بسم الله الرحمن الرحیم

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای

دوره هجدهم ـ شماره سه ـ شماره پیاپی ۵۵

پاییز ۱۴۰۰

درجه علمی فصلنامه علمی کارافن طی نامه شماره ۳/۱۸/۶۰۸۳۷ تاریخ ۱۳۹۲/۰۴/۳۰ **از طرف کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ابلاغ گردیده است.**

فصلنامه علمی کارافن در پایگاه استنادی علوم کشورهای اسلامی (ISC) نمایه می‌شود.

صحت آرا و اندیشه‌های مندرج در هر مقاله، به عهدهٔ نویسنده (ها) است.

آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴، سازمان مرکزی دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای

کدپستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

تلفن: ۰۲۱-۴۲۳۵۰۴۱۸

پست‌الکترونیک: karafan@tvu.ac.ir

وب‌سایت نشریه: http: //karafan.tvu.ac.ir

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای
دوره هجدهم ـ شماره سه ـ شماره پیاپی ۵۵
پاییز ۱۴۰۰

اساتید محترمی که در داوری و ارزیابی مقالات این شماره همکاری داشته‌اند:

علیرضا آکوشیده، محمد امیدپناه، امیرخالدیان، امیرفتحی، محمد امیری، ولی انجیل الی، ولی اله پناهی زاده، مصطفی جعفری کرمانی پور، میثم جعفری نوکندی، یعقوب دادگراصل، غلامرضا داودی، محمدمهدی داوودی، علیرضا رئیسی، معراج رجائی، فرزاد رحمنی، نسترن ریاحی نوری، زهرا زمان زاده دربان، حامد سپهرزاده، ناصر سینا، محمدعلی شاکراردکانی، والا صالح، علی اکبر صدری، زویا صنعتی مسبوقی، محمدرضا عاروان، فرزانه عسکری، مرتضی فتحی، هادی قاسمی زوارق، حسین قاضی‌زاده احسائی، علی کفلو، فرخنده کیایی، محمدرضا مجتبائی، سید محمود محسنی مطلق، محمدرضا مدبرنیا، مجتبی معصوم نژاد، سارا میناگر، محمود یوسفیان.

راهنمای نگارش و نحوه ارسال مقاله‌های علمی به فصلنامه علمی کارافن

۱. هدف نشریه کارافن انتشار نتایج پژوهش‌ها، مقاله‌ها، تجربه‌های علمی و کاربردی استادان و پژوهشگران دانشگاه و خارج از دانشگاه در محورهای مصوب کارافن است که به دو زبان فارسی و انگلیسی چاپ می‌شود.

۲. زمان فرایند داوری مقالات حداکثر سه ماه است.

۳. مقاله‌ها از طریق پایگاه اینترنتی نشریه (لینک آن در سایت دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای موجود است) به نشانی karafan.tvu.ac.ir قابل ارسال است و تمامی فرایند داوری و پیگیری از طریق سایت امکان‌پذیر خواهد بود.

۴. نویسندهٔ مسئول مکاتبات ابتدا باید در سامانهٔ کارافن (بخش حساب کاربری) به‌عنوان «نویسنده» ثبت‌نام و پس از تکمیل فرم مربوط به اطلاعات فردی، برای بارگذاری مقاله به قسمت «ارسال مقاله» مراجعه کند. گفتنی است نویسنده باید پیش از بارگذاری فایل‌های مربوط، مقاله را بر اساس راهنمای تدوین مقالات کارافن تنظیم کرده باشد.

۵. آثار ارسالی نباید پیش‌تر در هیچ نشریه‌ای به چاپ رسیده یا هم‌زمان به مجلهٔ دیگری ارسال شده باشند.

۶. هر مقاله توسط دو داور متخصص در موضوع مقاله ارزیابی می‌شود و پس از کسب دو نظر موافق و تأیید هیئت‌تحریریه، در نوبت چاپ قرار خواهد گرفت.

۷. مقاله‌ها باید در نرم‌افزار Microsoft word 2010-2013 یا بالاتر در قطع وزیری تهیه شوند و تعداد کل صفحات بیشتر از بیست صفحه نباشد. تمامی معادله‌ها، عبارت‌های ریاضی و فرمول‌ها با نرم‌افزار Mathtype نگارش و در فایل مقاله ضمیمه شوند.

۸. فایل هر مقاله باید در نسخه‌های الکترونیکی Word و Pdf همراه فرم تعهدنامهٔ نویسنده‌ها که در فایل جداگانه‌ای در قسمت راهنمای نویسنده‌ها قرار گرفته است، در وبگاه مجله بارگذاری شود.

۹. برای داوری منصفانه و علمی مقاله، ضروری است نویسندهٔ مسئول مکاتبات یک نسخه از مقاله (ترجیحاً نسخهٔ word) را بدون بیان مشخصات فردی در سامانه بارگذاری کند. همچنین در نسخهٔ Pdf مقاله، مشخصات فردی نویسنده (ها) (اعم از مرتبه علمی، میزان تحصیلات، شماره تماس، نام سازمان/محل خدمت، ایمیل و...) نگاشته شود.

۱۰. عنوان جداول در بالا، و عنوان تصاویر در پایین آن‌ها نوشته شود که باید شامل منابع و مآخذ مورد

استفاده بوده و به ترتیب شماره‌گذاری شوند.

۱۱. در مقاله‌های به زبان فارسی، تمام اعداد در متن و جدول‌ها (بجز فهرست منابع انگلیسی) به صورت فارسی تایپ شوند.

۱۲. هر مقاله باید به ترتیب دارای بخش‌های زیر باشد تا در فهرست مقاله‌های‌قابل داوری ثبت شود:

عنوان: غیرتکراری، فاقد ابهام و نارسایی و دارای همخوانی با محتوای مقاله باشد.

چکیده: باید دربرگیرندهٔ طرح موضوع، مسئله، هدف، روش تحقیق، یافته‌ها و نتیجه باشد. چکیدهٔ فارسی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ کلمه و چکیدهٔ انگلیسی نیز برگردان کامل چکیدهٔ فارسی باشد.

واژه‌های کلیدی: شامل ۷-۵ کلمه که به صورت تک‌واژه، بیانگر محتوای مقاله بوده و امکان جست‌وجوی مخاطبان را فراهم آورد (به دو زبان فارسی و انگلیسی).

چهارچوب مقاله: تمامی عنوان‌های به‌کاررفته از مقدمه تا نتیجه‌گیری باید به صورت سلسله‌مراتبی شماره‌گذاری شود که بدین شرح است:

مقدمه: شامل مبانی نظری، تجربی و بیان مسئله

اهداف و پرسش‌های پژوهش

روش‌شناسی

یافته‌ها

نتیجه‌گیری: باید منطقی، مفید، روشن‌کنندهٔ بحث و بیانگرِ یافته‌های تحقیق باشد.

تشکر و قدردانی

پی‌نوشت‌ها: شامل اصطلاحات، معادل‌های خارجی و توضیحات ضروری هستند که باید در متن مقاله به ترتیب شماره‌گذاری شده و در همان صفحه آورده شوند.

فهرست منابع: شایسته است از منابع جدید و معتبر به گونه‌ای در تنظیم مقاله‌ها استفاده شود که حداقل نیمی از آن‌ها در پنج سال اخیر منتشر شده باشند. ضروری است منابع مورد استفاده به ترتیبِ شمارهٔ آن در متن مقاله، پشت سر هم قرار گیرند. همچنین در منابعِ با سالِ متفاوت انتشار، نگارنده (گان) به ترتیب صعودی سال انتشار آورده شوند. نکته آن که تمامی منابع باید به زبان انگلیسی و در انتهای مقاله تنظیم شوند. چنانچه از منابع فارسی در متن مقاله استفاده گردد، نویسندگان باید آن‌ها را به انگلیسی ترجمه و در انتها عبارت (in Persian) را درج نمایند.

ترتیب نگارش فهرست منابع با استفاده از الگوی APA

کتاب‌ها: نویسنده یا نویسندگان. نام خانوادگی به همراه اولین حرف نام. سال انتشار کتاب (در پرانتز).

عنوان کتاب (با حروف کج). نوبت چاپ (در پرانتز)، اگر غیر از اول باشد. ناشر. DOI برای کلیه آثاری که دارای یک DOI هستند، صرف نظر از اینکه از نسخه آنلاین استفاده کرده اید یا از نسخه چاپی استفاده کرده اید. سطر اول هر نقل قول تنظیم می شود. هر خط بعدی ۵-۷ فاصله دارد.

مثال:

[1] Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw Hill.

مقاله‌ها: نویسنده یا نویسندگان. نام خانوادگی به همراه اولین حرف نام. سال انتشار مقاله (در پرانتز). عنوان مقاله. عنوان مجله (با حروف کج). دوره مجله (با حروف کج). شماره مجله در پرانتز (بدون حروف کج). دامنه صفحه مقاله. DOI یا URL. سطر اول هر نقل قول تنظیم می شود. هر خط بعدی ۵-۷ فاصله دارد.

مثال:

[2] Nasiri, S., Rahimi Asiabaraki, H., & Razaghi, E. (2021). The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine. *Karafan Quarterly Research Journal, 17*(4), 117-132.

مقاله‌های کنفرانس: نویسنده یا نویسندگان مقاله. نام خانوادگی به همراه اولین حرف نام. سال و تاریخ برگزاری کنفرانس (در پرانتز). عنوان مقاله (با حروف کج). عنوان کنفرانس. محل برگزاری. DOI یا URL. سطر اول هر نقل قول تنظیم می شود. هر خط بعدی ۵-۷ فاصله دارد.

مثال:

[3] Maddox, S., Hurling, J., Stewart, E., & Edwards, A. (2016, March 30-April 2). *If mama ain't happy, nobody's happy: The effect of parental depression on mood dysregulation in children*. Southeastern Psychological Association 62nd Annual Meeting, New Orleans, LA, United States.

پایان‌نامه: نویسنده. نام خانوادگی به همراه اولین حرف نام. سال (در پرانتز). عنوان (با حروف کج). سطح پایان نامه یا رساله [در براکت]. دانشگاه، همچنین در [براکت] مستقیماً بعد از سطح پایان نامه، به عنوان مثال [رساله دکتری، دانشگاه ویکتوریا]. نام پایگاه داده یا بایگانی. آدرس اینترنتی. سطر اول هر نقل قول تنظیم می شود. هر خط بعدی ۵-۷ فاصله دارد.

مثال:

[4] Mosek, E. (2017). *Team flow: The missing piece in performance* [Doctoral dissertation, Victoria University]. Victoria University Research Repository. http://vuir.vu.edu.au/35038/

۱۳. ارجاع داخل متن

- رشته های فنی و مهندسی، هنر و معماری و کشاورزی:

ارجاع منابع در متن مقاله به شیوهٔ عددگذاری باشد و شماره منبع انتهایی، در داخل متن به شکل کروشه مانند نمونه قرار بگیرد. مثال: [۴]

- رشته های کارآفرینی و مدیریت (علوم انسانی) و علوم پایه:

نام خانوادگی مؤلّف یا نام معروف، تاریخ نشر اثر: صفحه یا صفحات. نیازی به نوشتن «ص» برای شمارهٔ صفحات نیست. همچنین اعداد از راست به چپ نوشته شوند؛ مثل (۱۲۲- ۱۳۶)

متن ارجاعی (نقل‌قول مستقیم) باید داخل گیومه و نشانی آن به‌ترتیب گفته‌شده، داخل پرانتز قرار گیرد؛ مثل (سیف، ۱۳۶۸: ۴۲۶).

اگر در متن به چند اثر از یک نویسنده ارجاع داده شود، هر کدام از آن آثار بر مبنای تفاوت تاریخ نشر تفکیک می‌شود و در منابع پایانی، با نام اثر مشخص خواهد شد.

در صورتی که به دو اثر چاپ‌شده از یک مؤلّف در یک سال ارجاع داده شود، لازم است ابتدا در منابع پایانی، با نوشتن «الف» و «ب» در کنار سال چاپ، آن‌ها را از هم متمایز کنید و سپس در منابع داخلی، بعد از نام خانوادگی مؤلّف، سال چاپ به همراه «الف» یا «ب» نوشته شود؛ برای مثال (حسینی، ۱۳۸۹ الف: ۲۶) توجه: عکس‌ها، تصاویر، نمودارها و جداول با کیفیت مناسب و با اشاره به منبع مورد استفاده (نام خانوادگی نویسنده، سال انتشار، شماره صفحه) تهیه شود.

۱۴. عکس‌ها، تصاویر و نمودارها حداقل با وضوح ۳۰۰ نقطه در اینچ (300 dpi) با قالب مناسب Tiff و اندازهٔ A5 تهیه و علاوه‌بر متن، در فایل جداگانه‌ای ضمیمهٔ مقاله شوند.

۱۵. مسئولیت هر مقاله از نظر علمی، ترتیب اسامی نویسنده‌ها و پیگیری، به عهدهٔ نویسندهٔ مسئول آن خواهد بود. نویسندهٔ مسئول باید تعهدنامهٔ ارسال مقاله را از سایت دانلود و پس از تکمیل، در هنگام ثبت‌نام ارسال کند.

۱۶. تعداد و ردیف نویسنده‌های مقاله به همان صورتی که در تعهدنامه ارائه شده است، مورد قبول است. تقاضای حذف یا تغییر در ترتیب اسامی نویسنده‌ها تنها پیش از داوری نهایی و با درخواست کتبی تمامی نویسنده‌ها و اعلام علت درخواست،قابل بررسی است.

۱۷. گواهی پذیرش مقاله پس از اتمام مراحل داوری و ویراستاری و تصویب نهایی هیئت تحریریه، توسط مدیر مسئول فصلنامه صادر و به اطلاع نویسندهٔ مسئول خواهد رسید.

۱۸. کارافن، مقاله‌های تأییدشده را طبق شیوه‌نامهٔ خود ویرایش می‌کند.

۱۹. مطالب مطرح‌شده در مقاله‌ها، الزاماً بیانگر دیدگاه کارافن نیست.

۲۰. صحت آرا و اندیشه‌های مندرج در هر مقاله، به عهدهٔ نویسنده (ها) است.

۲۱. چاپ مقاله‌های منتشرشده در کارافن در سایر مجله‌ها و کتاب‌ها، با بیان مأخذ بلامانع است.

فهرست عناوین

سخن سردبیر

ظهور اقتصاد دانش، همراه با جهانی‌شدن، و بحران‌های مالی و زیست‌محیطی، جمله چالش‌های مهمی هستند که در سال‌های اخیر ضرورت بازطراحی و گسترش مأموریت‌های دانشگاه‌ها به‌طور قابل توجهی گوشزد کرده‌اند. ازاین‌رو، در سایه چنین تغییرات فزاینده و سریعی، در سال‌های اخیر فشار فزاینده‌ای بر دانشگاه‌ها وارد شده است تا تمرکز اصلی خود از آموزش و انجام پژوهش به‌سوی انجام اثربخش مأموریت سوم خود (Third Mission) با عنوان «کمک به جامعه» مطعوف نمایند. مأموریت سوم دانشگاه‌ها یک پدیده چند رشته‌ای، پیچیده و در حال تحول است که با مأموریت اجتماعی و اقتصادی دانشگاه‌ها در معنای وسیع مرتبط است. با این حال مطالعات موجود در خصوص ارزیابی عملکرد نظام‌های آموزش عالی عمدتاً بر وظایف، کارکرد و مأموریت‌های سنتی مراکز دانشگاهی تمرکز می‌کنند و یا دیدگاه محدودی از مأموریت سوم دانشگاه‌ها ارائه می‌دهند. به همین دلیل نه مرور سیستماتیکی از مبانی نظری و ادبیات موضوعی در ارتباط با این رسالت دانشگاهی صورت گرفته است و نه مطالعات میدانی و تجربی قابل توجهی برای بررسی همه جانبه عملکردهای ناهمگن، محدودیت‌ها، برخوردها و ادغام این مأموریت در ابعاد آموزشی و پژوهشی انجام نشده است. لذا بررسی سیستماتیک وضعیت دانش و ایجاد یک چارچوب جدید برای تبیین ابعاد مأموریت سوم دانشگاه‌ها، سیاست‌ها و عملکرد مؤسسات دانشگاهی یک ضرورت پژوهشی است که انتظار می‌رود اساتید، دانش‌پژوهان و دانشجویان تحصیلات تکمیلی در حوزه آموزش عالی بر آن تأمل نمایند. واقع مأموریت سوم به کارکرد اضافی دانشگاه‌ها در زمینه جامعه دانش اشاره دارد. بر این اساس دانشگاه تنها مسئول احراز صلاحیت سرمایه انسانی (آموزش – مأموریت اول) و تولید دانش جدید (پژوهش – مأموریت دوم) نیست. بلکه دانشگاه‌ها باید از طریق پیوند دادن فعالیت دانشگاه با بافت اجتماعی–اقتصادی خود، با نیازهای اجتماعی و تقاضاهای بازار درگیر شوند. امروزه دانشگاه‌ها در بیشتر کشورهای توسعه یافته استراتژی‌های خود را حول این سه مأموریت متمرکز می‌کنند. آنچه جای تأمل دارد که بیشتر دانشگاه‌ها در جوامع در حال توسعه ارتباط پویایی نداشته و سهم مشارکت آن‌ها در فرایند توسعه اجتماعی و اقتصادی آن جوامع بسیار کم اهمیت و کم مقدار است. انتظار می‌رود برایند تلاش مجدانه پژوهشگران این حوزه به تدوین یک چارچوب مفهومی برای تقویت مأموریت سوم دانشگاه و تقویت ارتباط ریشه‌دارتر این نهادها با جامعه پیرامون خود ختم شود.

نعمت الله عزیزی

سردبیر فصلنامه علمی کارافن

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 13-33
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.277262.1427
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.1.4

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Assessment of the Impact of Distributed Generation and Distribution Network Faults on Generation Reliability Indices

Farzane Askari[1]*

[1] Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.06.2021
Revised: 07.31.2021
Accepted: 08.30.2021

Keyword:
Distributed generation
Distribution network
Reliability
Hierarchical level I (HLI)
Equivalent forced outage rate

***Corresponding Author:**
Farzane Askari
Email: Faskari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In addition to effects on the distribution network such as reducing loss, improving voltage profile, and increasing reliability, installing DGs can also indirectly affect the power system generation reliability. But unlike the transmission network, which is considered to be completely reliable when studying HLI level reliability studies, the distribution network, which contains most of the distributed power generation capacity, has high incidence, lower levels of automation, and radial structure that can lead to capacity closure. These units are crafted. Therefore, in this article, a method is proposed to combine the uncertainties of distribution network and forced outage rate of DG into "Equivalent Forced Outage Rate" or EFOR. Using this parameter, DGs can be moved from the distribution network to the sub-transmission bus to participate in forming the capacity outage probability table and calculating HLI reliability indices. The proposed method has a Single Contingency approach to distribution network events and therefore has a higher speed compared to methods such as Monte Carlo simulation.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۳-۱۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.277262.1427
DOR:20.1001.1.23829796.1400.18.3.1.4
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

محاسبه تأثیر واحدهای تولید پراکنده و اتفاقات شبکه توزیع بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح تولید

فرزانه عسکری[1*]

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

کلید واژگان:
تولید پراکنده
شبکه توزیع
قابلیت اطمینان
سطح سلسله‌مراتبی[1] اول
نرخ خروج اجباری معادل

نویسنده مسئول: فرزانه عسکری
پست الکترونیکی:
Faskari@tvu.ac.ir

چکیده

افزایش نصب منابع تولید پراکنده در شبکه قدرت علاوه بر تأثیراتی مانند کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان و ... که بر شبکه توزیع بر جای می‌گذارد، می‌تواند قابلیت اطمینان سطح تولید را نیز به‌طور غیرمستقیم تحت تأثیر قرار دهد. اما برخلاف شبکه انتقال که در هنگام مطالعات قابلیت اطمینان سطح HLI کاملاً قابل اطمینان فرض می‌گردد، شبکه توزیع که دربردارنده بخش اعظم ظرفیت تولید پراکنده شبکه قدرت است، دارای اتفاقات زیاد، سطوح پایین‌تر اتوماسیون و ساختاری شعاعی است که می‌تواند منجر به حبس ظرفیت تولید این واحدها گردد؛ از این رو در این مقاله روشی ارائه شده است تا با استفاده از آن نرخ خروج اجباری واحدهای تولید پراکنده و اتفاقات شبکه توزیع با یکدیگر تلفیق و در قالب «نرخ خروج اجباری معادل» ظاهر گردد تا از آن بتوان برای معادل‌سازی این واحدها در شینه فوق‌توزیع و مشارکت دادن آن‌ها در تشکیل جدول COPT برای استفاده شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI استفاده کرد. روش ارائه شده، رویکردی Single Contingency به اتفاقات شبکه توزیع دارد و به همین دلیل در قیاس با روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت کارلو، از سرعت بالاتری برخوردار است.

[1] Hierarchical Level

مقدمه

افزایش نصب منابع تولید پراکنده [1] (DG) و ذخیره‌سازها در شبکه قدرت طی دو دهه اخیر، مهندسان این حوزه را با معضلات جدیدی روبه‌رو کرده است. از جمله این معضلات می‌توان به بروز تغییرات در تلفات شبکه، پروفیل ولتاژ، هماهنگی حفاظتی رله‌ها و ... اشاره کرد [۱; ۲].یکی از مهم‌ترین اثرات تولید پراکنده در شبکه قدرت، تأثیر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه است. اثرات این تکنولوژی، بر قابلیت اطمینان شبکه در سطح توزیع در مقالات مختلفی بررسی شده است [۳-۶]. در [۴] تأثیرات نصب منابع تولید پراکنده بر شاخص‌های قابلیت اطمینان توزیع مانند SAIFI، SAIDI، CAIDI و ENS با ارائه یک مدل و اعمال آن بر یک شبکه توزیع واقعی از شهر تهران بررسی شده است. مرجع [۷] از یک مدل تحلیلی مشابه برای شبیه‌سازی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده بر مراحل واکنش بهره‌بردار شبکه توزیع به وقوع خطا، شامل پاسخ حفاظتی، بازیابی نواحی بالادستی، بازیابی نواحی پایین دستی و پروسه تعمیر استفاده کرده است. در [۶] تأثیر حضور چند واحد سلول خورشیدی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان یک شبکه توزیع بررسی شده است. همچنین در این تحقیق، میزان حساسیت مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان توزیع به تغییر ظرفیت و محل نصب واحدهای تولیدی سنجیده شده است. همچنین در [۵] تحقیق جامعی پیرامون مقالات و کتب منتشر شده در خصوص ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها در حضور منابع تولید پراکنده به عمل آمده است.

نویسندگان در [۸] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌صورت هم‌زمان اقدام به جایابی و تعیین ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در یک شبکه توزیع ۱۳۲ شینه و با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات کرده‌اند. همچنین در تحقیقی دیگر، با تعریف شاخص‌های مجزایی برای تلفات، پروفیل ولتاژ و قابلیت اطمینان شبکه، الگوریتمی برای جایابی بهینه چند هدفه منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع ارائه شده است.

اما تأثیر این واحدهای تولیدی مقیاس کوچک تنها محدود به شبکه توزیع نمی‌باشد و با افزایش تعداد آن‌ها اثرات وجود چنین منابعی بر قابلیت اطمینان سطح تولید نیز محسوس می‌گردد. در مطالعات سطح HLI، شبکه قدرت به‌صورت یک سیستم متشکل از واحدهای تولیدی مختلف متصل به یک شینه واحد مدل می‌شود که مجموع مصرف مشترکین شبکه نیز به‌صورت یک بار یکتا به همان شینه وصل است. برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح تولید، «جدول احتمال خروج ظرفیت» [2]، COPT، تشکیل می‌گردد [۹]. اما به دلیل نصب منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع و احتمال بالاتر بروز اتفاقات در این شبکه در مقایسه با شبکه انتقال برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI نمی‌توان شبکه توزیع را نیز مانند شبکه انتقال تنها توسط یک شینه یا یک خط کاملاً قابل اطمینان مدل‌سازی کرد؛ زیرا ممکن است علی‌رغم امکان تولید توان توسط DG، به دلیل وقوع حوادث در شبکه توزیع امکان انتقال توان تولیدی به بار مهیا نباشد و ظرفیت تولیدی واحد در شبکه توزیع حبس گردد. همچنین ساختار شعاعی شبکه توزیع و نبود مسیرهای جایگزین برای انتقال توان و نیز سطوح پایین اتوماسیون شبکه توزیع و زمان‌بر بودن عملیات بازیابی دستی نواحی فاقد خطا، موضوع حبس ظرفیت تولیدی DGها در شبکه توزیع را در قیاس با واحدهای متمرکز که در شبکه انتقال نصب شده‌اند، تشدید می‌کند؛ لذا در صورت افزایش ضریب نفوذ واحدهای تولید پراکنده در یک شبکه قدرت، باید بتوان به روشی تأثیرات اتفاقات شبکه توزیع را نیز بر شاخص‌های قابلیت اطمینان تولید مدل‌سازی کرد. یک روش رایج برای این منظور مدلسازی واحدهای تولید پراکنده به‌صورت بار منفی است [۱۰]. اما این نحوه مدلسازی به دلیل ناتوانی در اعمال عدم‌قطعیت تحمیلی از سوی شبکه توزیع بر انتقال توان DG به بار، از اعتبار زیادی برخوردار نیست. همچنین به‌کارگیری این روش، به کاهش صوری میزان بار از دست رفته در صورت

[1] Distributed Generation
[2] Capacity Outage Probability Table

عدم‌عملکرد DG به‌صورت جزیره‌ای می‌انجامد و شاخص‌های قابلیت اطمینان را به‌صورت خوش‌بینانه و بهتر از مقادیر حقیقی ارزیابی می‌کند.

این در حالی است که در سایر تحقیقات، علاوه بر نرخ خروج اجباری واحد تولیدی، میزان تولید احتمالی واحدهای تجدیدپذیر نیز مدلسازی شده است. مهم‌ترین روش مدل‌سازی ماهیت تصادفی میزان تولید واحدها، استفاده از روش خوشه‌بندی Fuzzy C-mean یا به اختصار FCM است. در [۱۱] این روش برای ایجاد یک مدل قابلیت اطمینان از یک مزرعه بادی دارای ژنراتورهای DFIG استفاده شده است. بدین منظور روش FCM برای تعیین چند حالت کاهش‌یافته[1] حد فاصل تولید کامل تا توقف کامل واحد به‌کار رفته است. در [۱۲] همین روش برای تعیین سطوح مختلف کاهش‌یافته تولید یک نیروگاه جزر و مدی استفاده شده است. در برخی مطالعات علاوه بر ماهیت تصادفی میزان تولید واحد که ناشی از اختلاف ارتفاع امواج است، تأثیرات این فاکتور بر نرخ خروج اجباری اجزای واحد نیز بررسی شده است [۱۳]. همین رهیافت در [۱۴] برای استخراج یک مدل قابلیت اطمینان برای نیروگاه‌های OTEC[2] به‌منظور برنامه‌ریزی رزرو چرخان شبکه قدرت به‌کار گرفته شده است. در [۱۵] با بهره‌گیری از نرم‌افزار Data synthesizer و با استفاده از داده‌های رژیم بادی ثبت شده در یک منطقه و به‌کارگیری مدل مارکوف، میزان ساعت به ساعت خروجی یک واحد بادی به‌صورت سری زمانی تولید شده و در نهایت با استفاده از FCM یک مدل قابلیت اطمینان چند سطحی برای خروجی توربین ایجاد گردیده است.

همچنین در برخی مقالات، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو[3]، MCS و نیز سایر روش‌های عددی از جمله تکنیک کاهش واریانس برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حضور منابع تولید پراکنده مورد استفاده و مقایسه قرار گرفته است [۱۶]. مزیت روش‌های عددی، امکان مدل‌سازی هرگونه عدم‌قطعیت و پیچیدگی ذاتی شبکه قدرت است. با این وجود به دلیل شبیه‌سازی کل سیستم با روش MCS، این مزیت منجر به افزایش شدید حجم محاسبات خواهد شد. در [۱۷] با بهره‌گیری از روش LHS[4]، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با یک روش تحلیلی، جایگزین شده است. اما با وجود افزایش سرعت محاسبات، این مقاله نشان داده است که روش مذکور برای ارزیابی پراکندگی شاخص‌های قابلیت اطمینان، کارایی لازم را ندارد. همچنین مرجع [۲] از یک روش نوین دیگر به نام HOL theorem proving برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده کرده و نتایج کار را با نتایج حاصل از روش‌های عددی MCS و متغیرهای شبه‌احتمالاتی در شبکه‌ای یکسان قیاس کرده است.

هدف این مقاله، ارائه روشی است که با استفاده از آن بتوان تأثیر نصب یک واحد تولید پراکنده در شبکه توزیع را بر شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح HLI بررسی کرد، ضمن آن که این روش قادر باشد خروج ناخواسته DG از مدار و همچنین اتفاقات شبکه توزیع را نیز به‌خوبی مدل کند و در عین حال به حجم محاسباتی بالایی مانند روش MCS نیز نیاز نداشته باشد.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح تولید و توزیع معرفی شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی و نحوه مدل‌سازی آن به‌منظور بررسی تأثیر نصب DG بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI آورده شده است و در بخش چهارم به مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی پرداخته شده است.

---

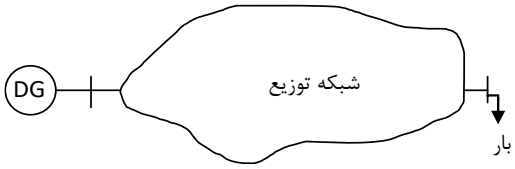
[1] Derate
[2] Ocean Thermal Energy Conversion
[3] Mont Carlo Simulation
[4] Latin Hypercube Sampling

روش پیشنهادی

در این مقاله برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت تحمیلی از سوی شبکه توزیع بر انتقال توان واحدهای تولید پراکنده به بار، DG به‌صورت یک واحد تولیدی با نرخ خروج اجباری اصلاح شده متأثر از شبکه توزیع مدل شده است. به عبارت دیگر، به‌منظور مدل‌سازی تأثیر شبکه توزیع بر میزان موردانتظار تولید DG، هریک از واحدهای تولید پراکنده با ظرفیت معین و نرخ «خروج اجباری معادل»[1] خود و بر شینه فوق‌توزیع مدل می‌گردند؛ لذا این واحدها نیز مانند واحدهای متمرکز نیروگاهی در محاسبات جدول احتمال خروج ظرفیت واحدهای نیروگاهی (COPT) مشارکت داده خواهند شد.

مدلسازی DG به‌صورت یک واحد تولیدی مستقل از شبکه توزیع

در این مدل‌سازی فرض می‌شود که روی یکی از شینه‌ها در یکی از فیدرهای شبکه توزیع یک دستگاه DG نصب شده و از دید شینه مذکور به شبکه قدرت نگریسته می‌شود. همان‌گونه که می‌توان احتمال برق‌دار بودن هریک از نقاط بار در شبکه توزیع را به‌دست آورد، می‌توان احتمال اتصال یک بار به شینه دارای DG را نیز محاسبه کرد. توان خروجی یک مولد تولید پراکنده عموماً توسط بارهای محلی موجود در همان شبکه استفاده می‌شود. اما در صورتی که در شرایط خاصی از بهره‌برداری میزان تولید یک واحد DG بیش از میزان بار موجود در شبکه باشد. تولید مازاد DG می‌تواند با فرض رفع برخی مشکلات حفاظتی، از طریق شینه فوق‌توزیع به شبکه بالادستی تحویل داده شود؛ بنابراین می‌توان گفت که اگرچه پست فوق‌توزیع برای بارهای موجود در فیدر به‌صورت یک منبع عمل می‌کند اما برای یک DG در نقش یک بار نیز ظاهر خواهد شد. از این رو همانند شکل ۱ چه تولید یک واحد DG توسط بارهای محلی مورد استفاده قرار گیرد و چه از طریق پست فوق‌توزیع به شبکه بالادستی گسیل شود، می‌توان گفت که DG در حال تغذیه یک بار است:



شکل ۱. مدل نمادین انتقال توان از DG به بار در شبکه توزیع

در مدل دیده شده در شکل ، بار نماینده بارهای محلی تغذیه شده توسط DG یا توان تزریق شده از DG به پست فوق‌توزیع یا ترکیبی از هر دو این‌ها است؛ لذا به‌منظور انتقال توان تولیدی توسط DG به بار، باید هم واحد تولیدی قادر به تحویل توان از پایانه خروجی باشد و هم شبکه موجود توانایی انتقال توان تولیدی DG به بار مذکور را داشته باشد. بنابراین می‌توان چنین گفت که به‌منظور انتقال توان خروجی DG به بار، واحد تولیدی و شبکه توزیع با یکدیگر سری شده‌اند؛ بنابراین اگر احتمال موفقیت در امر تغذیه بار توسط واحد تولیدی با R_S نمایش داده شود خواهیم داشت:

$$R_S = R_{grid}\, R_{DG} \qquad (۱)$$

[1] Equivalent Forced Outage Rate

که در رابطه فوق R_{DG} احتمال عملکرد موفق DG در تولید توان و R_{grid} احتمال عملکرد موفق شبکه توزیع در انتقال این توان به بار است. در ادامه می‌توان نوشت:

$$Q_s = 1 - R_s \quad (۲)$$

$$Q_{DG} = 1 - R_{DG} \quad (۳)$$

خواهیم داشت:

$$(1 - Q_s) = (1 - Q_{DG}) \times R_{grid} \quad (۴)$$

$$Q_S = 1 - [(1 - Q_{DG}) \times R_{grid}] \quad (۵)$$

در روابط فوق Q_s احتمال شکست در تغذیه بار توسط واحدهای تولیدی و Q_{DG} احتمال عملکرد ناموفق DG در تولید توان یا همان FOR واحد است. با این اوصاف می‌توان فرض کرد که از دیدگاه قابلیت اطمینان، شبکه توزیع نیز یکی از اجزای واحد تولید پراکنده است؛ لذا با این فرض، یک نرخ خروج اجباری معادل برای مجموعه واحد تولید پراکنده و شبکه توزیع قابل تعریف خواهد بود که آن را می‌توان «نرخ خروج اجباری معادل واحد» نامید. این پارامتر را با $EFOR$ نمایش داده و مقدار آن با جایگزینی EFOR به جای Q_s و FOR به جای Q_{DG} در رابطه (۵)، قابل محاسبه خواهد بود:

$$EFOR = 1 - [(1 - FOR) \times R_{grid}] \quad (۶)$$

بدین ترتیب برای سهولت در محاسبات قابلیت اطمینان می‌توان نیروگاه تولید پراکنده را از شبکه توزیع، جدا و آن را با همان ظرفیت اصلی و نرخ خروج اجباری معادل، روی شینه فوق‌توزیع مدل کرد.

محاسبه نرخ خروج اجباری معادل برای یک واحد تولید پراکنده

از آنجا که نرخ خروج اجباری هر واحد عددی معلوم در بازه $[0,1]$ می‌باشد؛ بنابراین برای محاسبه نرخ خروج اجباری معادل تنها کافی است که R_{Grid} در رابطه (۶) به‌دست آید. همانطورکه گفته شد R_{grid} بیانگر احتمال عملکرد موفق شبکه در انتقال توان تولیدی به بار است. به بیان ساده‌تر می‌توان R_{grid} را به‌عنوان احتمال اتصال DG به بار در نظر گرفت.

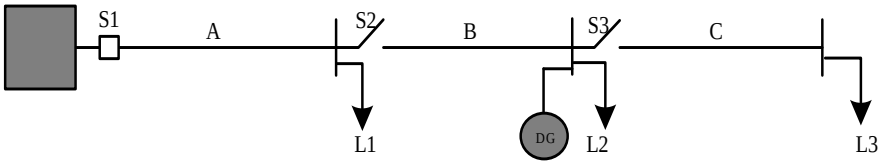
برای محاسبه R_{grid} ، با فرض آنکه T کل بازه زمانی مورد مطالعه (برابر با یک سال و معادل ۸۷۶۰ ساعت) و T_{off} مدت زمان قطع ارتباط DG و بار، ناشی از بروز اتفاقات در شبکه توزیع باشد خواهیم داشت:

$$R_{grid} = \frac{T - T_{off}}{T} \quad (۷)$$

محاسبه T_{off} متأثر از عوامل متعددی است که از آن جمله می‌توان به امکان عملکرد DG در حالت جزیره‌ای (وجود ادوات کنترل فرکانس)، میزان حوادث و فالت‌های شبکه و وجود نقاط مانور، سطح اتوماسیون شبکه توزیع و وجود انشعابات دارای سکسیونر و فیوز و ... اشاره کرد. در ادامه به محاسبه T_{off} در چند شرایط مختلف پرداخته شده است.

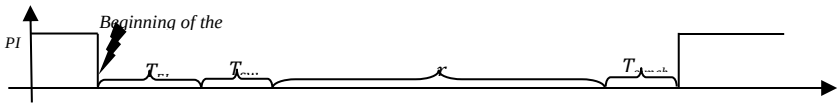
محاسبه T_{off} برای یک واحد DG فاقد ادوات کنترل فرکانس

در ابتدا فرض می‌کنیم که DG قابلیت کنترل فرکانس ندارد و نتواند به‌صورت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد؛ بنابراین در صورتی که خطا در ناحیه‌ای رخ دهد که ارتباط ناحیه دارای DG را از شبکه بالادستی قطع کند، تولید DG برابر با صفر خواهد شد. در این حالت با وقوع یک خطا در شبکه، کلید قدرت ابتدای فیدر، عمل می‌کند و برق کل فیدر را قطع می‌کند. از آنجا که واحد تولید پراکنده نیز خطا را می‌بیند ادوات حفاظتی آن عمل می‌کند و DG را از شبکه جدا خواهد کرد. حال بسته به ناحیه‌ای که خطا در آن رخ داده است و ناحیه‌ای که DG در آن نصب شده است، مدت‌زمانی طول خواهد کشید ناحیه دارای DG مجدداً برق‌دار شود. در صورتی که خطا در مسیر اتصال DG به شبکه فوق‌توزیع باشد (برای مثال مطابق شکل ۲ در قطعه A یا B رخ دهد) تولید واحد به اندازه مجموعه مدت‌زمان لازم برای مکان‌یابی خطا، کلیدزنی، تعمیر خط و مدت‌زمان لازم برای سنکرون‌سازی مجدد DG با شبکه سراسری از دست خواهد رفت. اما اگر خطا در ناحیه‌ای رخ دهد که در مسیر اتصال DG به شبکه فوق‌توزیع نباشد، (مثلاً خطا در قطعه C رخ دهد) تنها کافی‌ست تا زمان مکان‌یابی و جداسازی ناحیه دارای خطا منتظر ماند. پس از این مدت، ناحیه دارای DG برق‌دار می‌گردد و پس از طی مدت‌زمان لازم برای سنکرون‌سازی مجدد DG با شبکه، تولید از سر گرفته می‌شود.



شکل ۲. یک شبکه شعاعی ساده مجهز به DG

با فرض T_{FL} به‌عنوان مدت‌زمان موردنیاز برای مکان‌یابی خطا، T_{sw} مدت‌زمان لازم برای کلیدزنی، r مدت‌زمان تعمیر قطعه دارای خطا و T_{synch} زمان لازم برای سنکرون‌سازی مجدد DG با شبکه سراسری، مدت‌زمان قطع ارتباط DG و بار یا T_{off} را می‌توان در این دو حالت با توجه به زمان‌بندی نشان داده شده در شکل ۳ و شکل ۴ به‌دست آورد.



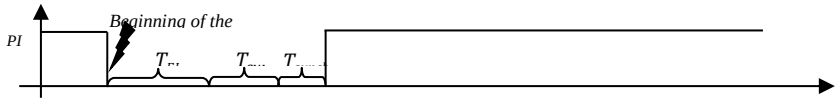
شکل ۳. زمانبندی عملکرد DG هنگام وقوع خطایی که تا رفع کامل آن، واحد قادر به تولید نباشد.

در حالت اول مطابق شکل ۳ با فرض وقوع خطا در ناحیه نصب DG یا یک ناحیه در مسیر بین DG و پست فوق‌توزیع، T_{off} از رابطه (۸) به‌دست می‌آید.

$$T_{off} = T_{FL} + T_{sw} + r + T_{synch} \quad (۸)$$

در صورتی که خطا در ناحیه پایین‌دست رخ دهد، T_{off} مطابق شکل ۴ از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$T_{off} = T_{FL} + T_{sw} + T_{synch} \quad (۹)$$



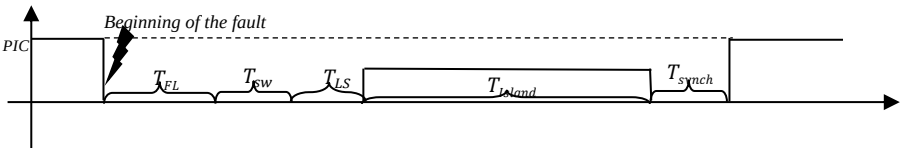
شکل ۴. زمانبندی عملکرد DG هنگام وقوع خطایی که تا جداسازی آن، واحد قادر به تولید نباشد.

محاسبه T_{off} برای یک واحد DG دارای ادوات کنترل فرکانس

در صورتی که واحد تولیدی دارای ادوات کنترل فرکانس باشد می‌تواند مستقل از شبکه بالادستی بار را به‌صورت جزیره‌ای تغذیه کنند. در واقع در حالت خاصی ممکن است بتواند به‌صورت مستقل از شبکه بار را تغذیه کنند که به آن حالت پشتیبان می‌گویند. این حالت در صورتی رخ می‌دهد که خطا در ناحیه‌ای رخ دهد که ارتباط DG از پست فوق‌توزیع جدا شود. با وقوع خطا، پس از جایابی ناحیه دارای خطا، مدت‌زمانی طول خواهد کشید تا DG در حالت پشتیبان شروع به کار کند. در صورتی که مدت‌زمان لازم برای بازردایی و تشکیل جزیره با T_{LS} نمایش داده شود، مدت‌زمان عملکرد به حالت پشتیبان با در نظر داشتن مدت‌زمان رفع خطا از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$T_{Island} = r - T_{LS} \quad (۱۰)$$

ممکن است DG در حالت پشتیبان، مطابق شکل ۵ نتواند از تمامی ظرفیت نصب شده خود استفاده کند؛ لذا می‌توان یک مدت‌زمان مؤثر عملکرد جزیره‌ای، T'_{Island}، را مانند رابطه (۱۱) تعریف کرد که بتواند این کاهش ظرفیت را مدل کند.



شکل ۵. زمان‌بندی عملکرد DG هنگامی که واحد به‌صورت پشتیبان عمل می‌کند.

$$T'_{Island} = T_{Island} \cdot \frac{P_{Island}}{P_{installed}} \quad (۱۱)$$

که در آن P_{Island} میزان توان خروجی واحد DG در هنگام عملکرد پشتیبان و $P_{Installed}$ میزان ظرفیت نصب شده آن می‌باشد. با این وصف می‌توان فرض کرد که طی کل مدت‌زمان عملکرد جزیره‌ای، DG به مدت T'_{Island} به‌صورت تمام ظرفیت کار کرده و به مدت $T'_{Island} - T_{Island}$ در حالت خاموشی به سر برده است؛ لذا در این حالت، مدت‌زمان کل خاموشی ناشی از بروز یک اتفاق در شبکه که منجر به عملکرد DG در حالت جزیره‌ای بشود از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$T_{off} = T_{FL} + T_{sw} + T_{LS} + (T_{Island} - T'_{Island}) + T_{synch} \quad (۱۲)$$

باید توجه داشت که در صورتی که خطا در ناحیه‌ای از شبکه رخ دهد که به هر دلیل مانند ممکن نبودن بارزدایی، شرایط جزیره‌سازی قابل‌تحقق نباشد، زمان T_{off} از همان روابط بخش قبل یعنی روابط (۸) و (۹) به‌دست می‌آید.

محاسبه T_{off} در صورت وقوع خطا در یکایک نواحی

عدد به‌دست‌آمده برای T_{off} از روابط قبلی تنها به‌ازای وقوع یک خطا در یک قطعه از شبکه است؛ از این رو با فرض λ_i به‌عنوان نرخ بروز خرابی در قطعه iام شبکه و T_{off}^i به‌عنوان مدت‌زمان اتصال نیافتن DG به بار در اثر بروز خطا در این ناحیه، مدت‌زمان عدم اتصال DG به بار ناشی از وقوع خطا در یکایک نواحی از رابطه (۱۳) به‌دست خواهد آمد:

$$T_{off} = \sum \lambda_i \, . \, T_{off}^i \tag{۱۳}$$

با به‌دست آوردن T_{off} می‌توان با استفاده از روابط (۶) و (۷) مقادیر R_{Grid} و $EFOR$ را برای واحد تولید پراکنده به‌سادگی محاسبه کرد.

محاسبه شاخص قابلیت اطمینان

جدول احتمال خروج ظرفیت COPT، جدولی است که در آن تمامی حالت‌های ممکن خروج ظرفیت تولید شبکه در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از آن مدل ظرفیت واحدهای تولیدی شبکه استخراج می‌گردد. این جدول به‌صورت صعودی و براساس میزان ظرفیت خارج شده از مدار مرتب می‌گردد. در یک شبکه که دارای n واحد تولیدی باشد، تعداد حالات خروج ظرفیت با فرض دو سطحی بودن میزان تولید هر واحد برابر با 2^n حالت خواهد بود.

در این جدول، احتمال وقوع هر حالت خروج ظرفیت و نیز احتمال تجمعی آن محاسبه و ثبت می‌گردد. با خروج برخی از واحدهای تولیدی و از دست دادن بخشی از ظرفیت تولید ممکن است بهره‌برداری شبکه ناگزیر از بارزدایی در شبکه به‌منظور ایجاد تعادل بین تولید و مصرف باشد. بنابراین در هر حالت، میزان انرژی قطع شده (در صورت وقوع خاموشی) هنگام قطع بار را می‌توان از برهم‌نهی منحنی مصرف و میزان افت تولید به‌دست آورد. برای این منظور از منحنی بار کل ساعت به ساعت کل شبکه طی بازه زمانی موردمطالعه که به‌صورت نزولی مرتب شده است استفاده می‌شود. جدول ۱ احتمال خروج ظرفیت یک شبکه که دارای n واحد تولیدی است را نشان می‌دهد [۹].

جدول ۱. جدول احتمال خروج ظرفیت

حالت	ظرفیت خارج شده	احتمال تکی	احتمال تجمعی	مدت زمان قطع بار	انرژی ازدست‌رفته	$LOLE_i$	$LOEE_i$
1	$C_1 = 0$	$p_1(C_1)$	$P_1(C_1) = 1$	t_1	E_1	$p_1(C_1) \times t_1$	$p_1(C_1) \times E_1$
2	C_2	$p_2(C_2)$	$P_2(C_2) = 1 - p_1(C_1)$	t_2	E_2	$p_2(C_2) \times t_2$	$p_2(C_2) \times E_2$
3	C_3	$p_3(C_3)$	$P_3(C_3) = 1 - p_1(C_1) - p_2(C_2)$	t_3	E_3	$p_3(C_3) \times t_3$	$p_3(C_3) \times E_3$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
$m = 2^n$	C_m	$p_m(C_m)$	$P_m(C_m) = 1 - \sum_{i=1}^{m-1} P_i(c_i)$	t_m	E_m	$P_m(C_m) \times t_m$	$P_m(C_m) \times E_m$

در جدول ۱ مقادیر $p_k(C_k)$ و $P_k(C_k)$ به‌ترتیب نشان‌دهنده احتمال‌های تکی و تجمعی خروج ظرفیت C_K می‌باشد و t_k و E_k نیز به‌ترتیب نمایش‌دهنده مدت‌زمان قطع بار و میزان انرژی ازدست‌رفته در این حالت است. همچنین در هر حالت یک مقدار برای $LOLE_i$ و $LOEE_i$ به‌دست می‌آید. شاخص $LOLE$ و $LOEE$ مطابق روابط زیر از جمع تمامی $LOLE_i$ها و $LOEE_i$ها به‌دست می‌آید.

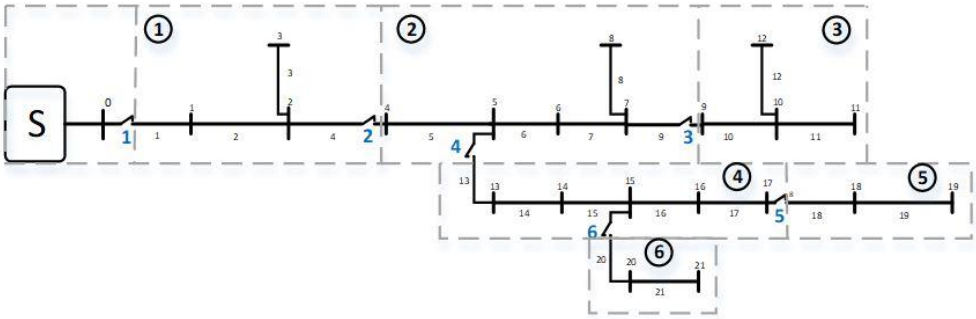
$$LOLE = \sum_{i=1}^{2^n-1} LOLE_i \tag{۱۴}$$

$$LOEE = \sum_{i=1}^{2^n-1} LOEE_i \tag{۱۵}$$

از آنجا که هر واحد تولید پراکنده در مقایسه با نیروگاه‌های تولید متمرکز به‌صورت یک واحد تولیدی با ظرفیت کم و یک نرخ خروج اجباری معادل، روی فوق‌توزیع مدل می‌گردد؛ با افزایش تعداد واحدهای تولید پراکنده و انتقال آن‌ها به شینه فوق‌توزیع، تعداد حالت‌های جدول خروج ظرفیت به‌شدت افزایش خواهد یافت و لاجرم حجم محاسبات نیز به همان نسبت زیاد خواهد شد. برای فائق آمدن بر مشکلات محاسباتی ناشی از تعداد زیاد حالت‌های جدول COPT می‌توان از روش‌های مختلفی مانند روش تقریب توزیع گسسته توسط توزیع پیوسته، روش کانولوشن و ... استفاده کرد.

نتایج عددی

برای آنکه بتوان اثر نصب DG در نواحی مختلف حفاظتی شبکه را با استفاده از مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار داد، یک شبکه توزیع مجهز به تعداد مناسبی از تجهیزات حفاظتی از نوع سکسیونر انتخاب گردیده است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل ۶ قابل مشاهده است شایان ذکر است که مشخصات مربوط به میزان مصرف مشترکین در هر شینه و هر ناحیه از شبکه به‌ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ و اطلاعات مربوط به طول هر قطعه از خطوط در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۶. شبکه آزمون توزیع دارای ۲۱ شینه و ۶ ناحیه حفاظتی

همچنین مقادیر زمانی جایابی و جداسازی خطا، تعمیر خطوط و غیره در جدول ۵ بیان شده و در نهایت مقادیر دیگر پارامترهای شبکه مانند نرخ خرابی و مقاومت و راکتانس هر کیلومتر از خط، در جدول ۶ ثبت گردیده است.

جدول ۲. مشخصات بارهای روی هریک از شینه‌های شبکه آزمون

شماره شینه	۱	۳	۴	۶	۸	۹	۱۱	۱۲	۲۰	۲۱	۱۳	۱۴	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	مجموع
میزان بار (KW)	90	100.1	18.7	26.4	45.1	16.5	90	374	50.6	87.6	90	269.5	90	85	200	51.04	50.6	87.6	1684.54

جدول ۳. مشخصات بارهای روی هریک از ناحیه‌های حفاظتی شبکه تست

ناحیه حفاظتی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	مجموع
میزان بار (KW)	190.1	90.2	480.5	534.5	251	138.2	1685

جدول ۴. طول هر قطعه از فیدر

شماره قطعه فیدر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
طول (m)	420	250	294	411	190	167	189	33	138	481	290	200	190	340	110	124	200	240	104	124	30

جدول ۵. مدت‌زمان لازم برای فعالیت‌های مختلف به‌منظور رسیدگی به حوادث شبکه

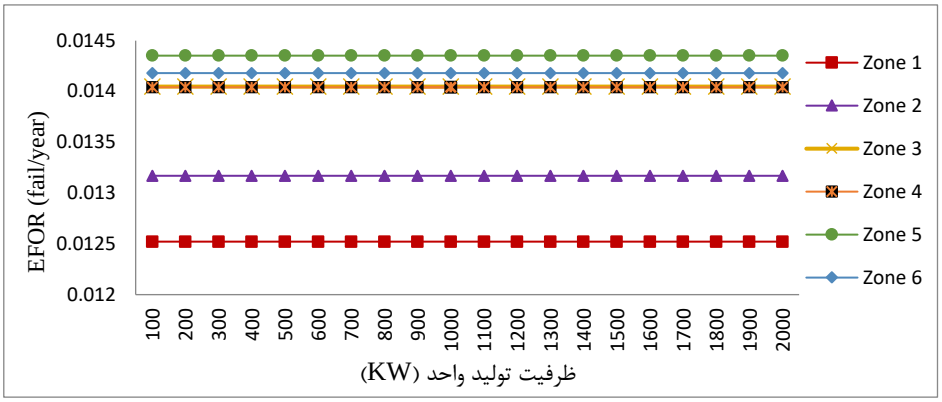
فعالیت	جایابی خطا	جداسازی ناحیه دارای خطا	تعمیر خط	بازردایی و تشکیل جزیره	سنکرون سازی DG با شبکه	مانور
زمان (دقیقه)	۴۰	۲۰	۲۴۰	۳۰	۱۵	۲۰

جدول ۶. اطلاعات قابلیت اطمینان و پخش بار در شبکه آزمون توزیع

نرخ خرابی λ	مقاومت واحد طول، R	راکتانس واحد طول، X
$2\ (\frac{fail/Year}{km})$	$0.5\ (\frac{\Omega}{km})$	$0.4\ \left(\frac{\Omega}{\mathrm{km}}\right)$

بررسی تأثیر تغییر ظرفیت تولید DG فاقد تجهیزات کنترل فرکانس بر EFOR آن

ابتدا فرض می‌شود که یک دستگاه DG فاقد تجهیزات کنترل فرکانس در ناحیه‌های حفاظتی مختلف شبکه نصب شده است. مقدار FOR برای این واحد برابر با 0.01 در نظر گرفته شده است. در هر ناحیه، میزان تولید DG در پله‌های یک‌صد کیلوواتی و از مقدار 100 kW تا 2 MW افزایش یافته است؛ بنابراین در هر ناحیه تعداد ۲۰ حالت مختلف ایجاد می‌گردد. شکل ۷ نمودار این تغییرات را هنگام نصب واحد در ناحیه‌های مختلف شبکه نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار تغییرات EFOR واحد تولید پراکنده در اثر افزایش ظرفیت آن در ناحیه‌های مختلف

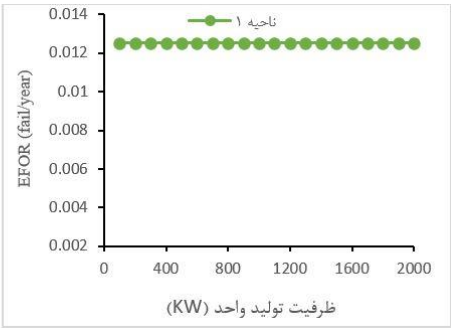
مطابق شکل ۷ با افزایش ظرفیت واحد، هیچ‌گونه تغییری در میزان EFOR واحد مشاهده نمی‌گردد. دلیل این امر این است که DG موردنظر فاقد توانایی کنترل فرکانس و در نتیجه عملکرد در حالت پشتیبان است؛ از این رو در اثر بروز هر گونه اتفاقی در شبکه که منجر به قطع ارتباط آن با شبکه بالادستی گردد، کل ظرفیت آن از دست خواهد رفت و می‌توان گفت بدترین حالت رخ خواهد داد.

بررسی تأثیر تغییر ظرفیت تولید DG مجهز به تجهیزات کنترل فرکانس بر EFOR آن

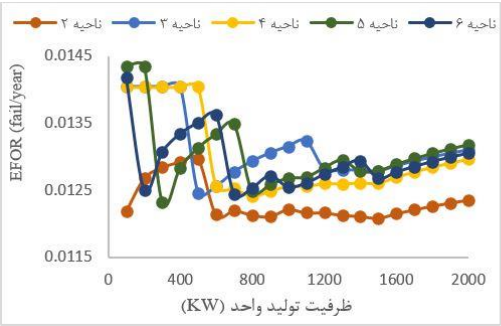
اگر DG قادر به عملکرد در حالت پشتیبان باشد، بخشی از ظرفیت خود را هنگام قطع ارتباط با شبکه بالادستی حفظ خواهد کرد. اما درصد استفاده از این ظرفیت به میزان بار ناحیه‌های شبکه وابسته است؛ بنابراین با تغییر ظرفیت واحد EFOR دست‌خوش تغییر می‌گردد. نمودار تغییرات EFOR واحد را برحسب افزایش اندازه آن در هریک و سایر ناحیه‌های حفاظتی شش‌گانه شبکه در شکل ۸ و شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است.

مشاهده می‌شود که در ناحیه حفاظتی شماره ۱ نیز مانند حالت قبل با تغییر میزان تولید واحد، EFOR آن ثابت می‌ماند. دلیل این امر این است که در ناحیه شماره ۱ امکان عملکرد DG به‌صورت یک جزیره ممکن نیست؛ زیرا یا خطا در خود این ناحیه رخ می‌دهد که موجب قطع کامل تولید واحد تا رفع کامل خطا خواهد شد یا اینکه خطا در سایر نواحی پایین دست رخ می‌دهد که پس از انجام عملیات جداسازی خطا، واحد مجدداً با شبکه اصلی سنکرون می‌شود و با تمام ظرفیت قادر به تولید خواهد بود؛ بنابراین از آنجا که DG در این ناحیه هیچ‌گاه در حالت پشتیبان قرار نمی‌گیرد؛ با تغییر ظرفیت آن تغییری در مقدار EFOR آن ایجاد نمی‌گردد.

اما اگر DG در سایر ناحیه‌ها نصب شده باشد، مشاهده می‌شود که با تغییر میزان تولید، مقدار EFOR آن تغییر می‌کند. نمودارهای موجود در شکل ۹ نشان می‌دهد که در هر ناحیه، تا پیش از رسیدن میزان تولید DG به میزان بار آن ناحیه، EFOR واحد مقداری ثابت و بیشتر از FOR واحد است اما با بیشتر شدن تولید واحد از مصرف ناحیه خود، EFOR به‌طور یک‌باره کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا در این وضعیت DG می‌تواند به‌صورت جزیره‌ای عمل کند و درصد بیشتری از ظرفیت خود را در اختیار بارهای شبکه قرار دهد. با افزایش میزان تولید واحد، مطابق رابطه (۱۱) میزان استفاده از ظرفیت نصب شده هنگام جزیره‌ای بودن کاهش می‌یابد و بنابراین EFOR افزایش خواهد یافت. این افزایش تا جایی خواهد بود که واحد بتواند علاوه بر ناحیه خود، یکی از ناحیه‌های مجاور را نیز پشتیبانی کند. پس از عبور از این مرز، EFOR مجدداً سقوط خواهد کرد.



شکل ۸. نمودار تغییرات EFOR برحسب اندازه واحد تولید پراکنده در ناحیه شماره ۱

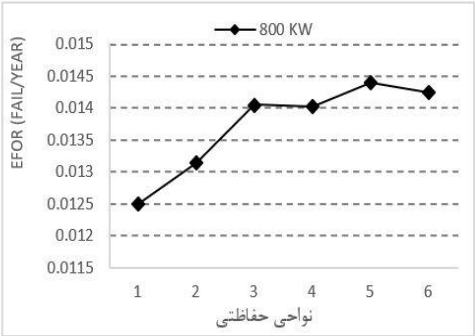


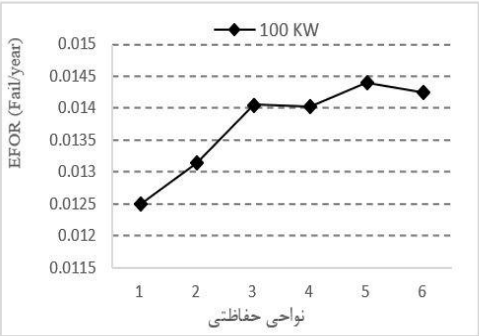
شکل ۹. نمودار تغییرات EFOR برحسب اندازه واحد تولید پراکنده در سایر ناحیه‌ها

بررسی تأثیر تغییر مکان نصب DG فاقد ادوات کنترل فرکانس بر EFOR

هنگامی که DG فاقد ادوات کنترل فرکانس باشد؛ بنابراین نتواند در حالت پشتیبان قرار گیرد؛ EFOR آن باید به‌طور کلی با دورتر شدن از پست فوق‌توزیع، افزایش یابد. این امر بدین دلیل است که با افزایش فاصله از پست فوق‌توزیع، تعداد ناحیه‌هایی که حدفاصل ناحیه نصب DG و پست فوق‌توزیع قرار دارند، افزایش می‌یابد و در تعداد حالات بیشتری ممکن است ارتباط DG با پست و شبکه بالادستی قطع گردد؛ بنابراین انتظار می‌رود که EFOR افزایش بیشتری از خود نشان بدهد. این امر را می‌توان در شکل ۱۰ که نشان‌دهنده تغییرات EFOR در اثر جابه‌جایی DG در ناحیه‌های مختلف برای دو ظرفیت مختلف DG است، مشاهده کرد.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد نمودار EFOR در هر دو ظرفیت کاملاً یکسان می‌باشد که دلیل آن پیش از این بیان گردید. اما سؤالی که در اینجا ممکن است مطرح گردد این است که چرا نمودار شکل ۱۰ یک نمودار صعودی نیست؟ می‌توان گفت این امر از آنجا ناشی می‌شود که شماره‌گذاری ناحیه‌ها برمبنای دوری یا نزدیکی آن‌ها به پست فوق‌توزیع صورت نگرفته است. برای مثال EFOR در ناحیه شماره ۵ بیشتر از مقدار آن در ناحیه شماره ۶ است؛ زیرا هر دو ناحیه دارای موقعیت نسبتاً مشابهی نسبت به پست فوق‌توزیع هستند اما به دلیل طولانی‌تر بودن ناحیه شماره ۵، اثر خروج اجزای شبکه بر میزان نرخ خروج اجباری واحد نصب شده در آن بیشتر خواهد بود.

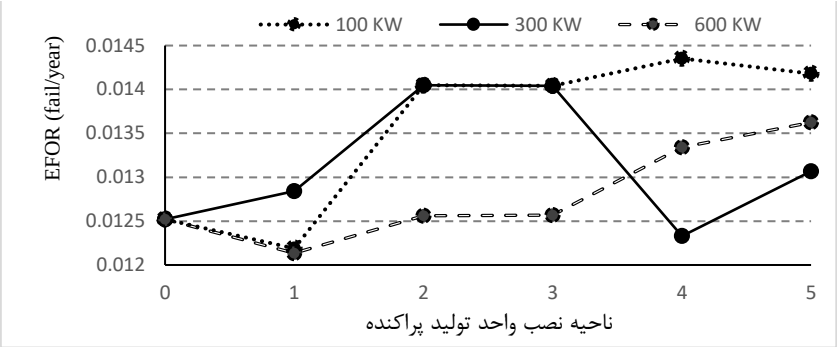




شکل ۱۰. نمودار تغییرات EFOR در اثر جابه‌جایی DG با ظرفیت‌های 100kW و 800 kW، در ناحیه‌های مختلف

بررسی تأثیر تغییر مکان نصب DG دارای ادوات کنترل فرکانس بر EFOR

در صورتی که DG دارای ادوات کنترل فرکانس باشد، علاوه بر پارامتر دوری و نزدیکی از پست فوق‌توزیع، توانایی عملکرد آن در حالت جزیره‌ای و میزان استفاده از ظرفیت نصب شده آن در این حالت نیز بر EFOR تأثیرگذار می‌باشد. شکل ۱۱ این نمودار را به‌ازای ظرفیت‌های مختلف به نمایش گذاشته‌اند. برای مثال در شکل ۱۱ هنگامی که ظرفیت DG برابر با 100 kW است EFOR واحد در تمامی ناحیه‌ها به‌جز ناحیه شماره ۲ بر منحنی‌های شکل ۱۰ منطبق می‌باشد و اما در ناحیه شماره ۲ با توجه به میزان بار آن که تقریباً برابر با 90.2 kW است، DG می‌تواند به‌صورت جزیره‌ای عمل کند؛ بنابراین EFOR در این ناحیه تنزل کرده است.

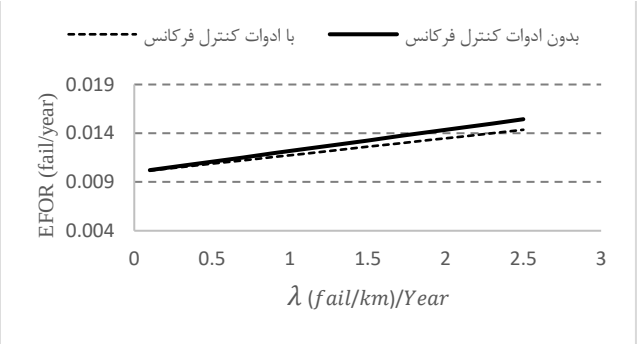


شکل ۱۱. نمودار تغییرات EFOR در اثر تغییر مکان DG در شبکه به‌ازای تولیدهای 100 kW و 300kW و 600kW

هنگامی که میزان تولید واحدها بیشتر گردد، روند مشابهی در سایر ناحیه‌ها نیز مشاهده می‌شود. در مجموع با نگاهی به نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که اگر DG نتواند به‌صورت جزیره‌ای عمل کند، تغییرات EFOR تنها ناشی از محل نصب خواهد بود اما در صورتی که بتواند در وضعیت پشتیبان نیز به تولید خود ادامه دهد، میزان ظرفیت آن نیز بر این پارامتر تأثیرگذار خواهد بود.

بررسی تأثیر نرخ خرابی خطوط بر EFOR واحد تولید پراکنده

برای بررسی تأثیر تغییر نرخ خرابی خطوط بر میزان EFOR واحدهای موجود در شبکه توزیع، یک واحد با ظرفیت 700 kW نصب شده در ناحیه شماره ۵ در نظر گرفته شده است. مقدار λ در بازه‌ای از 0.1 تا 2.5 و در گام‌هایی به اندازه $0.2\frac{fail/km}{Year}$ افزایش داده می‌شود. در این حالت فرض می‌شود طول قطعه‌های فیدر همانند جدول ۴ می‌باشد و لذا مجموع طول کل فیدر برابر با $4.525\ km$ است. شکل ۱۲ نمودار تغییرات EFOR یک واحد DG فاقد ادوات و دارای ادوت کنترل فرکانس را بر حسب تغییرات نرخ خرابی تجهیزات نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲. تأثیر تغییرات نرخ خرابی خطوط بر EFOR واحد تولید پراکنده فاقد و دارای ادوات کنترل فرکانس

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش نرخ خرابی خطوط شبکه احتمال جدا شدن واحد تولیدی از بار بیشتر شود، مشاهده می‌گردد که میزان EFOR واحد تولیدی نیز افزایش خواهد یافت. همچنین اشکال فوق نشان می‌دهد که EFOR واحد تولیدی با نرخ خرابی نسبتی تقریباً خطی داشته و در شرایط یکسان، مقادیر EFOR برای یک واحد ناتوان از کنترل فرکانس بیشتر از مقادیر آن برای یک واحد دارای این ادوات است.

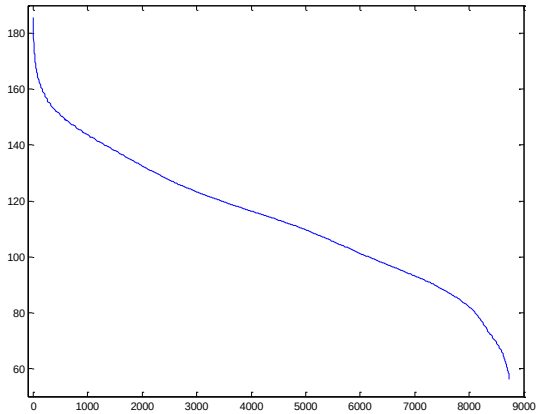
بررسی تأثیر افزایش ضریب نفوذ DG در شبکه بر شاخص‌های سطح HLI

انتظار می‌رود در اثر جایگزینی واحدهای متمرکز در شبکه با واحدهای تولید پراکنده و با فرض تغییر نکردن ظرفیت شبکه، شاخص‌های قابلیت اطمینان بهبود یابند. این ادعا در صورتی صحیح است که میزان نرخ خروج اجباری واحدهای جایگزین با همین پارامتر در واحد متمرکز جایگزین شده برابر باشد. دلیل بهبود شاخص‌ها را می‌توان این گونه ذکر کرد که با جایگزینی یک واحد بزرگ با چندین واحد کوچک، مدل ظرفیت دارای تعداد حالات بیشتری می‌شود و به یک توزیع پیوسته شبیه‌تر خواهد شد. بنابراین خروج هر واحد، موجب از دست رفتن میزان کمی از بار خواهد شد که این امر خود به بهبود شاخص‌های از دست رفتن بار می‌انجامد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود هرچه درصد واحدهای جایگزین شده با واحدهای DG نسبت به کل تولید شبکه بیشتر باشد، شاخص‌ها بهتر شوند.

برای بررسی صحت این مدعا، برای شبکه آزمون RBTS [۱۸] شاخص‌های قابلیت اطمینان در سطح HLI در حالت‌های مختلف جایگزینی DG به جای واحدهای متمرکز محاسبه گردید. این شبکه دارای ۱۱ واحد تولید به ظرفیت مجموع ۲۴۰ مگاوات و پیک بار سالانه ۱۸۵ مگاوات است. اطلاعات تفضیلی مربوط به ظرفیت و نرخ خروج اجباری واحدهای تولیدی این شبکه در جدول ۷ و منحنی تداومی بار این شبکه نیز در شکل ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۷. اطلاعات واحدهای تولیدی شبکه RBTS

ردیف	نوع واحد	ظرفیت واحدها	تعداد واحد	نرخ خروج اجباری
۱	برقابی	۵	۲	۰/۰۱۰
۲	حرارتی	۱۰	۱	۰/۰۲۰
۳	برقابی	۲۰	۴	۰/۰۱۵
۴	حرارتی	۲۰	۱	۰/۰۲۵
۵	برقابی	۴۰	۱	۰/۰۲۰
۶	حرارتی	۴۰	۲	۰/۰۳۰



شکل ۱۳. منحنی تداومی بار شبکه RBTS

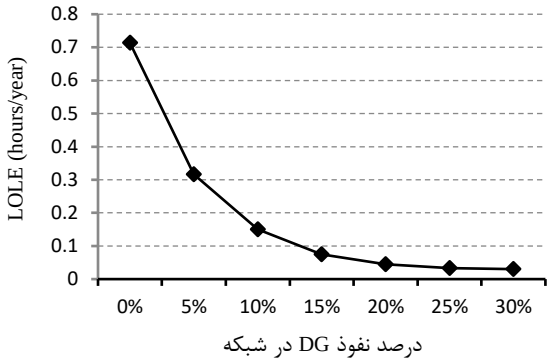
نصب واحدهای جایگزین شده بر پست فوق‌توزیع

در این مرحله برای بررسی تأثیر تغییر میزان مشارکت واحدهای تولید پراکنده در کل تولید شبکه، ضریب نفوذ DG در تولید شبکه از ۵ تا ۳۰ درصد مطابق جدول ۸ تغییر داده شده است. برای این کار از تعدادی واحد تولید پراکنده با ظرفیت یکسان و نرخ خروج اجباری برابر با واحدهای جایگزین شده استفاده گردیده است.

جدول ۸. میزان توان تولیدی توسط DG در درصدهای مختلف مشارکت در تولید

درصد نفوذ DG در تولید شبکه	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
میزان توان تولیدی توسط کل واحدهای DG (مگاوات)	۲۴۶۸	۴۲۲۰	۶۲۷۲	۸۲۴۰	۱۰۴۶۷	۱۲۶۷۲

ابتدا فرض می‌شود که این واحدها همه در پست‌های فوق‌توزیع نصب شده باشند. بنابراین خروج خطوط توزیع در شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI اثرگذار نخواهد بود. شکل ۱۴ تغییرات شاخص LOLE با تغییر ضریب نفوذ DG در شبکه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد زیاد واحدهای DG جایگزین شده، شاخص مذکور به‌شدت بهبود می‌یابند.



شکل ۱۴. تغییرات شاخص LOLE برحسب افزایش درصد نفوذ DGهای نصب شده در پست فوق‌توزیع

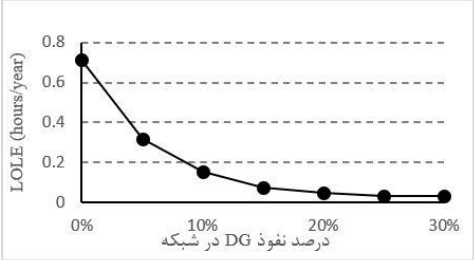
نصب واحدهای جایگزین شده در شبکه توزیع

با انتقال واحدهای تولید پراکنده به درون شبکه توزیع، باید اثر وقوع اتفاقات در شبکه توزیع را نیز مدل‌سازی کرد. برای این کار فرض شده است که واحدهای DG در فیدرهایی متصل به شبکه نصب شده باشند. این فیدرها با رعایت تنوع در طول فیدر، محل نصب DG، مقاومت خطوط، نرخ خرابی آن‌ها و در نهایت، میزان بارگذاری هر فیدر انتخاب شده‌اند. برای هریک از پارامترهای مذکور سه مقدار کم، متوسط و زیاد به شرح جدول ۹ در نظر گرفته شده است.

جدول ۹. جدول مقادیر سه‌گانه برای هریک از پارامترهای فیدرها

پارامتر	نرخ خرابی $(\frac{fail/km}{Year})$	طول (km)	مقاومت (Ω)	میزان بارگذاری (kw)	ناحیه نصب DG
کم	0.2	1.0	0.20	253.7	3
متوسط	1.5	2.5	0.50	761.3	4
زیاد	3.0	4.0	0.75	1268.8	5

بنابراین با توجه به جدول ۹، تعداد $3^5 = 243$ فیدر متفاوت ایجاد خواهد شد. در هریک از این فیدرها یک واحد DG نصب شده و EFOR آن واحد با توجه به پارامترهای فیدر و همچنین نرخ خروج اجباری خود آن و با استفاده از روش تشریح شده در بند ۳-۲ به‌دست آمده است. شاخص LOLE برای وضعیت فوق به‌دست آمده است. تغییرات این شاخص نیز با افزایش ضریب نفوذ DG در شکل ۱۵ دیده می‌شود. برای اینکه بتوان به‌طور خالص، تأثیر قطعی‌های خطوط توزیع را بر شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی کرد باید در هر حالت نسبت این شاخص‌ها را بر مقادیر متناظر خود هنگامی که DG در شینه فوق‌توزیع نصب شده است، به‌دست آورد. شکل ۱۶ این نسبت را برای شاخص LOLE به نمایش گذاشته است.



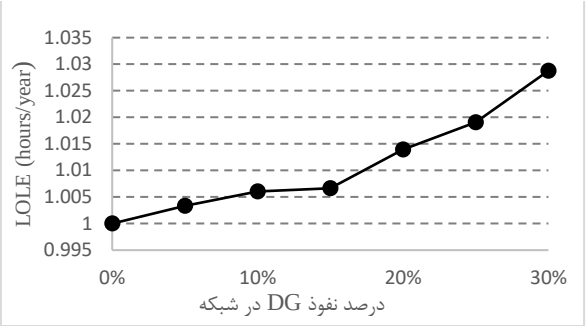
شکل ۱۵. تغییرات شاخص LOLE برحسب افزایش درصد نفوذ DGهای نصب شده در شبکه توزیع، با در نظر گرفتن احتمال وقوع خطا در شبکه

شکل ۱۶. نسبت شاخص LOLE در هنگام نصب DG در شبکه توزیع به مقدار آن در هنگام نصب DG در پست فوق‌توزیع بدون در نظر گرفتن تلفات شبکه

مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب نفوذ DG این نسبت ممکن است تا ۸ درصد افزایش یابد. می‌توان دلیل این امر را چنین برشمرد که با افزایش میزان تولید واحدهای موجود در شبکه توزیع، ظرفیت تولید بیشتری در اثر بروز اتفاقات در شبکه توزیع، محبوس خواهد ماند. از سوی دیگر، ملاحظه می‌گردد که در صورتی که میزان مشارکت واحدها در تولید برق شبکه زیر ۱۰ درصد باشد، تفاوت نصب DG در شینه فوق‌توزیع و درون شبکه قابل اغماض می‌باشد. این در حالی است که در این آزمایش سعی بر آن بوده است که تا حدامکان تنوع در پارامترهای فیدرها رعایت شده باشد. در صورتی که فیدرهای یک شبکه دارای پارامترهای قابلیت اطمینان نامناسبی باشند، ممکن است این نسبت بیش از مقادیر فوق نیز بشود.

از سوی دیگر، نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع، میزان تلفات شبکه را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. بنابراین برای اینکه بتوان تأثیر نصب DG در شبکه توزیع بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI را به‌طور کامل مدل کرد باید تأثیر تلفات را نیز مدل کرد. بدین ترتیب تأثیرات شبکه توزیع بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI به‌طور کامل دیده خواهد شد. شکل ۱۷ میزان تأثیر نصب DG در شبکه توزیع بر شاخص LOLE را نسبت به حالتی که واحدها در پست فوق‌توزیع نصب شده‌اند به نمایش گذاشته است.

بنابراین می‌توان با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته در این بند چنین نتیجه‌گیری کرد که نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع تأثیر دوگانه‌ای بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI دارد؛ زیرا از یک سو به دلیل بروز اتفاقات در شبکه توزیع موجب تضعیف آن‌ها می‌گردد و از سویی دیگر به دلیل تأثیر مثبتی که بر کاهش تلفات این بخش دارد، اندکی این شاخص‌ها را بهبود می‌دهد. اما در مجموع، جایگزینی واحدهای نیروگاهی متمرکز با انواع DG به دلیل اینکه موجب افزایش تعداد حالات خروج ظرفیت به میزان کم می‌شود، به بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان منجر خواهد شد.



شکل ۱۷. نسبت شاخص LOLE در هنگام نصب DG در شبکه توزیع به مقدار آن در هنگام نصب DG در پست فوق‌توزیع با در نظر گرفتن تلفات شبکه

نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی پارامتر «نرخ خروج اجباری معادل» برای واحدهای تولید پراکنده، خطاهای رخ داده در شبکه توزیع برحسب ظرفیت این واحدها مدل‌سازی شد و تأثیرات آن بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح تولید بررسی گردید. نتایج عددی حاصل از به‌کارگیری روش پیشنهادی نشان داد که قابلیت کنترل فرکانس هرچند تأثیر غیرخطی و پیش‌بینی‌ناپذیری بر میزان EFOR مشاهده شده را خواهد داشت اما به‌طور کلی در قیاس با واحدهای فاقد آن، نرخ خروج اجباری معادل بهتری را برای واحد به ارمغان می‌آورد. در ادامه با انجام آنالیز حساسیت، صحت عملکرد روش پیشنهادی با تغییر ظرفیت و محل نصب DG در فیدر و نیز تغییر نرخ خرابی خطوط، بررسی گردید. در انتها، با جایگزینی تعدادی از واحدهای شبکه آزمون RBTS با تعدادی واحد تولید پراکنده، میزان تغییر شاخص‌های قابلیت اطمینان سطح HLI شبکه بررسی گردید و مشاهده شد که به دلیل افزایش تعداد سطوح تولید شاخص‌های مربوطه بهبود خواهند یافت. همچنین مطابق پیش‌بینی مشاهده گردید که به دلیل اتفاقات شبکه توزیع، انتقال واحدهای تولید پراکنده جایگزین شده از شینه فوق‌توزیع به داخل شبکه توزیع بر شاخص‌های سطح HLI تأثیر منفی می‌گذارد. هرچند که به دلیل بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه توزیع، این تأثیر منفی، قدری تعدیل خواهد شد.

در این تحقیق واحدهای تولیدی به‌صورت دو سطحی (تولید کامل- عدم‌تولید) مدل شده‌اند، می‌توان در تحقیقات آتی، حالت‌های چندسطحی و کاهش‌یافته تولید را نیز بررسی کرد. همچنین در این مقاله فرض بر این بود که در هر فیدر تنها یک دستگاه DG نصب شده باشد که با افزایش تعداد DGها و امکان جزیره‌سازی شبکه توزیع در حالتی که حداقل یکی از آن‌ها دارای قابلیت کنترل فرکانس باشند مسئله به‌صورت گسترده‌تری قابل بررسی و تحقیق خواهد بود.

References

[1] Ahmad, S., Sardar, S., Asar, A. U., & Noor, B. (2017). Impact of distributed generation on the reliability of local distribution system. *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *8*(6), 375-382. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080649

[2] Ahmad, W., Hasan, O., Awwad, F., Bastaki, N., & Hasan, S. R. (2020). Formal reliability analysis of an integrated power generation system using theorem proving. *IEEE Systems Journal*, *14*(4), 4820-4831. https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2970107

[3] Das, B., Deka, D. B. C., & Bimal, C. (2013). Impact of distributed generation on reliability of distribution system. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *8*(1), 42-50. https://doi.org/10.9790/1676-0814250

[4] Falaghi, H., & Haghifam, M. (2005, Nov 21-24). *Distributed Generation Impacts on Electric Distribution Systems Reliability: Sensitivity Analysis.* EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool", Belgrade, Serbia https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1630240

[5] López-Prado, J. L., Vélez, J. I., & Garcia-Llinás, G. A. (2020). Reliability Evaluation in Distribution Networks with Microgrids: Review and Classification of the Literature. *Energies*, *13*(23), 6189. https://doi.org/doi.org/10.3390/en13236189

[6] Ngaopitakkul, A., & Jettanasen, C. (2017, Dec 4-7). *The effects of multi-distributed generator on distribution system reliability.* 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), Auckland, New Zealand. https://ieeexplore.ieee.org /abstract/document/8378388

[7] Neto, A. C., Da Silva, M., & Rodrigues, A. B. (2006, June 11-15). *Impact of distributed generation on reliability evaluation of radial distribution systems under network constraints.* 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, Sweden https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document /4202384

[8] Tyastuti, R. F., Hariyanto, N., Nurdin, M., Khairudin, & Yasunori, M. (2015, Aug 10-11). *A genetic algorithm approach determining simultaneously location and capacity distributed generation in radial distribution system.* 2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Denpasar, Indonesia https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7352567

[9] R. Billinton and R. N. Allan. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4899-1860-4

[10] Brown, R. E., & Freeman, L. A. (2001, July 15-19). *Analyzing the reliability impact of distributed generation.* 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262), Vancouver, BC, Canada https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/ 970197

[11] Ghaedi, A., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M. (2013) . Toward a comprehensive model of large-scale DFIG-based wind farms in adequacy assessment of power systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *5*(1), 55-63. https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2272947

[12] Mirzadeh, M., Simab, M., & Ghaedi, A. (2020) .Reliability evaluation of power systems containing tidal power plant. *Journal of Energy Management and Technology*, *4*(2), 28-38. https://doi.org/10.22109/jemt.2020.176501.1167

[13] Ghaedi, A., & Mirzadeh, M. (2020). The impact of tidal height variation on the reliability of barrage-type tidal power plants. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *30*(9), e12477. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12477

[14] Ghaedi, A., Nasiriani, K., & Nafar, M. (2020). Spinning Reserve Scheduling in a Power System Containing OTEC Power Plants. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, *3*(3), 379-391. https://doi.org/10.22111/ieco.2020.32602.1231

[15] Lalitha, M. P., Reddy, P. H., & Naidu, P. J. (2014, Dec 22-24). *Generation reliability evaluation of wind energy penetrated power system.* 2014 International Conference on High Performance Computing and Applications (ICHPCA), Bhubaneswar, India https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7045371

[16] Kadhem, A. A., Wahab, N .I. A., Aris, I., Jasni, J., & Abdalla, A. N. (2017). Computational techniques for assessing the reliability and sustainability of electrical power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, 1175-1186. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.276

[17] Shu, Z., & Jirutitijaroen, P. (2011). Latin hypercube sampling techniques for power systems reliability analysis with renewable energy sources. *IEEE Transactions on Power Systems*, *26*(4), 2066-2073. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2113380

[18] Billinton, R., Kumar, S., Chowdhury, N., Chu, K., Debnath, K., Goel, L., Khan, E., Kos, P., Nourbakhsh, G., & Oteng-Adjei, J. (1989). A reliability test system for educational purposes-basic data. *IEEE Transactions on Power Systems*, *4*(3), 1238-1244 .https://doi.org/10.1109/59.32623

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 35-53
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi: 10.48301/KSSA.2021.130684
20.1001.1.23829796.1400.18.3.2.5

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Designing a Convex Optimization Model for Self-healing of a Smart Distribution Network

Mohammad Hassan Yeganehkia[1], Mohammad Mahdi Rezaei[2]*, Mehrdad Abedi[3]

[1]PhD Student, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
[2]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
[3]Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.20.2021
Revised: 04.17.2021
Accepted: 05.17.2021

Keyword:
Convex optimization
Self – healing
Load shedding
Distributed generation sources
Islanding

***Corresponding Author:**
Mohammad Mahdi Rezaei
Email: rezaei_mm@yahoo.com

ABSTRACT

Self-healing is used to automatically repair the distribution system in the event of a fault. One way to reduce without service customers is to operate the faulty area as an island. However, the island is formed optimally when the island is formed online after the fault. If the island is determined before the fault, the optimal margin of the island will not be formed and the number of customers without electricity might increase. In this article, island building is carried out online after the fault. One of the most important problems after a fault occurs is the quick solution of the problem. Since nonlinear models greatly increase the solving time, in the proposed method, the problem is transformed from a non-convex MINLP model to a convex model. As a result, the proposed model can be answered in a very short time. The second point in the problem of self-healing optimization is to achieve the optimal global solution. The optimization problem is carried out by the convex optimization method. Because in convex problems there is only one optimal, the proposed method ensures the achievement of the optimal global solution. A variety of dispatchable and non-dispatchable distributed generation sources were used. Load and production modeling was also undertaken in a probabilistic space because considering the uncertainty, it can be said that the proposed model can be resistant to such events. After determining the optimal microgrid, the optimal production of distributed generation resources and load shedding was carried out to balance the system power. The IEEE 33-bus system was used to demonstrate the efficiency of the proposed method.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۵۳-۳۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.130684
DOR:20.1001.1.23829796.1400.18.3.2.5
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی یک مدل بهینه‌سازی محدب برای خودترمیمی یک شبکه توزیع هوشمند

محمد حسن یگانه کیا[۱]، محمد مهدی رضایی[۲*]، مهرداد عابدی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۳- استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده برق، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلید واژگان:
بهینه‌سازی محدب
خودترمیمی
برداشت بار
منابع تولید پراکنده
جزیره‌سازی

نویسنده مسئول: محمد مهدی رضایی
پست الکترونیکی:
rezaei_mm@yahoo.com

چکیده

خودترمیمی برای ترمیم خودکار سیستم توزیع در هنگام خطا به‌کار می‌رود. یکی از روش‌های کاهش مشترکین بدون برق، بهره‌برداری منطقه خطادار به‌صورت جزیره‌ای است اما زمانی جزیره به‌صورت بهینه تشکیل می‌شود که این جزیره به‌صورت آنلاین بعد از خطا شکل گیرد. در صورتی که جزیره قبل از خطا تعیین شده باشد، مرز بهینه جزیره تشکیل نمی‌شود و ممکن است تعداد مشترکین بدون برق افزایش یابد. در این مقاله جزیره‌سازی به‌صورت آنلاین پس از خطا انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشکلات پس از وقوع یک رخداد خطا، حل سریع مسئله است. از آن‌جایی که مدل‌های غیرخطی، زمان حل را به‌شدت زیاد می‌کنند؛ در روش پیشنهادی، مسئله خودترمیمی از مدل MINLP نامحدب به یک مدل محدب تبدیل شده است. در نتیجه مدل پیشنهادی با زمان بسیار کمی می‌تواند به جواب برسد. نکته دوم در مسئله بهینه‌سازی خودترمیمی رسیدن به جواب بهینه سراسری است. چون در مسائل محدب تنها یک راه‌حل بهینه وجود دارد؛ بنابراین روش پیشنهادی رسیدن به جواب بهینه سراسری را تضمین می‌کند. همچنین مدل‌سازی بار و تولید در یک فضای احتمالاتی صورت می‌گیرد. پس از تعیین ریزشبکه بهینه، تولید بهینه منابع تولید پراکنده و برداشت بار برای متعادل کردن توان سیستم انجام می‌شود. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی از سیستم ۳۳ باس IEEE استفاده شده است.

مقدمه

یکی از موضوعات بسیار مهم در شبکه هوشمند خودترمیمی است. هدف از خودترمیمی در شبکه توزیع برق این است که در زمان خطا، سیستم آن را تشخیص دهد و سپس آن را به‌صورت بهینه رفع کند. شکل بهینه خودترمیمی زمانی اتفاق می‌افتد که حداقل مشترکین بدون بار را با برآوردن تمامی محدودیت‌های سیستم داشته باشیم. برای این منظور ابتدا باید خطا ایزوله شود و منطقه خطادار به شکل بهینه بازآرایی شود. در این حالت، سیستم تبدیل به یک یا چند ریزشبکه جزیره‌ای می‌شود و با استفاده از منابع تولید پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع، بارهای موجود در منطقه خطادار را تغذیه می‌کند. تعداد و مرز ریزشبکه‌ها می‌تواند از قبل تعیین شده باشد که در این صورت با وجود خطا به‌سرعت سیستم به آرایش تعیین شده تغییر می‌کند ولی چنانچه تعداد و مرز ریزشبکه به‌صورت آنلاین پس از خطا تعیین شود می‌توان برداشت یا قطع بار را در سیستم به کمترین میزان ممکن رساند. در [۱] یک الگوریتم دو لایه مبتنی بر فراابتکاری برای عملیات بهینه شبکه توزیع هوشمند در حالت خودترمیمی با در نظر گرفتن ریزشبکه در حضور میکروتوربین و ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع ارائه شده است. در لایه اول، یک روش جدید مبتنی بر نظریه گراف برای یافتن شکل مطلوب ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است، در حالی که در لایه دوم، مدیریت انرژی مطلوب ریزشبکه‌ها، با در نظر گرفتن حالت خودترمیم تعیین شده است. در [۲] یک روش دو مرحله‌ای به‌منظور حل طرح خودترمیم متمرکز برای سیستم‌های توزیع الکتریکی ارائه شده است. مرحله اول، مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را به‌منظور به‌دست آوردن متغیرهای تصمیم دودویی همانند وضعیت سوئیچ‌ها برای طرح خودترمیم حل می‌کند. در مرحله دوم، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی به‌منظور تنظیم نقطه عملیاتی حالت پایدار از توپولوژی پیدا می‌شود. در مرحله اول، یعنی تصحیح متغیرهای الکتریکی پیوسته و بهینه‌سازی حذف بار حل می‌گردد. در [۳] یک سیستم توزیع با ژنراتورهای پراکنده بهینه به دسته‌ای از ریزشبکه‌ها با خودکفایی بالا با اختصاص دادن منابع ذخیره انرژی پراکنده و منابع راکتیو پراکنده تقسیم شده است. در [۴] استراتژی خودترمیمی برای یک سیستم توزیع با هر دوی تولیدات پراکنده قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل ارائه شده است. در وضعیت خودترمیمی، بخش قطع شده سیستم توزیع به ریزشبکه‌های خودکفا شبکه تقسیم خواهد شد و به این شکل، منبع توان مطمئن برای ماکزیمم بارها به‌طور مداوم فراهم می‌شود. در [۵] یک معماری قابل توسعه برای بهره‌برداری عادی و خودترمیمی ریزشبکه‌های شبکه‌ای پیشنهاد شده است. ریزشبکه‌ها می‌توانند برق را با یکدیگر در زیرساخت‌های پیشنهادی مبادله کنند. هنگامی که کمبود تولید یا خطا در ریزشبکه اتفاق می‌افتد، مدل به حالت خودترمیم سوئیچ می‌شود و ظرفیت‌های تولید محلی ریزشبکه‌های دیگر می‌تواند برای پشتیبانی از بخش اضطراری سیستم استفاده شود. در [۶] یک استراتژی کنترل مبتنی بر طبقه‌بندی ایالت برای پشتیبانی تصمیم‌گیری خودترمیمی سیستم توزیع ارائه شده است. در [۷] بهینه‌سازی سیستم توزیع با مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های مجازی، خصوصیات واحدهای تولید پراکنده، واحدهای ذخیره‌سازی انرژی پراکنده و همچنین منابع راکتیو توزیع شده انجام شده است. در [۸] یک چارچوب بازیابی خدمات ترتیبی برای تولید راه‌حل‌های بازیابی برای سیستم‌های توزیع و ریزشبکه‌ها در رخداد قطع برق مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. راه‌حل بازیابی حاوی یک مرتبه‌ای از اقدامات کنترل است که به‌درستی سوئیچ‌ها، ژنراتورهای پراکنده و بارهای قابل سوئیچ را برای ایجاد ریزشبکه‌های مستقل چندگانه هماهنگ می‌کنند. در [۹] یک استراتژی بازیابی سیستم توزیع مبتنی بر گراف که شامل ریزشبکه‌هایی است که بار بازسازی شده را حداکثر می‌کند و تعداد عملیات سوئیچینگ را به حداقل می‌رساند. در [۱۰] یک روش جدید یادگیری ماشین توزیع شده مبتنی بر انتخاب ویژگی برای تشخیص تأثیرات دینامیکی وقایع مختلف سیستم قدرت پیشنهاد شده است. هدف، آسان کردن فرایند تصمیم‌گیری پس از خطا برای بازگرداندن یک ریزشبکه مستقل بدون دخالت یک پست مرکزی است. در [۱۱] روش‌های نظام‌مند و بهینه‌سازی برای خوشه‌بندی سیستم توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های مجازی با خودکفایی بهینه ارائه می‌شود. مزایای نصب هر دو منابع ذخیره‌سازی انرژی پراکنده و منابع راکتیو توزیع شده برای بهبود خودکفایی

ساختار ریزشبکه‌ها بررسی شده است. در [۱۲] چارچوبی جامع برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه روز پیش برای سیستم‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن شرایط عادی و اضطراری ارائه شده است. در حالت اضطراری، استراتژی پیشنهادی خودترمیمی، منطقه جدا شده از سیستم توزیع را با تقسیم‌بندی‌های جزیره‌ای برای ارائه منبع تغذیه قابل‌اعتماد برای بارهای بحرانی پیوسته مجزا خواهد کرد. در [۱۳] یک طرح سیستم مدیریت خروج سلسله‌مراتبی برای ارتقای قابلیت تاب‌آوری یک سیستم توزیع هوشمند مبتنی بر ریزشبکه‌های چندگانه‌ها در برابر حوادث غیرمنتظره فاجعه‌بار پیشنهاد می‌کند. ریزشبکه‌ها منابع موجود خود را در مرحله اول با استفاده از یک الگوریتم مدل پیش‌بی‌ن جدید مبتنی بر کنترل، برنامه‌ریزی میکنند. در مرحله دوم، اپراتور سیستم توزیع، توان انتقالی ممکن را در میان ریزشبکه‌ها هماهنگ می‌کند و از ظرفیت‌های استفاده نشده منابع ریزشبکه برای تغذیه بارهای قطع شده در مرحله ۱، استفاده می‌کند. در [۱۴] یک روش مبتنی بر تاب‌آوری ارائه شده است که ریزشبکه‌ها را برای بازیابی بارهای بحرانی فیدرهای توزیع پس از یک اختلال عمده استفاده می‌کند. با توجه به ظرفیت محدود ژنراتورهای پراکنده (DGها) در ریزشبکه‌ها، عملکرد دینامیکی DGها در روند بازیابی ضروری است. در [۱۵] یک ساختار کنترل سلسه‌مراتبی برای اتصال ریزشبکه‌های خودکفای مجاور برای مبادله بار سیستم در شرایط اضطراری ارائه شده است. در [۱۶] یک روش براساس سیستم چندعامله برای خودترمیمی با ریزش بار براساس اولویت و حالت جزیره‌ای براساس منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در [۱۷] یک روش بهره‌برداری سیستم توزیع جدید به‌وسیله شکل‌گیری ریزشبکه‌های چندگانه با منابع تولید پراکنده برای بازیابی بار بحرانی ارائه شده است. در [۱۸] یک روش خودترمیمی جدید برای دو ریزشبکه جزیره‌ای مجاور پیشنهاد شده است. هر ریزشبکه، کمبود توان دیگری را پشتیبانی می‌کند. در [۱۹] یک استراتژی جامع برای خودترمیمی یک ریزشبکه با مصیبت‌های مختلف پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی توزیع مجدد تولید، تجدید پیکربندی شبکه و ریزش بار را برای خودترمیمی توسعه داده است. در [۲۰] بازیابی محلی با استفاده از ریزشبکه‌ها انجام شده است. روش پیشنهادی برای تاب‌آوری یک سیستم توزیع در مقابل با خطاها به‌کار رفته است. در [۲۱] به‌کمک تخمین‌زن فازی محل مناسب ادوات فکتس را معلوم می‌کنیم تا پایداری استاتیکی ولتاژ در باس‌ها را افزایش دهیم. در [۲۲] برای سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع کنترل‌گر مقاوم تأخیرداری طراحی شده است که در آن تأثیر عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها طی فرایند طراحی بررسی شده است.

نوآوری و ترکیبات اصلی مقاله

در مسئله خودترمیمی، دو نکته رسیدن به جواب بهینه سراسری و زمان حل بسیار مهم است. برای تضمین بهینه بودن باید مسئله محدب باشد و برای کاهش زمان حل باید مسئله به فرم خطی تبدیل شود. مسئله خودترمیمی، یک مسئله MINLP نامحدب است؛ بنابراین باید برای رسیدن به بهینه سراسری، مسئله به فرم محدب تبدیل شود. همچنین برای کاهش زمان حل مسئله به فرم خطی تبدیل شود. به‌طور مثال در مدل‌سازی محدودیت ظرفیت میکروتوربین‌ها که محدب است اگر خطی‌سازی نشود زمان شبیه‌سازی بسیار زیاد می‌شود. در [۱; ۹; ۱۲; ۱۵] مسئله به فرم خطی تبدیل شده است و رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین شده است اما در هیچ‌یک از این مقالات، مدل کامل و مناسبی ارائه نشده است که بتوان در مسئله خودترمیمی از آن استفاده کرد. در مقاله حاضر علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی جدید و محدب برای میکروتوربین، منابع تجدیدپذیر و توابع توزیع احتمالاتی برای تولید و بار در نظر گرفته شده است.

ترکیبات اصلی مقاله به شرح زیر است:

- ✓ ارائه یک مدل‌سازی ریاضی جدید و کامل برای حل مسئله خودترمیمی
- ✓ ارائه یک مدل بهینه‌سازی محدب برای کاهش زمان حل مسئله خودترمیمی
- ✓ استفاده از مدل محدب و خطی برای تضمین رسیدن به بهینه سراسری
- ✓ تبدیل سیستم توزیع به ریزشبکه‌های خودکفا

- ✓ در نظر گرفتن انواع منابع تولید پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع

در ادامه، فرمول‌سازی مسئله خودترمیمی در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ مدل‌سازی ریاضی ارائه شده تبدیل به یک مدل محدب شده است. در بخش ۴ نتایج عددی روی یک سیستم ۳۳ باس آزمون شده و در بخش آخر، نتیجه‌گیری و تحلیل نتایج ارائه شده است.

فرمولاسیون مسئله

هنگام وقوع خطا، طرح پیشنهادی، خطا را در نواحی معین شبکه ایزوله می‌کند و منطقه بدون برق را به سریع‌ترین شکل ممکن و با استفاده از برداشت بار یا جزیره‌ای کردن، بازیابی می‌کند. در مسائل بهینه‌سازی تنها زمانی می‌توانیم به جواب بهینه برسیم که مدل مسئله محدب باشد. در مسائل محدب تنها یک بهینه وجود دارد. مسئله تاب‌آوری یک مسئله پیچیده MINLP نامحدب است؛ بنابراین مسئله از حالت MINLP نا محدب به MILP تبدیل می‌شود و رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین می‌شود. تابع هدف همانند زیر بیان شده است:

$$\mathrm{Min} \sum_t(\sum_i c^G p_{i,t}^G + \sum_i c^{emi}\sigma_i p_{i,t}^G - \sum_i c^D p_{i,t}^D + (c^B\eta_{1,t} - c^s\mu_{1,t}) + \sum_i(1 - cs_{i,t})\, CDF_{i,t}LC_{i,t})) \quad (۱)$$

در تابع هدف ترم اول، هزینه تولید میکروتوربین ها را بیان می‌کند. هزینه بهره‌برداری واحدهای تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است [۴]؛ چون این واحدها هزینه بهره‌برداری ندارند. ترم دوم، هزینه آلودگی میکروتوربین‌ها را نشان می‌دهد. ترم سوم، درآمد ناشی از فروش برق به مشتریان را بیان می‌کند. ترم چهارم و پنجم، هزینه‌های ناشی از تبادل توان سیستم توزیع و شبکه بالادست را نشان می‌دهد. ترم ششم، هزینه‌های قطع بار را در حالت خطا نشان می‌دهد.

این قید، نحوه تبادل توان بین سیستم توزیع و شبکه بالادست را نشان می‌دهد. با استفاده از این قید می‌توان خرید/ فروش توان از/به شبکه بالادست را تعیین کرد.

$$P_{1,t} = \eta_{1,t} - \mu_{1,t} \ , \eta, \mu \geq 0 \quad (۲)$$

در شبکه قدرت لازم است که محدوده ولتاژ همیشه در بازه معینی قرار گیرد تا مشترکین در تغذیه بارهای خود دچار مشکل نشوند و پایداری ولتاژ نیز حفظ شود. این قید نیز مربوط به همین مسئله است.

$$1 - \epsilon \leq V_{i,t} \leq 1 + \epsilon \quad (۳)$$

توان خروجی اکتیو و راکتیو هر منبع تولیدی باید متناسب با ظرفیت نامی آن باشد. این محدودیت مطابق با محدودیت (۴) بیان شده است:

$$(p_{i,t}^G)^2 + (q_{i,t}^G)^2 \leq S_i^{max2} \quad (۴)$$

یکی از مهم‌ترین قیود شبکه، برابری بار - تولید است که در قالب معادلات پخش‌بار[1] مطابق با معادلات ۵ و ۶ بیان شده است:

$$P_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j} V_{j,t} \left(G_{i,j} cos\theta_{ij,t} + B_{i,j} sin\theta_{ij,t} \right) \quad (۵)$$

$$Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j} V_{j,t} \left(G_{i,j} sin\theta_{ij,t} - B_{i,j} cos\theta_{ij,t} \right) \quad (۶)$$

معادلات (۷) و (۸) توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه را از باس i ام با در نظر گرفتن بار محلی آن باس، نشان می‌دهد.

$$P_{i,t} = p_{i,t}^{G} + p_{i,t}^{E} - p_{i,t}^{D} + \sum_{n \in N} p_{i,n,t}^{R} \quad (۷)$$

$$Q_{i,t} = q_{i,t}^{G} + q_{i,t}^{E} - q_{i,t}^{D} + \sum_{n \in N} q_{i,n,t}^{R} \quad (۸)$$

معادله (۹) بیان می‌کند که مجموع توان‌های تولیدی اکتیو می‌تواند برابر یا بیشتر از مجموع بارهای مصرفی باشد.

$$\sum_{i} (p_{i,t}^{G} + p_{i,t}^{E} + \sum_{n \in N} p_{i,n,t}^{R}) \geq \sum_{i} p_{i,t}^{D} \quad (۹)$$

ذخیره‌سازها نقش مهمی در شبکه‌های توزیع هوشمند دارند. منابع خورشیدی و بادی می‌توانند به‌عنوان منابع قابل توزیع در نظر گرفته شوند؛ زیرا انرژی در حالت عادی بهره‌برداری شبکه ذخیره می‌شود و در موارد اضطراری به شبکه تزریق می‌شوند. محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز توسط معادله (۱۰) تعیین می‌شود.

$$-P_{i}^{ch,max} \lambda_{i,t} \leq p_{i,t}^{E} \leq P_{i}^{dch,max} \phi_{i,t} \quad (۱۰)$$

وضعیت ذخیره‌سازی در هر زمان ممکن است به‌صورت زیر شارژ یا دشارژ شود:

$$\lambda_{i,t} + \phi_{i,t} \leq 1 \quad (۱۱)$$

در معادله (۱۱)، $\lambda_{i,t}$ و $\phi_{i,t}$ به‌ترتیب متغیرهای باینری مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز هستند. وضعیت شارژ (SOC) ذخیره‌سازها به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{T}{EC_{i}} \left(\phi_{i,t} p_{i,t}^{E} \pi_{d}^{-1} + \lambda_{i,t} p_{i,t}^{E} \pi_{c} \right) \quad (۱۲)$$

محدوده نامی SOC مطابق با (۱۳) است. مطابق (۱۳)، SOC می‌تواند صفر باشد. با این حال، بهتر است از شارژ و دشارژ کامل باتری جلوگیری کنید تا عمر آن بیشتر شود.

$$0 \leq \mathrm{SOC_{i,t}} \leq \mathrm{SOC_{i}^{max}} \quad (۱۳)$$

[1] Load Flow

بهینه‌سازی محدب

محدب بودن مدل باعث می‌شود که رسیدن به بهینه سراسری تضمین شود؛ بنابراین برای رسیدن به بهینه سراسری باید مسائل نامحدب به محدب تبدیل شود. شروط مهم برای محدب بودن مسائل این است که تابع هدف و قیود نامساوی محدب باشند. همچنین قیود مساوی باید افاین باشند. معادلات ۵ و ۶ قیود مساوی هستند. این قیود به دلیل غیرخطی بودن و نامحدب بودن باعث می‌شوند که حل‌کننده به جواب بهینه نرسد. معادله ۴ یک قید غیرخطی نابرابر و به دلیل دایره بودن محدب است ولی چون بعضی از قیود مسئله باید خطی شوند، این قید نیز باید خطی شود. ترم آخر تابع هدف نیز به دلیل ضرب یک متغیر باینری و یک متغیر پیوسته غیرخطی است؛ بنابراین تابع هدف نیز باید خطی‌سازی شود.

خطی‌سازی ضرب متغیر باینری و پیوسته

در تابع هدف ضرب متغیر باینری $cs_{i,t}$ در یک متغیر پیوسته $LC_{i,t}$ وجود دارد. برای خطی‌سازی تابع هدف، معادلات زیر جایگزین معادله ۱ می‌شود:

$$\mathrm{Min} \sum_t (\sum_i c^G p_{i,t}^G + \sum_i c^{emi} \sigma_i p_{i,t}^G - \sum_i c^D p_{i,t}^D \ + (c^B \eta_{1,t} - c^s \mu_{1,t} \tag{۱۴}$$

$$\left|L_{i,t}\right| \leq M_I cs_{i,t} \tag{۱۵}$$

$$\left|LC_{i,t} - L_{i,t}\right| \leq M_I (1 - cs_{i,t}) \tag{۱۶}$$

خطی‌سازی محدودیت توان ظاهری

معادله ۴ یک معادله با متغیرهای مربع و محدب است ولی به دلیل اینکه تعدادی از محدودیت‌ها باید خطی شوند، این محدودیت که محدب است نیز باید خطی‌سازی شود. روش خطی‌سازی مبتنی بر پولیگون برای تقریب ترم‌های مربعی به‌کار می‌رود. شعاع دایره از پولیگون s انتخاب می‌شود:

$$S_i = S_i^{max} \sqrt{(2\pi/n)/\sin\left(\frac{2\pi}{n}\right)} \tag{۱۷}$$

جایی که n تعداد لبه‌ها از پولیگون استفاده شده برای خطی‌سازی است. در اینجا محدودیت‌های خطی‌سازی با n=6 فرمول‌سازی می‌شود. معادلات خطی شده ۱۸ تا ۲۰ جایگزین معادله غیرخطی ۴ می‌شود.

$$-\sqrt{3}\left(p_{i,t}^G + S_i\right) \leq q_{i,t}^G \leq -\sqrt{3}\left(p_{i,t}^G - S_i\right) \tag{۱۸}$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{2}.\ S_i \leq q_{i,t}^G \leq \frac{\sqrt{3}}{2}.\ S_i \tag{۱۹}$$

$$\sqrt{3}\left(p_{i,t}^G - S_i\right) \leq q_{i,t}^G \leq \sqrt{3}\left(p_{i,t}^G + S_i\right) \tag{۲۰}$$

خطی‌سازی محدودیت‌های پخش بار

محدودیت‌های ۵ و ۶ مدل را به‌شدت به یک مدل غیرخطی نامحدب تبدیل می‌کند. خطی‌سازی معادلات پخش بار براساس سری‌های تیلور و فرضیات زیر انجام می‌شود:

۱. اندازه‌های ولتاژ هر باس همیشه یک عدد نزدیک به یک است.

۲. تفاوت زاویه در امتداد یک خط بسیار کوچک است؛ به‌طوری که می‌توان $sin\theta_k = \theta_k$ و $cos\theta_k = 1$ را در نظر گرفت.

براساس فرض اول، اندازه ولتاژ باس را می‌توان همانند زیر در نظر گرفت:

$$V_{i,t} = 1 + \Delta V_{i,t} \tag{۲۱}$$

جایی که انتظار می‌رود $\Delta V^{min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V^{max}$ بسیار کوچک باشد. با استفاده از فرضیات فوق داریم:

$$P_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) \left(G_{i,j} + B_{i,j} \,.\, \theta_{ij,t}\right) \tag{۲۲}$$

$$Q_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) \left(G_{i,j}\theta_{ij,t} - B_{i,j}\right) \tag{۲۳}$$

اما دقت کنید که همچنان معادلات ۲۲ و ۲۳ غیرخطی هستند. از آنجایی که انتظار می‌رود $\Delta V_{i,t}$ ، $\Delta V_{j,t}$ و $\theta_{ij,t}$ کوچک باشند. ضرب $\Delta V_{i,t}\theta_{ij,t}$ و $\Delta V_{j,t}\theta_{ij,t}$ را می‌توان به‌عنوان یک عبارت مرتبه دوم در نظر گرفت؛ بنابراین به دلیل کوچک بودن، این عبارات در نظر گرفته نمی‌شوند. معادلات خطی‌سازی شده نهایی برای پخش بار همانند زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{i,t} = \sum_j \left(\left(1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}\right) G_{i,j} + B_{i,j} \,.\, \theta_{ij,t}\right) \tag{۲۴}$$

$$Q_{i,t} = \sum_j \left(G_{i,j}\theta_{ij,t} - \left(1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}\right) B_{i,j}\right) \tag{۲۵}$$

بنابراین مدل محدب برای مسئله MINLP نامحدب ارائه شد. این مدل محدب توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده است.

ایجاد ریزشبکه‌های بهینه

در این مقاله، نظریه گراف برای ایجاد امکان تشکیل MGها در شرایط وقوع خطا استفاده می‌شود. با توجه به این نظریه، هر شبکه با یک گراف معادل نشان داده می‌شود. هر لبه این گراف شامل سوئیچ‌های قابل کنترل شبکه و گره منبع شامل فیدرهایی که به شبکه بالادست متصل هستند یا واحد MT با قابلیت کنترل فرکانس هستند. سپس حلقه‌های اساسی گراف مشخص می‌شوند. حلقه اساسی شامل کوچک‌ترین حلقه ممکن و حلقه‌های مستقل است. هریک از حلقه‌های اساسی با یک بردار توصیف شده است که اعضای آن لبه‌های حلقه تشکیل‌دهنده هستند که به نام بردارهای حلقه اساسی (FLVها) نامیده می‌شوند. هریک از این حلقه‌ها شامل مجموعه‌ای از سوئیچ‌های قابل کنترل به شرح زیر است: حلقه‌های اساسی می‌توانند به حلقه‌های اساسی واقعی و مجازی تقسیم شوند که به‌ترتیب از ساختار شبکه و واحد MT با قابلیت کنترل فرکانس حاصل می‌شود؛ بنابراین اضافه کردن هر واحد MT در شبکه باعث ایجاد یک حلقه اساسی

مجازی جدید می‌شود. پس از تعیین FLVهای گراف، الگوریتم تولید درخت / جنگل پوشا برای تولید یک ساختار MG ممکن با در نظر گرفتن محدودیت شعاعی شبکه و ضرورت تأمین تمام بارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک درخت پوشا یک زیرگراف است که شامل تمام گره‌های گراف با حداقل تعداد ممکن لبه‌ها می‌باشد. این بدان معنی است که یک لبه از یک درخت پوشا، در حداقل یک زوج گره که در ابتدا متصل شده‌اند، قطع شده است. در این مقاله، جنگل پوشا معادل پیکربندی ممکن شبکه است. از آنجایی که برخی از شاخه‌ها یا لبه‌های حلقه‌های اساسی در برخی حلقه‌ها مشترک هستند، با انتخاب هر لبه مشترک، تمام لبه‌هایی که در مسیر لبه انتخاب شده و در حلقه قرار گرفته‌اند باید از کاندیدهای انتخاب لبه در حلقه‌های مشترک بعدی حذف شوند.

این قانون تضمین می‌کند که ساختارهای ایجاد شده هیچ حلقه‌ای ندارند و تمام بارها به نقطه تولید متصل می‌شوند. علاوه بر این، یکی از ویژگی‌های قابل توجه روش پیشنهادی، قابلیت ایجاد تعداد مطلوب از جزیره‌ها است. در این وضعیت، اگر فقط یک سوئیچ از هریک از حلقه‌های اساسی انتخاب شده باشند، شبکه در قالب درخت پوشا یکپارچه می‌شود. انتخاب هر سوئیچ از هر حلقه مجازی، معادل ایجاد یک MG در شبکه است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن یا نادیده گرفتن حلقه مجازی در فرایند انتخاب تصادفی سوئیچ‌های باز، اپراتور می‌تواند تعدادی از MGهای ایجاد شده را کنترل کند. نکته قابل توجه این است که با در نظر گرفتن بخش جداسازی خطا، یکی از سوئیچ‌های باز شده همیشه به‌عنوان یک مقدار مشخص در نظر گرفته می‌شود و از این رو تعداد متغیرها کاهش می‌یابد. برای دانستن پیکربندی ممکن شبکه، یک الگوریتم PSO برای تعیین بهینگی استفاده می‌شود.

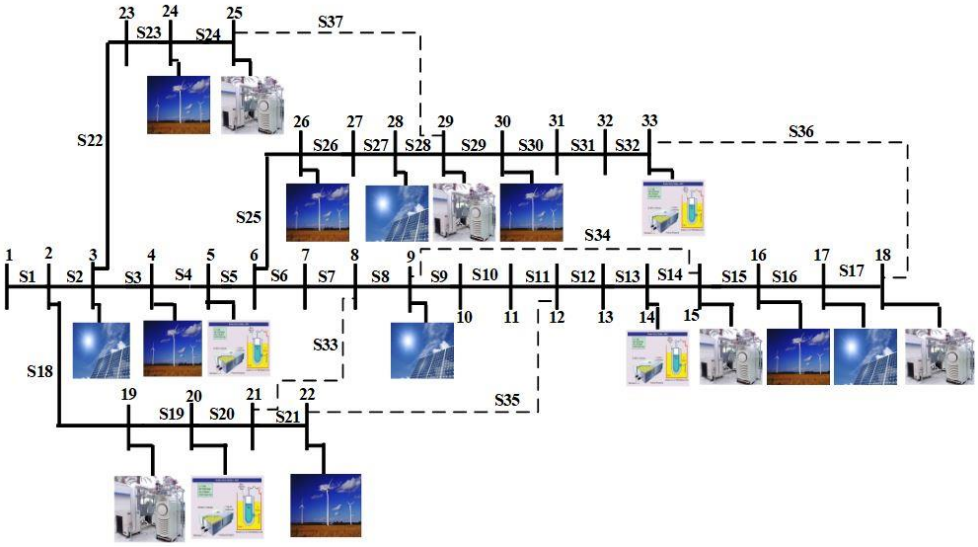
نتایج عددی

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی، روش پیشنهادی روی یک شبکه تست ۳۳ باس IEEE ارائه شده است. این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. هزینه تولید میکروتوربین‌ها ۰.۱ دلار / کیلووات ساعت، هزینه آلودگی میکروتوربین‌ها ۰.۰۲ دلار/ کیلوگرم، قیمت فروش برق به مشتریان ۰.۳ دلار/کیلووات ساعت، قیمت برای خرید/فروش از/به شبکه بالادست ۰.۱ دلار/کیلووات ساعت است. ضرایب تولید توان توربین بادی، فتوولتائیک و بارها به‌ترتیب مطابق با شکل‌های ۲ تا ۴ است. اطلاعات ظرفیت توان میکروتوربین‌ها، توربین بادی و فتوولتائیک همانند جدول ۱ است. محدوده ولتاژ مجاز بین ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ فرض شده است. الگوریتم پیشنهادی روی یک کامپیوتر با CPU ۲.۵ گیگاهرتز و RAM ۴ گیگا هرتز اجرا شده است. در این مقاله، سه سناریو برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده است:

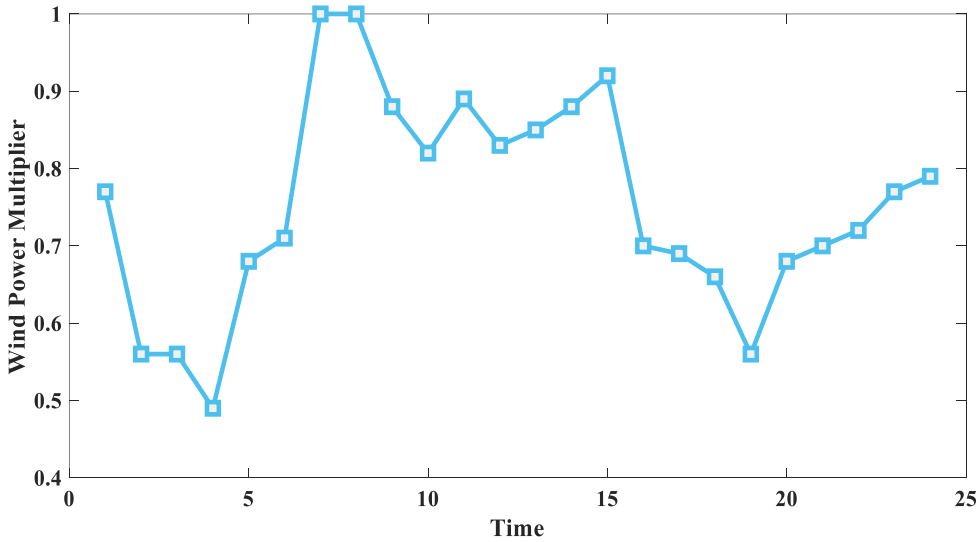
سناریو ۱- در نظر گرفتن تمام بارها بصورت مسکونی: در این سناریو تمام بارها مسکونی هستند و منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازه‌ها همانند جدول ۱ در سیستم ۳۳ باس حضور دارند.

سناریو ۲- در نظر گرفتن شبکه موردمطالعه به شکل واقعی: همان‌طور که می‌دانیم در بیشتر سیستم‌های توزیع منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها با تعداد محدودی وجود دارند. در سناریوی اول در نظر گرفتیم که در سیستم ۳۳ باس، ۵ میکروتوربین، ۵ توربین باد، ۴ PV و ۴ باطری وجود دارد. ولی در سناریو ۲ تعداد منابع تولید پراکنده و باطری را کم کرده تا سیستم به شکل واقعی نزدیک‌تر شود. تعداد و ظرفیت منابع تولید پراکنده در سناریو ۲ همانند جدول ۲ است که تعداد میکروتوربین، توربین باد، PV و باطری به دو عدد تغییر کرده است. همچنین ظرفیت میکروتوربین‌ها را نیز به دلیل عملکرد واقعی‌تر نسبت به سناریو ۱ کاهش داده‌ایم.

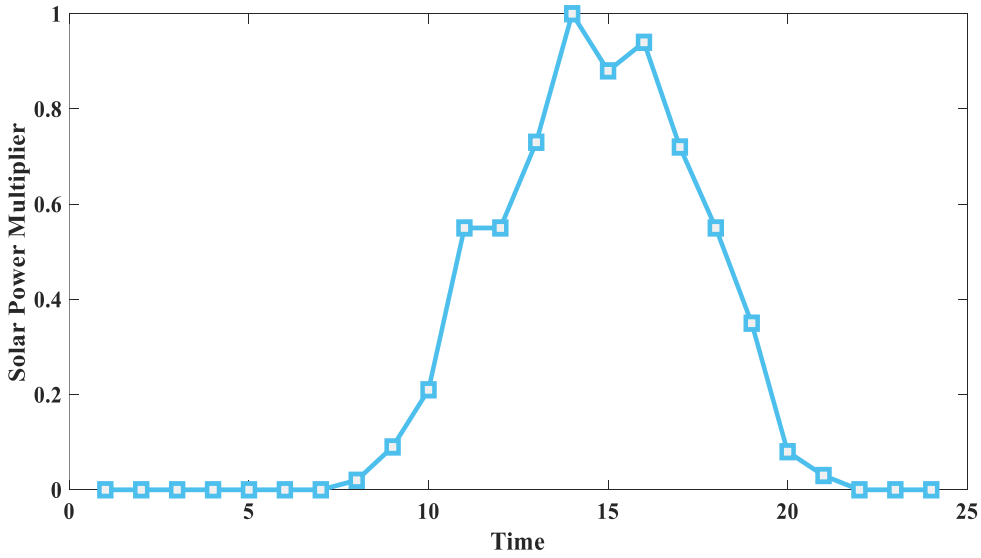
سناریو ۳- در نظر گرفتن بارهای مسکونی و غیرمسکونی: در سناریو ۳، منابع و ذخیره‌سازها همانند سناریو ۲ و مطابق جدول ۲ هستند. اما در این سناریو، بارهای موجود در باس‌های ۵، ۷، ۸، ۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۲ صنعتی و بقیه بارها مسکونی هستند. هزینه برداشت بار برای بارهای مسکونی ۲.۲ دلار/کیلووات ساعت و برای بارهای غیرمسکونی ۲۸۲ دلار/کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.



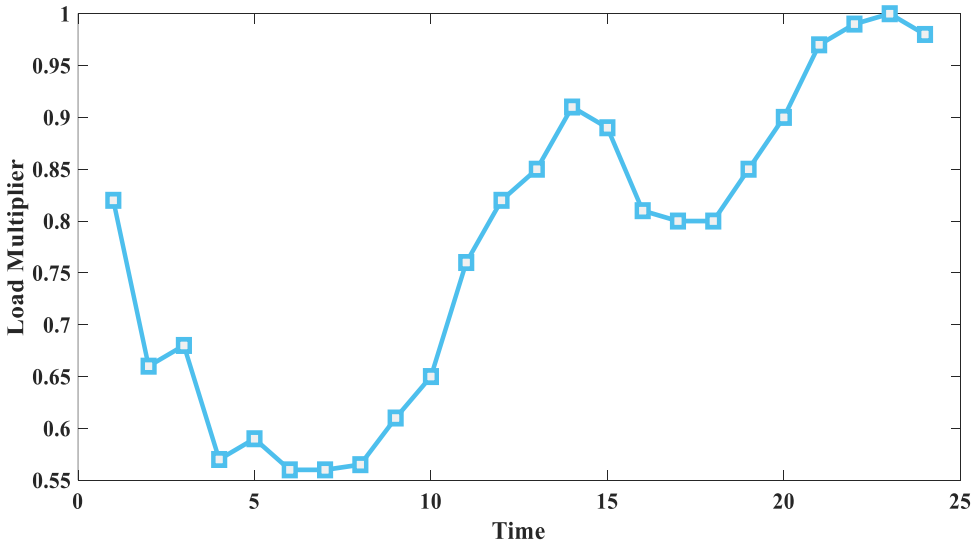
شکل ۱. سیستم موردمطالعه



شکل ۲. ضرایب توان بادی



شکل ۳. ضرایب توان خورشیدی



شکل ۴. ضرایب بار

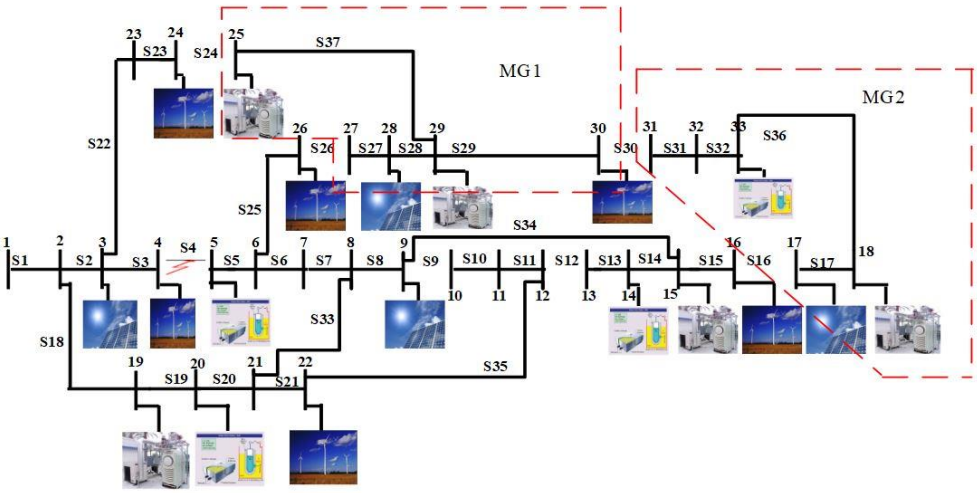
جدول ۱. اطلاعات ذخیره‌ساز، فتوولتائیک، باد و میکروتوربین‌ها در سناریو ۱

ذخیره‌ساز				فتوولتائیک		باد		میکروتوربین‌ها	
باس	حداقل شارژ باطری	کیلووات	شارژ اولیه	باس	کیلووات	باس	کیلووات	باس	کیلووات
						۴	۳۰	۱۵	۸۰۰
۵	۰.۲	۱۵۰	۰.۱	۳	۶۰	۱۶	۸۵	۱۸	۶۵۰
۱۴	۰.۲	۱۵۰	۰.۹	۹	۶۰	۲۲	۶۰	۱۹	۱۰۰
۲۰	۰.۲	۲۰۰	۰.۸	۱۷	۴۰	۲۴	۵۰	۲۵	۷۵۰
۳۳	۰.۲	۲۰۰	۰.۵	۲۸	۵۰	۲۶	۵۰	۲۹	۷۵۰
						۳۰	۷۰		

جدول ۲. اطلاعات ذخیره‌ساز، فتوولتائیک، باد و میکروتوربین‌ها در سناریوهای ۲ و ۳

ذخیره‌ساز				فتوولتائیک		باد		میکروتوربین‌ها	
باس	حداقل شارژ باطری	کیلووات	شارژ اولیه	باس	کیلووات	باس	کیلووات	باس	کیلووات
۵	۰.۲	۱۵۰	۰.۱	۱۷	۴۰	۴	۳۰	۱۸	۳۰۰
۲۰	۰.۲	۲۰۰	۰.۸	۲۸	۵۰	۳۰	۷۰	۲۹	۳۵۰

در مطالعه موردی این مقاله فرض شده است که خطا در خط ۴ قرار دارد. اولین قدم در بحث تاب‌آوری این است که پس از خطا بهترین آرایش تعیین شود. در ابتدا خطا بین باس ۴ و ۵ به‌وسیله سکشن لایزر S4 ایزوله شده است. برای آرایش بهینه در حالت خودترمیمی، سکشن لایزرهای S9،S4 ، S12، S16، S24، S26 و S30 و تای سوئیچ‌های S33، S34، S35، S36 و S37 عمل می‌کنند. آرایش بهینه در خطای موردنظر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. تشکیل ریزشبکه‌های بهینه پس از تجدید پیکربندی شبکه

در جدول ۳ میزان تولید توان میکروتوربین‌ها را در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. در ساعت ۲۰ میکروتوربین ۱۹ با تمام ظرفیت و میکروتوربین ۲۵ خاموش است و در ساعت ۲۱ میکروتوربین ۱۹ خاموش شده است. در سناریو ۱ هیچ برداشت باری اتفاق نیفتاده است. همچنین نحوه شارژ و دشارژ باطری‌ها همراه با حالت شارژ باطری‌ها نشان داده شده است. شارژ باطری ۵ در وضعیت اضطراری در ساعت ۲۰ منطقی به نظر نمی‌رسد. ولی به دلیل اینکه شارژ اولیه باطری ۵ (مطابق جدول ۱) ۱۰ درصد است و حداقل شارژ باطری ۲۰ درصد (برای افزایش طول عمر باطری) در نظر گرفته شده است، بنابراین باطری ۵ در ساعت ۲۰ به میزان ۱۵.۷۸۹ کیلووات شارژ شده است تا میزان شارژ باطری به حداقل شارژ باطری که ۲۰ درصد است برسد. باطری‌های ۱۴، ۲۰ و ۳۳ در ساعت ۲۰ دشارژ شده‌اند تا به سیستم در این وضعیت اضطراری کمک کنند. در این ساعت حالت، شارژ باطری‌های ۱۴ و ۲۰ به‌ترتیب ۷۱ و ۶۴ درصد است. ولی باطری ۳۳ دارای حالت شارژ ۲۰ درصد در ساعت ۲۰ است؛ بنابراین باطری‌های ۱۴ و ۲۰ با توجه به وضعیت شارژشان قابلیت دشارژ شدن مجدد در ساعت ۲۱ را دارند. بنابراین این دو باطری در ساعت ۲۱ به‌ترتیب با ۶۹ و ۸۰ کیلووات دشارژ شده‌اند ولی باطری ۳۳ قابلیت دشارژ در ساعت ۲۱ را ندارد؛ زیرا به حداقل میزان شارژ باطری (۲۰ درصد) رسیده است. همچنین توان دریافتی از شبکه در ساعت ۲۰ و ۲۱ به‌ترتیب ۱۱۰۵.۷۳۲ و ۱۱۸۷.۵۵۱ کیلووات است؛ بنابراین طرح پیشنهادی در سناریو اول بدون هیچ قطع باری توانسته است تعادل توان را در سیستم برقرار کند.

جدول ۳. برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها در حالت تاب‌آوری برای سناریو ۱

زمان (ساعت)	توان مبادله شده از شبکه بالادست	برنامه‌ریزی ذخیره‌سازها			برنامه‌ریزی میکروتوربین‌ها	
		باس	حالت شارژ	کیلووات	باس	کیلووات
۲۰	۱۱۰۵.۷۳۲	۵	۰.۲	-۱۵.۷۸۹	۱۵	۷۵۴.۲۴۳
		۱۴	۰.۷۱	۲۵.۵	۱۸	۴۷۵.۷۴۴
		۲۰	۰.۶۴	۲۸	۱۹	۱۰۰
		۳۳	۰.۲	۵۴	۲۵	-
					۲۹	۷۳۵.۳۸
۲۱	۱۱۸۷.۵۵۱	۵	۰.۲	-	۱۵	۷۱۸.۷۵۳
		۱۴	۰.۲	۶۹	۱۸	۵۴۵.۹۹۴
		۲۰	۰.۲	۸۰	۱۹	-
		۳۳	۰.۲	-	۲۵	۷.۹۸
					۲۹	۷۵۰

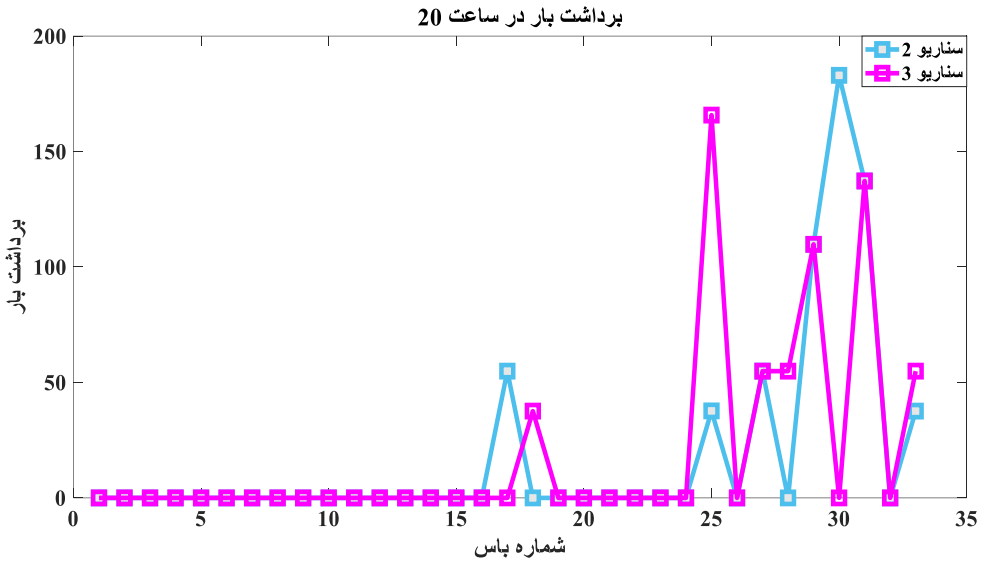
در جدول ۴، برنامه‌ریزی برای ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ برای سناریو ۲ (کاهش تعداد منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای موجود در سیستم) بیان شده است. میکروتوربین‌های موجود در باس ۱۸ و ۲۹ با ۱۰۰ درصد ظرفیتشان عمل می‌کنند که با توجه به کمبود تولید و وضعیت اضطراری سیستم طبیعی است. باطری ۵ همانند سناریو یک عمل می‌کند. اما باطری ۲۰ در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ به‌ترتیب با ۶۱.۶۹۳ و ۴۶.۳۰۷ کیلووات دشارژ می‌شود. پس از دشارژ باطری ۲۰ در ساعت ۲۱ مشاهده می‌کنیم که وضعیت شارژ باطری به ۰.۲ رسیده است که نشان می‌دهد باطری ۲۰ با حداکثر ظرفیت در ساعت ۲۱ دشارژ شده است. توان دریافتی از شبکه بالادست هم ۲۱۲۷.۹۶۵ و ۲۱۸۴.۰۸۱ کیلووات به‌ترتیب برای ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ است. توان دریافتی از شبکه بالادست نسبت به سناریو ۱ افزایش یافته است که به دلیل کمبود تولید طبیعی به نظر می‌رسد. در سناریو ۱ هیچ برداشت باری رخ نداد اما در این سناریو به دلیل کمبود منابع تولید

پراکنده و ذخیره‌ساز در سیستم ۶۱۵.۱۲۴ و ۶۵۳.۹۷۴ کیلووات برداشت بار به‌ترتیب در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ اتفاق افتاده است. بنابراین در سناریو ۲ و مقایسه آن با سناریو ۱ اهمیت نفوذ بالای منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز و تأثیر آنها در کاهش برداشت بار سیستم مشخص شده است.

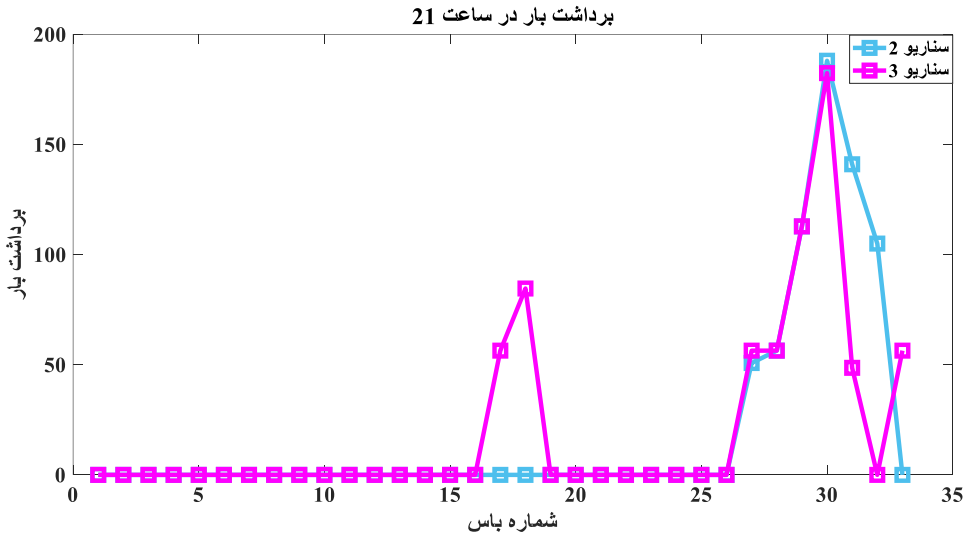
جدول ۴. برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها در حالت تاب‌آوری برای سناریو ۲

زمان (ساعت)	توان مبادله شده از شبکه بالادست	برنامه‌ریزی ذخیره‌سازها			برنامه‌ریزی میکروتوربین‌ها		کل میزان برداشت بار (کیلووات)
		باس	حالت شارژ	کیلووات	باس	کیلووات	
۲۰	۲۱۲۷.۹۶۵	۵	۰.۲	-۱۵.۷۸۹	۱۸	۳۰۰	۶۱۵.۱۲۴
		۲۰	۰.۴۶	۶۱.۶۹۳	۲۹	۳۵۰	
۲۱	۲۱۸۴.۰۸۱	۵	۰.۲	-	۱۸	۳۰۰	۶۵۳.۹۷۴
		۲۰	۰.۲	۴۶.۳۰۷	۱۹	۳۵۰	

در سناریو ۳ بارها به دو دسته بارهای مسکونی و بارهای صنعتی تقسیم شده‌اند. بارهای صنعتی اهمیت بالاتری نسبت به بارهای مسکونی دارند؛ بنابراین در تابع هدف به‌وسیله اعمال هزینه برداشت بار متفاوت برای بارهای مسکونی و غیرمسکونی تا حدامکان از برداشت بارهای صنعتی جلوگیری شده است. گرچه میزان کل برداشت بار و برنامه‌ریزی میکروتوربین، باطری و توان دریافتی از شبکه در هر دو سناریو یکسان است. اما برای اینکه اهمیت بارها در نظر گرفته شود، الگوریتم برداشت بارهای مختلفی را در باس‌های مختلف سیستم انجام داده است. همان‌طور که گفته شد در سناریو ۳، باس‌های ۵، ۷، ۸، ۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۲ بارهای صنعتی هستند. در شکل ۶، برداشت بار در ساعت ۲۰ برای سناریو ۲ و ۳ نشان داده شده است. از بین باس‌های صنعتی در هر دو سناریو باس‌های ۲۵ و ۳۰ (جزیره ۱) برداشت شده‌اند. با این تفاوت که در سناریو ۳ میزان ۱۶۵.۷۸ کیلووات از جزیره ۱ برداشت شده است، در حالی که میزان برداشت بار برای سناریو ۲ ۲۲۰.۶۸ کیلووات از جزیره ۱ است. بنابراین الگوریتم به‌خوبی توانسته است میزان برداشت بار در باس‌های صنعتی را با در نظر گرفتن هزینه بیشتر در تابع هدف کاهش دهد و برداشت بار را از باس‌های با اولویت پایین‌تر انجام دهد تا تعادل توان در سیستم برقرار شود. همچنین در شکل ۷ برداشت بار در باس‌های مختلف در ساعت ۲۱ برای سناریوهای ۲ و ۳ نشان داده است. در ساعت ۲۱ در سناریو ۲ در باس‌های صنعتی ۳۰ (در جزیره ۱) و ۳۲ (در جزیره ۲) ، به‌ترتیب با برداشت بار ۱۸۸ و ۱۰۴.۹۹۴ کیلووات رخ داده است. در حالی که در سناریو ۳ برداشت بار تنها در باس ۳۰ (در جزیره ۱) با مقدار ۱۸۲.۳۸ کیلووات رخ داده است؛ بنابراین برداشت بار در سناریو ۳ مقدار ۱۱۰.۶۱۴ کیلووات از بارهای صنعتی نسبت به سناریو ۲ کمتر شده است. در سناریو ۳ مقدار تابع هزینه ۹۸۷۰۱.۱۹۰۹ است که اگر اولویت‌بندی در نظر گرفته نشود، مقدار تابع هزینه ۱۴۵۳۷۶.۱۳۸۹ به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه در هزینه بهره‌برداری است.



شکل ۶. برداشت بار برای سناریوهای ۲ و ۳ در ساعت ۲۰



شکل ۷. برداشت بار در سناریوهای ۲ و ۳ در ساعت ۲۱

برای مقایسه روش پیشنهادی، نتایج با روش پیشنهادی رفرنس [۲۳] و [۱] مقایسه شده است. رفرنس [۱] مدل MINLP نامحدب را توسط حل‌کننده دیکاپت حل کرده است. پس از مدل‌سازی مدل MINLP نامحدب و حل آن توسط حل‌کننده دیکاپت به جواب نشدنی می‌رسیم. مدل پیشنهادی در [۱] با هیچ حل‌کننده‌ای به جواب بهینه نمی‌رسد و در تمام حل‌کننده‌ها جواب نشدنی دارد. تنها راه رسیدن به جواب بهینه سراسری، استفاده از مدل پیشنهادی در این

مقاله است. علاوه بر این زمان اجرای برنامه در گام دوم (بهره‌برداری) ۰.۰۵ ثانیه است. بنابراین زمان حل نسبت به [۱] که دارای زمان حل بسیار بالایی (۱۱۸ ثانیه) به دلیل داشتن مدل MINLP نامحدب است، به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است. روش موجود در [۱] به دلیل استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در فاز بازیابی نمی‌تواند رسیدن به بهینه سراسری را تضمین کند.

دو نکته مهم در مسئله خودترمیمی کم بودن زمان حل مسئله و رسیدن به جواب بهینه سراسری است. در جدول ۵ مشاهده می‌کنیم روش پیشنهادی منجر به بهبود قابل‌توجهی در نتایج از نظر زمان حل مسئله و رسیدن به جواب بهینه سراسری می‌شود. در روش پیشنهادی زمان حل ۰.۳۵ ثانیه است که نسبت به روش [۱] و [۲۳] به میزان قابل‌توجهی کمتر است. از نظر تلفات و مینیمم ولتاژ نیز روش پیشنهادی برتری دارد که نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در حل مسئله خودترمیمی است.

جدول ۵. مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود در ادبیات در سناریو ۱

روش‌های حل	تلفات (کیلووات)	مینیمم ولتاژ (ولت)	زمان اجرا (ثانیه)
روش پیشنهادی	۲۷.۱	۰.۹۹۲	۰.۳۵
روش [۱]	۳۱	۰.۹۷۱	۱۱۸
روش [۲۳]	۳۶	۰.۹۶۵	۲۸

نتیجه‌گیری

در این مقاله، چارچوبی جامع برای عملکرد یک شبکه توزیع هوشمند در حضور هر دو نوع منابع پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، شبکه توزیع به یک یا چند ریزشبکه تبدیل شده است. در حقیقت پس از وقوع خطای شدید در شبکه بالادست، ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادست قطع می‌شود. هدف این است که هر ریزشبکه بتواند بار خود را با کمترین حذف یا برداشت بار (یا حتی بدون حذف بار) تغذیه کند. منابع خورشیدی و بادی موجود در شبکه به‌صورت احتمالاتی مطالعه شده است که دقت مدل‌سازی را نسبت به حالت قطعی بالا می‌برد. برای شبیه‌سازی و عملیات بهینه‌سازی نیز از نرم‌افزار قدرتمند GAMS استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شبکه در حالت خودترمیم می‌تواند با تشکیل ریزشبکه‌های جزیره‌ای و خودکفا و تنظیم مجدد منابع پراکنده، حداکثر بار هریک از ریزشبکه‌ها را تغذیه کند. همچنین برای رسیدن به جواب بهینه یک مدل محدب ارائه شده است که توسط این مدل رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین می‌شود و زمان حل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. همچنین اولویت‌بندی بار و در نظر گرفتن بارهای صنعتی نیز در این مقاله انجام شد و نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب روش پیشنهادی در حل مسئله هستند. در کارهای آینده می‌توان عدم‌قطعیت را با روش‌هایی همچون شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی دقیق‌تر ارائه داد.

فهرست علائم و اختصارات

اندیس‌ها

i شمارنده باس

t شمارنده زمان

متغیرها

$\eta_{1,t}$ توان خریداری شده از شبکه بالادست.

$\mu_{1,t}$ توان فروخته شده به شبکه بالادست.

$cs_{i,t}$ متغیر باینری برای تعیین باسهایی که در باس i و در زمان t حذف شوند.

$P_{i,t}$ توان اکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس iام در زمان tام.

$Q_{i,t}$ توان راکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس iام در زمان tام.

$V_{i,t}$ دامنه ولتاژ باس iام در زمان tام.

$\delta_{i,j,t}$ اختلاف فاز بین ولتاژ باس‌های iام و jام در زمان tام.

$p_{i,t}^{G}$ مقدار کل توان اکتیو تولیدی در باس iام در زمان tام.

$q_{i,t}^{G}$ مقدار کل توان راکتیو تولیدی در باس iام در زمان tام.

$q_{i,t}^{D}$ مقدار کل توان راکتیو بارها در باس iام در زمان tام.

$V_{i,t}$ ولتاژ باس iام در زمان tام.

$\Delta V_{i,t}$ میزان تغییرات ولتاژ در باس i.

$LC_{i,t}$ میزان قطع بار در باس i ام.

$L_{i,t}$ تعریف متغیر دوم برای برداشت بار به دلیل خطی‌سازی.

پارامترها

c^{G} هزینه تولید.

c^{emi} هزینه آلودگی.

c^{D} سود ناشی از فروش برق.

c^{B} هزینه برق خریداری شده از شبکه بالادست.

c^{s} سود ناشی از فروش برق به شبکه بالادست.

ϵ مقدار تغییرات مجاز ولتاژ در سیستم توزیع.

$B_{i,j}$ سوسپتانس خط بین باس iام و jام.

$G_{i,j}$ کندوکتانس خط بین باس iام و jام.

S_i^{max} ظرفیت میکروتوربین‌ها در باس i ام.

$p_{i,t}^{D}$ مقدار کل توان اکتیو بارها در باس iام در زمان tام.

M_I یک عدد بزرگ.

References

[1] Zadsar, M., Haghifam, M. R., & Larimi, S. M. M. (2017). Approach for self-healing resilient operation of active distribution network with microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *11*(18), 4633-4643 .

[2] Cavalcante, P. L., López, J .C., Franco, J. F., Rider, M. J., Garcia, A. V., Malveira, M. R. R., Martins, L. L., & Direito, L. C. M. (2016). Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(1), 145-155. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2454436

[3] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & Fouly, T. H. M. E.-. (2013). Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, *28*(4), 4192-4200. https//:doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2259852

[4] Wang, Z., & Wang, J. (2015). Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization Into Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, *30*(6), 3139-3149. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2389753

[5] Wang, Z., Chen, B., Wang, J., & Chen, C. (2016). Networked Microgrids for Self-Healing Power Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(1), 310-319. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2427513

[6] Li, C., Liu, X., Zhang, W., Cao, Y., Dong, X., Wang, F & ,.Li, L. (2016). Assessment Method and Indexes of Operating States Classification for Distribution System With Distributed Generations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(1), 481-490. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402157

[7] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & El-Fouly, T. (2015). Optimized Multiple Microgrid-Based Clustering of Active Distribution Systems Considering Communication and Control Requirements. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *62*(2), 711-723. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2352212

[8] Chen, B., Chen, C., Wang, J., & Butler-Purry, K. L. (2018). Sequential Service Restoration for Unbalanced Distribution Systems and Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, *33*(2), 1507-1520. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2720122

[9] Li, J., Ma, X., Liu, C., & Schneider, K. P. (2014). Distribution System Restoration With Microgrids Using Spanning Tree Search. *IEEE Transactions on Power Systems*, *29*(6), 3021-3029. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2312424

[10] Karim, M. A., Currie, J., & Lie, T. T. (2018). Dynamic Event Detection Using a Distributed Feature Selection Based Machine Learning Approach in a Self-Healing Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, *33*(5), 4706-4718. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2812768

[11] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & El-Fouly, T. H. M. (2012). Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *3*(3), 1491-1502. https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2198246

[12] Hosseinnezhad, V., Rafiee, M., Ahmadian, M., & Siano, P. (2018). A comprehensive framework for optimal day-ahead operational planning of self-healing smart distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *99*, 28-44. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.031

[13] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M. (2016). Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(6), 2869-2879. https//:doi.org/10.1109/TSG.2016.2558628

[14] Xu, Y., Liu, C. C., Schneider, K. P., Tuffner, F. K., & Ton, D. T. (2018). Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(1), 426-437. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2591531

[15] Shahnia, F., Chandrasena, R. P. S., Rajakaruna, S., & Ghosh, A. (2014). Primary control level of parallel distributed energy resources converters in system of multiple interconnected autonomous microgrids within self-healing networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *8*(2), 203-222 .

[16] Souza, F. A. d., Vila, C. U., Enembreck, F., & Carpes, L. M. (2017). A Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms Considering Priority-Based Load Shedding and Islanding with Distributed Generation in Smart Distribution Grids. *IEEE Latin America Transactions*, *15*(4), 632-638. https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7896348

[17] Chen, C., Wang, J., Qiu, F., & Zhao, D. (2016). Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(2), 958-966. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2429653

[18] Pashajavid, E., Shahnia, F., & Ghosh, A. (2015). Development of a self-healing strategy to enhance the overloading resilience of islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *8*(2), 868-880. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601

[19] Sun, W., Ma, S., Alvarez-Fernandez, I., & Golshani, A. (2018). Optimal self-healing strategy for microgrid islanding. *IET Smart Grid* ,*1*(4) ,143-150 . https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0057

[20] Anuranj, N. J., Mathew, R. K., Ashok, S., & Kumaravel, S. (2016, March 4-6). *Resiliency based power restoration in distribution systems using microgrids.* 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7584186

[21] Alipour, M. (2017). Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *14*(42), 95-121 .

[22] Alinaghizadeh ardestani, m., & Vakili, A. (2020). Output feedback Controller design for HVAC system with delayed based Robust control approach. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(1), 89-99. https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112758

[23] Choopani, K., Hedayati, M., & Effatnejad, R. (2020). Self-healing optimization in active distribution network to improve reliability, and reduction losses, switching cost and load shedding. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *30*(5), e12348. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12348

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 55-77
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.130679
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.3.6

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Process Simulation and Extraction of Parameters Affecting the Production Capacity and Efficiency of a Combined Cycle Power Plant Unit (Case Study: Yazd Combined Cycle Power Plant)

Mohamad Omidpanah[1]*, Seyed Amir Abbas Elomee[2], Mehdi Ashtian Malayer[3]

[1]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
[2]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.
[3]MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.02.2021
Revised: 05.12.2021
Accepted: 05.17.2021

Keyword:
Combined cycle power plant
Thermodynamic modeling
Thermoflow
Media system
Heat Recovery Steam Generator (HRSG)
Energy efficiency

***Corresponding Author:**
Mohamad Omidpanah
Email: *Momidpanah@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

Given the increasing importance of energy management, optimizing power generation systems and reducing their energy consumption are of great importance, particularly recognizing the parameters affecting the performance of these units. In the present study, ANSALDO unit was investigated as a combined cycle unit commonly applied in Iran. To this end, the ANSALDO unit of Yazd Combined Cycle Power Plants was modeled and analyzed. This was followed by obtaining the efficiency and production capacity of the power plant, determining the thermal balance of all power plant equipment and investigating the impact of effective parameters on gas and steam units. Based on the findings, each gas unit of this power plant had a thermal efficiency of 34% and a production capacity of 134 MW. When these units were coupled to the steam unit in the design, the total thermal efficiency of the power plant reached 50% and its production capacity reached 422 MW. An examination of the impact of effective parameters on thermal efficiency and production capacity showed that increasing ambient temperature decreased the thermal efficiency of power plant by 14%, which can be compensated by activating the evaporator system and total production by 10 to 15 MW.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۷۷-۵۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
:10.48301/KSSA.2021.130679
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.3.6
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی فرایندی و استخراج پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی و راندمان حرارتی یک واحد نیروگاه چرخه ترکیبی مطالعه موردی: نیروگاه چرخه ترکیبی یزد

محمد امیدپناه[۱*]، سیدامیرعباس علومی[۲]، مهدی آشتیان ملایر[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلید واژگان:
نیروگاه چرخه ترکیبی
مدل‌سازی ترمودینامیکی
ترموفلو
سیستم مدیا
بویلر بازیاب حرارت
بازده انرژی

***نویسنده مسئول:** محمد امیدپناه
پست الکترونیکی:
Momidpanah@tvu.ac.ir

چکیده

به دلیل اهمیت روزافزون انرژی، بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی سیستم‌های تولید قدرت با شناخت پارامترهای مؤثر بر عملکرد واحد، امری ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر، واحد آنسالدو، یکی از واحدهای چرخه ترکیبی رایج کشور بررسی شده است. در این پژوهش، واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد به‌طور کامل مدل‌سازی و تحلیل شد و پس از به‌دست آمدن راندمان و توان تولید نیروگاه، بالانس حرارتی مربوط به تمام تجهیزات نیروگاه مشخص گردید و سپس تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد واحدهای گازی و بخار آن پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که هرکدام از واحدهای گازی این نیروگاه دارای راندمان ۳۴ درصد و توان تولیدی ۱۳۴ مگاوات در شرایط طراحی می‌باشند که با کوپل شدن به واحد بخار راندمان کل نیروگاه به ۵۰ درصد و توان تولیدی آن به ۴۲۲ مگاوات می‌رسد و با بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر راندمان و توان تولیدی مشاهده گردید که با افزایش دمای محیط، راندمان نیروگاه ۱۴ درصد کاهش یافت که می‌توان با فعال کردن سیستم کولر تبخیری، این کاهش را جبران کرد و تولیدی کل را حدود ۱۰ الی ۱۵ مگاوات افزایش داد.

مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی به دلیل پاکی و راحتی انتقال و تبدیل آسان به دیگر انرژی‌ها جزو بهترین انرژی‌ها می‌باشد؛ به‌طوری که روزبه‌روز بر تقاضای استفاده از این انرژی در جهان افزوده می‌شود. واحدهای گازی و سیکل ترکیبی، یکی از مهم‌ترین منابع تولیدکننده انرژی الکتریکی در صنعت نیروگاهی دنیا هستند. نیروگاه سیکل ترکیبی در واقع ترکیبی از توربین بخار و توربین گازی است؛ به‌نحوی که ژنراتور توربین گازی برق را تولید می‌کند و درعین حال انرژی حرارتی تلف‌شده از توربین گاز (توسط محصولات احتراق) برای تولید بخار موردنیاز توربین بخار استفاده می‌شود و به این طریق برق اضافی تولید می‌گردد. با ترکیب کردن این دو با یکدیگر، سیکل بهره‌وری نیروگاه افزایش می‌یابد. بازده الکتریکی از یک چرخه ساده نیروگاه برق بدون استفاده از اتلاف گرما به‌طور معمول راندمانی بین ۲۵ تا ۴۰درصد دارد، در حالی که همان نیروگاه در حالت چرخه ترکیبی، راندمان الکتریکی حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد را دارا است. تجزیه‌وتحلیل عددی ترمودینامیکی که شامل انرژی و اگزرژی می‌باشد و یکی از راه‌حل‌های افزایش راندمان و توان تولیدی چرخه‌های تولید توان است [۱-۴].

با توجه به مطالب بیان شده و به دلیل اهمیت روزافزون انرژی و قانون هدفمندسازی یارانه‌ها که حاصل تغییر نگرش بازار انرژی و تمایل به سمت بازار آزاد در این عرصه می‌باشد و افزایش مصرف انرژی، محدود بودن منابع طبیعی، حرکت در راستای طرح توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست باید تا حدامکان از هدررفت و اتلاف انرژی جلوگیری کند و در زمینه استفاده بهینه از منابع انرژی در کشور قدم‌هایی برداشته شود؛ بنابراین بهینه‌سازی سیستم‌های تولید قدرت و کاهش مصرف انرژی آنها، امری ضروری است؛ لذا بررسی پارامترهای مؤثر و تحلیل ترمودینامیکی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بسیار مؤثر است و پژوهش‌های بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته که در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم.

نخستین پیشرفت‌های تئوری در زمینه نیروگاه‌های گازی- بخاری را سیپلو بروتر در سال ۱۹۶۰ ایجاد کرد [۵]. محققان بسیاری مانند زرماک و وونش، آنالیز مقدماتی ترمودینامیکی برای یک نیروگاه سیکل ترکیبی عملی ۱۲۵ مگاواتی را انجام دادند و تلفات را در اجزای مختلف محاسبه کردند [۶]. احمدی و دنسر، یک نیروگاه سیکل ترکیبی با بویلر اضافی را از دیدگاه قانون اول و دوم ترمودینامیک و همچنین از منظر اگزرژی اقتصادی بررسی کردند. سپس آنها با تعریف تابع هدف هزینه کلی و با روش الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی سیکل پرداختند و مقادیر بهینه پارامترهای طراحی را به‌منظور کمینه کردن تابع هدف مربوطه به‌دست آوردند [۷-۹].

سیکل‌های ترکیبی دارای تنوع ساختاری قابل‌توجهی هستند که از آن جمله تفاوت از لحاظ تعداد سطوح فشاری بویلر بازیاب حرارت است که چنین تفاوت‌هایی در کیفیت برق تولیدی از جنبه‌های فنی و اقتصادی مؤثر است.

باسیلی در تحقیقی به نقش پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت برق تولیدی یک نیروگاه ترکیبی سه‌فشاره براساس راندمان سیکل پرداخت [۶]. ردی و محمد (۲۰۰۷) یک نیروگاه سیکل ترکیبی گاز طبیعی را تحلیل کردند تا تأثیر دمای ورودی و نسبت فشار توربین گاز را بر کارایی اگزرژی بررسی کنند [۱۰]. سو و چانگ (۲۰۰۴) طراحی مهندسی و تحلیل اگزرژی سیستم‌های تولید قدرت را براساس توربین گاز انجام دادند [۱۱]. احمدی و طغرایی نیز (۲۰۱۶) تحلیل انرژی نیروگاه بخار شهید منتظری در اصفهان را هدف‌گذاری کردند [۱۲].

در زمینه تولید منحنی پارتو، گنجه کویری و همکارانش به بهینه‌سازی یک سیکل ترکیبی دوفشاره براساس دو تابع هدف پرداختند که تابع اول نرخ هزینه واحد و تابع دوم راندمان اگزرژی سیکل ترکیبی موجود بوده است. با در نظر گرفتن نوع سیکل موردنظر در این تحقیق، نسبت فشار کمپرسور، دمای محفظه احتراق و اختلاف دمایی نقطه پینچ از پارامترهایی با بیشترین تأثیر بر خصوصیات فنی و اقتصادی چرخه در بهینه‌یابی چرخه ترکیبی بیان شده است [۱۳].

حبیب و همکاران با تحلیل انرژی و اگزرژی یک چرخه برایتون دریافتند که خنک‌کاری با استفاده از کولرهای تبخیری، مقدار NOx را به‌طور قابل‌توجهی از ۱۰۰۰ ppm به ۱۰۰ ppm کاهش می‌دهد [۱۴]. فاروک و همکاران به تأثیر دمای هوای ورودی به کمپرسور بر میزان تولید الکتریسیته و مصرف سوخت در نیروگاه پرداخته‌اند و نتایج حاکی از آن بود که افزایش دمای هوای ورودی به کمپرسور (کاهش چگالی هوای ورودی)، کاهش جریان جرم به کمپرسور و افزایش کار مصرفی کمپرسور را در پی دارد [۱۵].

در این پژوهش، ابتدا به بررسی ساختار واحد آنسالدو نیروگاه چرخه ترکیبی پرداخته و سپس از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک (تحلیل ترمودینامیکی) بررسی شد. به‌منظور مدل‌سازی سیکل مربوطه با استفاده از نرم‌افزار ماژولار ترموفلو[1] و داده‌های واقعی، طراحی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی انجام شد و سپس برای مدل‌سازی چرخه از دیدگاه قانون اول، از موازنه انرژی برای حجم کنترل در شرایط پایا، استفاده گردید و در نهایت با داده‌های واقعی موجود در آزمون کارایی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی اعتبارسنجی صورت گرفت و در ادامه کار با توجه به اهمیت بهینه‌سازی سیستم‌های تولید قدرت و کاهش مصرف انرژی آنها در تولید برق کشور، به تحلیل و بررسی بازده حرارتی نیروگاه مذکور و پارامترهای مؤثر بر راندمان واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی در شرایط خارج از نقطه طراحی پرداخته شد. نوآوری تحقیق حاضر را می‌توان مدل‌سازی دقیق و نزدیک به واقعیت یکی از واحدهای رایج کشور دانست که با استفاده از تجربیات عملی به بررسی پارامترهای مؤثر و پرکاربرد پرداخته است که به بهره‌برداران نیروگاه‌های چرخه ترکیبی کمک شایانی در زمینه پیش‌بینی عملکرد سیستم در صورت تغییر پارامترهایی مانند دمای هوای محیط، دبی خروجی اگزوز توربین گاز، فشار کندانسور و غیره می‌کند.

مطالعه موردی: واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

نیروگاه سیکل ترکیبی یزد، در عرض جغرافیایی ۳۱/۹۴ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴/۰۴ درجه شرقی است که اطلاعات مهم سایت در جدول ۱ آورده شده و در شکل ۱ نمایی از نقشه هوایی این نیروگاه نشان داده شده است.

واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین واحدهای نیروگاهی کشور که شامل ۲ واحد گازی، دو عدد بویلر بازیاب حرارتی، یک عدد توربین بخار، یک عدد کندانسور تماس مستقیم و یک عدد برج خنک‌کن خشک (هلر) می‌باشد. در این واحد از توربین‌های گازی V94.2 ساخت شرکت توگا مپنا تحت لیسانس آنسالدو ایتالیا و توربین بخار E-Type استفاده شده است.

جدول ۱. اطلاعات سایت نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

Latitude	31.94°N	
Longitude	54.04°E	
Altitude	1200 m	
Wind Velocity	125 Kilometer per hour	
Ambient Temperature	Average	19 °C
	Maximum (Average)	26.3°C
	Minimum (Average)	11.4°C
	Maximum (Absolute)	46 °C

[1] Thermoflow

	Minimum (Absolute)	-16°C
Humidity	Average	32 %
	Maximum	95 %
	Minimum	13 %

شکل ۱. نقشه هوایی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

سوخت اصلی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد گاز طبیعی و سوخت جایگزین آن گازوئیل می‌باشد. ترکیب اجزا و خواص سوخت‌های مورداستفاده در نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۲. اطلاعات سوخت مصرفی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

Natural Gas		Gas Oil	
METHANE (% MOLE)	84.55	DENSITY (kg/m3)	820 to 860
ETHANE (% MOLE)	9.92	CARBON RESIDUE (%WEIGHT)	0.1
PROPANE (% MOLE)	3.87	ASH (% WEIGHT)	0.01
ISO BUTANE (% MOLE)	0.37	ASH (% WEIGHT)	0.05
NORMAL BUTANE (% MOLE)	0.67	SULPHUR (% WEIGHT)	1
NORMAL BUTANE (% MOLE)	0.09	LOW CALORIFIC VALUE (kJ/kg)	42700
NORMAL PENTANE (% MOLE)	0.09	DIESEL INDEX	55
CARBON DIOXIDE (% MOLE)	0.35	CETANE INDEX	50

Natural Gas		Gas Oil
NITROGEN (% MOLE)	0.09	
MOLECULAR WEIGHT	19.17	
LOW CALORIFIC VALUE (kJ/sm3)	38154	
DEW POINT (°C)	-46.6	

بویلرهای بازیاب مورداستفاده در نیروگاه سیکل ترکیبی یزد از نوع دو فشاره با جریان طبیعی آب/بخار و ساخت شرکت کره‌ای DUSAN & MASBA می‌باشد. اطلاعات جریانی در بویلر بازیاب نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در جدول ۳ و در جدول ۴ نیز اطلاعات توربین بخار نشان داده شده است.

جدول ۳. اطلاعات بویلر بازیاب واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

Site Yazd Solar				
HRSG				
HP Section				
Temperature of Water/Steam				
1	Inlet/Outlet of Superheater 3	°C/°C	456.3 / 523	
2	Inlet/Outlet of Superheater 2	°C/°C	390.8 / 464.9	
3	Inlet/Outlet of Superheater 1	°C/°C	310.3 / 390.8	
4	Inlet/Outlet of Economizer 4	°C/°C	282.7 / 306.2	
5	Inlet/Outlet of Economizer 3	°C/°C	212.8 / 282/7	
6	Inlet/Outlet of Economizer 2	°C/°C	179 / 212.8	
7	Inlet/Outlet of Economizer 1	°C/°C	141.3 / 179	
LP Section				
Temperature of Water/Steam				
1	Inlet/Outlet of Superheater	°C/°C	180 / 236.5	
2	Inlet/Outlet of Deaerator	°C/°C	124.8 / 143.1	
3	Inlet/Outlet of Preheater	°C/°C		
Pressure Drop of Water/Steam				
1	Across Superheater	mbar	1.2	
2	Across Preheater	mbar	0.4	
Operating Pressure			LP	HP
1	Outlet of Final Superheater	bar	9.6	95.1
2	Drum	bar	10.6	98.9
Pinch Point & Approach Point Temperature				
1	HP	°C	7.7 / 4.3	
2	LP	°C	18 / 37.3	
Duct Burner				
1	Outlet Temp.	°C	612.1	

جدول ۴. اطلاعات توربین بخار واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

Steam Turbine			
Rated Capacity 159 MW			
HP Turbine Stop Valve Inlet			
Item No.	Particular	Units	Value
1	Flow Rate	kg/s	133.93
2	Press.	bar	90
3	Temp.	°C	520
LP Turbine Stop Valve Inlet			
Item No.	Particular	Units	Value
1	Flow Rate	kg/s	18
2	Press.	bar	8.5
3	Temp.	°C	230
Exhaust Steam Pressure: 0.14 bar			

اطلاعات توربین گاز نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در جدول ۵ نشان داده شده است.

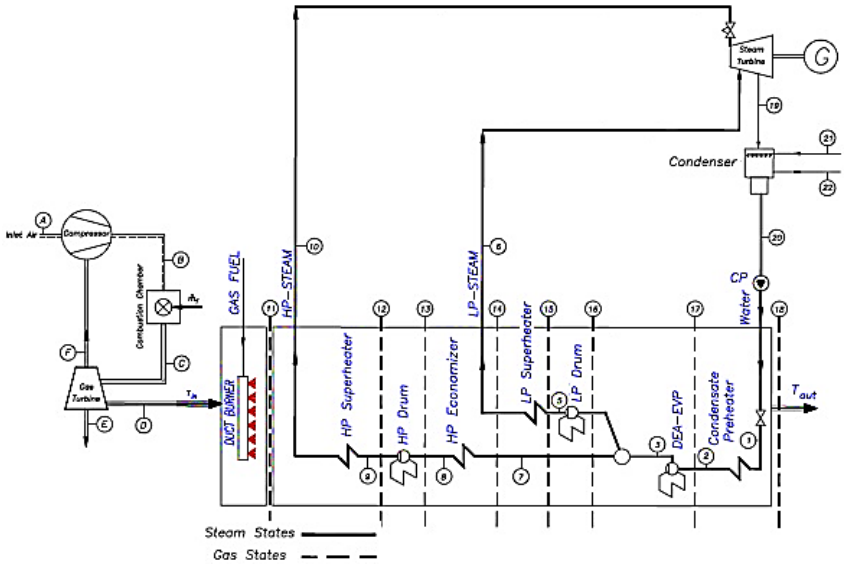
جدول ۵. اطلاعات توربین گاز واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

Gas Turbine Type: V94.2		
Item No.	Particular	
1	No of GTs	2
2	Rated Power Output(kW)	154500
3	Turbine Inlet Temperature(°C)	1060
4	Efficiency at Rating Power Output (%)	0.339
5	Mass Flow rate at Compressor(kg/s)	505
6	Emissions (ppmvd)	NO_x = 25 CO = 10
7	Inlet Pressure Loss (mbar)	10
8	Outlet Pressure Loss (mbar)	7.5

با استفاده از اطلاعات استخراج شده از واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل در نرم‌افزار ماژولار ترموفلو پرداخته شده است.

معادلات حاکم بر تئوری مسئله

برای تحلیل ترمودینامیکی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد از معادلات بقا انرژی در حجم کنترل استفاده شده است. معادلات حاکم برای یک سیکل دوفشاره نمونه که شماتیک آن در شکل ۲ نمایش داده شده نیز نوشته شده است.



شکل ۲. شماتیک یک نمونه نیروگاه سیکل ترکیبی دوفشاره

قانون بقای جرم حاکم بر حجم کنترل در شرایط پایا

$$\sum m_i = \sum m_e \tag{۱}$$

قانون بقای انرژی حاکم بر حجم کنترل در شرایط پایا

$$Q - W = \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) - \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i\right) \tag{۲}$$

قانون بقای انرژی حاکم بر اجزای سیکل ترکیبی

توان مصرفی کمپرسور

قانون اول ترمودینامیک برای کمپرسور که نشان‌دهنده توان مصرفی کمپرسور است در معادله زیر بیان شده است:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_{air}(h_B - h_A) = \dot{m}_{air} c_P (T_B - T_A) \tag{۳}$$

که در آن $\dot{m}_{air}$ دبی هوای ورودی و c_P گرمای ویژه هوا در فشار ثابت و T_A دمای هوای ورودی به کمپرسور و T_B دمای خروجی از کمپرسور می‌باشد که طبق رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

توان حرارتی محفظه احتراق

قانون اول ترمودینامیک برای هیتر که نشان‌دهنده توان حرارتی اضافه شده به هوا می‌باشد در معادله زیر بیان شده است [۱۶]:

$$T_B = T_A \times [(1+\frac{1}{\eta_{com}}) \times (r_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)] \quad (۴)$$

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{air}(h_C - h_B) = \dot{m}_{air} c_P (T_C - T_B) \quad (۵)$$

که در روابط فوق γ وزن مخصوص سیال، r_c نسبت تراکم کمپرسور و η_{com} بازده آیزنتروپیک کمپرسور می‌باشد.

توان تولیدی توربین

قانون اول ترمودینامیک برای توربین که نشان‌دهنده توان تولیدی در توربین است در معادله زیر بیان شده که T_D از رابطه (۷) به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{air}(h_C - h_D) = \dot{m}_{air} c_P (T_C - T_D) \quad (۶)$$

$$T_D = T_C \times \left(1 - \eta_{gt} \times (1 - r_T^{\frac{\gamma-1}{\gamma}})\right) \quad (۷)$$

که در روابط فوق T_C دمای گازهای ورودی به توربین گاز، r_T نسبت فشار توربین و η_{gt} بازده آیزنتروپیک توربین گاز می‌باشد. کل کار خاص تولید شده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$W_{net} = W_{Turbine} - W_{compressor} \quad (۸)$$

و در نهایت راندمان سیکل موردنظر از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\eta_{NET} = \frac{\dot{W}_{NET}}{\dot{Q}_{IN}} \quad (۹)$$

در چرخه‌های ترکیبی، گاز داغ حاصل از احتراق پس از عبور از توربین گاز وارد بویلر بازیاب می‌شود و حرارت خود را توسط مبدل‌های حرارتی به آب داخل بویلر می‌دهد. بخار یا آب گرم تولید شده برای تولید برق در توربین بخار استفاده می‌گردد. بویلر بازیاب حرارت از چندین بخش تشکیل شده است که در ادامه به مدل‌سازی هریک از این بخش‌ها می‌پردازیم:

در روابط زیر منظور از $\dot{m}_g$ دبی گازهای داغ عبوری از ماژول‌های بویلر و $\dot{m}_s$ دبی بخار عبوری از ماژول‌های بویلر بازیاب می‌باشد.

سوپرهیتر فشار بالا

در رابطه زیر $\dot{m}_{s,HP}$ دبی بخار ورودی به توربین فشار قوی می‌باشد.

$$\dot{m}_g C_p (T_d - T_{12}) = \dot{m}_{s,HP}(h_{10} - h_9) \quad (۱۰)$$

درام فشار بالا

$$\dot{m}_g C_p (T_{12} - T_{13}) = \dot{m}_{s,HP}(h_9 - h_8) \quad (۱۱)$$

اکونومایزر فشار بالا

$$\dot{m}_g C_p (T_{13} - T_{14}) = \dot{m}_{s,HP}(h_8 - h_7) \quad (۱۲)$$

سوپرهیتر فشار پایین

$$\dot{m}_g C_p (T_{14} - T_{15}) = \dot{m}_{s,lp}(h_6 - h_5) \quad (۱۳)$$

درام فشار پایین

$$\dot{m}_g C_p (T_{15} - T_{16}) = \dot{m}_{s,LP}(h_5 - h_3) \quad (۱۴)$$

دی اریتور

$$\dot{m}_g C_p (T_{16} - T_{17}) = \dot{m}_{s,lp}(h_3 - h_2) \quad (۱۵)$$

پیش‌گرمکن

$$\dot{m}_g C_p (T_{17} - T_{18}) = \dot{m}_{s,lp}(h_2 - h_1) \quad (۱۶)$$

توان توربین بخار

$$\dot{W}_{st} = \dot{m}_{st,in}(h_{st,in} - h_{st,out}) \quad (۱۷)$$

بازده ایزنتروپیک توربین بخار

$$\eta_{ise,st}\left(h_{st,in} - h_{st,out,ise}\right) = (h_{st,in} - h_{st,out}) \quad (۱۸)$$

$$(\dot{m}_{s,HP}h_{10} + \dot{m}_{s,LP}h_6 - \dot{m}_s h_{19}) = W_{ST,i} \quad (۱۹)$$

که داریم:

$$\dot{m}_{s,HP} + \dot{m}_{s,LP} = \dot{m}_s \quad (۲۰)$$

و برای راندمان توربین بخار نیز داریم:

$$\eta_{ST} = \frac{W_{act}}{W_{ise}} \quad (۲۱)$$

کندانسور

$$\dot{m}_s(h_{19}-h_{20})=\dot{m}_{cooling}(h_{22}-h_{21}).\eta_{cond} \quad (۲۲)$$

پمپ

هر بویلر بازیاب حرارت، از دو پمپ سانتریفوژ فشار بالا و فشار پایین که از مخزن ذخیره هوازدا تغذیه می‌شوند تشکیل شده است. از این پمپ‌ها برای انتقال و افزایش فشار سیال استفاده می‌شود. هد، ظرفیت و دمای سیال در این پمپ‌ها به کارکرد آن بستگی دارد. پارامترهای مؤثر در پمپ، آنتالپی ورودی، خروجی و آنتالپی ایزنتروپیک خروجی هستند.

$$W_{p1}=\frac{\dot{m}_s(h_1-h_{20})}{\eta_{pump}} \quad (۲۳)$$

$$W_{BFP,HP}=\frac{\dot{m}_{S,HP}(h_{out}-h_{in})}{\eta_{BFP}} \quad (۲۴)$$

$$\dot{m}_s(h_{19}-h_{20})=\dot{m}_{cooling}(h_{22}-h_{21}) \quad (۲۵)$$

راندمان حرارتی سیکل گاز

$$\eta_{gas,cycle}=\frac{W_{GT}-W_{Com}}{Q_{in}} \quad (۲۶)$$

راندمان سیکل توربین بخار

$$\eta_{st}=\frac{W_{ST}-W_{PUMP}}{Q_{HRSG}} \quad (۲۷)$$

راندمان سیکل ترکیبی

$$\eta_{CCPP}=\frac{W_{ST}+W_{GT}-W_{Com}-W_{pump}}{Q_{in,ccpp}} \quad (۲۸)$$

در این روابط، زیرنویس‌های GT، Com، ST به‌ترتیب به معنای توربین گاز، کمپرسور و توربین بخار و $CCPP$ به معنای سیکل ترکیبی می‌باشد.

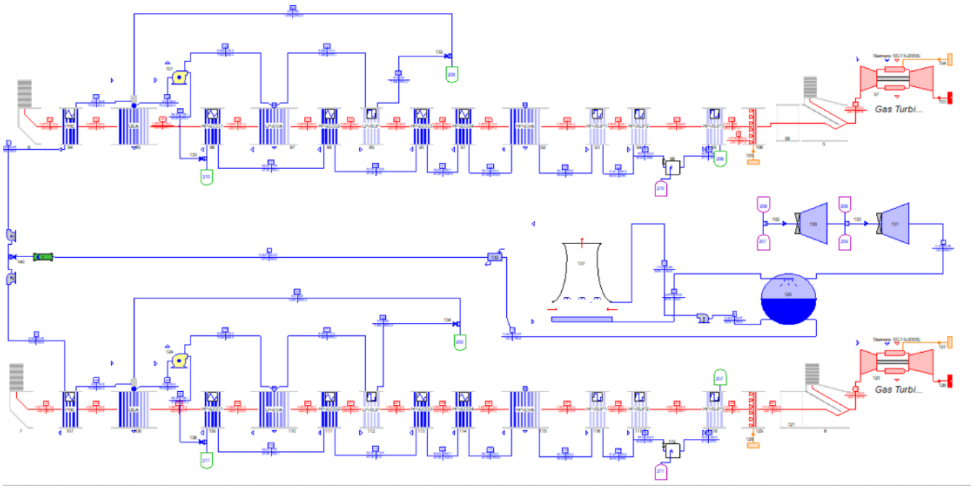
$Q_{in,ccpp}$ در رابطه بالا شامل حرارت انتقالی در محفظه احتراق و حرارت مصرفی در بویلر کمکی (در صورت استفاده) است.

تمامی فرمول‌های استفاده شده در این قسمت برگرفته از مرجع [۱۶] می‌باشد.

مدل‌سازی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در نرم‌افزار ترموفلو

در تحقیق حاضر به مدل‌سازی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با استفاده از دیاگرام موجود در آرشیو فنی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد به‌وسیله نرم‌افزار قدرتمند ترموفلو پرداخته شده است. در این پژوهش با استفاده از ماژول

ترموفلکس که انعطاف‌پذیرترین ماژول نرم‌افزار ترموفلو می‌باشد شبیه‌سازی چرخه موردنظر صورت گرفته است. در شکل ۳ طراحی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در محیط ترموفلکس نمایش داده شده است:

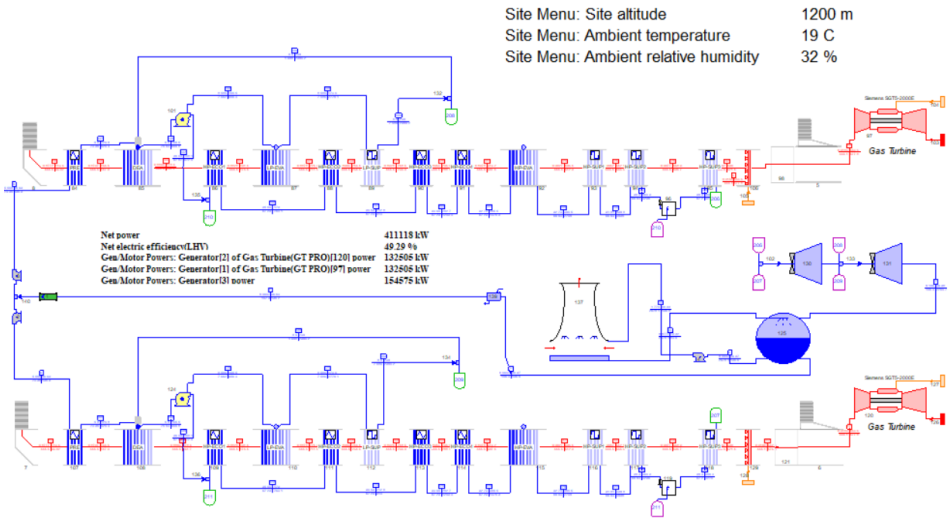


شکل ۳. طراحی واحد آنسالدو نیروگاه چرخه ترکیبی یزد در محیط ترموفلکس

نتایج

خروجی نرم‌افزار ترموفلو

پس از شبیه‌سازی چرخه مذکور، مقادیر فشار، دما، دبی آب و بخار، آنتالپی نقاط مختلف سیکل، مقدار توان و سایر پارامترهای ترمودینامیکی مطابق شکل‌های ۴ و ۵ نیز استخراج شده است.



شکل ۴. خروجی نرم‌افزار ترموفلو به‌صورت دیاگرام سیکل

SYSTEM SUMMARY

Steam Property Formulation : IFC-67

Ambient pressure = 0.8772 bar Temperature = 19 C RH = 32 %

Program revision date: February 25, 2013

	Unit	LHV	HHV
Net fuel input	[kW]	834029	923355
Gross heat rate	[kJ/kWh]	7156	
Net heat rate	[kJ/kWh]	7303	8085
Gross electric efficiency	[%]	50.31	
Net electric efficiency	[%]	49.29	44.52
CHP efficiency	[%]	49.29	
PURPA efficiency	[%]	49.29	
Gross power	[kW]	419588	
Net power	[kW]	411121	
Total auxiliaries	[kW]	8467	
Net process heat output	[kW]	0	

شکل۵. خروجی نرم‌افزار ترموفلو به صورت جدول

اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده

نتایج شبیه‌سازی حاضر با داده‌های موجود در آزمون کارایی واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد طبق جدول ۵ اعتبارسنجی گردید و اختلاف ایجاد شده بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون کارایی در واقع به دلیل بعضی از افت فشارها در خط لوله و فرسودگی تجهیزات می‌باشد که در این شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است (شرایط مرزی آزمون کارایی: دمای محیط ۱۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۳۲ درصد، فشار محیط: ۰.۹ بار، راندمان مکانیکی تجهیزات ۹۵ درصد فرض شده است).

جدول ۵. اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی

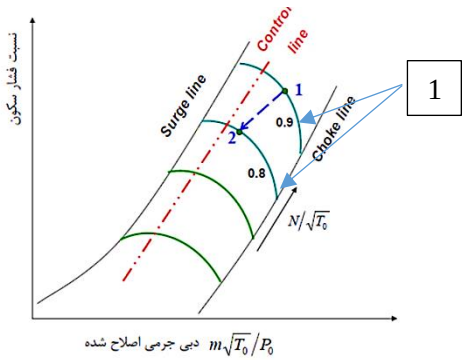
	نتایج حاصل از شبیه‌سازی	نتایج آزمون کارایی	درصد خطا
توان تولیدی توربین گاز (کیلووات)	۱۳۲۵۰۵	۱۳۳۰۰۷	۰.۳۷ درصد
توان تولیدی توربین بخار (کیلووات)	۱۵۴۵۷۵	۱۵۹۰۰۰	۳ درصد
توان تولیدی خالص نیروگاه (کیلووات)	۴۱۹۵۸۸	۴۲۱۹۹۹	۰.۵ درصد

بررسی نقش پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی و راندمان

بررسی تأثیر پارامترهای مستقل مختلف در پارامترهای مهمی مانند راندمان، توان، افت انرژی و ... در بهینه‌سازی سیستم نقش مهمی را ایفا می‌کند. در واقع با بررسی آنالیز حساسیت یک پارامتر، تأثیر و مقدار اثر آن پارامتر مشخص می‌گردد و این در انتخاب روش‌های مناسب برای بهبود عملکرد سیستم قابل‌توجه می‌باشد. در این بخش به معرفی، تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر راندمان واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد می‌پردازیم:

تأثیر دمای هوای ورودی بر عملکرد توربین گاز

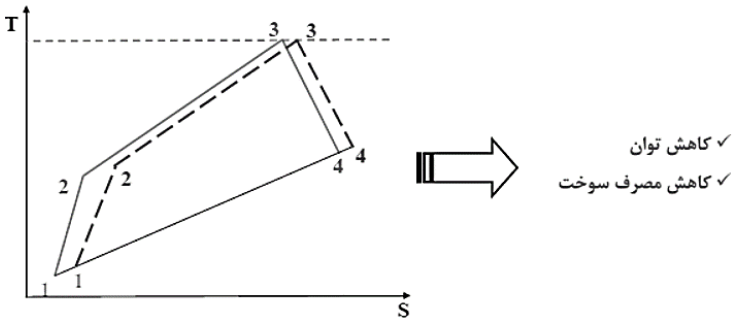
با افزایش دما چگالی هوا کاهش می‌یابد و به همان دلیل بیان شده در بررسی دو پارامتر زیر، از دبی هوای ورودی به کمپرسور کاسته می‌شود. اما این تنها تأثیر افزایش دما بر عملکرد توربین گاز نیست. تغییرات دما باعث تغییر در نسبت فشار کمپرسور می‌شود. بررسی مفهومی این تأثیر در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. بررسی مفهومی تأثیر دمای محیط بر نسبت فشار کمپرسور

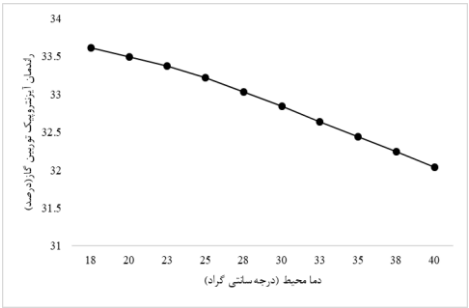
محدوده کاری کمپرسور بین دو خط سرج و چوک قرار دارد. برای جلوگیری از خطرات ناشی از وقوع سرج در مقادیر پایین دبی، عملکرد کمپرسور توسط سیستم آنتی‌سرج روی خط کنترل قرار می‌گیرد. خطوط سبز پررنگ (خطوط شماره ۱) نشان داده شده بیانگر مقادیر بی بعد دور کمپرسور هستند. در اینجا عملکرد کمپرسور در محدوده پایدار بین خط کنترل و خط چوک با توجه به تغییرات دمای هوای ورودی به آن مورد توجه است.

N دور کمپرسور همان‌گونه که بیان شد خطوط سبز پررنگ بیانگر مقدار دور بی‌بعد (خطوط شماره ۱) هستند که و T_0 دمای هوای ورودی به کمپرسور است. نقطه ۱ را در شکل ۶ در نظر بگیرید. با توجه به ثابت بودن دور کمپرسور (توربین گاز با دور ثابت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه که به‌واسطه ژنراتور اعمال می‌شود تحت بهره‌برداری است) با افزایش دما، دبی بی‌بعد کاهش می‌یابد. از طرفی همان‌گونه که بیان شد با افزایش دمای هوا دبی جرمی هوای ورودی نیز کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که در محور افقی این نمودار میزان دبی بی‌بعد کم می‌شود. اکنون با کاهش دبی بی‌بعد از یک سو و همچنین کاهش مقدار دور بی‌بعد، نقطه کاری کمپرسور از نقطه ۱ به سمت نقطه ۲ حرکت می‌کند و این جهت حرکت یکتاست و حالت دیگری برای مکان نقطه ۲ وجود ندارد. حرکت از نقطه ۱ به ۲ که به دلیل افزایش دمای هوای ورودی به کمپرسور اتفاق می‌افتد، همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است باعث کاهش در نسبت فشارکمپرسور می‌شود وکاهش نسبت فشار منجر به کاهش تولید توان می‌گردد. بنابر آنالیز مفهومی ارائه شده، هم به دلیل کاهش دبی و هم به دلیل کاهش نسبت فشار توان توربین گاز کاهش می‌یابد. شکل ۷ تغییر در عملکرد توربین گاز به دلیل افزایش دمای هوا محیط را در دیاگرام دما- آنتروپی نشان می‌دهد. مانند دو پارامتر پیشین، در این حالت نیز با تغییرات به‌وجودآمده سیستم کنترلی دمای گاز را در ورودی توربین گاز در مقدار نامی طراحی کنترل می‌کند. به دلیل افزایش دمای خروجی کمپرسور و نیز کاهش دبی هوای ورودی در اثر افزایش دمای محیط، میزان مصرف سوخت نیز کم می‌شود.

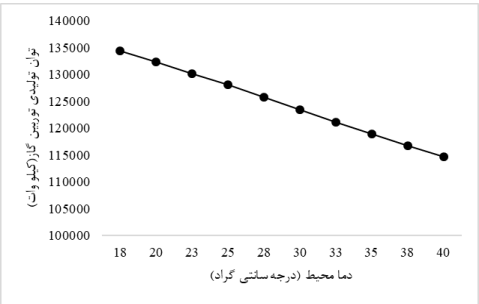


شکل ۷. در دیاگرام دما- آنتروپی توربین گاز

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ با افزایش دمای محیط از ۱۸ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد شاهد کاهش توان تولید توربین گاز از ۱۳۴ به ۱۱۴ مگاوات می‌باشیم و بازده آیزنتروپیک توربین گاز ۲ درصد کاهش یافت.



شکل ۸. تأثیر افزایش دما محیط بر راندمان توربین گاز



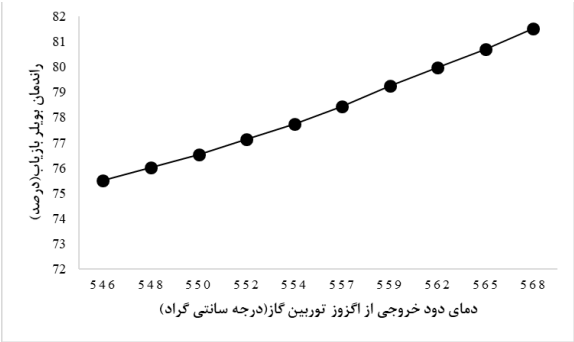
شکل ۹. تأثیر افزایش دما محیط بر توان تولیدی توربین گاز

تأثیر دمای دود خروجی توربین گاز بر بویلر بازیاب

راندمان بویلر بازیاب براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Heat\ recovery\ boiler\ efficiency = \frac{Actual\ heat\ recoveried}{Energy\ from\ GT\ exhaust\ \&\ duct\ burner\ fuel} \quad (۲۹)$$

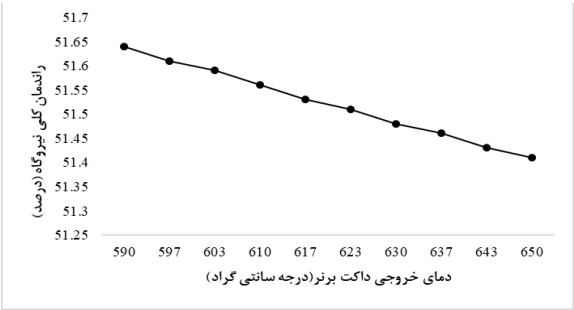
که در این حالت، انرژی سوخت مشعل اضافی براساس ارزش حرارتی پایین سوخت می‌باشد و انرژی دود خروجی توربین گاز شامل مؤلفه گرمای نهان نمی‌باشد. در این حالت، انرژی گرفته شده از دود، اختلاف بین آنتالپی محسوس در خروجی توربین گاز و آنتالپی محسوس در دمای محیط پایگاه می‌باشد. براساس قانون اول ترمودینامیکی، افزایش دمای دود خروجی توربین گاز یا به‌عبارت دقیق‌تر افزایش دمای دود ورودی به بویلر بازیاب، موجب کاهش سوخت داکت برنر و افزایش کارایی راندمان بویلر بازیاب خواهد شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تأثیر دمای دود خروجی از توربین گاز بر راندمان بویلر بازیاب

تأثیر دمای دود خروجی داکت برنر بر بویلر بازیاب

حرارت موردنیاز برای تأمین بخار تغذیه توربین توسط توربین‌های گاز و داکت برنر تأمین می‌گردد. مقدار ایده‌آل این حرارت وابستگی زیادی به دبی آب تغذیه ورودی به بویلر بازیاب حرارت دارد. اگر برای یک دبی بخار ثابت مقدار حرارت بیش‌ازحد موردنیاز باشد؛ راندمان بویلر بازیاب کاهش می‌یابد؛ زیرا بخشی از حرارت بدون استفاده به دودکش هدایت می‌گردد و اگر این حرارت کمتر از مقدار موردنیاز باشد، وارد محدودیت‌های بویلر بازیاب حرارت می‌شود که نباید چنین اتفاقی بیفتد. این امر در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تأثیر دمای دود خروجی داکت برنر بر راندمان بویلر بازیاب

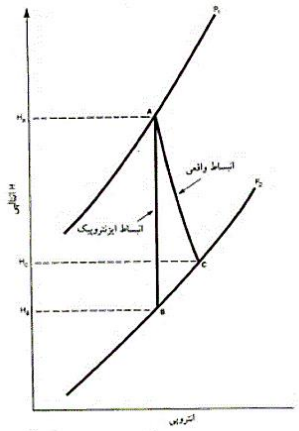
بررسی تأثیر بازده آیزنتروپیک توربین بخار بر راندمان

انبساط توربین واقعی با توجه به یک افزایش در آنتروپی، دارای افت‌ها یا برگشت‌ناپذیری‌هایی می‌باشد که می‌توان آن را در دیاگرام مولیر برای انبساط بین دو فشار دید. زیاد شدن مقدار آنتروپی (یعنی افت‌های بیشتر) کم شدن انرژی قابل‌حصول برای تولید کار را موجب می‌شود. خط انبساط در توربین واقعی شامل افت‌های اصلی زیر می‌باشد:

۱- افت خفقان HP از طریق شیر گاورنر و خط لوله مربوطه

۲- افت‌های خروجی در آخرین مرحله توربین LP

مزیت بازگشت‌ناپذیری‌ها در توربین LP کاهش در رطوبت بخار خروجی است که باعث کاهش ساییدگی در پره‌های طبقه آخر می‌شود؛ بنابراین در ادامه به تأثیر بازده آیزنتروپیک توربین HP، LP و تأثیر بازده آیزنتروپیک توربین LP بر کیفیت بخار خروجی آن می‌پردازیم.

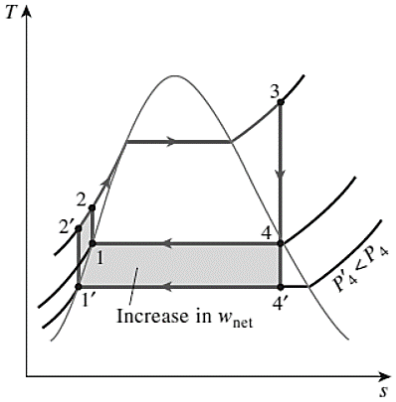


شکل ۱۲. مقایسه انبساط‌های توربین واقعی و آیزنتروپیک

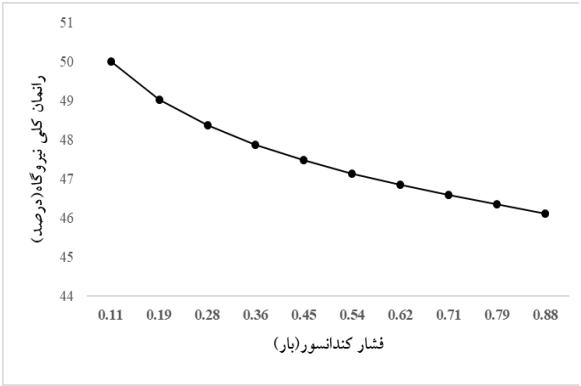
شکل ۱۳. تأثیر بازده آیزنتروپیک توربین بخار بر راندمان

بررسی اثر کاهش فشار کندانسور

بخارآب در کندانسور به‌صورت مخلوط اشباع است و دمای آن برابر با دمای اشباع متناظر با فشار در کندانسور می‌باشد. بنابراین، کاهش فشار کندانسور باعث می‌شود دمای بخارآب و دمایی که تحت آن گرما دفع می‌شود، کاهش یابد. تأثیر کاهش فشار کندانسور بر بازده چرخه در شکل ۱۴ که بیانگر دیاگرام دمای آنتروپی سیکل رانکین ساده می‌باشد نشان داده شده است. برای مقایسه، حالت ورودی توربین را ثابت در نظر گرفته‌ایم. مساحت سایه‌خورده در این نمودار، افزایش کار خالص خروجی را بر اثر کاهش دادن فشار کندانسور از P_4 تا P'_4 نشان داده است. گرمای ورودی موردنیاز نیز افزایش می‌یابد اما این افزایش بسیار کم می‌باشد. به‌طور کلی کاهش فشار کندانسور این است که بازده گرمایی چرخه افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه از لحاظ تئوری با کاهش فشار کندانسور کار خالص افزایش می‌یابد ولی در عوض هم امکان آسیب دیدن توربین وجود دارد و هم کار مصرفی پمپ افزایش می‌یابد؛ معمولاً از این کار صرف‌نظر می‌کنند (شکل ۱۵).



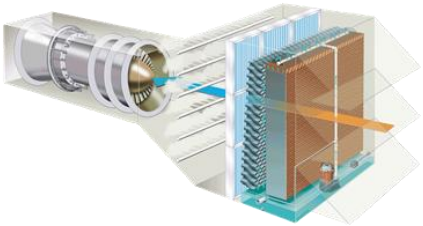
شکل ۱۴. تأثیر کاهش فشار کندانسور بر سیکل ایدآل رانکین



شکل ۱۵. تأثیر فشار کندانسور بر راندمان نیروگاه

بررسی تأثیر سیستم خنک‌کن مدیا هوای ورودی کمپرسور

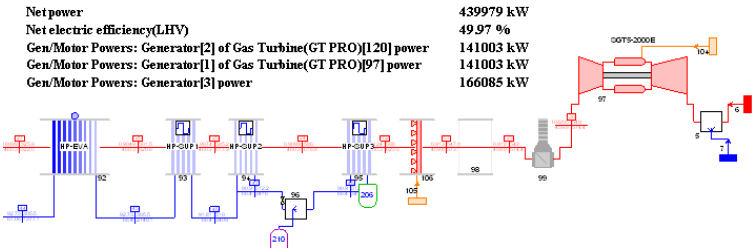
اثرات افزایش دما به‌مراتب وسیع‌تر از پارامترهای تأثیرگذار محیطی دیگر است ولی راه‌هایی برای جلوگیری از اثرات منفی آن وجود دارد که در اینجا به معرفی آنها و بررسی یکی از روش‌ها می‌پردازیم. برای جلوگیری از اثرات منفی ناشی از افزایش دمای هوای محیط، از خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور استفاده می‌شود. سیستم خنک‌کن مدیا یک کولر بزرگ تبخیری می‌باشد که قبل از فیلتر هوای ورودی به کمپرسور نصب می‌شود. این سیستم در نیروگاه چرخه ترکیبی یزد دارای تعدادی پد خنک‌کننده در ۶ طبقه با ابعاد کلی ۱۵x۱۳.۵ متر است که در مسیر هوای ورودی قرار گرفته است و با مصرف یک مترمکعب آب به‌ازای افزایش تولید هر مگاوات ساعت، باعث توزیع یکنواخت آب و افزایش سطح تماس آب و هوا گردیده و موجب کاهش دمای هوای ورودی کمپرسور به میزان ۱۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط طراحی شده که راندمان خنک‌کاری را افزایش می‌دهد و باعث افزایش توان تولیدی می‌گردد که در شکل ۱۶ شماتیک این سیستم نمایش داده شده است و در شکل ۱۷ سیستم مدیا بالادستی نصب شده در واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد نشان داده شده است.



شکل ۱۶. شماتیک سیستم مدیا

شکل ۱۷. سیستم مدیا نیروگاه سیکل ترکیبی یزد

با افزودن سیستم مدیا به سیکل مدل‌سازی‌شده مشاهده شد که توان تولیدی کل سیکل از ۴۲۲ مگاوات به ۴۴۰ مگاوات افزایش یافت که در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.

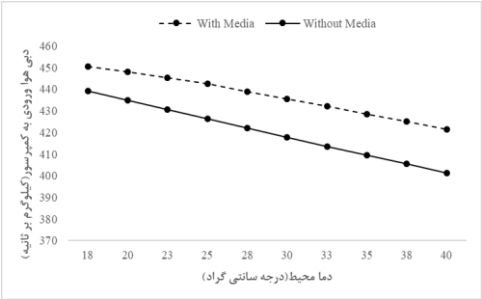


شکل ۱۸. سیکل مدل‌سازی شده با سیستم مدیا

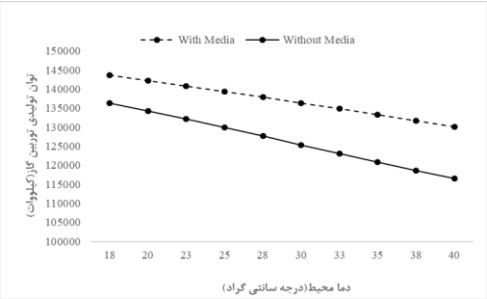
سیستم مدیا به‌طور مستقیم بر دمای هوای ورودی به کمپرسور تأثیر می‌گذارد که با کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور باعث افزایش توان خروجی و راندمان مولد می‌شود که تحلیل فیزیکی این پدیده در ادامه نیز بیان شده است.

$$P\,\dot{V} = \dot{m}RT \;\rightarrow\; \dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} \qquad (۳۰)$$

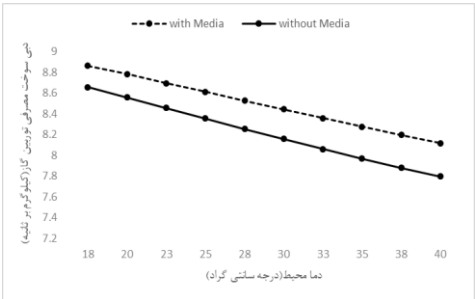
با توجه به معادله ۲۸ مقدار گذر حجمی هوای ورودی به علت جریان صوتی موجود در نازل‌های توربین ثابت می‌باشد؛ بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود دبی هوای ورودی توربین با فشار دارای نسبت مستقیم و با دما دارای نسبت عکس می‌باشد. بنابراین طبق رابطه فوق با کاهش دما، دبی جرمی نیز افزایش می‌یابد که این پدیده در نمودارهای ارائه شده در این قسمت نشان داده شده است. با کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور، شاهد افزایش دبی هوای ورودی به کمپرسور توان می‌باشیم که در نمودارهای شکل‌های زیر نشان داده شده است.



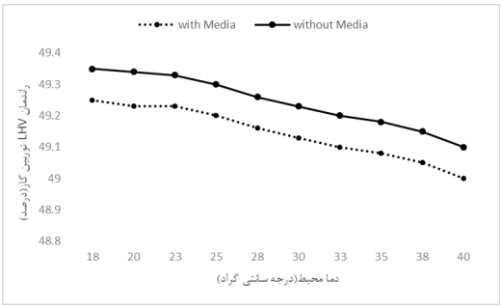
شکل ۱۹. تأثیر سیستم مدیا بر دبی هوای ورودی به کمپرسور



شکل ۲۰. تأثیر سیستم مدیا بر توان تولیدی توربین گاز



شکل ۲۱. تأثیر سیستم مدیا بر دبی سوخت ورودی به توربین گاز



شکل ۲۲. تأثیر سیستم مدیا بر راندمان LHV توربین گاز

با توجه به شکل ۲۱ با در مدار قرار گرفتن سیستم مدیا، دبی سوخت مصرفی توربین گاز با توجه به افزایش دبی هوای ورودی افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به فرمول ۳۱ [۱۷] و همان‌گونه که در نمودار ۲۲ نشان داده شده است راندمان LHV توربین گاز، کاهش جزئی می‌یابد.

$$GT\ LHV\ Eff. = \frac{Electricity\ output\ at\ Generator}{Fuel\ Input} \quad (۳۱)$$

نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به مطالعه کلی ساختار یک نیروگاه گازی و یک نیروگاه سیکل‌ترکیبی دوفشاره پرداخته است. به‌طور کلی نیروگاه‌های گازی در صنایع مختلف پرکاربردتر است و قابلیت به‌کارگیری برای اهداف مختلف را دارند اما نیروگاه‌های سیکل ترکیبی برای تولید برق با راندمان قابل‌قبول احداث شده‌اند. اگرچه نیروگاه‌های گازی، قابلیت‌های گسترده‌ای دارند، دارای مشکلات عمده‌ای می‌باشند که این نوع نیروگاه‌ها را از درجه صرفه اقتصادی خارج کرده است. مشکل اصلی این نیروگاه‌ها راندمان پایین آنها نسبت به سایر نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر که برمبنای مدل‌سازی و تحلیل انرژی دو توربین گاز V94.2 ارائه شده است نشان می‌دهد که راندمان حرارتی توربین‌های گاز برابر با ۳۳/۴۵ درصد به‌دست آمده است که با ترکیب با واحد بخار به راندمانی حدود ۵۰ درصد دست یافتیم. توان تولیدی به‌دست‌آمده واحد آنسالدو نیروگاه سیکل ترکیبی یزد برابر با ۴۲۱ مگاوات است که راندمان آن حدود ۵۰ درصد می‌باشد.

پژوهش حاضر پس از مطالعه و مدل‌سازی این نیروگاه، به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی و راندمان مجموعه توربین گاز، بخار و ترکیبی پرداخته است که نتایج آن به‌صورت زیر بیان می‌شود.

- با افزایش دما، دبی بی‌بعد کمپرسور کاهش می‌یابد و از طرفی همان‌گونه که بیان شد با افزایش دمای هوا دبی جرمی هوای ورودی به آن نیز کاهش می‌یابد که در نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با افزایش دمای محیط از ۱۸ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، توان تولید توربین گاز از ۱۳۴ به ۱۱۴ مگاوات کاهش یافت و همچنین راندمان حرارتی نیز با افزایش دمای محیط با نرخ کمتری از توان به میزان ۲ درصد کاهش یافت.
- استفاده از سیستم مدیا موجب کاهش دمای ورودی به کمپرسور و همچنین افزایش توان تولیدی توربین گاز به میزان ۱۰ الی ۱۵ مگاوات می‌شود و فعال کردن سیستم مدیا در مواقعی دمای هوا بسیار بالا می‌باشد ضروری است.
- افزایش دمای خروجی داکت برنر موجب افزایش راندمان بویلر بازیاب می‌شود و در نتیجه باعث افزایش راندمان کلی نیروگاه می‌گردد.
- کاهش فشار کندانسور باعث افزایش راندمان و توان تولیدی سیکل ترکیبی می‌شود که البته کاهش فشار کندانسور اثرات جانبی دارد؛ برای مثال امکان نشت هوا به داخل کندانسور را فراهم می‌کند و مهم‌تر این که رطوبت بخار آب را در طبقات نهایی توربین افزایش می‌دهد و وجود رطوبت زیاد موجب کاهش بازده توربین و فرسودگی پره‌های توربین می‌شود.

فهرست نمادهای انگلیسی

$\dot{W}$	کار بر واحد زمان
W	کار
$\dot{m}$	دبی جرمی
	جرم
c_P	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت
T	دما
γ	وزن مخصوص
η	بازده آیزنتروپیک
h	آنتالپی
$\dot{Q}$	انتقال حرارت بر واحد زمان
	انتقال حرارت
P	فشار
$\dot{V}$	حجم مخصوص
R	ثابت جهانی گازها
$\underline{V}$	سرعت
	شتاب گرانش

زیرنویس‌ها

i	ورودی
e	خروجی
$com.$	کمپرسور
T	توربین
gt	توربین گاز
net	خالص
g	گاز داغ
s	بخار
HP	فشاربالا
LP	فشارپایین
ise	آیزنتروپیک
act	واقعی
$cond.$	کندانسور
BFP	پمپ تغذیه بویلر
$CCPP$	نیروگاه سیکل ترکیبی
H	بویلر بازیاب
RSG	

References

[1] Hoseinzadeh, S., Ghasemiasl, R., Havaei, D., & Chamkha, A. J. (2018). Numerical investigation of rectangular thermal energy storage units with multiple phase change materials. *Journal of Molecular Liquids*, *271*, 655-660. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.128

[2] Hoseinzadeh, S., Heyns, P. S., Chamkha, A., & Shirkhani, A. (2019). Thermal analysis of porous fins enclosure with the comparison of analytical and numerical methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *138*(1), 727-735. https//:doi.org/10.1007/s10973-019-08203-x

[3] Hoseinzadeh, S., Moafi, A., Shirkhani, A., & Chamkha, A. J. (2019). Numerical validation heat transfer of rectangular cross-section porous fins. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, *33*(3), 698-704. https://doi.org/10.2514/1.T5583

[4] Yari, A., Hosseinzadeh, S., Golneshan, A. A., & Ghasemiasl, R. (2015, July 26–31). *Numerical Simulation for Thermal Design of a Gas Water Heater With Turbulent Combined Convection*. ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference, Seoul, South Korea https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-3305

[5] Ghasemiasl, R., Hoseinzadeh, S., & Javadi, M. (2018). Numerical analysis of energy storage systems using two phase-change materials with nanoparticles. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, *32*(2), 440-448. https://doi.org/10.2514/1.T5252

[6] Bassily, A. (2007). Modeling, numerical optimization, and irreversibility reduction of a triple-pressure reheat combined cycle. *Energy*, *32*(5), 778-794. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.04.017

[7] Ahmadi, P., & Dincer, I. (2011). Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. *Applied Thermal Engineering*, *31*(14), 2529-2540. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018

[8] Ahmadi, P., & Dincer, I. (2011). Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit. *Energy Conversion and Management - ENERG CONV MANAGE*, *52*(5), 2296-2308. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.023

[9] Ahmadi, P., & Dincer, I. (2018). 1.8 Exergoeconomics. *Comprehensive energy systems*, 340-376. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00107-3

[10] Reddy, B., & Issa, K. (2007). Exergy analysis of a natural gas fired combined cycle power generation unit. *International Journal of Exergy - INT J EXERGY*, *4*, 180-196. https://doi.org/10.1504/IJEX.2007.012065

[11] Sue, D.-C., & Chuang, C.-C. (2004). Engineering design and exergy analyses for combustion gas turbine based power generation system. *Energy*, *29*(8), 1183-1205. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.02.027

[12] Ahmadi, G. R., & Toghraie, D. (2016). Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 454-463. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074

[13] Payganeh, G., Mehrpanahi, A., Nikbakht Naserabad, S., & Rezapour, K. (2017). Techno-Economic Analysis Of Rehabilitating And Repowering Of Thermal Power Plants In Iran. *Journal Of Energy Management*, *6*(4), 32-43 .

[14] Habib, M. A., Rashwan, S. S., Haroon, S., & Khaliq, A. (2018). Thermodynamics and emission analysis of a modified Brayton cycle subjected to air cooling and

evaporative after cooling. *Energy Conversion and Management*, *174*, 322-335 . https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.051

[15] Farouk, N., Sheng, L., & Hayat, Q. (2013). Effect of ambient temperature on the performance of gas turbines power plant. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, *10*(1), 439 .

[16] Mohtaram, S., Sun, H., Lin, J., Chen, W., & Sun, Y. (2020). Multi-Objective Evolutionary Optimization & 4E analysis of a bulky combined cycle power plant by CO2/CO/NOx reduction and cost controlling targets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *128* ,109898. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109898

[17] Kehlhofer, R., Rukes, B., Hannemann, F., & Stirnimann, F. (2009). *Combined-cycle gas & steam turbine power plants*. PennWell Books, LLC. https://books.google.com/books/about/Combined_Cycle_Gas_Steam_Turbine_Power_P.html?id=aLcfEAAAQBAJ

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 79-99
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.282479.1489
20.1001.1.23829796.1400.18.3.4.7

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Design and Manufacturing of Gloves for Intelligent Quantification of Hand Vibration

Naser Hamedani[1], Mohammad Karimi Moridani[2*]

[1]M.Sc., Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

[2]Assistant professor, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Health, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 05.05.2021
Revised: 06.18.2021
Accepted: 07.11.2021

Keyword:
Motion recording gloves
Hand vibration
LabVIEW and microcontroller software
Finger joint
Motion analysis

***Corresponding Author:**
Mohammad Karimi Moridani
Email: *karimi.m@iautmu.ac.ir*

ABSTRACT

This research paper aimed to design and manufacture a sample of motion recording gloves to measure angles and quantify the amount of vibration of the finger joints to obtain a suitable criterion for measuring the amount of hand vibration. This glove can record the intensity of vibration, and by connecting to a computer, it can provide motion and vibration signals in the form of diagrams. The device's hardware includes an ATmega32 microcontroller, an LCD, and six bending sensors used in gloves. The present research used LabVIEW software to show online charts. After repeated tests and optimization of the device, samples were taken from 13 people with hand tremors (patients) and 9 people without hand tremors (healthy). In this sampling method, patients were evaluated in three states of displacement, concentration, and position. After recording the samples, processes were performed to extract the hand movement signal diagrams and variables to differentiate between people in the best way. The classification performed in this study between the two groups of healthy and patients showed that experimentally this system had a difference of 2.5 to 3 times between patients and healthy people in 22 people using the average speed feature. This device will help physicians in clinical diagnoses. It was also found that the best diagnostic examination by this device occurs in the parameter of average speed and position.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۹۹-۷۹
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.282479.1489
DOR:20.1001.1.23829796.1400.18.3.4.7
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی و ساخت دستکش در راستای کمی‌سازی هوشمند میزان لرزش دست

ناصر همدانی[۱]، محمد کریمی مریدانی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده بهداشت و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

کلید واژگان:
دستکش ثبت حرکت
لرزش دست
نرم‌افزار لب‌ویو و میکروکنترلر
مفصل انگشتان
آنالیز حرکت

***نویسنده مسئول:** محمد کریمی مریدانی
پست الکترونیکی:
karimi.m@iautmu.ac.ir

چکیده

هدف این مقاله، طراحی و ساخت یک نمونه از دستکش ثبت حرکت با هدف اندازه‌گیری زوایا و کمی‌سازی میزان لرزش مفاصل انگشتان دست با هدف به‌دست آوردن معیاری مناسب برای اندازه‌گیری میزان لرزش دست افراد می‌باشد. این دستکش می‌تواند شدت لرزش را ثبت کند و با اتصال به رایانه، سیگنال حرکتی و لرزش را به شکل نمودار ارائه دهد. سخت‌افزار دستگاه ساخته شده شامل یک عدد میکروکنترلر ATmega32، یک عدد نمایشگر LCD و شش عدد سنسور خمشی به‌کاررفته در دستکش می‌باشد. در این مقاله از نرم‌افزار LabVIEW برای نشان دادن نمودار آنلاین استفاده می‌شود. پس از آزمایش‌های مکرر و بهینه‌سازی دستگاه، از ۱۳ نفر فرد دچار لرزش دست (بیمار) و ۹ نفر فرد بدون لرزش دست (سالم) نمونه گرفته شد. در این روش نمونه‌گیری، بیماران در سه حالت حرکتی، تمرکزی و وضعیتی ارزیابی شدند. پس از ثبت نمونه‌ها پردازش‌هایی صورت گرفت تا نمودارهای سیگنال حرکت دست و متغیرهای ایجاد تمایز بین افراد به بهترین حالت استخراج شود. طبقه‌بندی انجام شده در این پژوهش بین افراد دو گروه سالم و بیمار، نشان می‌دهد این سیستم به‌صورت آزمایشی در تعداد ۲۲ نفر با استفاده از ویژگی میانگین سرعت دارای تمایزی در حد ۲/۵ الی ۳ برابر میان بیماران و افراد سالم می‌باشد. این امر در تشخیص‌های کلینیکی به پزشکان کمک خواهد کرد. همچنین مشخص گردید بهترین معاینه تشخیصی توسط این دستگاه در پارامتر میانگین سرعت و در حالت وضعیتی رخ می‌دهد.

مقدمه

لرزش به‌طور کلی عملکرد نادرست بخشی از مغز است که کنترل حرکات عضلانی در سراسر بدن یا در مناطق خاصی مانند (دست) را به عهده دارد. چند اختلال عصبی مانند مولتیپل اسکلروزیس[۱]، سکته مغزی، آسیب مغزی وجود دارد که به علت آسیب رساندن به مغز و سلول‌های عصبی سبب لرزش دست می‌شوند. لرزش دست در بیماری‌هایی همچون پارکینسون نیز وجود دارد. درمان بیماری پارکینسون، علامتی است؛ یعنی فرد تا زمانی که دارو مصرف می‌کند علامتش کنترل می‌شود ولی اگر قطع کند بیماری بازمی‌گردد و این‌گونه نیست که علائم رفع شود و بهبودی کامل داشته باشد.

از دیرباز تلاش‌های فروانی برای ساخت دستکش‌های ثبت حرکت صورت گرفته است که عمده استفاده آن‌ها برای وسایل بازی و سرگرمی بوده است. اما با آغاز قرن ۲۱ میلادی تحقیقاتی در مورد استفاده آن‌ها در مطالعات حرکتی انسان‌ها و حیوانات و نیز کاربردهایی در واقعیت مجازی و هپتیک صورت گرفته است. امروزه از جمله موضوعات موردبحث میان متخصصان نورولوژی کمی‌سازی این لرزش و محاسبه شاخص‌های آن برای تشخیص، میزان پیشروی، درمان و مطالعه تأثیر داروهای گوناگون بر بیماری لرزش دست است. به این منظور محققان از روش‌هایی برای محاسبه میزان لرزش دست بهره جسته‌اند که بررسی این روش‌ها ما را در راستای رسیدن به راهی بهینه یاری خواهد کرد.

اولین دستکش ثبت حرکت در سال ۱۹۷۷ در شرکت الکترونیک ویژوالیزیشن[۲] ساخته شد که سایری[۳] نام گرفت. در سال ۱۹۸۲ آقای توماس جی[۴] یک مدل سنسور نوری اپتیکال اختراع کرد که برای کاربرد در اندازه‌گیری میزان خمش انگشتان دست مناسب بود. نمونه‌ای از آن را در دستکش ثبت حرکتی که در سال ۱۹۸۹ با همکاری آقای جورون لاینیر[۵] ساخته بود، به‌کار بردند [۱]. تا سال ۲۰۰۰ استفاده از دستکش‌ها بیشتر به مسائل مربوط به بازی‌های رایانه‌ای و کنسول‌های بازی معطوف بود [۲]. تا اینکه در سال ۲۰۰۲ آقای دکتر بوک[۶] نظریه استفاده از آن‌ها به‌عنوان سیستم‌های شبیه‌ساز در دستگاه‌های توان‌بخشی پزشکی را ارائه کرد که تعدادی از مؤسسات و دانشگاه‌های مهم دنیا در حال کار و پژوهش روی این موضوع هستند [۳; ۴].

در مطالعه بنائی و همکاران، یک روش جدید خودکار برای طبقه‌بندی بیماران دچار اختلالات عصبی[۷] با استفاده از ویژگی‌هایی که از سیگنال‌های راه رفتن آن‌ها به‌دست می‌آید، ارائه شده است [۵]. تحقیق دلیری رویکردی برای تشخیص و طبقه‌بندی بیماری‌های اختلال عصبی (هانگتینتون، پارکینسون و اسکلروز جانبی آمیوتروفیک) ارائه کرده است. این تحقیق براساس دینامیک راه رفتن می‌باشد. در این مقاله از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[۸] برای تشخیص از طریق به‌کارگیری کرنل‌های مختلف استفاده کرده است [۶].

همچنین در مطالعه Ye و همکاران موج ضربه‌ای براساس استخراج ویژگی از الگوهای راه رفتن به‌منظور طبقه‌بندی بیماری پارکینسون انجام شد که طبقه‌بندی آن‌ها با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده‌اند و شبکه عصبی با توابع عضویت فازی وزن‌دار شده[۹] انجام شد [۷]. کارمن[۱۰] و همکاران استدلال کردند که اختلال نوشتن، یکی از

---

[1] Multiple Sclerosis (MS)
[2] Electronic Visualization
[3] Sayre
[4] Thomas G
[5] Jaron Lanier
[6] W.G. BOOOK
[7] Neurodegenerative Diseases
[8] Support vector machine (SVM)
[9] Neural network with weighted fuzzy membership functions (NEWFM)
[10] Karman

اولین علائم حرکتی مشاهده‌شده در پارکینسون است که می‌توان به این بیماران از موضوع کنترل سلامت، با استفاده از تغییرات حرکتی در دست‌خط به تشخیص پارکینسون کمک کرد. آن‌ها برای اولین‌بار استخراج ویژگی‌های دست‌خط و مجموعه داده‌های فرم را انجام دادند و بعد از آن از شبکه عصبی عمیق برای تمایز کلاس‌ها استفاده کردند [۸]. در پژوهش دیگری آکدمیر[۱] و همکاران بر تصاویر توموگرافی تابش پوزیترون[۲] مغز ناشی از تغییرات فلوئور و دی‌اکسی گلکوز[۳] برای تشخیص متفاوت بعضی از افرادا مبتلا به پارکینسون تمرکز کردند. این تصاویر با استفاده از نرم‌افزار NeuroQ تجزیه‌وتحلیل بصری شدند [۹]. همچنین تجزیه‌وتحلیل فیلم‌ها، حالت راه رفتن و ویژگی‌های بیماران مبتلا به پارکینسون به تمایز میکروسکوپ الکترونی عبوری[۴] از فلج متعارف پیشرفته[۵] و سیستم‌های متعدد آتروفی[۶] در پژوهش دای بیاسه[۷] و همکاران نشان داده شد [۱۰]. هیم[۸] و همکاران از تصویربرداری تشدید مغناطیسی[9] یک تسلا برای تمایز PD ازPSP، با استفاده از تجزیه‌وتحلیل اجزای اصلی[۱۰] برای استخراج ویژگی و روش SVM برای طبقه‌بندی بیماری‌ها استفاده کردند [۱۱]. علاوه بر این در مطالعه هیکل[۱۱] و همکاران، یک سیستم تشخیصی مبتنی بر طبقه‌بندی گروهی که از داده‌های راه رفتن بیماران برای تشخیص NDD استفاده می‌کند، معرفی شده است. سیستم تشخیصی، مجموعه‌ای از چهار طبقه‌بندی باینری است. تکنیک پیشنهادی علاوه‌بر افراد سالم، در داده‌های پویایی راه رفتن ثبت شده از ۶۴ نفر به نمایندگی از سه بیماری NDD اعمال می‌شود. نتایج، تأثیر روش پیشنهادی در تشخیص NDDها از تجزیه‌وتحلیل راه رفتن را نشان می‌دهد [۱۲]. در تحقیق دیگری، فنگ و همکاران، داده MRI ۰/۳ تسلا را برای تشخیص تفاضلی PD و MSA به‌کار گرفتند و همچنین از آزمون‌های آماری برای مقایسه دو گروه استفاده کردند [۱۳].

در این مقاله، مراحل ساخت یک نمونه از این دستکش بررسی شده است و معضلات پیشرو یعنی استفاده از سنسورهای مناسب برای اندازه‌گیری زوایای حرکتی دست و نحوه جایابی آن‌ها، اخذ کامل و بی‌نقص اطلاعات ارسالی، نمودار کردن اطلاعات، تحلیل خروجی‌های نمودارها و دسته‌بندی اطلاعات ارزیابی گردیده است. با توجه به نبود درمان قطعی در غالب بیماری‌های ایجادکننده لرزش دست، ساخت دستکشی مدنظر قرار گرفت که لرزش را خنثی کند تا فرد از انجام فعالیت‌های روزانه بازنماند. قدم اول استخراج اطلاعات مربوط به لرزش دست و نمودار کردن آنها بود. در این تحقیق با هدف ایجاد دستگاهی برای بررسی ارتعاشات دست توسط ابزارها به روش زاویه‌سنجی مجموعه‌ای شامل سخت‌افزار و نرم‌افزار ویژه تحلیل، طراحی و ایجاد گردید.

مواد و روش‌ها

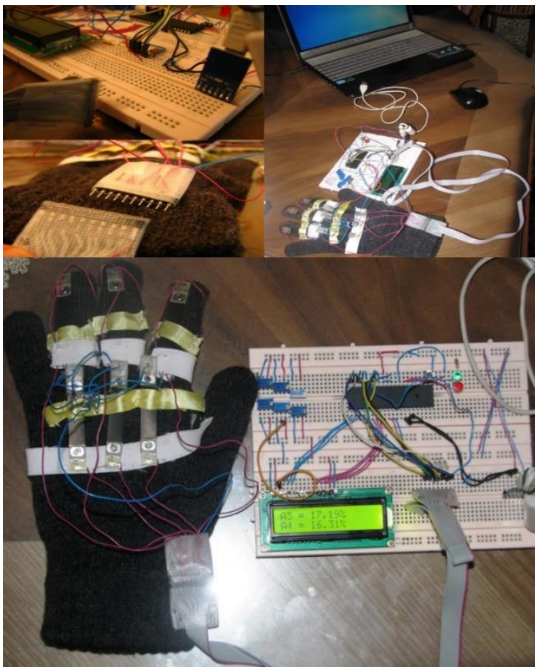
در این بخش پس از معرفی دستکش ساخته‌شده، شیوه عملکردمداری و برنامه طراحی‌شده پرداخته می‌شود. با طرح روند کلی پژوهش، پایگاه داده ثبت شده توسط دستگاه ساخته شده و سپس قطعات استفاده شده معرفی می‌گردد و توضیحاتی در مورد نحوه عملکرد و تنظیم هریک آورده می‌شود.

---

[1] Akdemir
[2] Positron-emission tomography (PET)
[3] Fluoro deoxy glucose (FDG)
[4] Transmission electron microscopy (TEM)
[5] Progressive supranuclear palsy (PSP)
[6] Multiple system atrophy (MSA)
[7] di Biase
[8] Heim
[9] Magnetic resonance imaging (MRI)
[10] Principal component analysis (PCA)
[11] Heikal

معرفی دستگاه

دستگاه ساخته شده در این مطالعه می‌تواند زاویه، سرعت، جابه‌جایی، بیشینه و کمینه خمش هر مفصل در حالت‌های مختلف را اندازه‌گیری کند. سنسور خمشی، نقش زاویه‌یاب را ایفا می‌کند و به میزان خم شدن مفاصل، تغییرات را به‌طور خطی حس می‌کند. این تغییر ولتاژ به میکروکنترلر می‌رود و در آن‌جا توسط برنامه نوشته شده، پردازش می‌شود. سپس اطلاعات زاویه بر LCD به‌صورت عددی بین صفر تا صد نشان داده می‌شود. به همین روش نیز داده‌های گرفته شده از سنسور، از خروجی پورت سریال[1] با کابل به کامپیوتر می‌رود و با نرم‌افزار LabVIEW پردازش لازم صورت می‌گیرد و آنلاین به شکل یک سیگنال ظاهر می‌شود. برای انجام آنالیزهای ثانویه روی سیگنال اخذ شده، داده‌ها به نرم‌افزارهای متلب[2] و اکسل[3] انتقال می‌یابد. پس از اعمال یک فیلتر پایین‌گذر نهایتاً پارامترهای مربوطه مانند زاویه، سرعت، جابه‌جایی، بیشینه و کمینه خمش هر مفصل در حالت‌های مختلف استخراج و تحلیل می‌شود. شکل ۱ نمایی از سخت‌افزار دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. سخت‌افزار دستکش ساخته شده

معرفی پایگاه داده

به‌منظور بررسی لرزش دست، جامعه آماری ۲۲ نفری مشتمل بر ۱۳ فرد بیمار با لرزش دست ناشی از عوامل مختلف و ۹ فرد سالم (۴ نفر زن و ۱۸ نفر مرد با میانگین سنی ۶۰/۶۲ و انحراف معیار استاندارد سنی ۱۵ سال) ارزیابی

[1] USB to Serial Converter
[2] MATLAB
3 Excel

شدند. معیار سالم و بیمار بودن افراد، مشاهده عینی لرزش دست افراد می‌باشد؛ به‌طوری که فارغ از سن یا مریضی افراد اگر کسی هیچ‌گونه لرزشی در دست نداشته باشد برای این پژوهش، سالم مفروض می‌شود و اگر کسی لرزشی کم یا زیاد داشته باشد بیمار محسوب می‌شود. سیستم ساخته‌شده باید بتواند با مقایسه دو گروه افراد سالم و بیمار، برای تفکیک این دو گروه پارامتری معنادار استخراج کند.

پیش از نمونه‌گیری، اطلاعات مربوط به سن، جنسیت، مدت و علت لرزش دست هر فرد در پرسش‌نامه‌ای جداگانه ثبت گردید و در یک جدول گردآوری شد. با توجه به اطلاعات ثبت‌شده، هریک از بیماران لرزش دست خود را ناشی از عوامل مختلفی مانند پارکینسون، استرس و فشارهای عصبی، کهولت سن، عمل قلب، انفجار تروریستی، تصادف، ارثی و ... دانستند. فارغ از اینکه علت لرزش چه می‌باشد این پژوهش به کمّی‌سازی میزان لرزش دست افراد می‌پردازد. لذا هدف اصلی، تشخیص علت بیماری نیست بلکه هدف، اندازه‌گیری میزان لرزش دست یک فرد و بررسی روند درمانش می‌باشد. در این مرحله پیش از شروع، توضیحی درباره غیرتهاجمی بودن روش آزمایش به بیماران ارائه گردید و از آنان به‌منظور انجام آزمایش رضایت گرفته شد.

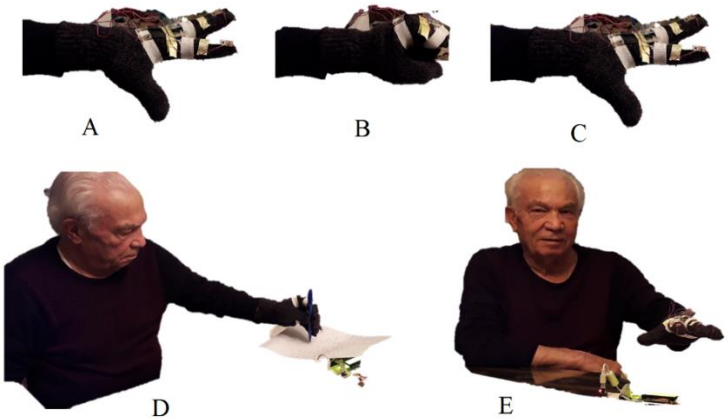
در حین نمونه‌گیری، بیماران در سه حالت ارزیابی شدند: حرکتی، تمرکزی و وضعیتی. به دلیل اینکه اغلب مخاطبان این پژوهش افرادی با سن بالا می‌باشند، لازم است مدت نمونه‌گیری کوتاه و بدون اشتباه باشد و تکرار نمونه‌گیری میسر نمی‌باشد؛ لذا مدت‌زمان هریک از این حالت‌ها ۳۰ ثانیه است و جمعاً مدت کل آزمون یک دقیقه و سی ثانیه می‌باشد. پس از پوشیدن دستکش مخصوص، از بیمار درخواست می‌شود حالت‌های زیر را مرحله به مرحله انجام دهد:

الف) حرکتی: در این حالت بیمار، روی یک صندلی نشسته و دست خود را در مقابل خود، ۱۰ ثانیه باز، ۱۰ ثانیه بسته و دوباره ۱۰ ثانیه باز می‌کند تا مقدار بیشینه و کمینه هر سنسور در رایانه تشخیص داده شود. این ۳۰ ثانیه به دلیل کالیبره کردن دستگاه استفاده شد و از داده‌های به‌دست‌آمده در این مرحله به‌منظور کاهش تأثیرات جانبی، در مقایسه افراد سالم و بیمار استفاده نشده است و فقط اطلاعات حالت تمرکزی و وضعیتی تحلیل می‌شود.

ب) تمرکزی: در این حالت، بیمار به‌صورت نشسته در مقابل خود، مدادی را در دست می‌گیرد و طوری که تمام انگشتان به بدنه مداد چسبیده باشند مداد را با فاصله کمی حول یک نقطه ثابت روی یک کاغذ به مدت ۳۰ ثانیه نگه می‌دارد.

ج) وضعیتی: در این حالت، بیمار به‌صورت نشسته کف دست خود را با فاصله ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری از سطح میز و موازی با آن نگه می‌دارد و این حالت را به مدت ۳۰ ثانیه حفظ می‌کند. این وضعیت، مشابه حالتی است که متخصصان نورولوژی، لرزش دست بیماران خود را به‌صورت عینی معاینه می‌کنند.

در شکل۲، تصاویر A تا C روش نمونه‌گیری در حالت حرکتی (۱۰ ثانیه باز، ۱۰ ثانیه بسته و دوباره ۱۰ ثانیه باز)، تصویر D روش نمونه‌گیری در حالت تمرکزی (به مدت ۳۰ ثانیه) و تصویر E روش نمونه‌گیری در حالت وضعیتی (به مدت ۳۰ ثانیه) را نشان می‌دهد.



شکل ۲. A-C: روش نمونه‌گیری براساس حالت حرکت (۱۰ ثانیه باز، ۱۰ ثانیه بسته و ۱۰ ثانیه دوباره باز) ، روش نمونه‌گیری براساس حالت تمرکزی (به مدت ۳۰ ثانیه) و روش نمونه‌برداری براساس حالت وضعیتی (به مدت ۳۰ ثانیه)

روش انجام کار

برای اندازه‌گیری زاویه، سنسورهایی مختلفی بررسی شد. این سنسورها به دلیل معایب زیر مورد استفاده قرار نگرفتند.

۱- پتانسیومتر: به علت ابعاد بزرگش برای مفاصلی همچون زانو کاربرد دارد.

۲- شتاب‌سنج: هزینه بالا و ابعاد نه‌چندان کوچکش نسبت به نیاز ما از معایبش می‌باشد.

۳- استفاده از دوربین و مارکت‌ها: یک روش کلینیکی نمی‌باشد و نیاز به تنظیمات ویژه‌ای دارد.

۴- فیبر نوری: برای تغییرات بسیار کم در اندازه‌گیری زوایا کاربرد دارد.

۵- نوارهای کربنی- پلیمری: تکنولوژی آن در ایران وجود ندارد. این نوارها با خمش ولتاژ تولید می‌کند و با اعمال ولتاژ خم می‌شوند. دوطرفه است.

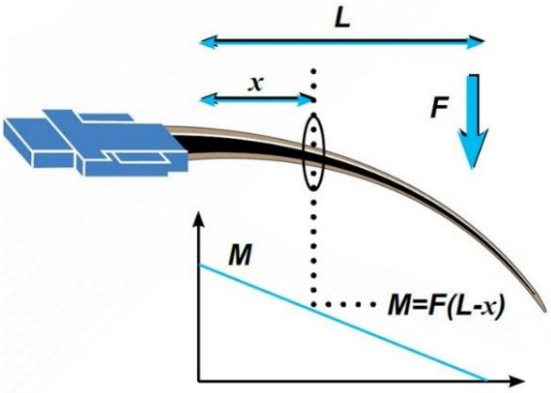
۶- سنسور خمشی: این سنسورها مقاومتی است و با بایاس آن مقاومتش در اثر خمش تغییر می‌کند. در نهایت از سنسور خمشی آرتمن استفاده شد.

به دلیل معایب بیان شده برای دیگر سنسورها و همچنین ویژگی‌های سنسور خمشی آرتمن، مورد ششم انتخاب گردید. سنسورهای تشخیص زاویه براساس خمش، سنسورهای شرکت آرتمن می‌باشد که کاربرد فراوانی دارند و با قیمت مناسب یافت می‌شوند. شکل ۳ نمایش یک نمونه از این سنسور است که در این مطالعه از آن استفاده شده است.

شکل ۳. نمایی از سنسورهای خمشی آرتمن

ویژگی‌های سنسور خمشی بسیار متنوع است. از آنجایی که هیچ‌گونه قطعه متحرک در این سنسور وجود ندارد، عمر مفید، دوام و قابلیت اطمینان بسیار بالایی دارد. این سنسور از عواملی همچون نور، لرزش و تکان هیچ‌گونه تأثیرپذیری ندارد و می‌توان در شرایط محیطی مختلف به‌راحتی از آن استفاده کرد. سبکی و همچنین نازکی، افزایش کارایی در پروژه‌ها را همراه دارد. قابلیت راه‌اندازی آن با مدار کنترل بسیار ساده است.

سنسور خمشی سنجش زاویه، شامل یک نوار قابل‌انعطاف، ماده حساس از جنس گرافیت و بخش کانکتور می‌باشد که اعمال خمش به سنسور و خم کردن آن، سبب تغییر مقاومت به نسبت اندازه زاویه می‌شود. اطلاعات استفاده شده در این بخش از دیتا شیت این محصول جمع‌آوری شده است که از طریق شرکت آرتمن در اختیار محققان قرار داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با اعمال نیروی F به بدنه یک سنسور خمشی با طول L، تغییراتی در طول به مقدار x خواهد داشت. در این حین حد شیب به میزان M تغییر خواهد کرد.



شکل ۴. نیروی اعمالی به سنسور خمش

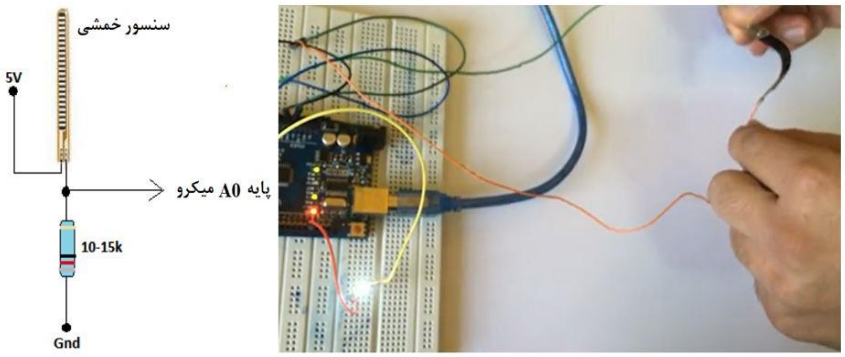
که با توجه به معادله شماره (۱)

$$M = F(L - X) \quad (۱)$$

و از تناسب این معادله با معادله شماره (۲) میزان تغییرات مقاومت، به صورت کاملاً خطی به‌دست می‌آید.

$$R = (L - X)/(2 - \mathrm{Q}) \quad (۲)$$

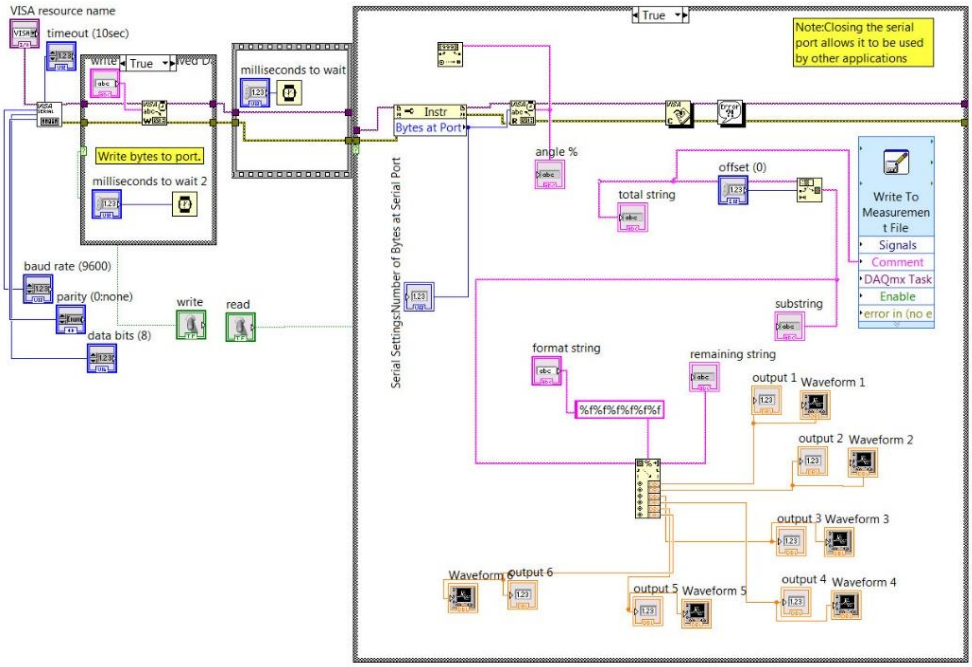
قطعاً یکی از مراحلی که باید قبل از آنالیز نتایج به آن توجه کرد، خروجی به‌دست‌آمده توسط وسایل اندازه‌گیری داده‌ها است. در این مقاله با توجه به اینکه از سنسور خمشی آرتمن استفاده شده است، قبل از استفاده از این سنسور برای اندازه‌گیری میزان لرزش باید از دقت عملکرد این سنسور در راستای اندازه‌گیری صحیح اطمینان حاصل شود. برای کالیبراسیون این سنسور از میکرو AVR استفاده شده است. این سنسور با توجه به اختلاف مقاومتی حاصل‌شده میزان خمش را می‌سنجد. با افزایش خمش، میزان مقاومت افزایش می‌یابد و مقدار ولتاژ خروجی (با توجه به قانون تقسیم ولتاژ) افزایش پیدا می‌کند. در حالت عادی و در وضعیتی که سنسور در حالت طبیعی و صاف قرار دارد میزان مقاومت، هیچ تغییری ندارد و در حالت نرمال خود می‌باشد. به‌منظور اجرای کالیبراسیون خمش‌های مختلف با درجات متفاوت (صفر، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه، ۱۸۰ درجه) بر سنسور اعمال می‌شود و با توجه به ورودی مختلف به پایه A0، LED و سون سگمنت متصل به پایه‌های پورت D میکرو میزان ولتاژ ایجاد شده متناسب با میزان خمش که به روشنایی نیز تولید می‌شود را نشان می‌دهند. شکل ۵ ساختار مداری برای اندازه‌گیری میزان خمش حاصل‌شده در سنسور را نشان می‌دهد. در این گونه سنسورها تغییر مقاومت در اثر خم کردن نسبت به مقاومت کل آن بسیار بالا می‌باشد؛ بنابراین با تبدیل تغییرات مقاومت به ولتاژ و به‌کارگیری یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دقیق (مثلاً ۱۶ یا ۲۴ بیتی از نوع زیگما دلتا) می‌توان تغییرات زاویه را با دقتی فراتر از یک‌دهم درجه به‌دست آورد. مطابق اطلاعاتی که کارخانه سازنده، ارائه کرده است مقاومت این مدل سنسور در حالت صاف حدود ۱۰۰ کیلواهم و در حالت ۴۵ درجه ۱۵۰ کیلواهم و در حالت ۹۰ درجه ۲۰۰ کیلواهم خواهد بود [۱۴].



شکل ۵. راه‌اندازی و چگونگی اندازه‌گیری میزان سنجش سنسور خمشی

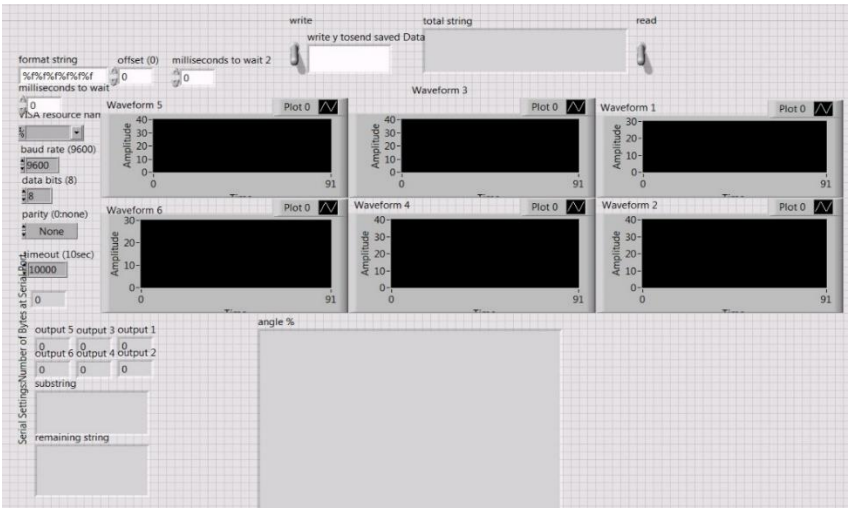
نرم‌افزار لب ویو[1]

در این مقاله برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار LabVIEW استفاده شده و برای ارسال داده‌ها به کامپیوتر به‌صورت آنلاین، از ارتباط سریال کمک گرفته شده است. داده‌های ثبت‌شده به‌صورت نمودار در کامپیوتر به نمایش درمی‌آیند. بلوک دیاگرام ایجاد شده برای آنالیز داده‌های ورودی و تشخیص میزان لرزش دست، در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۶ نیز برای نمایش نمودارهای مختلف به‌صورت آنلاین و بررسی ترند هر نمودار استفاده شد. به‌منظور درک بهتر نحوه طراحی بلوک دیاگرام شکل ۷، هریک از قسمت‌های این شکل در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۶. بلوک دیاگرام نمایش نمودار با LabView

[1] Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW)



شکل ۷. نمایی از برنامه ساخته شده با LabView با هدف نمایش آنلاین نمودارها

نتایج

در این بخش، ابتدا خروجی‌های به‌دست‌آمده آنلاین و سپس پردازش‌های انجام شده به‌صورت آفلاین بررسی می‌گردد. پس از آن، مقایسه‌های صورت‌گرفته و نتایج به‌دست‌آمده ارائه می‌گردد. برای اندازه‌گیری لرزش دست، پس از طراحی و شبیه‌سازی مدار در محیط پروتئوس، در عمل مدار موردنیاز ساخته شد [۱۵]. همچنین با به‌کارگیری سنسور خمشی دستکش موردنظر طراحی و ساخته شد.

برنامه موردنیاز برای اندازه‌گیری زوایایی که سنسورهای خمشی به آن‌ها حساس هستند در محیط CodeVisionAVR نوشته شد و به میکروکنترلر ATmega32 اعمال شد. هریک از نرم‌افزارهای LabVIEW، MATLAB، Hyper Terminal و Excel در قسمتی از فرایند پردازش به‌کار گرفته شد. پس از آزمایش‌های مکرر و بهینه‌سازی، این دستگاه برای نمونه‌گیری از افراد دچار لرزش دست مورد استفاده قرار گرفت. طبق روش نمونه‌گیری مذکور در بخش قبل، دستگاه موفق به ثبت اطلاعات حاصل از دستان جامعه نمونه شد. این آزمایش در سه حالت حرکتی، تمرکزی و وضعیتی انجام گرفت. پس از ثبت نمونه‌ها در سه حالت گوناگون برای هر فرد، پردازش‌هایی صورت گرفت تا نمودارهای سیگنال حرکت دست و متغیرهای ایجاد تمایز بین افراد به بهترین حالت استخراج شود. با توجه به منحنی‌های به‌دست‌آمده توسط دستگاه ساخته‌شده برای آنالیز لرزش، نتایجی حاصل شد که در ادامه به‌ترتیب ارائه می‌گردد.

خروجی آنلاین

اولین موفقیت در این مطالعه، نمایش خروجی سیستم به‌صورت آنلاین روی صفحه نمایش رایانه می‌باشد. دستگاه ساخته‌شده در این پژوهش می‌تواند میزان خمش را اندازه‌گیری کند. سنسور خمشی به میزان خمش مفصل، تغییرات مقاومت را به‌طور خطی دنبال می‌کند. به این صورت که با خم شدن انگشتان، مقاومتش افزایش می‌یابد؛ بنابراین ولتاژ خروجی کاهش پیدا می‌کند. حال این تغییر ولتاژ به مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر می‌رود و در آن‌جا توسط برنامه نوشته‌شده، به شکل درصد بیان می‌شود. این درصدها که نماینده میزان خمش هستند، دیتای خام محسوب

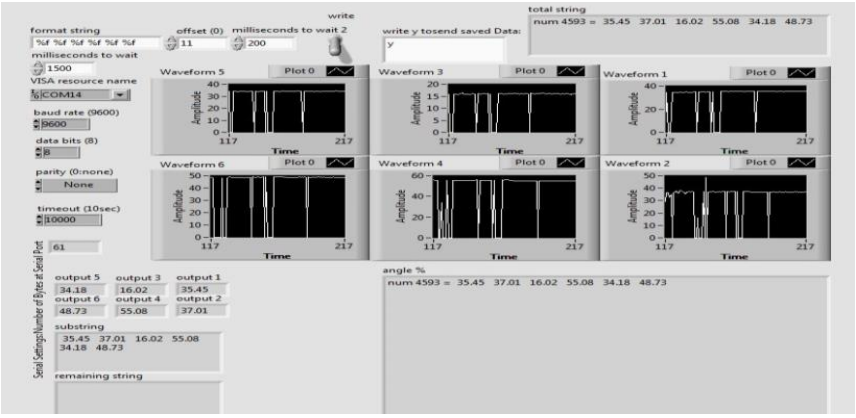
می‌شوند. جدول ۱ اطلاعات به‌دست‌آمده از میزان خمش سنسورهای مختلف (S1 تا S6) تعبیه‌شده روی دستکش را به‌صورت درصد (٪) نشان می‌دهد.

جدول ۱. میزان خمش ثبت‌شده در مفصل به کمک سنسورهای روی دستکش بر حسب درصد

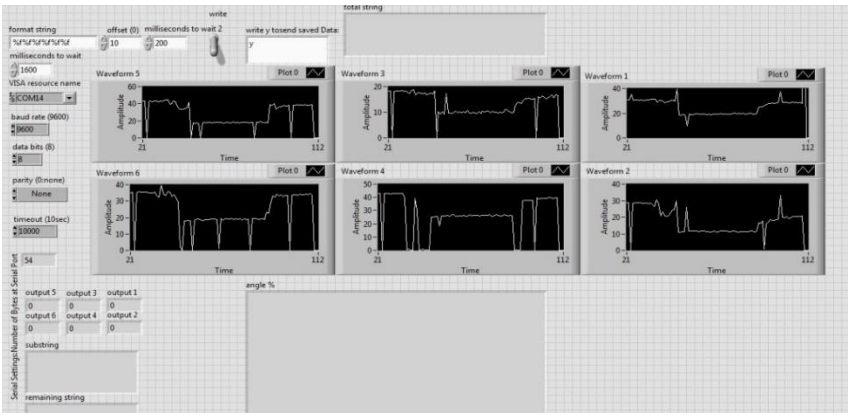
S1 (%)	S2 (%)	S3 (%)	S4 (%)	S5 (%)	S6 (%)
22.27	14.94	14/06	33/59	29.98	25.59
22.17	15.53	13.77	33.59	29.49	25.10
22.75	15.33	13.67	33.69	29.20	24.90
22.75	15.82	14.84	34.08	29.79	26.07
22.56	15.53	13.87	33.98	30.27	25.29
22.36	15.23	13.96	34.08	30.08	25.39
22.36	15.23	13.57	33.89	29.69	25.00
22.46	15.62	14.06	33.69	29.79	25.39
21.78	15.23	14.16	33.98	30.08	25.39
22.66	14.94	13.87	34.08	30.37	25.10
22.66	15.33	14.06	33.79	30/08	25.10
22.56	15.53	14.26	33.79	30.18	25.29

طبق عملکرد ساختاری سنسورها، هر سنسور، کمینه و بیشینه متفاوتی دارد. دیتای خام از میکروکنترلر به LCD می‌رود و مقدار درصد خمش نمایش داده می‌شود. از طرفی این داده‌ها از خروجی پورت سریال[1] توسط کابل به کامپیوتر می‌رود و با نرم‌افزار LabVIEW پردازش لازم صورت می‌گیرد و به‌صورت آنلاین به شکل نمودار درمی‌آیند. شکل ۸ نشان‌دهنده نمودار ترسیم شده در LabVIEW هنگامی که سنسور در اثر هیچ خمشی قرار نگرفته، می‌باشد. شکل ۹ نشان‌دهنده کارکرد این دستگاه در حالت حرکت دست از باز به بسته (مشت) و دوباره باز می‌باشد. در این قسمت از کار، دریافت‌کننده زاویه سنسور خمشی می‌باشد و کار پردازش را میکروکنترلر انجام می‌دهد، سپس صفحه نمایش کامپیوتر، حرکت دست را به‌صورت نمودار نشان می‌دهد.

[1] USB to Serial Converter



شکل ۸. خروجی آنلاین - عملکرد معمولی دستگاه در LabVIEW
(شماره هر نمودار متناظر با شماره سنسور است)



شکل ۹. خروجی آنلاین - عملکرد دستگاه هنگام باز و بسته شدن دست.
نقاط کمینه دیده شده در شکل‌ها حالت مشت شده دست می‌باشد.

پردازش آفلاین

برای انجام آنالیزهای ثانویه روی سیگنال اخذ شده نیاز به انتقال داده‌ها به نرم‌افزارهایی همچون MATLAB و Excel می‌باشد. به‌منظور انتقال داده‌ها، پس از نمایش آنلاین برای هر بیمار، از نمودارها یک فایل متنی[1] در محیط LabVIEW استخراج شد. البته ثبت اطلاعات در یک فایل متنی در محیط Hyper Terminal نیز قابل انجام می‌باشد و مواقعی که صرفاً ثبت داده اهمیت دارد، از Hyper Terminal استفاده می‌شود. در مرحله آماده‌سازی در صورتی که داده‌ای موجود نباشد یا طبق فرمت طراحی‌شده، ثبت نشده باشد، تمام سطر آن داده را حذف می‌کنیم و

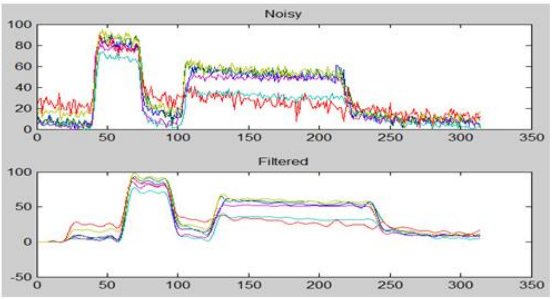
[1] Text (.TXT)

تحت عنوان داده ازدست رفته[1] یاد می‌شود. Miss Data تا حد ممکن باید کاهش یابد. نمونه‌های ابتدایی، نسبت به کل دیتای ثبت شده در حدود ۳۰ درصد Miss Data داشتند. این خطاهای اخذ دیتا، در نمونه‌گیری از جامعه نمونه‌ای که غالباً از افراد مسن تشکیل می‌شود و امکان تکرار آزمون وجود ندارد، بسیار پررنگ‌تر از قبل حائزاهمیت می‌شوند؛ از این رو در چندین مرحله با بهینه‌سازی دستگاه و تغییر ساختارهای برنامه‌نویسی، تلاش برای کاهش نسبت Miss Data به کل دیتای ثبت شده انجام گرفت تا جایی که میزان Miss Data به صفر درصد رسید و این یکی دیگر از موفقیت‌های این پژوهش محسوب می‌شود. یعنی هنگام نمونه‌گیری درحالت عادی و به‌دور از خطاهای انسانی هیچ‌گونه Miss Data توسط دستگاه ثبت نمی‌شود و تمامی دیتاها قابل استفاده می‌باشند.

انتقال به نرم‌افزار متلب

در فرایند پردازش آفلاین، پس از آماده‌سازی ماتریس‌های عددی، اکنون نوبت انتقال اطلاعات به محیط نرم‌افزار متلب رسیده است. حال اولین قدم حذف نویزهای سوار شده روی سیگنال حرکت دست و نرمالیزه کرده آن می‌باشد. برای حذف نویز از یک فیلتر پایین‌گذر در محیط متلب استفاده شده است. فیلتر استفاده شده در این بخش، یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس گذر ۰ هرتز، فرکانس قطع ۱۵ هرتز، دامنه گذر ۰ دسی‌بل و دامنه قطع ۲۵ دسی‌بل می باشد. شکل ۱۰ برنامه نوشته شده برای حذف نویز و سیگنال نویزی و فیلترشده را نشان می‌دهد. محور افقی، نشان‌دهنده تعداد نمونه ارسال شده (دیتا) و محور عمودی، نشانگر میزان زاویه مفاصل انگشت بین ۰ تا ۹۰ درجه است.

```
val=data;
d = fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap,Ast',0.15,0.25,1,60);
designmethods(d)
Hd = design(d,'equiripple');
fvtool(Hd)
y = filter(Hd,val);
figure
subplot(211)
plot(val)
title('Noisy')
subplot(21)
plot(y)
title('Filtered')
```



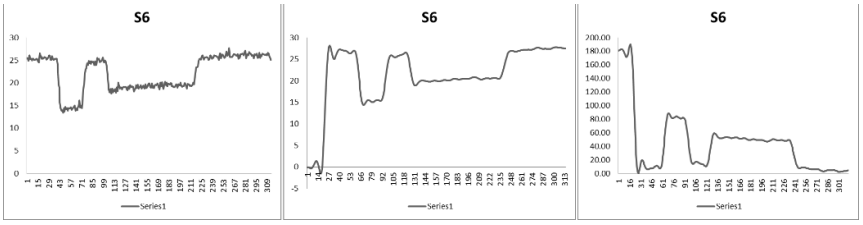
شکل ۱۰. اعمال فیلتر پایین‌گذر روی یک سیگنال نمونه (شامل ۶ سیگنال از ۶ سنسور)

اما اینکه ابتدا سیگنال، فیلتر و سپس نرمالایزه شود یا اینکه ابتدا نرملایزه شود و سپس فیلتر گردد، اختلاف می‌باشد. در اینجا هر دو روش امتحان شد. در روش اول، ابتدا از یک فیلتر پایین‌گذر برای حذف نویزهای سیگنال

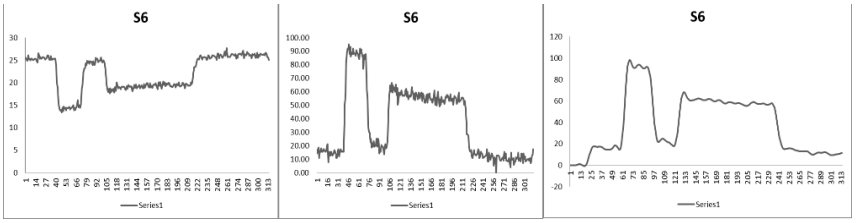
[1] Miss Data

استفاده شد و سپس این سیگنال بین زاویه ۰ تا ۹۰ درجه توسط معادله (۳) به‌صورت خودکار نرمالایزه شد. در این روش به دلیل اختلالات ناشی از فیلتر ابتدایی، پس از نرمالایزه شدن، خروجی مطلوبی مشاهده نشد. شکل ۱۱ نمایش روش اول و شکستت آن می‌باشد. در روش دوم برعکس عمل شد؛ ابتدا داده‌ها بین زاویه ۰ تا ۹۰ درجه نرمالایزه گردید و پس از آن از فیلتر استفاده شد. نتیجه کاملاً موفقیت‌آمیز بود و ماتریس عددی دیتا نشان‌دهنده زاویه حرکت مفاصل موردبررسی بین ۰ تا ۹۰ درجه می‌باشد. در معادله (۳) max، بیشینه و min، کمینه مقدار ثبت شده توسط هر سنسور طی نمونه‌گیری برای هر فرد می‌باشد که در آن abs عملگر قدر مطلق و dat دیتاهای خام ارسالی از سنسورهای دستکش می‌باشد [۱۶]. در ادامه، شکل‌های ۱۱و ۱۲ نشان‌دهنده نتایج اعمال دو روش اول و دوم روی یک سیگنال ثبت شده از سنسور شماره شش (S6) در یک آزمون می‌باشد. در این شکل‌ها محور افقی، نشانگر شماره نمونه ارسال شده (دیتا) و محور عمودی نشانگر میزان زاویه مفاصل انگشت بین ۰ تا ۹۰ درجه می‌باشد.

$$normalize = 90 - \frac{data - abs(max - min)}{min} * 90 \quad (۳)$$



شکل ۱۱. نمایش روش اول (از چپ به راست: سیگنال خام از سنسور ششم، سیگنال فیلتر شده و سیگنال نرمالایزه شده ناموفق)



شکل ۱۲. نمایش روش دوم (از چپ به راست: سیگنال خام، سیگنال نرمالایزه شده بین ۰ تا ۹۰ و سیگنال فیلتر شده)

مشاهده می‌شود که روش دوم خروجی سیگنالی بین صفر تا نود درجه دارد؛ لذا از این روش برای فیلتر و آنالیز استفاده شد.

مقایسه کمّی نتایج آزمون‌های افراد (آنالیز تمایزپذیری)

مقایسه دقیق میزان لرزش دست افراد، نیازمند تعریف متغیرهایی مانند میزان جابه‌جایی هر مفصل و سرعت حرکت هر مفصل می‌باشد. از آنجایی که آزمون‌ها در دو حالت تمرکزی و وضعیتی انجام گرفته است؛ چهار متغیر

به‌صورت مجموع جابه‌جایی حالت تمرکزی[1]، سرعت حرکت حالت تمرکزی[2]، مجموع جابه‌جایی حالت وضعیتی[3]، سرعت حرکت حالت وضعیتی[4] تعریف می‌شود. شایان ذکر است قدرمطلق اختلاف زاویه بین هر دو دیتای ارسالی در جدولی جداگانه محاسبه می‌شوند. این جدول، نمایانگر میزان حرکت هر مفصل در لحظه ارسال دیتای جدید نسبت به دیتای قبلی می‌باشد؛ از این رو مجموع اعداد هر ستون میزان کل حرکت انجام شده توسط یک مفصل (مجموع جابه‌جایی) را نشان می‌دهد. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری این سیستم (۳/۵ نمونه در هر ثانیه) فاصله زمانی بین ارسال هر دو دیتای متوالی ۲۸/۶ میلی‌ثانیه می‌باشد. در نتیجه برای آزمون هر بیمار می‌توان با تقسیم مجموع جابه‌جایی بر هریک از حالت‌های تمرکزی و وضعیتی زمان سپری‌شده در همان حالت، سرعت حرکت هر مفصل در آن حرکت را محاسبه کرد.

در مرحله بعد برای استخراج ویژگی مناسب برای تفکیک دو گروه افراد سالم و افراد دچار لرزش دست، این دو گروه با هم مقایسه شدند. از آنجایی که در هر حرکتی شرایط هر مفصل به لحاظ تغییر زاویه، میزان استفاده و در نتیجه میزان جابه‌جایی و سرعت حرکت با مفصل های دیگر متفاوت است، لازم است در هر حرکت تنها یک مفصل در دو گروه مقایسه گردد. برای مثال در دستکش طراحی‌شده، سنسور S1 نشان‌دهنده مفصل میانی انگشت اشاره است. پارامترهای آماری هر سنسور برای هر گروه به‌صورت جداگانه در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ محاسبه شد. جدول ۲ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج مقایسه پارامترهای آماری در نرم‌افزار SPSS برای سنسور S1

اطلاعات سنسور اول (S1)					
شخص	پارامترها	مجموع جابه‌جایی حالت تمرکزی SDC	سرعت حرکت حالت تمرکزی VC	مجموع جابه‌جایی حالت وضعیتی SDP	سرعت حرکت حالت وضعیتی VP
Control نرمال	تعداد آزمون‌دهندگان N	۹	۹	۹	۹
	میانگین Mean	۳۰/۳	۱/۴	۱۵/۸	۰/۸
	میانه Median	۳۰/۶	۱/۵	۱۶/۳	۱
	واریانس Variance	۵۵/۳	۰/۱	۵۲/۹	۰/۱
	محدوده Range	۲۲/۳	۱/۱	۱۹/۳	۰/۸
	کمینه Minimum	۱۷/۷	۰/۸	۶	۰/۴
	بیشینه Maximum	۴۰	۱/۹	۲۵/۳	۱/۲
Patient بیمار	تعداد آزمون‌دهندگان N	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
	میانگین Mean	۶۱/۸	۲/۹	۳۹/۷	۲
	میانه Median	۵۴/۲	۲/۶	۳۳/۸	۱/۶
	واریانس Variance	۱۱۸۶/۴	۲/۷	۴۰۰/۳	۹
	محدوده Range	۱۱۲	۵/۳	۶۷/۲	۳
	کمینه Minimum	۱۶/۹	۰/۸	۱۲/۶	۰/۸

[1] Sum of Displacement in Concentration State (SDC)
[2] Velocity in Concentration State (VC)
3 Sum of Displacement in Position State (SDP)
4 Velocity in Position State (VP)

اطلاعات سنسور اول (S1)				
شخص	پارامترها	مجموع جابه‌جایی حالت تمرکزی SDC	سرعت حرکت حالت تمرکزی VC	مجموع جابه‌جایی حالت وضعیتی SDP	سرعت حرکت حالت وضعیتی VP
	بیشینه Maximum	۱۲۸/۹	۶/۱	۷۹/۸	۳/۸

همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است در دو حالت تمرکزی و وضعیتی، دو متغیر جابه‌جایی و سرعت، در دو گروه سالم و بیمار برای هر سنسور محاسبه شده است. این جدول برای سنسور S1 در کل جامعه نمونه می‌باشد. تعداد افراد سالم ۹ نفر و تعداد افراد بیمار ۱۳ نفر است. پارامترهای آماری محاسبه شده در جدول ۳ شامل میانگین، میانه، واریانس، دامنه تغییرات، کمینه و بیشینه در دو گروه سالم و بیمار می‌باشد. متغیرهای موردمطالعه در هر سنسور SDC، VC، SDP و VP می‌باشد. برای بررسی بهتر نیاز است نتایج افراد بیمار با نتایج افراد سالم در هر سنسور مقایسه شود. از تقسیم نتایج افراد بیمار به نتایج افراد سالم جدول ۳ به‌دست می‌آید. نتایج بیان شده در جدول ۳ در واقع نرخ افزایش اطلاعات آماری هر سنسور را در چهار حالت تقسیم نتایج افراد بیمار به نتایج افراد سالم در هر سنسور فراهم کرده است.

جدول ۳. نرخ افزایش اطلاعات آماری هر سنسور در چهار حالت

شماره سنسور / پارامتر	SDC_S1	SDC_S2	SDC_S3	SDC_S4	SDC_S5	SDC_S6	شماره سنسور / پارامتر	VC_S1	VC_S2	VC_S3	VC_S4	VC_S5	VC_S6
Mean	۲	۲/۵	۱/۳	۱/۵	۲	۱/۹	Mean	۲	۲/۵	۱/۳	۱/۵	۲	۱/۹
Median	۱/۸	۲/۹	۲/۵	۱/۴	۴/۳	۲/۱	Median	۱/۷	۲/۸	۲/۴	۱/۴	۴/۳	۲/۱
Variance	۴	۵/۱	۱/۴	۱/۱	۱/۱	۶/۱	Variance	۴	۵/۲	۱/۴	۱/۱	۱/۱	۶
Range	۵	۲/۷	۱/۸	۱/۳	۱/۲	۲/۶	Range	۴/۸	۲/۷	۱/۸	۱/۳	۱/۲	۲/۶
Minimum	۱	۱/۹	۱/۹	۲/۲	۱/۴	۱	Minimum	۱	۱/۸	۲	۲/۲	۱/۵	۱
Maximum	۳/۲	۲/۵	۲/۸	۲/۳	۱/۲	۲/۴	Maximum	۳/۲	۲/۵	۱/۸	۲/۴	۱/۲	۲/۴
مقایسه جابه‌جایی درحالت تمرکزی							مقایسه سرعت در حالت تمرکزی						
شماره سنسور / پارامتر	SDP_S1	SDP_S2	SDP_S3	SDP_S4	SDP_S5	SDP_S6	شماره سنسور / پارامتر	VP_S1	VP_S2	VP_S3	VP_S4	VP_S5	VP_S6
Mean	۲/۵	۲/۶	۱/۵	۷/۲	۳/۱	۲/۷	Mean	۲/۴	۲/۵	۱/۵	۷/۹	۳	۲/۷
Median	۲/۱	۲/۴	۲	۲/۳	۲/۵	۲	Median	۱/۶	۲/۳	۲	۲/۲	۲/۷	۲/۲
Variance	۷/۶	۸/۸	۱/۸	۳۲/۵	۳۱/۳	۱۸/۹	Variance	۷/۴	۹/۱	۲/۵	۲۶/۵	۴۲/۹	۲۰/۵
Range	۳/۵	۴/۲	۱/۱	۱/۷	۶/۴	۴/۵	Range	۳/۸	۴/۲	۲/۶	۴/۱	۶/۹	۴/۸
Minimum	۲/۱	۱/۷	۲/۴	۳/۹	۲	۳/۳	Minimum	۲	۱/۷	۲/۴	۲/۸	۱/۶	۲/۴
Maximum	۳/۲	۳/۶	۱/۲	۴/۹	۴/۹	۴/۴	Maximum	۳/۲	۳/۶	۱/۷	۲۱	۴/۷	۴/۴
مقایسه جابه‌جایی درحالت وضعیتی							مقایسه سرعت در حالت وضعیتی						

مقایسه نتایج در حالت‌های مختلف

الف) در حالت تمرکزی (SDC و VC)

با توجه به جدول ۳ نسبت افزایش میانگین جابه‌جایی دست بیماران به افراد سالم در حالت تمرکزی در سنسور یک، عدد ۲/۰۴ (حدود ۲ برابر) می‌باشد. این عدد در سنسورهای دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۵۴، ۲/۰۳ و ۱/۹۴ می‌باشد. این اعداد در خصوص نسبت افزایش میانگین سرعت دست بیماران به افراد سالم در حالت تمرکزی عیناً تکرار شده است. این افزایش نشان می‌دهد میزان لرزش دست بیماران بیشتر است. همچنین در این جدول، نسبت افزایش میانه جابه‌جایی دست بیماران به افراد سالم در حالت تمرکزی در سنسورهای اول، دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۱/۷۷، ۲/۸۷، ۴/۳۲ و ۲/۰۸ می‌باشد. این اعداد حاکی از آن است که نسبت افزایش میانه SDC و VC دست بیماران به افراد سالم، بیشتر از نسبت افزایش میانگین آن‌ها است؛ در نتیجه میانه جابه‌جایی و میانه سرعت لرزش دست، تمایز بیشتری نسبت به میانگین جابه‌جایی و میانگین سرعت ایجاد می‌کند.

ب) در حالت وضعیتی (SDP و VP)

در حالت وضعیتی نیز مانند حالت تمرکزی با توجه به جدول ۳ نسبت افزایش میانگین جابه‌جایی دست بیماران به افراد سالم در حالت وضعیتی در سنسور یک، عدد ۲/۵۱ (حدود ۲/۵ برابر) می‌باشد. این عدد در سنسورهای دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۵۸، ۳/۱۳ و ۲/۷۳ می‌باشد. این اعداد در خصوص نسبت افزایش میانگین سرعت دست بیماران به افراد سالم در حالت وضعیتی با اختلاف ناچیزی تکرار شده است. همچنین در این جدول، نسبت افزایش میانه جابه‌جایی دست بیماران به افراد سالم در حالت وضعیتی در سنسورهای اول، دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۰۷، ۲/۳۷، ۲/۴۶ و ۱/۹۸ می‌باشد. این اعداد حاکی از آن است که نسبت افزایش میانگین SDP و VP دست بیماران به افراد سالم بیشتر از نسبت افزایش میانه آن‌ها است. در نتیجه میانگین جابه‌جایی و میانگین سرعت لرزش دست، تمایز بیشتری نسبت به میانه جابه‌جایی و میانه سرعت ایجاد می‌کند. مشاهده می‌شود که نتیجه برتری میانگین و میانه در حالت تمرکزی و وضعیتی برعکس یکدیگر می‌باشد. با توجه به کمینه و بیشینه‌های موجود در هریک از حالت‌ها می‌توان نتیجه گرفت که چه در افراد سالم چه در افراد بیمار، حالت وضعیتی لرزش بیشتری نسبت به حالت تمرکزی دارد؛ از این رو اعداد مربوط به میانه در حالت وضعیتی بیشتر است؛ بنابراین میانه، وابسته به حالات و حالت‌های مختلف است و می‌تواند مقادیر نادرستی نشان دهد. در نهایت در بین پارامترهای آماری مطرح‌شده، میانگین تمایز بهتری نشان می‌دهد. از طرفی مشاهده شد که در هر دو حالت اعداد مربوط به میانگین سرعت با اعداد مربوط به میانگین جابه‌جایی مقادیر مشابهی دارند.

مقایسه میانگین در حالت‌های تمرکزی و وضعیتی

الف) در پارامتر جابه‌جایی (SDC و SDP)

با توجه به جدول ۳ نسبت افزایش میانگین جابه‌جایی دست بیماران به افراد سالم در حالت تمرکزی در سنسورهای اول، دوم، پنجم و ششم به ترتیب ۲/۰۴، ۲/۵۳، ۲/۰۳ و ۱/۹۴ می‌باشد. این عدد در حالت وضعیتی در سنسورهای اول، دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۵۱، ۲/۵۸، ۳/۱۳ و ۲/۷۳ می‌باشد. مشاهده می‌شود حالت مربوط به حالت وضعیتی برای نشان دادن میزان لرزش دست در پارامتر جابه‌جایی تمایز بیشتری ایجاد می‌کند.

ب) در پارامتر سرعت (VC و VP)

با توجه به جدول ۳ نسبت افزایش میانگین سرعت دست بیماران به افراد سالم در حالت تمرکزی در سنسورهای اول، دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۰۴، ۲/۵۳ ، ۲/۰۳و ۱/۹۴ می‌باشد. این عدد در حالت وضعیتی در سنسورهای اول،

دوم، پنجم و ششم به‌ترتیب ۲/۴۴، ۲/۵۱، ۳/۰۵ و ۲/۷۳ می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت مشاهده می‌شود حالت مربوط به حالت وضعیتی برای نشان دادن میزان لرزش دست در پارامتر سرعت نیز تمایز بیشتری ایجاد می‌کند. در نهایت از جمع‌بندی بحث مطرح‌شده در مورد جدول ۳ نتیجه گرفته می‌شود بهترین معاینه تشخیصی توسط این دستگاه در پارامتر میانگین سرعت و در حالت وضعیتی (VP) رخ می‌دهد.

بحث در زمینه نتایج

دستکش هوشمند ساخته شده می‌تواند زاویه را اندازه گیری کند. سنسور خمشی به میزان خمش تغییرات، مقاومت را به‌طور خطی حس می‌کند، به این صورت که با خم شدن انگشتان، مقاومتش افزایش می‌یابد و ولتاژ خروجی آن نسبت به تغییر زاویه، تغییر می‌کند. حال این تغییر ولتاژ به مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر می‌رود و در آن‌جا توسط برنامه نوشته‌شده، پردازش می‌شود و به روی LCD می‌رود و در آن‌جا مقدار زاویه را نشان می‌دهد. به همین صورت نیز داده‌های گرفته شده از سنسور از خروجی پورت سریال با کابل USB to Serial Converter به کامپیوتر می‌روند و با نرم‌افزار LabVIEW پردازش لازم صورت می‌گیرد و به‌صورت آنلاین به شکل نمودار درمی‌آیند. برای انجام آنالیزهای ثانویه روی سیگنال اخذ شده اطلاعات به نرم‌افزارهای متلب و اکسل انتقال می‌یابند. پس از اعمال یک فیلتر پایین‌گذر، پارامترهای مربوطه مانند زاویه، سرعت، جابه‌جایی، کمینه و پیشینه خمش هر مفصل در حالت‌های مختلف استخراج و تحلیل می‌شود.

با توجه به عملکرد سیستم آنالیز لرزش دست به نظر می‌رسد از این دستکش هوشمند در صورت لزوم به دو منظور می‌توان استفاده کرد:

الف) بررسی تغییرات شاخص‌های لرزش (فرکانس، موقعیت و سرعت) در طول درمان برای هر بیمار

ب) دسته‌بندی کمّی دقیق‌تر بیماران براساس شاخص‌های ارائه شده.

از آنجایی که تمامی این پژوهش را نویسندگان مقاله طراحی، ساخته و برنامه‌نویسی کرده‌اند این قابلیت وجود دارد که در سه بخش زیر ارتقاهایی در این سیستم آنالیز لرزش داشته باشیم:

الف) ارتقای دستگاه: می‌توان با استفاده از مدار کریستال خارجی، فرکانس کاری میکروکنترلر را افزایش داد و در نتیجه تعداد نمونه‌برداری در ثانیه تا ۲۰ برابر یا بیشتر می‌گردد. این امر موجب افزایش دقت و قدرت مانور بیشتر در آنالیزها می‌شود. همچنین دستکش هوشمند را می‌توان برای هر دو دست چپ و راست ساخت.

ب) ارتقای برنامه‌نویسی: می‌توان با تغییر پروگرام میکروکنترلر برای افزایش دقت، تعداد نمونه‌برداری را تا دو برابر افزایش داد. همچنین برای کاربردهای جانبی یا انواع اپلیکیشن یا گجت می‌توان برنامه‌نویسی را طبق نیاز مربوطه تغییر داد. برای مثال در انتها برای نمایش یکی از کاربردهای دستکش، خروجی نتایج دستگاه به‌صورت چشمک زدن دو LED سبز و قرمز به نمایش گذاشته شد. هرگاه دست باز باشد سبز روشن می‌شود و هنگام مشت، قرمز روشن می‌شود. در غیر این صورت هردو به‌صورت متاوب چشمک می‌زنند که به معنای نه باز و نه بسته بودن دست می‌باشد.

این خروجی در انواع اپلیکیشن‌ها می‌تواند کاربرد داشته باشد. برای مثال برای کنترل موس توسط سه انگشت، ساخت این دستکش کم‌هزینه و ساده می‌باشد و عملکرد آن برای این منظور به شرح زیر تغییر خواهد کرد:

اگر جمع زوایای انگشت یک بیشتر از جمع زوایای انگشت دو باشد: به پایین رود.

اگر جمع زوایای انگشت یک کمتر از جمع زوایای انگشت دو باشد: به بالا رود.

اگر جمع زوایای انگشت دو بیشتر از جمع زوایای انگشت سه باشد: به راست رود.

اگر جمع زوایای انگشت دو بیشتر از جمع زوایای انگشت سه باشد: به چپ رود.

بنابراین در آینده، دستکش‌هایی می‌تواند به‌وجود بیاید که با حالت‌های مختلف انگشتان بتوان انواع برنامه‌ها را کنترل کرد. همچنین در کاربردهای پزشکی برای کمک به معلولین، توانبخشی و همچنین خنثی کردن لرزش دست کاربرد داشته باشد. امروزه این دستکش‌ها غالباً در انیمیشن‌سازی استفاده می‌شود.

ج) آنالیزهای قوی‌تر: دسته‌بندی انجام شده در این پژوهش، بین افراد دو گروه سالم و بیمار صورت گرفته است. این سیستم به‌صورت پایلوت در تعداد ۲۲ نفر با استفاده از ویژگی VP دارای تمایزی در حد ۲/۵ الی ۳ برابر میان بیماران و افراد سالم می‌باشد. با افزایش جامعه نمونه می‌توان بین شدت بیماری افراد یک گروه بیمار دسته‌بندی مناسبی صورت داد. این امر در تشخیص‌های کلینیکی به پزشکان کمک خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

هدف اولیه کمک به افرادی مانند پزشکان است که رفع لرزش دستانشان می‌تواند عمر کاری آن‌ها را افزایش دهد که سرمایه‌ای بزرگ برای هر کشوری محسوب می‌شود. این هدف در مورد افراد عادی که در شرکت‌ها و ادارات نیز مشغول فعالیت می‌باشند و لرزش دست آن‌ها مشکلاتی را برای خود و اطرافیان ایجاد کرده است نیز می‌تواند صدق کند.

هدف ثانویه کمک به متخصصان نورولوژی است به‌طوری که درحال حاضر با مشاهده عینی وضعیت بیمار معاینه می‌شود و لذا کمّی‌سازی لرزش دست و محاسبه پارامترهای آن، کمک شایانی در تشخیص بیماری و روند درمان آن می‌کند. هدف دیگری که بر این پژوهش می‌تواند مترتب گردد بررسی دقیق تأثیر درمانی داروهای گوناگون بر بیماری‌های لاعلاجی همچون بیماری پارکینسون می‌باشد. این اهداف منتج به افزایش کیفیت کار خدمات مراکز درمانی می‌شود.

شیوه ثبت سیگنال در این کار، روشی نوین محسوب می‌شود که بسیار دقیق و کم‌هزینه می‌باشد. همچنین نحوه پردازش و محاسبات به‌کارگیری شده در این حوزه نیز جدید می‌باشد.

References

[1] Zimmerman, T. G., Lanier, J., Blanchard, C., Bryson, S., & Harvill, Y. (1986). A hand gesture interface device. *SIGCHI Bull.*, *18*(4), 189–192. https://doi.org/10.1145/1165387.275628

[2] FitzGerald, J. J., Lu, Z., Jareonsettasin, P., & Antoniades, C. A .(2018) .Quantifying Motor Impairment in Movement Disorders. *Front Neurosci*, *12*, 202. https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00202

[3] Selekler, K. (2010). Alois Alzheimer Ve Alzheimer Hastaliği. *Türk Geriatri Dergisi*,, *13*(3), 9-14. https://doi.org/10.17942/sted.12150

[4] Tsai, C. H., Lo, S. K., See, L. C., Chen, H. Z., Chen, R. S., Weng, Y. H., Chang, F. C., & Lu, C. S. (2002). Environmental risk factors of young onset Parkinson's disease: a case-control study. *Clin Neurol Neurosurg*, *104*(4), 328-333. https://doi.org/10.1016/s0303-8467(02)00027-6

[5] Banaie, M., Pooyan, M., & Mikaili, M. (2011). Introduction and application of an automatic gait recognition method to diagnose movement disorders that arose of similar causes. *Expert Syst. Appl.*, *38*(6), 7359–7363. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.091

[6] Daliri, M. R. (2012). Automatic diagnosis of neuro-degenerative diseases using gait dynamics. *Measurement*, *45*(7), 1729-1734. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.013

[7] Ye, Q., Xia, Y., & Yao, Z. (2018). Classification of Gait Patterns in Patients with Neurodegenerative Disease Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, *2018*, 9831252. https://doi.org/10.1155/2018/9831252

[8] Kamran, I ,.Naz, S., Razzak, I., & Imran, M. (2021). Handwriting dynamics assessment using deep neural network for early identification of Parkinson's disease. *Future Generation Computer Systems*, *117*, 234-244. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.11.020

[9] Akdemir ,Ü., Tokçaer, A. B., Karakuş, A., & Kapucu, L. (2014). Brain 18F-FDG PET imaging in the differential diagnosis of parkinsonism. *Clin Nucl Med*, *39*(3), e220-226. https://doi.org/10.1097/rlu.0000000000000315

[10] di Biase, L., Di Santo, A., Caminiti, M. L ,.De Liso, A., Shah, S. A., Ricci, L., & Di Lazzaro, V. (2020). Gait Analysis in Parkinson's Disease: An Overview of the Most Accurate Markers for Diagnosis and Symptoms Monitoring. *Sensors (Basel)*, *20*(12). https://doi.org/10.3390/s20123529

[11] Heim, B ,.Krismer, F., De Marzi, R., & Seppi, K. (2017). Magnetic resonance imaging for the diagnosis of Parkinson's disease. *Journal of neural transmission (Vienna, Austria : 1996)*, *124*(8), 915-964. https://doi.org/10.1007/s00702-017-1717-8

[12] Heikal, M., & Eldawlatly, S. (2020, Dec 15-16). *An Ensemble Classification Technique of Neurodegenerative Diseases from Gait Analysis.* 2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), Cairo, Egypt https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9334609

[13] Feng, J. Y., Huang, B., Yang, W. Q., Zhang, Y. H., Wang, L. M., Wang, L. J., & Zhong, X. L. (2015). The putaminal abnormalities on 3.0T magnetic resonance imaging: can they separate parkinsonism-predominant multiple system atrophy from Parkinson's disease? *Acta Radiol*, *56*(3), 322-328. https://doi.org/10.1177/0284185114524090

[14] Luo, B., Wang, T., Zhang, F., Lin, Y., Zheng, C., & Chen, S. (2021). Interdigital Capacitive Sensor for Cable Insulation Defect Detection: Three-Dimensional Modeling, Design, and Experimental Test. *Journal of Sensors*, *2021*, 8859742. https://doi.org/10.1155/2021/8859742

[15] Hashemi Talkhouncheh, S. A., & Shahbazi, A. (2020). Design, Simulation and Fabrication of a Mobile Jammer in GSM Bands. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(1), 27-41. https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112755

[16] Hosseinpour, M., Karimi, H., Bakhsham, M., & Khodaei, A. (2020). Investigating the effect of multiple intelligence on individual performance of top entrepreneurs. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(3), 109-121. https://doi.org/10.48301/kssa.2020.124670

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 101-114
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.130310
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.5.8

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Robust Optimization of Satellite Attitude Control with Reaction Wheel Actuator in the Presence of Uncertainties

Vahid Bohlouri[1]*

[1]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.23.2021
Revised: 04.15.2021
Accepted: 05.09.2021

Keyword:
Satellite attitude control
Robust optimization
Reaction wheel
Uncertainty

***Corresponding Author:**
Vahid Bohlouri
Email: *v_bohlouri@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

In this paper, a single - axis satellite attitude control with reaction wheel actuator was analyzed in the presence of uncertainty and external disturbance. A proportional - integral - derivative (PID) controller was used to control when the control gains were achieved with evolutionary optimization algorithm. To increase robustness, robust optimization method was used in the presence of uncertainties and disturbances. In the robust optimization method, the statistical properties of the performance criterion, expected value and standard deviation were considered as the combined objective function of the optimization algorithm. For fair comparison, deterministic and robust optimization results were compared together versus uncertainties. Reaction wheel actuator was modeled with first - order equation and practical constraint in maximum and minimum generation momentum. Uncertainty was considered on moment of inertia, external disturbance, and reaction wheel with power spectral density function sampled with LHS algorithm. The graph of the mean value and performance criteria of the combined objective function shows small changes in the objective function in the face of uncertainties. Achieved numerical solution results indicated that the tuned controller with robust optimization performed better in the presence of uncertainties although tuned controller with deterministic optimization performed better assuming certain values.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۱۱۴-۱۰۱
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.130310
20.1001.1.23829796.1400.18.3.5.8
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مقاوم کنترل وضعیت ماهواره با عملگر چرخ عکس‌العملی با لحاظ عدم‌قطعیت

وحید بهلوری[1*]
۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلید واژگان:
کنترل وضعیت ماهواره
چرخ عکس‌العملی
بهینه‌سازی مقاوم
عدم‌قطعیت

نویسنده مسئول: وحید بهلوری
پست الکترونیکی:
v_bohlouri@tvu.ac.ir

چکیده

در این مقاله کنترل وضعیت تک‌محوره ماهواره صلب با عملگر چرخ عکس‌العملی با فرض عدم‌قطعیت و اغتشاش بررسی شده است. به‌منظور کنترل وضعیت ماهواره از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID) استفاده شد که ضرایب آن از فرایند بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم تکاملی به‌دست آمده است. برای افزایش قوام سیستم کنترل در مواجهه با عدم‌قطعیت و اغتشاش، از روش بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده است. در روش بهینه‌سازی مقاوم ویژگی‌های آماری معیار عملکرد به‌عنوان تابع هدف ترکیبی الگوریتم بهینه‌ساز لحاظ شده است. به‌منظور مقایسه منصفانه، نتایج بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم به‌ازای عدم‌قطعیت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. چرخ عکس‌العملی با دینامیک مرتبه اول و لحاظ کردن محدودیت عملی بیشینه گشتاور تولیدی مدل‌سازی شده است. عدم‌قطعیت روی مدل عملگر، لختی دورانی ماهواره و اغتشاشات خارجی با مدل تابع چگالی طیفی، اعمال گردیده و با روش بهینه LHS نمونه‌برداری تصادفی شده است. نتایج حل عددی، نشانگر عملکرد مقاوم‌تر کنترل‌کننده تنظیم‌شده با روش بهینه‌سازی مقاوم در مواجهه با عدم‌قطعیت‌هاست؛ به‌طوری که نمودار میانگین و معیار عملکرد تابع هدف ترکیبی نشان‌دهنده تغییرات کم‌معیار عملکرد در مواجهه با عدم‌قطعیت‌هاست البته کنترل‌کننده طراحی‌شده با روش بهینه‌سازی معین، با فرض معین بودن همه مقادیر، عملکرد مناسب‌تری دارد.

مقدمه

امروزه ماهواره‌های زیادی با مأموریت‌ها و کاربردهای متنوعی در حال چرخش به دور زمین هستند و خدمات مختلفی را ارائه می‌کنند. در بین زیرسیستم‌های مختلف یک ماهواره، زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت، وظیفه نشانه‌روی ماهواره، جهت‌دهی مناسب، پایدارسازی و مانورهای حرکتی را بر عهده دارد. عملگرهای مختلفی از جمله چرخ‌های عکس‌العملی، تراسترها و گشتاوردهنده‌های مغناطیسی برای کنترل وضعیت و پایدارسازی وضعیت ماهواره‌ها استفاده می‌شوند [۱]. در این بین، چرخ‌های عکس‌العملی با تولید گشتاور زاویه‌ای، سبب پایدارسازی و مانور دقیق‌تر وضعیت ماهواره‌ها می‌شوند. چرخ‌های عکس‌العملی نسبت به عملگرهای تراستر و گشتاوردهنده مغناطیسی مزایایی دارند که سبب استفاده بیشتر در کنترل وضعیت ماهواره شده است. تراسترها معمولاً گشتاورهای زیاد، سریع و گسسته تولید می‌کنند و در کنترل دقیق وضعیت از آن‌ها کمتر استفاده می‌شود [۲]. گشتاوردهنده‌های مغناطیسی وابسته به میدان مغناطیسی زمین و ارتفاع ماهواره هستند و مقدار گشتاور بسیار کمی تولید می‌کنند. چرخ عکس‌العملی توانایی تولید گشتاور پیوسته دارد و سطح مناسبی از گشتاور تولید می‌کند. این عملگر در مود نشانه‌روی دقیق ماهواره‌ها کارایی ویژه‌ای دارد، اگرچه که اشباع شدن و نیازمندی به فرایند اشباع‌زدایی نیز از مشکلات چرخ‌های عکس‌العملی است [۳; ۴].

در سیستم کنترل وضعیت ماهواره، متناسب با شرایط مداری ماهواره، عدم‌قطعیت‌های بسیاری وجود دارد که می‌تواند باعث کاهش کارایی و کاهش دقت کنترلی شود. عدم‌قطعیت‌ها یا منشأ درونی دارند و از داخل فضاپیما ناشی می‌شوند یا منشأ خارجی دارند و به شرایط محیطی فضا بازمی‌گردند. عمده عدم‌قطعیت بیرونی در مقدار اغتشاشات خارجی است و عمده عدم‌قطعیت داخلی نیز از تغییرات لختی دورانی ماهواره ناشی می‌شود. بنابراین لازم است سیستم کنترل ماهواره با لحاظ کردن عدم‌قطعیت‌ها تنظیم و طراحی شود [۵].

امروزه روش‌های بهینه‌سازی متنوعی ابداع و استفاده شده است که بخش زیادی از آن‌ها مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی شبیه‌الگوریتم ژنتیک هستند. سیستم‌های کنترل بسیار زیادی با روش‌های بهینه‌سازی تنظیم و طراحی شده‌اند. در کنترل وضعیت ماهواره به‌عنوان نمونه می‌توان به منابع [۶-۸] اشاره کرد. روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته بهینه‌سازی معین[1] و بهینه‌سازی مقاوم[2] تقسیم‌بندی کرد. در روش بهینه‌سازی معین فقط مقدار مطلق معیار عملکرد به‌عنوان تابع هدف بررسی می‌شود اما در روش بهینه‌سازی مقاوم، علاوه بر مقدار مطلق معیار عملکرد، ویژگی‌های آماری نظیر انحراف معیار، امیدریاضی یا واریانس معیار عملکرد نیز در مواجهه با نامعینی‌ها مورد نظر است [۹; ۱۰]. بنابراین می‌توان از روش بهینه‌سازی مقاوم به‌منظور بررسی تغییرات معیار عملکرد در مواجهه با عدم‌قطعیت بهره برد.

تحقیقات انجام شده در حوزه کنترل وضعیت ماهواره با لحاظ کردن عدم‌قطعیت را می‌توان به چند بخش تقسیم کرد: بخش نخست، تحقیقاتی است که تنها به بررسی مقدار تأثیر نامعینی‌ها در عملکرد کنترل وضعیت با روش مونت کارلو پرداخته‌اند [۱۱-۱۳]. بخش دوم، طراحی سیستم کنترل وضعیت به بهره‌گیری از روش‌های کنترل مقاوم است که برای نمونه می‌توان به مراجع [۱۴-۱۷] اشاره کرد. بخش آخر، رویکرد بهینه‌سازی مقاوم است که تلاش می‌کند در خلال فرایند بهینه‌سازی، مقادیر تنظیمی از متغیرهایی را به‌دست دهد که در نهایت توابع هدف را در برابر نامعینی‌ها مقاوم کنند. در این زمینه می‌توان به مراجع [۱۸-۲۰] اشاره کرد که در آن‌ها روش بهینه‌سازی مقاوم برای کنترل دو وضعیتی (روشن- خاموش) ماهواره مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیقات مقدار متوسط و انحراف معیار مصرف سوخت به‌عنوان دو تابع هدف مسئله بهینه‌سازی انتخاب شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای دو معیار

[1] Deterministic Optimization
[2] Robust Optimization

مذکور با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها انجام شده است. در این تحقیقات، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی مقاوم و معین، نشان‌دهنده افزایش قوام معیار عملکرد در روش بهینه‌سازی مقاوم در مواجهه با عدم‌قطعیت‌هاست.

در این مقاله برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده PID یک ماهواره صلب تک‌محوره کنترل‌شده با چرخ عکس‌العملی از روش بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده است تا مقدار معیار عملکرد کمترین تغییرات در مواجهه با نامعینی‌ها و اغتشاش را داشته باشد. همچنین به دلیل مزایای چرخ عکس‌العملی از این عملگر در سیستم کنترل وضعیت استفاده شده است.

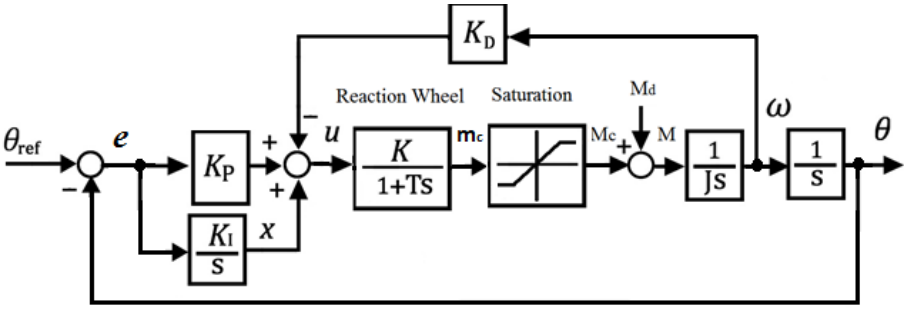
در این راستا ابتدا مسئله کنترل وضعیت ماهواره با چرخ عکس‌العملی مدل‌سازی و روابط ریاضی و معادلات دیفرانسیلی بیان شد. در ادامه دیاگرام بلوکی سیستم کنترل حل عددی و شبیه‌سازی گردید و تحلیل پاسخ‌های زمانی و چرخه حدی انجام شد. شرایط بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم، الگوریتم بهینه‌سازی مقاوم، مدل‌سازی عدم-قطعیت و نمونه‌برداری با روش LHS در بخش سوم این مقاله ارائه شد. در انتها مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از دو روش بهینه‌سازی معین و مقاوم مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

کنترل وضعیت ماهواره

اجزای اصلی عملگر چرخ عکس‌العملی شامل یک صفحه دوار، یک موتور الکتریکی بدون جاروبک با سرعت بالا و یک برد الکترونیکی کنترلی است. اگر ماهواره در نقطه تعادل خود قرار داشته باشد، موتور در سرعت ثابت قرار می‌گیرد (یا خاموش است). در صورت نیاز به دوران ماهواره یا تغییر زاویه، موتور الکتریکی شتاب می‌گیرد، گشتاور تولید می‌کند و در نهایت حول محور ماهواره گشتاور تولید می‌کند. به عبارتی بخش دوار با تغییر حرکت دورانی می‌تواند اندازه حرکت ماهواره را تغییر دهد، گشتاورهای مزاحم را حذف کند و در صورت لزوم، زاویه ماهواره را به مقدار مطلوب برساند [۲۱].

کنترل وضعیت ماهواره با چرخ عکس‌العملی

در این بخش، کنترل وضعیت تک‌محوره ماهواره با عملگر چرخ عکس‌العملی بررسی شده است. دیاگرام بلوکی کنترل وضعیت ماهواره تک‌محوره با کنترل‌کننده PI-D و همچنین مدل چرخ عکس‌العملی در شکل ۱ مشاهده می-شود. در مدل‌سازی چرخ عکس‌العملی، گاهی مدل ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود، گاهی با دینامیک مرتبه اول مدل می‌شود [۲۲]. البته مدل دقیق‌تر دینامیک مرتبه اول به همراه بلوک اشباع به دلیل محدودیت‌های عملی است که در این مقاله از این مدل استفاده شده است. شایان ذکر است که به دلیل وجود بلوک اشباع، سیستم کنترل غیرخطی شده است. در دیاگرام بلوکی شکل ۱، T ثابت زمانی چرخ عکس‌العملی، K ضریب بهره چرخ، θ زاویه ماهواره، θ_{ref} زاویه مطلوب ورودی، ω سرعت زاویه‌ای، K_P بهره تناسبی، K_D بهره مشتقی، K_I بهره انتگرالی، u سیگنال کنترلی، M_c گشتاور کنترلی، M_d گشتاور اغتشاشی، M گشتاور اعمالی به دینامیک ماهواره و J لختی دورانی ماهواره است. مطابق دیاگرام بلوکی شکل ۱، فیدبک زاویه و سرعت زاویه‌ای به کنترل‌کننده، اعمال می‌شود و سیگنال کنترلی تولید می‌گردد و به عملگر وارد می‌شود. گشتاور کنترلی و گشتاور اغتشاشی به مدل دینامیک تک‌محوره ماهواره، اعمال و زاویه و سرعت زاویه‌ای ایجاد می‌شود.



شکل ۱. دیاگرام بلوکی کنترل وضعیت تک‌محوره ماهواره با کنترل‌کننده PI-D و مدل چرخ عکس‌العملی

در دیاگرام بلوکی کنترلی شکل ۱، چهار معادله دیفرانسیلی وجود دارد که در جدول ۱، این معادلات در حوزه زمان و در حوزه لاپلاس به تفکیک بیان شده است. سایر معادلات جبری کنترل وضعیت شکل ۱، در روابط ۵ تا ۸ بیان شده است.

جدول ۱. معادلات کنترل وضعیت تک‌محوره ماهواره با کنترل‌کننده PI-D و مدل چرخ عکس‌العملی

شماره معادله	معادلات حوزه زمان	معادلات حوزه لاپلاس
(۱)	$\dot{\theta} = \omega$	$\frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{s}$
(۲)	$\dot{\omega} = \frac{M}{J}$	$\frac{\omega}{M} = \frac{1}{Js}$
(۳)	$\dot{X} = K_I e$	$\frac{X}{e} = \frac{K_I}{s}$
(۴)	$\dot{m}_c = \frac{Ku - m_c}{T}$	$\frac{m_c}{u} = \frac{K}{1+Ts}$

$$e(t) = \theta_{\mathrm{ref}} - \theta \tag{۵}$$

$$u(t) = K_P e(t) - K_D \omega + K_I \int e(t)dt \tag{۶}$$

$$M = M_c + M_d \tag{۷}$$

$$\mathrm{M_c} = \begin{cases} M_{c_{max}} & \text{for} \quad \mathrm{m_c} > M_{c_{max}} \\ m_c & \text{for} \quad M_{c_{min}} \le u \le M_{c_{max}} \\ M_{c_{min}} & \text{for} \quad u < M_{c_{min}} \end{cases} \tag{۸}$$

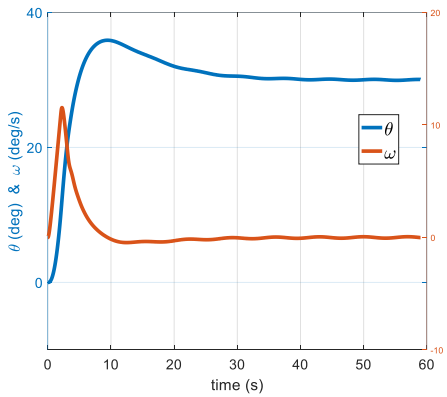
که در آن $M_{c_{max}}$ و $M_{c_{min}}$ مقدار بیشینه و کمینه بلوک اشباع بوده و رابطه ۸، توصیف ریاضی بلوک اشباع است.

معادلات دیفرانسیلی جدول ۱، در نرم‌افزار متلب توسط روش اویلر حل عددی شده است. سیستم کنترل وضعیت شکل ۱، به‌ازای مقادیر مفروض در جدول ۲، شبیه‌سازی شده و نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. شایان ذکر است که ضرایب بهره کنترلی در این مرحله، صرفاً به‌صورت تجربی لحاظ شده است و در بخش بعدی مقاله، ضرایب حاصل از بهینه‌سازی بیان می‌شود.

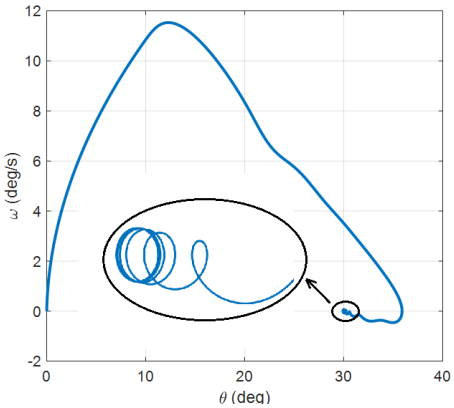
جدول ۲. مقادیر عددی در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار عددی	واحد
θ_{ref}	۳۰	Deg
K_P	۴۰	N.m/deg
K_D	۸۰	N.m.s/deg
K_I	۵	N.m/deg
M_d	۰/۰۱Sin (0.1t)	N.m
J	۱۰	Kg/m^2
K	۱	-
T	۰/۲۵	S

در شکل ۲، نمودار زاویه و سرعت زاویه‌ای در مدت زمان ۶۰ ثانیه اجرای برنامه و با گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه ترسیم شده است. مطابق این شکل سیستم کنترل توانسته توسط چرخ عکس‌العملی، وضعیت ماهواره را با وجود اغتشاش خارجی سینوسی، به مقدار مرجع همگرا کند. مقادیر عددی مدل چرخ عکس‌العملی مطابق مراجع [۲۲; ۲۳] در جدول ۲ لیست شده است. همچنین مقدار عددی لختی دورانی در محدوده جرمی ماهواره‌های کلاس میکرو انتخاب شده است که در مرجع [۲۴] نیز به تفصیل بحث شده است. در شکل ۳ نمودار سرعت زاویه‌ای بر حسب زاویه ترسیم شده است که به دلیل غیرخطی بودن سیستم کنترل در نهایت یک چرخه (شبه) حدی ایجاد شده که در شکل مذکور به‌منظور بررسی بهتر، بزرگ‌نمایی شده است. چرخه (شبه) حدی به دلیل المان غیرخطی اشباع و همچنین اغتشاش خارجی سینوسی در سیستم کنترل به‌وجود آمده است. فرکانس این چرخه (شبه) حدی حدود ۰/۰۱۶ هرتز و نزدیک به فرکانس اغتشاش خارجی می‌باشد و دامنه نوسان حدود ۰±۱/ درجه است.



شکل ۲. زاویه و سرعت زاویه‌ای کنترل وضعیت با چرخ عکس‌العملی



شکل ۳. زاویه و سرعت زاویه‌ای (چرخه شبه‌حدی) کنترل وضعیت با چرخ عکس‌العملی

بهینه‌سازی معین و مقاوم

در این بخش، ضرایب کنترلی ماهواره توسط روش بهینه‌سازی معین و مقاوم استخراج می‌شود سپس نتایج به‌دست‌آمده از دو روش مذکور، در مواجهه با عدم‌قطعیت بررسی می‌شوند. بدین منظور ابتدا مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌گردد و سپس الگوریتم بهینه‌سازی معین و مقاوم مطرح می‌شود.

ضرایب کنترلی (K_P, K_D, K_I)، متغیرهای مسئله بهینه‌سازی هستند که مقدار آن‌ها از فرایند بهینه‌سازی استخراج می‌شود. در سیستم‌های کنترل وضعیت ماهواره، مقدار خطای وضعیت در مانور نشانه‌روی حائز اهمیت است. بنابراین مقدار میانگین مطلق خطای نشانه‌روی مانور وضعیت ماهواره بدون احتساب ۱۰ ثانیه اول به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، در نظر گرفته می‌شود. لختی دورانی، دامنه اغتشاش خارجی و بهره مدل عملگر به‌عنوان پارامترهای مسئله بهینه‌سازی می‌باشند که حاوی عدم‌قطعیت هستند. بهینه‌سازی معین و مقاوم با الگوریتم ژنتیک و مبتنی بر روش‌های تکاملی انجام می‌شود. روابط ریاضی مسئله بهینه‌سازی به‌صورت زیر است:

$$\text{Find } (K_P, K_D, K_I) \tag{۹}$$

$$\text{Minimizing } [PI = Mean \sum |\theta_{ref} - \theta|] \tag{۱۰}$$

$$\text{Parameters } (J, M_d, K) \tag{۱۱}$$

$$0 < K_P, K_D, K_I < 200 \tag{۱۲}$$

که PI میانگین مطلق خطای نشانه‌روی مانور وضعیت ماهواره بوده و به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی انتخاب شده است. همچنین محدوده عددی متغیرهای بهینه‌سازی بین ۰ تا ۲۰۰ انتخاب شده است. بهینه‌سازی معین با روش الگوریتم ژنتیک و براساس روابط ۹ تا ۱۲ نوشته انجام شده است. مشخصات بهینه‌سازی ژنتیک در جدول ۳ بیان شده است. شایان ذکر است که بهینه‌سازی با نرم‌افزار متلب و به‌ازای مقادیر عددی جدول ۲ انجام شده و شرط توقف، کمترشدن تغییرات تابع هدف از مقدار $۱۰^{-۶}$ لحاظ گردیده است. مقادیر متغیرهای مذکور، حاصل از بهینه‌سازی معین به‌صورت $K_P = ۶۶/۳۴$، $K_D = ۹۹$ و $K_I = ۰/۰۱۵$ به‌دست آمده است.

جدول ۳. مشخصات بهینه‌ساز

الگوریتم بهینه‌سازی	الگوریتم ژنتیک
جمعیت هر نسل	۵۰ ژن
تابع انتخاب ژن	اتفاقی یکنواخت
نرخ جهش	۰/۰۱
ضریب مهاجرت نسلی	۰/۲
شرط توقف	کمتر شدن مقدار تغییرات تابع هدف از $۱۰^{-۶}$

الگوریتم بهینه‌سازی مقاوم مطابق مرجع [۲۵] با دو تفاوت اصلی در تابع هدف و مدل‌سازی عدم‌قطعیت پارامترها نوشته می‌شود. این نوع بهینه‌سازی مبتنی بر تکرارهای متوالی و بهره‌گیری از ویژگی‌های آماری مثل امید ریاضی، واریانس و انحراف معیار می‌باشد و سعی در یافتن جواب با کمینه کردن تابع هدف آماری دارد. بنابراین در بهینه‌سازی مقاوم به‌جای کمینه کردن مطلق معیار عملکرد، انحراف معیار و امید ریاضی معیار عملکرد به‌عنوان تابع هدف ترکیبی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این الگوریتم به‌جای مقدار مطلق پارامترها، تابع چگالی طیفی[1] پارامتر تعریف

[1] Probability Density Function (PDF)

می‌شود؛ به‌طوری که در هر تکرار بهینه‌سازی، یک عدد متفاوت به پارامتر اختصاص می‌یابد. روابط ریاضی ۱۴ و ۱۵ به‌جای روابط ۱۰ و ۱۱ بیان شده که اختلاف اصلی بهینه‌سازی معین و مقاوم است.

$$\text{Find } (K_P, K_D, K_I) \tag{۱۳}$$

$$\text{Minimizing } [E\{PI\}, \sigma(PI)] \tag{۱۴}$$

$$\text{PDF } (J, K, M_D) \tag{۱۵}$$

که در آن انحراف معیار (σ) و امید ریاضی (E) معیار عملکرد، به عنوان تابع هدف ترکیبی تعریف شده است. تابع هدف ترکیبی مذکور براساس معیار آماری و تکرارهای متوالی شبیه‌سازی تشکیل می‌شود. از طرفی نیاز به نمونه‌برداری از پارامترهای نویزی در هر مرحله از تکرار برنامه می‌باشد که بدین منظور پارامترهای حاوی عدم‌قطعیت توسط تابع چگالی طیفی (PDF) مدل‌سازی می‌گردد و توسط الگوریتم بهینه LHS نمونه‌برداری می‌شود. در تابع چگالی طیفی سه عامل انحراف معیار، مقدار میانگین و نوع توزیع احتمالاتی حائز اهمیت است که این ویژگی‌ها برای پارامترهای دیاگرام بلوکی کنترل شامل لختی دورانی، بهره عملگر و دامنه اغتشاش خارجی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر آماری پارامترهای حاوی عدم‌قطعیت

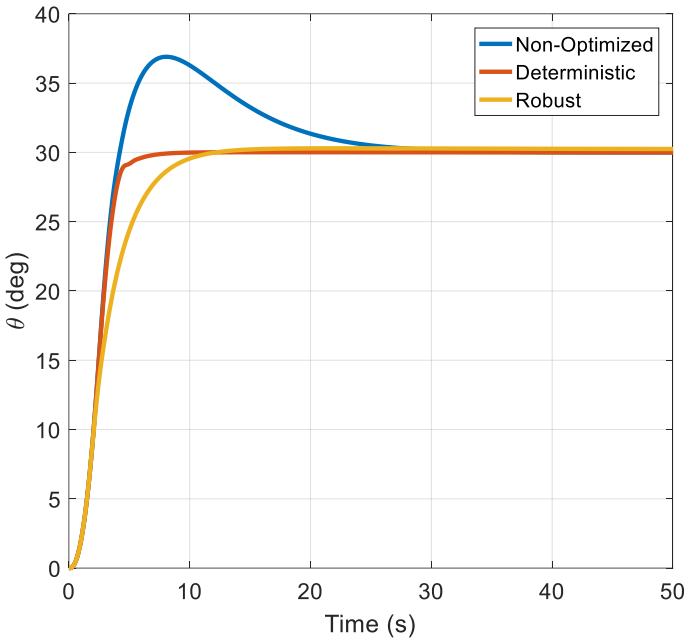
پارامتر	انحراف معیار	مقدار میانگین	نوع توزیع آماری
دامنه اغتشاش	۰/۰۵	۰/۰۵	یکنواخت[1]
بهره چرخ عکس‌العملی	۰/۱	۱	نرمال
لختی دورانی ماهواره	۱	۱۰	نرمال

تولید اعداد تصادفی با توزیع نرمال و نمونه‌برداری تصادفی عددی می‌تواند توسط روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی انجام شود. یکی از بهینه‌ترین روش‌های تولید اعداد تصادفی با توزیع نرمال روش LHS[2] است. در مرجع [۲۰] مقایسه مناسبی بین روش LHS و الگوریتم‌های rand[3] و wgn[4] انجام شده است. به دلیل کاهش بار محاسباتی روش LHS و بهینه‌بودن آن، در این مقاله برای نمونه‌برداری با توزیع نرمال از این روش استفاده شده است. در این مقاله برای هر عدم‌قطعیت، ده‌هزار عدد تولید شده است. به عبارتی هر بار اجرای بهینه‌سازی معین برنامه ده هزار مرتبه تکرار می‌شود تا علاوه بر معیار عملکرد، مشخصات آماری نظیر امید ریاضی و انحراف معیار نیز ایجاد شود. بنابراین، بهینه‌سازی مقاوم نیز حداقل ده‌هزار برابر بهینه‌سازی قطعی تکرار می‌شود و بار محاسباتی دارد. مقادیر ضرایب کنترل‌کننده به‌صورت $K_p = ۳۴/۷۴$، $K_D = ۸۷/۱$ و $K_I = ۰/۱$ از فرایند بهینه‌سازی مقاوم و به‌ازای مقادیر عددی جدول ۲ به‌دست آمده است.

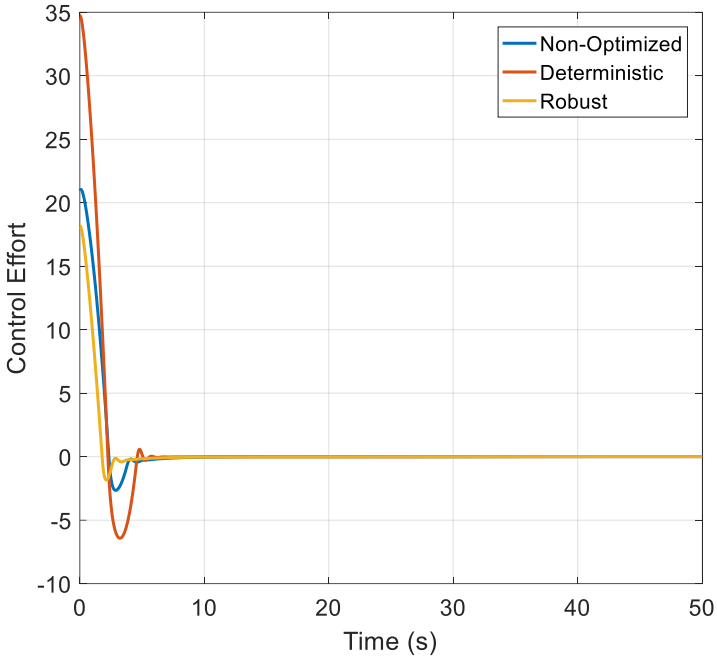
[1] Uniform
[2] Latin Hypercube Sampling (LHS)
[3] Random
[4] White Gaussian Noise

بحث و نتایج

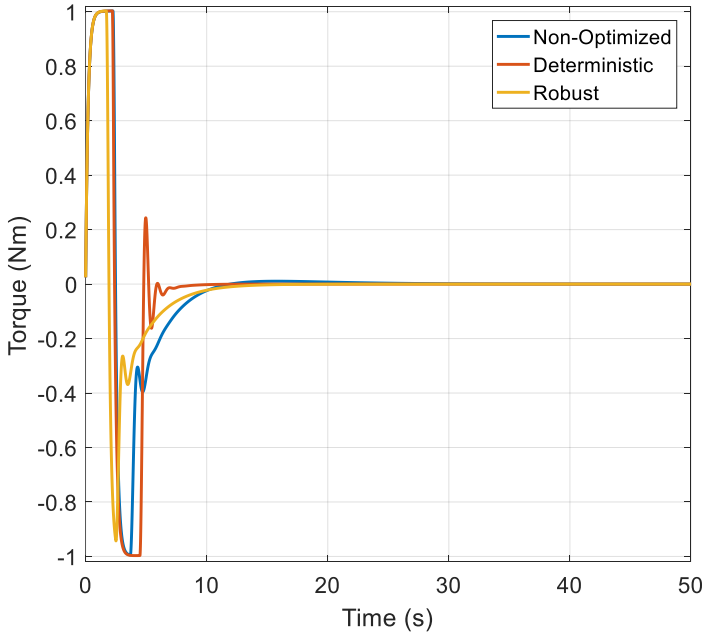
در این بخش به‌منظور بررسی نتایج و مقایسه منصفانه، نمودارهای وضعیت، تلاش کنترلی و گشتاور اعمالی به ماهواره به‌ازای هر سه حالت غیربهینه، بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم و به‌ازای مقادیر عددی مذکور در جدول ۲، تشریح شده است. نمودار وضعیت ماهواره برحسب زمان و به‌ازای سه حالت مذکور و در حضور اغتشاش خارجی، در شکل ۴ ترسیم شده است. پاسخ سیستم کنترل وضعیت به‌ازای ضرایب حاصل از دو حالت بهینه‌سازی‌شده، به‌هم‌نزدیک بوده و فراجهشی در پاسخ مشاهده نمی‌شود. در شکل ۵، نمودار تلاش کنترلی به‌ازای سه روش مذکور مشاهده می‌شود. در شکل ۶ نیز نمودار گشتاور اعمالی به ماهواره (M) ترسیم شده است. مطابق انتظار تفاوت معناداری در پاسخ پله و نمودارهای تلاش کنترلی و گشتاور ناشی از دو نوع بهینه‌سازی معین و مقاوم مشاهده نمی‌شود. تفاوت بین دو روش بهینه‌سازی مذکور در اعمال عدم‌قطعیت و بررسی ویژگی‌های آماری نظیر انحراف معیار، واریانس یا امید ریاضی معیار عملکرد است که در ادامه بررسی می‌شود.



شکل ۴. پاسخ زمانی وضعیت ماهواره با سه روش تنظیمی ضرایب کنترلی

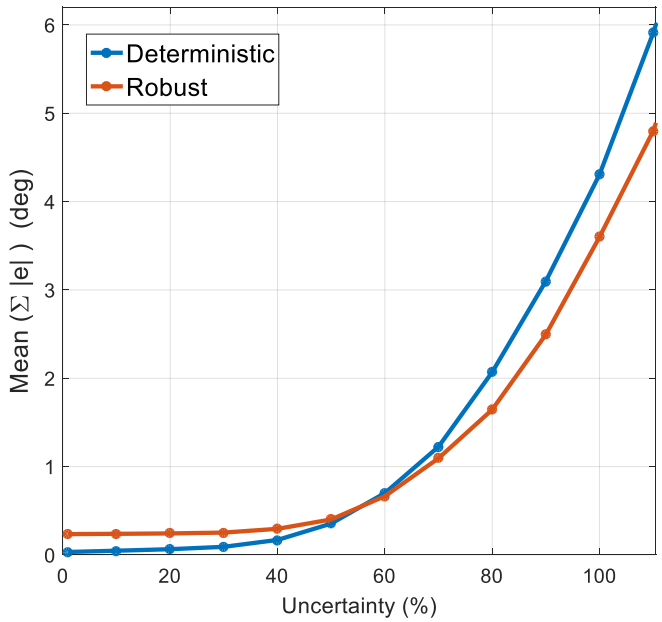


شکل ۵. تلاش کنترلی به‌ازای ورودی پله ۳۰ درجه با سه روش تنظیمی ضرایب کنترلی

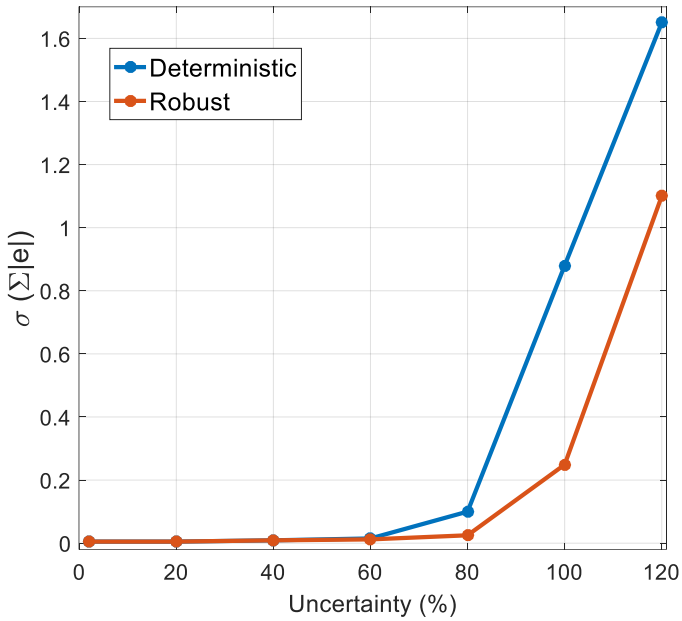


شکل ۶. گشتاور اعمالی به ماهواره به‌ازای ورودی پله ۳۰ درجه و با سه روش تنظیمی ضرایب کنترلی

در این بخش مقدار میانگین مطلق خطای نشانه‌روی وضعیت که به عنوان معیار عملکرد کنترلی انتخاب شده بود، برحسب عدم‌قطعیت بررسی شده است. مجدداً دیاگرام بلوکی شکل ۱ به‌ازای مقادیر عددی مذکور و به‌ازای ضرایب کنترلی به‌دست‌آمده از فرایند بهینه‌سازی معین و مقاوم، شبیه‌سازی شده است. در این تحلیل، مقایسه پاسخ زمانی سیستم کنترل، با ضرایب حاصل از دو روش بهینه‌سازی، به‌تنهایی ارزشی ندارد و باید نتایج آماری نظیر مقدار میانگین خطا و انحراف معیار آن در تکرارهای متوالی برنامه به‌ازای عدم‌قطعیت‌های مختلف بررسی شود. بنابراین حل عددی به‌ازای مقادیر مختلف عدم‌قطعیت انجام شده و هر اجرای برنامه صدهزار مرتبه تکرار شده تا نتایج آماری کاملاً همگرا شده باشند. شبیه‌سازی برحسب درصد عدم‌قطعیت یا به عبارتی درصد انحراف معیار از مقادیر جدول ۴ انجام شده و مقدار انحراف معیار و میانگین معیار عملکرد در دو شکل ۷ و ۸ ترسیم شده است. در این دو شکل، نمودار آبی رنگ و قرمز رنگ، به‌ترتیب، معیار عملکرد حاصل از بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم را نشان می‌دهند. این دو شکل به‌خوبی گویای رفتار سیستم کنترلی تنظیم شده در مواجهه با عدم‌قطعیت‌هاست. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های خیلی کم، کنترل‌کننده تنظیم شده با روش بهینه‌سازی معین خطای نشانه‌روی کمتری خواهد داشت و از دقت مناسب‌تری برخوردار است. اما چنانچه عدم‌قطعیت در سیستم کنترل وجود داشته باشد، کنترل‌کننده تنظیم شده با روش بهینه‌سازی مقاوم خطای نشانه‌روی کمتری خواهد داشت و دقت مناسب‌تری دارد. این رفتار هم در نمودار میانگین آماری و هم در نمودار انحراف معیار مشاهده می‌شود. اگرچه با روش بهینه‌سازی معین مقداری شاخص عملکرد بهتر است اما روش بهینه‌سازی مقاوم در مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها، قوام بیشتر و ارجحیت دارد. بنابراین مزیت روش بهینه‌سازی مقاوم نسبت به بهینه‌سازی معین در کنترل وضعیت ماهواره با چرخ عکس‌العملی، به‌ویژه در مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها، به‌خوبی آشکار است.



شکل ۷. میانگین معیار عملکرد برحسب درصد انحراف معیار پارامترهای نامعین



شکل ۸. انحراف معیار عملکرد بر حسب درصد انحراف معیار پارامترهای نامعین

نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم کنترل وضعیت ماهواره صلب با کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی- انتگرالی (PID) با عملگر کنترلی چرخ عکس‌العملی بررسی شد. ضرایب کنترلی با لحاظ کردن اغتشاش و عدم‌قطعیت پارامتری با دو روش بهینه‌سازی معین و بهینه‌سازی مقاوم تنظیم شده است. روش بهینه‌سازی مقاوم طبق الگوریتم مدون و با بهره‌گیری از ویژگی‌های آماری نظیر امید ریاضی، واریانس و انحراف معیار توابع هدف ترکیبی و به‌ازای تکرارهای متوالی برنامه انجام شد. از نظر مدل‌سازی دینامیکی، ماهواره به‌صورت تک‌محوره صلب و با در نظر گرفتن ملاحظات عملی و مدل دینامیکی مرتبه دوم و محدودیت بیشینه گشتاور تولیدی برای عملگر چرخ عکس‌العملی شبیه‌سازی شد. عدم‌قطعیت بر روی پارامترهای لختی دورانی ماهواره، اغتشاش خارجی و مدل چرخ عکس‌العملی به‌صورت تابع چگالی احتمال با توزیع نرمال با روش نمونه‌برداری بهینه LHS در نظر گرفته شد. میانگین مطلق خطای مانور نشانه‌روی ماهواره و انحراف معیار آن به‌عنوان معیار عملکرد ترکیبی کنترل وضعیت ماهواره در نظر گرفته شد. نتایج حل عددی نشانگر ارجحیت تنظیم ضرایب کنترلی با روش بهینه‌سازی مقاوم در برابر روش بهینه‌سازی معین به‌ویژه در مواجهه با نامعینی‌هاست؛ به‌طوری که در این روش با افزایش عدم‌قطعیت‌ها، معیار عملکرد تغییرات کمتری نسبت به روش بهینه‌سازی معین دارد.

References

[1] Ley, W., Wittmann, K., & Hallmann, W. (2009). *Handbook of space technology*. John Wiley & Sons. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470742433

[2] Sidi, M. J. (1997). *Spacecraft dynamics and control: a practical engineering approach*. Cambridge university press. https://www.cambridge.org/core/books/spacecraft-dynamics-and-control/E9CAEE81CD09527C99497FA8C7C35B0A

[3] Bryson, A. E. (1993). *Control of spacecraft and aircraft*. Princeton university press Princeton, New Jersey. https://doi.org/10.1515/9781400880034

[4] Wertz, J. R. (2012). *Spacecraft attitude determination and control*. Springer Science & Business Media. https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-9907-7

[5] Fuchs, M., Neumaier, A., & Girimonte, D. (2007). Uncertainty modeling in autonomous robust spacecraft system design. In *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* (pp. 41-42). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pamm.200700450

[6] Chen, S.-M., & Dong, Y.-F. (2011). Satellite Attitude Tracking Controller Optimization Based on Particle Swarm Optimization. *Procedia Engineering*, *15*, 526-530. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.100

[7] Cooper, M. A., & Smeresky, B. (2020). An Overview of Evolutionary Algorithms toward Spacecraft Attitude Control. In *Advances in Spacecraft Attitude Control* (pp. 51-72). https://doi.org/10.5772/intechopen.89637

[8] Li, J., Zhang, S., Liu, X., & He, R. (2017). Multi-objective evolutionary optimization for geostationary orbit satellite mission planning. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, *28*(5), 934-945. https://doi.org/10.21629/JSEE.2017.05.11

[9] Beyer, H.-G., & Sendhoff, B. (2007). Robust optimization – A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *196*(33), 3190-3218 . https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.03.003

[10] Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119454816

[11] Farquhar, R. W., Aeronautics, S., & Astronautics, S. (1966). *Analog Studies of the Limit-Cycle Fuel Consumption of a Spinning Symmetric Drag-Free Satellite*. Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics. https://ntrs.nasa.gov/citations/19670001569

[12] Moghadaszadeh Bazaz, S., Bohlouri, V., & Jalali Naini, S. H .(2016) .Attitude Control Of A Rigid Satellite With Pulse-Width Pulse-Frequency Modulation Using Observer-Based Modified Pid Controller. *Modares Mechanical Engineering*, *16*(8), 139-148 .

[13] Xiaoping, S., & Guoping, Y. (2013, May 25-27). *Robust attitude tracking control scheme for flexible spacecraft with vibration suspension.* 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6561260

[14] Duan, C., Zhang, S., Zhao, Y., & Kong, X. (2014) .Robust Control Allocation among Overactuated Spacecraft Thrusters under Ellipsoidal Uncertainty. *Abstract and Applied Analysis*, *2014*, 950127. https://doi.org/10.1155/2014/950127

[15] Hu, Q., Li, B., & Zhang, Y. (2013). Robust attitude control design for spacecraft under assigned velocity and control constraints. *ISA Transactions*, *52*(4), 480-493. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.03.003

[16] Pirouzmand, F., Ghahramani, N., & Arvan, M. R. (2014). Robust Predictive Controller design using LMI for Satellite Attitude Control System. *Tabriz Journal Of Electrical Engineering*, *44*(4), 9-21 .

[17] Shahravi, M., Kabganian, M., & Alasty, A. (2006). Adaptive robust attitude control of a flexible spacecraft. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, *16*(6), 287-302. https://doi.org/10.1002/rnc.1051

[18] Bohlouri, V., Ebrahimi, M., & Jalali-Naini, S. (2018, May 2-7). *Robust Optimization of Satellite Attitude Control with Thruster in Presence of Disturbances.* 25 th Annual International Mechanical Engineering Conference, Tehran, Iran.

[19] Bohlouri, V., Ebrahimi, M., & Naini, S. H. J. (2017, May 19-21). *Robust optimization of satellite attitude control system with on-off thruster under uncertainty.* 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC), St. Petersburg, Russia https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7959495

[20] Bohlouri, V., & Jalali-Naini, S. (2018). Robust optimization of satellite attitude control with thruster actuators based on combined objective function. *Journal of Space Science and Technology*, *10*(4), 55-66 .

[21] Bialke, B. (1998). *High fidelity mathematical modeling of reaction wheel performance.* 21st Annual American Astronautical Society Guidance and Control Conference, https://ci.nii.ac.jp/naid/10010248518/

[22] Bohlouri, V., Kaviri, S., Taghinezhad, M., Naddafi Pour Meibody, M., & Seyedzamani, S. (2018). Modeling and System Identification of a reaction wheel with experimental data. *Modares Mechanical Engineering*, *17*(11), 437-446 .

[23] Sohrabzadeh, K., Mehdiabadi Mehran., Asadi Meysam,. (2009). *Determination of optimal model of reactive wheel of satellite situation control system with the aim of detecting failure.* 8th iranian aerospace association conference ,Isfahan, Iran. https://civilica.com/doc/75990/

[24] Bellar, A., & Mohammed, M. A. S. (2019). Satellite inertia parameters estimation based on extended Kalman Filter. *Journal of Aerospace Technology and Management*, *11*. https://doi.org/10.5028/jatm.v11.1016

[25] Venanzi, I., Materazzi, A., & Ierimonti, L. (2015). Robust and reliable optimization of wind-excited cable-stayed masts. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *147*, 368-379. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.011

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 115-135
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi: 10.48301/KSSA.2021.130680
20.1001.1.23829796.1400.18.3.6.9

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Improving the Performance of the Adaptive Virtual Impedance Method in the Island Microgrid

Kiomars Sabzevari[1]*

[1]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.03.2021
Revised: 04.30.2021
Accepted: 05.17.2021

Keyword:
Fault control
Active and reactive power distribution
Voltage regulation
Adaptive virtual impedance
Circulating current

***Corresponding Author:**
Kiomars Sabzevari
Email:
k.sabzevari52@gmail.com

ABSTRACT

One of the main challenges in island microgrids is the distribution of reactive power between distributed generation sources. The use of adaptive virtual impedance has been introduced as a method of improving the distribution of reactive power between distributed generation sources. Although the use of adaptive virtual impedance improves the reactive power distribution between the distributed generation sources and reduces the circulating current, it causes a voltage drop and the output voltage range of the distributed generation unit is reduced. In this paper, a control strategy for improving the adaptive virtual impedance method is proposed. In the proposed control strategy, the voltage drop across the output impedance of the distributed generation units is compensated due to the use of increased virtual impedance, and the load supply voltage is adjusted to the nominal value. The proposed control method, in addition to maintaining the advantages of using adaptive virtual impedance such as appropriate distribution of active and reactive capacities between distributed generation units and reducing circulating current, compensates for the voltage drop in the output impedance. In the proposed method, the output reference voltage of the drop control method is adjusted within the allowable range in proportion to the load change. To evaluate performance and efficiency, the proposed control method is implemented on an island microgrid consisting of two distributed generation units. The simulation results show the performance and efficiency of the proposed method.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۱۳۵-۱۱۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.130680
DOR:20.1001.1.23829796.1400.18.3.6.9
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد روش امپدانس مجازی تطبیقی در ریزشبکه جزیره‌ای

کیومرث سبزواری[1*]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلید واژگان:
کنترل افتی
تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو
تنظیم ولتاژ
امپدانس مجازی تطبیقی
جریان گردشی

نویسنده مسئول: کیومرث سبزواری
پست الکترونیکی:
k.sabzevari52@gmail.com

چکیده

یکی از معضلات اصلی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای، تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده می‌باشد. استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی به‌عنوان یکی از راهکارهای بهبود تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده معرفی شده است. اگرچه استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی سبب بهبود تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده و کاهش جریان گردشی می‌شود اما سبب ایجاد افت ولتاژ شده و دامنه ولتاژ خروجی واحد تولیدی پراکنده کاهش می‌یابد. در این مقاله، یک استراتژی کنترلی برای بهبود روش امپدانس مجازی تطبیقی پیشنهاد گردیده است. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، افت ولتاژ روی امپدانس خروجی واحدهای تولید پراکنده که به دلیل استفاده از امپدانس مجازی افزایش‌یافته، جبران می‌شود و ولتاژ تغذیه بار در مقدار نامی تنظیم می‌گردد. روش کنترلی پیشنهادی، علاوه بر حفظ مزایای استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی نظیر تقسیم مناسب توان‌های اکتیو و راکتیو بین واحدهای تولید پراکنده و کاهش جریان گردشی، افت ولتاژ ایجاد شده در امپدانس خروجی جبران می‌شود. در روش پیشنهادی ولتاژ مرجع تولیدی روش کنترل افتی متناسب با تغییر بار، در محدوده مجاز تنظیم می‌شود. برای ارزیابی عملکرد و کارایی، روش کنترلی پیشنهادی، روی یک ریزشبکه جزیره‌ای شامل دو واحد تولید پراکنده اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد و کارایی مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.

مقدمه

در سال‌های اخیر، ریزشبکه‌ها، شامل منابع تولید پراکنده (DG)[1]، دستگاه‌های ذخیره انرژی و به دلیل پایداری، ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر موردتوجه قرار گرفته است.

به‌طورکلی ریزشبکه، بهره‌وری منابع تولید پراکنده (مانند سلول‌های خورشیدی، پیل سوختی، میکروتوربین، CHP و غیره) را افزایش می‌دهد تا فرصت‌های بیشتری برای هماهنگی DGهای مختلف از طریق برابری (تولید گرما و برق) ایجاد کند [۱-۳].

ریزشبکه‌ها می‌توانند به شبکه اصلی قدرت متصل گردند یا به‌طور جزیره‌ای بهره‌برداری شوند.

هر دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای نیاز به سیستم‌های کنترل خاصی دارند. در حالت متصل به شبکه اصلی، سیستم کنترل به‌گونه‌ای است که مقادیر مشخصی از توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق کند. در این حالت ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی کنترل می‌شود. در حالت جزیره‌ای، سیستم کنترل باید ولتاژ و فرکانس را در محدوده مجاز نگه دارد، توان را به‌طور مناسب بین منابع تقسیم کند و پایداری سیستم را حفظ نماید [۴-۶].

به‌منظور تحقق این اهداف از دو رویکرد کنترل متمرکز و کنترل غیرمتمرکز استفاده می‌شود. در کنترل غیرمتمرکز یا محلی، هریک از منابع تولید پراکنده، به‌صورت مستقل کنترل می‌شوند [۷]. درحالی‌که در کنترل متمرکز با استفاده از ارتباط مخابراتی اطلاعات موردنیاز به مرکز کنترل ارسال و پس از پردازش در کنترل منابع به‌کار گرفته می‌شوند [۸; ۹].

در زمینه کنترل ریزشبکه‌های جزیره‌ای، روش‌های کنترلی گوناگونی ارائه شده است. پرکاربردترین روش، کنترل افتی[2] است [۱۰]. روش کنترل افتی مرسوم، اساساً برای منابع متصل به خطوط انتقال با خاصیت سلفی طراحی شده است. در شبکه‌های ولتاژ پایین که دارای خاصیت مقاومتی می‌باشند، این روش کنترلی موفق به تقسیم مناسب توان (مخصوصاً توان راکتیو) با دقت مناسب نمی‌شود علاوه‌برآن نابرابری و عدم‌تقارن در امپدانس خطوط که مسئله‌ای رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد و همچنین برابر نبودن امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده، کنترل دقیق توان راکتیو در حالت متصل به شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تقسیم توان راکتیو در حالت جزیره‌ای را نیز با مشکلاتی مواجه می‌سازد [۱۱; ۱۲]. از دیگر مشکلات روش کنترل افتی وجود جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده است. جریان گردشی باعث افزایش تلفات، اشغال ظرفیت واحدهای تولید پراکنده و کاهش کارایی کنترل افتی می‌گردد.

در [۱۳; ۱۴] مفهوم امپدانس مجازی برای اصلاح روش افتی پیشنهاد شده است. استفاده از امپدانس مجازی، خاصیت سلفی خط را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه تزویج میان توان‌های اکتیو و راکتیو به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تضعیف می‌گردد. هرچند که امپدانس مجازی موجب اصلاح عملکرد روش افتی می‌شود ولی قادر به حذف جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده موازی نمی‌باشد. در [۱۵; ۱۶] ایده امپدانس مجازی تطبیقی برای اصلاح روش امپدانس مجازی ارائه شده است. در این روش بر کاهش جریان گردشی، مقدار امپدانس مجازی ثابت نیست بلکه مقدار آن هر لحظه طوری تغییر می‌کند که نابرابری امپدانس خطوط بین منابع تولید پراکنده را از بین ببرد و جریان گردشی را کاهش دهد. با وجود مزایای روش امپدانس مجازی، استفاده از آن سبب افزایش افت ولتاژ روی امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده می‌شود. افزایش افت ولتاژ باعث کاهش کیفیت توان، به دلیل کاهش ولتاژ باس‌های تغذیه‌کننده بارهای متصل به ریزشبکه می‌گردد.

[1] Distributed Generation
[2] Droop control

در این مقاله به‌منظور جبران افت ولتاژ ناشی از به‌کارگیری امپدانس مجازی تطبیقی یک روش کنترلی اصلاحی ارائه شده است. در روش کنترلی پیشنهادی ولتاژ مرجع مورداستفاده در کنترل افتی مرسوم طوری تنظیم می‌شود تا همواره ولتاژ باسی که منبع تولید پراکنده به آن متصل است در مقدار تعیین شده تثبیت گردد.

سیستم کنترلی مبتنی بر امپدانس مجازی

شکل (۱) مدار معادل یک مبدل منبع ولتاژ که از طریق امپدانس خط $Z\,e^{j\theta} = R + jX$ به باس تغذیه بار متصل شده است را نشان می‌دهد. توان اکتیو و راکتیو تحویلی به باس به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند.

$$P = \frac{V_S^2}{Z}\cos\theta - \frac{V_S V_L}{Z}\cos(\theta+\delta) \tag{۱}$$

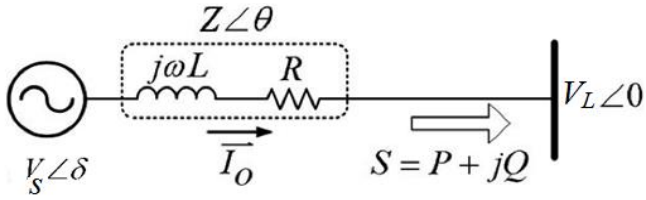
$$Q = \frac{V_S^2}{Z}\sin\theta - \frac{V_S V_L}{Z}\sin(\theta+\delta) \tag{۲}$$

اگر فرض شود امپدانس خط کاملاً اندوکتیو است $\theta=90^o$ و اختلاف زاویه بین ولتاژ منبع و باس تغذیه، δ کوچک باشد، آن‌گاه روابط (۱) و (۲) به‌صورت زیر ساده می‌شوند:

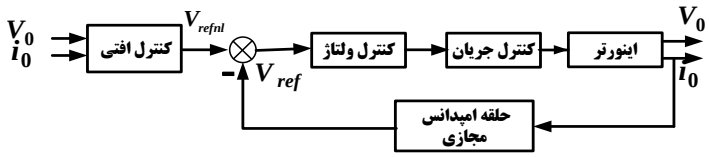
$$P = \frac{V_S V_L}{Z}\sin\delta \tag{۳}$$

$$Q = \frac{V_S^2}{X} - \frac{V_S V_L}{X}\cos\delta \tag{۴}$$

روابط (۳) و (۴) نشان‌دهنده وجود یک رابطه قوی بین توان اکتیو و فرکانس و همچنین بین توان راکتیو و ولتاژ است. روابط (۳) و (۴) اساس روش کنترل افتی مرسوم را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین برای عملکرد صحیح روش کنترل افتی، امپدانس خط باید سلفی باشد.



شکل ۱. مدار معادل یک مبدل منبع ولتاژ متصل به باس تغذیه بار



شکل ۲. سیستم کنترل DG با استفاده از امپدانس مجازی

برای افزایش خاصیت سلفی و همچنین ازبین‌بردن نابرابری امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده موازی از امپدانس مجازی استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام سیستم کنترل منبع تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای در شکل (۲) نشان‌داده شده است. با تنظیم امپدانس مجازی، استفاده شده در سیستم کنترل منبع تولید پراکنده، ولتاژ مبنا مطابق رابطه زیر تغییر داده می‌شود [۱۶].

$$V_{ref} = V_{refnl} - Z_D(s).\, i_o \qquad (۵)$$

که در آن $Z_D(s)$ امپدانس مجازی، V_{ref} ولتاژ مرجع خروجی کنترل افتی در حضور حلقه امپدانس مجازی و V_{refnl} ولتاژ مرجع در حالت بدون بار می‌باشد.

مقدار امپدانس مجازی برای شرایط ماندگار ریزشبکه و به‌ازای یک مقدار خاص امپدانس خروجی منبع تولید پراکنده و امپدانس خط به‌دست می‌آید. درصورتی‌که امپدانس خط و امپدانس خروجی منبع تولید پراکنده در اثر شرایط محیطی و عملکرد ریزشبکه تغییر کند، تعیین یک مقدار خاص برای امپدانس مجازی نمی‌تواند اهداف موردنظر را به‌طور مناسب برآورده سازد. همان‌طور که از شکل (۲) و همچنین رابطه (۵) مشخص می‌باشد، حلقه امپدانس مجازی باعث کاهش ولتاژ مرجع ورودی به بلوک کنترل ولتاژ می‌شود.

سیستم کنترلی مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی

در شرایطی که مقدار بارهای ریزشبکه تغییر کنند و امپدانس خروجی واحدهای تولید پراکنده یا امپدانس خطوط متصل‌کننده واحدها به باس‌های تغذیه برابر نباشند، روش کنترلی مبتنی بر امپدانس مجازی با مقدار ثابت نمی‌تواند جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده را به‌طور مؤثر کاهش دهد. برای اصلاح عملکرد روش امپدانس مجازی، ایده امپدانس مجازی تطبیقی ارائه شده است. براساس این ایده مقدار امپدانس مجازی ثابت نمی‌باشد و مقدار آن با توجه به وضعیت ریزشبکه و اهداف کنترلی موردنظر مانند تقسیم مناسب توان راکتیو و کاهش جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده تغییر می‌یابد.

امپدانس مجازی تطبیقی $Z_D^*(s)$ مطابق رابطه (۶)، از دو قسمت ثابت و متغیر تشکیل شده است. قسمت ثابت همان امپدانس مجازی متداول $Z_D(s)$ می‌باشد که مقدار آن برابر $L_D\omega$ در نظر گرفته می‌شود. قسمت متغیر بر اساس الگوریتم نشان داده شده در شکل (۳) چنان تغییر می‌کند که جریان گردشی کاهش یابد.

$$Z_D^*(s) = Z_D(s) + \frac{1}{s} h(i_H).\, \Delta Z \qquad (۶)$$

Δz تعیین‌کننده مقدار تغییر قسمت متغیر امپدانس مجازی تطبیقی می‌باشد و $h(i_H)$ در هر مرحله از تکرار با توجه به مقدار جریان گردشی i_H می‌تواند یکی از مقادیر ۰ ، ۱-و ۱ باشد (شکل ۳). اگر جریان گردشی توسط DG ایجاد شود مقدار $h(i_H)$ برابر ۱ و در نتیجه مقدار امپدانس مجازی تطبیقی افزایش می‌یابد. اگر جهت جریان گردشی برعکس گردد، مقدار $h(i_H)$ ، ۱- در نظر گرفته می‌شود و امپدانس مجازی کاهش می‌یابد. در صورتی که جریان

گردشی از حد مجاز، i_ϵ ، کمتر باشد مقدار $h(i_H)$ صفر می‌شود. در این الگوریتم Z_{min} و Z_{max} به‌ترتیب کمینه و بیشینه مقدار مجاز امپدانس مجازی تطبیقی تعریف شده است.

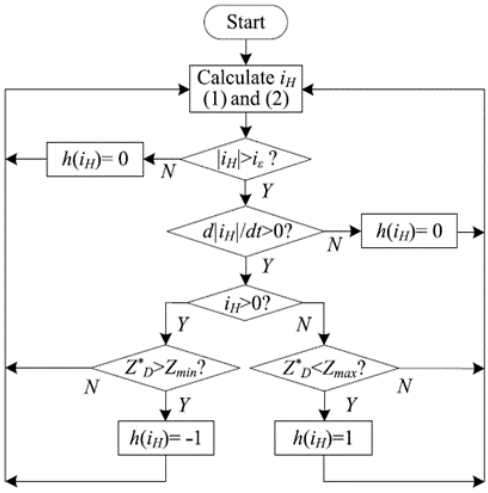
برای محاسبه جریان گردشی بین واحدهای تولید پراکنده موازی یکی از منابع تولید پراکنده به‌عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و جریان گردشی دیگر واحدها به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$i_{Hi} = k_i . i_{unit} - i_{oi} \quad (۷)$$

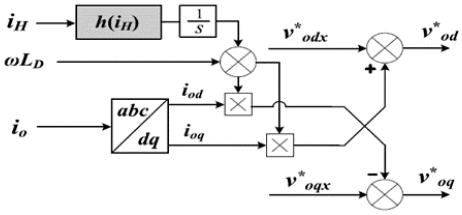
$$i_{unit} = \sum_{i=1}^{n} i_{oi} \Big/ \sum_{i}^{n} k_i \quad (۸)$$

در روابط فوق، i_{Hi} جریان گردشی منبع تولیده پراکنده iام، k_i نسبت ظرفیت نامی منبع تولیده پراکنده iام به ظرفیت نامی منبع تولید پراکنده مبنا و i_{oi} جریان خروجی منبع تولید پراکنده iام می‌باشد.

دیاگرام کنترل امپدانس مجازی تطبیقی در قاب dq در شکل (۴) نشان‌داده شده است.



شکل ۳. الگوریتم تعیین $h(i_H)$ [۱۶]



شکل ۴. دیاگرام کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی

استراتژی کنترلی پیشنهادی

هرچند در روش کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی مقدار امپدانس مجازی متغیر است ولی همچنان مطابق رابطه (۵) باعث کاهش ولتاژ مرجع می‌گردد. کاهش ولتاژ مرجع به نوبه خود سبب کاهش ولتاژ در باس متصل به DG، V_o در شکل (۵) و همچنین کاهش ولتاژ در باس مشترک، V_{pcc}، می‌شود.

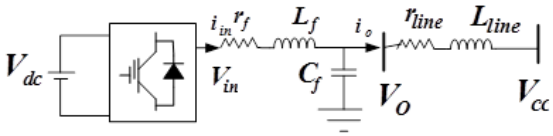
با استفاده از مدار معادل تونن ولتاژ در باس متصل به DG از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۳]:

$$V_o = G(s)V_{ref} - Z_o(s).i_o \quad (۹)$$

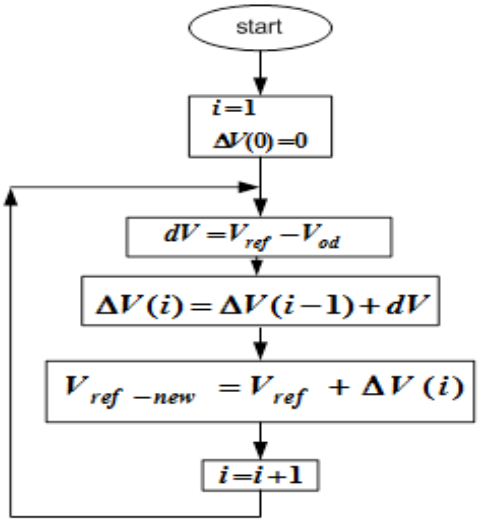
در رابطه فوق G(s) بهره ولتاژ سیستم کنترل حلقه بسته و $Z_o(s)$ امپدانس معادل تونن از دید باس متصل به DG می‌باشد. در فرکانس اصلی اندازه G(s) برابر واحد و فاز آن صفر است و $Z_o(s)$ به‌واسطه استفاده از امپدانس مجازی رفتاری کاملاً اندوکتیو دارد.

در این مقاله برای جبران افت ولتاژ، $\Delta V = V_{ref} - V_O$ الگوریتم شکل (۶) پیشنهاد می‌شود. مطابق الگوریتم پیشنهادی اختلاف ولتاژ بین V_{ref} و V_{Od} به‌دست‌آمده و این مقدار به V_{ref} قبلی اضافه می‌شود. در نتیجه ولتاژ مرجع روش کنترل افتی متناسب با میزان افت ولتاژ تغییر می‌یابد. بدین ترتیب مقدار ولتاژ در باس متصل به DG در مقدار تعیین شده به‌عنوان ولتاژ مرجع تثبیت می‌گردد.

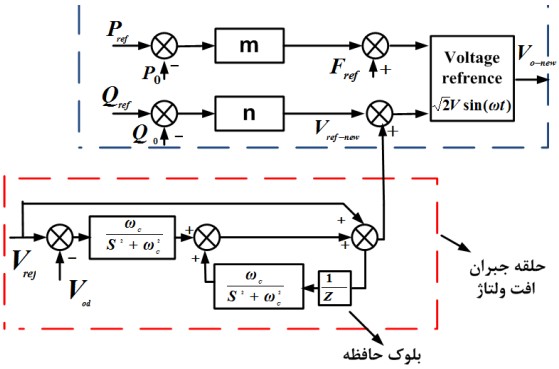
نحوه اجرای الگوریتم پیشنهادی برای جبران افت ولتاژ در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای m، n به‌ترتیب ضرایب توان اکتیو و راکتیو روش افتی متداول و ω_c فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر می‌باشند. مطابق شکل (۷) در هر لحظه، افت ولتاژ حاصل از اختلاف بین ولتاژ مرجع با ولتاژ خروجی باس متصل به DG (در محور d) به‌دست می‌آید و با استفاده از یک بلوک حافظه با افت ولتاژ قبلی جمع می‌شود و افت ولتاژ نهایی به مقدار ولتاژ مرجع اضافه می‌گردد. علت استفاده از فیلتر پایین‌گذر حذف هارمونیک‌های فرکانس بالا در ولتاژ V_{Od} می‌باشد. همچنین علت استفاده از فیلتر پایین‌گذر دوم در حلقه مربوط به بلوک حافظه، جلوگیری از افزایش خطای ناشی از وجود هارمونیک‌های باقی‌مانده در خروجی فیلتر اول است.



شکل ۵. مدار معادل یک واحد تولید پراکنده متصل به باس



شکل ۶. الگوریتم جبران افت ولتاژ



شکل ۷. بلوک دیاگرام روش افتی اصلاح شده

پایداری سیستم و تعیین محدوده مجاز امپدانس مجازی تطبیقی

مقدار بیشینه امپدانس مجازی، با توجه به پایداری سیستم به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن مقدار بیشینه امپدانس مجازی، ابتدا مدل سیگنال کوچک سیستم به‌دست می‌آید. مدل سیگنال کوچک واحد تولید پراکنده در پیوست ۱ آمده است. مقادیر ویژه ماتریس AS رفتار سیستم را نشان می‌دهد.

مقادیر ویژه سیستم وقتی مقدار امپدانس مجازی از مقدار 1mHتا 15mH *درصورتی‌که* مقدار اندوکتانس خارجی برابر 6mH باشد در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش امپدانس مجازی مقادیر ویژه به سمت محور موهومی حرکت می‌کنند و وقتی‌که $L_V = 7.8mH$ باشد. مقادیر ویژه در ناحیه ناپایدار قرار می‌گیرند و سیستم نوسانی می‌شود و در صورتی که مقدار اندوکتانس خارجی به $20mH$ افزایش یابد مقادیر ویژه هیچ‌وقت وارد ناحیه ناپایدار نمی‌شوند؛ بنابراین در صورتی که اندوکتانس خارجی زیاد باشد می‌توان نتیجه گرفت در صورت تغییرات اندوکتانس مجازی، سیستم ناپایدار نمی‌شود. مقدار امپدانس مجازی با توجه به اندوکتانس خارجی و

حاشیه پایداری انتخاب می‌شود. توصیه می‌شود مقدار امپدانس مجازی، کوچک‌تر از امپدانس خارجی انتخاب شود تا محدوده تنظیم زیادی برای عملکرد پایدار داشته باشد.

با در نظر گرفتن *20* درصد حاشیه پایداری، مقدار بیشینه امپدانس مجازی را $Z_{max}=2\Omega$ *در نظر می‌گیریم.*

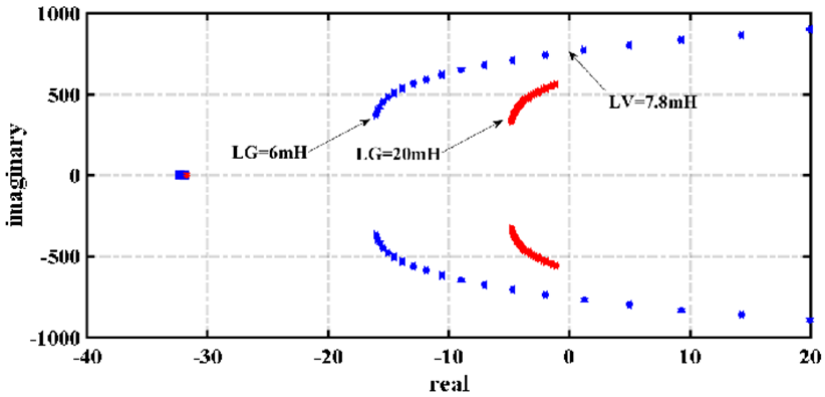
مقدار کمینه امپدانس مجازی با توجه به مقادیر مقاومت و راکتانس خط انتقال و تأمین شرایط دی‌کوپلینگ توان‌های اکتیو و راکتیو برای عملکرد صحیح روش کنترل افتی، تعیین می‌شود.

$$X_{line} + X_V \gg r_{line}$$

در این مقاله با توجه به مقادیر مقاومت و راکتانس خط انتقال، مقدار کمینه امپدانس مجازی $Z_{min}=0.8\ \Omega$ در نظر می‌گیریم.

با توجه به مکان هندسی ریشه‌ها، سیستم پیشنهادی پایدار می‌باشد و در مقایسه با روش‌های کنترلی ارائه شده در مراجع [۱] و [۳] که از لینک مخابراتی و ارتباط فیزیکی بین واحدها برای کنترل واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است، سیستم کنترلی پیشنهادی نیازی به لینک مخابراتی ندارد و پایداری آن تضمین شده است. در مرجع [۱] از سیستم مدیریت انرژی دوسطحی برای کنترل توان واحدهای تولید پراکنده و پخش بار استفاده شده است. سطح داخلی سیستم مدیریت انرژی از ارتباط فیزیکی واحدهای تولید پراکنده هر ریزشبکه برای کنترل و تقسیم توان بین واحدهای تولید پراکنده و سطح خارجی سیستم مدیریت انرژی از لینک مخابراتی برای پخش توان بین ریزشبکه‌ها استفاده کرده است. در صورت قطع لینک مخابراتی، سیستم مدیریت انرژی قادر به کنترل توان بین ریزشبکه‌ها نمی‌شود و امکان ناپایداری سیستم در اثر اضافه‌بار واحدهای تولید پراکنده وجود دارد.

در مرجع [۳] به‌منظور تقسیم دقیق توان راکتیو و بهبود عملکرد روش کنترل افتی مرسوم از دو عملکرد کاهش خطا و بازیابی ولتاژ استفاده شده است. عملکرد کاهش خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح معادله Q-E روش کنترل افتی و ارسال سیگنال‌های همگام‌سازی انجام می‌شود. برای این کار توسط باند با پهنای کم، سیگنال‌های همگام‌سازی برای واحدهای تولید پراکنده ارسال می‌گردد. عملکرد کاهش تقسیم توان، سبب کاهش ولتاژ خروجی واحد تولید پراکنده می‌شود و به‌منظور جلوگیری از کاهش ولتاژ خروجی از روش بازسازی ولتاژ استفاده می‌شود. در این روش نیز اگر به هر دلیلی لینک مخابراتی قطع گردد سیستم کنترل قادر به عملکرد مناسب نمی‌باشد و احتمال ناپایداری ریزشبکه وجود دارد.



شکل ۸. مکان هندسی ریشه‌ها

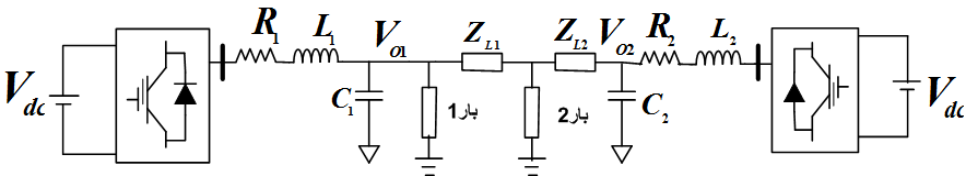
شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی روش کنترل پیشنهادی از ریزشبکه شکل (۹) استفاده شده است. پارامترهای ریزشبکه در جدول (۱) آورده شده است. در این ریزشبکه ابتدا بار شماره ۱ به ریزشبکه متصل می‌شود و سپس در لحظه t=250ms بار شماره ۲ به ریزشبکه اضافه می‌شود. برای نشان‌دادن کارایی روش کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی ریزشبکه در چهار حالت زیر انجام شده است.

۱. سیستم کنترلی با روش افتی مرسوم
۲. سیستم کنترلی با امپدانس مجازی مرسوم
۳. سیستم کنترلی با امپدانس مجازی تطبیقی
۴. سیستم کنترلی با روش افتی پیشنهادی.

ظرفیت توان دو منبع تولید پراکنده، متفاوت در نظر گرفته شده است و ظرفیت توان DG2، ۱.۵ برابر ظرفیت توان DG1 در نظر گرفته شده است. اندازه بارهای متصل به ریزشبکه به‌صورت زیر می‌باشد:

بار شماره ۱: P(L1)=50KW Q(L1)=10KVAR
بار شماره ۲: P(L2)=100KW Q(L2)=10KVAR



شکل ۹. مدار معادل ریزشبکه موردمطالعه [۱۶]

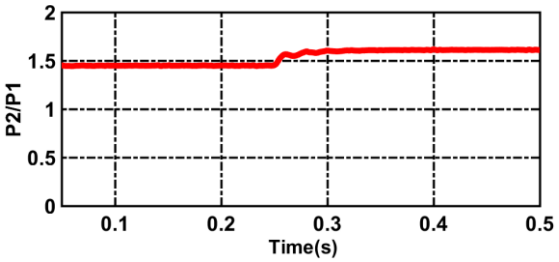
جدول ۱. پارامترهای ریزشبکه

پارامتر	مقدار	واحد
C_f	۱۰۰	mF
L_f	۲/۲۷	mH
r_f	۰/۰۱	Ω
r_G	۰/۱	Ω
V_{DC}	۷۰۰	V
f_s	۱۸۰۰	Hz
V_{rated}	۳۹۱	V
ω_0	۳۱۴	rad/s
ω_c	۳۱/۴۱	rad/s
m_p (DG1)	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۶	
n_q (DG1)	۰/۰۰۰۱۳	
m_p (DG2)	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴	
n_q (DG2)	۰/۰۰۰۰۸۶۷	
P_{DG2}/P_{DG1}	۱/۵	
L_D (DG1)	۴/۸	mH

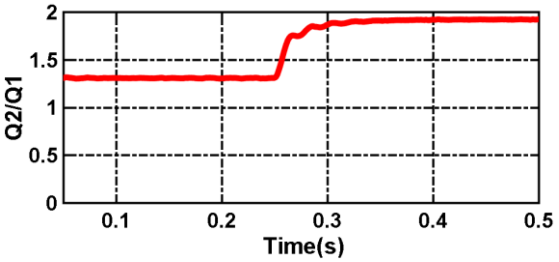
پارامتر	مقدار	واحد
L_G (DG1)	۶	mH
L_D (DG2)	۳/۲	mH
L_G (DG2)	۴	mH

شبیه‌سازی ریزشبکه با روش کنترل افتی متداول

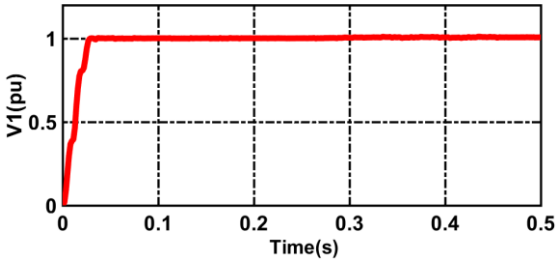
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۱۰) الی (۱۴) نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی دو DG در محدوده مجاز می‌باشد. مطابق شکل (۱۰) توان اکتیو تقریباً به نسبت ۱/۵ بین دو DG تقسیم می‌شود ولی طبق شکل (۱۱) توان راکتیو بین دو منبع به‌طور دقیق تقسیم نشده است. در زمان t=0s تا t=0.2s بار شماره ۱ به ریزشبکه متصل می‌باشد. در این فاصله DG1 نسبت به DG2 توان راکتیو بیشتری تحویل می‌دهد. در لحظه t=0.25S بار شماره ۲ به ریزشبکه وصل می‌شود و در این وضعیت DG2 توان بیشتری تحویل می‌دهد؛ بنابراین نسبت ۱/۵ در تقسیم توان راکتیو به‌دست نمی‌آید و همچنین جریان گردشی بین دو منبع زیاد می‌باشد.



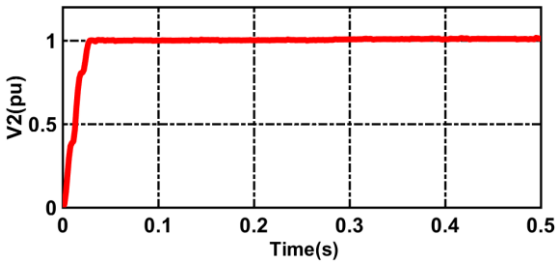
شکل ۱۰. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



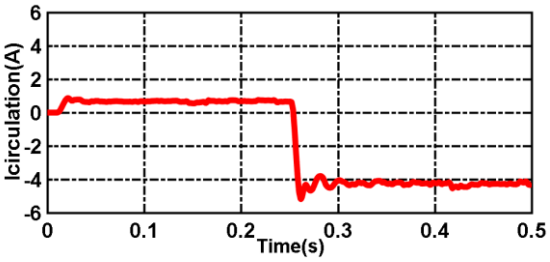
شکل ۱۱. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۱۲. ولتاژ خروجی DG1



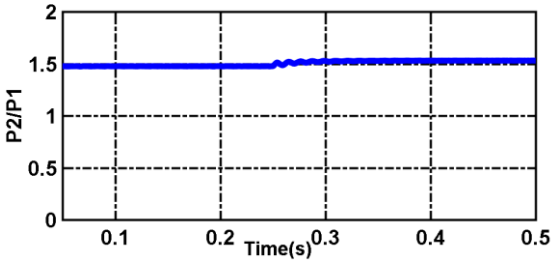
شکل ۱۳. ولتاژ خروجی DG2



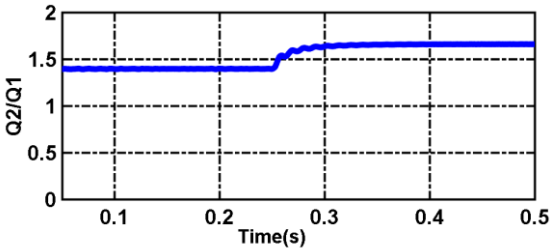
شکل ۱۴. جریان گردشی بین DG1 و DG2

شبیه‌سازی ریزشبکه با حلقه کنترل امپدانس مجازی

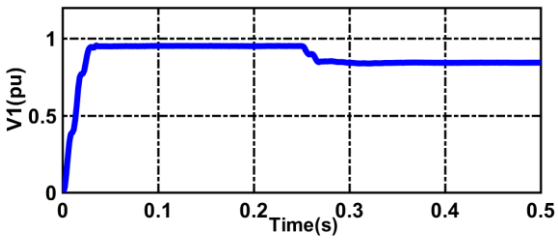
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۱۵) الی (۱۹) نشان داده شده است نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از امپدانس مجازی، سبب کاهش جریان گردشی و تقسیم بهتر توان‌های اکتیو و راکتیو بین دو DG می‌شود ولی مطابق شکل (۱۷ و ۱۸) با اضافه‌شدن بار شماره (۲) ولتاژ خروجی هر دو DG کاهش می‌یابد و افت ولتاژ زیاد می‌شود.



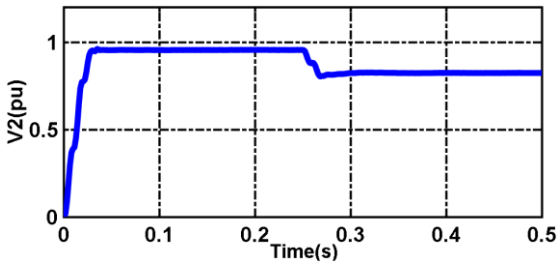
شکل ۱۵. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



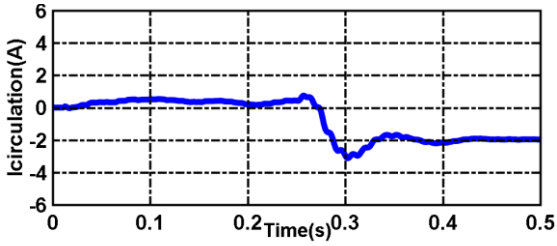
شکل ۱۶. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۱۷. ولتاژ خروجی DG1



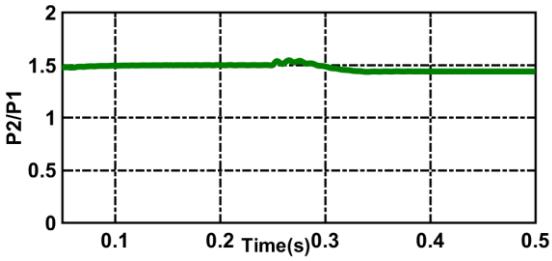
شکل ۱۸. ولتاژ خروجی DG2



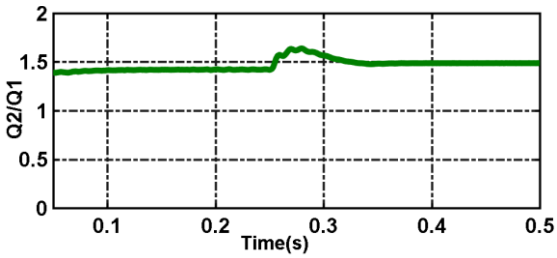
شکل ۱۹. جریان گردشی بین DG1 و DG2

شبیه‌سازی سیستم با امپدانس مجازی تطبیقی

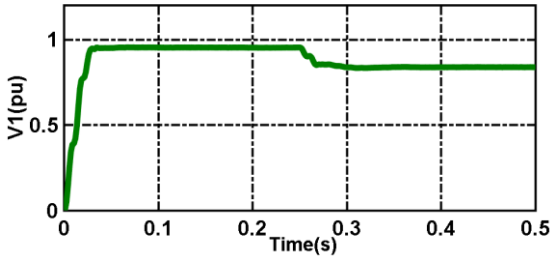
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۲۰) الی (۲۵) نشان‌داده شده است نتایج شبیه‌سازی در این مرحله نشان می‌دهد تقسیم توان اکتیو و راکتیو نسبت به مراحل قبل بهتر شده است. توان اکتیو و راکتیو DG2 تقریباً به نسبت موردنظر یعنی ۱/۵ برابر DG1 می‌باشد. ولی همان‌طور که از شکل‌های (۲۱ و ۲۲) مشخص است. ولتاژ خروجی هر دو DG از مقدار مجاز کمتر می‌باشد و با افزایش بار ولتاژ خروجی واحدها کاهش می‌یابد.



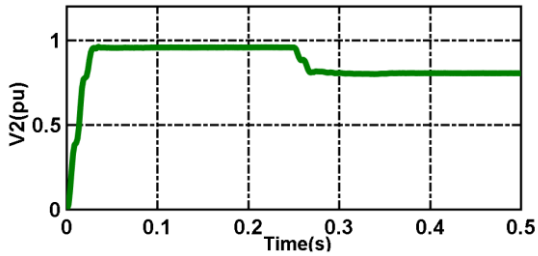
شکل ۲۱. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



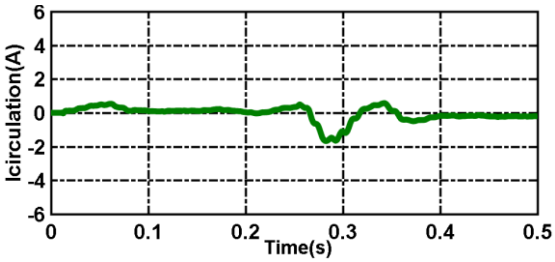
شکل ۲۲. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۲۳. ولتاژ خروجی DG1



شکل ۲۴. ولتاژ خروجی DG2



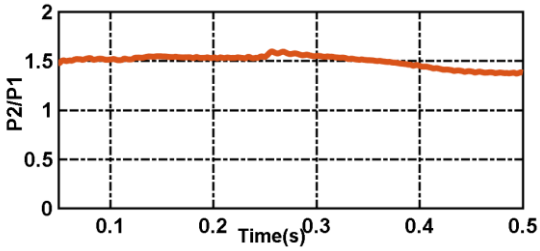
شکل ۲۵. جریان گردشی بین DG1 و DG2

شبیه‌سازی سیستم با روش کنترل افتی پیشنهادی

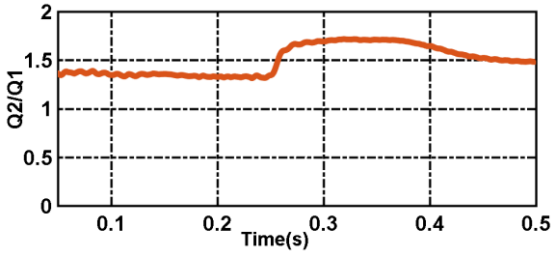
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۲۶) الی (۳۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۲۶) و (۲۷) توان اکتیو و راکتیو متناسب با ظرفیت دو واحد تولید پراکنده (ظرفیت واحد شماره ۲ یک‌ونیم برابر ظرفیت واحد شماره ۱ می‌باشد) بین هر دو واحد تقسیم شده است. هرچند برای یک لحظه کوتاه در اثر تغییر بار نسبت توان راکتیو تولیدی دو واحد متناسب با ظرفیت واحدها نمی‌باشد ولی این وضعیت گذراست و سریع نسبت توان‌ها به مقدار یک‌ونیم می‌رسد. مطابق شکل‌های (۲۸) و (۲۹) ولتاژ خروجی DG1 در مقدار ۱ پریونیت و ولتاژ خروجی DG2 در مقدار ۰/۹۷ پریونیت تثبیت می‌شود. بنابراین در روش کنترل پیشنهادی ولتاژ خروجی واحدها در محدود مجاز تثبیت می‌گردند. همچنین مطابق شکل (۳۰) سیستم کنترل پیشنهادی قادر به کاهش جریان گردشی بین واحدها می‌گردد.

تغییرات امپدانس مجازی تطبیقی استفاده شده در این مقاله در شکل (۳۱) آمده است. همان‌طور که مشخص است مقدار امپدانس مجازی بین مقدار بیشینه و کمینه تغییر می‌کند و مقدار آن به‌طور عکس با جریان گردشی تناسب دارد. با افزایش بار در t=0.25s جریان گردشی افزایش می‌یابد؛ بنابراین امپدانس مجازی نیز زیاد می‌شود تا

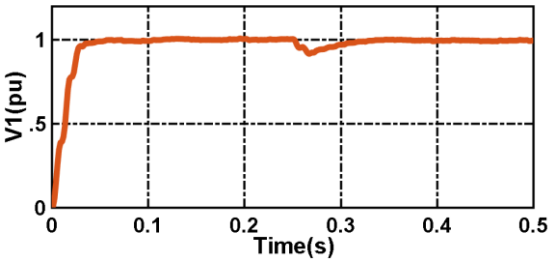
جریان گردشی را محدود کند. درصورتی‌که جریان گردشی از حد مجاز کمتر باشد، مقدار امپدانس مجازی ثابت می‌ماند و مقدار آن به یک مقدار مشخص همگرا می‌شود.



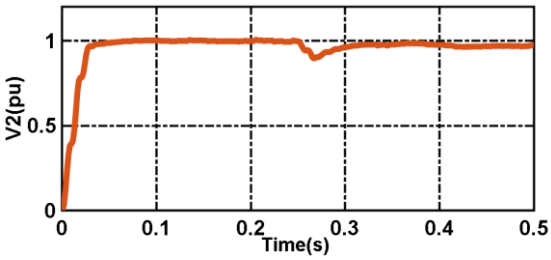
شکل ۲۶. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



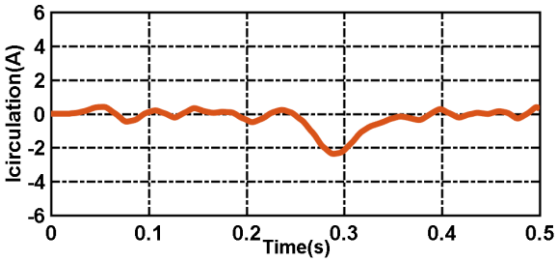
شکل (۲۷. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



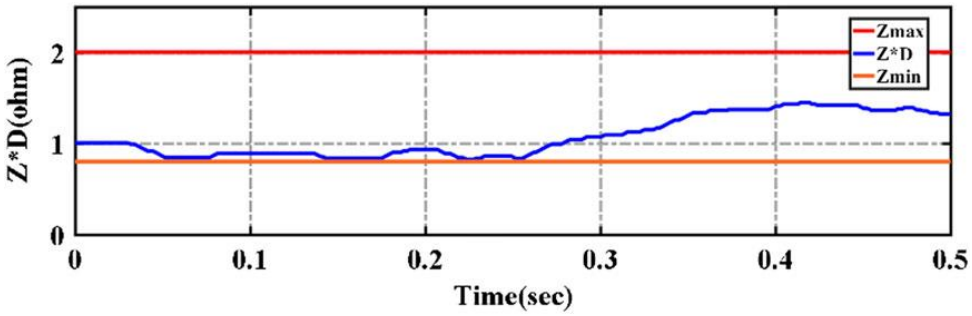
شکل ۲۸. ولتاژ خروجی DG1



شکل ۲۹. ولتاژ خروجی DG2



شکل ۳۰. جریان گردشی بین DG1 و DG2



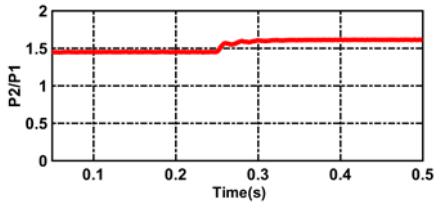
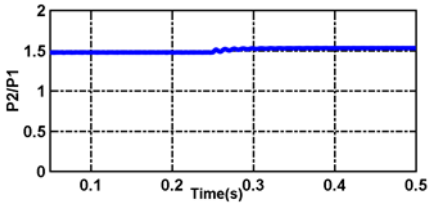
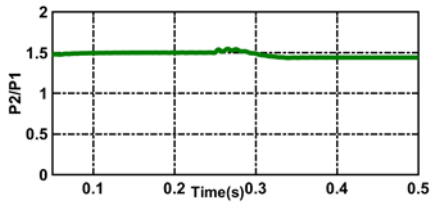
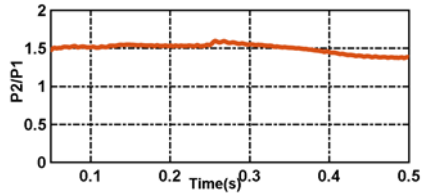
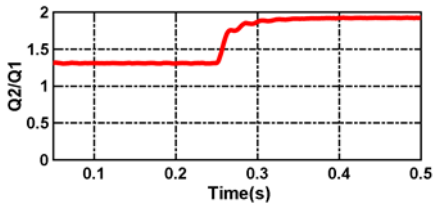
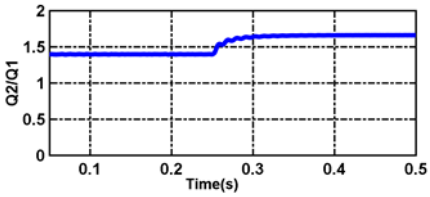
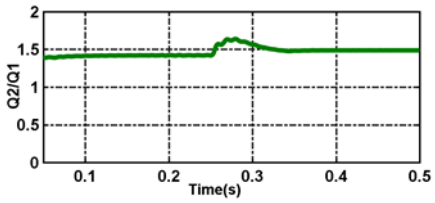
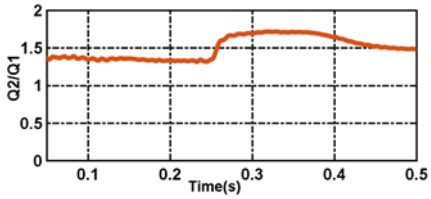
شکل ۳۱. مقادیر امپدانس تطبیقی

جدول ۲. نتایج عددی شبیه‌سازی ریزشبکه

$t \geq 0/5s$					$t \ll 0/25s$					
I_H	V_2	V_1	$\frac{Q_2}{Q_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	I_H	V_2	V_1	$\frac{Q_2}{Q_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	
۴.۸	۱	۱	۱/۹	۱/۶	۱	۱	۱	۱/۳	۱/۴۴	۱
۲	۰/۸۲	۰/۸۴	۱/۶۵	۱/۶۱	۰/۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۴	۱/۴۷	۲
۰/۲	۰/۸	۰/۸۳	۱/۴۸	۱/۴۳	۰/۱	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۴۱	۱/۴۹	۳
۰/۵	۰/۹۶۸	۱	۱/۵۵	۱/۴۲	۰/۵	۱	۱	۱/۴	۱/۵	۴

در جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی در چهار حالت فوق نشان داده شده است. در این جدول، مقادیر متوسط نسبت توان واحد دوم به واحد اول، مقدار متوسط ولتاژ خروجی هر دو DG و جریان گردشی بین واحدها در دو وضعیت قبل و بعد از اضافه‌شدن بار دوم آورده شده است. همچنین در جدول (۳) نسبت‌های توان اکتیو و راکتیو هر دو منبع تولید پراکنده در چهار روش کنترلی نشان داده شده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای چهار حالت شبیه‌سازی ۱- روش افتی مرسوم ۲- روش امپدانس مجازی مرسوم ۳- روش امپدانس مجازی تطبیقی ۴- روش افتی پیشنهادی، در جدول (۲) و جدول (۳) نشان می‌دهد که روش کنترل پیشنهادی افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی را جبران کرده و جریان کاهشی را نیز در حد قابل‌قبولی کاهش داده است. توان‌های اکتیو و راکتیو تقریباً با نسبت موردنظر و متناسب با ظرفیت واحدهای تولید پراکنده بین آنها تقسیم شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نسبت‌های توان اکتیو و راکتیو در چهار روش

	
تصویر۳-۱۱. نسبت توان اکتیو واحدها در روش کنترل افتی	تصویر ۳-۱۶. نسبت توان اکتیو واحدها در روش امپدانس مجازی ثابت
	
تصویر ۳-۲۱. نسبت توان اکتیو واحدها در روش امپدانس مجازی تطبیقی	تصویر۳-۲۶. نسبت توان اکتیو واحدها در روش کنترلی پیشنهادی
	
تصویر۳-۱۲. نسبت توان راکتیو واحدها در روش کنترل افتی	تصویر۳-۱۷. نسبت توان راکتیو واحدها در روش امپدانس مجازی ثابت
	
تصویر۳-۲۲. نسبت توان راکتیو واحدها در روش امپدانس مجازی تطبیقی	تصویر۳-۱۷. نسبت توان راکتیو واحدها در روش کنترلی پیشنهادی اول

نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش کنترلی پیشنهاد شده است که برای جبران افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی ولتاژ مرجع خروجی روش افتی اصلاح می‌شود. اصلاح ولتاژ مرجع طوری می‌باشد که ولتاژ مرجع خروجی روش افتی پیشنهادی

هر لحظه و به‌ازای تغییرات بار برابر مقدار ولتاژ مرجع خروجی روش افتی در حالت بدون بار باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی به‌خوبی می‌تواند افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی تطبیقی را جبران کند و مقدار ولتاژ خروجی DGها را در محدوده مجاز تنظیم کند و همچنین توان‌های اکتیو و راکتیو بین DGها را تقریباً مطابق ظرفیت هر واحد، تقسیم کند. در روش پیشنهادی در مقایسه با روش کنترل افتی متداول جریان گردشی نیز کاهش‌یافته است. با توجه به مکان هندسی ریشه‌ها، سیستم پیشنهادی، پایدار می‌باشد. در مقایسه با روش‌های کنترلی ارائه شده در مراجع [۱] و [۳] که از لینک مخابراتی و ارتباط فیزیکی بین واحدها برای کنترل واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است، سیستم کنترلی پیشنهادی، نیازی به لینک مخابراتی ندارد و پایداری آن تضمین شده است.

References

[1] Ahmadi, S. E., & Rezaei, N. (2020). A new isolated renewable based multi microgrid optimal energy management system considering uncertainty and demand response. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *118*, 105760. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105760

[2] Pan, H., Teng, Q., & Wu, D. (2020). MESO-based robustness voltage sliding mode control for AC islanded microgrid. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, *6*(2), 83-93. https://doi.org/10.23919/CJEE.2020.000013

[3] Zhang, S., Chen, C., Dong, L., Li, Y., Zhao, J., Nian, H., & Kong, L. (2019, May 21-24). *An Enhanced Droop Control Strategy for Accurate Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids*. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8881692

[4] Bouzid, A. E. M., Sicard, P., Chaoui, H., Cheriti, A., Sechilariu, M., & Guerrero, J. M. (2019). A novel Decoupled Trigonometric Saturated droop controller for power sharing in islanded low-voltage microgrids. *Electric Power Systems Research*, *168*, 146-161. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.11.016

[5] Pannala, S., Patari, N., Srivastava, A. K., & Padhy, N. P. (2020). Effective Control and Management Scheme for Isolated and Grid Connected DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *56*(6), 6767-6780. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3015819

[6] Yang, Q., Jiang, L., Zhao, H., & Zeng, H. (2018). Autonomous Voltage Regulation and Current Sharing in Islanded Multi-Inverter DC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(6), 6429-6437. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2712658

[7] Arboleya, P., Gonzalez-Moran, C., Coto, M., Falvo, M. C., Martirano, L., Sbordone, D., Bertini, I., & Pietra, B. D. (2015). Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(2), 1055-1063. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392071

[8] Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *3*(2), 797-807. https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2181432

[9] Shafiee, Q., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *29*(2), 1018-1031. https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2259506

[10] Bidram, A., & Davoudi, A. (2012). Hierarchical Structure of Microgrids Control System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *3*(4), 1963-1976. https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425

[11] Han, H., Liu, Y., Sun, Y., Su, M., & Guerrero, J. M. (2015). An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(6), 3133-3141. https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2332181
[12] Tuladhar, A., Hua, J., Unger, T., & Mauch, K. (2000). Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *36*(1), 131-138. https://doi.org/10.1109/28.821807
[13] Guerrero, J. M., Luis Garcia de, V., Matas, J., Castilla, M., & Miret, J. (2005). Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *52*(4), 1126-1135. https://doi.org/10.1109/TIE.2005.851634
[14] He, J., & Li, Y. W. (2011). Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *47*(6), 2525-2538. https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2168592
[15] Li, Y. W., & Kao, C. (2009). An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *24*(12), 2977-2988. https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2022828
[16] Zhang, M., Du, Z., Lin, X., & Chen, J. (2015). Control Strategy Design and Parameter Selection for Suppressing Circulating Current Among SSTs in Parallel. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(4), 1602-1609. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402835

پیوست:

مدل سیگنال کوچک:

مدل کامل سیگنال کوچک DG شامل کنترل افتی، کنترل امپدانس مجازی، کنترل ولتاژ و جریان و فیلتر، در زیر نشان داده شده است [۱۶].

$$A_P = \begin{bmatrix} -\omega_C & 0 \\ 0 & -\omega_C \end{bmatrix} \qquad c_P = \begin{bmatrix} 0 & -n \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_P = \frac{3}{2}\begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_C I_{od} & \omega_C I_{oq} & \omega_C U_{od} & \omega_C U_{oq} \\ 0 & 0 & -\omega_C I_{od} & \omega_C I_{od} & \omega_C U_{od} & -\omega_C U_{od} \end{bmatrix}$$

$$D_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega L_v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega L_v & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_V = 0, \quad A_c = 0 \quad , \quad B_{V1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} , \quad B_{C1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{V2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad C_V = \begin{bmatrix} K_{1i} & 0 \\ 0 & K_{1i} \end{bmatrix}$$

$$D_{V1} = \begin{bmatrix} K_{1P} & 0 \\ 0 & K_{1P} \end{bmatrix} \qquad D_{V2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_{1P} & -\omega C_f & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega C_f & -K_{1P} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{C1} = \begin{bmatrix} K_{2P} & 0 \\ 0 & K_{2P} \end{bmatrix} \qquad D_{C2} = \begin{bmatrix} -K_{2P} & -\omega L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_f & -K_{2P} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} \frac{-r_f}{L_f} & \omega & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{-r_f}{L_f} & 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & \frac{-1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & \frac{-1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_G} & 0 & -\frac{r_G}{L_G} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_G} & -\omega & -\frac{r_G}{L_G} \end{bmatrix}$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} {}^{1}/_{L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_f & {}^{1}/_{L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A_S = \begin{bmatrix} A_P & 0 & 0 & B_P \\ B_{V1}C_P & A_V & 0 & B_{V2} + B_{V1}D_P \\ B_{C1}D_{V1}C_P & B_{C1}C_V & A_C & B_{C1}D_{V2} + B_{C2} + B_{C1}D_{V1}D_P \\ B_{01}D_{C1}D_{V1}C_P & B_{O1}D_{C1}C_V & B_{O1}C_C & A_O + B_{O1}(D_{C1}D_{V2} + D_{C2} + D_{C1}D_{V1}D_P \end{bmatrix}$$

پارامترها و مقادیر شرایط اولیه برای مطالعه پایداری در جدول زیر ارائه شده است:

Parameters	Value	Parameters	Value
U_{dc}	۷۰۰ ولت	K_{2i}	۳۳۳
ω_C	۳۱/۴ *rad/s*	ω	۳۱/۴ *rad/s*
K_{1p}	۱۱۵	U_{dq}	۱۶۲ ولت
K_{1i}	۲۰۵۹۴۴	I_{od}	۱۹/۷ آمپر
K_{2p}	۰/۰۵۷۷	I_{oq}	۱۵/۶ آمپر
I_{id}	۲۷ کیلو آمپر	U_{od}	۸۱۱۰ ولت
I_{iq}	۹۳ کیلو آمپر	U_{oq}	۹۰ ولت

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 137-153
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.262698.1326
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.7.0

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Fast Texture Retrieval Using Walsh-Hadamard Transform

Mohammad Amiri[1]*

[1]Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.20.2021
Revised: 04.17.2021
Accepted: 05.17.2021

Keyword:
Texture similarity
Earth mover distance
Walsh-Hadamard transform

***Corresponding Author:**
Mohammad Amiri
Email: *amiri.mgh@gmail.com*

ABSTRACT

One of the most important issues in image processing is to find algorithms that can determine the similarity and dissimilarity of a texture image with other images in a short time. Because texture images have repetitive patterns throughout the image, similarity algorithms for natural or non- texture images are not effective for texture images. Deep learning algorithms also require large amounts of data in the same group and for texture images that do not have much data volumes available, they do not work. In this paper, an algorithm was developed to rapidly search for tissue similarity using the Walsh-Hadamard transform. This algorithm consists of three steps. In the first step, the Gabor filter was used to extract the high-dimensional feature from each texture. Then, a randomized Walsh-Hadamard transform was used to convert high-dimensional feature from each texture into two-dimensional feature. In the third step, an earth mover distance (EMD) approximation algorithm was used to determine the similarity or dissimilarity between two textures that are represented by two-dimensional vectors. The results of the proposed algorithm proved that this approximation algorithm is relatively suitable for real tissues.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۱۵۳-۱۳۷
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.262698.1326
20.1001.1.23829796.1400.18.3.7.0
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بازیابی سریع تصاویر بافتی با استفاده از تبدیل والش- هادامارد

محمد امیری[1*]

۱- استادیار،گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

کلید واژگان:
تشابه بافتی
فاصله حرکت زمینی
تبدیل والش- هادامارد

***نویسنده مسئول:** محمد امیری
پست الکترونیکی:
amiri.mgh@gmail.com

چکیده

یکی از مسائل مهم در پردازش تصویر، پیدا کردن الگوریتم‌هایی است که بتوان تشابه و عدم‌تشابه یک تصویر بافت را با سایر تصاویر در زمان کوتاه مشخص کند. از آنجایی که تصاویر بافت دارای الگوهای تکرارشونده در کل تصویر هستند، الگوریتم‌های مشابهت‌یابی برای تصاویر معمولی برای تصاویر بافت کارایی ندارند. الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق هم نیازمند حجم بسیار زیادی داده در همان گروه هستند و برای تصاویر بافت که حجم داده زیادی در دسترس نباشد کارایی ندارند. در این مقاله، الگوریتمی برای جستجوی سریع تشابه بافتی با استفاده از تبدیل والش- هادامارد، توسعه داده شد. این الگوریتم، از سه مرحله تشکیل شده است: در مرحله اول از فیلتر گابور برای استخراج بردارهایی با ابعاد بالا از هر بافت، استفاده شد. سپس، از یک تبدیل تصادفی‌شده والش- هادامارد استفاده گردید تا بردارهایی با ابعاد بالا به بردارهایی با دو بُعد جای‌گذاری شود. در مرحله سوم، از یک الگوریتم تقریب برای اندازه‌گیری فاصله بین دو بردار استفاده شد تا تشابه یا عدم‌تشابه بین دو تصویر بافت مشخص شود. نتایج آزمایش عملی الگوریتم گواه این امر هستند که این تقریب برای بافت‌های واقعی نسبتاً مناسب هستند.

مقدمه

جستجوی تشابه بافتی، مسئله‌ای اساسی در بینایی کامپیوتر است که طیف وسیعی از کاربردهای مختلف را پوشش می‌دهد [۱-۳]. یادگیری ماشین، شامل طبقه‌بندی و خوشه‌بندی است. یکی از رویکردهایی که برای حل این مسئله، بسیار مورد مطالعه بوده است از طریق تقلیل مسئله جستجوی تشابه به اندازه‌گیری فاصله حرکت زمینی[1] (EMD) است. در این نوشتار برای محاسبه EMD به‌صورت دقیق یا به‌صورت تقریبی راه‌حل‌هایی ارائه می‌شود.

با توجه به پیچیدگی زمانی حل کامل مسئله EMD که از مرتبه $O(n^2)$ می‌باشد، حل تقریبی این مسئله مورد توجه قرار گرفته است [۴]. در این مقاله از یک الگوریتم با پیچیدگی زمانی $O(log\ n)$ برای محاسبه EMD بین دو بردار ویژگی مستخرج از تصاویر استفاده شده است. در ابتدا مجموعه ویژگی‌های مستخرج از هر بافت پس از کاهش بُعد و تصویر از یک فضای ۶۴ بعدی به فضای دوبعدی، در یک بردار $\ell 1$ نشان داده می‌شود. تشابه یا عدم‌تشابه بین دو بافت، با محاسبه فاصله ℓ_1 بین دو بردار محاسبه می‌گردد.

جای‌گذاری EMD در نُرم ℓ_1 ازطریق روش جزءبندی چهاردرخت[2] در فضای اقلیدسی با ابعاد کم انجام می‌گیرد. برای این کار دو راه‌حل وجود دارد: الف) استخراج بردارهای ویژگی با ابعاد کم و سپس اعمال روش جزءبندی چهاردرخت. ب) استخراج بردارهای ویژگی با ابعاد زیاد و سپس اعمال تکنیک‌های کاهش ابعاد برای کاهش ابعاد بردار ویژگی با استفاده از قضیه جانسون- لیندنستراس[3] (JL) [۵] و تبدیل آنها به بردارهایی با ابعاد کم و سپس اعمال روش جزءبندی چهاردرخت.

مشکلی که در روش «الف» وجود دارد این است که بردارهای ویژگی که با ابعاد کم از یک بافت استخراج شده‌اند، اطلاعات کافی از بافت ندارند و به‌طورکلی یک نماد یا نماینده ضعیفی از بافت هستند. مشکلی که در روش «ب» وجود دارد این است که قضیه JL، ابعاد بردارها را به $O(\log n)$ کاهش می‌دهد که در آن n تعداد بردارها است. زمان اجرای روش جزءبندی چهاردرخت، $O(2^{d} n \log n)$ است که در آن d ابعاد آن فضایی است که بردارها در آن قرار دارند که این ابعاد $O(log\ n)$ است (پس از اعمال قضیه JL)، و بدین ترتیب، زمان اجرا به $poly(n)$ افزایش می‌یابد که همانند حل دقیق مسئله جستجوی تشابه بافت‌ها، به‌کُندی انجام می‌گیرد.

علی‌رغم پیشرفت الگوریتم‌های یادگیری عمیق در سال‌های اخیر، به دلیل نیاز این شبکه‌ها به حجم داده زیاد و همچنین کاربرد بیشتر این شبکه‌ها در طبقه‌بندی تصاویر، استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق متناسب مسائل طبقه‌بندی هستند تا بازیابی تصاویر در پایگاه داده.

در این مقاله، از طریق آزمایش‌هایی مشاهده می‌کنیم که برای مسئله یافتن تشابه بین بافت‌ها، می‌توانیم بردارهای ویژگی با ابعاد بالا را استخراج کنیم و سپس از تبدیل تبدیل والش- هادامارد برای تنک‌سازی این بردارهای استخراج- شده استفاده کنیم و سپس از یک نسخه تُنُک قضیه JL برای جای‌گذاری این بردارها در فضای اقلیدسی دوبُعدی استفاده می‌کنیم. آزمایش‌های ما نشان می‌دهند که اگر ما بردارهای استخراج‌شده از یک بافت را توسط تبدیل والش- هادامارد پیش‌پردازش کنیم، کاهش ابعاد به دو بُعد، برای بافت‌های واقعی نسبتاً خوب است.

---

[1] Earth mover distance
[2] Quad-tree partitioning
[3] Johnson-Lindenstrauss (JL)

پیشینه تحقیق

استخراج ویژگی‌های تصاویر بافت به‌منظور طبقه‌بندی، خوشه‌بندی یا بازیابی تصاویر بافت صورت می‌گیرد. برخی از این الگوریتم‌ها مبتنی بر استفاده از فیلتر گابور هستند و برخی هم مبتنی بر الگوی دودویی محلی[1].

در [۶] یک الگوریتم مقاوم به چرخش، شدت نور و مقیاس برای استخراج ویژگی با استفاده از فیلتر گابور برای بازیابی تصاویر پزشکی ارائه شده است. از تلفیق فیلتر گابور و ماتریس جهت لبه[2] برای استخراج ویژگی با بعد کاهش‌یافته به‌منظور استفاده در طبقه‌بندی تصاویر بافت با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در [۷] استفاده شده است. با استفاده هم‌زمان از دامنه و فاز فیلتر گابور در تحقیق کیم و همکاران [۸] نشان داده شده است که فیلتر گابور می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به فیلتر الگوی دودویی محلی در طبقه‌بندی تصاویر بافت داشته باشد.

الگوریتم دودویی محلی را نخستین‌بار اوجالا و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۲ ارائه کردند. این بردار ویژگی برای هر پیکسل با استفاده از پیکسل‌های همسایگی در یک شعاع خاص ساخته می‌شود. تمام خانه‌هایی که مقدار آنها از پیکسل مرکزی بیشتر است مقدار ۱+ و بقیه مقدار صفر را می‌گیرند. نسخه‌های مختلفی از این الگوریتم برای بازیابی تصاویر بافت مانند [۱۰]، بازیابی براساس محتوی و الگوریتم دودویی محلی [۱۱] و بازیابی محتوی براساس تلفیق الگوریتم دودویی و SIFT[3] [۱۲] ارائه شدند.

استخراج بردار ویژگی با ابعاد بالا با استفاده از فیلتر گابور

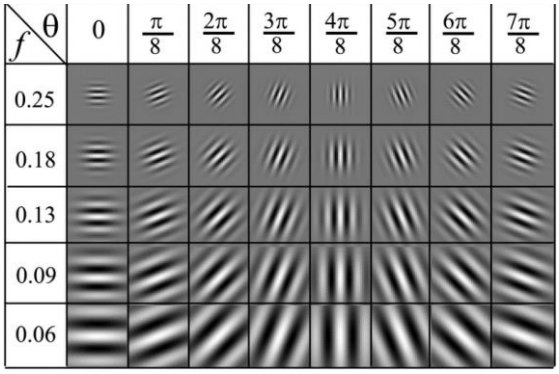
فیلتر گابور که دنیس گابور[4] [۱۳] توسعه داده است، فیلتری خطی است که برای آشکارسازی لبه در پردازش تصویر استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده است که لایه اول بخش بینایی پستانداران مانند فیلتر گابور عمل می‌کند و به همین دلیل منطبق بودن بیولوژیکی بیشتر در مقایسه با سایر فیلترها، این فیلتر بیشتر از سایر فیلترها مورد توجه قرار گرفته است [۱۴] و [۱۵].

فیلترهای گابور دارای ویژگی محلی‌سازی هم در حوزه مکان و هم در حوزه فرکانس هستند و به همین دلیل برای بخش‌بندی تصاویر بافت‌ها [۶; ۱۶-۲۲] مناسب می‌باشند. در حوزه مکان، یک فیلتر گابور دوبُعدی، یک تابع کرنل گوسی است که توسط موج سینوسی صفحه‌ای مدوله شده است.

موجک‌های گابور از طریق گسترش[5] و چرخش[6] موجک مادر (تابع گابور) به‌دست می‌آیند. شکل ۱ یک بانک فیلتر گابور با ۸ چرخش در حوزه مکان و ۵ گسترش در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد.

---

[1] Local binary pattern
[2] Edge direction matrix
[3] Scale-invariant feature transform
[4] Dennis Gabor
[5] Scale
[6] Orientation



شکل ۱. بانک فیلتر گابور با ۸ زاویه چرخش و ۵ گسترش

در این مقاله از الگوریتم گابور به‌عنوان الگوریتم استخراج ویژگی استفاده می‌شود. به‌طور خاص، در یک بافت مشخص T با سایز $x \times y$، از یک فیلتر گابور برای استخراج n بردار ویژگی که هرکدام دارای d بُعد می‌باشد، استفاده می‌کنیم.

الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی برای استخراج ویژگی از سه فیلتر گابور، تبدیل جانسون- لیندنستراس و والش- هادامارد استفاده می‌کند. فیلتر گابور برای استخراج ویژگی‌های مقاوم به چرخش و از تبدیل والش- هادامارد برای تنک‌سازی بردار ویژگی و بالاخره از تبدیل جانسون- لیندنستراس برای کاهش بعد استفاده شده است. هریک از این الگوریتم‌ها به‌تنهایی در کاربردهای مختلف استفاده شده‌اند اما در این مقاله از ترکیب این الگوریتم‌ها برای بازیابی تصاویر بافت استفاده شده است.

توضیح کلی الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زیر است:

- ورودی: دو تصویر بافت T_1 و T_2 با سایز $x \times y$
- استخراج دو مجموعه n تایی R و B از بردار ویژگی با بعد d به‌ترتیب از T_1 و T_2 با استفاده از فیلتر گابور
- استخراج بردارهای ویژگی جدید R’ و B’ با بعد d’ با استفاده از تبدیل والش- هادامارد در قضیه ۳ (d’<d)
- اجرای الگوریتم EMD روی بردارهای B’ و R’ برای یافتن بردارهای VB’ و VR’
- فاصله ℓ_1 بین دو بردار VB’ وVR’ را به‌صورت $||VR' - VB'||_1$ بیان می‌کنیم که یک تقریب برای EMD (R’,B’) است.
- خروجی: مرتب‌سازی تصاویر برحسب میزان شباهت به تصویر اولیه برحسب فاصله $||VR' - VB'||_1$.

از آن‌جایی که برای هر تصویر بافت ۱۶ تصویر مشابه در پایگاه داده وجود دارد، ارزیابی میزان کارایی الگوریتم‌های مختلف برحسب تعداد تصاویر مشابه درست در ۱۶ تصویر اول صورت می‌گیرد.

تکنیک کاهش ابعاد با استفاده از تبدیل والش- هادامارد

یکی از معایب فیلتر گابور برای مقایسه بین تصاویر برای پیدا کردن تصاویر مشابه در یک پایگاه داده تصاویر، زمان اجرای زیاد آن به دلیل ابعاد زیاد بردارهای ویژگی استخراج شده با این روش می‌باشد. برای حل این مسئله معمولاً از روش‌های کاهش بعد استفاده می‌شود.

یکی از تکنیک‌های قدیمی برای کاهش ابعاد، قضیه JL است [۵]. JL در یادگیری ماشین کاربردهای بسیاری دارد؛ ازجمله: خوشه‌بندی [۲۳]، طبقه‌بندی [۲۴]، رگرسیون خطی [۲۵] و جریان داده‌ها [۲۶]. قضیه JL یک تبدیل خطی تصادفی است که برای یک بردار حقیقی دلخواه α با d بُعد در قضیه ۱ ضمیمه بیان شده است.

با استفاده از این لم و اعمال یک اتحاد، قضیه جانسون- لیندنستراس را برای یک مجموعه از نقاط n در فضای اقلیدسی d بُعدی خواهیم داشت. به‌صورت غیررسمی، قضیه JL بیان می‌کند که اگر یک مجموعه از نقاط P با سایز n را درون یک زیرفضای تصادفی s برای $s = O(\varepsilon^{-2} \log d)$ جای‌گذاری کنیم، آن‌گاه تمام فواصل بین جفت نقاط، با فاکتور $(1 + \varepsilon)$ تقریب زده خواهد شد.

نگاشت خطی تصادفی T در قضیه ۲ معمولاً با یک ماتریس S با ابعاد $s \times d$ تعریف می‌شود که در آن داریم: $T(a) = Sa$ که برای مقیاس‌گذاری مناسب، در مقدار $\sqrt{d/s}$ ضرب می‌شود.

برای هرچه تُنُک‌تر ساختن S، آلیون و چازلی [۲۷] نشان دادند که درایه‌های S مقدار صفر را با احتمال 1-q از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس 1/q به‌دست می‌آورد که در آن مقدار متغیر q برابر است با $\frac{(\log d)^{O(1)}}{d}$. ماتوسک در [۲۸] نشان داد که می‌توانیم درایه‌های S را حتی به‌صورت مؤثرتر، انتخاب کنیم. به‌طورخاص، ماتوسک قضیه ۳ ضمیمه را اثبات کرده است.

از این قضیه در الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌کنیم.

تعبیه EMD در نُرم ℓ_1

برای مقایسه بین دو تصویر ابتدا باید بردار ویژگی از هرکدام از تصاویر استخراج شود و سپس فاصله بین آنها را اندازه‌گیری کرد. فاصله اقلیدسی و فاصله منهتن به‌عنوان دو روش فراگیر برای اندازه‌گیری فاصله بردارها در ریاضیات استفاده می‌شوند اما این روش‌ها برای مقایسه، تصاویر کارایی لازم را ندارند. یکی از الگوریتم‌های کارآمد برای اندازه‌گیری فاصله بردار ویژگی در تصاویر، روش EMD می‌باشد. این روش با پاسخ به این سؤال شروع می‌شود که حداقل کار لازم برای تبدیل یک توزیع به یک توزیع دیگر چقدر است؟ در ادامه به تشریح این الگوریتم به‌صورتی که در این مقاله مورداستفاده قرار گرفته است می‌پردازیم.

برای ساده‌تر بیان کردن این موضوع، فرض می‌کنیم که یک عدد حقیقی همیشه به عدد صحیح بعدی گرد می‌شود. علاوه بر این، فرض می‌کنیم که داده‌ها (نقاط) داده شده در یک شبکه[1] با اندازه Δ هستند (برگرفته از مجموعه[2] $\{0.1.2 \ldots \Delta\}$)، در ظاهر، این مسئله یک محدودیت است اما می‌توان در بسیاری از کاربردها ازجمله در بازیابی تصاویر از آن استفاده کرد. فرض می‌کنیم که Δ یک توان ۲ است. بدین ترتیب هر نقطه ورودی، در $[\Delta]^2$ قرار دارد. برای هر سلول c و هر مجموعه P از نقاط در صفحه، $P \cap c$ نشان‌دهنده مجموعه تمام نقاط در P است که در c قرار دارند (اشتراک). در سراسر این مقاله، معمولاً فرض می‌کنیم که یک سلول یک مربع در فضای $\mathbb{R}^2$ است، سپس برای هر سلول c، ما طول جانبی c را با ℓ_c نشان می‌دهیم و تعداد نقاط P درون c را با $(n_c = |P \cap c|)$ نشان می‌دهیم.

[1] Grid

a) جابه‌جایی تصادفی[1] نقاط داخل هر سلول: فرض بر این است که هر شبکه به تعدادی زیرشبکه بدون هم‌پوشانی تقسیم می‌شود و داده‌ها (نقاط) در داخل این زیرشبکه‌ها قرار دارند. برای اطمینان از خصوصیات مناسب نقاط ورودی، فرض ما این است که این مرزهای بین شبکه‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

برای تعریف مرز شبکه‌ها، ابتدا یک شبکه تودرتو $G_0 \ldots G_i \ldots G_{\log \Delta+1}$ را در سلول ورودی $[2\Delta]^2$ قرار می‌دهیم (که اندازه آن دو برابر اندازه سلول اصلی است) ؛ به‌طوری که طول جانبی یک سلول c در شبکه G_i، $\ell_c = 2^i$ است. به عبارت دیگر، $G_{\log \Delta+1}$ یک سلول تکی c با طول جانبی $\ell_c=2\Delta$ دارد و هر سلول c در G_i به چهار زیرسلول در G_{i-1} تبدیل می‌شود. سپس به‌طور تصادفی، مرز شبکه‌ها را تغییر می‌دهیم. برای این کار یک جفت عدد صحیح $a, b \in \{0, 1 \ldots \Delta\}$ را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کنیم و سپس هر نقطه $p \in P$ را به اندازه بردار (a, b) جابه‌جا می‌کنیم.

فرض ما این است که ما یک شماره‌گذاری منحصربه‌فرد برای سلول‌ها در G_i داریم؛ به‌طوری که هنگامی که ما به یک سلول $c \in Gi$ رجوع می‌کنیم، منظور ما این است که این سلول برای $1 \le c \le |G_i|$ مطابق با این شماره‌گذاری، یک عدد منحصربه‌فرد c دارد. ما چهار زیرسلول $c \in G_i$ که در شبکه G_{i-1} هستند را بچه‌های c، و c را سلول والدین هریک از این چهار زیرسلول می‌نامیم.

جای‌گذاری[2](تعبیه). فرض کنید که ما دو مجموعه نقطه $R', B' \subseteq [\Delta]^2$ با تعداد n نقطه داریم. فاصله EMD بین R' و B'، وزن حداقل تطابق وزنی بین R' و B' است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EMD(R'.B') = \min_{\pi:R'\to B'} \sum_{r\in R'} \|r-\pi(r)\|_2 \qquad (۱)$$

که در آن حداقل یک نگاشت از R' به B' وجود دارد و $\|r-\pi(r)\|_2$ فاصله اقلیدسی بین یک نقطه r و نقطه نگاشت‌شده $\pi(r)$ است. ما به دنبال تقریب وزن حداقل تطابق وزنی بین R' و B' هستیم. برای این کار از الگوریتم‌های ارائه شده در [۶] و [۱۶] استفاده شده است که این الگوریتم محاسبه EMD(R',B') را با تقریب $O(\log n)$ انجام می‌دهد. به عبارت دیگر:

$$\mathrm{EMD}\left(R' \text{ و } B'\right) \le \mathrm{Est}\left(R' \text{ و } B'\right) \le O(\log n)\cdot \mathrm{EMD}\left(R' \text{ و } B'\right) \qquad (۲)$$

علی‌رغم این حقیقت که ضریب تقریب این الگوریتم در این تئوری از مرتبه $O(\log n)$ است، این الگوریتم در عمل بسیار خوب کار می‌کند. ما این الگوریتم را الگوریتم جای‌گذاری EMD در نُرم ℓ_1 می‌نامیم و در ادامه آن را توضیح خواهیم داد.

ورودی‌ها دو مجموعه نقاط $R', B' \subseteq [\Delta]^2$ با تعداد n نقطه هستند. خروجی‌ها دو بردار VR' و VB' هستند که فاصله ℓ_1 آنها ($\|VR' - VB'\|_1$) یک تقریب $O(\log n)$ به $EMD(R'.B')$ است. ما نحوه تشکیل VR' را تشریح می‌کنیم. نحوه ساختن VB' نیز به همین صورت است. بردار VR' یک بردار حقیقی دارای $n(1+\frac{1}{4}+\cdots+\frac{1}{4^i}+\cdots+\frac{1}{4^{\log \frac{n}{4}}})$ بُعدی است. n عنصر اول بردار متناظر با n سلول در G_0 هستند و به همین ترتیب برای بقیه. به عبارت دیگر می‌توان گفت:

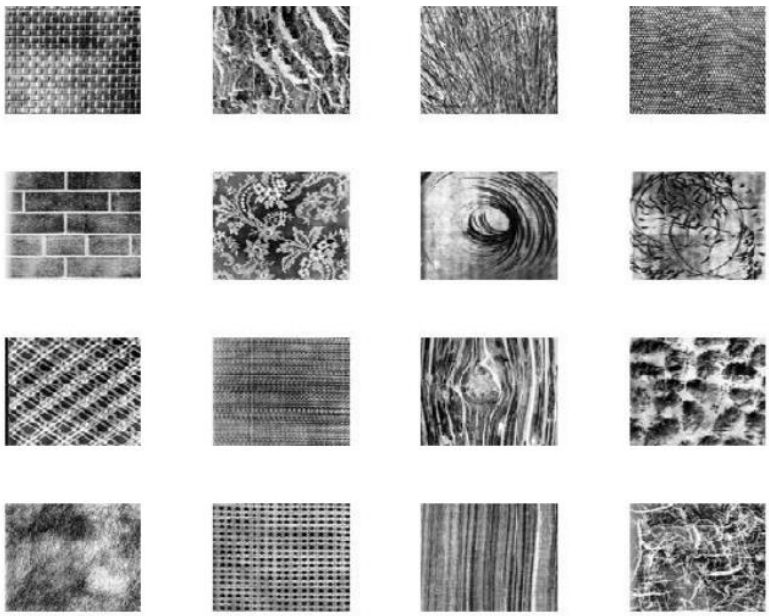
$$v_{R'} = (\overbrace{x_1,\cdots,x_n}^{G_0},\overbrace{x_{n+1},\cdots,x_{n+\frac{n}{4}}}^{G_1},\cdots,\underbrace{x_{n+\frac{n}{4}+\cdots+\frac{n}{4^{i-1}}},\cdots,x_{n+\frac{n}{4}+\cdots+\frac{n}{4^{i-1}}}}_{G_i},\cdots) \qquad (۳)$$

[1] Randomly shift
[2] Embedding

سپس با استفاده از قضیه ۴ ضمیمه می‌توان اثبات کرد که این تقریب، تقریب خوبی برای فاصله EMD می‌باشد.

نتایج آزمایش

برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی آزمایش‌های مختلفی انجام شده است و نتایج آنها را با سایر روش‌ها مقایسه شده است. برای آزمون تصاویر از پایگاه داده برودتاز [۲۹] که شامل ۱۱۲ تصویر بافت با ابعاد ۵۱۲×۵۱۲ می‌باشد استفاده شده است. در شکل ۲ تعدادی از این تصاویر بافت را می‌توان ملاحظه کرد. برای افزایش تعداد نمونه‌ها، هر تصویر به ۱۶ تصویر به ابعاد ۱۲۸×۱۲۸ تقسیم شده است. بنابراین تعداد کل تصاویر برابر ۱۷۹۲ شکل می‌باشد.



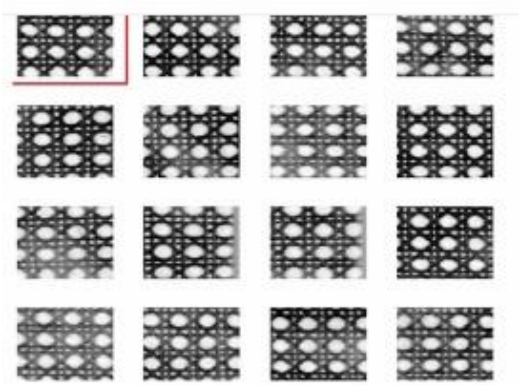
شکل ۲. ۱۶ بافت نمونه از ۱۱۲ بافت موردمطالعه در این مقاله

در تمامی روش‌های زیر برای هر تصویر بافت T در پایگاه داده، ۱۶۹ بردار ویژگی که هرکدام از آنها d = 64 بُعد دارد استخراج شده است. آن‌گاه متناسب با هر روش این بردارهای ویژگی استخراج شده تغییراتی کرده‌اند. روش‌های زیر مورد مقایسه قرار گرفتند:

- روش ۱، گابور: برای هر بافت T در پایگاه داده، ۱۶۹ بردار ویژگی که هرکدام از آنها d = 64 بُعد دارد استخراج شده است. در این روش هیچ‌گونه کاهش بعدی انجام نشده است.

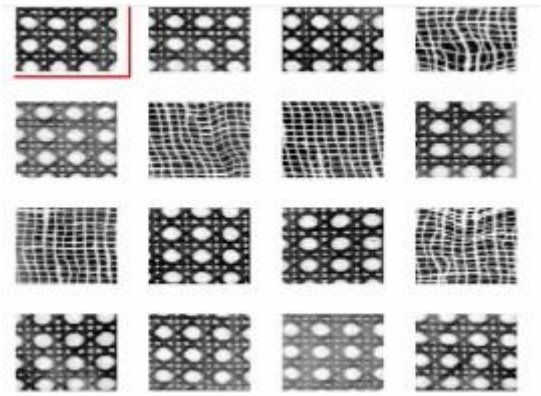
این نتیجه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در بین این ۱۵ زیربافت مشاهده می‌کنیم، هیچ‌گونه عدم‌تطابقی وجود ندارد.

نتیجه حاصل از جستجو در پایگاه داده در شکل ۳ نشان داده شده است. در تمامی مثال‌های این بخش تصویر اول سمت چپ، تصویر مورد پرس‌وجو[1] می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است هر ۱۶ تصویر پیدا شده صحیح است و نشان‌دهنده تطابق ۱۰۰ درصدی می‌باشد.



شکل ۳ .نتیجه پرس‌وجو با استفاده از فیلتر گابور ۶۴ بعدی

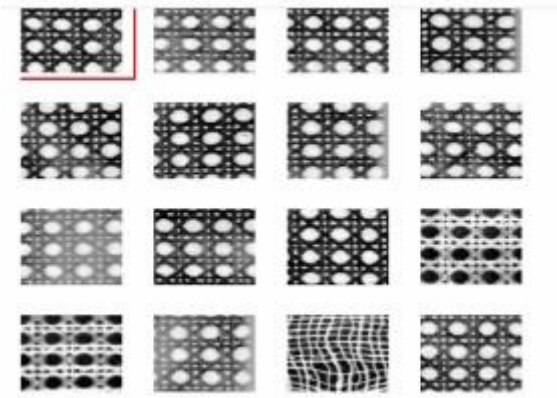
روش ۲، گابور تصادفی: به‌صورت تصادفی ۱۶۹ بردار استخراج‌شده را به یک زیرفضای دو بُعدی با s = 2 در قضیه ۲ سوق می‌دهیم. نتیجه حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در بین این ۱۵ تصویر بافت مشاهده می‌کنیم پنج عدم‌تطابق وجود دارد که نشان‌دهنده موفقیت ۶۶ درصدی در یافتن اشکال مشابه می‌باشد.



شکل ۴. روش گابور تصادفی

- روش ۳، گابور- هادامارد تصادفی: تبدیل والش– هادامارد را به بردارهایی که با استفاده از فیلتر گابور استخراج شده‌اند، اعمال می‌کنیم. در نهایت، به‌صورت تصادفی این ۱۶۹ بردار را به یک زیرفضای دو بُعدی سوق می‌دهیم. این دو مرحله با استفاده از قضیه ۳ برای s = 2 انجام می‌گیرد.

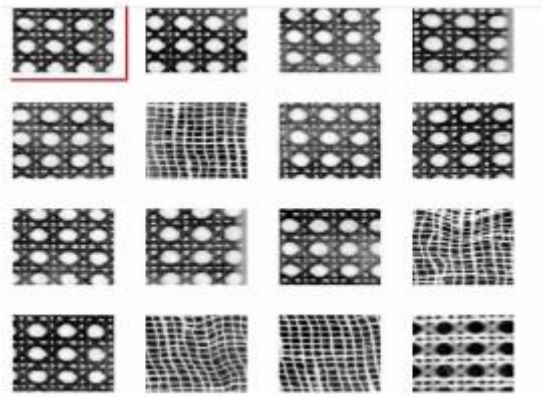
[1] Query



شکل ۵. روش گابور– هادامارد تصادفی

شکل ۵ نتیجه این روش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم یک عدم‌تطابق وجود دارد که نشان‌دهنده موفقیت ۹۳ درصدی در یافتن تصاویر مشابه است. مشاهده می‌شود که تنها تفاوت بین روش گابور تصادفی و گابور- هادامارد تصادفی این است که در روش سوم از تبدیل والش- هادامارد برای گسترش مختصات هر شکل استفاده می‌کنیم. با این حال، همان‌طور که در آزمایش‌هایمان مشاهده می‌کنیم، استفاده از تبدیل والش– هادامارد این امکان را برای ما فراهم می‌آورد تا ابعاد بردار نهایی را به ۲ کاهش دهیم که این مقدار بسیار کوچک‌تر از ابعاد بردار نهایی در قضیه ۳ است.

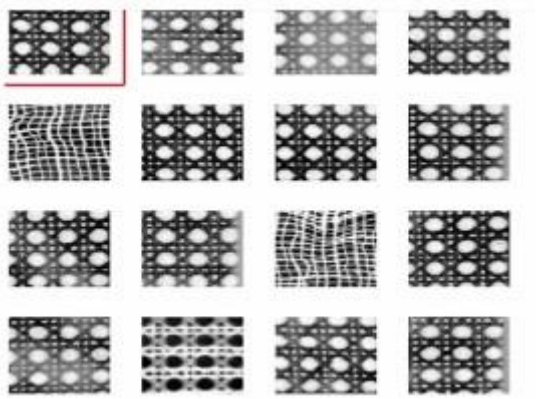
- روش ۴، گابور تصادفی EMD: به‌صورت تصادفی این ۱۶۹ بردار مستخرج را به یک زیرفضای دو بُعدی با $s = 2$ در قضیه ۲ سوق می‌دهیم. سپس از الگوریتم جای‌گذاری EMD در نُرم ℓ_1 و قضیه ۴ استفاده می‌کنیم تا بردار ℓ_1 از هر بافت T را پیدا کنیم. مقایسه بین دو بافت T_1 و T_2 با استفاده از این رویکرد با محاسبه فاصله ℓ_1 بین دو بردار ℓ_1 که متناظر با بافت‌های T_1 و T_2 هستند انجام می‌گیرد.



شکل ۶. گابور تصادفی EMD

شکل ۶ نتیجه این روش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بین این ۱۵ تصویر مشاهده می‌کنیم چهار عدم‌تطابق وجود دارد که نشان‌دهنده موفقیت ۷۳ درصدی در یافتن زیربافت است.

- روش ۵، گابور- هادامارد تصادفی EMD: این روش، نتیجه اصلی است که متناظر با الگوریتم پیشنهادی در بخش ۲ می‌باشد. برای هر بافت T در پایگاه داده، ما ۱۶۹ بردار که هرکدام از آنها $d = 64$ بُعد دارد استخراج می‌کنیم. سپس تبدیل والش– هادامارد را به بردارهایی که با استفاده از فیلتر گابور استخراج شده‌اند، اعمال می‌کنیم. در نهایت، به‌صورت تصادفی این ۱۶۹ بردار را به یک زیرفضای دو بُعدی سوق می‌دهیم. این دو مرحله با استفاده از قضیه ۳ برای $s = 2$ انجام می‌گیرد. سپس از الگوریتم جای‌گذاری EMD در نُرم ℓ_1 و قضیه ۴ استفاده می‌کنیم تا بردار ℓ_1 از هر بافت T را پیدا کنیم. مقایسه بین دو بافت T_1 و T_2 با استفاده از این رویکرد با محاسبه فاصله ℓ_1 بین دو بردار که متناظر با بافت‌های T_1 و T_2 هستند انجام می‌گیرد.



شکل ۷. الگوریتم پیشنهادی: گابور– هادامارد تصادفی EMD

همان‌طور که در بین این ۱۵ تصویر مشاهده می‌کنیم دو عدم‌تطابق وجود دارد که نشان‌دهنده موفقیت ۸۶ درصدی در یافتن زیربافت است. مشاهده می‌شود که تفاوت بین روش گابور– هادامارد تصادفی و روش گابور– هادامارد تصادفی EMD این است که ما از الگوریتم جای‌گذاری EMD در نُرم ℓ_1 و قضیه ۴ استفاده می‌کنیم تا بردار ℓ_1 را بر هر بافت T پیدا کنیم. مقایسه بین دو بافت T_1 و T_2 با استفاده از این رویکرد با محاسبه فاصله ℓ_1 بین دو بردار ℓ_1 که متناظر با بافت‌های T_1 و T_2 هستند انجام می‌گیرد. الگوریتم‌های شناخته‌شده بسیاری برای حل این مسئله با نُرم ℓ_1 وجود دارد، و با کاهش جستجوی تشابه بین بافت‌ها برای محاسبه فاصله ℓ_1 بین بردارها، این امکان برای ما فراهم می‌شود تا این مسئله را سریع‌تر حل کنیم. به‌طورخاص، به‌منظور حل دقیق جستجوی تشابه، ما به زمان $O(n^2)$ نیاز داریم، درحالی که با استفاده از کاهش به فاصله ℓ_1 ازطریق کاهش EMD، این مسئله در زمان $O(n \log n)$ به‌طور تقریبی حل می‌شود و آزمایش‌های ما نشان می‌دهند که این تقریب برای داده‌های حقیقی مانند بافت‌ها نسبتاً خوب است. شایان ذکر است که درصد صحت اندازه‌گیری شده فقط برای یکی از ۱۶ عضو از ۱۱۲ گروه بافت می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه یکی از ۱۶ تصویر، خود تصویر تحت بازیابی می‌باشد، در اندازه‌گیری به میزان یک شانزدهم افست وجود دارد. در جدول ۱ دقت این چهار روش آمده و با هم مقایسه شده است.

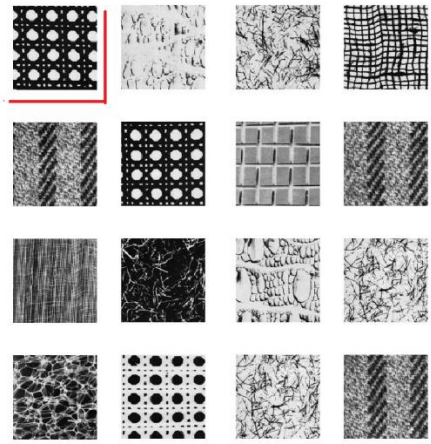
جدول۱ . مقایسه میزان دقت الگوریتم‌های مختلف

نوع الگوریتم	دقت به‌دست‌آمده برحسب درصد
گابور بدون کاهش بعد	۱۰۰
گابور تصادفی	۶۶
گابور- هادامارد تصادفی	۹۳
گابور تصادفی EMD	۷۳
گابور- هادامارد تصادفی EMD	۸۶
جستجوی دودویی محلی (نسخه ساده)	۱۹
جستجوی دودویی محلی (نسخه توسعه‌یافته) [۳۰]	۵۰

مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها

برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم جستجوی دودویی محلی که یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در زمینه پردازش تصویر می‌باشد را آزمایش کردیم. این الگوریتم را ابتدا در سال ۲۰۰۲ اویا و همکاران ارائه گردند [۹] اما در سال‌های بعد نسخه توسعه‌یافته این الگوریتم به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در این زمینه مورد استفاده قرار گرفت [۳۱].

برای مقایسه درست، از همان تصویر موردآزمایش بخش قبل و با همان ابعاد استفاده شده است. برای استفاده از این الگوریتم، از تابع ازپیش آماده‌شده نرم‌افزار متلب و با همان مقادیر پیش‌فرض برای پارامترهای موردنیاز، استفاده شده است. نتیجه اجرای این الگوریتم در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. نتیجه اجرای الگوریتم جستجوی دودویی

در بین ۱۵ تصویر اول، تنها دو تصویر مشابه تصویر مورد جستجو می‌باشد. دلیل این مسئله این است که بسیاری از الگوریتم‌ها برای مسائلی مانند طبقه‌بندی و خوشه‌بندی مناسب هستند اما در مسئله بازیابی تصاویر به دلیل اینکه هیچ داده‌ای برای آموزش وجود ندارند، کارایی لازم را ندارند. در تحقیق دوشی و همکاران [۳۲] که روی بانک داده Outex انجام شده نشان داده شده است که نسخه اولیه الگوریتم جستجوی دودویی، کارایی بهتری نسبت به سایر

نسخه‌های این الگوریتم در مسئله بازیابی تصاویر بافت دارد. در تحقیق ستوده و همکاران [۳۰] که در سال ۲۰۱۹ روی چهار پایگاه داده مختلف انجام شده است نیز با استفاده از نسخه توسعه‌یافته این الگوریتم به میانگین دقتی حدود ۵۰ درصد در بازیابی تصاویر دست یافتند در حالی که دقت به‌دست‌آمده در این تحقیق به‌صورت میانگین ۸۶ درصد بوده است.

در تحقیق کیم و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ نیز نشان داده شده است که در صورت استفاده درست از فیلتر گابور، کارایی این الگوریتم بهتر از الگوریتم جستجوی دودویی محلی است. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف بازیابی بافت از نظر روش‌های مورداستفاده صورت گرفته است.

جدول ۲. مقایسه الگوریتم‌های مختلف بازیابی تصاویر بافت از نظر روش اجرا

نوع الگوریتم	روش اجرا
طبقه‌بندی بافت مقاوم به چرخش و چند تفکیکی با جستجوی دودویی [۹]	تلفیق الگوریتم جستجوی دودویی و هیستوگرام
روش تلفیقی گابور و تشخیص لبه برای تشخیص شکل و بافت [۷]	تلفیق فیلتر گابور و ماتریس تشخیص لبه
تشخیص خودکار ناهنجاری بافت روکش آسفالت [۳]	گرادیان تصادفی نزولی
تشخیص بیماری گیاهان با آنالیز بافت برگ [۱۹]	تلفیق فیلتر گابور و جستجوی دودویی محلی
بازیابی تصاویر بافت رنگی [۱۷]	تلفیق موجک گابور و تابع مفصل گوسی
طبقه بندی و بازیابی تصاویر بافت با هیستوگرام رنگی و جستجوی دودویی [۱۰]	تلفیق جستجوی دودویی محلی و هستوگرام رنگی
بازیابی تصاویر براساس محتوی	فیلتر گابور و بردار انسجام رنگ
روش پیشنهادی	تلفیق فیلتر گابور و تبدیل والش و الگوریتم تقریب فاصله

نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم‌های مختلفی برای پیدا کردن تصاویر بافت مشابه در یک پایگاه داده مطالعه شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت فیلتر گابور، کارایی خود را برای پیدا کردن تصاویر مشابه نشان داده است اما از آن‌جایی که استفاده مستقیم از این فیلتر دارای پیچیدگی زمانی زیادی است، روش‌هایی برای کاهش ابعاد بردارهای ویژگی حاصل از اعمال فیلتر گابور بر تصاویر، مطالعه شد و کارایی الگوریتم پیشنهادی که با استفاده از تبدیل والش– هادامارد بردارهای ۶۴ بعدی را به دو بعد تبدیل می‌کرد و در نهایت، محاسبه فاصله بردارهای دو بعدی با الگوریتم تقریبی EMD اثبات شد. زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه فاصله دو تصویر از مرتبه $O(n^2)$ به مرتبه $O(n \log n)$ نیز کاهش یافت. تحقیق حاضر نشان داده است که ممکن است الگوریتم‌هایی برای طبقه‌بندی تصاویر بافت مناسب باشند و نتایج خوبی داشته باشند ولی برای بازیابی مناسب نباشند. نوآوری تحقیق حاضر شامل استفاده از چند الگوریتم مختلف است که در موارد دیگر کاربرد داشته‌اند اما در این پژوهش برای پیدا کردن تشابه تصاویر بافتی استفاده شدند.

References

[1] DeCost, B. L., Francis, T., & Holm, E. A. (2017). Exploring the microstructure manifold: Image texture representations applied to ultrahigh carbon steel microstructures. *Acta Materialia*, *133*, 30-40. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.014

[2] Farwell, L. S., Gudex-Cross, D., Anise, I. E., Bosch, M. J., Olah, A. M., Radeloff, V. C., Razenkova, E., Rogova, N., Silveira, E. M. O., Smith, M. M., & Pidgeon, A. M. (2021). Satellite image texture captures vegetation heterogeneity and explains patterns of bird richness. *Remote Sensing of Environment*, *253*, 112175. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112175

[3] Hoang, N.-D. (2019). Automatic detection of asphalt pavement raveling using image texture based feature extraction and stochastic gradient descent logistic regression. *Automation in Construction*, *105*, 102843. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102843

[4] Grauman, K., & Darrell, T. (2007). The Pyramid Match Kernel: Efficient Learning with Sets of Features. *Journal of Machine Learning Research* ,*8* ,725-760 . https://dl.acm.org/doi/10.5555/1248659.1248685

[5] Johnson, W. B. (1984). Extensions of Lipschitz mappings into Hilbert space. *Contemporary mathematics*, *26*, 189-206. https://doi.org/10.1090/conm/026/737400

[6] Veerashetty, S., & Patil, N. (2019) .Design of rotation, illumination, and scale invariant Gabor texture descriptor for image texture analysis and retrieval. *International Journal of Computers and Applications*, *43*, 1-9. https://doi.org/10.1080/1206212X.2019.1658378

[7] Sahib, Z. A., Uçan, O. N., Talab, M. A., Alnaseeri, M. T., Mohammed, A. H., & Sahib, H. A. (2020, June 26-28). *Hybrid Method Using EDMS & Gabor for Shape and Texture*. 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) ,Ankara, Turkey. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9152829/

[8] Kim, N. C., & So, H. J. (2018). Directional statistical Gabor features for texture classification. *Pattern Recognition Letters*, *112*, 18-26. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.05.010

[9] Ojala, T., Pietikainen, M., & Maenpaa, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *24*(7), 971-987. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2002.1017623

[10] Liu, P., Guo, J.-M., Chamnongthai, K., & Prasetyo, H. (2017). Fusion of color histogram and LBP-based features for texture image retrieval and classification. *Information Sciences*, *390*, 95-111. https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.01.025

[11] Garg, M., & Dhiman, G. (2021). A novel content-based image retrieval approach for classification using GLCM features and texture fused LBP variants. *Neural Computing and Applications*, *33*(4), 1311-1328. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05017-z

[12] Yuan, X., Yu, J., Qin, Z., & Wan, T. (2011). *A SIFT-LBP image retrieval model based on bag of features*. 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, https://www.semanticscholar.org/paper/A-SIFT-LBP-IMAGE-RETRIEVAL-MODEL-BASED-ON-Yuan-Yu/a90bf09e362b7902d68e37aee6389f2a16e3aa47

[13] Gabor, D. (1946). Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, *93*(26), 429-441 .

[14] Daugman, J. G. (1985). Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. *Journal of the Optical Society of America A*, *2*(7), 1160-1169. https://doi.org/10.1364/JOSAA.2.001160

[15] Marcelja, S. (1980). Mathematical description of the responses of simple cortical cells. *J Opt Soc Am*, *70*(11), 1297-1300. https://doi.org/10.1364/josa.70.001297

[16] Kassis, M., & El-Sana, J. (2016, Oct 23-26). *Scribble Based Interactive Page Layout Segmentation Using Gabor Filter*. 2016 15th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR), Shenzhen, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7814032

[17] Li, C., Huang, Y., & Zhu, L. (2017). Color texture image retrieval based on Gaussian copula models of Gabor wavelets. *Pattern Recognition*, *64*, 118-129. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.10.030

[18] Madhavi, D., & Patnaik, M. R. (2018). Genetic algorithm-based optimized gabor filters for content-based image retrieval. In *Intelligent communication, control and devices* (pp. 157-164). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_18

[19] Patil, J. K., & Kumar, R. (2017). Analysis of content based image retrieval for plant leaf diseases using color, shape and texture features. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *10*(2), 69-78. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.11.004

[20] Sahib, Z. A., Uçan, O. N., Talab, M. A., Alnaseeri, M. T., Mohammed, A. H., & Sahib, H. A. (2020 ,26-28 June 2020). *Hybrid Method Using EDMS & Gabor for Shape and Texture*. 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) ,

[21] Samantaray, A. K., & Rahulkar, A. D. (2020). New design of adaptive Gabor wavelet filter bank for medical image retrieval. *IET Image Processing*, *14*(4), 679-687. https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-ipr.2019.1024

[22] Singh, J., Bajaj, A., Mittal, A., Khanna, A., & Karwayun, R. (2018, Dec 14-15) . *Content Based Image Retrieval using Gabor Filters and Color Coherence Vector.* 2018 IEEE 8th International Advance Computing Conference (IACC), Greater Noida, India https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8692123

[23] Feldman, D., Monemizadeh, M., & Sohler, C. (2007, June 6-8). *A PTAS for k-means clustering based on weak coresets.* Proceedings of the twenty-third annual symposium on Computational geometry, Gyeongju South Korea. https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1247069.1247072

[24] Arriaga ,R. I., & Vempala, S. (2006). An algorithmic theory of learning: Robust concepts and random projection. *Machine learning*, *63*(2), 161-182. https://doi.org/10.1109/SFFCS.1999.814637

[25] Dasgupta, A., Kumar, R., & Sarlós, T. (2010, June 5-8). *A sparse johnson: Lindenstrauss transform.* Proceedings of the forty-second ACM symposium on Theory of computing, Ithaca, New York. https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1806689.1806737

[26] Clarkson, K. L., & Woodruff, D. P. (2017). Low-rank approximation and regression in input sparsity time. *Journal of the ACM (JACM)*, *63*(6), 1-45. https://doi.org/doi.org/10.1145/3019134

[27] Alon, N., Matias, Y., & Szegedy, M. (1999). The Space Complexity of Approximating the Frequency Moments. *Journal of Computer and System Sciences*, *58*(1), 137-147. https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1545

[28] Ailon, N., & Chazelle, B. (2009). The fast Johnson–Lindenstrauss transform and approximate nearest neighbors. *SIAM Journal on computing*, *39*(1), 302-322. https://doi.org/10.1137/060673096

[29] Abdelmounaime, S., & Dong-Chen, H. (2013). New Brodatz-Based Image Databases for Grayscale Color and Multiband Texture Analysis. *ISRN Machine Vision*, *2013*, 876386. https://doi.org/10.1155/2013/876386

[30] Sotoodeh, M., Moosavi, M., & Boostani, R. (2019) .A Novel Adaptive LBP-Based Descriptor for Color Image Retrieval. *Expert systems with Applications*, *127*, 342-352. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.020

[31] Dolly, B., & Raj, D. (2021). Texture Based Image Retrieval Using GLCM and LBP. In *International Conference on Intelligent and Smart Computing in Data Analytics: ISCDA 2020* (pp. 35-45). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6176-8_5

[32] Doshi, N. P., & Schaefer, G. (2012, Nov 11-15). *A comprehensive benchmark of local binary pattern algorithms for texture retrieval.* Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), Tsukuba, Japan https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6460737

[33] Matoušek, J. (2008). On variants of the Johnson–Lindenstrauss lemma. *Random Structures & Algorithms*, *33*(2), 142-156. https://doi.org/10.1002/rsa.20218

[34] Arora, S. (1998). Polynomial time approximation schemes for Euclidean traveling salesman and other geometric problems. *Journal of the ACM (JACM)*, *45*(5) ,753-782 .https://doi.org/10.1145/290179.290180

[35] Charikar, M. S. (2002, May). *Similarity estimation techniques from rounding algorithms.* Proceedings of the thiry-fourth annual ACM symposium on Theory of computing, Montreal, Quebec, Canada. https://doi.org/10.1145/509907.509965

[36] Grauman, K., & Darrell, T. (2005, Oct 17-21). *The pyramid match kernel: discriminative classification with sets of image features.* Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1, Beijing, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1544890

ضمائم:

قضیه ۱ (کاهش ابعاد در L2) ([۵]): فرض کنید که α یک بردار دلخواه در $\mathbb{R}^n$ است. فرض کنید که $T: R^d \rightarrow R^s$ نشان دهنده‌ی یک نگاشت خطی تصادفی ناشی از توزیع احتمالیِ مناسب F است که بعدا تعیین می‌شود. فرض کنید $X1 = |T(a)_1|^2$ و به همین ترتیب $Xs = |T(a)_s|^2$ آنگاه داریم:

$$\Pr\left[(1-\varepsilon)Z \leq X1 + \cdots + Xs \leq (1+\varepsilon)Z \geq 1-\delta(1+\varepsilon)Z \geq 1-\delta\right. \qquad (۴)$$

قضیه ۲ ([۵]): فرض کنید $0 < \varepsilon \leq ½$ و $P = \{p_1, \cdots, p_n\}$، مجموعه n نقطه در فضای $\mathbb{R}^d$ است. هم چنین فرض کنید که $s = C\,\varepsilon^{-2}\,log\,d$ باشد که در آن C ثابتی است که به اندازه‌ی کافی بزرگ است. سپس، نگاشت خطی $T: R^d \rightarrow R^s$ از قضیه‌ی ۱ با احتمال حداقل 1/2، نامعادله‌ی زیر را برای تمام $i, j \in [n]$ برآورده می‌کند:

$$(1-\varepsilon)\|pi - pj\| \leq \|T(pi) - T(pj)\| \leq (1+\varepsilon)\|pi - pj\| \qquad (۵)$$

که در نامعادله بالا $\|\cdot\|$ نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی اقلیدسی است.

قضیه ۳ ([۳۳]): فرض کنید که a نشان‌دهنده‌ی بردار واحد در $\mathbb{R}^d$ است که شرط $\|a\|_\infty \leq \alpha$ را برآورده می‌کند که در آن $a \in [\frac{1}{\sqrt{d}}.1]$ وفرض کنید که $Zi = |a[i]|^2$ برای $i \in [d]$ و $Z = Z1 + \cdots + Zd$ باز هم فرض کنید که داشته باشیم $S = C\varepsilon^{-2}\log(4/\delta)$ که در آن C یک ثابت مناسب است. فرض کنید که $T: R^d \rightarrow R^s$ نشان دهنده‌ی یک نگاشت خطیِ تصادفی است که توسط $T(a)_i = 1/\sqrt{s}\sum_{j=1}^{d} s[i.j] \times a[j]$ برای $i = 1.2 \ldots . s$ تعریف می‌شود، که در آن $s[i.j]$ متغیرهای تصادفی مستقل هستند، بگونه‌ای که $S[i.j] = +\frac{1}{\sqrt{q}}$ با احتمال q/2، و $S[i.j] = -\frac{1}{\sqrt{q}}$ با احتمال q/2، و $S[i.j] = 0$ با احتمال $1-q$ است که در آن مقدار

متغیر qبرابر $C\alpha\ ^2\log\ (d/(\varepsilon\delta))$ می‌باشد. هم چنین فرض کنید $X1 = |T(a)\ _1|\ ^2$ و به همین ترتیب $Xs = |T(a)\ _s|\ ^2$ ، و $X = X1 + \cdots + Xs$. بنابر این داریم:

$$\Pr[1-\varepsilon)\ Z \le X \le (1+\varepsilon)Z] \ge 1-\delta \qquad (۶)$$

قضیه ۴ ([۳۶-۳۴]): فرض کنید که $R',B' \subseteq [\Delta]^2$ دو مجموعه با n نقطه باشدند به گونه‌ای که $n = 4^k$، توانی از ۴ باشد. فرض کنید که ما بصورت تصادفی مجموعه‌ی شبکه‌ی تو در تو $G_0, \ldots, G_i, \ldots, G_{\log \Delta+1}$ را در سلول ورودی $[2\Delta]^2$ تغییر می‌دهیم. VR' و VB' دو بردار خروجی هستند با استفاده از الگوریتم جایگذاری EMD در نُرم ℓ_1 ساخته شده‌اند. سپس داریم:

$$EMD(R'.B') \le \|VR' - VB'\|. \quad E[\|VR' - VB'\| \le 2log\Delta EMD(R'.B') \qquad (۷)$$

که در آن E ، امید ریاضی برای برای مجموعه‌ی شبکه‌ی تو در تو $G_0, \ldots, G_i, \ldots, G_{\log \Delta+1}$ است که به صورت تصادفی به اندازه بردار (a,b) جابحا شده اند که این بردار با انتخاب یک زوج عدد صحیح مستقل و یکنواخت از مجموعه $\{0, 1, \ldots, \Delta\}$ بصورت تصادفی انتخاب می‌شود.

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 155-168
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.257650.1280
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.8.1

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Analysis and Implementation of Harmonic Elimination of a Synchronous Generator Supplying Nonlinear Loads

Hossein Asgharpour-Alamdari[1]*

[1]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.19.2020
Revised: 07.12.2021
Accepted: 07.26.2021

Keyword:
Synchronous generators
Non-linear loads
Power networks
Harmonic contents
THD

***Corresponding Author:**
Hossein Asgharpour-Alamdari
Email:
Asgharpour_alamdari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

One The generation of sinusoidal voltage in terminal of synchronous generators is often non-sinusoidal due to the connection of non-linear loads to it. Under these conditions, the flowing current and voltage waveforms would considerably be affected. This would ultimately result in destructive effects such as increased losses, frequency fluctuations, reduced grid stability as well as reduced power quality of the load. Accordingly, this paper examines the various harmonic components and their impact on synchronous generators with conventional windings feeding nonlinear local loads. The consequences of the harmonic contents of the output waveforms by varying nonlinear loads were tested practically by implementing the single and triple layer winding synchronous generators. Then, the energy-saving lightbulb, the three-phase induction motor, and the incandescent lamp connected to the diode bridge (using power electronic components) were utilized as three non-linear electrical charges. Finally, the obtained results were evaluated by calculating the THD of the different states of the experiments performed on the two designs (three-layer winding design instead of one-layer winding). By comparing the experimental THD, the three-layer winding design was superior to the conventional one.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۱۶۸-۱۵۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.257650.1280
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.8.1
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تحلیل و اجرای روش حذف مؤلفه‌های هارمونیک ژنراتور سنکرون با بارهای غیرخطی

حسین اصغرپورعلمداری[1*]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

کلید واژگان:
ژنراتور سنکرون
بارهای غیرخطی
شبکه‌های قدرت
مؤلفه‌های هارمونیکی
THD

***نویسنده مسئول:** حسین اصغرپورعلمداری
پست الکترونیکی:
Asgharpour_alamdari@tvu.ac.ir

چکیده

شکل موج ولتاژ تولیدی در ترمینال ژنراتورهای سنکرون غالباً غیرسینوسی می‌باشد و در صورتی‌که بارهای مصرفی از نوع غیرخطی به آن متصل گردد ولتاژ غیرسینوسی دوسر بار ایجاد می‌گردد که باعث کاهش کیفیت توان در مصرف‌کنندگان می‌شود. در این شرایط، وجود مؤلفه‌های هارمونیک باعث پدیدآمدن آثار مخربی از جمله افزایش تلفات، نوسانات فرکانس و کاهش پایداری شبکه خواهد شد. در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های مختلف هارمونیکی و اهمیت آن در ژنراتورهای الکتریکی متصل به شبکه محلی بر پایه تمرکز بر سیم‌پیچی‌های متداول در بارهای غیرخطی پرداخته می‌شود. سپس با اتصال بارهای مختلف غیرخطی به ژنراتور سنکرون یک و سه لایه، آثار مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان به‌صورت عملی آزمایش شده است. لامپ کم‌مصرف، موتور القایی سه فاز و لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود (استفاده از قطعات الکترونیک قدرت) به‌عنوان سه بار الکتریکی غیرخطی در این مقاله آزمایش شدند. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده، با محاسبه THD حالات مختلف آزمایش‌های انجام شده بر دو طرح (طرح سیم‌پیچی سه لایه به‌جای سیم‌پیچی یک لایه) موردنظر ارزیابی شد. با مقایسه تی اچ دی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، برتری طرح سیم‌پیچی سه لایه نسبت به طرح متعارف می‌باشد.

مقدمه

در دنیای امروز، استفاده گسترده از بارهای غیرخطی، موجب تزریق مؤلفه‌های هارمونیکی جریان در شبکه‌های قدرت می‌شود که آثار آن باعث افزایش تلفات در خطوط انتقال و مصرف‌کنندگان و هم‌چنین تخریب کیفیت توان می‌شود. با اعمال بارهای غیرخطی، به‌منظور حفظ و پایداری شبکه، می‌توان از فیلترهای مختلف الکترونیک قدرت استفاده کرد [۱; ۲]. در بارهای صنعتی، توان ظاهری، متشکل از توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشد ولی در بارهای غیرخطی، توان ظاهری، مؤلفه دیگری به نام توان اعوجاجی دارد. مقدار این توان در مؤلفه اصلی صفر است اما در مؤلفه‌های دیگر دارای مقدار می‌باشد. برای بیان این کمیت، مرجع [۳] با ارائه الگوریتمی بر پایه تکرار و با هدف حذف این توان برای بارهای غیرخطی (سلفی و کوره‌های القایی) ارائه کرده تا شکل موج ولتاژ را سینوسی‌تر کند و اعوجاج آن را بکاهد. برای این الگوریتم، تزریق بانک خازنی را در هر مرحله در دستور کار قرار داده است. هم‌چنین در بارهای غیرخطی باید به کمیت ضریب قدرت اهمیت داده شود. مفهوم واقعی ضریب قدرت به‌ازای مؤلفه اصلی می‌باشد که در حضور مؤلفه‌های دیگر باعث تغییر این کمیت می‌شود که در مرجع [۴] به این مسئله پرداخته است. اهمیت به کیفیت توان در سیستم‌های الکتریکی از اولویت طراحان می‌باشد. بارهای غیرخطی به‌طور مستقیم روی شکل موج‌های جریان و ولتاژ دوسر بار و حتی عملکرد تجهیزات خط و به‌طور خاص بر ترانسفورماتورها تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که اعمال بارهای غیرخطی باعث کاهش راندمان در ترانسفورماتورها می‌شود. در مراجع [۵; ۶] با بررسی مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان به تأثیرات این نوع بارها بر شبکه قدرت و در مراجع [۷-۹] با آزمایش‌های عملی ارتباط تلفات و THD[1] ارزیابی شده است. امروزه بیشتر بارهای مسکونی، ویژگی غیرخطی دارند که مراجع [۱۰; ۱۱]، آثار هارمونیکی بارهای خانگی را ارزیابی کرده‌اند و با محاسبه THD، ضریب قدرت و توان‌های اکتیو و راکتیو، مکان مناسبی برای استقرار فیلتر به‌منظور کاهش مؤلفه‌های هارمونیکی و افزایش کیفیت توان ارائه کرده‌اند.

یکی از راه‌های مقابله با مؤلفه‌های هارمونیکی در مدارات متصل به بارهای غیرخطی، استفاده از منابع تولید ولتاژ با شکل فرم‌های کاملاً سینوسی می‌باشد [۱۲]. شکل موج ولتاژ خروجی در ژنراتورها به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل در حالت عملکردی ماشین، به‌طور معمول شبه‌سینوسی می‌باشد و مؤلفه‌های هارمونیکی متعددی دارند. از مهم‌ترین آثار این هارمونیک‌ها می‌توان به تغییر نقطه کار، افزایش تلفات هسته، افزایش نویز و لرزش و هم‌چنین کاهش پایداری ماشین اشاره کرد. بنابراین، کاهش این هارمونیک‌های مزاحم، از مهم‌ترین اهداف محققان در این حوزه به‌شمار می‌آید. برای رسیدن به این هدف، یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها، استفاده از سیم‌پیچی گام کسری و گسترده در استاتور می‌باشد [۱۳; ۱۴]. شایان ذکر است که این روش نمی‌تواند به‌طور کامل مؤلفه‌های هارمونیکی مزاحم را حذف کند؛ از این رو در مراجع [۱۵; ۱۶]، برمبنای یک تحلیل ریاضی جامع با هدف کاهش دامنه مؤلفه‌های هارمونیکی مزاحم، طرحی در نحوه سیم‌پیچی استاتور ماشین‌های جریان متناوب ارائه شده است. در این ساختار، با استفاده از تغییر در تعداد دور و موقعیت قرار گرفتن کلاف‌ها، مقدار هارمونیک‌های مزاحم به‌حداقل رسیده است. بنابراین، دست‌یابی به شکل موج مطلوب شار و به‌تبع آن بهبود مشخصه‌های عملکردی و پارامترهای ماشین میسر می‌گردد.

مرجع [۱۷]، با مطالعه سیم‌پیچی ماشین‌های AC، به بیان ضریب سیم‌پیچی پرداخته است تا مؤلفه‌های هارمونیک MMF[2] کاهش یابد و همچنین در مرجع [۱۸] چگونگی توزیع نیروی محرکه الکتریکی در راستای کاستن مؤلفه‌های هارمونیک پرداخته است. استفاده از تبدیل و سری فوریه در شکل موج‌های ناشی از تابع سیم‌پیچی یا شکل موج MMF در مقالات متعدد مرسوم است که در مرجع [۱۹] با استفاده از این روش، رویکردی جدیدی بر پایه نمایش برداری

[1] Total Harmonic Distortion
[2] Magneto Motive Force

پیشنهاد داده است؛ البته به‌منظور دستیابی به شرایط بهینه در طراحی سیم‌پیچی ماشین‌های الکتریکی و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک و بهبود عملکرد مشخصه‌های ماشین، استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی در مقالات متعدد پیشنهاد گردیده است [۲۰; ۲۱].

در شبکه‌های محلی، اعمال بارهای غیرخطی باعث پیدایش هارمونیک‌های متعددی در شکل موج‌های ولتاژ و جریان می‌گردد. از طرفی، منابع تولید انرژی الکتریکی فاقد شکل موج سینوسی ولتاژ می‌باشند. با توجه به وجود مؤلفه‌های هارمونیک منابع ولتاژ و تولید مؤلفه‌های هارمونیک ناشی از بارهای غیرخطی، وضعیت سینوسی بودن کمیات الکتریکی را بغرنج می‌کند و باعث افزایش تلفات، نوسانات فرکانس و کاهش پایداری شبکه خواهد شد. براین اساس، در این مقاله پیرو تحقیقات صورت‌گرفته در مراجع [۱۵] و [۱۶] و برای بارهای غیرخطی در راستای کاهش مؤلفه‌های هارمونیکی شکل موج ولتاژ دوسر بار، ژنراتور با سیم‌پیچی سه لایه به‌جای ژنراتور با سیم‌پیچی یک و دو لایه ارائه گردیده است. برای ارزیابی طرح سیم‌پیچی سه لایه، دو ماشین با ساختار ژنراتوری مجهز به سیم‌پیچی یک لایه و سه لایه و با اعمال بارهای غیرخطی در محیط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این دو ماشین در شرایط مختلف بارداری، حاکی از بهبود عملکرد ماشین‌ها با استفاده از طرح سیم‌پیچی سه لایه است.

این مقاله در چهار بخش تقسیم شده که در قسمت اول، مقدماتی از مطالب مربوطه و پیشینه تحقیق ارائه گردیده و سپس در بخش دوم به معرفی ژنراتور سنکرون با سیم‌پیچی استاتور سه لایه پرداخته است. در بخش سوم، مراحل آزمایش‌های انجام شده به‌ازای بارهای مختلف غیرخطی اشاره داشته و در نهایت، نتیجه آن در بخش چهارم ارائه گردیده است.

آنالیز هارمونیکی تابع سیم‌پیچی در ژنراتورهای سنکرون

وقتی‌که یک بار غیرخطی به سیستم قدرت متصل می‌شود باعث به‌وجود آمدن جریان غیرسینوسی می‌شود. شکل موج جریان می‌تواند با توجه به نوع بار، فرمت‌های متفاوتی داشته باشد. شکل موج جریان، مؤلفه‌های متعددی از سینوسی و کسینوسی دارد که با استفاده از سری فوریه می‌توان دامنه این مؤلفه‌ها را به‌دست آورد. آثار این مؤلفه‌ها، بر ولتاژ مصرف‌کننده‌های دیگر تأثیرگذار خواهد بود که باعث پایین آمدن کیفیت توان در سیستم‌های قدرت خواهد شد. استفاده از انواع فیلترهای الکترونیک قدرت، راه‌کار مقابله با آن است. از طرفی، در شبکه‌های محلی، شکل موج خروجی ولتاژ ژنراتورهای صنعتی سینوسی خالص نمی‌باشد و اعوجاج دارد. به‌عبارتی، شکل موج ولتاژ، علاوه بر مؤلفه اصلی، دارای مؤلفه‌های هارمونیکی بسیاری (معمولاً به‌صورت فرد) با دامنه‌های متفاوت خواهد بود. یکی از راه‌کارهای مقابله با حذف هارمونیک‌های مزاحم، طراحی ژنراتورهایی با خروجی شکل موج ولتاژ کاملاً سینوسی می‌باشد. این مقاله، ژنراتورهای سنکرون با استاتور سه لایه به‌جای یک و دو لایه را ارائه کرده است [۱۵]. شکل موج ولتاژ خروجی ژنراتور سه لایه در برابر ژنراتور متعارف، کاملاً سینوسی است و مؤلفه‌های هارمونیک (به‌جز اصلی) دارای دامنه‌ای تقریباً صفر می‌باشد. حال اگر به ژنراتور پیشنهادی (سه لایه) بار غیرخطی متصل گردد، دامنه مؤلفه‌های هارمونیک کمتر است و آثار آن هم کاهش می‌یابد.

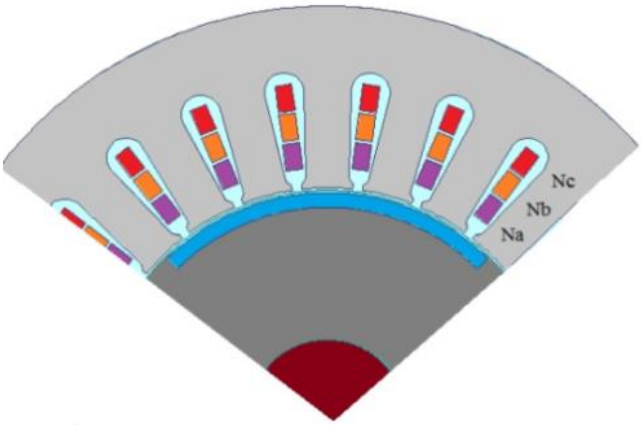
در ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب، ولتاژ و جریان و به همان نسبت شار در فاصله هوایی سینوسی خالص نمی‌باشد و اعوجاج دارد که باعث ایجاد اعوجاج در ولتاژ ژنراتورها می‌شود. در هر نقطه از فاصله هوایی ماشین‌های الکتریکی شاری به‌صورت غیرسینوسی تولید شده که با توجه به بسط سری فوریه دارای یک مؤلفه اصلی و بی‌نهایت مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی می‌باشد؛ اگرچه در این بسط ممکن است یک مؤلفه DC نیز ظاهر شود. به مؤلفه اول، هارمونیک اصلی و به هر جزء از مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی، هارمونیک مزاحم گویند. در حالت ایده‌آل، دامنه مؤلفه

اصلی حداکثر (در واحد پریونیت) و دامنه مابقی مؤلفه‌ها باید صفر شود. برای مقایسه تأثیر دامنه مؤلفه هارمونیک‌های مزاحم (غیراصلی) به مؤلفه هارمونیک اصلی (اول)، THD با رابطه ریاضی (۱) تعریف می‌شود.

$$THD = 100 \times \sqrt{(\sum_{h=2,3,4,\dots}^{n} E_h^2)}/E_1 \quad (۱)$$

که در این رابطه، E_h دامنه ولتاژ القایی هارمونیک h ام (به h مرتبه هارمونیک گویند) و E_1 دامنه ولتاژ القایی هارمونیک اول (اصلی) می‌باشد که در حالت ایده‌آل باید ضریب سیم‌پیچی یک و THD صفر باشد. در ماشین‌های جریان متناوب مقدار ضریب سیم‌پیچی کمتر از یک و THD مقداری بیشتر از صفر است که به‌صورت درصد نمایش می‌دهند.

در برابر یک ژنراتور سنکرون متعارف (سیم‌پیچی استاتور به‌صورت یک لایه و دو لایه با گام کامل و کسری) استاتوری با سیم‌پیچی سه لایه در این مقاله ارائه گردیده است [۱۵]. در این طرح، برای تعداد N دور کلاف یک ماشین اولیه، توزیع سینوسی کلاف‌ها در همه شیارها مدنظر می‌باشد. شکل ۱ ساختار سیم‌پیچی سه لایه را نشان می‌دهد. ساختار سیم‌پیچی سه‌لایه که در آن Na، Nb و Nc تعداد دور کلاف مربوط به فازهای مختلف، به‌جای N دور کلاف در یک شیار استاتور می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل۱. ساختار سیم‌پیچی سه لایه [۱۵]

برای حذف مؤلفه‌های هارمونیک مؤثر در ایجاد اعوجاج شار (مؤلفه‌های هارمونیکی ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱،...)، مطابق با بحث‌های ارائه شده بالا، رابطه (۲) برای محاسبه سهم هادی‌های هر کلاف در هر شیار (Nk) پیشنهاد گردیده است [۱۵].

$$N_k = Sin(\frac{2 * k * \pi}{Z}) - Sin(\frac{2 * (k-1) * \pi}{Z}) \quad (۲)$$

که در آن Z تعداد شیار استاتور و k شماره کلاف است و از آن تعداد دسته کلاف هر فاز به‌دست می‌آید. برای درک بهتر مفهوم ساختار سیم‌پیچی پیشنهادی در این طرح، آرایش سیم‌پیچی، شکل موج نیروی محرکه مغناطیسی و دامنه مؤلفه‌های هارمونیک برای یک استاتور سه فاز، دو قطب با تعداد شیار۱۸، در ادامه بیان می‌گردد.

برای استاتوری با ۱۸ شیار، سه فاز و دو قطب، تعداد کلاف در هر گروه فاز برابر با ۴.۵ می‌باشد. در طراحی سیم‌پیچی استاتور تعداد شیار باید عدد صحیح شود؛ لذا k برابر ۴ انتخاب می‌شود؛ پس باید N_1 تا N_4 به‌صورت زیر به‌دست آید [۱۵].

$$N_1 = \mathrm{Sin}(\frac{2*1*\pi}{18}) - \mathrm{Sin}(\frac{2*(1-1)*\pi}{18}) = 0.342 \quad (۳)$$

$$N_2 = \mathrm{Sin}(\frac{2*2*\pi}{18}) - \mathrm{Sin}(\frac{2*(2-1)*\pi}{18}) = 0.300 \quad (۴)$$

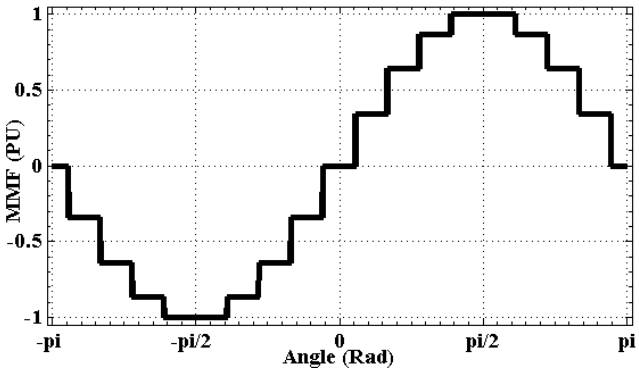
$$N_3 = \mathrm{Sin}(\frac{2*3*\pi}{18}) - \mathrm{Sin}(\frac{2*(3-1)*\pi}{18}) = 0.224 \quad (۵)$$

$$N_4 = \mathrm{Sin}(\frac{2*4*\pi}{18}) - \mathrm{Sin}(\frac{2*(4-1)*\pi}{18}) = 0.122 \quad (۶)$$

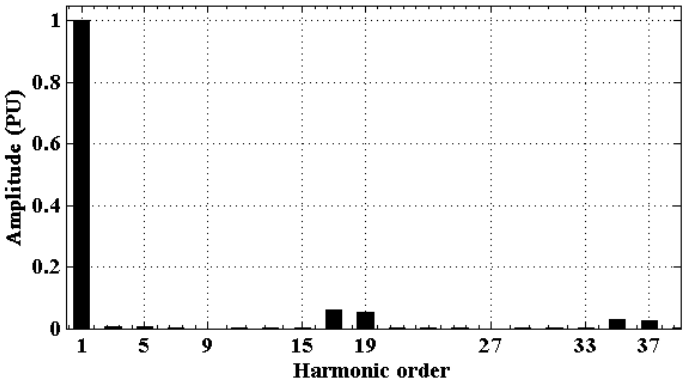
مطابق با روابط (۳)-(۶) مجموع N_1 تا N_4 باید ۱ گردد که با توجه به تغییر تعداد شیار از ۴.۵ به ۴، سهم کلاف چهارم از ۰.۱۲۲ به ۰.۱۳۴ تغییر داده می‌شود. با طراحی سیم‌پیچی خاص و به‌کارگیری رابطه (۱)، آرایش سیم‌پیچی، MMF و نتایج دامنه هارمونیک‌ها به‌صورت شکل‌های (۲) و (۳) و جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. آرایش سیم‌پیچی سه لایه ۱۸ شیار، دو قطب، سه فاز

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134
B	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224
C	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342
	10	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
A	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134
B	0.300	0.342	0.342	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224
C	0.300	0.224	0.134	-	0.134	0.224	0.300	0.342	0.342



شکل ۲. MMF ناشی از سیم‌پیچی سه لایه ۱۸ شیار، دو قطب، سه فاز



شکل ۳. نمودار میله‌ای مؤلفه‌های هارمونیک‌ها درماشین ۱۸شیار،۲ قطب،۳ فاز

جدول ۲. دامنه مؤلفه‌های هارمونیک برای استاتور ۱۸ شیار، ۲ قطب، ۳ فاز

مرتبه هارمونیک	دامنه (%)	مرتبه هارمونیک	دامنه (%)	مرتبه هارمونیک	دامنه (%)	مرتبه هارمونیک	دامنه (%)
1	100	11	0.2116	21	0.0846	31	0.0482
3	0.6223	13	0.1100	23	0.0635	33	0.0565
5	0.3014	15	0.1270	25	0.0931	35	2.8530
7	0.3348	17	5.8743	27	0.0000	37	2.7011
9	0.0000	19	5.2582	29	0.0762	39	0.0423

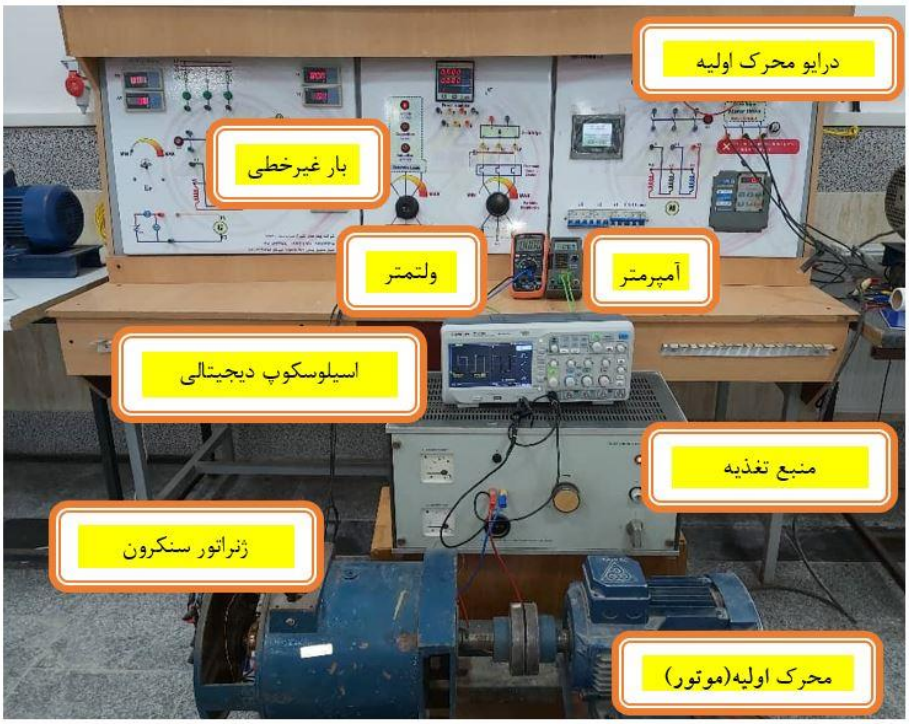
با توجه به جدول (۲)، مؤلفه‌های ۱۷و ۱۹ و بعد از آن هم مؤلفه‌های ۳۵ و ۳۷ دارای مقداری کمی مؤلفه هارمونیک می‌باشند که در این ساختار، بعد از هارمونیک اصلی، فقط دو گروه (گروه ۱۷ شامل ۱۷، ۳۵، ۵۳،..... و گروه ۱۹ شامل ۱۹، ۳۷، ۵۵،....) از مؤلفه هارمونیک وجود دارند و بقیه مؤلفه‌های هارمونیک تقریباً دارای دامنه‌ای صفر یا بسیار بی‌تأثیر می‌باشند. در این ساختار مقدار THD فازی برابر ۸.۸۴۸ درصد است که در مقایسه با مدل سیم‌پیچی یک لایه و دولایه گام کسری مشابه وضعیت بهتری دارد (THD1-layer=26.61% , THD2-layer=13.9%).

تحلیل و بررسی آزمایش‌های عملی

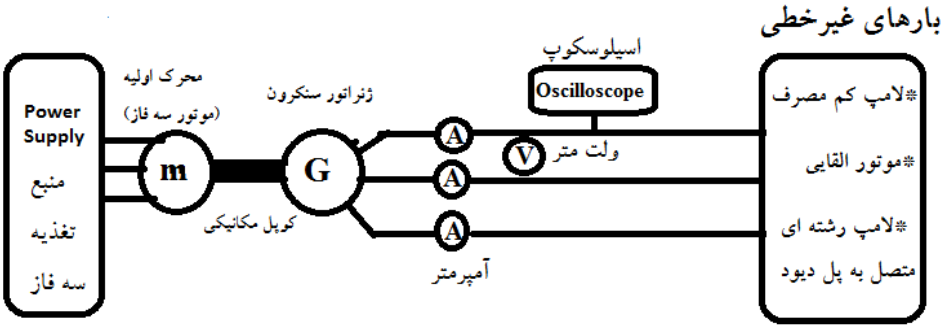
به‌منظور اعتبارسنجی سیم‌پیچی سه لایه ژنراتور سنکرون در مقابل سیم‌پیچی‌های متعارف یک لایه، در این مقاله، بارهای غیرخطی به دو ژنراتورسنکرون با طرح یک و سه لایه اعمال شد و نتایج به‌دست‌آمده بررسی گردید.

برای آزمایش عملی در آزمایشگاه، لامپ‌های کم‌مصرف، موتورهای القایی سه فاز و لامپ‌های رشته‌ای متصل به پل دیود (بار متصل به ادوات الکترونیک قدرت) به‌عنوان سه بار غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند. بارهای ذکر شده، در دو حالت ژنراتور سنکرون با طرح سیم‌پیچی یک و سه لایه اعمال گردیده و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه گردیده‌اند. شکل (۴-الف)، چگونگی اتصال بار به ژنراتورهای سنکرون را در آزمایشگاه و شکل (۴-ب)، شمای کلی ژنراتور متصل به بار را نشان می‌دهند. بین منبع و بار از یک اسیلوسکوپ دیجیتالی به‌منظور نمایش شکل موج ولتاژ یا جریان استفاده شده است. این آزمایش در دو حالت (ژنراتور یک و سه لایه) انجام گرفته و نتایج آن توامان ارائه گردیده است.

پس از انجام آزمایش، شکل موج ولتاژ مستخرج از اسیلوسکوپ با روابط سری فوریه آنالیز شده و مولفه اصلی، به‌همراه مؤلفه‌های غیراصلی (تا مؤلفه ۴۰) بررسی شده است. شکل (۵)، شکل موج ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در ژنراتورهای سنکرون را نشان می‌دهد. هم‌چنین مقایسه دامنه هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ تا مرتبه ۴۰ بعد از آنالیز فوریه به‌صورت شکل (۶) می‌باشد.



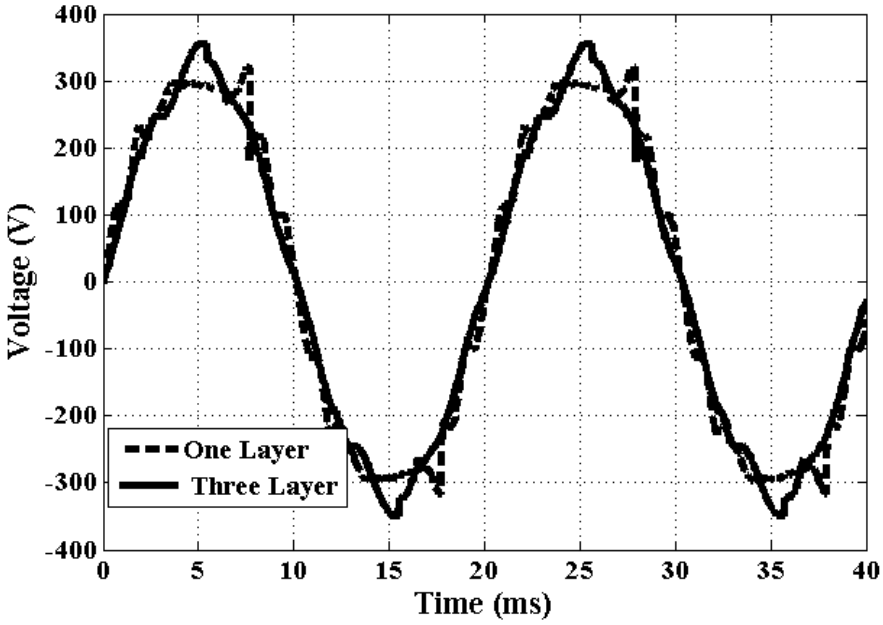
الف)



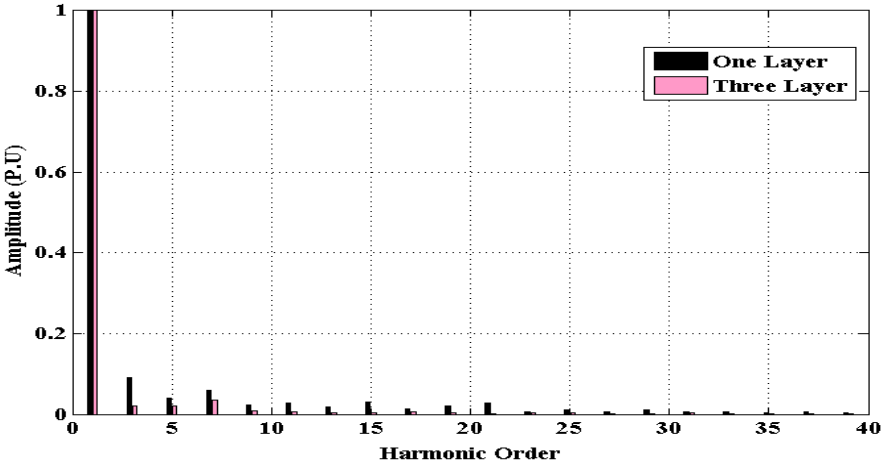
ب)

شکل ۴. ساختار کلی ژنراتور متصل به بارهای الکتریکی

الف) مجموعه آزمایشگاهی ب) شمای کلی آزمایش انجام شده



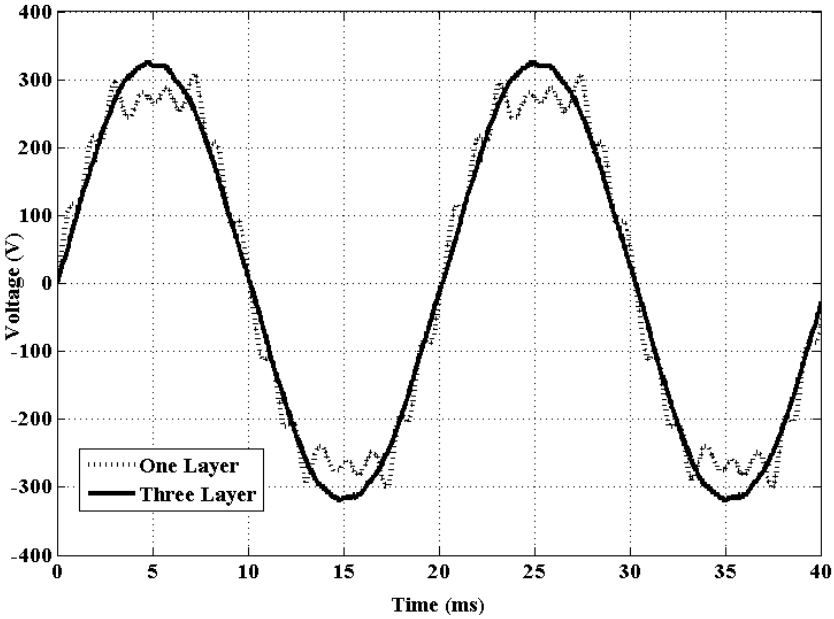
شکل ۵. ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۶. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ فازی در حالت بار غیرخطی (لامپ‌های کم‌مصرف) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)

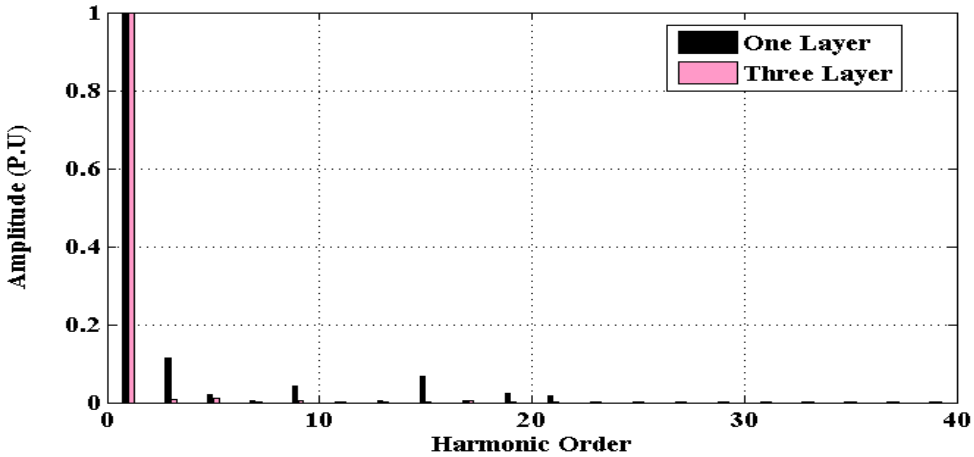
موتورهای القایی و ترانسفورماتورها به‌عنوان بار غیرخطی محسوب می‌شوند. در ادامه، یک موتور القایی سه فاز به‌عنوان بار مصرفی برای دو ژنراتور در نظر گرفته شده است. شکل موج ولتاژ و مقایسه دامنه هارمونیک‌ها برای دو

طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در شکل‌های (۷ و ۸) نشان می‌دهد. برای مرحله بعد، در خروجی ژنراتور یک پل دیود سه فاز و یک مجموعه لامپ رشته‌ای به‌عنوان بار در نظر گرفته شده است. وجود یک‌سوکننده باعث غیرخطی شدن بار خواهد شد. شکل موج ولتاژ و مقایسه دامنه هارمونیک‌ها برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه) در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان می‌دهد.

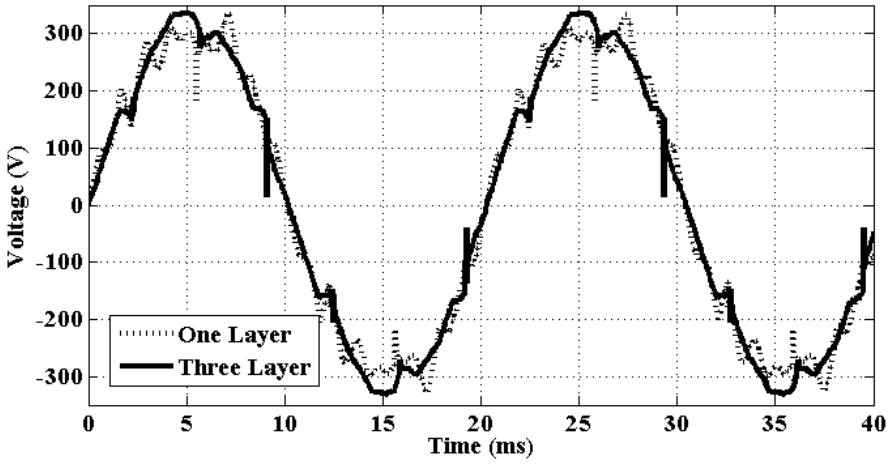


شکل ۷. ولتاژ القاشده در حالت بار غیرخطی (موتورهای القایی) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)

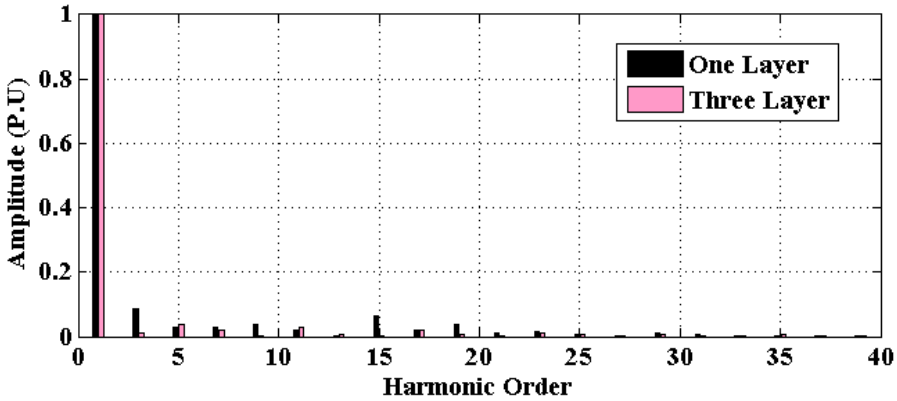
در نهایت بین ژنراتور سنکرون و بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود)، مقاومتی قرار داده تا شکل موج جریان توسط اسیلوسکوپ (شکل ۱۱) اندازه‌گیری شود. برای مقایسه دو طرح از لحاظ دامنه مؤلفه‌های هارمونیک مقدار THD را محاسبه کرده که نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۳) مشاهده می‌گردد که مقدار THD در طرح پیشنهادی نسبت به طرح متعارف کمتر است و معنی آن سینوسی بودن شکل موج ولتاژ و حذف بسیاری از مؤلفه‌های هارمونیکی در دو سر بار می‌باشد.



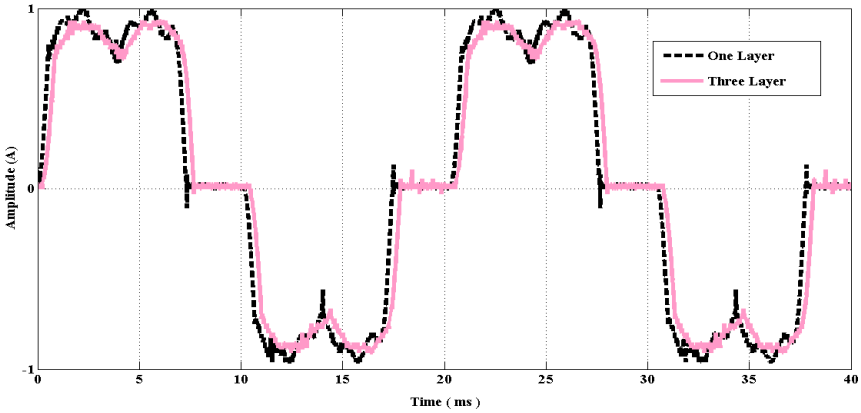
شکل ۸. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ در حالت بار غیرخطی (موتورهای القایی) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۹. شکل موج ولتاژ در حالت بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود) برای دو طرح سیم‌پیچی (یک و سه لایه)



شکل ۱۰. مقایسه دامنه هارمونیک شکل موج‌های ولتاژ در حالت بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود) برای دو طرح سیم‌پیچی



شکل ۱۱. مقایسه شکل موج جریان ژنراتور سنکرون (با دو طرح سیم‌پیچی یک و سه لایه) و بار غیرخطی (لامپ رشته‌ای متصل به پل دیود)

جدول ۳. مقایسه THD حالات مختلف آزمایش‌های انجام شده روی دو طرح موردنظر

	یک لایه	سه لایه
لامپ‌های کم‌مصرف	11.70	5.56
موتورهای القایی	14.29	1.45
لامپ رشته‌ای متصل به پل‌دیود	13.12	6.02

نتیجه‌گیری

وجود بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت باعث ایجاد مؤلفه‌های هارمونیکی در شکل موج‌های ولتاژ و جریان می‌شوند. از جمله آثار مخرب این پدیده، افزایش تلفات و غیرسینوسی شدن ولتاژ مخصوصاً در شبکه‌های محلی می‌شود. برای مقابله با هارمونیک‌های مزاحم می‌توان از ژنراتورهایی با شکل موج خروجی کاملاً سینوسی استفاده کرد. در این

مقاله، عملکرد بارهای غیرخطی به‌طور آزمایشگاهی بررسی شد و بر شکل موج ولتاژ و محاسبه THD تمرکز گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ژنراتور با سیم‌پیچی سه لایه در برابر سیم‌پیچی یک لایه، برای لامپ‌های کم‌مصرف مقدار THD از ۱۱.۷۰ به ۵.۵۶ درصد کاهش داشته و برای موتورهای القایی کاهش آن چشم‌گیر می‌باشد (از ۱۴.۲۹ به ۱.۴۵درصد). هم‌چنین، برای لامپ‌های رشته‌ای متصل به پل دیود، اندازه‌گیری شکل موج ولتاژ و جریان به همین صورت کاهش داشته که نشان از حذف و یا تضعیف بسیاری از مؤلفه‌های هارمونیک غیراصلی در شبکه‌های محلی متصل به ژنراتور سنکرون با سیم‌پیچی سه لایه می‌باشد.

References

[1] Liengpradis, P., & Kinnares, V. (2013, Oct 26-29). *Active power control of single-phase grid-connected system supplying nonlinear load.* 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Busan, Korea (South) https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6713323

[2] Tomy, G., & Menon, D. (2016, March 3-5). *Power quality improvement strategy for non-linear load in single phase system.* 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) ,Chennai, India https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7755353

[3] Brusilowicz, B., Szafran, J., & Wisniewski, G. (2016, March 7-10). *Reactive power compensation of nonlinear load.* 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), Edinburgh, UK. https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2016.0095

[4] Sandoval, G. (2014). Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads. *ARTECHE/INELAP SA*

[5] Brociek, W., Grzywacz, T., & Wilanowicz, R. (2017, Sept 11-13). *Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load.* 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Kutna Hora, Czech Republic https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8093075

[6] Lai, H., Lin, W., & Pu, G. (2020, June 27-29). *Harmonic Loss Analysis of Three-phase Induction Motor Sine Winding.* 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), Dalian, China https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9182571

[7] Biricik, S., & Özerdem, Ö. C. (2011, May 8-11). *Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions.* 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5874818

[8] Sikora, R., Markiewicz, P., & Pabjańczyk, W. (2017, Sept 14-16). *Surface polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion.* 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz, Poland https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8090732

[9] Sikora, R., Markiewicz, P., & Pabjańczyk, W. (2018). Multivariable polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion. *Open Physics*, *16*(1), 137-142. https//:doi.org/doi.org/10.1515/phys-2018-0021

[10] Nikum, K., Saxena, R., & Wagh, A. (2016, Nov 25-27). *Harmonic analysis of residential load based on power quality*. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/ document/8077306

[11] Sun, Y., Xie, X., Zhang, L., & Li, S. (2020). A Voltage Adaptive Dynamic Harmonic Model of Nonlinear Home Appliances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *67*(5), 3607-3617. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2921261

[12] Asad, B., Vaimann, T., Belahcen, A., Kallaste, A., Rassõlkin, A., & Iqbal, M. N. (2020). Modified winding function-based model of squirrel cage induction motor for fault diagnostics. *IET Electric Power Applications*, *14*(9), 1722-1734 .

[13] Kutt, F., Michna, M., Kostro, G., & Ronkowski, M. (2017). Modelling of steady state and transient performance of the synchronous generator considering harmonic distortions caused by non-uniform saturation of the pole shoe. *Electric Power Systems Research* ,*143* ,409-414 .https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.030

[14] Yokoi, Y., Higuchi, T., & Miyamoto, Y. (2016). General formulation of winding factor for fractional-slot concentrated winding design. *IET Electric Power Applications*, *10*(4), 231-239 .

[15] Asgharpour-Alamdari, H., Alinejad-Beromi, Y., & Yaghobi, H. (2017). Reduction in distortion of the synchronous generator voltage waveform using a new winding pattern. *IET Electric Power Applications*, *11*(2), 233-241. https://doi.org/10.1049/ iet-epa.2016.0502

[16] Asgharpour-Alamdari, H., Alinejad-Beromi, Y., & Yaghobi, H. (2018). Improvement of induction motor operation using a new winding scheme for reduction of the magnetomotive force distortion. *IET Electric Power Applications*, *12*(3), 323-331 .

[17] Tang ,N., & Brown, I. P. (2018). Framework and Solution Techniques for Suppressing Electric Machine Winding MMF Space Harmonics by Varying Slot Distribution and Coil Turns. *IEEE Transactions on Magnetics*, *54*, 1-12. https://doi.org/10. 1109/TMAG.2018.2804897

[18] Scuiller, F. (2020). General, compact and easy-to-compute winding factor formulation. *IET Electric Power Applications*, *14*(8), 1430 – 1437. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0950

[19] Caruso, M., Di Tommaso, A. O., Marignetti, F., Miceli, R., & Ricco Galluzzo, G. (2018). A general mathematical formulation for winding layout arrangement of electrical machines. *Energies*, *11*(2), 446. https://doi.org/10.3390/en11020446

[20] Tommaso, A. O. D., Genduso, F., & Miceli, R. (2015). A New Software Tool for Design, Optimization, and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, *51*(4), 1-10. https://doi.org/10.1109/ TMAG.2014.2369860

[21] Z. Q. Li. (2019). Application of sine winding technology in the design of explosion-proof motor products. *Internal Combustion Engines and Accessories*, *5*, 197-198 .

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 169-186
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.271748.1381
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.9.2

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Optimization of Model Predictive Control Horizons Using Particle Swarm Algorithm to Synchronize Marine Simulator Motion

Navid Moshtaghi Yazdani[1]*, Mohammad Hasan Olyaei Torqabeh[2]

[1]PhD, Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.
[2]MSc., Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Biomedical Engineering, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.24.2021
Revised: 10.09.2021
Accepted: 10.18.2021

Keyword:
Motion step algorithm
Predictive control
Particle swarm algorithm
Optimization

***Corresponding Author:**
Navid Moshtaghi Yazdani
Email:
Navid.moshtaghi@alumni.ut.ac.ir

ABSTRACT

Marine simulators are effective tools for making a ship feel like driving by creating a similar environment using motion commands. The main problem with simulators is the limited workspace which does not allow them to generate accurate real-time floating movements, so they require a motion synchronization algorithm. Recently, the use of predictive control has become popular in marine simulators. Values of control horizon and future forecast affect the computational load. However, because the designer manually selects these horizons, they are lower than the optimal level. In this paper, a new method based on particle swarm algorithm was used to achieve the best control and forecast horizons by minimizing some periods such as sensory error, displacement and computational load. The proposed method eliminates the disadvantages of the MPC-MCA method such as time-consuming empirical estimation through trial and error for initial control and forecast horizons, while minimizing optimal cost performance and computational load. The simulation results showed the efficiency of the proposed method based on the improvement of performance output and computational load.

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۱۸۶-۱۶۹

آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/

doi:10.48301/KSSA.2021.271748.1381 20.1001.1.23829796.1400.18.3.9.2

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی افق‌های کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در راستای هم‌گام‌سازی حرکت شبیه‌ساز دریایی

نوید مشتاقی یزدانی[1*]، محمد حسن علیائی طرقبه[2]

۱- دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

کلید واژگان:

الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت

کنترل پیش‌بین

الگوریتم ازدحام ذرات

بهینه‌سازی

***نویسنده مسئول:** نوید مشتاقی یزدانی

پست الکترونیکی:

Navid.moshtaghi@alumni.ut.ac.ir

چکیده

شبیه‌سازهای دریایی، ابزارهای مؤثری برای احساس راندن یک شناور دریایی از طریق ایجاد یک محیط مشابه با استفاده از فرمان‌های حرکتی هستند. مشکل اصلی شبیه‌سازها فضای کار محدودی است که به آن‌ها اجازه نمی‌دهد تا حرکات دقیق شناور واقعی را ایجاد کنند؛ در نتیجه آن‌ها به الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت نیاز دارند. اخیراً استفاده از کنترل پیش‌بین در شبیه‌سازهای دریایی به محبوبیت رسیده است. دریچه‌های افق کنترل و پیش‌بینی آینده بر بار محاسباتی تأثیر می‌گذارد اما از آن جا که این افق‌ها به‌صورت دستی توسط طراح انتخاب می‌شوند، پایین‌تر از سطح بهینه می‌باشند. در این مقاله، روشی نوین بر مبنای الگوریتم ازدحام ذرات برای دستیابی به بهترین افق‌های کنترل و پیش‌بینی با توجه به حداقل‌رسانی برخی از کمیت‌ها مانند خطای حسی، جابه‌جایی و بار محاسباتی به‌کار گرفته شده است. روش پیشنهادی معایب روش MPC-MCA مانند تخمین تجربی وقت‌گیر از طریق تکرار آزمون و خطا برای تعیین افق‌های کنترل و پیش‌بینی را برطرف می‌کند و در عین حال هزینه و بار محاسباتی را به حداقل می‌رساند. نتایج شبیه‌سازی، کارآمدی روش پیشنهادی را بر مبنای بهبود خروجی عملکرد و بار محاسباتی نشان می‌دهد.

مقدمه

شبیه‌سازهای دریایی دستگاه‌های مقرون‌به‌صرفه‌ای هستند که کاربرد رو به افزایشی برای آموزش و نمونه‌سازی اولیه دارند. هدف یک شبیه‌ساز دریایی، ایجاد (بازخورد حرکت) برای کاربر است تا احساس واقعی کار را برای وی فراهم کند. بازخورد حرکت به کاربر کمک می‌کنند تا اتفاقات طبیعی را در محیط شبیه‌سازی‌شده تجربه کند. محدودیت اصلی شبیه‌سازهای دریایی، محدودیت مرزهای فضای کاری است؛ در نتیجه، بازخورد حرکت باید توسط الگوریتمی که به‌عنوان الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت شناخته می‌شود به‌صورت حرکات امکان‌پذیری برای پلتفورم شبیه‌ساز دریایی تغییر شکل دهد تا تعادلی بین خطای احساس راندن و محدودیت‌های محل کار پلتفورم ایجاد کند [۷-۱].

سیستم دهلیزی در گوش داخلی قرار گرفته است و حرکت بدن انسان را تشخیص می‌دهد. این سیستم از استاتولیت‌ها که مسئول حس شتاب خطی و کانال‌های نیم‌دایره که مسئول احساس سرعت زاویه‌ای می‌باشند تشکیل شده است. اندام‌های استاتولیت نمی‌توانند تفاوت میان شتاب افقی و تأثیر گرانش را به‌وسیله گرایش کاربر که حول یک محور افقی ایجاد می‌شود، تشخیص دهند. این کار در تکنیکی به نام هماهنگی شتاب که در شبیه‌سازهای حرکتی برای ایجاد احساس شتاب‌های خطی پایدار بدون تجربه کردن جابه‌جایی زیاد پلتفورم به‌کار می‌رود انجام می‌شود. این مسئله براساس این نکته است که استاتولیت‌ها نمی‌توانند بین شتاب خطی پایدار و شتاب استاتیک که منشأ آن در گرانش متناسب با سر کاربر، مشابه با شتاب گرانش- اینرسی در یک وسیله نقلیه واقعی است، تمایز قائل شوند. شتاب گرانش- اینرسی مجموع بردار تمام شتاب‌های به‌کاررفته در بدن؛ ازجمله شتاب گرانش است. بدون بینایی یا کانال‌های نیم‌دایره، انسان نمی‌تواند درک کند آیا منشأ شتاب گرانش- اینرسی ناشی از شتاب بدن یا حرکت سر او است. کاربر باید در نرخی تحت آستانه درک چرخش انسانی متمایل شود تا از احساس چرخش ناشی از شتابی که توسط کانال‌های نیم‌دایره حس می‌شود اجتناب کند [۸-۱۲]. از نظر سنتی، فیلترهای wash out برای اجرای الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت به‌کار گرفته شده‌اند. شتاب آغازین از طریق حرکت خطی پلتفورم ایجاد می‌شود و احساس شتاب پایدار با هماهنگی شتاب ایجاد می‌شود. فیلترهای wash out کلاسیک را محققان متعددی طراحی کرده‌اند و بهبود داده‌اند [۱۶-۱۳]. محققان Casas و Thöndel الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی پارامترهای فیلترهای wash outکلاسیک به‌کار گرفتند اما نتواستند در مورد ارزیابی عینی نتایج خود اطلاعات کافی ارائه کنند. فیلترهای wash out بهینه، نسل بعدی فیلترهای wash out بودند که براساس مفهوم تنظیم‌کننده درجه دوم خطی طراحی شدند [۱۷; ۱۸]. علی‌رغم این که هدف فیلترهای wash out بهینه، به‌حداقل رساندن خطای حسی بین شبیه‌ساز و یک کاربر واقعی است، این فیلترها از کمبودهای مربوط به محدودیت‌های فیزیکی شبیه‌ساز مانند نقض جابه‌جایی حداکثری و نیاز به الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت بهینه برای کار کردن در یک محیط کار بزرگ‌تر رنج می‌برند [۱۹-۲۱]. به‌علاوه، الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت بهینه مبتنی بر تنظیم‌کننده درجه دوم خطی محدودیت‌های دینامیک پلتفورم را در نظر نمی‌گیرد. از آن جا که مسئله محدودیت‌ها در فیلترهای wash out و تکنیک‌های هم‌گام‌سازی حرکت بهینه متعارف بسیار مهم است، یک روش برای تقلیل این محدودیت لازم است. علاوه بر این، به‌کارگیری الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت بهینه، مستلزم دستکاری در چند وزن مربوط به حالت‌هایی است که اغلب نمایش فیزیکی مشخصی ندارند که می‌توانند وظیفه تنظیم کردن را بسیار پیچیده کنند [۲۲; ۲۳]. نقطه‌ضعف اصلی تمام فیلترهای wash out این است که آن‌ها معمولاً در مورد محدودیت‌های شبیه‌ساز آگاهی ندارند و محدودیت‌های فیزیکی را می‌توان هر زمانی نقض کرد؛ بنابراین، فیلترهای wash out معمولاً به‌طور محافظه‌کارانه برای بدترین سناریو تنظیم می‌شوند. این تنظیم مانع از این می‌شود که پلتفورم حرکت از فضای کار استفاده بهینه کند. مشکلاتی که در ماهیت فیلترهای wash out وجود دارند محققان را ترغیب کردند تا کنترل پیش‌بین را در اجرای الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت به‌کار ببرند [۲۴]. در روش

کنترل پیش‌بین، محدودیت‌ها به‌صورت آشکار برای فرد کنترل‌کننده تعریف می‌شوند. در این نوع کنترل، هدف، به‌دست آوردن بهترین ورودی برای بهینه‌سازی پاسخ آتی است. همچنین این روش، ایراد اساسی کنترل مود لغزشی ناشی از اثر چترینگ[1] را ندارد [۲۵]. این مشکل به مرور زمان اهمیت کمتری پیدا می‌کند، ورودی و خروجی برای هر نمونه زمانی آینده نزدیک در نظر گرفته می‌شوند. یک تابع هزینه برای برطرف کردن فاکتورهای نامطلوب مانند خطای احساس حرکت و تغییرات ناگهانی در متغیرها تعریف می‌شود. این بهینه‌سازی، بهترین مقادیری را که باید در نمونه‌های زمانی بعدی به‌کار بروند تعیین می‌کند. البته، تنها ورودی اولیه به‌کار می‌رود و مسئله برای هر مرحله زمانی دوباره بهینه‌سازی می‌شود. عرض پنجره آینده نزدیک برای بهینه‌سازی تابع هزینه و رعایت محدودیت‌ها افق پیش‌بینی (Tp) نامیده می‌شود و پنجره آینده مربوط به ورودی بهینه بعدی، افق کنترل (Tc) نام دارد. پنجره افق در هر مرحله زمانی عقب می‌رود تا لحظه زمانی قبلی را در آغاز، حذف و لحظه بعدی را در آخر لحاظ کند. کاربرد کنترل پیش‌بین در الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت لزوم اجرای تنظیم وزن را برای سناریوی بدترین مورد از میان برداشته است. کنترل پیش‌بین قابلیت بالاتری برای ایجاد عملکرد بهتر در مقایسه با فیلترهای wash out نشان داده است [۶].

Dagdelen و همکارانش ابتدا الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت مبتنی‌بر کنترل پیش‌بین را ارائه دادند [۲۶]. در MPC-MCA[2] اولیه، هماهنگی شتاب به‌کار گرفته نشد؛ بنابراین پلتفورم حرکت به سرعت به محدودیت‌های فضای کار خود رسید. Maran افق‌ها را به‌صورت دستی تنظیم کرد و خاطرنشان ساخت که افق‌های پیش‌بینی و کنترل در کنترل‌کننده پیش‌بین بر نتایج خروجی و زمان محاسبه شبیه‌سازی تأثیر می‌گذارند [۲۷]. البته هیچ روش مستقیمی برای تنظیم بهینه افق کنترل پیشنهاد نشده است و یافتن بهترین مقادیر هنوز هم یک معضل است. فرایند انتخاب افق‌های کنترل و پیش‌بینی بسیار زمان‌بر است. این فرایند تنظیم در MPC-MCA پایین‌تر از سطح بهینه است و به‌طور کامل از قابلیت شبیه‌ساز استفاده نمی‌کند. افق پیش‌بینی باید برای تأمین عملکرد قابل‌قبول به اندازه کافی گسترده باشد [۲۸] در حالی که افزایش افق پیش‌بینی محاسبه بهینه‌سازی را کند می‌کند. در این مقاله الگوریتم ازدحام ذرات برای دست‌یابی به بهترین افق‌های کنترل و پیش‌بینی از طریق در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم مانند جابه‌جایی و بار محاسباتی به‌منظور حذف نقاط ضعف خطای تجربی زمان‌بر مربوط به افق‌های کنترل و پیش‌بینی اولیه MPC-MCAهای موجود به‌کار گرفته شد. در این بخش، مفاهیم اساسی الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت و کنترل پیش‌بین مورد بحث قرار گرفته‌اند. در بخش (۲)، توصیف ریاضی کنترل پیش‌بین که برای الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت به‌کار برده شده است به‌طور مبسوط شرح داده شده است و نقش افق‌های کنترل و پیش‌بینی نشان داده شده است. روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی افق کنترل پیش‌بین در بخش (۳) شرح داده شده است، نتایج شبیه‌سازی در بخش (۴) ارائه شده و بخش (۵) به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

کنترل پیش‌بین

کنترل پیش‌بین به‌صورت موفقیت‌آمیزی در بسیاری صنایع به‌کار رفته است [۲۹; ۳۰]. مزیت اصلی این نوع کنترل، توانایی آن در کنترل محدودیت‌های ورودی و خروجی در بهینه‌سازی چند متغیری در یک افق محدود از طریق پیش‌بینی دینامیک فرایند است [۳۱-۳۳]. کنترل‌کننده‌های متعارف با توجه به حالات فعلی و گذشته یک سیستم تصمیمات در لحظه می‌گیرند در حالی که کنترل پیش‌بین، آینده را در نظر می‌گیرد.

[1] Chattering
[2] Model predictive control-motion cueing algorithm

کنترل پیش‌بین، یک روش بهینه محدود برای استخراج بهترین توالی ورودی به‌منظور دستیابی به خروجی بهینه در یک افق محدود آینده است. ورودی بهینه، بلافاصله برای هر بازه نمونه‌برداری به‌کار می‌رود و مسئله بهینه‌سازی دوباره در مرحله نمونه بعدی حل می‌شود [۳۴].

برخی مطالعات در مورد کاربردهای الگوریتم ژنتیک و کنترل پیش‌بین برای بهینه‌سازی ورودی کنترل وجود دارند. بیشتر تحقیقات این زمینه از کنترل پیش‌بین مبتنی‌بر الگوریتم ژنتیک برای کنترل فرایند غیرخطی تحقیقاتی است که AI-Duwaish و Potocnik انجام داده‌اند [۳۵; ۳۶]. باید توجه داشت که روش زمان‌بر آزمون و خطا تا به امروز برای تنظیم افق‌های کنترل و پیش‌گویانه در MPC-MCA مورد استفاده قرار گرفته است در حالی که الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی افق به‌کار نرفته است. به‌علاوه، کنترل پیش‌بین، یک بار محاسباتی قابل توجه دارد که می‌تواند تأثیر منفی بر فرایندهای کاربردی در کنترل زمان واقعی داشته باشد؛ بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، جستجوی مناسب‌ترین افق‌های کنترل و پیش‌گویانه است که زمان محاسباتی را به‌حداقل برساند. در این مقاله، تنها از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است.

مدل کنترل پیش‌بین در رابطه (۱) را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} x_m(t+1) &= A_m x_m(t) + B_m u(t) \\ y(t) &= C_m x_m(t) \end{aligned} \tag{۱}$$

از آن جا که ممکن است محدودیت‌هایی در نرخ متغیرهای ورودی و نیز خروجی وجود داشته باشد؛ بنابراین ورودی u را به ورودی Δu تغییر می‌دهیم.

$$\Delta u(t) \triangleq u(t) - u(t-1) \tag{۲}$$

$$\Delta x_m(t) \triangleq x_m(t) - x_m(t-1) \tag{۳}$$

بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} \Delta x_m(t+1) &= A_m \Delta x_m(t) + B_m \Delta u(t) \\ y(t+1) - y(t) &= C_m A_m \Delta x_m(t) + C_m B_m \Delta u(t) \end{aligned} \tag{۴}$$

اگر x(t) به‌صورت زیر تعریف شود:

$$x(t) \triangleq \begin{bmatrix} \Delta x_m(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \tag{۵}$$

از معادله (۴) و (۵) داریم

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A\, x(t) + B\, \Delta u(t) \\ y(t) &= C\, x(t) \end{aligned} \tag{۶}$$

که در آن $\Delta u(t)$ ورودی کنترل و $x(t)$ متغیر حالت می‌باشند و A و B و C عبارتند از

$$A = \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ C_m A_m & I \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix},\ C = [0\ \ I] \tag{۷}$$

در هر نمونه زمانی t، حالت پیش‌بینی‌شده بازه $(t+nT_S)$ به‌صورت $x(t+n|t)$ نشان داده شده است که T_S زمان نمونه را نشان می‌دهد. بنابراین داریم:

$$x(t+n|t)=A^n x(t)+A^{n-1}B\Delta u(t)+A^{n-2}B\Delta u(t+1)+...+B\Delta u(t+n-1) \quad (۸)$$

$$y(t+n_p|t)=CA^n x(t)+CA^{n-1}B\Delta u(t)+CA^{n-2}B\Delta u(t+1)+...+CA^{n_p-n_c}B\Delta u(t+n_c-1) \quad (۹)$$

افق‌های کنترل و پیش‌بینی MPC عبارتند از n_c و n_p. بنابراین خروجی پیش‌بینی‌شده در افق پیش‌بینی تابعی از توالی ورودی و حالت فعلی است.

حال می‌توان معادله خروجی را به‌صورت رابطه زیر نوشت:

$$Y=FX(t)+G\Delta U \quad (۱۰)$$

که در آن Y, F, R, ΔU به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Y=\begin{bmatrix} y(t+1|t) \\ y(t+1|t) \\ . \\ . \\ . \\ y(t+n_p|t) \end{bmatrix} \quad \Delta u=\begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ . \\ . \\ . \\ \Delta u(t+n_c-1) \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad (۱۱)$$

که F و G به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$G=\begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{n_p-1}B & CA^{n_p-2}B & \cdots & CA^{n_p-n_c}B \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad F=\begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ . \\ . \\ . \\ CA^{n_p} \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

هدف به‌حداقل رساندن تابع هزینه با در نظر گرفتن قیود است که به‌صورت تعریف می‌شود:

$$J(\Delta U) = (Y_S - Y)^T Q (Y_S - Y) + U^T S U + \Delta U^T R \Delta U \qquad (۱۳)$$
$$D_{\min} \le V\,\Delta U \le D_{\max}$$

که در آن Y_s مرجع خروجی در افق پیش‌بینی و Q، R، و S ماتریس‌های وزنی با قطر مورب برای جبران افزایش نامطلوب در فاکتورهای متناظر هستند. همچنین توالی ورودی U پس از آخرین ورودی و نوسان ورودی بهینه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ \vdots \\ u(t+n_c-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{I} & 0 & 0 & \cdots \\ \mathrm{I} & \mathrm{I} & 0 & \cdots \\ \mathrm{I} & \mathrm{I} & \mathrm{I} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ \mathrm{I} & \mathrm{I} & \mathrm{I} & \mathrm{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+n_c-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t-1) \\ \vdots \\ u(t-1) \end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

محدودیت‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: محدودیت نرخ ورودی، نتایج ورودی و نتایج خروجی که می‌توان آن‌ها را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$D_{\min} \le V\,\Delta U \le D_{\max}$$

که در آن $V, D_{\min}, D_{\max}$ به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}, D_{\min} = \begin{bmatrix} D_{1\min} \\ D_{2\min} \\ D_{3\min} \end{bmatrix}, D_{\max} = \begin{bmatrix} D_{1\max} \\ D_{2\max} \\ D_{3\max} \end{bmatrix}$$

$D_{\max}$ و $D_{\min}$ محدوده پایین و بالای هر کدام از محدودیت‌ها هستند.
محدودیت‌های نرخ‌های ورودی به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$D_{1\min} = \Delta u_{\min} = \begin{bmatrix} \Delta u_{\min} \\ \Delta u_{\min} \\ . \\ . \\ . \\ \Delta u_{\min} \end{bmatrix}, V_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{I} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathrm{I} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathrm{I} \end{bmatrix}, D_{1\max} = \Delta u_{\max} = \begin{bmatrix} \Delta u_{\max} \\ \Delta u_{\max} \\ . \\ . \\ . \\ \Delta u_{\max} \end{bmatrix}$$

مجموعه محدودیت‌های مقادیر ورودی را نیز می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$D_{2\min}=\begin{bmatrix} u_{\min}-u(t-1) \\ u_{\min}-u(t-1) \\ . \\ . \\ . \\ u_{\min}-u(t-1) \end{bmatrix}, V_1=\begin{bmatrix} \mathrm{I} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathrm{I} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathrm{I} \end{bmatrix}, D_{2\max}=\begin{bmatrix} u_{\max}-u(t-1) \\ u_{\max}-u(t-1) \\ . \\ . \\ . \\ u_{\max}-u(t-1) \end{bmatrix}$$

و مجموعه محدودیت سوم در نتایج خروجی نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$D_{3\min}=Y_{\min}-FX(t)$$
$$V_3=G$$
$$D_{3\max}=Y_{\max}-FX(t)$$

با به‌کارگیری معادلات(۱۴) و (۱۰) در (۱۳) داریم:

$$J(\Delta U)=(Y_S-FX(t)-G\Delta U)^T Q(Y_S-FX(t)-G\Delta U)+(\mathrm{T}\Delta U+\overline{U}_i)^T S(\mathrm{T}\Delta U+\overline{U}_i)+\Delta U^T R\Delta U \quad (۱۵)$$

پس از حذف عبارات ثابت از تابع هزینه معادله (۱۵) داریم:

$$J(\Delta U)=\Delta U^T(G^T QG+R+\mathrm{T}^T S\mathrm{T})\Delta U+2\Delta U^T(G^T Q(FX(t)-Y_S)+\mathrm{T}^T S\overline{U}_i) \quad (۱۶)$$

معادله (۱۶) را می‌توان به‌صورت زیر بازنوسی کرد:

$$J(\Delta U)=\frac{1}{2}\Delta U^T H\Delta U+\Delta U^T Z$$
$$D_{\min}\le V\Delta U\le D_{\max} \quad (۱۷)$$

که در آن H و K به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$H\triangleq 2(G^T QG+R+\mathrm{T}^T S\mathrm{T})$$
$$Z\triangleq 2(G^T Q(FX(t)-Y_S)+\mathrm{T}^T S\overline{U}_i) \quad (۱۸)$$

با هم یک مسئله برنامه‌ریزی درجه دوم را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین می‌توان آن را به روش مجموع مربعات محاسبه کرد:

MCA مبتنی بر MPC با بهینه‌سازی افق کنترل

مهم‌ترین فاکتورهای عملکرد MPC افق‌های کنترل و پیش‌بینی هستند؛ زیرا آن‌ها مستقیماً بر اندازه مسئله برنامه‌ریزی درجه دوم تأثیر می‌گذارند. در حضور یک مرجع خروجی قابل اطمینان، افزایش افق پیش‌بینی نتیجه خروجی را بهبود می‌بخشد؛ البته، بار محاسباتی، یک محدودیت است. افزایش افق کنترل به معنای درجه آزادی بالاتر ورودی کنترل است؛ به هر صورت، ممکن است این کار ضروری نباشد و به محاسبات بیشتر و در برخی موارد حتی به اثرات نامطلوب منجر شود. در روش پیشنهادی، بهینه‌سازی آفلاین برای رسیدن به بهترین مقادیر برای افق‌های کنترل و پیش‌بینی از طریق به‌حداقل رساندن یک تابع هزینه انجام می‌شود.

$$J_{total} = K_1 J_{Equation} + K_2 J_{MCA} \tag{۱۹}$$

. ـ ر جه داشت که K_1 و K_2 فاکتور وزن برای کنترل تأثیر هزینه محاسبات است. رشد n_c و n_p در یک تابع هزینه برای محدود کردن افق‌هایی که به‌صورت غیرضروی عریض هستند قرار داده می‌شود هزینه محاسباتی $J_{Equation}$ باید تابعی منطقی از n_c و n_p باشد. این هزینه به افق‌ها اجازه می‌دهد تا تنها زمانی که افزایش آن‌ها ضروری است رشد کند و فاکتورهای نامطلوب مانند خطا و جابه‌جایی را کاهش می‌دهد. البته این تابع، افزایش بیشتر در افق‌ها را کم می‌کند. د، این مقاله تابع $J_{Equation}$ به‌صورت زیر است [۱۱]:

$$J_{Equation} = a_1 n_p + a_2 n_c + a_3 n_p n_c + a_4 n^2{}_p n_c + a_5 n^2{}_c n_p + a_6 n^2{}_p + a_7 n^2{}_c \tag{۲۰}$$

برای انتخاب ضرایب معادله ما کنترل پیش‌بین را با چند تغییر در n_c و n_p اجرا می‌کنیم و ضرایب را برای هماهنگ کردن با زمان شبیه‌سازی برازش می‌کنیم.

در مدل فضای حالت MCA داریم [۳۷]:

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \\ x_k \\ v_k \\ \dot{\omega}_k \\ \dot{v}_k \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.5dt^2 & 0 \\ dt & 0 \\ 0 & 0.5dt^2 \\ 0 & dt \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, u_k = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_k \\ \dot{v}_k \end{bmatrix}$$

هزینه J_{MCA} متشکل از هزینه‌های خطای حس‌های چرخشی و انتقالی، جابه‌جایی سکو، سرعت سکو، ورودی شتاب به‌کاررفته و ورودی سرعت زاویه‌ای است [۱۲].

$$\begin{aligned} J_{MCA} &= a_{11}\int (f - f_{ref})^2 dt + a_{12}\int (\omega - \omega_{ref})^2 dt + a_{13}\int (\varpi - \varpi_{ref})^2 dt + a_{14}\int \omega^2 dt + \\ & a_{15}\int \varpi^2 dt + a_{16}\int x^2 dt + a_{17}\int v^2 dt + a_{18}\int a^2 dt + a_{19}\int \theta^2 dt \end{aligned} \tag{۲۱}$$

که در آن f نیرو، f_{ref} نیروی حس شده توسط استئولیت‌ها، ϖ سرعت زاویه‌ای ناشی از شتاب، ϖ_{ref} چرخش حس شده توسط کانال‌های نیم‌دایره از ω، ϖ سرعت زاویه‌ای برای تولید احساس چرخش و ω_{ref} چرخش حس شده توسط کانال‌های نیم‌دایره از ω است. x جابه‌جایی سکو، v سرعت سکو، a شتاب به‌کار رفته و θ جابه‌جایی زاویه‌ای سکو است و f نیرو، f_{ref} نیروی مخصوص حس شده توسط استئولیت‌ها می‌باشد.

f نیروی واردشده بر سر راننده از سوی شتاب خطی a و گرانش است که به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_x = a_x + g\theta \tag{۲۲}$$

که g شتاب گرانش است.

برای محاسبه حس انسانی، سیستم دهلیزی پیشنهادی مرجع [۹] که مناسب‌ترین مدل است و در بین محققان به‌صورت گسترده استفاده شده است انتخاب می‌گردد.

$$\frac{f_{ref}}{f} = 0.4\frac{1+10s}{(1+5s)(1+0.016)} \tag{۲۲}$$

و سرعت زاویه‌ای حس شده توسط کانال‌های نیم‌دایره به‌صورت زیر است

$$\frac{\omega_{ref}}{\omega} = \frac{5.73*80*s^2}{(1+5.73s)(1+80s)} \tag{۲۳}$$

اما همان‌طور که می‌دانیم در کنترل پیش‌بین، در مورد یک جفت معتبر $\left(n_c \quad , \quad n_p\right)$، شرط زیر باید لحاظ شود.

$$n_c \le n_p \tag{۲۴}$$

الگوریتم ازدحام ذرات یکی از روش‌های بهینه‌سازی است. این الگوریتم را کندی و ابرهات در سال ۱۹۹۵ توسعه دادند. الگوریتم، الهام گرفته از رفتار اجتماعی گونه‌های مختلف زیستی در زندگی گروهی آنان است؛ مانند پرندگان و ماهی‌ها. الگوریتم، ازدحام ذرات تعامل بین اعضا را برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات تقلید می‌کند. همچنین می‌توان گفت الگوریتم ازدحام ذرات از سرعت بالایی برخوردار است [۳۸].

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله t+1 ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر zj مؤلفه jام از بردار z باشد، آن‌گاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از:

$$\begin{aligned} v_j^i[t+1] &= wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]) \\ x_j^i[t+1] &= x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \end{aligned} \tag{۲۵}$$

در این روابط، W ضریب اینرسی، r1 و r2 اعدادی تصادفی در بازه [0,1] با توزیع یکنواخت و همچنین c1 و c2 ضرایب یادگیری هستند. r1 و r2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. c1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c2 ضریب یادگیری مربوط به کل جمع می‌باشد.

برای به‌کار گرفتن الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌سازی افق‌ها، هر ذره متناظر با افق‌های کنترل و پیش‌بینی هستند:

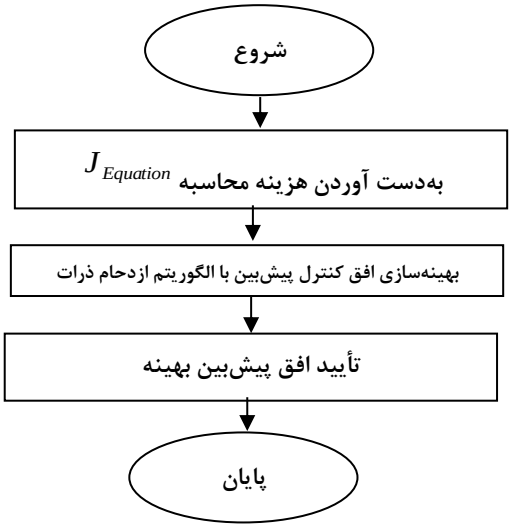
$$P_i = \left[n_c \quad n_p\right]$$

در نتیجه هر ذره، شرط خطی (۲۵) را باید در نظر بگیرد. ضمن اینکه برای اجتناب از فرایند بهینه‌سازی طولانی هر ذره پس از ۵ بار که شرط (۲۵) را برآورده نکرد حذف می‌گردد؛ زیرا آن‌ها مقدار فرایند قابل‌توجهی را به خود اختصاص می‌دهند در حالی که نتایج آن‌ها مطلوب نیست. علاوه بر آن، هر ذره باید شرط زیر را نیز برآورده کند:

$$\left\langle n_{p2} \le n_{p1} \quad , \quad n_{c2} \le n_{c1} \right\rangle \tag{۲۶}$$

زیرا افزایش هریک از افق‌ها به‌طور یکنواخت محاسبه را افزایش می‌دهد. در رابطه (۲۶)، اعداد ۱ و ۲ به معنی مرحله اول و مرحله دوم می‌باشد.

تابع $J_{Equation}$ به‌عنوان نماینده بار محاسباتی در ارزیابی تابع هزینه در الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی افق‌ها به‌کار خواهد رفت. در مرحله بعدی، الگوریتم ازدحام ذرات با فرایند جستجو برای راه‌حل ایده‌آل آغاز می‌شود. در ادامه فلوچارت کلی روش پیشنهادی به تصویر کشیده شده است.



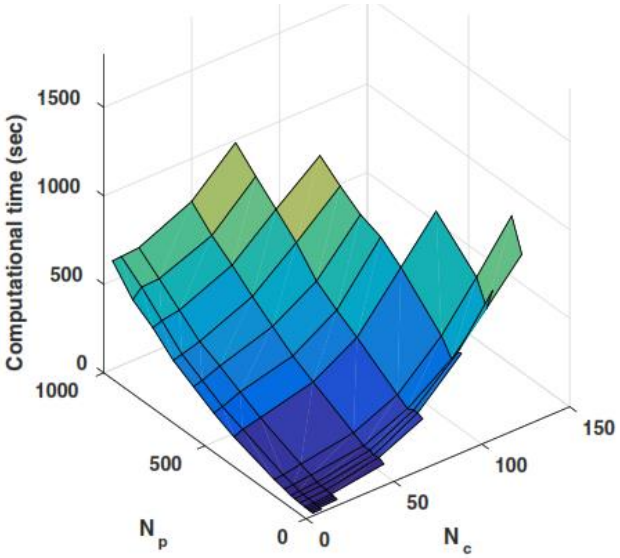
فلوچارت مدل پیشنهادی

نتایج شبیه‌سازی

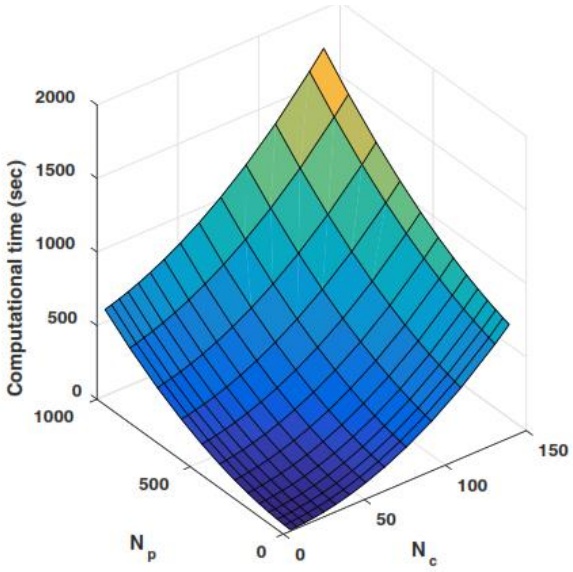
فرایند به‌دست آوردن تابع محاسبات و تابع هزینه و نیز الگوریتم ازدحام ذرات و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده‌اند. هزینه محاسبات حاصل از به‌کارگیری برازش تابع به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$J_{Equation} = 0.4n_p + 3\times10^{-2}n_c + 17\times10^{-3}n_p n_c + 19\times10^{-5}n^2{}_p n_c + 5\times10^{-3}n^2{}_p \tag{۲۷}$$

الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی افق‌های MPC برای یک سیگنال ورودی آموزش کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشینه بار محاسباتی ($J_{Equation,\max}$) ۸۰۰ تنظیم شده است.



شکل ۱. تابع محاسباتی حاصل از نمونه‌های شبیه‌سازی از طریق تغییر nc و np



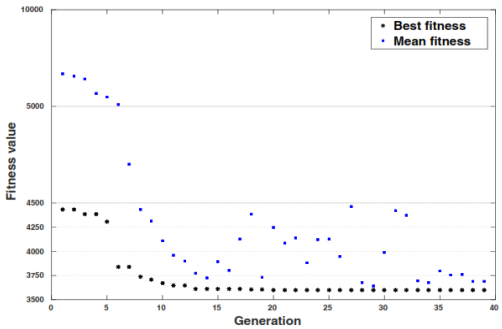
شکل ۲. تابع محاسباتی برآورد شده از طریق تغییر nc و np

جدول ۱ تنظیمات الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. تعداد جمعیت در ۱۰۰ تنظیم شده است. باید توجه داشت که افزایش بیشتر جمعیت صرفاً زمان بهینه‌سازی را بدون هیچ دستاورد چشمگیری که به هم‌گرایی منجر شود، افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، نتایج رضایت‌بخش نشان می‌دهند که پارامترهای منتخب به‌درستی انتخاب شده‌اند.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

نام پارامتر	مقدار پارامتر
اندازه جمعیت	۱۰۰
ضریب اینرسی	۰.۱-۰.۹
ضرایب یادگیری	۵
معیار توقف جستجو	مدت زمان
زمان محاسباتی	۳۰ ثانیه

برای صرفه‌جویی در زمان، هر ذره ارزیابی شده جدید همراه با ارزش اعتبار خود و نتیجه هزینه ذخیره می‌شود؛ بنابراین، در مرحله بعدی برای همان ارزیابی، افق مقدار ذخیره شده بدون اجرای شبیه‌سازی بازگردانده می‌شود. در بهینه‌سازی انجام شده، الگوریتم ازدحام ذرات در تکرار شصت‌وهفتم متوقف شد. شکل ۳ همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. راه‌حل بهینه به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم ازدحام ذرات عبارت است از: Nc = ۵، NP = ۵۰



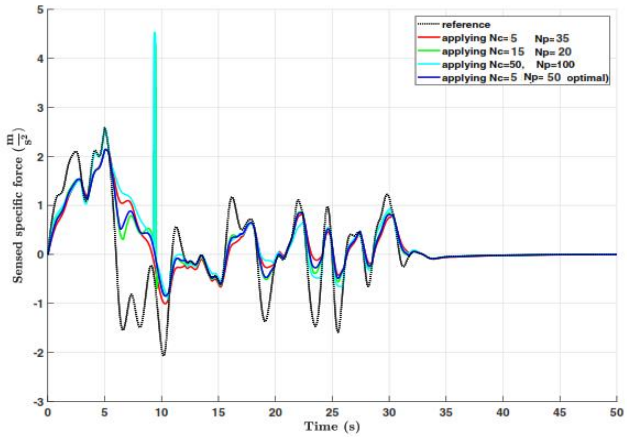
شکل ۳. همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی افق

سیگنال‌های آموزشی از سناریوهای آموزشی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز دریایی ROV-SIM استخراج گردید. یک سیگنال ورودی آزمایشی برای مقایسه افق‌های بهینه حاصل از دانش ما و آزمون و خطا براساس سناریوهای شبیه‌سازی متعدد و نیز محدودیت‌های فیزیکی شبیه‌ساز مورداستفاده در مقاله در محیط شبیه‌سازی به‌کار رفت که هدف آن دستیابی به بهترین نتایج شبیه‌سازی برمبنای جابه‌جایی، خطای حس انسانی و محدودیت‌های فیزیکی مربوطه است. به‌منظور مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده با افق‌های پیش‌بینی و کنترل MPC-MCA اجرایی به‌صورت دستی که از طریق یک فرایند خسته‌کننده و زمان‌بر تنظیم می‌شوند از سه نفر از متخصصان و کارشناسان طراحی مقادیر مدنظر را دریافت کردیم که در جدول ۲ به آن اشاره شده است.

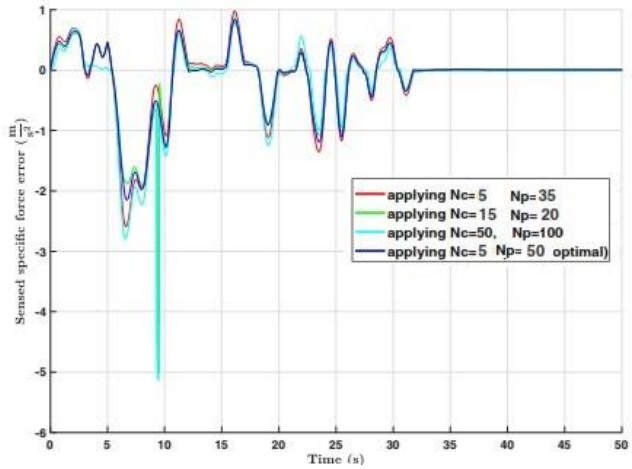
جدول۲. مقادیر پیشنهادی افق کنترل و افق پیش‌بین توسط متخصصان

کارشناس	مقادیر پیشنهادی (n_c,n_p)
کارشناس ۱	(۵,۳۵)
کارشناس ۲	(۱۵,۲۰)
کارشناس ۳	(۵۰,۱۰۰)

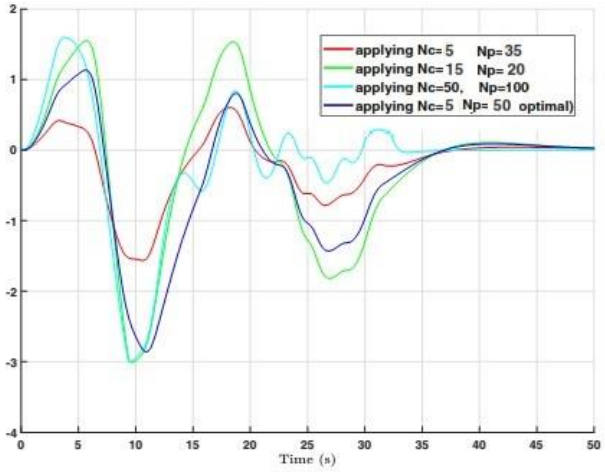
شکل ۴ مقایسه‌ای بین نیروی احساس شده برای افق‌های بهینه و مواردی که بیان شدند را نشان می‌دهد. پیروی از مرجع توسط نیروی احساس شده مطلوب است. مرجع نیروی حس شده به‌عنوان نیروی خاصی که توسط کاربری که حرکت مشابهی را در یک شبیه‌ساز دریایی واقعی احساس می‌کند تعریف می‌شود. اختلاف بین مرجع و نیروی حس شده خروجی، خطای حسی است که در شکل ۵ نشان داده شده است. هدف به‌حداقل رساندن خطای حسی و جابه‌جایی از طریق تابع هزینه است. شکل ۶ جابه‌جایی برای تنظیمات افق MPC مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه نیروی احساس شده در افق‌های مختلف



شکل ۵. مقایسه خطای نیروی مخصوص احساس شده برای افق‌های مختلف



شکل ۶. مقایسه جابه‌جایی سکو برای افق‌های مختلف

افق‌های پیش‌بینی کوتاه در معرض نقض شدید محدودیت‌های کنترل پیش‌بین هستند؛ زیرا کنترل پیش‌بین پنجره گسترده آینده را لحاظ نمی‌کند. زمانی که نزدیک است سکوی حرکت به مرزها برسد، خروجی کنترل پیش‌بین توسط یک شتاب ترمز برای متوقف کردن سکوی حرکت جایگزین خواهد شد. این مسئله به یک حرکت ناگهانی شدید برای کاربر منجر می‌شود. از سوی دیگر، افزایش افق‌ها محاسبات را کند می‌کند. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهند که ترجیح بر این است که افق کنترل در MPC-MCA پایین باشد. هزینه افق‌های بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است در پایین‌ترین مقدار است. تعیین بهترین افق براساس جریمه کل است. راه‌حل به‌دست‌آمده در مقایسه با سایر افق‌ها برحسب عملکرد خروجی (احساس و جابه‌جایی) و نیز بار محاسباتی مؤثرتر است.

جدول ۳. مقایسه تنظیم پارامترها

افق‌ها	(۱۵,۲۰)	(۵,۳۵)	(۵۰,۱۰۰)	(۵,۵۰)
هزینه کل	۶۰۹.۱	۴۶۰.۱	۶۲۰.۹	۴۳۶.۸

نتیجه‌گیری

کنترل پیش‌بین نقش مهمی در الگوریتم هم‌گام‌سازی حرکت یافته است. تاکنون انتخاب افق‌های پیش‌بینی و کنترل بر مبنای تنظیم دستی طراح بوده است و در نتیجه آن‌ها پایین‌تر از سطح بهینه بوده‌اند. در این تحقیق، روشی برای به‌دست آوردن افق‌های بهینه با استفاده از یک الگوریتم ازدحام ذرات پیشنهاد شد. این روش برای حل مسائل مربوط به تنظیم افق MPC-MCA از طریق آزمون و خطا، مانند خروجی نامطلوب یا بار محاسباتی زیاد طراحی شده است. خطای حسی و جابه‌جایی و نیز بار محاسباتی برای به‌دست آوردن بهترین افق‌ها لحاظ شده‌اند. نتیجه هر ارزیابی برای آینده جهت سرعت بخشیدن به ازدحام ذرات ذخیره شده است. افق‌های کنترل و پیش‌بینی بهینه شده‌اند و نتایج شبیه‌ساز برتری راه‌حل حاصل را نسبت به گزینش دستی طراح از افق‌های کنترل پیش‌بین بر مبنای آزمون و خطا

نشان داده‌اند. اگرچه ایده بهینه‌سازی افق کنترل پیش‌بین در MCA اجرا شد، اجرای آن می‌تواند به سایر مصارف نیز بسط داده شود.

References

[1] Asadi, H., Mohammadi, A., Mohamed, S., & Nahavandi, S. (2014). Adaptive translational cueing motion algorithm using fuzzy based tilt coordination. In *International Conference on Neural Information Processing* (pp. 474-482). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12643-2_58

[2] Asadi, H., Mohammadi, A., Mohamed, S., Zadeh, D. R., & Nahavandi, S. (2014). Adaptive washout algorithm based fuzzy tuning for improving human perception. In *International Conference on Neural Information Processing* (pp. 483-492). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12643-2_59

[3] Woon-Sung, L., Jung-Ha, K., & Jun-Hee, C. (1998, May 20-20). *A driving simulator as a virtual reality tool*. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146), Leuven, Belgium https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/676264

[4] Chang, Y.-H., Liao, C.-S., & Chieng, W.-H. (2009). Optimal motion cueing for 5-DOF motion simulations via a 3-DOF motion simulator. *Control Engineering Practice*, *17*(1), 170-184. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.016

[5] Aminzadeh, M., Mahmoodi, A., & Sabzehparvar, M. (2012). Optimal Motion-Cueing Algorithm Using Motion System Kinematics Final Comment. *European Journal of Control*, *18*, 377. https://doi.org/10.3166/ejc.18.363-375

[6] Fang, Z., & Kemeny, A. (2014, Sep 4-5). *Review and prospects of Renault's MPC based motion cueing algorithm for driving simulator.* Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe Paris, France. http://dsc2015.tuebingen.mpg.de/Docs/DSC_Proceedings/2014/DSC14_18_Fang_2.pdf

[7] Fang, Z., Colombet, F., Collinet, J.-C., Kemeny, A., & Center, I. S. (2014, September 4-5). *Roll tilt thresholds for 8 DOF driving simulators.* In Proc. Driving Simul. Conf, Europe. http//:dsc2015.tuebingen.mpg.de/Docs/DSC_Proceedings/2014/DSC14_10_Fang_1.pdf

[8] Groen, E. L., & Bles, W. (2004). How to use body tilt for the simulation of linear self motion. *J Vestib Res*, *14*(5), 375-385. https://doi.org/10.3233/VES-2004-14503

[9] Telban ,R. J., & Cardullo, F. M. (2005). *Motion cueing algorithm development: Human-centered linear and nonlinear approaches*. Nasa. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050180246/downloads/20050180246.pdf

[10] Chapron, T., & Colinot, J.-P. (2007, September 12-14) .*The new psa peugeot-citroen advanced driving simulator overall design and motion cue algorithm.* Proceedings of Driving Simulation Conference, North America – Iowa City. https://car-d.fr/publications/Chapron.pdf

[11] Asadi, H., Mohamed, S., Lim, C. P & ,.Nahavandi, S. (2016). A review on otolith models in human perception. *Behavioural brain research*, *309*, 67-76. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2016.03.043

[12] Asadi, H., Mohamed, S., Lim, C. P., Nahavandi, S., & Nalivaiko, E. (2017). Semicircular canal modeling in human perception. *Rev Neurosci*, *28*(5), 537-549. https://doi.org/10.1515/revneuro-2016-0058

[13] Reid, L. D., Nahon, M. A., & Studies, U. o. T. I. f. A. (1986). *Flight Simulation Motion-base Drive Algorithms. Part 3, Pilot Evaluations*. Institute for Aerospace Studies, University of Toronto. https://books.google.com/books?id=OM5hewAACAAJ

[14] Reid, L. D., & Nahon, M. A. (1986). *Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms.: Part 2, Selecting The System Parameters* (UTIAS report, Issue. U. o . Toronto. http://resolver.tudelft.nl/uuid:4faf3129-88c9-4117-82e9-f9819601dafd

[15] Nahon, M. A., & Reid, L. D. (1990). Simulator motion-drive algorithms-A designer's perspective. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, *13*(2), 356-362. https://doi.org/10.2514/3.20557

[16] Conrad, B., & Schmidt, S. F. (1971). *A study of techniques for calculating motion drive signals for flight simulators*. Nasa. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710025909/downloads/19710025909.pdf

[17] Thöndel, E. (2012, January 1) .*Design and optimisation of a motion cueing algorithm for a truck simulator*. 26th annual European simulation and modelling conference, Högskolan i Skövde. https://www.researchgate.net/profile/Evzen-Thoendel/publication/290299955_Design_and_optimisation_of_a_motion_cueing_algorithm_for_a_truck_simulator/links/60be166a92851cb13d861bcd/Design-and optimisation-of-a-motion-cueing-algorithm-for-a-truck-simulator.pdf

[18] Casas, S., Coma, I., Portalés, C., & Fernández, M. (2016). Towards a simulation-based tuning of motion cueing algorithms. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *67*, 137-154. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.06.002

[19] Arioui, H., Nehaoua, L., & Amouri, H. (2005, June 27-29). *Classic and Adaptive Washout Comparison for a Low Cost Driving Simulator*. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005., Limassol, Cyprus. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1467080

[20] Nehaoua, L., Mohellebi, H., Amouri, A., Arioui, H., Espie, S., & Kheddar, A. (2008). Design and Control of a Small-Clearance Driving Simulator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *57*(2), 736-746. https://doi.org/10.1109/TVT.2007.905336

[21] Nehaoua, L., Arioui, H., Mohellebi ,H., & Espie, S. (2006, June 14-16). *Restitution movement for a low cost driving simulator*. 2006 American Control Conference, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1656614

[22] Dagdelen, M., Reymond, G., Kemeny, A., Bordier, M., & Maïzi, N. (2009 .(Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators. *Control Engineering Practice*, *17*(9), 995-1003. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.03.002

[23] Walker, J. (2015). A motion cueing model for mining and forestry simulator platforms based on Model Predictive Control. In.

[24] Baseggio, M., Beghi, A., Bruschetta, M., Maran, F., & Minen, D. (2011, Oct 5-7). *An MPC approach to the design of motion cueing algorithms for driving simulators*. 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, USA https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6083053

[25] Masoumnezhad, M. (2017). Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *14*(42), 57-79 .

[26] Dagdelen, M., Reymond, G., Kemeny, A., Bordier, M., & Maïki, N. (2004). *MPC based motion cueing algorithm: Development and application to the Ultimate driving simulator*. DSC 2004 Europe (driving simulation conference),

[27] Maran, F. (2013). *Model-based control techniques for automotive applications* [University of the Studi of Padova]. Padua, Italy. http://automatica.dei.unipd.it/tl_files/pubblicazioni/PhDThesis/MaranFabio_PhD_thesis.pdf

[28] Garrett, N. J., & Best, M .(2010, August 22-26). *Driving simulator motion cueing algorithms–a survey of the state of the art.* Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), Loughboroug, England. https://repository.lboro.ac.uk/account/articles/9223-61

[29] Hosen, M. A., Hussain, M., Mjalli, F., Khosravi, A., Creighton, D., & Nahavandi, S. (2014). Performance analysis of three advanced controllers for polymerization batch reactor: An experimental investigation. *Chemical Engineering Research and Design*, *92*, 903–916. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.032

[30] Rodriguez, J., Kazmierkowski, M. P., Espinoza, J. R., Zanchetta, P., Abu-Rub, H., Young, H. A., & Rojas, C. A. (2013). State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *9*(2), 1003-1016. https://doi.org/10.1109/TII.2012.2221469

[31] Lee, J. H. (2011). Model predictive control: Review of the three decades of development. *International Journal of Control, Automation and Systems*, *9*(3), 415-424. https://doi.org/10.1007/s12555-011-0300-6

[32] Ruchika, N. R. (2013). Model predictive control: History and development. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, *4*(6), 2600-2602 .

[33] Stewart, B. T., Venkat, A. N., Rawlings, J. B., Wright, S. J., & Pannocchia, G. (2010). Cooperative distributed model predictive control. *Systems & Control Letters*, *59*(8), 460-469. https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2010.06.005

[34] Bemporad, A., Borrelli, F & ,.Morari, M. (2002). Model predictive control based on linear programming - the explicit solution. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *47*(12), 1974-1985. https://doi.org/10.1109/TAC.2002.805688

[35] Potočnik, P., & Grabec, I. (2002). Nonlinear model predictive control of a cutting process. *Neurocomputing*, *43*(1), 107-126. https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00623-3

[36] Al-Duwaish, H., & Naeem, W. (2001, Sept 7-7). *Nonlinear model predictive control of Hammerstein and Wiener models using genetic algorithms.* Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01) (Cat. No.01CH37204), Mexico City, Mexico https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/973909

[37] Fang, Z., & Kemeny, A. (2016). An efficient Model Predictive Control-based motion cueing algorithm for the driving simulator. *Simulation*, *92*(11), 1025-1033. https://doi.org/10.1177/0037549716667835

[38] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *14*(42), 33-55.

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 187-205
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.261332.1319
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.10.3

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Decentralized Control of Bidirectional Converters in a Grid-connected DC Microgrid to Increase System Stability Using a Genetic-Neural Algorithm

Seyed Mojtaba Abbasi[1], Mehdi Nafar[2*], Mohsen Simab[3]

[1]PhD Student, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
[2,3] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.26.2021
Revised: 07.16.2021
Accepted: 07.26.2021

Keyword:
DC micro-grid
Converter
Frequency
Voltage restoration
Stability
Genetic-neural

***Corresponding Author:**
Mehdi Nafar
Email: *mnafar@miau.ac.ir*

ABSTRACT

Using bidirectional parallel converters improves system reliability as they can bypass faults. Therefore, the bidirectional parallel converters structure is adopted for the DC microgrid connected to the grid. There is a circulating current between the bidirectional parallel converters that limits the overall capacity of the system and can damage switching devices. To solve this problem, in this paper, the mechanism of generating circulating current on the AC side when several bidirectional parallel converters work together was taken into consideration with the effect of constant power loads by the droop strategy P_{dc}-v_{dc}^2-f to share DC power and network frequency adaptation. The PI coefficients of the bidirectional parallel converters controller were optimized by online genetic algorithm and neural networks and updated with system conditions. Both the stable and dynamic relationships between P_{dc} and v_{dc}^2 are linear and did not create constant power loads of unstable poles for the system. The results indicated that compared with conventional i_{dc}-v_{dc} droop control, the proposed P_{dc}-v_{dc}^2-f strategy can increase dc power control and system stability, consequently increasing the dc voltage regulation dynamics.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۰۵-۱۸۷
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.261332.1319
20.1001.1.23829796.1400.18.3.10.3
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

کنترل غیرمتمرکز مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبکه DC متصل به شبکه به‌منظور افزایش پایداری سیستم به کمک الگوریتم ژنتیک-عصبی

سید مجتبی عباسی[۱]، مهدی نفر[۲*]، محسن سیماب[۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه ازاد اسلامی، مرودشت، ایران.
۲ و ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه ازاد اسلامی، مرودشت، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

کلید واژگان:
ریزشبکه DC
مبدل
فرکانس
بازیابی ولتاژ
پایداری
ژنتیک- عصبی

***نویسنده مسئول:** مهدی نفر
پست الکترونیکی:
mnafar@miau.ac.ir

چکیده

از آنجا که مبدل‌های قدرت دوطرفه قابلیت عبور از خطا را دارند، به‌کارگیری آنها باعث بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. بنابراین، ساختار مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی، برای ریزشبکه DC متصل به شبکه اتخاذ شده است. میان مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی، جریان گردشی وجود دارد که ظرفیت کلی سیستم را محدود می‌کند و می‌تواند به دستگاه‌های سوئیچینگ آسیب برساند. برای حل این مسئله، در این مقاله مکانیزم تولید جریان گردشی در سمت AC، هنگامی که چندین مبدل قدرت دوطرفه به‌صورت موازی با هم کار می‌کنند، با در نظر گرفتن تأثیر بارهای توان ثابت توسط استراتژی دروپ $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ مورد توجه قرار گرفت تا اشتراک‌گذاری توان DC و انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه انجام شود. ضرایب PI کنترلر مبدل‌های قدرت توسط الگوریتم ژنتیک آنلاین و شبکه عصبی بهینه شد و با شرایط سیستم به‌روزرسانی گردید. هر دو رابطه پایدار و دینامیکی بین Pdc و vdc^2 خطی هستند و بارهای توان ثابت قطب‌های ناپایدار را برای سیستم ایجاد نمی‌کنند. نتایج مقایسه شده با کنترل دروپ idc-vdc متداول نشان می‌دهد استراتژی پیشنهادی $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ می‌تواند کنترل توان dc و پایداری سیستم را افزایش دهد که باعث افزایش دینامیک تنظیم ولتاژ dc می‌شود.

مقدمه

افزایش پایداری سیستم در شبکه‌های الکتریکی به‌عنوان هدف بسیار مهمی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱]. پایدارسازی سیستم قدرت از طریق بهینه‌سازی نقاط هدف با رویکرد استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد [۲]. در این مقاله از ساختار مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی چندگانه برای یک ریزشبکه DC متصل به شبکه AC استفاده شده است. پشتیبانی ولتاژ و انتقال انرژی از ریزشبکه DC متصل به شبکه AC و بالعکس توسط مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی انجام می‌شود. در [۳] نقاط ضعف دروپ idc-vdc متداول به‌طور دقیق تجزیه‌وتحلیل می‌گردد و استراتژی کنترل توزیع‌شده برای غلبه بر این نقایص ارائه می‌شود. در [۴] یک روش کنترل توزیع برای تحقق بخشیدن به بازیابی ولتاژ و به اشتراک گذاشتن جریان دقیق DC با انتقال سه سیگنال پیشنهاد شده است: الف) سیگنال ولتاژ محلی ب) سیگنال ولتاژ تخمینی ج) سیگنال جریان محلی. در [۵] یک استراتژی کنترل ثانویه متمرکز پیشنهاد شده است تا جابه‌جایی ولتاژ DC با افزودن یک مقدار تغییر ولتاژ به کنترل‌کننده دروپ متداول انجام شود اما دقت اشتراک‌گذاری جریان را نمی‌توان تضمین کرد. در [۶] یک روش کنترل بهبودیافته توزیع ثانویه براساس سیستم ارتباطی پهنای باند پایین برای بازیابی ولتاژ DC و اطمینان از صحت توزیع جریان DC ارائه شده است. امروزه بارهای DC و منابع انرژی تجدیدپذیر به‌طور گسترده‌ای در شبکه استفاده می‌شود؛ لذا ریزشبکه‌های DC نیز اخیراً با توجه به مزایای خود از جمله بهره‌وری بالا و هزینه کم مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. علاوه بر این، روش‌های کنترل اصلاح شده یا روش‌های کنترل ثانویه به سیستم ارتباطی پهنای باند پایین، بستگی دارد؛ بنابراین هزینه‌های دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرمتمرکز افزایش می‌یابد [۸; ۹]. در حالت مقایسه ریزشبکه مستقل AC با ریزشبکه مستقل DC، ریزشبکه AC/DC ترکیبی می‌تواند تولیدکننده‌های AC و DC، بارهای AC و بارهای DC را بدون تبدیل‌های AC به DC یا DC به AC تحت پوشش قرار دهد. ریزشبکه AC/DC ترکیبی به‌طور معمول از زیرشبکه[1] AC، زیرشبکه DC و مبدل‌های قدرت دوطرفه تشکیل شده است که در آن زیرشبکه AC، شامل تولیدکننده‌ها و بارهای AC است، زیرشبکه DC هم شامل تولیدکننده‌ها و بارهای DC است [۱۰]. در [۱۱] یک روش کنترل یکپارچه برای اتصال به شبکه و ریزشبکه dc جزیره‌ای پیشنهاد شده است، روش کنترل پیشنهادی می‌تواند جریان DC دقیق را به اشتراک بگذارد و ولتاژ باس را بازیابی کند. در [۱۲] یک روش کنترل هماهنگ غیرمتمرکز برای مبدل قدرت دوطرفه سه فاز موازی در ریزشبکه AC/DC ترکیبی پیشنهاد شده است. برای کنترل مبدل قدرت دوطرفه سه فاز موازی، عمدتاً از سه کنترل‌کننده PI برای تغییرات ولتاژ و تنظیم افت شیب منحنی استفاده می‌شود. تمام این استراتژی‌های کنترل برای ریزشبکه dc عمدتاً بر حالت جزیره‌ای تمرکز دارد که حالت متصل به شبکه را در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این، روش‌های کنترل اصلاح‌شده یا روش‌های کنترل ثانویه به سیستم ارتباطی پهنای باند پایین بستگی دارد؛ بنابراین هزینه‌های دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با روش‌های کنترل غیرمتمرکز افزایش می‌یابد [۱۳].

ایده جدیدی که در این کار از آن استفاده شده این است که می‌توان به این نوع کنترل دروپ یعنی $Pdc\text{-}vdc^2$، انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه را اضافه کرد [۱۴] که باید کنترل دروپ $Pdc\text{-}vdc^2$ بازطراحی شود که نام این حالت پیشنهادی جدید را $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ می‌نامیم. در این حالت، ضرایب PI مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی با استراتژی دروپ $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک به‌صورت آنلاین بهینه و با شرایط سیستم به‌روزرسانی می‌شود اما با توجه این که الگوریتم باید محاسبات آنلاین را انجام دهد به‌روزرسانی ضرایب PI دارای تأخیر است که برای جلوگیری از این کار می‌توان الگوریتم ژنتیک را به‌صورت آنلاین در شبیه‌سازی مدل کرد و پس از تکرار مشخص مثلاً ۱۰۰ تکرار در هر تکرار ضرایب PI بهینه شده را در فایل excel ذخیره کرد و سپس در فاز بعد برای آموزش

[1] Subgrid

شبکه عصبی استفاده کرد. در این صورت در محاسبه الگوریتم ژنتیک، سرعت افزایش می‌یابد. چون شبکه عصبی براساس نرون‌ها در مغز مدل شده، پاسخ لحظه‌ای و بهینه‌ای برای PI به‌صورت آنلاین ارائه می‌دهد. در بخش ۲ مدل‌سازی سیستم پیشنهادی بررسی می‌شود، شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری به‌ترتیب در بخش ۳ و ۴ آورده شده است.

مدل‌سازی سیستم

ریزشبکه DC تحت مطالعه شامل منابع تولید پراکنده‌ای مانند فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی و غیره است. روش‌های کنترل منابع تولید پراکنده در مقالات دیگر مطالعه شده است و نقطه تمرکز این پژوهش نمی‌باشد. ذخیره‌سازها در حالت شارژ یا دشارژ با توان ثابت کار می‌کنند و دیگر تولیدکننده‌ها در حالت ردیابی نقطه توان ماکزیمم (MPPT[1]) عمل می‌کنند [۱۵]. روش کنترل پیشنهادی برای مبدل‌های قدرت دوطرفه نقطه تمرکز این مقاله است. هنگامی که وضعیت سوئیچینگ مبدل‌های قدرت دوطرفه متفاوت است، افت ولتاژ در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه وجود دارد و جریان گردشی در طول مسیر تولید می‌شود. یک راهبرد کنترل دروپ dc بهبودیافته مبتنی بر $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ پیشنهاد شده است که می‌تواند عملکرد و پایداری سیستم را با وجود بارهای توان ثابت ارتقا دهد. کنترل غیرمتمرکز برای هماهنگی مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبکه DC متصل به شبکه با رویکرد انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه و افزایش پایداری سیستم با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک- عصبی انجام شده است. مبدل‌های قدرت می‌توانند ولتاژ ریزشبکه dc را به‌صورت هماهنگ فراهم کنند که کنترل فرکانس شبکه براساس اصلاح شده [۱۶] با کنترل مبدل‌های قدرت دوطرفه ترکیب شده است. برای به‌دست آوردن بهترین عملکرد کنترل‌کننده PI و تعیین ضرایب مربوطه، در عمل روش‌های مختلفی وجود دارد که در این مقاله ما از بهینه‌سازی ژنتیک- عصبی برای بهینه‌سازی ضرایب PI کنترلر استفاده کرده‌ایم. الگوریتم ژنتیک- عصبی روشی برای بهینه‌سازی است که با الهام از اصل بقای شایسته‌ترین در موجودات زنده عمل می‌کند. الگوریتم‌های ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی است که ایده آن برگرفته از طبیعت می‌باشد [۱۷]. در [۱۸] کنترل‌کننده‌های GA-PID با MATLAB شبیه‌سازی شدند و روش بهینه‌سازی GA برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده PID مربوطه استفاده شد. عملکرد GA-PID در یک مبدل باک DC-DC با شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل براساس معیارهای ISE، IAE، IATE و MSE بررسی شد. با موازی کردن اینورترهای متعدد، ولتاژ و فرکانس هر اینورتر به‌منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو تنظیم می‌شود [۱۹]. در این مقاله، برای کدنویسی از شبکه هوشمند عصبی و جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک موجود در نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی[2] (ANN) سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی نوین برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش به‌دست‌آمده در راستای بیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. منطق ریاضی روش الگوریتم ژنتیک سعی بر این دارد که با مینیمم کردن یک تابع ارزشیابی یا تابع هدف[3]، خروجی سیستم کنترلی را بهینه کند. این تابع ارزشمند را می‌توانیم براساس بهبود ضرایب PI به‌صورت زیر تعریف کنیم:

$$CostF = \alpha.OS + (1-\alpha).ST \qquad (۱)$$

که در آن OS میزان حداکثر جهش و ST یا زمان استقرار می‌باشد. اگر فرض کنیم $\alpha = 0.5$ رابطه فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

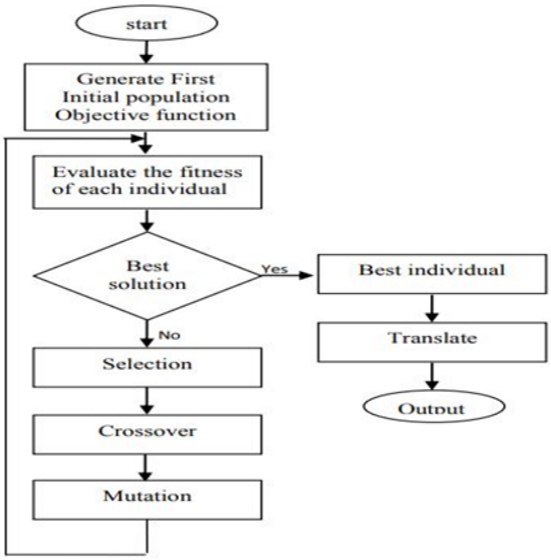
[1] Maximum power point tracking
[2] Artificial Neural Networks
[3] Cost Function

$$CostF = 0.5 \times OS + 0.5 \times ST \quad (۲)$$

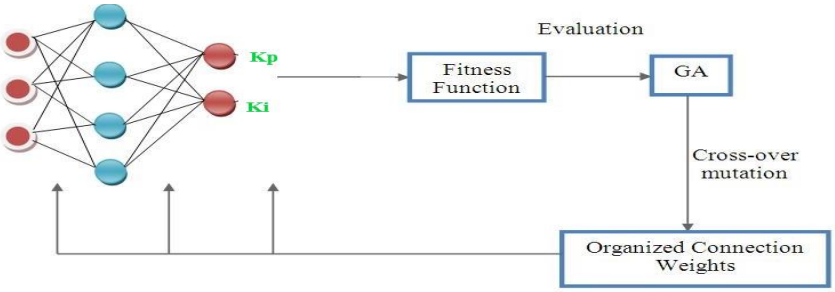
ضرایب PI مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی با استراتژی دروپ Pdc-vdc^2-f پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک به‌صورت آنلاین بهینه و با شرایط سیستم به‌روزرسانی می‌شود. روش کنترل کامل، روش ترکیبی شامل روش کنترل حلقه داخلی و روش کنترل حلقه خارجی است که در شکل ۸ نشان داده شده اشت. در راستای مقاوم‌سازی این استراتژی، ضرایب کنترل‌کننده‌های PI از یک شبکه عصبی استخراج می‌شود که دقت و مقاومت قابل قبول و بهینه این شبکه عصبی در وابستگی بسیار شدید نسبت به ضرایب وزنی شبکه عصبی مذکور می‌باشد. لذا به‌منظور تعیین ضرایب وزنی بهینه در شبکه عصبی مصنوعی موردنظر در استراتژی کنترلی پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با هدف دستیابی به بالاترین دقت یا کمترین خطا برای هریک از کنترل‌کننده‌های PI استفاده می‌شود. پس از به‌دست‌آمدن ضرایب وزنی بهینه از طریق الگوریتم ژنتیک، این ضرایب به شبکه عصبی داده می‌شود و ضرایب PI از شبکه عصبی استخراج می‌شود. به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی ضرایب K در کنترل‌کننده PID الگوریتم GA اجرا می‌شود.

در رویه مقداردهی اولیه الگوریتم GA، از یک فرایند تصادفی برای تولید کروموزوم استفاده شده است، سپس جهش توسط عملیات‌های محاسباتی برای به‌دست‌آوردن جهش‌یافته‌های جمعیت بردار متغیر تصمیم‌گیری انجام می‌شود. سپس جهش‌یافته‌ها در فرایند Crossover برای تولید بردارهای آزمایش براساس مقادیر تعریف شده توسط کاربر از احتمالات Crossover مورد استفاده قرار می‌گیرد. گزینه‌های نسل بعدی با مقایسه عملکرد محاسبه شده با استفاده از بردارهای آزمایش و بردارهای هدف در نسل کنونی انتخاب می‌شود. این فرایندها تا زمانی تکرار می‌شوند که بهینه‌سازی همگرا شود یا به حداکثر تعداد تکرار برسیم به‌منظور اجرای کنترل‌کننده هوشمند پیشنهادی، مطابق با فلوچارت شکل ۱ عمل می‌شود.

فلوچارت الگوریتم ژنتیک به‌منظور تعیین ضرایب وزنی بهینه شبکه عصبی مصنوعی مورداستفاده در استراتژی پیشنهادی به‌صورت شکل ۱ خواهد بود. در الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده، شبکه عصبی وظیفه تعیین ضرایب بهینه کنترل‌کننده‌های PI موجود در استراتژی کنترلی پیشنهادی را بر عهده دارد و الگوریتم ژنتیک وظیفه تعیین ساختار بهینه برای شبکه عصبی را دارد.



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم هوشمند ژنتیک

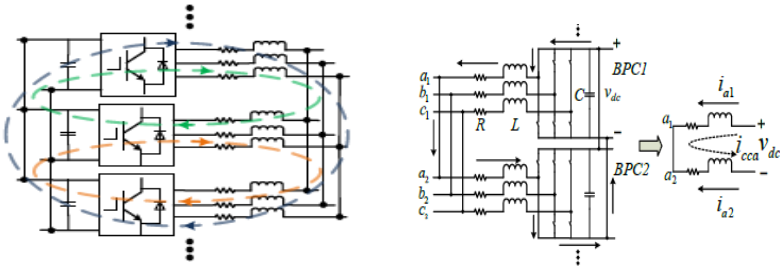


شکل ۲. فلوچارت الگوریتم ترکیبی هوشمند ژنتیک- عصبی به‌منظور تعیین و تنظیم اتوماتیک ضرایب کنترل‌کننده PI در استراتژی کنترلی پیشنهادی

به‌عبارت بهتر باید الگوریتم ژنتیک، ضرایب وزنی بهینه برای شبکه عصبی را تعیین کند. شبکه عصبی مذکور در لایه ورودی دارای دو نرون است که عبارتند از: خطای ردیابی و مشتق خطای ردیابی کنترل‌کننده‌های PI، و در لایه خروجی، دو نرون دارد که عبارتند از: ضرایب K_P و K_I. همچنین معماری شبکه عصبی پیشنهادی دارای یک لایه مخفی می‌باشد که تعداد نرون‌های لایه مخفی نیز آخرین متغیر تصمیم در ساختار بهینه‌سازی مورد بحث می‌باشد. روش کنترل پیشنهادی برای مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی که نقطه تمرکز اصلی این مقاله است، شامل دو بخش است: حلقه داخلی و حلقه بیرونی. حلقه داخلی به‌طور عمده برای سرکوب جریان گردشی و کنترل ولتاژ DC مبدل‌های قدرت است؛ در حالی که حلقه بیرونی، اغلب برای تحقق بخشیدن به مدیریت توان DC و برای اطمینان از کیفیت توان DC است.

روش کنترل حلقه داخلی

شکل (۳ الف) توپولوژی معمول مبدل‌های قدرت دوطرفه را نشان می‌دهد. ولتاژ ac خروجی (va، vb، vc) v،جریان خروجی ac (ia، ib، ic)i توسط یک فیلتر القایی فیلتر شده‌اند که اندوکتانس L است و مقاومت پارازیتی R است، سپس مبدل‌های قدرت دوطرفه به این منابع متصل می‌شوند. ولتاژهای AC منابع (vua، vub، vuc) vu است. خروجی ولتاژ Vdc توسط یک فیلتر خازنی که ظرفیت آن C است فیلتر می‌شود. مسیرهای جریان گردشی در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه در شکل (۳ب) نشان داده شده است. هنگامی که وضعیت سوئیچینگ مبدل‌های قدرت دوطرفه متفاوت است؛ افت ولتاژ در میان مبدل‌های قدرت دوطرفه به‌وجود می‌آید که باعث ایجاد جریان گردشی در طول مسیر می‌شود که در شکل (۳ب) توسط فلش نشان داده شده است.



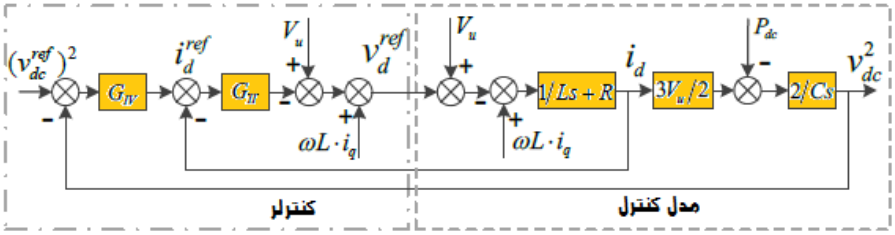
(ب) (الف)

شکل ۳. تجزیه‌وتحلیل جریان گردشی. (الف) مسیرهای جریان گردشی. (ب) مدار معادل یک جفت مبدل قدرت دوطرفه [۱۴].

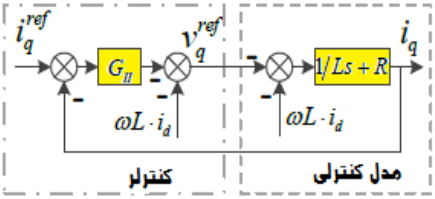
براساس تجزیه‌وتحلیل فوق، یک محور اضافی صفر معرفی می‌شود که عمدتاً شامل اجزای نامتقارن است. جایی که θ زاویه چرخشی است و برای سرکوب جریان گردشی، مقاومت مجازی Rcc بر روی محور 0 که به‌طور عمده شامل اجزای نامتقارن است طراحی شده است. با نادیده گرفتن تلفات مسیرسوئیچینگ، مدل سه محور dq-0 می‌تواند به‌صورت زیر ایجاد شود:

$$\begin{cases} L\dfrac{di_d}{d_t} = -R.i_d + \omega L.i_q + (V_u - v_d) \\ L\dfrac{di_q}{d_t} = -R.i_q - \omega L.i_d - v_q \\ L\dfrac{di_o}{d_t} = -R.i_o - v_o \\ \dfrac{1}{2}C\dfrac{dv_{dc}^2}{d_t} = \dfrac{3}{2}V_u.i_d - P_{dc} \end{cases} \quad (۳)$$

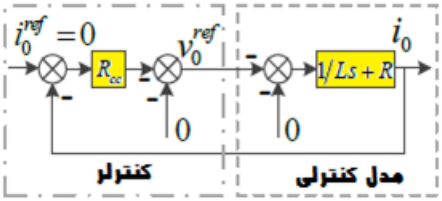
جایی که Vu دامنه ولتاژ منابع، ω فرکانس زاویه‌ای منابع و Pdc توان خروجی مبدل‌های قدرت دوطرفه موازی در سمت dc است. از (۳) می‌توان دید که رابطه vdc^2 و id بدون در نظر گرفتن Pdc خطی است. تمامی معادلات حاکم بر این ساختار در [۱۴] نشان داده شده است. همچنین در کنترل توان اکتیو، جریان id و کنترل توان راکتیو، جریان iq می‌تواند به‌طور کامل جدا می‌شود که می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود بخشد. تمام استراتژی کنترل برای حلقه داخلی در شکل (۴) نشان داده شده است.



الف

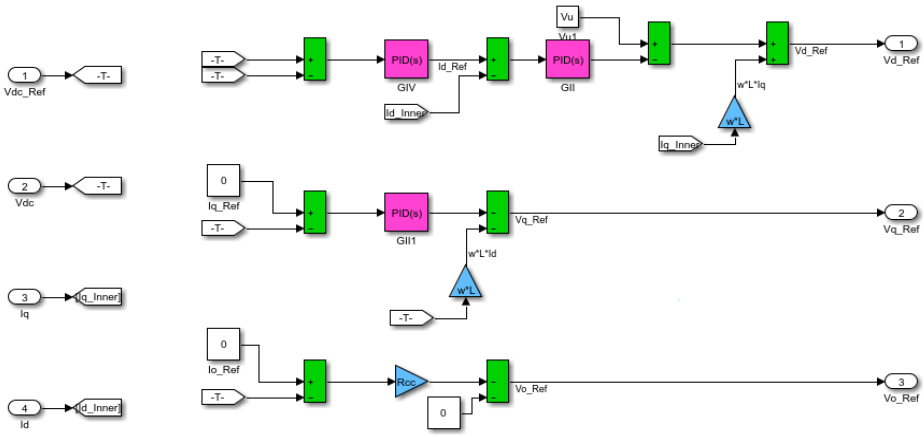


ب



ج

شکل ۴. کنترل حلقه درونی پیشنهادی الف) محور d، ب) محور q، ج) محور صفر



شکل ۵. شبیه‌سازی استراتژی پیشنهادی در حلقه داخلی

در محور d، دو حلقه کنترل مربوط به ولتاژ و جریان وجود دارد. حلقه جریان باید سریع‌تر از حلقه ولتاژ باشد. حلقه ولتاژ عمدتاً به‌منظور ایجاد ولتاژ خروجی vdc جهت کنترل vdc^2 با استفاده از دقت ارزیابی vdc_{ref} می‌باشد. کنترل‌کننده ولتاژ $GIV(s) = KIVP + KIVI / S$ یک کنترل‌کننده PI است که می‌تواند خطاهای استاتیکی را حذف کند. حلقه جریان طراحی شده است تا توان اکتیو جریان id را برای ردیابی جریان مشخص شده id_{ref}

به‌دقت به‌وسیله حلقه ولتاژ و برای تفکیک id و iq از طریق جبران‌سازی متناظر بسازد. کنترل‌کننده جریان $GII(s) = KIIP + KIII/s$ نیز یک کنترلر PI است. به‌طور مشابه، کنترل‌کننده جریان در محور q عمدتاً به‌منظور ایجاد جریان توان راکتیو به‌منظور ردیابی جریان iq_{ref} است. به‌منظور سرکوب جریان گردشی، یک کنترل کننده مقاومت مجازی RCC در محور 0 برای کاهش اجزای نامتقارن در نظر گرفته می‌شود که بسیار ساده و آسان است.

روش کنترل حلقه خارجی

حلقه بیرونی عمدتاً برای تحقق بخشیدن به مدیریت برق dc و برای اطمینان از کیفیت ولتاژ dc و سپس برای تولید ولتاژ مرجع برای حلقه داخلی است. هنگامی که دروپ idc-vdc متداول به سیستم حاوی بارهای توان ثابت اعمال می‌شود، چندین نقص وجود دارد. بنابراین، یک راهبرد کنترل دروپ dc بهبودیافته مبتنی بر $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ پیشنهاد شده است که می‌تواند عملکرد و پایداری سیستم را وقتی بارهای توان ثابت وجود دارد ارتقا دهد.

قانون کنترل می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$v_{dc,k}^{ref\,2} = v_{dc}^{*\,2} - r_k(P_{dc,k} - P_{dc,k}^*) \tag{۴}$$

به‌طوری که k نشان‌دهنده Kامین مبدل قدرت دوطرفه است. r_k، $P_{dc,k}$، $P_{dc,k}^*$ و $v_{dc,k}^{ref}$، به‌ترتیب ضرایب دروپ، توان خروجی dc و مقدار مرجع ولتاژ خروجی DC برای حلقه داخلی (نشان داده در شکل ۲) از kامین BPC است. V_{dc}^* ولتاژ باس DC است.

یعنی $v_{dc,k} = v_{dc,k}^{ref}$ سپس می‌توان نتیجه گرفت که:

$$P_{dc,k} = v_{dc,k}.i_{dc,k} = \frac{(V_{dc}^{*\,2} + r_k P_{dc,k}^*) - r_k P_{dc,k} - v_{dc,k} v_b}{R_{line,k}} \tag{۵}$$

$$P_{dc,k} = \frac{(V_{dc}^{*\,2} + r_k P_{dc,k}^*) - v_{dc,k} v_b}{R_{line,k} + r_k} \tag{۶}$$

جایی که Vb ولتاژ باس DC و $Rline,k$ مقاومت خط بین kامین مبدل قدرت دوطرفه و باس DC است. اگر $rk >> Rline,k$ و $M = \left(v_{dc}{}^{*2} + r_k P^*{}_{dc,k}\right)$ قرار دهیم، رابطه (۴) را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{r_k}{v_b} P_{dc,k} - \frac{M}{v_b} = -v_{dc,k} \tag{۷}$$

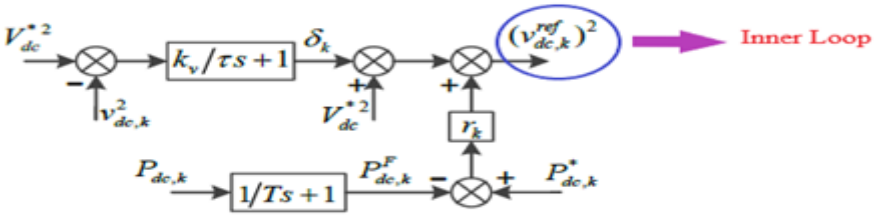
ترکیب معادله (۴) به‌صورت زیر می‌تواند به‌دست آید:

$$(\frac{r_k}{v_b})^2 P_{dc,k}^2 - (2\frac{M_{rk}}{v_b^2} - r_k)P_{dc,k} + (\frac{M}{v_b})^2 - M = 0 \tag{۸}$$

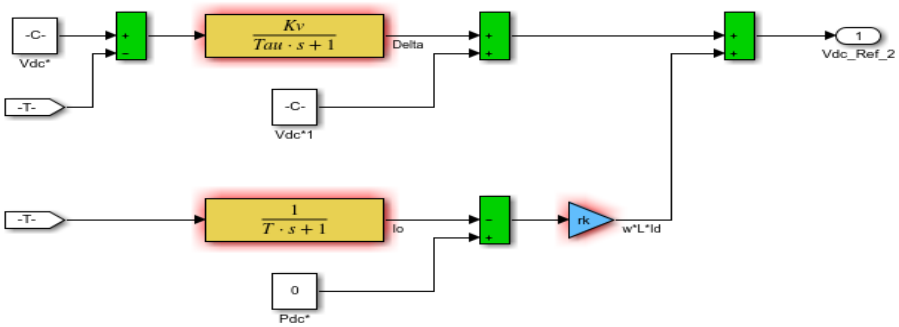
از (۸)، $P_{dc,k}$ می‌تواند به‌صورت زیر حل شود:

$$P_{dc,k} = \frac{M - v_b^2}{r_k} \qquad (۹)$$

از (۹) می‌توان نتیجه گرفت که اگر $r_k >> Rline,k$ باشد توان خروجی $P_{dc,k}$ به‌طور معکوس متناسب با ضریب دروپ rk می‌باشد. اما اگر rk بیش از حد بزرگ باشد، سیستم ناپایدار خواهد بود. از سوی دیگر، از (۴) می‌توان دید که ولتاژ DC جهت افزایش توان خروجی DC کاهش می‌یابد. بنابراین، کیفیت ولتاژ باس dc نمی‌تواند تضمین شود. با توجه به این مشکل، استراتژی بازیابی ولتاژ غیرمتمرکز پیشنهاد شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، مربع ولتاژ DC خروجی از Kامین مبدل قدرت دوطرفه $V_{dc,k}^{\ 2}$ ، برای مقایسه با مقدار V_{dc}^{*2} تغذیه می‌شود، سپس خطا توسط یک عنصر اینرسی جبران می‌شود که می‌تواند باعث کاهش امپدانس سیستم شود و سیستم را پایدارتر کند.



شکل ۶. روش کنترل حلقه بیرونی برای K امین مبدل قدرت دوطرفه



شکل ۷. شبیه‌سازی استراتژی پیشنهادی در حلقه بیرونی

استراتژی بازیابی به کنترل‌کنندگان محلی مبدل‌های قدرت دوطرفه اعمال می‌شود؛ بنابراین به دلیل محلی بودن، نرخ بازیابی می‌تواند بهبود یابد. روش کنترل حلقه بیرونی در شکل (۶) نشان داده شده است. یک فیلتر پایین‌گذر، توان dc را قبل از اینکه به کنترل‌کننده دروپ dc ارسال شود، فیلتر می‌کند. تمام سیگنال‌ها بازخورد پارامترهای الکتریکی محلی است و برای کنترل مبدل قدرت دوطرفه نیازی به سیگنال‌های دیگر مبدل‌های قدرت نیست.

این موضوع علاوه بر سرعت در انجام بازیابی ولتاژ، هزینه‌های مربوط به اعمال سیگنال مخابراتی از سایر مبدل‌ها را نیز کاهش می‌دهد؛ از این رو کنترل کلی حلقه بیرونی، غیرمتمرکز و غیرحساس به تغییر توپولوژی سیستم ریزشبکه

است که می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را بهبود دهد. می‌توان با کنترل فرکانس شبکه که اصلاح شده [۱۴] است استراتژی فرکانس نیز به آن اضافه کرد. هنگامی که دینامیک ریزشبکه به تعادل نزدیک می‌شود، فرکانس خروجی هر تولیدکننده برابر با مقدار اندازه‌گیری آن است:

$$\Delta f_i = f_i - 50 = \frac{1}{1+\alpha}[f_{\max} - 50 - \beta(f_{\max} - f_{\min})\lambda_i(P_i)]. \quad (۱۰)$$

$$d_i = \frac{f_{max} - f_{min}}{S_i}, \quad (۱۱)$$

$$f_i = f_{pri}(P_i) + f_{\sec}(\alpha, f_{i,meas}) + f_{ter}(\beta, P_i, \lambda_i(P_i))$$

به‌طوری که

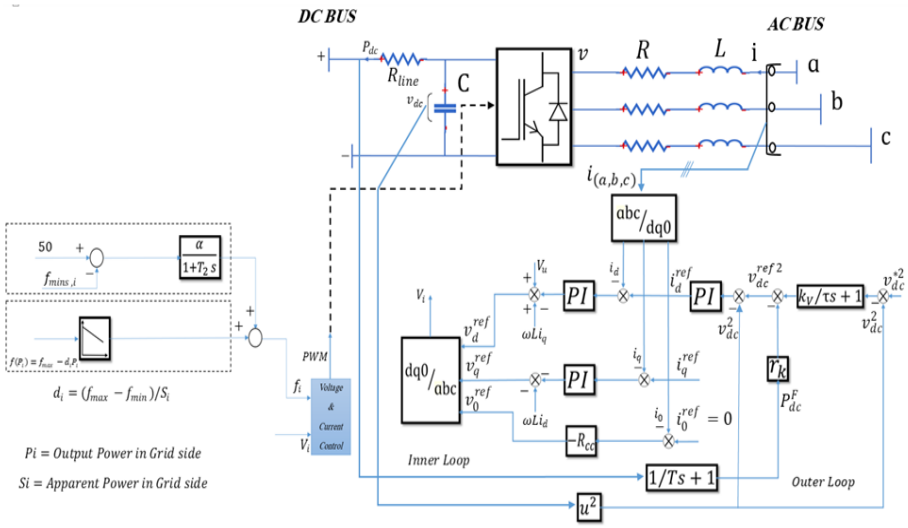
$$f_{pri} = f_{max} - d_i P_i,$$

$$f_{sec} = \frac{\alpha\left(50 - f_{meas,i}\right)}{1+T_2 s},$$

$$f_{ter} = (f_{max} - d_i S_i \beta \lambda_i(P_i) - f_{pri})/(1+T_3 s)$$

fmax و fmin محدودیت‌های فرکانس ریزشبکه، Si ظرفیت توان ظاهری، α و β به‌ترتیب ضریب کنترل ثالثیه توزیع شده و کنترل ثانویه توزیع شده برای همه تولیدکننده‌ها، fi و fi,meas بترتیب فرکانس خروجی و مقدار اندازه‌گیری شده و T_2 و T_3 ثابت‌های زمانی فیلترهای پایین‌گذر هستند، همچنین تابع(Pi) λi برای هزینه کلی است. روش کنترل کامل، روش ترکیبی شامل روش کنترل حلقه داخلی و روش کنترل حلقه بیرونی، در شکل (۸) نشان داده شده است که می‌تواند اجرای دقیق روش پیشنهادی را نشان دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود سیستم کنترلی پیشنهادی به‌منظور کنترل مبدل DC/AC دوطرفه موجود در ریزشبکه موردمطالعه دارای دو حلقه بیرونی و داخلی می‌باشد.

استراتژی کنترلی پیشنهادی در حلقه داخلی به‌منظور مهار و حذف شارش جریان‌های گردشی و کنترل ولتاژ لینک DC در نظر گرفته شده است و استراتژی کنترلی پیشنهادی در حلقه بیرونی به‌منظور کنترل و مدیریت توان DC تحویلی ریزشبکه و بهبود شاخص‌های کیفیت توان DC تعبیه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ساختار کنترلی پیشنهادی، کنترل‌کننده‌کلاسیک PI وجود دارد که مهم‌ترین مسئله در به‌کارگیری استراتژی پیشنهادی تعیین ضرایب مناسب و کارآمد برای کنترل‌کننده‌های مذکور می‌باشد؛ زیرا یکی از مهم‌ترین معضلات در به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های کلاسیک حساس بودن ضرایب کنترل‌کننده‌ها به شرایط و پارامترهای سیستم می‌باشد.

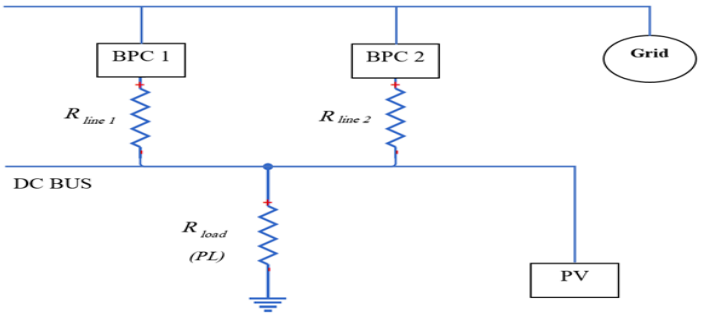


شکل ۸. روش کنترل پیشنهادی Pdc-vdc²-f برای Kامین مبدل قدرت [۱۴]

از این رو تضمین دستیابی به اهداف کنترلی تعیین‌شده برای حلقه داخلی و بیرونی در استراتژی کنترلی پیشنهاد شده تنها در گرو تعیین ضرایب بهینه برای کنترل‌کننده‌های کلاسیک موجود در ساختار فوق‌الذکر می‌باشد. برای این منظور و در راستای دستیابی به اهداف ذکر شده این ضرایب بهینه به‌واسطه بهره‌مندی از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-عصبی تعیین خواهد شد. برای این منظور در ابتدا یک مدل ریاضی برای ساختار نشان داده شده در شکل (۸) استخراج شده و سپس ضرایب بهینه و کارآمد کنترل‌کننده‌های کلاسیک موجود در مدل ریاضی استخراج شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی ژنتیک- عصبی تعیین می‌گردد. در نهایت پس از تعیین ضرایب بهینه، کل ریزشبکه با معماری پیشنهاد شده در شکل (۸) اجرا و با اعمال ضرایب بهینه به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی انجام شده، نتایج نهایی استخراج و ارائه می‌گردد.

شبیه‌سازی سیستم

سیستم موردمطالعه شامل بار dc و یک DG از نوع (PV) در ریزشبکه dc است. ریزشبکه dc به‌وسیله دو BPC به شبکه متصل شده است.



شکل ۹. سیستم مورد مطالعه ریزشبکه DC متصل به شبکه

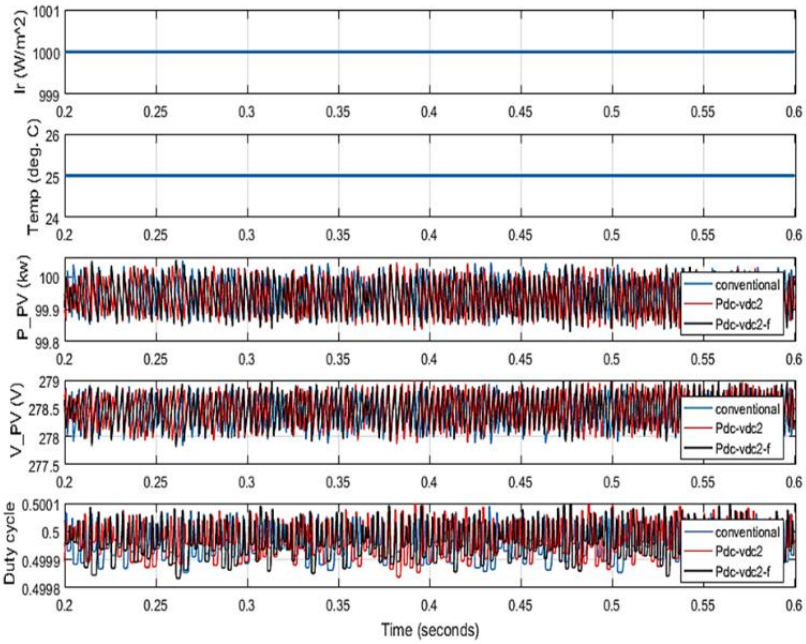
منبع ac دارای ولتاژ 380 ولت موثر و فرکانس 50 هرتز است، ولتاژ باس DC نیز برابر 500 ولت است. مقاومت خط بین BPCها و باس DC برابر $R\_line_1 = 2\ m\Omega$، $R\_line_2 = 4\ m\Omega$، است. مقاومت نامی PL $R\_load = 3.6\ \Omega$ است و یک تغییر گام بار با مقاومت موازی 6 اهم وجود دارد.

جدول ۱. پارامترهای سیستم موردمطالعه ریزشبکه DC

پارامتر	R_e	L_e	C_e	R_{line}	R	T
توصیف	مقاومت القایی	مقاومت پارازیتی	ظرفیت خازن سمت DC	مقاومت خط بین باس AC و DC	مقاومت بار DC	زمان تناوب
مقدار	$\frac{10^{-3}}{3}$	$\frac{1.5 \times 10^{-3}}{3}$	$\frac{5 \times 10^{-3}}{3}$	$\frac{12 \times 10^{-3}}{11}$	$\frac{0.7}{3}$	10^{-2}
پارامتر	K_{PIV}	K_{IIV}	K_{PII}	K_{III}	K_v	τ
توصیف	پارامترهای کنترل‌کننده در حلقه داخلی (توان اکتیو)	پارامترهای کنترل‌کننده در حلقه داخلی (توان اکتیو)	پارامترهای کنترل‌کننده در حلقه داخلی (توان راکتیو)	پارامترهای کنترل‌کننده در حلقه داخلی (توان راکتیو)	پارامتر کنترل‌کننده در حلقه بیرونی	ثابت زمانی
مقدار	2×10^{-4}	2×10^{-2}	1	150	1.5	2×10^{-2}

PV در ریزشبکه در حالت MPPT عمل می‌کند و توان خروجی آن در تابش 1000 وات بر مترمربع 100 کیلووات است. فیلترهای القایی در سمت ac و فیلترهای خازنی در سمت DC در دو BPC مشابه هستند، در حالی‌که مقاومت القایی و مقاومت پارازیتی به‌ترتیب 1.5 میلی‌هانری و 1 میلی‌هانری است و خازن‌های سمت DC برابر 5 میلی فاراد است. زمان شبیه‌سازی برابر با 0.6 ثانیه و میزان تابش خورشیدی 1000 وات بر مترمربع و میزان حرارت 25 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است، در این حالت بار اهمی برابر با 3.6 اهم در سمت DC در نظر گرفته شده است. پارامترهای دیگر به شرح جدول (۱) است.

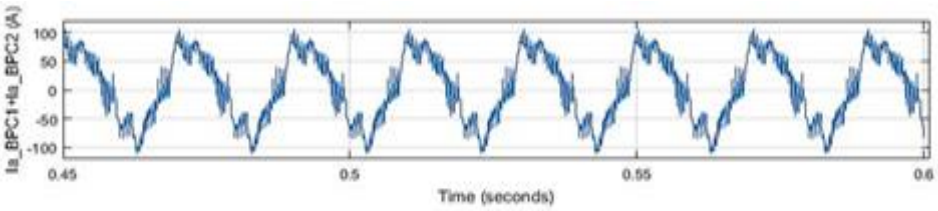
نتایج برای سه سیستم کنترلی متداول، $Pdc\text{-}vdc^2$ و Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI ارائه شده است.



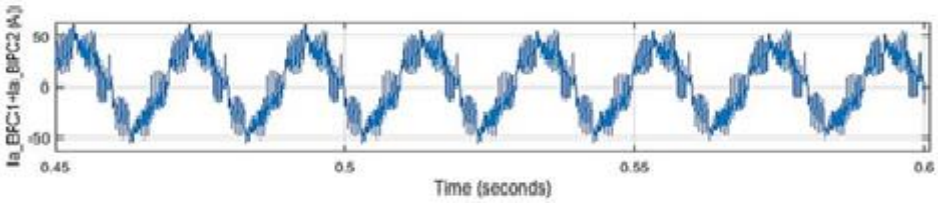
شکل ۱۰. از بالا به پایین میزان تابش، درجه حرارت، توان سیستم فتوولتائیک، ولتاژ سیستم فتوولتائیک و چرخه وظیفه

در شکل (۱۰) میزان تابش، درجه حرارت، توان سیستم فتوولتائیک، ولتاژ سیستم فتوولتائیک و سیکل وظیفه نشان داده شده است. نمودارهای فوق به‌عنوان ورودی‌های سیستم موردمطالعه هستند که طبق سناریو از 0.2 تا 0.6 ثانیه ارزیابی شده است.

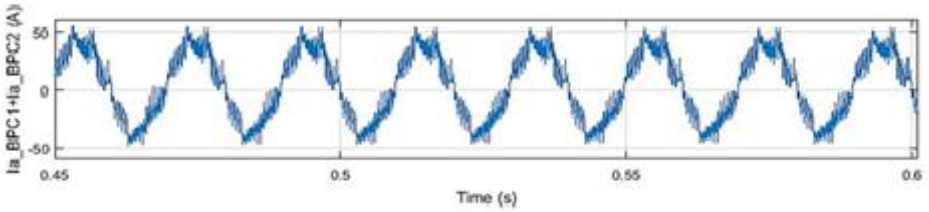
با توجه به اینکه در تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و در حالت MPPT، سیستم در حال کار است، توان خروجی سیستم فتوولتائیک حداکثر مقدار خروجی را براساس شکل ۱۰ ارائه می‌دهد و همچنین ولتاژ مؤثر خروجی هر فاز نیز در حالت MPPT می‌باشد. در شکل (۱۱) جریان AC در فاز a برای مجموع دو BPC را نشان می‌دهد.



الف



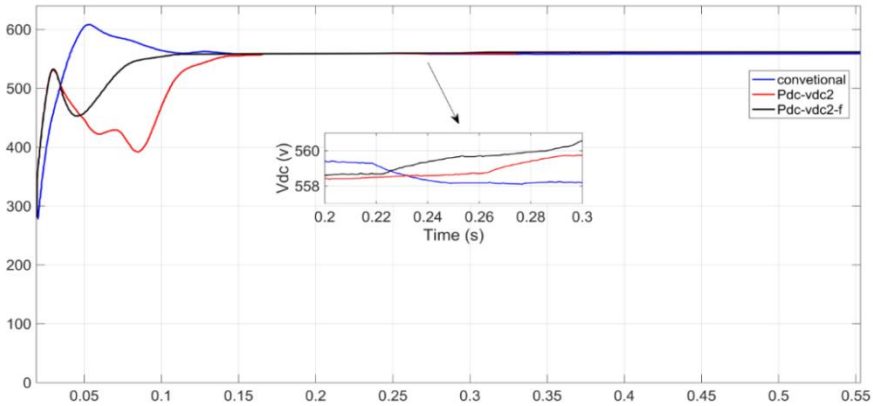
ب



ج

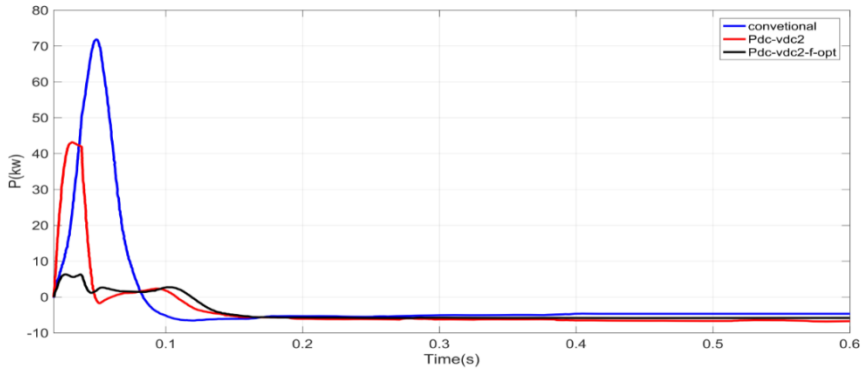
شکل ۱۱. جریان‌های AC در فاز a از BPCها الف) با استفاده از کنترل حالت متداول ب) استفاده از کنترل Pdc-vdc2 ج) استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

شکل (۱۱- الف) مجموع تغییرات جریان الکتریکی دو BPC با استفاده از کنترل حالت متداول، (۱۱- ب) با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 و (۱۱- ج) با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI نشان داده شده است. جریان AC دو BPC نوسان دارند و اجزای نامتقارن زیادی وجود دارد. این بدان معنی است که اگر تنها از کنترل d-q axesاستفاده شود؛ جریان گردشی در میان BPC ها وجود دارد (حالت متداول). از نتایج می‌توان دید که جریان ACاز دو BPC با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 و با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI هر دو صاف و نرمال است. بنابراین، جریان گردشی را می‌توان با کنترل پیشنهادی بیشتر کاهش داد و اثرات سرکوب جریان گردشی به‌صورت واضح مشخص است. کاهش جریان گردشی با لحاظ کردن مدل دقیقی از پارامترهای مهم سمت شبکه و ریزشبکه و لحاظ کردن Igrid0 حاصل شده است. در تحقیقات پیشین، محور صفر از دروپ‌های پیشنهادی لحاظ نمی‌شده ولی در این کار این مدل‌سازی دقیق انجام شده است. شکل (۱۲) مقایسه ولتاژ DC را در حالت‌های مختلف کنترل نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. ولتاژ DC با استفاده از کنترل حالت متداول، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

مطابق شکل (۱۲) زمان نشست منحنی در دروپ متداول 0138. ثانیه و در دروپ Pdc-vdc2 0.15 ثانیه و در دروپ پیشنهادی این مقاله 0.11 ثانیه می‌باشد که بهبود 26 درصدی و 37 درصدی را نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد. با کنترل‌کننده متداول، ولتاژ DC از پیک بیشتری برخوردار است و overshoot آن تا 610 ولت می‌باشد که ممکن است باعث آسیب زدن به مبدل‌ها و سوییچ‌ها شود. این افزایش ولتاژ حدود 10 درصد بیشتر از دروپ پیشنهادی می‌باشد. Undershoot مربوط به روش پیشنهادی نسبت به دروپ Pdc-vdc2 حدود 13 درصد دامنه کمتری دارد. پس از زمان نشست منحنی نیز، ولتاژ در دو روش دیگر دارای نوساناتی در محدوده 557 تا 560 ولت می‌باشند ولی استفاده از روش پیشنهادی این مقاله باعث پایدار ماندن ولتاژ روی 560 ولت می‌شود و به شکل مناسب‌تر و بهتری ولتاژ لینک DC را دنبال کند. همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است توان سمت شبکه AC با استفاده از کنترل حالت متداول، از دامنه نوسان بیشتری برخوردار است درحالی که با استفاده از کنترل Pdc-vdc2 دامنه نوسان، کمتر می‌شود و با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f و هم‌زمان بهینه‌سازی ضرایب PI، نوسانات بهبودی بیشتری دارند.



شکل ۱۳. توان سمت شبکه AC با استفاده از کنترل حالت متداول، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2، با استفاده از کنترل Pdc-vdc2-f با بهینه‌سازی ضرایب PI

توان مصرفی حالت سویچینگ با استفاده از روش پیشنهادی Pdc-vdc2-f نسبت به حالت متداول حدود 12 برابر توان کمتری مصرف می‌کنند. همچنین روش پیشنهادی نسبت به روش Pdc-vdc2 حدود 7 برابر توان کمتری را مصرف می‌کند. همچنین بهینه‌سازی ضرایب PI با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی باعث بهبود دقت و سرعت تعیین ضرایب شده است، این برتری مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل دیگر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای سه روش

	دروپ idc-vdc	دروپ $Pdc\text{-}vdc^2$	دروپ $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$
Tr (sec)	0.025	0.015	0.015
Ts (sec)	0.138	0.15	0.11
Mp (%)	9.85%	0	0
توان مصرفی هنگام سویچینگ	72 kw	43 kw	6 kw

طبق اطلاعات مندرج در جدول (۲) زمان صعود یا (Rise Time) در دروپ پیشنهادی 0.015 ثانیه می‌باشد که نسبت به حالت متداول 66 درصد بهبود یافته است. همچنین زمان نشست با استفاده از حالت پیشنهادی 0.11 ثانیه است که نسبت به حالت متداول، بهبودی 25 درصد را نشان می‌دهد. در پارامتر فراجهش[1] نیز بهبودی 9.85 درصد به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل غیرمتمرکز برای هماهنگی مبدل‌های دوطرفه در یک ریزشبکه DC متصل به شبکه با رویکرد انطباق‌پذیری با فرکانس شبکه و افزایش پایداری سیستم با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک- عصبی ارائه شد. ابتدا استراتژی کنترل سه محوری d-q-0 به‌جای راهبرد کنترل دو محور متعارف d-q طراحی و استفاده شد تا سرکوب جریان گردشی در سمت AC تولید شده توسط BPCهای موازی چندگانه انجام شود؛ به‌طوری که در شکل‌های تا مشاهده می‌شود اعوجاج و نوسانات ناشی از جریان گردشی در مبدل‌ها تا حدود بسیار زیادی از بین رفته و هدف سرکوب جریان گردشی میان مبدل‌ها محقق شده است. در عین حال از مربع ولتاژ (vdc^2) به‌جای ولتاژ dc خودکنترل استفاده شد که توانست کنترل ولتاژ را بهبود بخشد و عملکرد تنظیم ولتاژ dc را افزایش دهد؛ به‌طوری که زمان نشست منحنی ولتاژ، نسبت به دروپ متداول را تا 37 درصد و نسبت به دروپ Pdc-vdc2 را 26 درصد بهبود ببخشد. دوم، با در نظر گرفتن توان بار ثابت، استراتژی مدیریت توان غیرمتمرکز با استفاده از دروپ بهینه شده $Pdc\text{-}vdc^2\text{-}f$ با الگوریتم ژنتیک- عصبی برای به اشتراک‌گذاری بهتر توان DC طراحی شد که باعث شد توان مصرفی هنگام سویچینگ در مقایسه با دروپ متداول حدود 14 برابر و در مقایسه با دروپ Pdc-vdc2 حدود 9 برابر توان کمتری را مصرف کند. در مقایسه با دروپ idc-vdc متداول، استراتژی پیشنهادی توانست به کنترل توان dc کمک کند و پایداری سیستم را ارتقا دهد و سبب بهبود ولتاژ لینک dc شود.

[1] Overshoot

References

[1] Alipour, M. (2017). Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *14*(42), 95-121 .

[2] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *14*(42), 33-55 .

[3] Nasirian, V., Davoudi, A., Lewis, F. L., & Guerrero, J. M. (2014). Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *29*(4), 944-956. https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2350458

[4] Nasirian, V., Moayedi, S., Davoudi, A., & Lewis, F. L. (2015). Distributed Cooperative Control of DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(4), 2288-2303. https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2324579

[5] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., Vicuna, L. G. d., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(1), 158-172. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534

[6] Wang, P., Lu, X., Yang, X., Wang, W., & Xu, D. (2016). An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids With Enhanced Dynamic Current Sharing Performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *31*(9), 6658-6673. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2499310

[7] Wu, W., Wang, H., Liu, Y., Huang, M., & Blaabjerg, F. (2017). A Dual-Buck–Boost AC/DC Converter for DC Nanogrid With Three Terminal Outputs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *64*(1), 295-299. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2598804

[8] Bao, X., Zhuo, F., Tian, Y., & Tan, P. (2013). Simplified Feedback Linearization Control of Three-Phase Photovoltaic Inverter With an LCL Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *28*(6), 2739-2752. https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2225076

[9] Tzann-Shin, L. (2003). Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *18*(1), 11-22. https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.807145

[10] Tani, A., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2015). Energy Management in the Decentralized Generation Systems Based on Renewable Energy—Ultracapacitors and Battery to Compensate the Wind/Load Power Fluctuations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *51*(2), 1817-1827. https://doi.org/10.1109/tia.2014.2354737

[11] Xia, Y.-h., Peng, Y., Huiyong, H., Wang, Y., & Wei, W. (2016). Advanced unified decentralised control method with voltage restoration for DC microgrids. *Iet Renewable Power Generation*, *10*(6), 861-871. https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2015.0433

[12] Yang, P., Xia, Y., Yu, M., Wei, W., & Peng, Y. (2018). A Decentralized Coordination Control Method for Parallel Bidirectional Power Converters in a Hybrid AC–DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *65*(8), 6217-6228. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2786200

[13] Sun, K., Wang, X., Li, Y. W., Nejabatkhah, F., Mei, Y., & Lu, X. (2017). Parallel Operation of Bidirectional Interfacing Converters in a Hybrid AC/DC Microgrid

Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *32*(3), 1872-1884. https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2555140

[14] Xia, Y., Wei, W., Peng, Y ,.Yang, P., & Yu, M. (2018). Decentralized Coordination Control for Parallel Bidirectional Power Converters in a Grid-Connected DC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(6), 6850-6861. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2725987

[15] Nayanar, V., Kumaresan, N., & Gounden, N. A. (2016). A Single-Sensor-Based MPPT Controller for Wind-Driven Induction Generators Supplying DC Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *31*(2), 1161-1172. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2420568

[16] Xin, H., Zhang, L., Wang, Z., Gan, D., & Wong, K. P. (2015). Control of Island AC Microgrids Using a Fully Distributed Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(2), 943-945. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2378694

[17] Rahman, M. A., Uddin, M. N., & Abido, M. (2006) .An Artificial Neural Network for Online Tuning of Genetic Algorithm Based PI Controller for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor–Drive. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, *31*(3), 154-165. https://doi.org/10.1109/CJECE.2006.259211

[18] Chlaihawi, A. A. (2020). Genetic algorithm error criteria as applied to PID controller DC-DC buck converter parameters: an investigation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *671*(1), 012032. https://doi.org/10.1088/1757-899x/671/1/012032

[19] Husna, A., Roslan, M., & Mat, M. (2019). Droop control technique for equal power sharing in islanded microgrid. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, *10*(1), 530. https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i1.pp530-537

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 207-235
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.297893.1648 :20.1001.1.23829796.1400.18.3.11.4

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Investigation of Offshore Wind Turbine Foundation - Floating Offshore and Fixed Base Offshore - and Potential of North and South Seas of Iran

Fereshteh Jafari[1], Hajieh Bastami[2*]

[1]MSc. Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

[2]Assistant Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 08.14.2021
Revised: 09.15.2021
Accepted: 09.21.2021

Keyword:
Wind turbine
Floating offshore
Iran's water potential
Offshore fixed base
Foundation
Wind turbine technology

***Corresponding Author:**
Hajieh Bastami
Email: *hbastami@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

In the present work, the potential and capability of Iran's waters for acquiring and installing different types of wind turbines is discussed. For this purpose, various types of offshore wind turbines such as offshore float as the latest type of wind turbines as well as various types of base fixed offshore wind turbines were studied. In addition to reviewing the state of wind turbine technology in Iran according to oceanographic features, geographical coordinates, transportation costs and the possibility of assembly and ease of installation for the northern and southern seas of Iran, the amount of wind resources, water depth and available area were also taken into consideration. Based on the SWOT model, recommendations were made for the use of different types of turbines. In a part of the research, a comparison was made between Iran and leading countries in this field. For the Caspian Sea, the type of traction base of these turbines is not recommended due to the structural complexity, difficult installation and transportation and the need for deep water, while monopilic structures and the third generation of gravity are suitable options for the shallow depths of lakes. In addition, near the southern coast of Iran, due to high tides and many changes in water depth during the day and night and the impact of the tension of the restraint lines of traction platforms, the use of this structure is not recommended. Due to the high depth of water in coastal areas and very good stability in various weather conditions, spar structures are introduced as a desirable option.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۳۵-۲۰۷
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.297893.1648
20.1001.1.23829796.1400.18.3.11.4
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶
مقاله پژوهشی

بررسی پتانسیل دریاهای شمالی و جنوبی ایران به‌منظور استقرار توربین‌های بادی دریایی با فونداسیون شناور فراساحلی و پایه ثابت ساحلی

فرشته جعفری[۱]، حجیه بسطامی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

کلید واژگان:
توربین بادی
شناور فراساحلی
پتاسیل آب‌های ایران
پایه ثابت ساحلی
فونداسیون
فناوری توربین بادی

***نویسنده مسئول:** حجیه بسطامی
پست الکترونیکی:
hbastami@tvu.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر، پتاسیل و قابلیت آب‌های کشور ایران برای دست‌یابی و نصب انواع توربین‌های بادی، بحث و بررسی می‌شود. به همین منظور، انواع توربین‌های بادی دریایی از قبیل شناور فراساحلی به‌عنوان نوین‌ترین نوع توربین‌های بادی و همچنین انواع توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی، بررسی شده است. علاوه بر بررسی وضعیت فناوری توربین بادی در ایران، با توجه به ویژگی‌های اقیانوس‌شناسی، مختصات جغرافیایی، هزینه حمل‌ونقل و امکان مونتاژ و سهولت نصب برای دریاهای شمالی و جنوبی ایران، میزان منابع بادی، عمق آب‌ها و مساحت موجود و براساس مدل سوات، پیشنهادهایی برای استفاده از انواع مختلف توربین‌های مذکور ارائه شده است. در بخشی از پژوهش نیز مقایسه‌ای بین کشور ایران با کشورهای پیشرو در این حیطه صورت پذیرفته است. برای دریاچه خزر، نوع پایه کششی این توربین‌ها با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری، نصب و حمل‌ونقل دشوار و نیاز به آب‌های عمیق، توصیه نمی‌شود درحالی که سازه‌های مونوپایل و نسل سوم گرانشی‌ها گزینه‌های مناسبی برای ژرفای کم این دریاچه هستند. همچنین در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در طول شبانه‌روز و تحت تأثیر قرارگرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی سکوهای پایه کششی، استفاده از این ساختار توصیه نمی‌گردد. برای این سواحل، به دلیل عمق بالای آب در نواحی نزدیک به ساحل و پایداری بسیار خوب در شرایط جوی گوناگون، سازه‌های اسپار به‌عنوان گزینه مطلوب معرفی می‌گردد.

مقدمه

استفاده از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌منظور جایگزینی سوخت‌های فسیلی و اجتناب از گرمایش کره زمین و حل مشکلات زیست‌محیطی، به سال‌های نه‌چندان دور برمی‌گردد [۱; ۲]. توربین بادی، یک ساختار ساده مبدل انرژی است که انرژی جنبشی باد را به‌وسیله ساز و کار الکتریکی- مکانیکی خود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. با وجود آن‌که انرژی باد و ایده توربین‌های بادی، بسیار مفید و کارآمد بود چندی پس از به‌کارگیری، دوستداران محیط‌زیست را آزرده‌خاطر کرد. دای[1] و همکارانش با بررسی مزارع بادی، عواملی مانند تأثیرگذاری توربین‌ها بر پرواز پرندگان، آلودگی صوتی، برهم‌زدن نظم و زیبایی محیط‌زیست از لحاظ بصری را از جدی‌ترین ویژگی توربین-های بادی برشمردند [۳]. همچنین قیمت بالای زمین و نیاز به وسعت زیادی از اراضی در مزارع بادی در راستای سازوکار عملکردی توربین‌ها، از دیگر موارد منفی این فناوری به‌شمار می‌رود. از این‌رو، پژوهشگران به فکر چاره برای رفع موانع موجود افتادند. پروفسور ویلیام هریونموس[2] در سال ۱۹۷۲ ایده نوین توربین‌های بادی شناور را مطرح کرد [۴]. در سال ۱۹۹۳ بارلتراب[3] مفهوم مزرعه بادی شناور چند واحدی[4] را معرفی کرد که چندین توربین را روی یک ساختار شناور قرار می‌دادند [۵]. تونگ[5] در ۱۹۹۸ به بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی نصب یک نیروگاه بادی دریایی به‌صورت شناور پرداخت و موضوعات زیست‌محیطی، ساخت و نصب این توربین‌ها را در آن زمان مورد بحث قرار داد [۶]. در همان سال، اندرا اندرسون[6] و مینو پاتل[7] مقاله‌ای را در زمینه توسعه ابزار طراحی تحلیلی و عددی برای چگونگی عملکرد مزارع بادی در دریاها ارائه کردند و به ابزار انتقال انرژی تولید شده از دریاها به ساحل پرداختند [۷]. اندرسون و همکارانش فرم بدنه مناسب برای توربین‌های بادی شناور، ابزارهایی برای مدل‌سازی بارها، خستگی و آسیب‌های ناشی از آن را به‌عنوان سه مسئله اصلی در این حوزه حل کردند [۸]. بلو اچ تکنولوژی[8] کشور هلند در سال ۲۰۰۷ اولین توربین بادی شناور جهان را با دو پره و از نوع پایه کششی[9] در ۲۱/۳ کیلومتری آپولیا ایتالیا و در عمق ۱۱۳ متری، مستقر کرد که در پایان سال ۲۰۰۸ از رده خارج شد [۹]. پس از آن توربین بادی شناور هایویند[10] بود که در سال ۲۰۰۹ در دریای شمال با ظرفیت ۲/۳ مگاوات توسط شرکت زیمنس به بهره‌برداری رسید [۱۰; ۱۱]. پیرز کولازو[11] و همکاران انرژی امواج و بادهای فراساحلی را با هم ادغام کردند و فناوری‌ها و زیربنای موردنیاز این ایده را در سال ۲۰۱۵ مطرح کردند [۱۲]. حدود نیم قرن از اولین ایده توربین‌های بادی شناور گذشته بود که در سال ۲۰۱۸ بازده توربین بادی از ۳۰ کیلووات به بیشتر از ۵ مگاوات ارتقا یافت [۱۳]. انتظار می‌رود که در سال ۲۰۵۰ این آمار به عدد ۱۲۰۰ گیگاوات برسد [۱۴]. امروزه توربین‌های بادی ساحلی، انتقالی و فراساحلی به دلیل وسعت زیاد دریاها، سواحل و در ضمن ارزش بالای زمین و قابل استفاده‌تر بودن آن برای مصارف دیگر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از اصلی‌ترین روش‌های طبقه‌بندی توربین‌های فراساحلی، براساس عمق آبی است که در آن قرار می‌گیرند. فونداسیون توربین‌های بادی پایه ثابت به طورکلی به دو نوع فونداسیون آب‌های کم عمق، که در عمق آب از صفر تا ۳۰ متر کاربری دارند، فونداسیون انتقالی که در عمق آب

---

[1] Dai
[2] William Heronemus
[3] Barltrop
[4] MUFOW
[5] K.C Tong
[6] Andrew R. Henderson
[7] Minoo H. Patel
[8] Blue H Technologies
[9] TLP: Tension Leg Platform
[10] Hywind
[11] Perez-Collazo

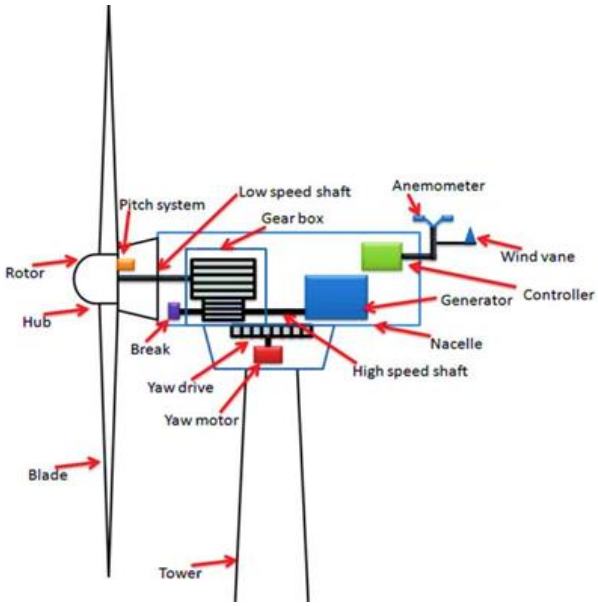
بین ۳۰ تا ۶۰ متر کاربری دارد و نوع دیگر مربوط به فونداسیون آب‌های عمیق است که برای آب‌هایی با عمق بیش از ۶۰ متر کاربرد دارند [۱۲].

انرژی باد یک انرژی تجدیدپذیر است که در کشور ایران، پتاسیل تولید ۴۰۰۰۰ مگاوات یعنی نصف توان تولید حال حاضر برق کشور را دارا می‌باشد. در پژوهش حاضر، پتانسیل آب‌های کشور ایران برای نصب انواع توربین‌های بادی دریایی براساس میزان منابع باد، عمق آب‌ها، مساحت موجود و دیگر ویژگی‌های اقیانوس‌شناسی، بررسی و در نهایت با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، مقایسه اقتصادی با فناوری فتوولتاییک و زمین‌گرمایی و توربین‌های بادی در خشکی و تحلیل مدل SWOT هر سازه، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد و هفت فونداسیون اصلی توربین‌های دریایی ضمن معرفی، تحلیل قرار می‌گردد. عنوان پژوهش حاضر به دلیل محدود بودن سوخت‌های فسیلی، آلودگی زیست‌محیطی و گرمایش جهانی، معایب متعدد توربین‌های بادی در خشکی، نوسان قیمت ارز و بحران حال حاضر کشور در بخش انرژی (برق و آب) دارای اهمیت فراوان می‌باشد.

توربین بادی

اجزا و نحوه عملکرد

توربین‌های بادی از سیزده جزء اساسی شامل: پایه، برج، نردبان دسترسی به نوک توربین، اتصال به شبکه الکتریکی، کنترل جهت‌گیری باد[1]، ناسل[2]، ژنراتور، بادسنج، ترمز مکانیکی یا الکتریکی، جعبه‌دنده، تیغه روتور (پره)، سرعت کنترل تیغه[3]، توپی روتور تشکیل شده است [۱۵; ۱۶] (شکل ۱).



شکل ۱. اجزای تشکیل‌دهنده توربین بادی [۱۵]

[1] Yaw Control
[2] Nacelle
[3] Pitch Control

پره‌های روتور با قرارگیری در معرض وزش باد همانند بال هواپیما انرژی را دریافت می‌کنند. هنگامی که باد می‌وزد، در یک طرف تیغه، کیسه هوایی کم‌فشار تشکیل می‌شود و تیغه را به سمت خود می‌کشد و سبب به‌حرکت درآمدن روتور می‌شود که به آن لیفت[1] می‌گویند. نیروی لیفت بسیار بزرگ‌تر از نیروی بادی است که برخلاف ناحیه جلویی پره وارد می‌شود که به آن درگ[2] می‌گویند. ترکیب نیروی لیفت و درگ باعث حرکت پروانه‌ای پره‌های توربین و روتور می‌گردد. تعدادی چرخ‌دنده به‌صورت متوالی، چرخش روتور را از ۱۸ به ۱۸۰۰ دور در دقیقه یعنی سرعتی که باعث تولید الکتریسیته متناوب[3] می‌شود، می‌رساند. پره‌های چرخان، پروانه داخل موتور که به جعبه‌دنده می‌رود را می‌چرخاند. جعبه‌دنده یا گیربکس، سرعت چرخش برای ژنراتور را افزایش می‌دهد. ژنراتور از میدان‌مغناطیسی برای تبدیل انرژی چرخشی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. نیروی خروجی تولید شده، به یک ترانسفورماتور می‌رود. ترانسفورماتور، انرژی حاصل از ژنراتور که حدود ۷۰۰ ولت است را به ولتاژ مناسب برای سیستم توزیع که معمولاً ۳۳۰۰۰ ولت است، تبدیل می‌کند. چرخ‌دنده، روتور و ژنراتور در قسمت بالایی برج در محفظه‌ای موسوم به ناسل قرار دارند. ناسل‌ها می‌توانند به‌اندازه‌ای بزرگ باشند که حتی یک بالگرد بر روی آن فرود آید. از دیگر اجزای اساسی یک توربین بادی می‌توان به کنترل‌کننده آن اشاره کرد. این بخش که وظیفه کنترل سرعت روتور را دارد، از آسیب‌های ناشی از وزش بادهای با سرعت بالا و چرخش بیش‌ازحد رتور جلوگیری می‌کند. این کنترل‌کننده داده‌های خود را از بادسنجی که در بالای برج و معمولاً انتهای آن نصب می‌شود گرفته، و درصورت افزایش باد و چرخش بیش‌ازحد روتور، یک ترمزکننده[4] به‌صورت مکانیکی یا الکتریکی سرعت چرخش روتور را کاهش می‌دهد [۱۷; ۱۸].

چرا توربین بادی دریایی

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد، بهترین و پاک‌ترین انرژی شناخته شده است و در بسیاری از مقالات و کتب، این مهم بررسی و تأیید شده است که نمونه کار دمیرتاس[5] مؤید این مسئله می‌باشد [۱۹].

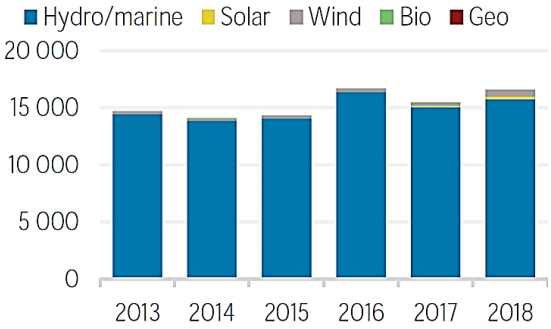
کشور ایران علی‌رغم داشتن کویرهای وسیع، به دلیل درجه حرارت بسیار بالا، اختلاف دمای شب و روز و بادهای شنی نمی‌تواند از انرژی خورشیدی در این مناطق بهره‌برداری کند. همچنین از لحاظ مواد سازنده به دلیل نبود فناوری ساخت، تمامی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی وارداتی هستند و هزینه گزافی را برای اقتصاد کشور خواهد داشت؛ از این رو هزینه تعمیر و نگهداری بسیار بالا می‌باشد و بازده این نیروگاه‌ها می‌تواند تحت تأثیر مستقیم عوامل سازنده و محیطی قرار گیرد. از طرفی، علی‌رغم تلاش‌های بسیار برای دست‌یابی به انرژی زمین گرمایی، متأسفانه فناوری این انرژی آن‌طور که باید در دسترس نمی‌باشد و طبق پژوهش‌های انجام شده، تنها یک نیروگاه زمین گرمایی مشکین‌شهر از سال ۷۷ تا کنون در دست ساخت است که ظرفیت تولید ۵۵ مگاوات را دارد. با توجه به جنس فولادی پایه‌های برج‌های توربین بادی از نظر متالورژی و در نتیجه استحکام و طول عمر بالاتر، هزینه تعمیر و نگهداری کمتر، ساخت و طراحی به‌مراتب ساده‌تر و داخلی‌سازی چند نمونه توربین توسط شرکت‌های داخلی در ایران، توربین‌های بادی گزینه مناسبی برای سرمایه‌گذاری خواهند بود. در شکل ۲ بخش خاکستری متعلق به میزان تولید نیرو از انرژی باد و بخش زردرنگ از انرژی خورشیدی طی شش سال در ایران را نشان می‌دهد[6].

---

[1] Lift
[2] Drag
[3] AC
[4] Brake
[5] Demirtas

[6] این شکل به استناد مدارک موجود در آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) استخراج شده است.

یک کیلووات ساعت برقی که از طریق توربین بادی تأمین می‌شود می‌تواند در کاهش ۸۵۰ گرم CO2، ۲.۹ گرم SO2، ۲.۶ گرم NOX و ۵۵ گرم خاکستر مؤثر باشد [۲۰].



شکل ۲. میزان تولید نیرو از انرژی‌های تجدیدپذیردر ایران بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ برحسب GWh [۲۱]

توربین‌های بادی فراساحلی نسبت به نوع پایه ثابت آن، مستقل از بستر عمل می‌کنند و می‌توانند صرف‌نظر از نوع و جنس خاک، نصب شوند. در واقع در خشکی و سواحل به دلیل وجود امواج الکترومغناطیسی، آلودگی بصری و صوتی ایده انتقال توربین‌های بادی به آب‌های عمیق به‌عنوان راهکاری برای دست‌یابی به برق بیشتر، در عین آسیب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به علت وجود موانع، ساختمان‌ها، کوه‌ها و سازه‌های بلند، باد کمتری سهم توربین‌ها می‌گردد درحالی که در دریاها و به‌ویژه محیط‌های فراساحلی، به علت بادهای شدید، متراکم‌تر بودن هوا و فضای بازتر، توان تولیدی به‌صورت قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. توربین‌های فراساحلی بزرگ را می‌توان توسط کشتی‌ها یا کرجی‌ها طی عملیاتی به دل دریاها و اقیانوس‌ها منتقل کرد و توان تولیدی را از ۵۰ مگاوات در مزرعه‌های بادی واقع در خشکی به ۱۰۰ مگاوات در مزرعه‌های بادی فراساحلی افزایش داد.

یکی از عوامل مثبت زیست‌محیطی توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت، ایجاد جزیره‌های کوچک مصنوعی در محل این فونداسیون‌هاست و در نتیجه افزایش آبزیان آن ناحیه را به همراه خواهد داشت [۲۲].

نظر بر بالابود هزینه توربین‌های بادی شناور در مقایسه با نوع ثابت، استفاده آنها در برخی مکان‌ها اقتصادی نمی‌باشد. از این‌رو، استفاده از این توربین ها در اطراف آب‌های عمیق می‌تواند راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه باشد.

انرژی باد و نحوه محاسبه آن

اندازه‌گیری انرژی موجود در هر مکان را انرژی یا قدرت باد[1] می‌گویند [۲۳]. توان تولید شده از توربین‌های بادی را رانکی فرود[2] در قالب رابطه (۱) و (۲) مطرح کرده است. در این معادله، رابطه بین سرعت باد و توان تولید شده به‌خوبی نشان داده شده است؛ به‌گونه‌ای که۱۰ درصد افزایش در سرعت وزش باد می‌تواند سبب ۳۳ درصد افزایش در توان تولید شده گردد. حال با توجه به افزایش سرعت باد در دریاها و اقیانوس‌ها می‌توان به توجیه خوبی از ضرورت توربین‌های بادی شناور فراساحلی رسید [۲۴]. توان موجود در یک باد "P" است و نیرویی که می‌توان از نیروی ورودی باد "Pa" استخراج کرد را با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) می‌توان محاسبه کرد:

[1] Power Wind
[2] Rankine-Froude

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (۱)$$

$$P_a = \frac{1}{2}\rho A V^3 C_p \quad (۲)$$

در معادله‌های (۱) و (۲) قدرتی که در باد وجود دارد با P(w)، چگالی هوا[1] با ρ ، مساحت روتور با A(m2)، سرعت باد با V(m/s)، ضریب توان ناشی از اتلاف با CP [2] و توان قابل استخراج توسط توربین بادی باPa (w) محاسبه می‌شود [۲۳]. ضریب توان CP در برابر سرعت‌های مختلف باد اندازه‌گیری می‌شود و توسط سازندگان توربین ارائه می‌گردد و شامل تمام تلفات ترکیبی۳ است. آلبرت بتز۴، فیزیک‌دان آلمانی در سال ۱۹۱۹ نتیجه گرفت که هیچ توربین بادی نمی‌تواند بیش از ۵۹/۳ درصد از انرژی جنبشی باد را تبدیل کند و این قانون به نام قانون بتز شهرت یافت. حد بتز نیز حداکثر مقدار نظری است که هیچ توربین بادی نمی‌تواند در عمل کار کند که چیزی در حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد می‌باشد [۲۵].

به‌منظور روشن شدن محاسبه توان تولیدی توربین‌های بادی، یک توربین بادی با طول پره ۵۰m در منطقه‌ای با متوسط سرعت باد $7.5\ m/s$ و چگالی هوای $1.1\ kg/m^3$ را در نظر بگیرید. اگر شرکت سازنده ضریب توان ۰/۴ را در برابر تلفات اعلام کرده باشد، توان تولیدی این توربین به این صورت خواهد بود:

$$A = \pi r^2 = \pi \times 50^2 = 7853.9816\ m^2$$

$$P = 0.5 \times 1.1 \times 7853.9816 \times 7.5^3 = 1822369.168\ \text{W} = 1.82\ \text{MW}$$

$$P_a = 1.82 \times 0.4 = 0.728\ \text{MW}$$

ملاحظه می‌شود که این توربین بادی می‌تواند با در دسترس بودن سرعت مطلوب باد برای یک‌ساعت ۰/۷۲۸ مگاوات به‌طور مدام تولید کند.

معرفیِ تحلیلی فونداسیون مناسب به‌منظور استقرار در دریاهای ایران از حیث اقیانوس‌شناسی

کشور ایران یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین کشورهای خاورمیانه است که در غرب قاره آسیا قرار دارد. ایران از سمت شمال به دریاچه بزرگ خزر (کاسپین) و از سمت جنوب به منابع آبی خلیج فارس و دریای عمان دسترسی دارد. موقعیت جغرافیایی ایران به‌گونه‌ای است که از منابع بادی خوبی در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی بهره‌مند می‌باشد (شکل ۳).

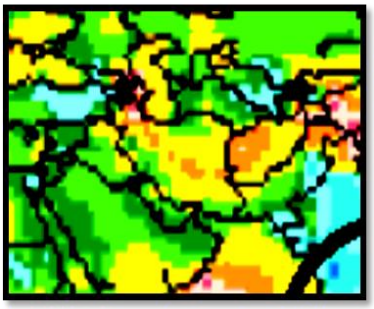
---

[1] چگالی هوا در سطح دریا در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و با توجه به جو استاندارد بین‌المللی حدود ۲۲۵/۱ کیلوگرم بر مترمکعب است.

[2] Power Coefficient

[3] تلفات ترکیبی شامل تلفات اجزای مکانیکی، تلفات آیرودینامیکی و الکتریکی می‌باشد.

[4] Albert Betz



شکل ۳. تصویر منابع بادی کشور ایران و اطراف آن (مناطق سبز و آبی دارای منابع بادی کم و مناطق زرد و و قرمز دارای منابع بادی زیاد) [۲۶]

با بررسی توربین‌های بادی دریایی می‌توان آن‌ها را به‌طور کلی به دو دسته تقسیم کرد: در آب‌های عمیق توربین-های بادی شناور فراساحلی در سه دسته فونداسیون سیستم شناوری: اسپار[1]، نیمه‌غوطه‌ور[2] و پایه کششی[3] و در نواحی کم‌عمق، چهار نوع فونداسیون پایه ثابت: یکپارچه[4]، گرانشی[5]، جکت[6] و سه‌پایه[7]. در عمق ۲۰ تا ۵۰ متری آب، از دو فونداسیون یکپارچه و گرانشی که ساختار یک‌پایه‌اند استفاده می‌گردد و برای عمق‌های بین ۵۰ تا ۸۰ متر از دو ساختار جکت و سه‌پایه که نامشان نشأت گرفته از فرم پی آن‌هاست، استفاده می‌شود [۲۷; ۲۸]. هر کدام ازسازه‌ها، ایده خاصی به منظور حفظ پایداری خود در برابر نیروی وارد از جانب امواج و بادها استفاده می‌کنند.

دریای خزر

رژیم بادی دریاچه خزر: تحلیل ویژگی‌های باد و طوفان‌های شدید اجازه می‌دهد که دریای خزر از نظر رژیم باد به مناطق مختلفی تقسیم شود. معیار اساسی برای این تقسیم‌بندی فراوانی، سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه قرار گرفت. در زمستان زمانی که شدت چرخه‌های جوی بر بخش‌های میانی و جنوبی دریای خزر افزایش می‌یابد، میانگین سرعت باد به ۷/۵- ۷ متر بر ثانیه می‌رسد [۲۹].

گوناگونی وضعیت باد روی دریای خزر، ناشی از گستره طولی آن به‌موازات نصف‌النهار، شرایط متفاوت اروگرافی سواحل و تنوع در جبهه‌های هوای گذری از روی نواحی مختلف است. دریای خزر پیوسته تحت تأثیر توده‌های هوای سرد قطبی و توده‌های گرم نیمه‌جنب حاره‌ای است. مقادیر بالای سرعت باد (۸- ۶ متر بر ثانیه) بیشتر در ناحیه شبه‌جزیره آبشوران مشاهده می‌شود؛ جایی که ویژگی اروگرافی باعث گسترش بادهای شدید و طوفانی می‌گردد [۲۹]؛ از این رو برای این دریا توربین‌های بادی دریایی شناور اولین انتخاب خواهند بود.

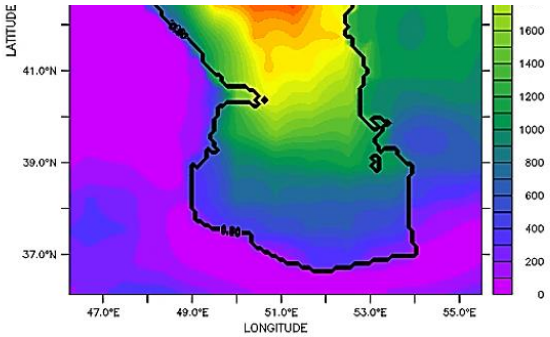
در بخش جنوبی دریای خزر میانگین سرعت باد کمتر است، در نواحی مرکزی آن ۵- ۴ متر بر ثانیه، در سواحل شرقی ۴- ۳/۵ متر بر ثانیه و در گوشه جنوب شرقی ۳- ۲/۵ متر بر ثانیه است. مقدار کم میانگین سرعت باد (۳- ۲/۵ متر بر ثانیه) در سواحل جنوب غربی و در آب‌های ساحلی ایران و سواحل جنوبی دریای خزر روی می‌دهد. در فصول

[1] Single Point Anchor Reservoir (Spar)
[2] Semi-Submersible
[3] Tension Leg Platforms (TLP)
[4] Monopile
[5] Gravity
[6] Jacket
[7] Tripod

گرم سال همچون فصول سرد میانگین سرعت باد از جنوب به شمال افزایش می‌یابد، گرچه در فصول گرم، تفاوت بین سرعت باد در بخش دریایی با ساحل چندان زیاد نیست؛ بنابراین در نتیجه گوناگونی فرایندهای جوی بر دریای خزر، تفاوت رژیم گرمایی دریا و خشکی و چگونگی توزیع اروگرافی ناحیه، میانگین سرعت باد در طول سال در مناطق مختلف دریای خزر، تفاوت اساسی دارد [۲۹].

علی‌رغم نایکنواختی سرزمین پیرامون دریای خزر از نظر جغرافیایی، دریای خزر و سواحل آن را می‌توان به نواحی با رژیم جهت باد تقریباً یکنواخت تقسیم کرد. روی خزر جنوبی فراوانی بادهای جنوب شرقی افزایش می‌یابد (۳۵- ۲۵ درصد)، و در بخش‌های جنوب‌شرقی آن بادهای غربی و شمال‌غربی غلبه دارد (۳۰- ۲۵ درصد). در زمان‌های گرم سال، تغییرات عمده‌ای در رژیم باد روی می‌دهد. در این شرایط، بادهای شمال‌غربی تقریباً بر کل دریای خزر غلبه دارد (۴۰- ۳۰ درصد در بخش‌های مرکزی خزر میانی و ۲۵- ۱۵ درصد در سواحل) [۲۹].

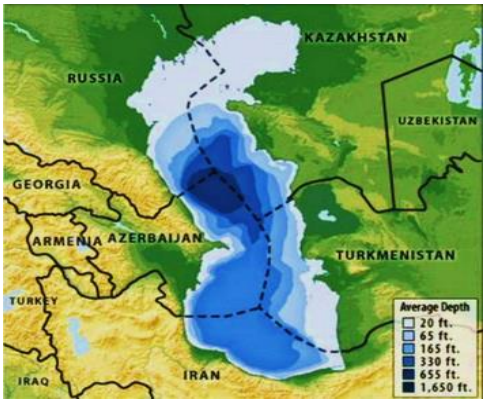
در ناحیه آبشوران به علت اروگرافی ناحیه، جریان اصلی باد شمالی (۵۰- ۴۰ درصد) و جنوبی‌تر از آن، جریان غالب باد شمال‌شرقی (۲۵ درصد) است. در ناحیه لنکران- آستارا جهت اصلی باد، غربی است (۴۵- ۳۰ درصد) که مربوط به نسیم ساحلی و چرخه کوهپایه- دره‌ای می‌باشد [۲۹].



شکل۴. میانگین انرژی باد در ارتفاع ۵۰ متر خزر میانی و جنوبی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ برحسب kWh/m2 [30]

به دلیل کاهش منابع بادی در خزر جنوبی، استفاده از توربین‌های بادی دریایی در هرجای این دریا توجیه اقتصادی نخواهد داشت و [۲۲] و [۳۱] مؤید این مسئله هستند اما مناطقی با ثبات و قدرت بادی خوبی شناسایی شده‌اند؛ از این رو در ادامه، پیشنهادهایی برای انواع فونداسیون‌ها با شاهدگیری از مقالات ارائه شده است تا با نصب آن‌ها به تأمین برق کشور کمک گردد. پتانسیل‌سنجی سایت‌های نفت و گاز برای استقرار توربین‌های بادی می‌تواند پیشنهادی راهگشا برای سایر مناطق جنوبی دریای خزر باشد.

عمق آب دریای خزر: عمق آب‌ها به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار و اساسی در برنامه‌ریزی و تعبیه توربین‌های بادی شناور در دریاها مطرح می‌باشد. در شکل ۵ که اینفوگرافیک اعماق دریای خزر را به تصویر می‌کشد، عمیق‌ترین مناطق در قسمت مرکزی و جنوبی واقع شده‌اند که در بعضی از مناطق جنوبی ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ متر عمق دارد، سواحل این دریاچه جمعاً ۶۳۷۹ کیلومتر است که حدود ۹۲۲ کیلومتر آن در خاک ایران واقع شده است و وسعت حوزه آبگیر آن ۳۷۳۳۰۰۰ کیلومترمربع است که ۲۵۶۰۰۰ کیلومترمربع آن در خاک ایران قرار دارد [۳۲].



شکل ۵. نقشه و اینفوگرافیک عمق دریای خزر[۳۲]

باتوجه به شکل ۵ سواحل دریای خزر به‌طور متوسط دارای عمق ۶ تا ۲۰ متر می‌باشند و بخش عمده خزر حوزه ایران، دارای عمق ۱۰۰ متر می‌باشد که حدود ۲۰۰۰۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد.

توربین‌های بادی شناور نیمه‌غوطه‌ور، گزینه مناسبی برای شرق خزر جنوبی می‌باشد؛ زیرا درفت پایین این سازه، آن را قادر می‌سازد تا در آب‌های کم‌عمق حدود ۴۰-۵۰ متر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین امکان بکسل آن به ساحل در صورت بروز نقص و تعمیر سازه‌ها با هزینه خیلی کمتر در مقایسه با تعمیرات اساسی که در دریا انجام می‌شوند، از مزایای این فونداسیون است [۳۳]. اما از معایب داشتن قسمت عمده‌ای از ساختار در نزدیکی سطح آزاد این است که سازه بیشتر تحت تأثیر خوردگی و بارهای ناشی از قطعات یخ قرار دارد و در برابر امواج شدید بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد داشت [۳۴]. همچنین منطقه جنوب‌شرقی دریای خزر به علت کم بودن ارتفاع موج و عمق آب دریا، شرایط مناسبی برای توربین بادی دریایی شناور دارد. استفاده از توربین‌های بادی شناور، گزینه مناسب‌تری از لحاظ اقتصادی در برابر توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت دانسته شده است که رزاقی کلجاهی و همکاران در [۳۵] تأییدی بر این تحلیل ارائه داده‌اند.

نیمه‌غوطه‌ور: این فوندانسیون شامل یک ساختار مثلثی با استوانه‌های فلزی توخالی[1] می‌باشد که از طریق شناوری زیاد، به پایداری می‌رسند. هر گوشه این ساختار، ستون‌های لوله‌ای عمودی دارد که توسط مهاربندها به‌هم اتصال یافته‌اند. این ستون‌ها می‌توانند با نگه داشتن ماسه در خود، به سطح شناوری مناسبی دست یابند [۳۶]. سیستم مهارسازی این ساختار با ۳-۶ خط اتصال است. مونتاژ کامل نیمه‌غوطه‌ورها در یک لنگرگاه خشک و حمل‌ونقل آن توسط یک کشتی بکسل امکان‌پذیر می‌باشد [۲۴]. شکل ۶ این سازه‌ها را با تکنیک SWOT نشان می‌دهد.

[1] Pontoon

شکل ۶. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فونداسیون نیمه‌غوطه‌ور

فونداسیون پایه کششی توربین‌های بادی شناور، با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری، نصب و حمل‌ونقل دشوار و نیاز آن به آب‌های عمیق ۱۸۰۰ متری، فقط در آب‌های عمیق دریای خزر پیشنهاد می‌شوند[1] که رزاقی کلجاهی و همکاران در [۳۷] با بررسی شرایط محیطی و ژئوتکنیکی دریای خزر، صحت این پیشنهاد را گواهی می‌دهد.

با توجه به عمق ۶ تا ۲۰ متری سواحل خزر جنوبی، توربین بادی دریایی پایه ثابت با فونداسیون گرانشی مناسب خواهند بود. در عمق‌های کمتر حدود ۳ تا ۵ متر، نسل اول به دلیل داشتن سازه‌های سنگین و درنتیجه حمل‌و نقل دشوار، برای مناطق کم عمق پیشنهاد می‌گردند تا از لحاظ اقتصادی مقرون بصرفه باشد. از عمق ۱۰ تا ۲۰ متر بین دو نسل دوم و سوم، به دلیل حمل و نقل آسان‌تر و سبک‌تر بودن سازه‌های نسل سوم، گزینه مناسبی برای احداث در این مناطق پیشنهاد می‌شوند. اوایل سال ۲۰۱۹، ۱۳ مورد از فونداسیون گرانشی در کشورهای دانمارک، آلمان، سوئد، فنلاند و بلژیک نصب شد که حداکثر عمق آب درنظرگرفته شده برای آنها ۲۰ متر بوده است [۳۸].

پورشفیع و همکاران در [۳۹] طی تقسیم‌بندی ۹گانه مناطق جنوب‌غربی دریای خزر، منطقه ۷ که در نزدیکی بندر آستارا قرار دارد با عمق ۲۰ متر و میانگین سرعت باد ۶ متر بر ثانیه را بهترین ناحیه برای توربین‌های بادی دریایی شناخته‌اند؛ زیرا جهت باد این منطقه، ثبات و مداومت خوبی دارد و غالباً از سمت غرب و جنوب‌غربی می‌باشد. همچنین طبرسا در [۴۰] مشخصات اقلیمی موج و باد دریای خزر جنوبی با مزرعه بادی گابارد واقع در دریای شمال در انگلستان را مقایسه کرده است. این مزرعه با میانگین سرعت باد ۰ متر بر ثانیه، میانگین ارتفاع امواج ۳.۳ متر و بلندترین ارتفاع موج ۳.۲ متر و عمق آب ۲۵ تا ۳۵ متر به فاصله ۲۳ کیلومتری ساحل گزارش شده است که مشابه پارامترهای اقیانوس شناختی دریای خزر است و در این مزرعه بادی ۱۵۰ توربین با ظرفیت اسمی ۴۰۵ مگاوات تعبیه شده است. در [۴۰] به تشابه با مزرعه بادی گابارد با تعداد ۱۵۰ توربین مدل Siemens SWT-3.3-101 برای دریای خزر، میزان تولید سالانه انرژی ۱۱۰۴.۱۴ گیگاوات ساعت اعلام شده است.

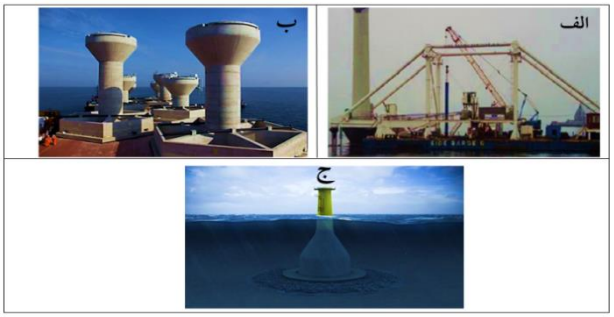
[1] ویژگی‌های سکوی پایه کششی در بخش دریای عمان بررسی شده است.

گرانشی: از این ساختار برای دریاهایی با بستر سفت و سخت استفاده می‌شود [۴۱]. پایه‌های آن معمولاً در سه شکل مستطیل، دایره و هشت‌ضلعی طراحی و ساخته می‌شوند و نقش این پایه‌های سنگین حفظ پایداری و جلوگیری از چرخش فونداسیون توربین است [۴۲; ۴۳]. این فونداسیون در سه نسل ساخته و نصب شده‌اند:

نسل اول: این نوع فونداسیون یک سازه بتونی کاملاً جامد، بدون سوراخ و سلول است. داشتن وزن زیاد به‌دلیل ساختار کاملاً جامد، سخت و یک‌پارچه و در نتیجه نیاز به باربرها و جرثقیل‌های خاص برای حمل‌ونقل از نقاط ضعف این سازه‌ها هستند ولیکن برای ژرفای کم آب (۳ تا ۷ متر) و نواحی ساحلی بسیار مناسب هستند [۳۸] (شکل ۷-الف).

نسل دوم: این سازه برای ژرفای خیلی کم- ۴ متر- تا ژرفای ۲۰ متر مناسب می‌باشند. وزن این سازه‌ها به‌دلیل وجود حفره و سوراخ‌هایی، بسیار کمتر از نسل اول است؛ از این رو حمل‌ونقل و عملیات نصب آن‌ها ساده‌تر می‌باشد. پس از نصب، سوراخ‌ها یا سلول‌ها با ماسه پر می‌شوند و به وزن نهایی طراحی شده می‌رسند [۳۸] (شکل ۷-ب).

نسل سوم: این فونداسیون، مخروطی‌شکل است و در طول مراحل حمل و نصب، نیمه شناور می‌باشد که نیاز به بالابر را در عملیات حمل‌ونقل به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. هنگامی که این پایه در بستر دریا قرار می‌گیرد، سوراخ داخلی با ماسه پر می‌شود تا به وزن نهایی طراحی برای تحمل بارها برسد. این نسل برای ژرفای ۱۳ تا ۲۰ متر مناسب است و به علت ویژگی‌های فوق، از دو نسل قبل مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد [۳۸](شکل ۷-ج).



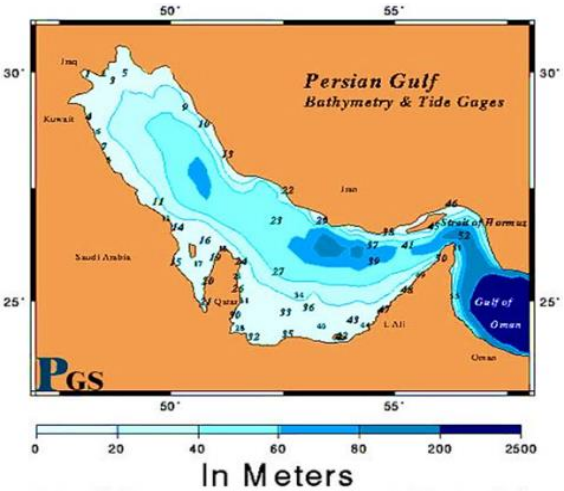
شکل ۷. فونداسیون نوع گرانشی توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی الف: فونداسیون نسل اول [۴۴]؛ ب: فونداسیون نسل دوم [۴۵]؛ ج: فونداسیون نسل سوم [۴۶]

دریای خلیج فارس

خلیج فارس تحت تأثیر سه سیستم آب‌وهوایی اصلی شامل: آنتی‌سایکلون سرد سیبری، سیستم کم‌فشار سودان و مانسون‌های هند می‌باشد. این ناحیه تحت تأثیر بادهای غالب از شمال غرب موسوم به «باد شمال» است که در قسمت‌های جنوبی تغییر جهت می‌دهد و به سمت شمال تمایل پیدا می‌کند. این بادها باعث به‌وجود آمدن امواج و جریان‌های سطحی می‌گردند [۲۹]. آب‌وهوای خلیج فارس، خشک و نیمه‌استوایی است. در بخش جنوبی به دلیل کم بودن آب‌های ورودی به خلیج فارس، رسوبات کربناتی زیاد است. جهت باد در طول زمستان از شمال‌غربی است و در کرانه جنوبی بادها از جهت غرب می‌وزند و با پیشروی به سمت تنگه هرمز، جهت وزش باد از جنوب‌غرب تغییر می‌یابد. در مناطق شمالی خلیج فارس و در فصل تابستان، بادهای موسمی از شمال‌غرب به جنوب می‌وزند اما باد غالب از جنوب‌شرق به شمال‌غرب است. به‌طور کلی در دریای خلیج فارس در ۷۵ درصد مواقع شاهد آب‌های بی‌تلاطم هستیم که عملیات نصب و نگهداری را تسهیل می‌کند و باعث کنترل راحت‌تر سازه‌ها می‌گردد [۴۱]. نواحی منطقه دیر با حداکثر سرعت باد ۳/۹۰۲ متر بر ثانیه و کمترین سرعت باد ۲/۳۴۳ متر بر ثانیه، پتانسیل خوبی برای نصب توربین با

ارتفاع ۱۰ متر به بالا دارد [۴۷]. پنج جزیره خارگ، لاوان، کیش و قشم در ارتفاع ۱۰ متر و میانگین متوسط سرعت باد از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۴ بررسی شده است. نتایج نشان داده که در اطراف جزیره سیری در ارتفاع ۴۰ متر، سرعت متوسط سالانه باد ۵.۹۰۳۴۶۰۸۵۱ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۸۰ متری ۶.۵۱۷۴۲۱۶۹۳ متر بر ثانیه می‌باشد [۴۸]. با توجه به نزدیکی جزیره سیری به این منطقه، عملیات نصب، حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری می‌تواند با سهولت بیشتری صورت پذیرد.

خلیج فارس۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر پهنا و سطح حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومترمربع دارد. ژرفای میانگین آن حدود ۳۵ متر و ژرف‌ترین نقطه آن در کرانه ایرانی تنگه هرمز است که ژرفایی تا ۱۶۵ متر دارد ولی میانگین آن در کناره‌های محور ۷۴ تا ۹۲ متر است و سراشیبی آن در خلیج عمان است. آب‌وهوای حاکم بر خلیج فارس خشک نیمه‌استوایی است که در تابستان دما را ۴۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد و محیط بادخیزی را برای منطقه فراهم می‌آورد [۲۹]. کرانه جنوبی خلیج فارس به‌ویژه در شرق شبه‌جزیره قطر، منطقه وسیع و کم‌عمقی (۱۰ تا ۲۰ متر) است. عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس ۹۳ متر ژرفا دارد که در ۱۵ کیلومتری جزیره تنب بزرگ قرار گرفته است. کم‌عمق‌ترین منطقه نیز دارای ژرفای بین ۱۰ تا ۳۰ متر است که شامل مناطق غربی می‌شود [۴۸].



شکل ۸. نقشه عمق آب‌های خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان [۴۹]

طهماسبی‌فرد و همکاران در [۵۰] پس از بارگذاری موج و جریان و همچنین بار باد به‌صورت استاتیکی و گشتاور آیرودینامیکی، خروجی‌های تحلیل تنش اجزای سازه را به‌دست آورده‌اند. آنالیز انهدام پیش‌روند انجام و سازه جکت برای خلیج فارس از لحاظ فنی مناسب دانسته شده است.

حداکثر شوری آب در تنگه هرمز و رأس خلیج فارس و در ماه بهمن و حداقل شوری آب در مردادماه است. شوری آب از ۳۸ هزارم تا ۴۱ هزارم متغیر است. به گزارش مهندسان متالورژی مورلی و آتلی در خلیج فارس میزان خورندگی فولاد در مناطق دارای تلاطم ۰/۱۴ میلی‌متر بر سال و در سایر نقاط ۰/۰۷ میلی‌متر بر سال می‌باشد [۴۱].

بخش عمده خلیج همیشه فارس ایران، به دلیل عمق کم آب از ۱ تا ۶۰ متر، از پتانسیل مناسبی برای استفاده از توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت در نواحی ساحلی بهره‌مند می‌باشد. در بخش‌های نزدیک به ساحل که عمق کمتری دارند (با در نظر گرفتن اختلاف سطح آب در شب و روز به دلیل جزر و مد)، سازه مونوپایل پیشنهاد می‌گردد. سیستم

فونداسیون مونوپایل نصب سریع و آسان در ۲۴ ساعت دارد [۵۱] و تأثیرات محلی و زیست‌محیطی روی آن کم است [۵۲]. با اضافه کردن سیم‌های کششی به پایه مونوپایل می‌توان این ساختار را از آب‌های کم‌عمق به آب‌های عمیق منتقل کرد تا انعطاف‌پذیری افقی مونوپایل‌ها را کاهش دهد و در نتیجه به ثبات توربین بادی کمک کند [۴۲].

مونوپایل: در نواحی کم‌عمق یا دریاهایی با عمق متوسط حدود ۳۰ متر کاربرد دارند [۵۳; ۵۴]. مونوپایل یک تک‌لوله فولادی با قطر بزرگ است که به داخل بستر دریا نفوذ می‌کند. از دیگر عوامل تأثیرگذار می‌توان به شرایط خاک و شدت بارگذاری محیطی اشاره کرد. مونوپایل‌های موجود در سواحل معمولاً ۵ تا ۱۲ متر قطر دارند [۵۵; ۵۶] و ضخامت خارجی دیواره تا ۱۵۰ میلی‌متر است [۵۵]، طول جاسازی شده[1] (L) به قطر خارجی[2] (D) دارای نسبت باریکی یعنی حدود کمتر از ۱۰ می‌باشد و بنابراین به‌عنوان ساختارهای سفت و سختی رفتار می‌کنند که چرخش آن‌ها بیش از خم شدن است [۵۷; ۵۸].

ساختار جکت، سازه‌های سنگینی هستند و برای عمق آب در حدود ۲۰ تا ۵۰ متر مناسب می‌باشند. کشور ایران به دلیل داشتن سکوهای نفت و گاز در دریاها، زیرساخت‌های لازم در طراحی، ساخت و نصب سازه‌های جکت را داراست [۴۱]. طهماسبی‌فرد و همکاران در [۵۰] تأییدی بر پیشنهاد سازه‌های جکت برای این آب‌ها را ارائه دادند که آب‌های منطقه دیر و کنگان را برای این سازه‌ها مناسب دانسته‌اند.

جکت: این سازه یک ساختار فولادی سه یا چهار پا است که با جوش دادن مقاطع فولادی متصل می‌شوند و مهاربندها ایستادگی خوبی به ساختار می‌دهد. به‌طور کلی برای این سازه، از یک ساختار فولادی توخالی استفاده می‌شود و انواع متنوعی دارند [۴۳] (شکل ۹).

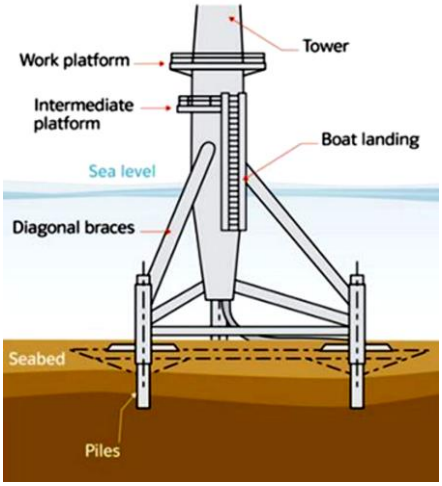
شکل ۹. فونداسیون جکت توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت [۵۹]

سازه‌های گرانشی، پیشنهاد خوبی برای خلیج فارس هستند. نسل سوم این سازه به دلیل سبک‌تر بودن، حمل‌ونقل آسان و پایداری مناسب با نواحی کم‌عمق خلیج فارس هماهنگی دارد و [۴۱] و [۳۷] مؤید این مسئله می‌باشد.

کمی فراتر تا ژرفای ۸۰ متر، شاید فونداسیون سه‌پایه از توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت، به دلیل نیاز حداقلی یا حتی بی‌نیازی به کنترل آبشستگی موضعی، گزینه مناسبی گمان شود اما به دلیل سنگینی این سازه‌ها و عملیات نصب و حمل‌ونقل سخت و دشوار به دلیل نیاز به یک محیط ساختمانی برای مونتاژ [۶۰] از نظر صرفه اقتصادی نمی‌توان آن را گزینه مناسبی دانست.

[1] Embedded Length
[2] Outer Diameter

ساختار سه‌پایه: گوشه‌های سازه سه‌پایه در محل‌های هر ساق نصب می‌گردند و با لنگرهایی به بستر دریا متصل می‌شوند. این لنگرها پایداری و ایستادگی خوبی در برابر بارهای جانبی ایجاد می‌کنند [۶۰]. این سازه باید در عمق بیش از ۷ متر تعبیه شود تا از برخورد کشتی‌ها به پایه‌های سازه جلوگیری شود. این فونداسیون برای عمق کم‌آب از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد و بیش از ۲۰ متر ژرفا نیاز است [۴۱] (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. فونداسیون سه‌پایه توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت [۶۰]

در آب‌های ژرف خلیج فارس می‌توان به ساختار نیمه‌غوطه‌ور از میان توربین‌های بادی شناور فراساحلی اندیشید؛ زیرا این سازه‌ها مستقل از شرایط و عمق آب هستند و به‌طور کلی ریسک پایینی دارند. امکان مونتاژ و تعمیر آن‌ها در خشکی میسر است و با توجه به پیشرفت روزافزون علم، قابلیت خوبی برای ارتقا به سطح بالاتری از تکنولوژی دارند. این سازه‌ها در معرض خوردگی و بارهای ناشی از یخ قرار می‌گیرند که در نواحی جنوبی به علت آب‌وهوای گرم، تکه‌های یخ وجود ندارد و این امر از بارهای اعمالی به سازه می‌کاهد و کنترل‌پذیری آن را تسهیل می‌کند.

با نزدیک شدن به تنگه هرمز و با افزایش عمق آب تا ۸۰ و ۲۰۰ متر سازه نوع اسپار به دلیل ساختار ساده و پایدار آن بهترین گزینه می‌باشند. این مناطق با وجود عمق بالا، به خشکی نزدیک هستند و عملیات حمل‌ونقل و مونتاژ این سکوها را بسیار ساده می‌کند. اما باید توجه داشت که به استناد انجمن انرژی بادی بریتانیا، برای استقرار توربین‌های بادی فراساحلی، حداقل فاصله ۵ کیلومتر از خط ساحلی باید رعایت شود [۴۱]. نکته مهم این است که به دلیل قرارگیری عمیق سکو در آب حتی در نامساعدترین وضعیت جوی نیز این سازه در معرض حداقلی امواج و بادها قرار می‌گیرد. به همین سبب، بازدهی این نوع دکل‌ها بسیار بالا می‌باشد. اسپارها حتی در صورت رهاشدن از کابل‌های مهار خود، به هیچ عنوان وارونه نمی‌شوند و تعادل خود را حفظ می‌کنند اما مسئله‌ای که استفاده از این فونداسیون منحصربه‌فرد را دشوار می‌سازد، اندازه بسیار عظیم سازه و درنتیجه حمل‌ونقل دشوار آن است که عملیات انتقال به سایت و نصب را نیز به‌مراتب دشوار می‌کند [۲۴-۲۶; ۲۸]. جریان‌های دریایی بیش از بارهای موج و باد بر سازه‌های اسپار تأثیر دارند و عمق آب‌خوری حدود ۱۱۰ متر دارند که امیری‌نیا و همکاران در [۶۱] صحت این مطلب را تأیید کرده‌اند.

اسپار: این فوندانسیون شامل یک استوانه شناور بسیار عظیم است که برای پایداری خود از ماسه استفاده می‌کند. مرکز ثقل این سازه بسیار کمتر از مرکز شناوری آن در زیر آب قرار می‌گیرد. قسمت‌های انتهایی سازه، وزن سنگینی دارند، این درحالی است که قسمت‌های فوقانی استوانه نزدیک به سطح آب، معمولاً توخالی می‌باشد و مرکز شناوری را بالا می‌برند. به‌طور کلی سکوهای اسپار شبیه به ستونی عظیم هستند. نحوه مهارسازی این سکوها نیز مانند پایه کششی است اما در نوع اسپار کابل‌ها بسیار عادی در دریا مهار می‌شوند. اسپارها به دلیل یک وزنه عظیم در انتهای سازه، پایداری بیشتری نسبت به پایه کششی‌ها دارند [۶۲; ۶۳]. شکل ۱۱ مدل SWOT برای این دسته از توربین‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فونداسیون اسپار

دریای عمان

طول خط ساحلی ایران در مجاورت دریای عمان حدود ۶۳۷ کیلومتر است و حداکثر عمق دریا در محدوده آب‌های ساحلی ایران در این ناحیه به بیش از ۲۰۰۰ متر می‌رسد. جلگه ساحلی ایران با عرض ۳۰ کیلومتر در مجاورت دریای عمان از حدود بندرعباس در تنگه هرمز تا گواتر در مرز با پاکستان امتداد می‌یابد [۲۹]. دریای عمان در حاشیه شمالی سیستم‌های جوی گرمسیری قرار دارد؛ به‌طوری که این دریا در معرض وزش بادهای موسمی مونسون قرار می‌گیرد. از آنجا که تغییرات فصلی در این دریا چندان طولانی نیست؛ این تغییرات موجب جریان‌های دریایی نمی‌گردند. جهت جریان‌های سطحی آب در دریای عمان در همه جا یکسان نیست و کاملاً به جهت وزش باد بستگی دارد. در فصل تابستان که بادهای موسمی جنوب‌غربی در دریای عمان حاکم هستند آب به داخل دریای عمان در جهت شمال‌غربی جریان دارد و یک جریان سطحی از دریای عمان به خلیج فارس وجود دارد. در فصل زمستان که بادهای موسمی شمال‌شرقی حاکم می‌شوند آب به خارج از دریای عمان جریان می‌یابد. بادهای شدید در دریای عمان در بهار و زمستان می‌وزند که شدت وزش این بادها در ماه‌های دی و بهمن بیش از سایر ماه‌ها است. جزر و مد در دریای عمان نامنظم است و از شرق به غرب بیشتر می‌شود؛ به‌طوری که در بخش شرقی حدود دو متر و در دهانه تنگه هرمز به حدود ۳/۵ متر می‌رسد. پدیده فراچاهش[1] یکی از پدیده‌هایی است که در شمال‌غرب دریای عمان و حوالی جاسک

[1] Upwelling

به‌وقوع می‌پیوندد. مطالعات نشان داده است که در ساحل دریای عمان به علت ویژگی‌های توپوگرافی، امواج به‌دام‌افتاده به فراوانی مشاهده شده‌اند [۲۹]. این دریا به دلیل دسترسی به اقیانوس هند در بخش مرکزی تا شرقی آن چیزی حدود ۲۵۰۰ متر عمق دارد ولی با وجود عمق زیاد، تا خشکی فاصله چندانی ندارد.

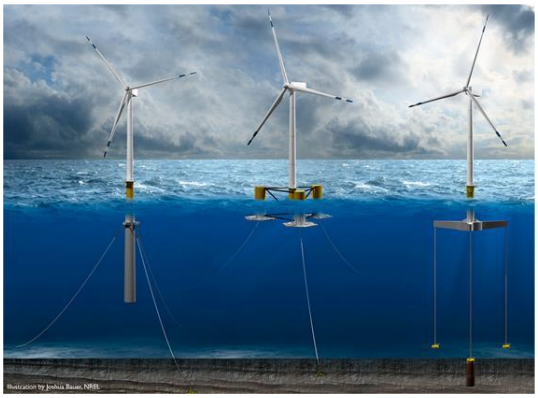
به دلیل عمق زیاد ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ متر آب، از میان توربین بادی شناور، سکوهای پایه‌کششی به دلیل کاربردهای فراساحلی و پایداری بالا در شرایط جوی نامناسب و قرارگیری در معرض امواج و طوفان‌های دریایی، مناسب‌ترین گزینه هستند. هزینه تولید تمام شده این نوع از توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های بادی پایه ثابت، علی‌رغم حفاری در عمق زیاد، کم‌تر می‌باشد و از طرفی، فرایند نصب این سازه‌ها بسیار ساده است؛ بنابراین می‌توانند به‌راحتی از پایگاهی به پایگاه دیگر انتقال یابند. سازه پایه کششی، حرکات تکانه‌ای و زاویه‌ای بسیار خوبی دارد اما برای استفاده از این سازه سه مانع اساسی وجود دارد: پیچیدگی نصب، لنگراندازی، تغییر در کشش لنگرها به دلیل تغییرات جزر و مد و اتصال فرکانسی بین دکل و سیستم از جمله این موارد هستند. این پیشنهاد براساس کار پژوهشی صادقی‌نیا و همکاران [۴۸] و رزاقی کلجاهی و همکاران [۳۷] ارائه شده است. در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در شبانه‌روز و تحت تأثیر قرارگرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی و لنگرگاهی سکوهای پایه کششی، به شرط وجود عمق مناسب ۱۸۰۰ متر، استفاده از این ساختار توصیه نمی‌شود.

پایه کششی: این نوع فونداسیون چهار پایه استوانه‌ای دارد. در این ساختار هم‌زمان با کشیدن دکل به سمت پایین توسط خطوط مهارسازی، آن را به سمت بالای آب نیز می‌کشاند. این ساختار، یک ستون اصلی بزرگ دارد که چندین خط کششی به آن وصل شده است. این خطوط می‌توانند کابل‌های کششی، لوله‌های تاندونی یا میله‌های توپر باشند. مقدار کشش خطوط مهارسازی بسیار مهم است و بی‌توجهی به این مهم، سبب واژگونی کل دکل خواهد شد. این کابل‌ها از حرکت عمودی[1] و حرکت چرخشی[2] سکو که توسط امواج خروشان دریا ایجاد می‌شوند جلوگیری می‌کنند. در این ساختار، پایه‌ها توسط پانتون‌های مثلثی به یکدیگر متصل شده‌اند. این فونداسیون در برابر حرکات افقی و عرضی۳ آزاد می‌باشد. سیستم لنگر در بستر دریا نیز می‌تواند از نوع گرانشی، مکشی یا پایه‌های فرورفته در بستر باشد و معمولاً وابسته به خاک است. این سازه‌ها ساختاری شناور دارند که تمرکز اصلی آن‌ها کنترل حرکت عمودی سازه می‌باشد که به کف دریا مهار شده‌اند. پیشرفته‌ترین مدل این ساختار در سال ۲۰۱۴ و مدل پلاستار۴ بوده است [۳۶; ۶۴]. شکل ۱۲ ویژگی‌های این سازه را براساس مدل SWOT نشان می‌دهد.

[1] Heave
[2] Roll & pitch
[3] Surge & sway
[4] PelaStar

شکل ۱۲. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فونداسیون پایه کششی

علاوه بر فونداسیون پایه کششی، سازه اسپار نیز به‌دلیل ساختار ساده‌ای که دارد و به دلیل پایداری بالا و امکان مونتاژ آن در محل پایگاه، در آب‌های عمیق دریای عمان گزینه مناسبی معرفی می‌گردد [۳۷].



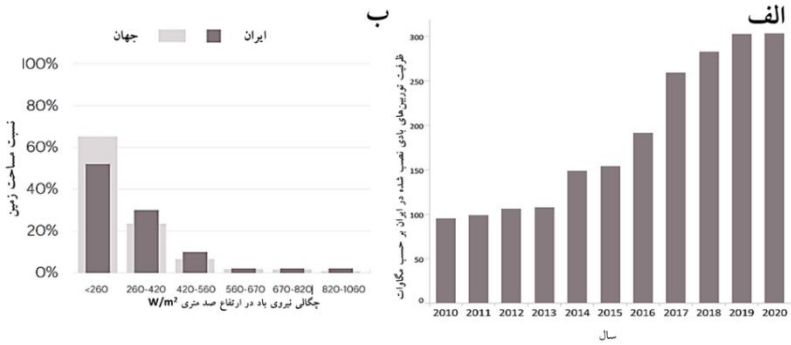
شکل ۱۳. انواع فوندانسیون توربین بادی شناور فراساحلی از سمت راست به‌ترتیب نوع نیمه غوطه‌ور، پایه کششی و اسپار [۶۴]

وضعیت فناوری توربین بادی و پتانسیل کشور ایران در مقایسه با کشورهای پیشرو

با بررسی گزارش‌های ساتبا[۱]، تاکنون تعداد ۲۶ نیروگاه بادی با ظرفیت مجموع ۳۰۹/۵ مگاوات در ایران احداث و بهره‌برداری شده است که این رقم سهم کل نیروگاه‌های بادی تا تیرماه ۱۴۰۰ از مقدار ۹۰۳/۳۶ مگاوات برق

[۱] سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق کشور ایران

تجدیدپذیر تولید شده در کشور ایران می‌باشد. مطابق شکل ۱۴-الف ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در ایران در سال ۲۰۲۰ میلادی معادل ۳۰۰ مگاوات می‌باشد و این آمار تنها برای نیروگاه‌های بادی در خشکی است؛ زیرا هیچ‌گونه توربین بادی دریایی تاکنون در ایران ثبت نشده است.



شکل ۱۴. الف) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در ایران برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ . ب) پتانسیل چگالی نیروی باد در شش کلاس آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا۱ در ارتفاع ۱۰۰ متر [۲۱].

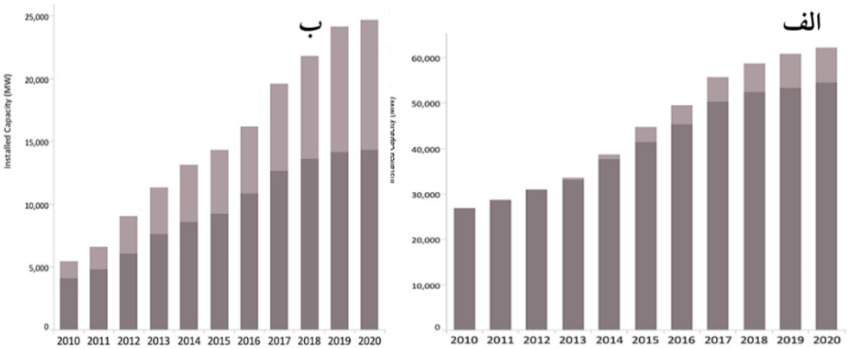
طبق آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، در شکل ۱۴-ب مناطق کلاس سوم و بالاتر به‌عنوان یک منبع باد خوب در نظر گرفته می‌شوند؛ به‌طوری که در کلاس سوم این شکل، چگالی نیروی باد در ارتفاع ۱۰۰ متر در ۱۰ درصد مناطق ایران مقدار ۴۲۰-۵۶۰W/m2 است.

به دلیل تلاش پژوهشگران و مهندسان ایرانی، در کشور ایران فناوری توربین بادی در حال پیشرفت می‌باشد. شرکت صبا نیرو به‌عنوان اولین شرکت سازنده توربین بادی در خاورمیانه در سال ۱۳۷۹ فعالیت خود را آغاز کرده و فناوری توربین‌های ۶۶۰ کیلووات از شرکت وستاس دانمارک را بومی کرده است. این شرکت با همکاری گروه مپنا توربین‌های بادی تا ۲/۵ مگاوات را تا طول پره ۵۰/۳ متر بومی‌سازی و تولید می‌کنند و توربین‌هایی با توان ۴ تا ۴/۵ مگاوات را در برنامه کار خود دارند. همچنین شرکت ویندمکس از سال ۱۳۹۴ با دست‌یابی به فناوری توربین‌های بادی محور عمودی ساوونیوس و داریوس، کار خود را آغاز کرد. مسئولیت طراحی و ساخت تجهیزات کارخانه‌ها و نیروگاه‌های بادی نیز بر عهده شرکت ماشین‌سازی اراک می‌باشد. علمداری در [۲۰] نیز فناوری ایرانی KAMI-600 که یک نیروگاه بادی ۶۰۰ کیلووات در سال ۱۳۹۲ مطرح شده است.

کشور ایران به‌دلیل بهره‌مندی از منابع نفت و گاز، دارای فناوری ساخت سکوهای نفتی در دریاها می‌باشد که این سازه‌ها با فونداسیون‌های پایه ثابت دریایی توربین بادی نیز بسیار تشابه دارند.

در دو دهه گذشته کشورهای بلژیک، چین، دانمارک، آلمان و انگلستان به‌عنوان کشورهای پیشرو در استقرار انرژی دریایی در بازار جهانی مدعی بوده‌اند و تا پایان سال ۲۰۲۰، ظرفیت کلی نصب شده از باد دریایی حدود ۳۴ گیگاوات اعلام شده است [۶۵]. در شکل ۱۵ ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در دو کشور آلمان و انگلیس برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در دو بخش خشکی و دریا نشان داده شده است که به‌ترتیب ۶۰۰۰۰ مگاوات و ۲۵۰۰۰ مگاوات می‌باشد.

[1] National Renewable Energy Laboratory (NREL)



شکل ۱۵. الف) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در آلمان برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰. ب) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در انگلستان برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰. (خاکستری کمرنگ برای بخش دریایی و خاکستری پررنگ برای بخش خشکی می‌باشد) [۲۱].

در این میان، چین بالاترین تأسیسات بادی دریایی را با بیش از ۳ گیگاوات ظرفیت نصب شده، ثبت کرد. پس از آن هلند با ۱/۵ گیگاوات، بلژیک با ۰/۷ گیگاوات و انگلستان با ۰/۴ گیگاوات قرار به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. تا به امروز، حدود ۹۰ درصد از ظرفیت جهانی نصب‌شده، در دریای شمال و مجاور اقیانوس اطلس [۶۶] قرار دارد. تا به امروز، بزرگ‌ترین مزرعه بادی دریایی جهان، هورنسی یک[1] انگلستان با ظرفیت ۱/۱۲ گیگاوات است [۶۷]. در آینده‌ای نه‌چندان دور، پیشرفت جهشی در صنعت توربین‌های بادی دریایی خواهیم داشت؛ به‌طوری که ژاپن هدف خود را برای باد دریایی تا سال ۲۰۴۰ از ۱۰ گیگاوات در سال ۲۰۳۰ به ۴۵ گیگاوات افزایش می‌دهد [۶۸] و هند اهداف بلندپروازانه‌ای از ۵ گیگاوات باد دریایی تا سال ۲۰۲۲ و ۳۰ گیگاوات تا ۲۰۳۰ تعیین کرده است [۶۹]. ایالات متحده آمریکا نیز هدف ۳۰ گیگاوات باد دریایی را تا سال ۲۰۳۰ تعیین کرده است [۷۰] و اهداف کره شمالی فراتر است؛ زیرا کشورش از برنامه ۴۳/۲ میلیارد دلار برای بزرگ‌ترین مزرعه بادی دریایی جهان با ظرفیت ۸/۲ گیگاوات در شهر ساحلی جنوب‌غربی سینان تا سال ۲۰۳۰ رونمایی کرده است [۶۷]. طبق سناریوی ۱/۵ درجه سانتی‌گراد IRENA، باد دریایی می‌تواند به ظرفیت کلی نصب شده حدود ۳۸۲ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و حدود ۲۰۰۲ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ برسد [۷۱]. فناوری توربین‌های بادی نیز تغییرات مثبتی خواهد داشت؛ برای مثال، شرکت توربین بادی دانمارکی Vestas در حال تحقیق روی یک توربین بادی دریایی بزرگ‌تر با ظرفیت نامی ۱۷ مگاوات است که می‌تواند در آینده، عملی شود [۷۲]. با توجه به پیشرفت‌های اخیر، اندازه توربین‌ها می‌تواند در یک یا دو دهه به ۲۰ مگاوات برسد [۶۶].

بررسی اقتصادی توربین‌های بادی

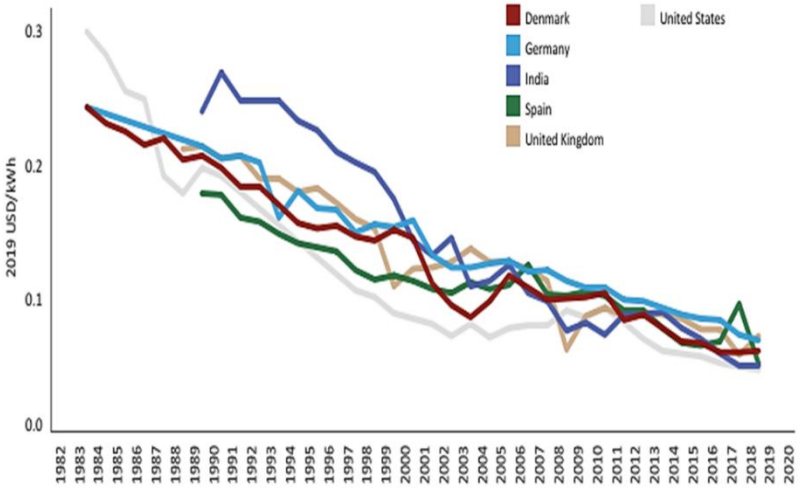
میانگین وزنی جهانی هزینه برق[2] برای بادهای دریایی به‌طور کلی از ۰/۱۶۲ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ به ۰/۰۸۴ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. با این حال، LCOE بین ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ افزایش یافته

[1] Hornsea 1
[2] Levelised Cost of Electricity (LCOE)

است؛ زیرا پروژه‌ها بیشتر به آب‌های عمیق‌تر منتقل شده‌اند که در سال ۲۰۱۱ به اوج ۰/۱۷۱ دلار/کیلووات ساعت در ساعت و ۰/۱۶۵ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۴ رسید و پس از آن با کاهش شدید مواجه شد.

شکل ۱۶. میانگین وزنی جهانی هزینه برق از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ برحسب دلار/کیلووات ساعت [۷۳]

در کشورهای پیشرو مانند چین، ژاپن، آلمان و انگلیس مقدار LCOE برای باد دریایی تا سال ۲۰۲۰ به‌شدت کاهش یافته است.



شکل ۱۷. میانگین وزن‌دهی LCOE پروژه‌های تازه وارد باد خشکی توسط کشورهای پیشرو از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۹ [۲۱]

به‌طور حتم هر طرحی پیش از شروع به کار نیاز به برآورد قیمت و درنتیجه سرمایه‌گذاری دارد. این هزینه‌ها شامل موارد مختلفی از جمله ساخت حمل‌ونقل و نصب خود توربین‌ها، فونداسیون توربین‌ها، اقدامات مربوط به انتقال نیرو

تولیدی به خشکی، عملیات کنترل و ... می‌باشد. در جدول ۱ درصد هزینه سرمایه‌گذاری پروژه شرکت زیمنس برای توربین ۲/۵ مگاواتی فراساحلی در هریک از این موارد، به‌عنوان نمونه بررسی شده است.

جدول ۱. هزینه سرمایه‌گذاری پروژه کلید در دست شرکت زیمنس با اندازه توربین ۲/۵ مگاوات دریایی با فاصله ۱۰ کیلومتر از ساحل [۲۸]

موارد موردنیاز به هزینه	درصد کل هزینه سرمایه‌گذاری
توربین‌های بادی	۴۹
زیرساخت‌های الکتریکی و اتصال به شبکه	۱۸
فونداسیون	۱۸
مانیتورینگ	۴
سایر هزینه‌ها	۱۱

در جدول ۲ نیز هزینه بهره‌برداری سالانه توربین ۲ مگاوات در خشکی ارائه شده است و درصد درآمد سالانه آن طبق آمار و ارقام، ۲۰ تا ۲۷ درصد برآورد گردیده است.

جدول۲. هزینه بهره‌برداری سالانه توربین بادی کلاس ۲ مگاوات [۲۸]

هزینه‌ها	درصد قیمت کارخانه قبلی	درصد درآمد سالانه
قرارداد تعمیر و نگهداری	۱.۰-۱.۲	۶.۵ -۵.۰
ذخایر تعمیر	۰.۸ - ۰.۵	۵.۰ -۳.۰
بیمه‌ها	۰.۶ - ۰.۵	۳.۵ -۳.۰
اجاره زمین	۱.۵ -۱.۰	۸.۰ -۶.۰
مدیریت/مشاوره	۰.۶ - ۰.۳	۳.۰ -۲.۰
متفرقه (برق از شبکه، تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها و ...)	۰.۳ - ۰.۲	۱.۵ -۱.۰
کل هزینه‌های سالانه	۵.۰ -۳.۵	۲۷.۵ -۲۰.۰

به‌طورکلی برای انتخاب توربین باید مقدار ظرفیت تولید توربین‌ها[1] محاسبه گردد که هرچه این مقدار بالاتر باشد؛ توربین، بازده اقتصادی‌تری دارد [۴۸]. با توجه به آنکه تمامی نیروگاه‌های بادی در خشکی نصب شده‌اند، برآورد هزینه-ها و مطالعات اقتصادی این انرژی پاک نیز در محدوده خشکی محاسبه شده است. در جدول ۳ هزینه‌های پایداری (منافع) نیروگاه‌ها با پنج فناوری مختلف با استفاده از روش NEW-DEA نشان داده شده است [۷۴].

[1] Capacity Factor (CF)

جدول ۳. هزینه‌های پایداری (منافع) نیروگاه‌ها با پنج فناوری مختلف با استفاده از روش NEW-DEA [۷۴]

هزینه‌های معادل پایداری (دلار بر کیلووات در سال) برای هر نیروگاه	هزینه‌های معادل سالانه	استفاده از آب	استفاده از زمین	انتشار معادل دی – اکسیدکربن	رادیو اکتیویته	سهم بازار	رشد بازار	ایجاد اشتغال	کارایی
فتوولتائیک	۱۱۱۰/۳	۰/۱۵۶	۳/۱۳	۲۴/۵	۰	۲۵/۹	۱۱۷/۶۲	۷۶/۳۶	۱۰۰
بادی	۵۶۱/۲	۰	۸/۴۲	۸/۸	۰	۴۰/۱	۱۸/۴۱	۱۴/۹۲	۶۵/۵
خورشیدی-حرارتی	۷۷۸	۲/۴۴۴	۲/۰۵	۱۴۲	۰	۰	۱۰/۵۳	۲۰/۱۹	۵۸/۸
سیکل ترکیبی توربین گازی	۱۵۳/۹	۴۲/۶۵۶	۰/۱۲	۲۲۳/۹	۰	۳۱۱/۸	۰/۳۱	۹/۶۵	۲۸/۶
سیکل ترکیبی توربین گازی‌سازی تجمعی	۶۲۵/۷	۶۵/۷۸۷	۰/۱۲	۴۹۰/۵	۰	۰	۰/۸۴	۹/۶۵	۲۸/۵

آزادسازی قیمت انرژی به‌خصوص هزینه سوخت مصرفی نیروگاه‌ها برمبنای قیمت‌های واقعی انرژی، استفاده از توربین‌های بادی را کاملاً توصیه‌پذیر می‌کند. اگر قیمت ریالی گاز به قیمت ریالی گازوئیل نزدیک‌تر شود یا قیمت ارز افزایش یابد، به دلیل بالا بودن هزینه برق تولیدی نیروگاه‌های گازی، نیروگاه‌های بادی بسیار مقرون‌به‌صرفه خواهند بود به‌طوری که دو نیروگاه غیرقابل رقابت با هم دانسته شده‌اند [۷۵]. علاوه بر موارد بیان شده، از جنبه ایجاد اشتغال، به استناد IRENA کشور ایران تا به امروز برای تعداد ۳۴۰۰ کار در حوزه انرژی باد، ظرفیت دارد.

نتیجه‌گیری

در راستای آخرین سند فناوری باد وزارت نیرو مبنی بر اقدام پژوهشگران به امکان‌سنجی توربین‌های بادی دریایی (فراساحلی) و اطلس‌شناسی دریاها، در پژوهش حاضر، پتانسیل آب‌های ایران با هدف نصب انواع مختلف توربین بادی دریایی بررسی شد و به همین منظور انواع توربین‌های بادی براساس مدل سوات بحث و بررسی گردیدند. انواع توربین‌های بادی دریایی شناور فراساحلی در سه فونداسیون اصلی اسپار، پایه کششی و نیمه‌غوطه‌ور و توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی در چهار فونداسیون مونوپایل، گرانشی، جکت و سه‌پایه ضمن تطبیق با شرایط اقیانوس‌شناسی دریاهای ایران، بررسی شدند و مزایا، معایب، فرصت‌ها و تهدیدهای هرکدام از انواع مورد بحث قرار گرفت. در بین فونداسیون‌های شناور نوع اسپار پایدارترین و مناسب‌ترین سازه برای نواحی نامناسب جوی ولیکن با حمل‌ونقل و نصب دشوار به دلیل داشتن ساختاری بسیار عظیم، معرفی شد. پس از آن نوع پایه کششی با پایداری کمتری نسبت به نوع اسپار به دلیل کابل‌های مهار و لنگرهای آن و تحت تأثیر قرار گرفتن در برابر جزر و مد ولی حمل‌ونقل آسان‌تر شرح داده شد. در آخر، نوع نیمه‌غوطه‌ور برای دریایی با ژرفای حدود ۴۰ تا ۵۰ متر و حساس در برابر خوردگی، بارها و امواج به‌عنوان سومین مدل بررسی شد. در بخش‌های کم‌عمق سازه مونوپایل و سازه گرانشی در سه نسل، برای ژرفای ۲۰ تا ۵۰ متر با فونداسیون پایه ثابت معرفی شدند که سازه مونوپایل به دلیل نصب آسان در کمتر از ۲۴ ساعت برای عمق‌های کمتر، مناسب دانسته شد و از بین سه نسل گرانشی، نسل اول برای اعماق کم ۳ تا

۷ متر، نسل دوم ژرفای ۴ تا ۲۰ متر و در نهایت نسل سوم برای اعماق ۱۳ تا ۲۰ با حمل‌ونقل آسان‌تر و طراحی سبک‌تر معرفی شدند. سازه‌های جکت و سه‌پایه نیز به‌عنوان دو دسته دیگر از توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت، برای دریاهایی با ژرفای ۵۰ تا ۸۰ متر با در نظر گرفتن سایر شرایط از حیث اقیانوس‌شناسی، مناسب دانسته شدند. به دلیل بالا بودن هزینه برق تولیدی نیروگاه‌های گاز و افزایش قیمت ریالی و ارز، نیروگاه‌های بادی به علل متعددی که در متن بیان شده است، مقرون‌به‌صرفه‌تر دانسته شده‌اند.

روش پیشنهادی براساس ویژگی‌های اقیانوس شناسی و مختصات جغرافیایی، هزینه حمل‌ونقل و امکان مونتاژ و سهولت نصب ارائه شده است. با توجه به مطالعه‌ای که در خصوص ویژگی و موقعیت جغرافیای دریاچه خزر صورت گرفت، به دلیل منابع باد کم، نوع پایه کششی این توربین‌ها با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری، نصب و حمل‌ونقل دشوار و نیاز آن به آب‌های عمیق ۱۸۰۰ متری، تنها برای آب‌های عمیق پیشنهاد می‌گردد. این درحالی است که سازه‌های مونوپایل و نسل سوم گرانشی‌ها گزینه‌های مناسبی برای ژرفای کم این دریا هستند. همچنین در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در شبانه‌روز و تحت تأثیر قرارگرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی و لنگرگاهی سکوهای پایه کششی، استفاده از این ساختار در نزدیکی سواحل به شرط عمق ۱۸۰۰ متری، توصیه نمی‌گردد این در حالی است که سازه‌های اسپار به دلیل عمق بالای آب در نواحی نزدیک به ساحل، پایداری بسیار خوب در شرایط جوی گوناگون از گزینه‌های مطلوب شناخته شدند.

References

[1] European Commission. (2020). *Boosting Offshore Renewable Energy for a Climate Neutral Europe*. European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_2096

[2] Feldhaus, P., & Vahlenkamp, T. (2010, October). *Transformation of Europe's Power System until 2050 Including Specific Considerations for Germany Electric Power and Natural Gas Practice*. https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client_service/epng/pdfs/transformation_of_europes_power_system.ashx

[3] Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable Energy*, *75*, 911-921. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074

[4] Heronemus, W. E. (1972, Sep. 11-13). *Pollution-free energy from offshore winds* 8th Annual Conference and Exposition, Marine Technology Society,, Washington, D.C. https://ci.nii.ac.jp/naid/10029324950/

[5] Barltrop, N. (1993). Multiple unit floating offshore wind farm (MUFOW). *Wind Engineering*, *17*(4), 183-188.

[6] Tong, K. C. (1998). Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *74-76*, 399-410. https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00036-1

[7] Henderson, A. R., & Patel, M. H. (1998, January). *Floating offshore wind energy.* BWEA Conference, https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Henderson/publication/30415925_Floating_Offshore_Wind_Energy/links/544d686b0cf24b5d6c42b522/Floating-Offshore-Wind-Energy.pdf

[8] Henderson, A. R., Watson, G. M., Patel, M. H., & Halliday, J. A. (2000). Floating Offshore Wind Farms–An Option? *Proceedings of the offshore wind energy in mediterranean and other European seas, Siracusa, Sicilia, Italy*, 15.

[9] Energy Technologies Institute. (2022). *Deep Water*. Energy Technologies Institute LLP. https://www.eti.co.uk/programmes/offshore-wind/deep-water

[10] Onstad, A. E., Stokke, M., & Sætran, L. (2016). Site Assessment of the floating wind turbine Hywind Demo. *Energy Procedia*, *94*, 409-416. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.205

[11] McPhee, D. (2020). *'World's largest' floating wind farm off Aberdeenshire delayed by six months*. Aberdeen Journals Ltd. https://www.pressandjournal.co.uk/fp/news/aberdeen-aberdeenshire/2561968/worlds-largest-floating-wind-farm-off-aberdeenshire-delayed-by-six-months/

[12] Pérez-Collazo, C., Greaves, D., & Iglesias, G. (2015). A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 141-153. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.032

[13] Ye, K., & Ji, J. (2018). The effect of the rotor adjustment on the vibration behaviour of the drive-train system for a 5 MW direct-drive wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *232*(17), 3027-3044. https://doi.org/10.1177/0954406217729418

[14] ETIPWind Executive CommitteeAlexander Vandenberghe, W. T., WindEurope,. (2020). *ETIPWindRoadmap*. Etipwind. https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-roadmap-2020.pdf

[15] Kaveh, A., & Sabeti, S. (2019). Optimal Design Of Jacket Supporting Structures For Offshore Wind Turbines Using Enhanced Colliding Bodies Optimization Algorithm [Research]. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, *9*(1), 129-145.

[16] Ye, K. (2018). *A study of the dynamic performance of the multi-system involved in the offshore floating type wind turbine*. https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/133157

[17] Aghamiri, S. R., . Ghadami, Farid. (2016). *Review of wind turbines and offshore wind turbines, advantages and limitations.* National Conference on Applied Engineering in Young and Elite Researchers Club, Islamic Azad University, West Branch of Tehran, Iran. https://www.sid.ir/Fa/Seminar/ViewPaper.aspx?ID=88247

[18] Department of Energy. (2014, June 20). *How Do Wind Turbines Work?* . energy.gov. https://www.energy.gov/articles/how-wind-turbine-works

[19] Demirtas, O. (2013). Evaluating the Best Renewable Energy Technology For Sustainable Energy Planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *3*(S), 23-33.

[20] Alamdari, E., . Wasti khabaz, Mahmoud,. Omidi, Hossein. . (2013). *wind energy and construction of wind power plants with iranian technology.* 1st national conference on new and clean energy, Hamedan, Iran. https://civilica.com/doc/210011/

[21] International Renewable Energy Agency. (2011-2020). *Data & Statistics*. IRENA - International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/statistics

[22] Zeinali, T., Jamil, M., & Najafi, G. H. (2018). *Technology of construction and installation of offshore wind farms for coastal areas of Iran.* Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World, Iran. https://civilica.com/doc/775571

[23] Zafar, U. (2018). *Literature Review of Wind Turbines.* (Chair of Geotechnical Engineering Bauhaus Universität, Weimar, Issue. https://www.researchgate.net/publication/329680977_Literature_Review_of_Wind_Turbines

[24] Chattot, J.-J. (2011). Wind turbine aerodynamics: analysis and design. *International Journal of Aerodynamics*, *1*(3-4), 404-444. https://doi.org/10.1504/IJAD.2011.038853

[25] David E. Watson. (2015). *Wind Turbine Power Coefficient (Cp)*. FT EXPLORING SCIENCE and TECHNOLOGY. https://www.ftexploring.com/wind-energy/wind-power-coefficient.htm

[26] Climate-Charts. (2021). *Wind Speed*. Climate-Charts. https://www.climate-charts.com/World-Climate-Maps.html

[27] Akhila Dharanikota & Suresh Rajendran. (2019, 07/23). *Numerical And Experimental Methods For Offshore Wind Turbine Design-A Review*. International Conference on Computational and Experimental Marine Hydrodynamics (MARHY 2018), Chennai,India. https://www.researchgate.net/publication/334625059_Numerical_And_Experimental_Methods_For_Offshore_Wind_Turbine_Design-A_Review

[28] Sangbaad. (2021). *Wind Turbin*. sangbaad. http://www.sangbaad.ir/category/%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%AA/%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%A8%D8%A7%D8%AF/

[29] Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science. (2021). *About INIOAS*. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science. http://www.inio.ac.ir/Default.aspx?tabid=1204

[30] Zereshkian, S., & Mansoury, D. (2018). The Assessment of Offshore Wind Energy as a source of Electrical Energy for Offshore Oil and Gas Platforms of the Caspian Sea. *Hydrophysics*, *4*(1), 57-68.

[31] Niknam Germi, H., Hakimzadeh, H., & Madadi, H. (2018). Feasibility Study of Installing Offshore Wind under Wind and Wave Environmental Loads in Caspian Sea. *Journal of Maritime Transport Industry*, *4*(1), 4-17. https://doi.org/10.30474/jmti.2018.64895

[32] Marinepress. (2019, October 4). *map and infographic of the depth of the caspian sea (caspian)*. Marinepress. https://marinepress.ir/

[33] Wandji, W. N., Natarajan, A., & Dimitrov, N. (2016). Development and design of a semi-floater substructure for multi-megawatt wind turbines at 50+ m water depths. *Ocean Engineering*, *125*, 226-237. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.021

[34] Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2005, October 26–28). *Engineering challenges for floating offshore wind turbines.* A National laboratory of the U.S. Department of EnergyOffice of Energy Efficiency & Renewable Energy, Copenhagen, Denmark. https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/38776.pdf

[35] RazaghiKaljahi, A., LotfollahiYghin, M. A. . (2013). *Investigating the performance of tension base wind turbines against gravity-environmental forces and how to increase the efficiency of offshore wind turbines in the southeast of the Caspian Sea.* The first National Conference on New and Clean Energy, Hamedan, Iran. https://civilica.com/doc/210099

[36] Nilsson, D., & Westin, A. (2014). Floating wind power in Norway-Analysis of opportunities and challenges. *CODEN: LUTEDX/TEIE*, 1-154.

[37] RazaghiKaljahi, A., LotfollahiYghin, M. A. . (2013). *Investigation and evaluation of the possibility of using different options of offshore wind turbines according to the environmental and geotechnical conditions of the coasts and seas.* The first National Conference on New and Clean Energy, Hamedan, Iran. https://civilica.com/doc/210099

[38] Esteban, M. D., Lopez-Gutierrez, J., & Negro, V. (2019). Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(3), 64. https://doi.org/10.3390/jmse7030064

[39] Pourshafie, F., Lashtehneshaei, M. A., & NezamivandChegini, A. H. . (2017). *Feasibility study of installing offshore wind turbines in the southwestern part of the Caspian Sea.* 16th Iran Hydraulic Conference, Ardabil, Iran. https://civilica.com/doc/727392

[40]Tabarsa, A. (2017). *Feasibility Study of Offshore Wind Turbine Project in Caspian Sea.* International Conference on Macro Science and Engineering Infrastructure Development., Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/730425

[41] Rezaei Monfared, H., . Sedaghat, Aref,. Watani Oskooi, Asghar. (2014). *Investigation of shallow northern and southern parts of the persian gulf for installation of offshore wind turbines according to environmental conditions.* The first regional conference on sea, development and water resources of the persian gulf coastal regions, Hormozgan, Iran. https://civilica.com/doc/393396/

[42] Malhotra, S. (2011, April 04). Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations. In D. I. Al-Bahadly (Ed.), *Wind Turbines* (pp. 36). InTech. https://doi.org/10.5772/15461

[43] Shrestha, S. (2015). *Design and analysis of foundations for onshore tall wind turbines* Clemson]. South Carolina. https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3296&context=all_theses

[44] Esteban, M. D., Couñago, B., López-Gutiérrez, J. S., Negro, V., & Vellisco, F. (2015). Gravity based support structures for offshore wind turbine generators: Review of the installation process. *Ocean Engineering*, *110*, 281-291. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.033

[45] Aarsleff. (2021). *Offshore Wind Turbine Foundations*. AARSLEFF. https://www.aarsleff.com/

[46] Seatowe. (2022). *Self-installing foundations optimized for production and logistics*. Seatower. http://seatower.com/home/

[47] Razmjo, A., & Shirmohammadi, R. (2016). Statistical Analysis and Potential Evaluation of Wind Energy in Dayyer port [Research]. *Iranian Journal of Energy*, *19*(1), 167-179.

[48] Sadeghian, A., Shirzadeh, A. . (2005). *A study of location selection methods for installing wind turbines.* 5th National Energy Conference, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/20191

[49] Persiangulfstudies. (2021). *Depth map of persian gulf, strait of hormuz and makran sea (oman).* The persian gulf studies center. http://www.persiangulfstudies.com/fa/pages/792

[50] Tahmasbi Fard, A., Azarsina, F., & Kazemi, S. (2017). *Feasibility study of offshore wind turbine construction with jacket guard structure in the Persian Gulf region using SACS engineering software.* The first international conference on new developments in civil engineering, Amol, Iran. https://civilica.com/doc/726970

[51] Junginger, M., Agterbosch, S., Faaij, A., & Turkenburg, W. (2004). Renewable electricity in the Netherlands. *Energy Policy*, *32*(9), 1053-1073. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00063-6

[52] Mingjun, B. (2017). Design Flow of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbine. *Southern Energy Construction*, *4*(S1), 56-61. https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011

[53] 4Coffshore. (2021). *Monopiles Support Structures by 4C Offshore*. 4Coffshore. https://www.4coffshore.com/

[54] Ali, H. M., Al-Esbe, I., & Alwan, H. M. (2021). A review of offshore wind turbines: global added capacity, monopile structure foundations stresses and deflection. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, *9*(2), 712-731. https://doi.org/10.21533/pen.v9i2.1879

[55] Achmus, M., Kuo, Y.-S., & Abdel-Rahman, K. (2009). Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics*, *36*(5), 725-735. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.12.003

[56] Anaya-Lara, O., Tande, J. O., Uhlen, K., & Merz, K. (2018). *Offshore Wind Energy Technology*. John Wiley & Sons. https://www.wiley.com/en-us/Offshore+Wind+Energy+Technology-p-9781119097761

[57] Peng, J., Clarke, B., & Rouainia, M. (2011). Increasing the resistance of piles subject to cyclic lateral loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *137*(10), 977-982. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000504

[58] Tomlinson, M. J., & Boorman, R. (2001). *Foundation design and construction*. Pearson education. https://www.pearson.com/uk/educators/higher-education-educators/program/Tomlinson-Foundation-Design-and-Construction-7th-Edition/PGM521364.html

[59] Smulders. (2022). *Beatrice Offshore Wind Farm | Jackets*. Smulders Group Smulders is a member of Eiffage Group. https://www.smulders.com/en/beatrice

[60] 4Coffshore. (2021). *Tripod Support Structures by 4C Offshore*. 4Coffshore. https://www.4coffshore.com/

[61] Amirinia, G. H. R., Zahbion, B., & Mazaheri, S. (2012). *Investigating the effect of sea currents on the dynamic response of offshore floating wind turbines.* 14th Marine Industries Conference, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/473527

[62] Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Weinstein, A. (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of renewable and sustainable energy*, *2*(3), 033104. https://doi.org/10.1063/1.3435339

[63] Savenije, L., Ashuri, T., Bussel, G., & Staerdahl, J. (2010). *Dynamic modeling of a spar-type floating offshore wind turbine.* European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC), Warsaw, https://www.researchgate.net/profile/Gerard-Van-Bussel/publication/254852069_Dynamic_modeling_of_a_spar-type_floating_offshore_wind_turbine/links/0deec53bc12eb20025000000/Dynamic-modeling-of-a-spar-type-floating-offshore-wind-turbine.pdf

[64] Jonkman, J. (2007). *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine*. Nrel. https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41958.pdf

[65] IRENA. (2011-2020). *Statistics Time Series*. IRENA - International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series

[66]IRENA. (2019). *FUTURE OF WIND*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf

[67] Hyonhee Shin. (2021, February 5). South Korea unveils $43 billion plan for world's largest offshore wind farm. *REUTERS*. https://finance.yahoo.com/news/south-korea-unveils-43-billion-102034227.html

[68] Aya Takada. (2020, Des 15). *Japan Plans Huge Offshore Wind Expansion to Hit Climate Goal*. Bloomberg L.P. https://www.bloombergquint.com/business/japan-to-lift-offshore-wind-capacity-fourfold-in-decade-to-2040

[69] Reve. (2020, December 9). *Offshore Wind Power in India: Key policy advances can lead to rapid gains for sector*. Evwind. https://www.evwind.es/2020/12/09/offshore-wind-power-in-india-key-policy-advances-can-lead-to-rapid-gains-for-sector/78461

[70] Adrijana Buljan. (2021, March 30). *US Jumpstarts Offshore Wind, Targets 30 GW by 2030* offshore wind. https://www.offshorewind.biz/2021/03/30/us-jumpstarts-offshore-wind-targets-30-gw-by-2030/

[71] IRENA. (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf

[72] Steve Hanley. (2021, February 12). *Vestas Unveils World's Most Powerful Offshore Wind Turbine*. cleantechnica. https://cleantechnica.com/2021/02/12/vestas-unveils-worlds-most-powerful-offshore-wind-turbine/

[73] IRENA. (2020, June). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. IRENA - International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf

[74] Shakouri.G, H., Kazemi, A., Abdolahpour, S., & Goldansaz, S.-M.-R. (2020). Economic, Social and Environmental Assessment of Electricity Generation from Renewable and Gas Technologies [Research]. *Iranian Journal of Energy*, *23*(3), 7-33.

[75] Motahari, S. A. A., Ahmadian, M., Abedi, Z., & Ghaffarzadeh, H. R. (2014). Economic Evaluation Of Wind Power Development In Iran Considering The Effect Of Energy Price Liberalization Policy. *Iranian Energy Economics*, *3*(10), 179-200.

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 237-252
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.130288
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.12.5

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Design and Implementation of Automatic License Plate Recognition System for Security Gates

Alireza Akoushideh[1*], Ali Tourani[2], Asadollah Shahbahrami[3], Mojtaba Masoumnezhad[4]

[1]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
[2]MSc, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
[3]Associated Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
[4]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.04.2021
Revised: 04.12.2021
Accepted: 05.09.2021

Keyword:
Car license plate recognition
Machine learning
ITS
Image processing
Computer vision

***Corresponding Author:**
Alireza Akoushideh
Email: *Akushide@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

In recent years, intelligent control of entry/exit points particularly based on image processing extracted from surveillance cameras, has been developed. The information obtained from such systems is important for monitoring the traffic and passage of vehicles. It can play an effective role in maintaining public safety and obtaining traffic statistics such as counting traffic at the gates of cities, statistical estimation of clients to organizations, and detecting and tracking suspicious traffic. Vehicles that enter a busy organization are identified at the time of entry and exit and a traffic log including the vehicle image with the license plate number and the date and time of entry and exit are recorded. In this research, a new method for extracting the license plate area is presented. The proposed method uses a combination of Canny vertical edge detection method and examination of connected components to identify candidate areas for the license plate. Experiment results in real conditions (images were taken from surveillance cameras in the organization supporting this research) showed that the proposed method can identify the license plate area of different vehicles in different lighting conditions with accuracy and readability of more than 98% and presents better performance than other state of the art methods.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۵۲-۲۳۷
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.130288
20.1001.1.23829796.1400.18.3.12.5
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی و اجرای سیستم تشخیص خودکار ناحیه پلاک خودرو برای گیت‌های ورودی اماکن حفاظتی

علیرضا آکوشیده[۱*]، علی تورانی[۲]، اسدالله شاه بهرامی[۳]، مجتبی معصوم نژاد[۴]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
۳- دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلید واژگان:
تشخیص خودکار پلاک خودرو
یادگیری ماشین
سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند
پردازش تصویر
بینایی ماشین

***نویسنده مسئول:** علیرضا آکوشیده
پست الکترونیکی:
Akushide@tvu.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، کنترل هوشمند مبادی ورودی و خروجی، به‌ویژه مبتنی بر پردازش تصاویر، بسیار توسعه یافته است. اطلاعات به‌دست‌آمده از چنین سیستم‌هایی برای نظارت بر ترافیک، عبور و مرور وسایل نقلیه مهم می‌باشد. این رویکرد می‌تواند در حفظ امنیت عمومی نقش مؤثری داشته باشد و در به دست آوردن آمار ترافیک مانند شمارش تردد در دروازه‌های شهرها، برآورد آماری مشتریان از سازمان‌ها، شناسایی و ردیابی عبور و مرور مشکوک نقش مؤثری داشته باشد. وسایل نقلیه‌ای که وارد یک سازمان پرتردد می‌شوند، در زمان ورود و خروج شناسایی شده و گزارش ترافیک آن‌ها، از جمله تصویر وسیله نقلیه با شماره پلاک و تاریخ و زمان تردد، ثبت می‌شود. در این تحقیق، ما یک روش جدید برای استخراج ناحیه پلاک خودرو پیشنهاد می‌دهیم. روش ما از ترکیب روش تشخیص لبه عمودی Canny و بررسی اجزای متصل برای شناسایی مناطق نامزد پلاک استفاده می‌کند. آزمایش در شرایط واقعی (تصاویر مستخرج از دوربین‌های نظارتی در سازمان حامی این تحقیق) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند ناحیه پلاک خودروهای مختلف را در شرایط نوری مختلف با دقت و خوانایی بیش از ۹۸ درصد شناسایی کند و عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های جدید نمایش دهد.

مقدمه

سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند[1] که به اختصار ITS نامیده می‌شوند، جزو جدیدترین راه‌کارهای ارائه‌شده برای مدیریت ترافیک یا کنترل تردد درنظر گرفته می‌شوند. این سامانه‌ها از راه‌حل‌های جدید و مبتنی بر علوم روز دنیا برای حل معضلات ترافیکی، بهبود ایمنی معابر و اهداف نظارتی، استفاده و منابع موجود را با کمک فناوری‌های جدید الکترونیکی، ارتباطی و پردازش اطلاعاتی بهینه‌سازی می‌کنند [۱]. حوزه‌های کاربردی سامانه‌های ITS، در نمایش لحظه‌ای وضعیت ترافیک، اندازه‌گیری سرعت خودروها، تشخیص تخلفات رانندگی و موارد متنوع دیگر است که در این میان، نظارت بر تردد وسایل‌نقلیه به دلیل اهمیت گسترده در اهداف امنیتی، نقش بسیار پررنگی دارد [۲]. امروزه در بسیاری از اماکن مهم مانند دانشگاه‌ها و محیط‌های نظامی که نیاز به کنترل رفت‌وآمد افراد در آن‌ها بیشتر احساس می‌شود، دوربین‌های نظارتی به‌عنوان یکی از ابزارهای سامانه‌های ITS تعبیه شده است که بیشتر به‌منظور ثبت و بایگانی ترددها با هدف بازبینی‌های بعدی مورداستفاده قرار می‌گیرند. درواقع خودکارسازی فرایند نظارت بر تردد در چنین مجموعه‌هایی، قابلیت بهبود در راستای افزایش دقت، کاهش نیاز به نیروی انسانی و کاهش هزینه‌ها را دارد [۳].

طی سال‌های اخیر، برای بهبود شناسایی مالکین خودروها و کنترل تردد، استفاده از سیستم‌های هوشمند مبتنی بر ویژگی‌های بصری[2] است. برای این منظور، سامانه از یک دوربین نظارتی نصب‌شده در مقابل درب ورودی استفاده می‌کند و از پلاک خودرویی که قصد ورود به محوطه را دارد تصویر تهیه می‌کند. این کار با پردازش تصویر خروجی دوربین انجام می‌گردد و بهترین زمان برای تهیه تصویر توسط الگوریتم‌های تشخیص ناحیه پلاک، انتخاب می‌شود [۴]. در مراحل بعدی، تصویر پلاک برای پردازش دقیق‌تر وارد فاز محاسباتی نرم‌افزار می‌شود که با انجام پیش‌پردازش[3]، تصویر پلاک تبدیل به یک تصویر واضح شود و سپس توسط الگوریتم‌های جداسازی[4] و سپس تشخیص حروف و اعداد[5]، کاراکترهای پلاک خوانده و جداسازی شوند. خروجی این سیستم‌ها، تعدادی تصویر تهیه‌شده از خودروها حین ورود/خروج از مقابل درب تردد به‌همراه ویژگی‌های دیگری مانند حروف پلاک، نام مالک خودرو، مجاز بودن یا نبودن خودرو برای ورود و مواردی از این دست خواهد بود.

شناسایی شماره پلاک خودروها در تصویر نیازمند آن است که سه گام اساسی به شکلی پشت‌سرهم اجرا شوند که این سه گام شامل تشخیص محل پلاک (ناحیه مستطیلی دور پلاک خودرو)، جداسازی حروف و ارقام پلاک و درنهایت تشخیص حروف و ارقام جداشده در مرحله دوم است. از آنجایی که هریک از این گام‌ها می‌تواند توسط الگوریتم‌های مختلفی انجام شود، فرایند تشخیص پلاک خودکار خودروها روش‌های اجرای مختلفی دارد. روش‌های مبتنی بر ویژگی خودرو که پلاک خودرو نیز جزو آن محسوب می‌شود، در دنیای امروز بسیار فراگیر هستند که این ویژگی‌ها توسط اعمالی نظیر لبه‌یابی، گوشه‌یابی، یافتن کانتورها و الگوریتم‌های دیگر یافت می‌شوند و عموماً برای تشخیص صحیح، برچسب‌گذاری می‌گردند. تکنیک‌های موجک‌های Haar [۵]، آنالیز اجزای اساسی (PCA) [۶]، تبدیلات منحنی‌واره و مدل گرافیک رایانه‌ای به‌عنوان روش استخراج ویژگی بسیار موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته‌اند. غالب راه‌کارهای این دسته، بخشی برای آموزش به سیستم توسط داده‌های آموزشی برای مدل‌سازی مناسب دارند. در این میان، یکی از ویژگی‌هایی که بسیار موردتوجه افراد در تشخیص پلاک واقع می‌شود استفاده از لبه‌های تصویر است. تشخیص لبه[6] فرایندی است که راه‌کارهای مختلفی مانند استفاده از گرادیان تصویر، یادگیری پیکسلی و سلولی، استفاده از تفاوت

[1] Intelligent Transportation Systems
[2] Vision-based Approaches
[3] Pre-Processing
[4] Segmentation
[5] Optical Character Recognition (OCR)
[6] Edge Detection

شدت نور و رنگ در کانال‌های تصویری مختلف و ... دارد و الگوریتم‌های معروفی مانند لبه‌یابی Sobel، Canny، Roberts، Prewitt و ... در آن یافت می‌شوند. برخی از این الگوریتم‌ها قادرند در فضای رنگی و خاکستری لبه‌های تصویر را پیدا کنند. در این میان، معمولاً از پیکسل‌های همسایه برای تشخیص لبه استفاده می‌شود و هرگونه تغییر ناگهانی در شدت نور یا رنگ تصویر، نمایانگر یک لبه است. برای این منظور، تلاش بسیاری در استفاده از راه‌کارهای مبتنی بر تشخیص پلاک در طول زمان شده است. الگوریتم شماره ۱، شبه‌کد فرایند کنترل تردد مبتنی بر بینایی ماشین و با محوریت تشخیص پلاک را به نمایش می‌گذارد.

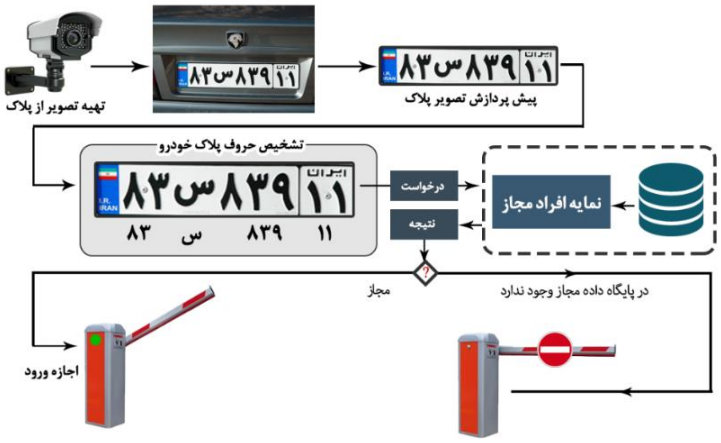
الگوریتم ۱. شبه‌کد فرایند کنترل تردد مبتنی بر بینایی ماشین و با محوریت تشخیص پلاک

Begin

1. Input: video stream from CCTV camera
2. Detection of License-plate area
3. Make a still image *I*
4. Pre-processing/Cropping
5. License-plate character recognition
6. Compare License-plate code *C* to vali list L
7. If (*C* is a valid person *P*):
    a. Log and open the gate.
8. Else
    a. Log and make decision.

End.

شکل ۱ نیز به‌صورت تصویری، فرایند کنترل تردد بیان شده در الگوریتم فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمای کلی فرایند کنترل تردد مبتنی بر بینایی ماشین و با محوریت تشخیص پلاک

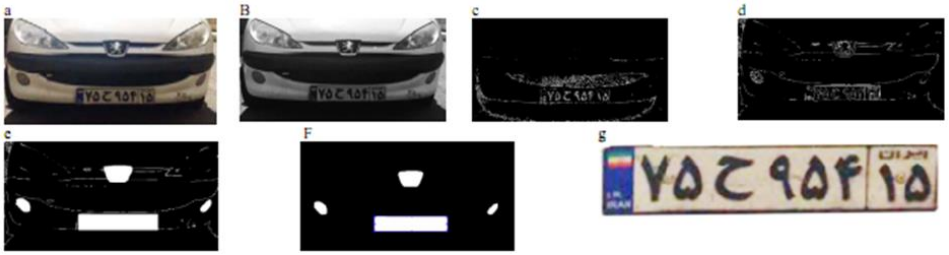
شایان ذکر است که جداسازی حروف پلاک، تشخیص حروف و ارائه خروجی مناسب از دیگر مراحل تشخیص پلاک می باشد که مورد بحث این تحقیق نمی‌باشند. در این مقاله، یک راه‌کار نرم‌افزاری مبتنی بر پردازش تصویر برای تشخیص ناحیه پلاک خودروها ارائه شده است که قادر است فرایند خودکارسازی تشخیص و جداسازی ناحیه پلاک را

با دقت بالای ۹۷ درصد و روی تصاویر تهیه‌شده از دنیای واقعی انجام دهد. بخش‌های دیگر این مقاله، به این شرح ارائه شده‌اند: در بخش دوم، برخی از روش‌های جدید و نیز متداول کنترل تردد مبتنی بر پلاک ارائه شده‌اند. بخش سوم به معرفی مدل پیشنهادی و بخش چهارم، به بررسی نتایج عملکرد پرداخته خواهد شد. درنهایت، مقاله با یک نتیجه‌گیری در بخش پنجم به پایان می‌رسد.

روش‌های جدید و متداول کنترل تردد مبتنی بر تشخیص پلاک

تشخیص ناحیه پلاک خودرو به دلیل کاربرد گسترده و نیاز به روزآمدی الگوریتم‌های استفاده‌شده و افزایش دقت، چندسالی است که بسیار موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. ویژگی‌های ظاهری قابل‌استخراج در این روش‌ها عموماً توسط اعمالی نظیر لبه‌یابی[1]، گوشه‌یابی[2]، یافتن کانتورها[3] و الگوریتم‌های دیگر یافت شده و عموماً برای تشخیص صحیح، برچسب‌گذاری[4] می‌گردند. در یک راه‌کار تشخیص پلاک مبتنی بر تشخیص لبه، از روش سه همسایه در تشخیص ناحیه و حروف موجود درون پلاک استفاده شده است [۷]. در این روش، لبه‌یابی کامل انجام نشده و تنها همسایه‌های پیکسل مرکزی برای تشخیص لبه درنظر گرفته می‌شود. از آنجایی که همپوشانی مناسبی در میان پیکسل‌ها وجود دارد، لبه‌یابی به شکلی نازک و بهینه انجام می‌شود. برای این منظور، نویسندگان مقایسه‌ای را با روش‌های مرسوم سوبل، رابرتز و پرویت انجام دادند که نتایج آزمایش‌ها حاکی از دقت بالاتر این روش روی تصاویر مختلف بوده است. در پژوهشی دیگر، استفاده از تشخیص پلاک مستقل از چرخش به‌عنوان راه‌کاری مناسب برای پیدا کردن ناحیه پلاک در تصاویر دنیای واقعی که دارای پیچیدگی‌های مختلفی است استفاده شده است که ناحیه پلاک خودرو توسط لبه‌یابی و چرخش لبه‌ها در زوایای مختلف پیدا شده و هرجا که تراکم بیشتری در نواحی لبه‌یابی‌شده وجود داشته باشد، می‌توان انتظار داشت که ناحیه موردنظر کاندیدای مناسبی برای وجود پلاک خودرو باشد [۸]. در این تحقیق، ناحیه پلاک خودرو توسط لبه‌یابی و چرخش لبه‌ها در زوایای مختلف پیدا شده و هرجا که تراکم بیشتری در نواحی لبه‌یابی‌شده وجود داشته باشد، می‌توان انتظار داشت که ناحیه موردنظر کاندیدای مناسبی برای وجود پلاک خودرو باشد. البته در این روش حروف و ارقام با همان زاویه تصویر اصلی از داخل پلاک استخراج‌شده و با استفاده از ممان زرنیک، ویژگی‌های آن‌ها استخراج می‌شود. تابع ممان زرنیک نیازی به چرخش کارکترها ندارد و از ممان‌های متعامد که به‌راحتی برای ساخت ویژگی مستقل از چرخش استفاده می‌شوند، بهره گرفته شده است. البته باید گفت که لبه‌یابی Prewitt نیز برای تشخیص لبه‌های پلاک پیش از اعمال KNN مورداستفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم KNN به‌سادگی می‌تواند روی داده‌های مختلف اجرا شده و به دلیل مقاومت بالا در برابر نویز، برای کلاسه‌بندی و جداسازی نواحی پلاک از غیرپلاک استفاده می‌شود. این روش برای پلاک‌های ایرانی تا ۹۶.۱ درصد قادر است که تشخیص پلاک صحیح داشته باشد. تصویری از عملکرد این روش در شکل ۲ نمایش داده شده است.

[1] Edge Detection
[2] Corner Detection
[3] Counters
[4] Labeling

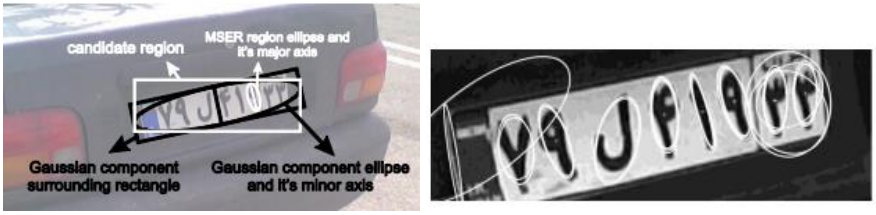


شکل ۲. تشخیص لبه موجود در پلاک به روش ترکیبی KNN و SVM [۸].

تحقیق دیگری که برای تشخیص پلاک ایرانی ارائه شده است از یک مدل هیبرید برای یادگیری ویژگی‌های پلاک و سپس تشخیص آن‌ها بهره می‌برد [۹]. در این پژوهش، از الگوریتم K-نزدیک‌ترین همسایه (KNN)[1] برای پیدا کردن نواحی پلاک و حروف درون آن و همچنین ماشین بردار پشتیبان[2] چند سطحی برای یادگیری سیستم استفاده می‌شود. در پژوهشی دیگر، سیستمی بر اساس راه‌کار محلی‌سازی ناحیه پلاک طراحی شده است که قادر است محتوای محلی درون پلاک را با یک کلاسه‌بند ترکیبی برای تشخیص حروف استفاده کند [۱۰]. این روش از یک راه‌کار تطابق الگوی تغییریافته از پلاک‌های اروپایی استفاده می‌کند که تا حدودی مشابه ساختار پلاک‌های داخلی ایران است. همچنین برای تشخیص شدت رنگ هر پیکسل، از جستجوی ترتیبی برای جداسازی کاندیداهای تشخیص پلاک بر اساس نسبت طول و عرض آن‌ها استفاده می‌کند. الگوریتم‌های تشخیص هاف[3]، سری فوریه و تبدیلات موجک نیز برای بهبود تشخیص ناحیه پلاک استفاده شده است. ارزیابی‌ها نشان داده است که دقت این سیستم در تشخیص صحیح کاراکترهای پلاک ۹۶ درصد بوده است. همچنین در پژوهشی دیگر از راه‌کارهای تشخیص الگو برای شناسایی حروف پلاک خودروها استفاده شده است که دقتی بیش از ۹۵ درصد را به همراه داشته است [۱۱]. در این روش، از رأی‌گیری برای تشخیص ناحیه پلاک استفاده شده و درنهایت ناحیه کاندیدی که بیشترین رأی را کسب کرده است، ناحیه مناسب پلاک خواهد بود. برای آزمودن سامانه، از تصاویر تهیه‌شده واقعی توسط گوشی موبایل استفاده شده است که معضلات مختلفی نیز در تصاویر وجود داشته است. راه‌کار دیگری برای تشخیص پلاک‌های نسبتاً نامشخص ایرانی که به‌واسطه سرعت بالای خودروها یا شرایط روشنایی و آب‌وهوایی چالش‌برانگیز تغییر کرده‌اند، ارائه شده است [۱۲]. در این پژوهش دقتی در حدود ۹۷ درصد در تشخیص ناحیه پلاک و ۹۱ درصد در تشخیص صحیح کاراکترها ارائه شده است که به‌واسطه استفاده از الگوریتم‌های حرکت پنجره‌ای برای تشخیص لبه‌های ناحیه پلاک، نواحی متصل[4] برای شناسایی ناحیه‌های کاندید پلاک بر اساس اتصال لبه‌ها، اعمال نسبت طول و عرض پلاک واقعی برای تشخیص صحیح و همچنین الگوریتم RANSAC برای تخمین بهترین حالت شناسایی حروف پلاک بوده است. در پژوهش دیگر، از راه‌کار خوشه‌بندی برای تشخیص حروف درون پلاک استفاده شده است که بر اساس میزان احتمالات موجود در حروف بودن یا نبودن آن کار می‌کند. اساس این روش نیز بر لبه‌یابی Canny استوار است و می‌تواند ناحیه پلاک و حروف درون آن را تا حد زیادی تشخیص دهد. همچنین الگوریتم EM یا حداکثر تخمین ممکن بر اجزای گوسین ناحیه پلاک، باعث شده تا تخمین دقیقی برای پلاک خودرو براساس اندازه، ابعاد و نسبت طول و عرض آن وجود داشته

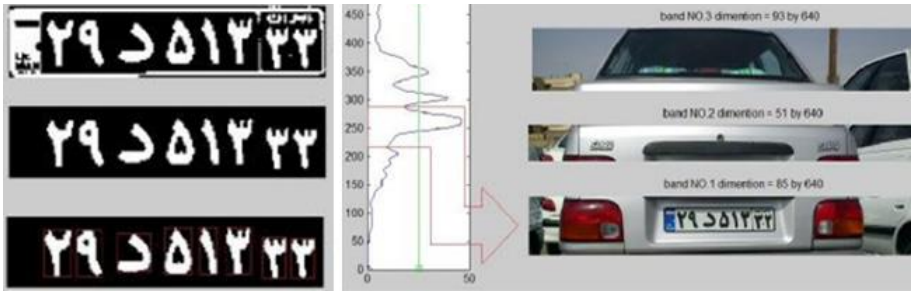
[1] K-Nearest Neighbors (KNN)
[2] Support Vector Machine (SVM)
[3] Hough
[4] Connected Components

باشد. تصویری از چگونگی عملکرد این روش را در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. دقت روش پیشنهادی یادشده بیش از ۹۳ درصد ارزیابی شده است.



شکل ۳. تشخیص پلاک و حروف آن توسط اعمال گوسین [۱۲].

راهبرد دیگری جهت تشخیص خودروها در جاده، از روشی مستقل از زاویه و اندازه مبتنی بر ناحیه پلاک و تشخیص حروف آن توسط شبکه عصبی استفاده کرده‌اند [۱۳]. در این روش، پس از تبدیل تصویر دوربین به خاکستری و اعمال لبه‌یابی Sobel در دو جهت افقی و عمودی، با تجمیع تعداد لبه‌های عمودی تصویر نواحی کاندید برای ناحیه پلاک استخراج می‌شوند. این ناحیه دارای تعداد زیادی لبه عمودی (به دلیل وجود حروف پلاک و نوار دور آن) است و با اعمال عمل تصویرسازی، مانند آنچه در شکل ۴ نمایش داده‌شده است، به‌عنوان کاندید انتخاب خواهند شد. خروجی عمل تصویرسازی، ارائه تعدادی ناحیه به‌صورت ناحیه بین خطوط افقی است که پلاک خودرو در آن حضور دارد. با اجرای عملیات مورفولوژی‌ای مناسب روی این نواحی، نویزهای اضافی حذف‌شده و تصویر دودویی حاوی کاندیدهای پلاک وارد مرحله ارزیابی می‌شوند. در مرحله ارزیابی، فاکتورهایی شامل نسبت ابعاد پلاک، نسبت مساحت ناحیه به مساحت مستطیل محاطی، تعداد لبه‌های عمودی موجود و وجود کادر آبی‌رنگ معرف پلاک ملی امتیازدهی شده و محتمل‌ترین ناحیه پلاک بودن انتخاب و جداسازی می‌شود. شناسایی پلاک در تصویر معرف وجود خودرو در آن است و روش موردنظر از این ویژگی جهت واکشی خودروها استفاده می‌کند. همچنین در کاربردهای بیشتر، از شبکه عصبی برای جداسازی حروف پلاک و تشخیص آن بهره می‌جوید که به دلیل متفاوت بودن اهداف این بخش از مقاله با کاربردهای تشخیص خودرو، بررسی نمی‌شوند. با اعمال روش ارائه‌شده بر روی مجموعه داده شامل ۲۳۰ تصویر خودرو، دقت شناسایی ناحیه پلاک در آن در حدود ۸۷/۸۳ درصد بوده است.



شکل ۴. تصاویری از چگونگی عملکرد روش مبتنی بر ناحیه پلاک در تشخیص خودرو [۱۳].

یکی دیگر از راه‌کارهایی که پژوهشگران ارائه کرده‌اند استفاده از یادگیری عمیق[1] بوده که در آن فرایندهای تشخیص ناحیه پلاک و سپس استخراج اعداد و حروف فارسی درون آن به‌صورت یک مسئله دسته‌بندی یکپارچه اجرا شده است [۱۴]. در این روش، از دو شبکه عصبی عمیق آموزش‌دیده‌شده توسط نسخه سوم YOLO استفاده شده که شبکه اول روی داده‌های تصویری پلاک‌های ایرانی تمرکز دارد و ناحیه پلاک را پس از شناسایی در تصویر، جداسازی می‌کند و به شبکه دوم می‌دهد. در شبکه دوم، هریک از حروف و اعداد فارسی که در ناحیه پلاک ورودی یافت شود، با یکی از کلاس‌های موجود تطبیق داده می‌شود. کلاس‌ها شامل اعداد (۰ تا ۹) و حروف (کاراکترهای فارسی معمول و علامت ویلچر برای خودروهای رانندگان کم‌توان) است. این روش دقت ۹۵.۰۵ درصد در شناسایی پایان-به-پایان[2]، از زمان تحویل تصویر تهیه‌شده از خودرو در شرایط واقعی به شبکه تا استخراج صحیح تمامی حروف و اعداد را دارد. همچنین دقت مرحله تشخیص ناحیه پلاک در تصاویر در روش مذکور ۹۷.۸ درصد گزارش شده است.

همان‌طور که اشاره شد راه‌کارهای مختلفی برای تشخیص ناحیه پلاک خودروها وجود دارند که برای بررسی مناسب بودن آن‌ها لازم است که روی مجموعه داده‌های واقعی آزمایش شوند و از دیدگاه دقت تشخیص پلاک در شرایط روشنایی و آب‌وهوایی مناسب بررسی گردند. ازاین‌رو و برای اثبات میزان کاربردی بودن راه‌کار ارائه‌شده، یک مجموعه داده واقعی تهیه گردید و نسخه پیاده‌سازی‌شده مدل پیشنهادی نیز روی آن آزمون و بررسی شد که در بخش بعدی به آن اشاره خواهد شد.

مدل پیشنهادی

برای طراحی یک مدل مناسب و کاربردی تشخیص ناحیه پلاک لازم است که با استفاده از منابع سخت‌افزاری موجود، یک ساختار کارا و مناسب ایجاد شود. در این فاز و ازآنجاکه ساختارهای پیچیده مانند پردازش‌های یادگیری عمیق، نیاز به یک سیستم سخت‌افزاری قدرتمند و مدت‌زمان طولانی برای طراحی مدل دارد، به دلیل محدودیت زمانی تمرکز اصلی مدل طراحی‌شده به یک ساختار «حداقل محصول قابل‌اجرا[3]» معطوف شده است. مدل طراحی‌شده قادر است که یک مجموعه ویدئویی را به‌عنوان ورودی، دریافت و فریم‌های متوالی آن را پردازش و درنهایت یک مجموعه تصویر خروجی مناسب ایجاد کند. سیستم باید ابتدا قابلیت پیش‌پردازش لازم برای تبدیل تصویر ورودی به یک تصویر قابل پردازش را داشته باشد. سپس ویژگی‌هایی شناسایی پلاک خودرو مورد جستجو قرار گیرد و ناحیه پلاک خودرو تشخیص داده شود. این ناحیه برای پردازش بیشتر در حوزه جداسازی کاراکترهای پلاک و سپس تشخیص هریک از آن‌ها تحویل ماژول‌های جداساز[4] و تشخیص کاراکتر[5] قرار می‌گیرد. درنهایت پلاک تشخیص داده‌شده برای مقایسه با مجموعه پلاک‌های موجود در پایگاه داده مورد جستجو قرار می‌گیرد و مجاز بودن یا نبودن خودرو بررسی می‌شود. الگوریتم شماره ۲، شبه‌کد شیوه تشخیص پلاک را به اختصار نمایش داده است.

الگوریتم ۲. شبه‌کد شیوه تشخیص پلاک

ورودی: دریافت ویدئوی RGB به عنوان ورودی	
أ.	استخراج فریم‌های ویدئو و ذخیره آنها در قالب تصاویر RGB
ب.	تبدیل تصویر RGB به طیف خاکستری
ج.	اعمال فیلتر میانه و میانگین‌گیر به‌منظور کاهش نویز احتمالی

[1] Deep Learning
[2] End-to-end
[3] Minimum Valuable Product (MVP)
[4] Segmentation
[5] Character Recognition

ورودی: دریافت ویدئوی RGB به عنوان ورودی	
د.	بهبود کیفیت شدت روشنایی تصاویر با اعمال روش مسطح‌سازی هیستوگرام
ه.	محاسبه قدرمطالق اختلاف فریم پردازش شده (تفاضل پس زمینه)
و.	یافتن لبه‌های عمودی با تکنیک Canny
ز.	تبدیل تصویر طیف خاکستری به باینری با تکنیک سطح آستانه
ح.	اعمال کامپوننت‌های متصل برای فیلترکردن لبه‌های قوی
ط.	حذف لبه‌های ضعیف با تکنیک سطح آستانه
ی.	اعمال عملگرهای مورفولوژی (بستن و بازکردن)
ک.	استخراج حباب‌های هدف به کمک تکنیک نسبت مشخص ارتفاع به پهنا
ل.	ترسیم کادرهای محدودکننده برای هر ناحیه منتخب بر روی تصویر RGB
خروجی: نواحی منتخب پلاک محصور شده در کادر	

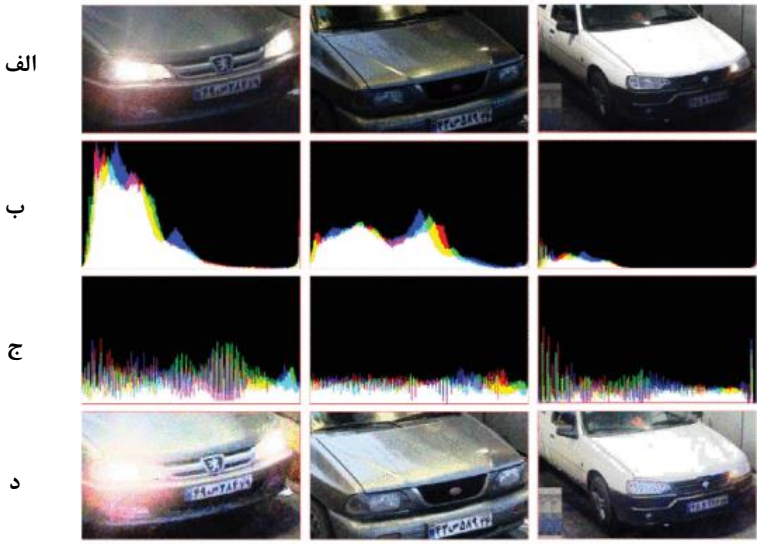
در ادامه به مراحل جزئی تشخیص ناحیه پلاک، از قبیل پیش‌پردازش، لبه‌یابی و آستانه‌گذاری و نیز سایر فرایندهای استخراج خروجی مناسب اشاره می‌گردد:

مرحله اول - پیش‌پردازش تصویر

در ابتدا لازم است که پیش‌پردازشی بر روی ویدئوی دریافتی انجام پذیرد. در ابتدا فریم‌های ویدئوی به‌دست‌آمده از دوربین نظارتی در حافظه سیستم به‌صورت متوالی و به منظور پردازش ذخیره می‌شوند. برای مثال، اگر تنظیمات ویدئوی نظارتی به‌صورت ۱۵ فریم بر ثانیه باشد، پس در هر ثانیه، ۱۵ تصویر ثابت وجود دارد که پردازش‌های بعدی بر روی آن‌ها انجام می‌پذیرد.

سپس، تصاویر ورودی که عموماً دارای مدل رنگی RGB است تبدیل به قالب Grayscale می‌شود تا علاوه بر کاهش تعداد کانال ورودی، حجم پردازشی هر فریم نیز کاهش یابد. در مرحله بعدی، فیلتر میانه با هدف کاهش نویزهای موجود در تصویر و بهبود تغییرات پیکسلی و سپس فیلتر میانگین، برای ایجاد توازن در پیکسل‌های همسایه برای پردازش بهتر و یک‌دست‌سازی ناحیه پلاک روی تصویر خاکستری اعمال می‌شوند.

سپس به‌منظور بهبود شدت روشنایی تصویر، از روش مسطح‌سازی هیستوگرام استفاده شده است. شکل ۵، نمایی از بهبود تصاویر خودرو را قبل و بعد از اعمال این تکنیک متداول نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روشنایی تصاویر پلاک تا حد زیادی، بهبود یافته‌اند.



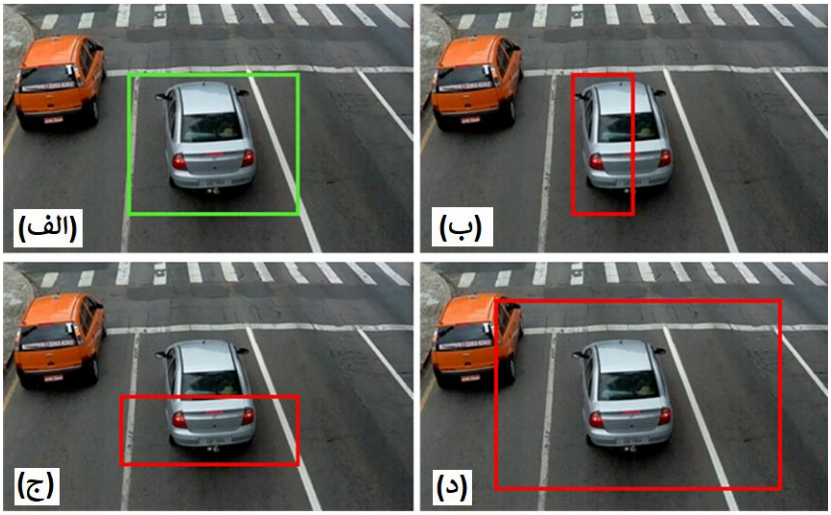
شکل ۵. نمایی از اعمال مسطح‌سازی هیستوگرام به جهت بهبود تصاویر [۱۵]. (الف) تصاویر اصلی، (ب) نمودار هیستوگرام تصویر اصلی، (ج) نمودار هیستوگرام بعد از اعمال الگوریتم مسطح‌سازی و (د) تصاویر بهبودیافته

محاسبه قدرمطلق اختلاف فریم پردازش شده (تفاضل پس زمینه)

در مرحله تشخیص خودروهای متحرک، از روش تفاضل پس‌زمینه استفاده شده است [۱۶]. با اعمال یک روش، شباهت بین بلوک‌های تصویر به‌دست‌آمده و تنها بخش‌هایی از تصویر که شامل سطوح تقریباً یک‌دست و پیوسته هستند، باقی می‌مانند. این مرحله همچنین کمک می‌کند تا بخش‌هایی از تصویر که پس از اعمال فیلترها دچار تغییرات بیشتری شده‌اند، شناسایی شوند و بخش‌های با تغییرات ناچیز برای حذف و نادیده‌گرفته‌شدن، استخراج گردند. این بخش‌های کوچک، توسط اعمال توابع آستانه‌یابی[1] حذف می‌شوند.

خروجی تفاضل پس‌زمینه، یک تصویر دودویی است؛ درصورتی‌که پیکسل تفاضل‌یافته، بخشی از پس‌زمینه باشد با رنگ سفید (مقدار یک) و در غیر این صورت با رنگ سیاه (مقدار صفر) نمایش داده می‌شود. همچنین به‌منظور متمرکز کردن الگوریتم تشخیص خودروی متحرک به بخش خاصی از تصویر، از یک ناحیه تعریف‌شده توسط کاربر (ROI) استفاده می‌گردد. بنابراین عملیات جداسازی پس‌زمینه ثابت از پیش‌زمینه شامل خودروهای در حال حرکت، تنها در این ناحیه انجام می‌پذیرد و ازاین‌رو می‌توان گفت که انتخاب ناحیه ROI مناسب بسیار مهم است. ابعاد ناحیه موردنظر باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که در عین متمرکز کردن الگوریتم برای تشخیص خودرو، فضای در نظر گرفته شده برای جابه‌جایی خودرو در تصویر برای ردیابی و اندازه‌گیری سرعت آن نیز کافی باشد [۱۳]. انتخاب ناحیه مناسب پردازشی ROI موجب می‌شود که از پردازش‌های اضافی بر نواحی‌ای که احتمال قرارگیری پلاک خودرو در آن‌ها صفر است و نیز بخش‌های بی‌تأثیر در تشخیص پلاک و نویزهای تصویر آن نواحی جلوگیری شود و با متمرکز ساختن بار پردازشی به ناحیه خاص تصویر تا حد زیادی به بهینه‌سازی عملکرد سیستم تشخیص پلاک کمک شود. نمونه‌ای از یک ناحیه ROI مناسب در شکل ۶ نمایش داده شده که معیار مناسب بودن ابعاد آن، با سعی و خطا و به‌صورت غیرخودکار توسط کاربر به‌دست‌آمده است.

[1] Thresholding



شکل ۶. نمونه‌ای از انتخاب ناحیه ROI. (الف) ناحیه ROI قابل‌قبول. (ب) غیرقابل‌قبول به دلیل عرض کم. (ج) غیرقابل‌قبول به دلیل ارتفاع کم. (د) غیرقابل‌قبول به دلیل وسعت زیاد [۱۵].

مرحله دوم - لبه‌یابی و آستانه‌گذاری

با اعمال الگوریتم لبه‌یابی Canny[1] [۱۷] و استخراج لبه‌های عمودی تصویر، امکان یافتن پلاک خودرو که تجمیعی از لبه‌های عمودی است، تسهیل می‌شود. با اعمال یک حد آستانه مشخص، نواحی دارای لبه‌هایی که از حد قابل‌قبول برای تعلق داشتن به کلاس پلاک خودرو کمتر یا بیشتر هستند، حذف می‌گردند. همچنین اعمال الگوریتم اجزای متصل[2] [۱۸] برای پیدا کردن بخش‌هایی از تصویر که نواحی توپر دارند و می‌توانند نمایانگر پلاک خودروها باشند نیز تا حد زیادی به یافتن نواحی کاندید پلاک کمک می‌کند. حذف نویزهای موجود در تصویر پردازش‌شده؛ مانند حفره‌های کوچک یا بخش‌های باقی‌مانده از آستانه‌گذاری، توسط اعمال تبدیلات مورفولوژی‌ای[3] [۱۹] انجام می‌شود. این تبدیلات که در پردازش تصویر عموماً به‌عنوان فیلتر بر روی تصاویر دودویی اجرا می‌شوند، گونه‌ای از عملیات ریاضی بر اساس اشکال موجود در تصویر هستند که دارای دو ورودی شامل تصویر دودویی اصلی و هسته (عنصر ساختاری) می‌باشند و یک تصویر دودویی را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهند. از میان تبدیلات متنوعی که وجود دارد، برخی از آن‌ها بسیار رایج هستند و در این پروژه نیز مورداستفاده قرار خواهند گرفت. اصلی‌ترین تبدیلات مورفولوژی‌ای عبارتند از کاهش یا Erosion، گسترش یا Dilation، باز کردن یا Opening و بستن یا Closing [۲۰] واضح است که انتخاب صحیح فیلترها و ترتیب مناسب اعمال آن‌ها در نتیجه نهایی، بسیار تأثیرگذار خواهد بود.

برخی تبدیلات دیگر پردازش تصویر نیز به‌صورت پرکاربردی مورداستفاده قرارگرفته‌اند. یکی از این تبدیلات، عملیات پر کردن سیلابی یا پر کردن حفره‌ها است که درون عناصر به هم متصل را به‌وسیله پیکسل‌های تعریف‌شده‌ای با توجه به میزان نزدیکی و روشنایی آن‌ها پر می‌کند. در پایان اعمال این فیلترها، نواحی حاوی تصویر پلاک به‌دست خواهد آمد که ممکن است چندین ناحیه منتخب برای پلاک بودن خودرو درنظر گرفته شود. تمامی کاندیداهای پلاک

[1] Canny Edge Detection
[2] Connected Components
[3] Morphological Transforms

خودرو، برچسب‌گذاری شده و توسط اعمال الگوریتم Hough [۲۱] برای یافتن شکل مستطیلی پلاک در تصویر، الگوریتم یافتن مستطیل‌های چرخش‌داده‌شده یا Rotated Rectangles برای یافتن پلاک مستطیلی‌شکل حتی در صورت داشتن زاویه و الگوریتم‌های پس‌پردازش و حذف نویز دیگر، ناحیه حاوی پلاک خودرو به دست خواهد آمد. در نهایت، یک فیلتر پردازشی برای مقایسه نواحی باقی‌مانده در تصویر با ویژگی‌های یک پلاک خودروی رایج، شامل نسبت طول و عرض و همچنین ابعاد به واحد پیکسل، روی تصویر اعمال می‌شود. خروجی این مراحل، شامل تعدادی مربع‌های محاط‌شده به‌عنوان Bounding-Box روی نواحی منتخب پلاک خودرو خواهد بود.

بررسی نتایج عملکرد

برای بررسی عملکرد سیستم، نسخه اولیه آن توسط زبان برنامه‌نویسی C# و با استفاده از کتابخانه Emgu.CV نسخه ۳.۲ [۲۲] پیاده‌سازی شد. دلیل انتخاب این محیط برنامه‌نویسی را می‌توان «سرعت بالا»، «وجود توابع پردازش تصویر» و همچنین «امکان اجرا در قالب واسط کاربریNET.» بیان کرد. از آنجایی‌که هدف از پیاده‌سازی راه‌کار پیشنهادی، استفاده از آن در شرایط واقعی بوده است، الگوریتم ارائه‌شده توسط زبان برنامه‌نویسی و کتابخانه مذکور پیاده‌سازی گردید و نسخه‌ای از آن در شرایط واقعی در ورودی دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای استان گیلان، دانشکده شهید چمران رشت، نصب گردید تا تنظیمات نرم‌افزاری و الگوریتمی سیستم پیشنهادی راستی‌آزمایی گردد. تصاویر آماده‌سازی و آزمون عملیاتی در شکل ۷ نمایش داده شده است. در ادامه، به معرفی مجموعه داده و نتایج حاصل از آزمون اشاره خواهد شد.

(الف)

(ب)

شکل ۷. نمایی از آزمون عملیاتی محصول. (الف) جانمایی دوربین نظارتی و (ب) تشخیص ناحیه پلاک

جمع‌آوری داده‌ها

یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه تشخیص پلاک، این است که داده‌های واقعی برای ارزیابی سیستم، آموزش آن، طراحی مدل و الگوریتم و حتی پیکربندی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سیستم، مورد استفاده قرار گیرد. جمع‌آوری داده، فرایندی بسیار پیچیده و طاقت‌فرسا می‌باشد و لازم است که دقت زیادی در هنگام تهیه مجموعه داده مناسب وجود داشته باشد. داده‌هایی که برای تشخیص پلاک مورداستفاده قرار می‌گیرند، می‌توانند به دو نوع اصلی ویدئو و تصویر ثابت باشند. در تصویر ثابت، لازم است که مشخصات پلاک، مناسب و ناحیه پلاک به خوبی در تصویر مشخص باشد. یک تصویر خوب، دارای کیفیت مناسب (دوربین تهیه تصویر با نرخ حداقل ۲ مگاپیکسل)، ابعاد مناسب (نسبت طول و عرض)، عمق و کنتراست تصویر بالا و همچنین حجم معقول ذخیره‌سازی است. اگر مجموعه داده به‌صورت ویدئویی باشد نیز لازم است که در کنار موارد یادشده، نرخ تصویربرداری (فریم بر ثانیه) مناسبی نیز برای تهیه تصویر وجود داشته باشد. هرچه میزان نرخ تصویربرداری بیشتر باشد، تعداد تصاویری که در واحد ثانیه از پلاک خودرو تهیه

می‌شوند نیز بیشتر خواهد بود. در سامانه جاری که میزان شفافیت تصویر بسیار اهمیت دارد و لازم است که تصویر شفاف و دقیقی از خودرو و پلاک آن تهیه شود، نرخ تصویر برداری ۱۰ فریم بر ثانیه نیز مناسب خواهد بود. همچنین دوربین با کیفیت ۲ مگاپیکسل که در فاصله بین ۱ الی ۲.۵ متری خودرو قرار داشته باشد نیز کفایت می‌کند. تصویر نهایی باید به‌گونه‌ای باشد که ناحیه‌ای که پلاک خودرو درون آن قرار دارد را به‌طور کامل پوشش دهد. همچنین حتی‌الامکان کمترین زاویه ممکن بین دوربین و پلاک خودرو وجود داشته باشد. یک تصویر پلاک خوب، عاری از هرگونه تاری و مات‌شدگی می‌باشد و تصویر پلاک به شکل یک مستطیل درون آن قرار می‌گیرد. شکل ۸، تصاویر پلاک مناسب، چالش‌برانگیز و نامناسب را نمایش می‌دهند.

شکل ۸. نمونه‌هایی از انواع تصویر پلاک. تصویر سمت راست: مناسب، تصویر وسط: چالش‌برانگیز و تصویر سمت چپ: نامناسب.

در تحقیق پیش رو، برای تهیه مجموعه دادگان مناسب در راستای ارزیابی سیستم، دو راهبرد کلی تهیه تصاویر حاوی پلاک خودروها پیشنهاد و اقدام شده است. در گام نخست، یک مجموعه داده شرایط واقعی (A) توسط دوربین گوشی همراه از خودروهای مختلف تهیه و برداشت شده است. این مجموعه داده، حاوی بیش از ۹۰۰ تصویر از خودروهای متوقف و درحال حرکت بوده که در شرایط روشنایی و آب‌وهوایی مختلف تهیه شده است. دوربین تهیه تصویر، دو مگاپیکسل و رنگی بوده و تصویر خودرو در فواصل یک الی ۵ متری از دوربین و با زاویه‌های صفر الی حدود ۳۵ درجه قرار دارند.

دومین مجموعه (B) با حمایت و هماهنگی پارک علم و فناوری گیلان در ورودی مجتمع کارگاهی و نیمه صنعتی فشتام تهیه گردید. این مجموعه از دادگان، کاملاً شرایط واقعی را در آب‌وهوا و روشنایی مختلف در خود دارد و قادر است نقاط قوت و ضعف راه‌کار پیشنهادی را به شکلی مناسب نمایش دهد. برای این منظور، یک دوربین با کیفیت دو مگاپیکسل در ارتفاع ۱.۷ متری از سطح زمین و با زاویه حدود ۳۰ درجه نسبت به زمین مستقر شد و تصویر خودروهای ورودی به مجموعه، با نظارت یک اپراتور انسانی تهیه و ذخیره گردید. این مجموعه داده کاملاً شرایط واقعی را در آب‌وهوا و روشنایی مختلف در خود دارد و قادر است نقاط قوت و ضعف راه‌کار پیشنهادی را به شکلی مناسب نمایش دهد. جدول ۱، مختصری از اطلاعات این دو مجموعه داده را به نمایش گذاشته است. شکل ۹ برخی از تصاویر بانک‌های داده را به نمایش گذاشته است.

جدول ۱. مشخصات مجموعه داده تهیه‌شده و به‌کارگرفته شده در تحقیق

مجموعه داده	مشخصات فایل	مشخصات فریم‌ها
بانک داده A	۹۳۲ تصویر ثابت	تهیه شده توسط گوشی موبایل با کیفیت ۲ مگاپیکسل در شرایط روشنایی و آب‌وهوایی مختلف
بانک داده B	۲۳۸۵ تصویر ثابت مستخرج از فایل ویدئویی از لحظه ورود خودرو در شرایط مختلف	تهیه‌شده توسط دوربین نظارتی با کیفیت ۲ مگاپیکسل با قابلیت تهیه ویدئو به مدت محدود (کمتر از ۱۰ ثانیه) از لحظه ورود خودرو به محل

(الف)

(ب)

شکل ۹. نمونه‌هایی از تصاویر مجموعه بانک داده (الف) A و (ب) B

نتایج تجربی و عملی به‌دست‌آمده

برای بررسی عملکرد سیستم طراحی‌شده در شرایط مختلف، یک آزمون برای ارزیابی دقت تشخیص ناحیه پلاک خودروها انجام پذیرفته است. برای این منظور، میزان موفقیت سیستم در شناسایی صحیح ناحیه پلاک خودروها، معیاری بر دقت و کارایی آن در نظر گرفته شده است. در این میان، یکی از اصلی‌ترین گام‌ها، تعریف یک ناحیه ROI جهت محدودسازی هر تصویر به یک ناحیه شامل پلاک با هدف کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی و خطاهای احتمالی بوده است. برای این منظور، بخشی از میدان دید دوربین که پلاک یک خودرو درون آن جای می‌گیرد را به‌عنوان ناحیه مذکور انتخاب کرده و پردازش و محاسبات را در آن ناحیه انجام داده‌ایم. اگرچه در دیتاست‌های ارائه شده این اصل به‌صورت پیش‌فرض وجود داشت ولی در کاربردهای واقعی این موضوع می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کارایی محصول داشته باشد. همچنین برای ارزیابی دقت تشخیص ناحیه پلاک خودرو، از دو نسبت مهم و کاربردی دقت[1] و بازخوانی[2] استفاده شده است. مقادیر این دو نسبت، از روابط ۱ و ۲ به‌دست می‌آیند:

$$Precision = TP \,/\, (TP + FP) \qquad (۱)$$

$$Recall = TP \,/\, (TP + FN) \qquad (۲)$$

[1] Precision
[2] Recall

در این روابط، مقدار TP به مثبت واقعی[1] یا تعداد نواحی پلاک به‌درستی تشخیص‌داده‌شده، FP به مثبت کاذب[2] یا تعداد پلاک‌های به‌اشتباه تشخیص‌داده‌شده و FN به منفی کاذب[3] تعداد پلاک‌های تشخیص‌داده‌نشده اشاره دارند. جدول ۳، نتایج ارزیابی دقت سیستم پیشنهادی در تشخیص پلاک را نمایش داده است. فرایند راستی‌آزمایی به‌صورت نظارتی و توسط یک گروه انسانی انجام پذیرفته است و احتمال خطا در آن تقریباً نزدیک به صفر است؛ زیرا خروجی تولیدی توسط سامانه (کلاس‌های پیداشده) و خروجی واقعی مقایسه شده و نتایج درج‌شده در جدول ۲ به‌دست آمده است. همچنین، راه‌کار پیشنهادی در مقایسه با دو راه‌کار دیگر ارائه‌شده در بخش کارهای مرتبط، بر مجموعه داده و محیط عملیاتی تشریح‌شده، آزمون شد که نتایج آن در جدول ۲ مشهود است.

جدول ۱. مشخصات مجموعه داده تهیه‌شده

روش مورداستفاده	مثبت واقعی	منفی کاذب	مثبت کاذب	دقت	بازخوانی
راه‌کار پیشنهادی	۲۳۱۲	۴۳	۳۰	۰.۹۸۷۱	۰.۹۸۱۷
روش سه‌همسایه [۷]	۲۲۴۱	۸۳	۶۱	۰.۹۷۳۵	۰.۹۵۶۹
روش ترکیبی [۹]	۲۲۷۳	۶۴	۴۸	۰.۹۷۹۳	۰.۹۷۲۶

همان‌طور که مشاهده می‌شود راه‌کار پیشنهادی قادر است تا مقادیر دقت و بازخوانی بهتری را روی مجموعه داده واقعی نمایش دهد. شایان ذکر است که دلیل پایین بودن برخی از دقت‌ها در تشخیص پلاک خودروها را می‌توان به دلایل زیر مرتبط دانست:

مناسب نبودن یا چالشی بودن تصویر

در صورتی که تصویر تهیه‌شده از خودرو که شامل ناحیه پلاک آن است با تنظیمات کلی سامانه در تضاد باشد؛ عملکرد سیستم مناسب نخواهد بود. برای نمونه، در برخی از تصاویر دیتاست، خودرو به‌درستی و در مسیر مشخص دوربین وارد نشده و با زاویه زیاد نسبت به محل نصب دوربین از آن تصویر تهیه شده است. این موارد باعث می‌شود که سامانه نتواند ناحیه پلاک خودرو را به‌درستی تشخیص دهد. همچنین در مواردی مانند کمبود نور محیط (غروب و شب) یا شرایط آب‌وهوایی بارشی، تشخیص ناحیه پلاک خودرو با معضل روبه‌رو شود که تأثیر منفی در عملکرد سامانه داشته است.

لرزش و حرکت دوربین در هنگام تهیه تصویر

درصورتی که به هر دلیلی مانند وزش باد شدید، دوربین در معرض لرزش قرار داشته باشد، تصویر تهیه‌شده تار می‌باشد و می‌تواند منجر به عدم‌وضوح مناسب ناحیه پلاک شود که یکی دیگر از مواردی است که تشخیص این ناحیه را با مشکل روبه‌رو می‌سازد.

[1] True-Positive
[2] False-Positive
[3] False-Negative

وجود مانع یا نویز در مقابل ناحیه پلاک

وجود نویز در هنگام تهیه تصویر توسط دوربین (به دلایلی مانند جذب نور زیاد از محیط) یا در هنگام ارسال، در کنار وجود مانع انسانی درحال عبور از مقابل خودرو، می‌تواند فرایند تشخیص ناحیه پلاک را با مشکل روبه‌رو کند و سامانه، قابلیت شناسایی این ناحیه را نداشته باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک راه‌کار استخراج ناحیه پلاک خودروها در تصاویر ورودی اماکن مختلف ارائه شد که برای کاربردهای نظارتی و کنترل تردد، قابل‌استفاده خواهد بود. روش پیشنهادی از ترکیب روش تشخیص لبه عمودی Canny و بررسی اجزای (کامپوننت‌های) متصل برای شناسایی مناطق نامزد پلاک خودرو استفاده می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که اعمال پیش‌پردازش‌هایی همچون فیلترهای میانه و میانگین‌گیر، در شناسایی نواحی، کمک مؤثری می‌کند. همچنین، اعمال عملگرهای مورفولوژی و محاسبه نسبت ارتفاع به پهنا نواحی شناسایی شده، دقت تشخیص را بالا می‌برد. روش پیشنهادی قادر است که پلاک خودروها را با مقادیر دقت و بازخوانی به‌ترتیب ۹۸.۷۱ و ۹۸.۱۷ درصد تشخیص دهد. ویژگی مهم راه‌کار پیشنهادی، قابلیت عملکرد در دنیای واقعی و در شرایط متغیر واقعی می‌باشد که شامل شرایط روشنایی، محیطی و آب‌وهوایی مختلف است. همچنین برای آزمون راه‌کار پیشنهادی، یک مجموعه داده واقعی از گیت‌های ورودی تهیه شد و نسخه پیاده‌سازی‌شده روی آن آزمایش گردید.

به‌عنوان فعالیت‌های آینده می‌توان به استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای شناسایی بلادرنگ خودرو با دقت بسیار بالا، مجهز کردن سیستم به مرحله تشخیص کارکترهای درون پلاک، بازبینی مرحله پیش‌پردازش به‌منظور افزایش کارآمدی طیف تصاویر ورودی به سامانه برای پردازش و همچنین آزمون و مطابق‌سازی سیستم برای شرایط پارکینگ‌های فضای بسته اشاره کرد.

سپاسگزاری

بخشی از این پروژه تحت قرارداد ۹۷/۶۱۹۲ و در قالب کانون شکوفایی خلاقیت پارک علم و فناوری گیلان انجام گرفته است. در اینجا از حمایت‌های مدیران محترم آن مجموعه و نیز آقای مهندس عبدالرضا جوافشانی نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

References

[1] Maimaris, A., & Papageorgiou, G. (2016, Nov 1-4). *A review of Intelligent Transportation Systems from a communications technology perspective.* 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7795531

[2] Yang, Z., & Pun-Cheng, L. S. (2018). Vehicle detection in intelligent transportation systems and its applications under varying environments: A review. *Image and Vision Computing*, *69*, 143-154. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2017.09.008

[3] Sumalee, A., & Ho, H. W. (2018). Smarter and more connected: Future intelligent transportation system. *IATSS Research*, *42*(2), 67-71. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2018.05.005

[4] Mahmood, Z., Khan, M. U. S., Jawad, M., Khan, S. U., & Yang, L. T. (2015, Aug 24-26). *A Parallel Framework for Object Detection and Recognition for Secure Vehicle Parking.* 2015 IEEE 17th International Conference on High Performance

Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems, New York, NY, USA. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7336278

[5] Hu, W., Zhou, R., El-Rafei, A., & Jiang, S. (2019). Quantum Image Watermarking Algorithm Based on Haar Wavelet Transform. *IEEE Access*, *7*, 121303-121320. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937390

[6] Nelson, R., & Roberts, R. (2021). Some Multilinear Variants of Principal Component Analysis: Examples in Grayscale Image Recognition and Reconstruction. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, *7*(1), 25-35. https://doi.org/10.1109/MSMC.2020.3012304

[7] Ashori, M., Haghiri, M., Tabasi, H., & Soleimanifard, A. (2014, October19). *An efficient algorithm for detecting the edges of colour images based on edge detection and the nature of the image concept.* Symposium on Advances in Science & Technology, Mashhad, Iran.

[8] Doran, M. J., & Broumandnia, A. (2013, 22/04). *The use of license plate recognition independent of rotation in intelligent transportation system.* 12th international conference on transportation and traffic engineering, Tehran, Iran. https://www.tpbin.com/Article/35229

[9] Tabrizi, S. S., & Cavus, N. (2016). A Hybrid KNN-SVM Model for Iranian License Plate Recognition. *Procedia Computer Science*, *102*, 588-594. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.447

[10] Ashtari, A. H., Nordin, M. J., & Fathy, M. (2014). An Iranian License Plate Recognition System Based on Color Features. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *15*(4), 1690-1705. https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2304515

[11] Azad, R., Davami, F., Jeo, J., & Shayegh, H. R. (2014, May 27-29). *New framework based on complementary methods for efficiency and accuracy of license plate recognition system* 2014 6th Conference on Information and Knowledge Technology (IKT), Shahrood, Iran. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7030353document/ 7030353

[12] Yuan, Y., Zou, W., Zhao, Y., Wang, X., Hu, X., & Komodakis, N. (2017). A Robust and Efficient Approach to License Plate Detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, *26*(3), 1102-1114. https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2631901

[13] Rahmani, M., Fazli, S., & Mohammadi, S. (2011, 03/22). *detection and tracking and classification of vehicles with image processing techniques for intelligent transportation system.* 11th international conference on transportation and traffic engineering, Tehran, Iran. https://www.tpbin.com/article/34967

[14] Tourani, A., Shahbahrami, A., Soroori, S., Khazaee, S., & Suen, C. Y. (2020). A Robust Deep Learning Approach for Automatic Iranian Vehicle License Plate Detection and Recognition for Surveillance Systems. *IEEE Access*, *8*, 201317-201330. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035992

[15] Ali Tourani, A. S., Alireza Akoushideh,. (2019). Instantaneous Vehicle Speed Measurement using Relative-Discriminative Histogram of Oriented Gradient. *Iranian Computing Science Journal (CSJ)*, *12*(42-54). https://doi.org/10.5815/ijigsp.2019.04.04

[16] Chen, S., Zhang, J., Li, Y., & Zhang, J. (2012). A Hierarchical Model Incorporating Segmented Regions and Pixel Descriptors for Video Background Subtraction. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *8*(1), 118-127. https://doi.org/10.1109/TII.2011.2173202

[17] Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *PAMI-8*(6), 679-698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851

[18] Wu, K., Otoo, E., & Shoshani, A. (2005). *Optimizing connected component labeling algorithms* (Vol. 5747). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.596105

[19] Haralick, R. M., Sternberg, S. R., & Zhuang, X. (1987). Image Analysis Using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *PAMI-9*(4), 532-550. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767941

[20] Duan, R., Liao, Y., & Wang, S. (2021). Adaptive Morphological Analysis Method and Its Application for Bearing Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *70*, 1-10. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3072116

[21] Dahnoun, N. (2018). *Multicore DSP: from algorithms to real-time implementation on the TMS320C66x SoC*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119125587.ch19

[22] Emgu. (2021). *Main Page*. Emgu. http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 253-272
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.269713.1360
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.13.6

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Sensor Node Clustering Algorithm with Respect to Node Density in Wireless Sensor Networks

Hamid Karimi[1]*

[1]Faculty Member, Department of Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 03.08.2021
Revised: 09.06.2021
Accepted: 10.02.2021

Keyword:
Wireless sensor network
Clustering algorithm
Energy efficient
Node density

***Corresponding Author:**
Hamid Karimi
Email: *karimi-h@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

In clustering algorithms for wireless sensor networks, cluster heads close to the sink node usually encounter much more relay traffic and therefore lose energy rapidly. To address this problem in wireless sensor networks, distance-aware clustering approaches such as EEUC that adjust the cluster size according to the distance between the sink node and each cluster head have been proposed. However, the network lifetime of such approaches is highly dependent on the distribution of the sensor nodes because in randomly distributed sensor networks the approaches do not guarantee that the cluster energy consumption is commensurate with the cluster size. It might be necessary, for example, for sensors to be randomly distributed over the surveillance region (e.g., via aircraft). To solve this problem in wireless sensor networks, a new method called distribution based clustering algorithm (DBCA) was proposed in the present research which is not only aware of the distance but also the density of the sensor nodes. In DBCA, clusters have limited sensor nodes that are determined by the distance between the sink node and the cluster head. The simulation results show that DBCA is 25% to 45% more efficient than previous algorithms in terms of power consumption under different operating conditions.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۷۲-۲۵۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.269713.1360
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.13.6
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

الگوریتم خوشه‌بندی گره‌های حسگر با توجه به تراکم گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم

حمید کریمی[1*]

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

کلید واژگان:
الگوریتم‌های خوشه‌بندی
تراکم گره‌ها
شبکه‌های حسگر بی‌سیم
کارایی در مصرف انرژی

***نویسنده مسئول:** حمید کریمی
پست الکترونیکی:
karimi-h@tvu.ac.ir

چکیده

در رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک[1] معمولاً با ترافیک رله بسیار بیشتری روبه‌رو می‌شوند و بنابراین به‌سرعت انرژی خود را از دست می‌دهند. برای رفع این مشکل، رویکردهای خوشه‌بندی آگاه از فاصله[2]، مانند الگوریتم خوشه‌بندی EEUC[3] که اندازه خوشه را با توجه به فاصله بین گره سینک و هر سرخوشه تنظیم می‌کنند پیشنهاد شده است. با این حال، طول عمر شبکه با استفاده از چنین رویکردهایی بسیار وابسته به توزیع گره‌های حسگر می‌باشد؛ زیرا در شبکه‌های حسگر توزیع شده تصادفی، رویکردها تضمین نمی‌کنند که مصرف انرژی خوشه متناسب با اندازه خوشه باشد. برای رفع این مشکل، ما یک روش جدید به نام الگوریتم خوشه‌بندی با در نظر گرفتن توزیع گره‌ها پیشنهاد می‌کنیم که نه‌تنها آگاه از فاصله است بلکه آگاه از تراکم گره‌ها نیز می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی ما (DBCA)[4]، خوشه‌ها دارای گره‌های محدودی هستند که با توجه به فاصله بین گره سینک و سرخوشه تعیین می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که DBCA در شرایط مختلف عملیاتی با توجه به طول عمر شبکه، ۲۵ درصد الی ۴۵ درصد کارآمدتر از الگوریتم‌های قبلی از لحاظ مصرف انرژی می‌باشد.

[1] Sink node
[2] Distance-aware
[3] Energy-efficient unequal clustering
[4] Distribution based clustering algorithm

مقدمه

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، گره‌های حسگر معمولاً قابل شارژ یا تعویض نیستند؛ زیرا گره‌ها در تعداد بسیار زیاد در مناطقی قرار می‌گیرند که دسترسی به آنها دشوار است. بنابراین با توجه به اینکه گره‌های حسگر معمولاً از منابع محدود انرژی تأمین می‌شوند، بهبود طول عمر شبکه همیشه هدف اصلی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بوده است.

بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی کارآمد برای افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده‌اند [۱-۵]. مخصوصاً رویکردهای مبتنی بر خوشه مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند؛ زیرا این رویکردها می‌توانند به بهره‌وری بالای انرژی دست پیدا کنند و در عین حال مقیاس‌پذیری شبکه را نیز افزایش دهند. به‌طور معمول در رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی، سرخوشه‌ها توسط الگوریتم‌های مبتنی بر رقابت انتخاب می‌شوند. معمولاً گره‌هایی با بیشترین انرژی در همسایگی، به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند. سپس هر گره معمولی (غیر از سرخوشه) یک سرخوشه را انتخاب می‌کند تا با آن یک خوشه را تشکیل دهد. پس از اتمام خوشه‌بندی، سرخوشه‌ها، داده‌های حس شده را از گره‌های عضو جمع می‌کند و به گره سینک می‌فرستند [۶-۸]. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی انتقال داده‌ها، سرخوشه‌ها موارد تکراری و اضافی را قبل از انتقال به گره سینک حذف می‌کنند.

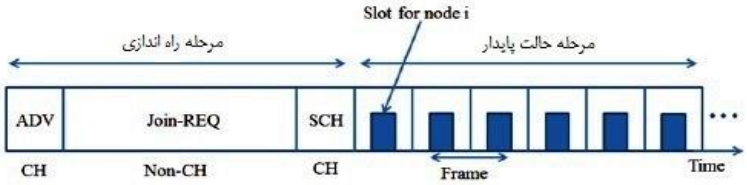
رویکردهای مبتنی بر خوشه‌بندی معمولاً از یک مدل ارتباطی چند هاپی[1] استفاده می‌کنند که کارآمدتر از مدل ارتباط مستقیم می‌باشد و داده‌های حس شده از منابع داده (گره‌های حسگر) را به گره سینک تحویل می‌دهند. با این حال در چنین رویکردهایی، سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک به دلیل خوشه‌بندی برابر، منابع انرژی خود را بسیار سریع‌تر از سرخوشه‌های دیگر از دست می‌دهند. به‌طور دقیق‌تر، سرخوشه‌هایی که نزدیک به گره سینک قرار می‌گیرند معمولاً در رله‌های ترافیکی بیشتری درگیر هستند و بنابراین منابع انرژی خود را بسیار سریع‌تر از سایر سرخوشه‌ها از دست می‌دهند (مشکل نقطه داغ[2]). این ممکن است منجر به تقسیم شبکه حسگر و همچنین کاهش پوشش سنجش شبکه گردد. برای رفع این مشکل، الگوریتم EEUC در [۹] پیشنهاد شده است. در EEUC، فاصله سرخوشه تا گره سینک و همچنین اندازه خوشه‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه در الگوریتم EEUC، خوشه‌های نزدیک به گره سینک نسبت به خوشه‌های دیگر، اندازه خوشه کوچک‌تری دارند. به‌طور دقیق‌تر، EEUC خوشه‌های کوچک‌تر و بیشتری را نزدیک به گره سینک قرار می‌دهد تا انرژی کمتری برای سنجش، تجمیع و ارتباطات درون خوشه‌ای مصرف کنند. این خوشه‌بندی نابرابر ممکن است با انتخاب مسیرهای مختلف برای تحویل داده‌ها، بار کمتری در سرخوشه‌های خاص ایجاد کند. با این حال EEUC برای شبکه‌های حسگر با توزیع تصادفی، کمتر مؤثر است و کارآمد نمی‌باشد. الگوریتم EEUC با ایجاد یک تناسب بین مصرف انرژی خوشه (سنجش و حس داده‌ها و ارتباطات درون‌خوشه‌ای) و مصرف انرژی برای ارتباطات بین‌خوشه‌ای، منجر به افزایش طول عمر برای شبکه حسگر می‌شود. با این حال EEUC تضمین نمی‌کند که یک خوشه با اندازه کوچک‌تر دارای تراکم گره کمتری در یک شبکه حسگر توزیع شده به‌طور تصادفی باشد. قرار دادن خوشه‌های کوچک در یک منطقه شلوغ ممکن است کارآمدی الگوریتم EEUC را کاهش دهد. برای رفع این مشکل، الگوریتم جدیدی به نام DBCA[3] (الگوریتم خوشه‌بندی با در نظر گرفتن توزیع گره) را پیشنهاد می‌دهیم که اندازه هر خوشه را با توجه به تراکم گره‌ها تعیین می‌کند. علاوه بر این، DBCA به‌طور خودکار تراکم گره‌ها در هر خوشه را براساس مصرف انرژی در هر خوشه نیز تنظیم می‌کند. در DBCA، ابتدا تعداد بهینه‌ای از سرخوشه‌ها را برای یک شبکه حسگر مشخص محاسبه می‌کنیم و سپس اندازه و تراکم گره‌ها در هر خوشه را با توجه به فاصله بین گره سینک و سرخوشه مشخص می‌کنیم. به‌طور هم‌زمان، سطح انرژی موردنیاز هر خوشه را نیز برای

[1] Multi-Hop
[2] Hot-spot problem
[3] Distribution based clustering algorithm

سنجش و ارتباط درون‌خوشه‌ای تخمین می‌زنیم تا امکان تنظیمات بیشتر فراهم شود. علاوه بر این برای متعادل نگه‌داشتن شبکه حسگر، برخلاف روش‌های قبلی که ساختارهای خوشه‌ای را در ابتدای هر دوره به‌طور کامل بازسازی می‌کنند ما فقط به‌صورت جزئی ساختارهای خوشه‌ای را بازسازی می‌کنیم. در ادامه این مقاله، بخش‌های زیر آورده شده است. در بخش ۲، به‌طور خلاصه تحقیقات مرتبط پیشین برای شبکه حسگر بی‌سیم در زمینه الگوریتم‌های خوشه‌بندی بررسی می‌شود. بخش ۳، شرح روش پیشنهادی DBCA را ارائه می‌دهد. در بخش ۴، ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل عملکرد توسط نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد و سرانجام در بخش ۵ نتیجه‌گیری می‌شود.

کارهای مرتبط

الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی انطباقی کم‌مصرف (LEACH[1])، اولین رویکرد خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم است [۱۰]. الگوریتم LEACH به‌صورت دوره‌ای عمل می‌کند و در ابتدای هر دوره، مجموعه‌ای از سرخوشه‌ها با یک رقابت محلی انتخاب می‌شوند. برای توزیع یکنواخت مصرف انرژی در بین تمام گره‌ها، الگوریتم LEACH سرخوشه را در میان گره‌ها می‌چرخاند. در LEACH، هر دوره دارای دو مرحله است: مرحله راه‌اندازی و مرحله حالت پایدار، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدای مرحله راه‌اندازی، هر گره تصمیم می‌گیرد که آیا یک سرخوشه با یک احتمال مشخص باشد یا خیر.



شکل ۱. الگوریتم LEACH

پس از انتخاب سرخوشه، هر سرخوشه برای دوره جاری یک پیام اعلانی[2] (ADV) را با استفاده از پروتکل CSMA[3] برای بقیه گره‌ها ارسال می‌کند. هر گره غیر از سرخوشه که پیام ADV را دریافت کند با توجه به قدرت سیگنال پیام ADV، خوشه موردنظر خود را تعیین می‌کند. پس از اینکه هر گره غیر از سرخوشه در مورد خوشه خود تصمیم گرفت، با ارسال یک پیام Join-REQ به سرخوشه، عضویت خود را در خوشه اطلاع می‌دهد. سپس سرخوشه یک برنامه زمانی دسترسی چندگانه با تقسیم‌بندی زمان (TDMA[4]) را آماده و آن را برای گره‌های عضو ارسال می‌کند. در مرحله حالت پایدار، گره‌های حسگر در اسلات‌های زمانی اختصاص داده شده، داده‌های خود را به سرخوشه ارسال می‌کنند. برای جلوگیری از اتلاف انرژی گره‌های حسگر، فرستنده‌های رادیویی خود را به غیر از زمان‌های اختصاص داده شده به آنها برای ارسال خاموش می‌کنند. سرخوشه‌ها، داده‌های حس شده را جمع و با استفاده از ماژول CSMA آنها را به سمت گره سینک هدایت می‌کنند. متأسفانه الگوریتم LEACH استفاده از ساختار خوشه‌هایی که به‌خوبی شکل گرفته‌اند را تضمین نمی‌کند. از آنجایی که الگوریتم LEACH سرخوشه را با توجه به انرژی باقیمانده

[1] Low-energy adaptive clustering hierarchy
[2] Advertisement message
[3] Carrier sense multiple access
[4] Time-division multiple access

انتخاب می‌کند ساختار خوشه شدیداً به توزیع گره‌های حسگر وابسته است. برای رفع این مشکل یک الگوریتم خوشه‌بندی متمرکز LEACH-C[1] پیشنهاد شده است [۱۱]. از آنجا که الگوریتم LEACH-C فرض میکند که گره سینک مکان گره‌های حسگر را می‌داند و همه گره‌های حسگر باید اطلاعات موقعیت خود را به‌صورت هم‌زمان به گره سینک ارسال کنند یک روش پرهزینه‌تر است و برای تشکیل ساختار خوشه‌ای به هزینه انتقال داده بیشتری نیاز دارد.

الگوریتم‌های مختلفی در ادبیات موضوع ارائه شده است که با الگوریتم LEACH شباهت دارند یا الگوریتم LEACH را بهبود می‌بخشند. تحقیق انجام شده در [۱۲] رویکرد M-LEACH را ارائه می‌دهد که یک طرح مسیریابی با مدل ارتباطی چند هاپی در درون هر خوشه است. در M-LEACH، گره حسگری که بالاترین سطح انرژی را داشته باشد شانس تبدیل شدن به سرخوشه را پیدا می‌کند. مقاله [۱۳] یک الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی مبتنی بر وزن‌دهی توزیع شده به نام DWEHC[2] پیشنهاد می‌دهد که یک روش گروه‌بندی کارآمد است. در این الگوریتم، سرخوشه براساس درجه گره‌ها و انرژی باقیمانده انتخاب می‌شود و ارتباطات درون‌خوشه‌ای با محدوده ارتباط یک گره که برای مفهوم گام یا پرش استفاده می‌شود مدیریت می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی در [۱۴] به‌عنوان الگوریتم LEACH بهینه شده (O-LEACH) نامگذاری شده است. این الگوریتم، بهینه‌سازی را در لایه‌های مختلف الگوریتم LEACH انجام می‌دهد و از نتایج آن برای انتخاب سرخوشه‌ها و پیکربندی خوشه‌ها استفاده می‌کند. با توجه به استفاده از یک آستانه خاص برای انرژی باقیمانده در فرایند انتخاب سرخوشه، O-LEACH موجب افزایش طول عمر شبکه حسگر می‌گردد. رویکرد MOPSO[3] یک الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌باشد که در [۱۵] پیشنهاد شده است. این الگوریتم تعداد خوشه‌ها را بهینه می‌کند و استفاده از انرژی را کاهش می‌دهد. درجه گره‌ها، میزان استفاده از انرژی توسط گره‌ها و میزان انرژی مصرف شده برای انتقال در گره‌ها، پارامترهای مورداستفاده برای انتخاب سرخوشه است.

یک الگوریتم متمرکز در [۱۶] به نام EELBC[4] ارائه شده است که گره سینک یا همان ایستگاه پایه مسئول فرایند خوشه‌بندی می‌باشد. در ابتدا یک تعداد گره دروازه[5] با توجه به تعداد کل گره‌ها در شبکه در نظر گرفته می‌شود و هر گره با نزدیک‌ترین دروازه، مرتبط می‌گردد. الگوریتم EELBC به دلیل استفاده کمتر از انرژی و کاهش تعداد گرهای مرده (گره‌هایی که انرژی خود را از دست داده‌اند)، کارایی شبکه حسگر را بهبود بخشیده است. در الگوریتم SLWCA[6] [۱۷] پارامترهای مورداستفاده برای انتخاب سرخوشه شامل انرژی گره، الگوی تحرک و درجه گره‌ها است. در ابتدا درجه گره‌ها محاسبه می‌شود و سپس تحرک گره‌ها و انرژی باقیمانده آنها بررسی می‌گردد و در نهایت یک وزن به‌دست می‌آید. گره با کمترین مقدار وزن به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌شود. در [۱۸] یک پروتکل خوشه‌بندی مقیاس‌پذیر با صرفه‌جویی در انرژی به نام EECSP[7] ارائه شده که در آن از مقادیر فاصله‌های درون‌خوشه‌ای و بین‌خوشه‌ای برای ساخت خوشه‌های متعادل استفاده می‌شود. این یک الگوریتم جدید مبتنی بر روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای انتخاب سرخوشه است که موجب افزایش طول عمر شبکه حسگر می‌گردد. در [۱۹]، یک پروتکل خوشه‌بندی ایستا معرفی شده که از مدل سرخوشه دوگانه استفاده می‌کند. با توجه به انرژی گره‌ها، دو سرخوشه انتخاب می‌گردد و یکی از سرخوشه‌ها برای تجمیع و دیگری برای انتقال داده‌ها

[1] Centralized low-energy adaptive clustering hierarchy
[2] Distributed Weight-Based Energy-Efficient Hierarchical Clustering
[3] Multi-objective Particle Swarm Optimization
[4] Energy Efficient Load Balanced Clustering
[5] Gateway
[6] Stable Load Balanced Weighted Clustered Algorithm
[7] Energy-Efficient Scalable Clustering Protocol

استفاده می‌شوند. در [۲۰]، یک روش مسیریابی برای شبکه حسگر ناهمگن ارائه شده که گره‌های با انرژی بیشتر را به‌عنوان سرخوشه انتخاب کرده و از الگوی چند هاپی برای برقراری ارتباط استفاده کرده است. الگوریتم پیشنهادی، محدوده شبکه را به مناطق مختلفی تقسیم کرده و یک گره متحرک را به هریک از منطقه‌ها اختصاص داده است. در [۲۱] پروتکلی مبتنی بر مدل شبکه‌های حسگر ناهمگن پیشنهاد شده که انرژی اضافی را برای بهبود کارایی در گره‌های نزدیک به گره سینک مدنظر قرار می‌دهد. با ترکیب گره‌های که انرژی بیشتری دارند با دیگر گره‌ها، ثبات و طول عمر شبکه حسگر افزایش پیدا می‌کند.

الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده در [۲۲] به‌صورت مورب محدوده شبکه را به مناطقی تقسیم می‌کند و سپس خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. الگوریتم از تکنیک k-means برای تشکیل خوشه بهره می‌برد و گره‌های حسگر با مدل ارتباط چند هاپی داده‌های خود را به گره سینک یا همان ایستگاه پایه منتقل می‌کنند. در پروتکل مسیریابی EESRA[1] [۲۳]، هدف پروتکل افزایش طول عمر شبکه و افزایش اندازه آن است. در این پروتکل، سرخوشه به‌صورت تصادفی انتخاب شد و یک مسیریابی سلسله‌مراتبی سه لایه‌ای را برای به‌حداقل رساندن بار ترافیکی سرخوشه اتخاذ می‌کند و از مدل انتقال چند هاپی برای انتقال داده‌های حس شده در درون خوشه استفاده می‌کند. به‌علاوه، هر سرخوشه یک یا چند گره واجد شرایط را انتخاب می‌کند تا به‌عنوان اجتماع خوشه‌ای عمل کنند. این اجتماعات خوشه‌ای مسئول بازیابی و جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری شده از اعضای خوشه خود و انتقال آنها به سرخوشه با استفاده از پروتکل ترکیبی MAC هستند که این پروتکل شامل مکانیسم‌های جلوگیری از برخورد[2] و زمان‌بندی خواب گره‌های حسگر برای سنجش داده‌ها می‌باشد. در مقاله [۲۴] یک پروتکل مسیریابی سلسله‌مراتبی مبتنی بر الگوریتم درخت k-d ارائه شده که از تقسیم‌بندی شبکه برای سازماندهی گره‌ها و خوشه‌ها استفاده می‌کند. این پروتکل، شبکه را به k منطقه تقسیم می‌کند و خوشه‌هایی را در هر منطقه ایجاد می‌کند. درخت k-d یک شبکه سلسله‌مراتبی دو هاپی ایجاد می‌کند که براساس آن درخت مربوطه با توجه به موقعیت مکانی هر گره برای انتقال داده‌ها به ایستگاه پایه ساخته می‌شود. نتایج، نشانگر بهبود تأخیر و کارایی شبکه است.

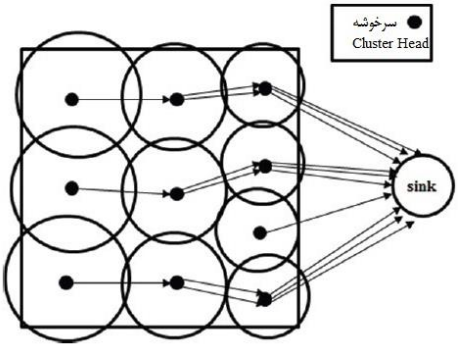
از آنجایی که الگوریتم‌های مبتنی بر خوشه‌بندی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولاً از یک مدل ارتباطی چند هاپی برای انتقال داده‌ها به گره سینک استفاده می‌کنند؛ این سبب می‌شود که سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک در رله‌های ترافیکی بیشتری قرار بگیرند و بنابراین بسیار سریع‌تر از سایر سرخوشه‌ها، منابع انرژی خود را مصرف کنند. برای رفع این مشکل، الگوریتم EEUC طرح خوشه‌بندی نابرابر را ارائه کرده است که در شکل۲ این طرح به تصویر کشیده شده است. الگوریتم EEUC، اندازه خوشه را براساس فاصله بین سرخوشه و گره سینک تعیین می‌کند؛ به این ترتیب که خوشه‌های نزدیک به گره سینک، کوچک‌تر می‌باشد و تعداد گره، عضو کمتری دارند. به‌طور دقیق‌تر، الگوریتم EEUC اندازه خوشه را با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌کند.

$$S_i.R_{comp} = (1 - c\,\frac{d_{\max} - d(s_i, \sin k)}{d_{\max} - d_{\min}})R^0_{comp} \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، R_{comp} حداکثر اندازه خوشه قابل تعریف می‌باشد. d_{max} و d_{min} به‌ترتیب بیشترین و کمترین فاصله بین گره سینک و یک سرخوشه را نشان می‌دهند. $d(s_i,sink)$ بیانگر فاصله سرخوشه S_i و گره سینک می‌باشد و C یک ضریب ثابت بین ۰ و ۱ است. با توجه به معادله (۱) ، اندازه خوشه از R_{comp} (1-C) تا R_{comp} متفاوت می‌باشد. در الگوریتم EEUC، خوشه‌های نزدیک‌تر به گره سینک انرژی کمتری را برای فعالیت‌های درون خوشه مصرف می‌کنند

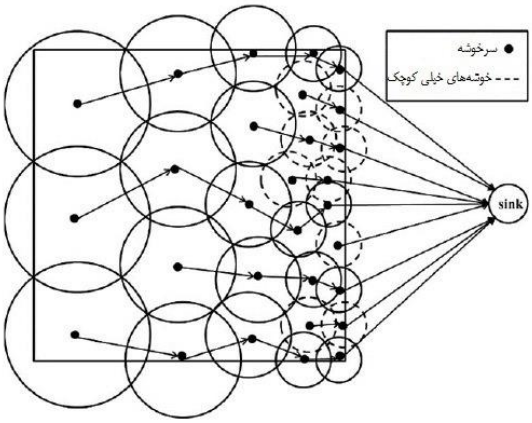
[1] Energy-Efficient Scalable Routing Algorithm
[2] Collision

(ارتباطات سنجش، تجمیع و ارتباطات درون‌خوشه‌ای) و بنابراین می‌توانند رله‌های ترافیکی بیشتری را تأمین کنند. با این حال EEUC برای شبکه‌های حسگر توزیع شده تصادفی، از کارآمدی کمتری برخوردار است؛ زیرا تراکم گره‌ها را در درون خوشه مدنظر قرار نمی‌دهد و تضمین نمی‌کند که خوشه‌ای با اندازه کوچک‌تر دارای تراکم گره کمتری باشد. بدیهی است که خوشه‌های کوچک با تراکم گره زیاد، کارآمدی الگوریتم EEUC را زیر سؤال می‌برند و تأثیر آن را کاهش می‌دهند.



شکل ۲. طرح الگوریتم EEUC

علاوه بر این برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی گره‌ها، الگوریتم EEUC ممکن است شامل خوشه‌هایی باشد که به دلیل اندازه کوچک در هیچ رله ترافیکی ایفای نقش نکنند همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳، خوشه‌های نشان داده شده توسط خط تیره در انتقال اطلاعات دخیل نیستند و بنابراین سرخوشه‌ها انرژی بسیار کمتری را مصرف می‌کنند. برای افزایش طول عمر شبکه، بزرگ‌تر بودن چنین خوشه‌هایی مطلوب‌تر است. این به ما انگیزه داد که تا یک الگوریتم با قابلیت ساختاربندی مجدد پیشنهاد کنیم. در روش پیشنهادی ما، خوشه‌هایی که در ارتباطات بین‌خوشه‌ای کمتری نقش دارند مجاز به داشتن گره‌های بیشتری برای عضویت در خوشه به‌منظور بهینه‌سازی می‌باشند. توضیحات دقیق‌تر در بخش ۳-۳ آورده شده است.



شکل ۳. طرح الگوریتم EEUC

الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در این مقاله به نام DBCA[1] دارای سه مرحله یا فاز راه‌اندازی، انتقال داده و ساختاربندی مجدد است. در مرحله راه‌اندازی، ابتدا الگوریتم DBCA تعدادی سرخوشه را تعیین می‌کند و سپس هر گره غیر از سرخوشه، یک سرخوشه را برای تشکیل یک خوشه انتخاب می‌کند. مشابه الگوریتم EEUC، الگوریتم پیشنهادی ما نیز تراکم گره‌ها در هر خوشه را با توجه به فاصله آن از گره سینک تعیین می‌کند. گره‌های حسگر، داده‌ها را به سرخوشه‌های خود منتقل می‌کنند و سپس سرخوشه‌ها با استفاده از یک مدل ارتباطی چند هاپی در مرحله انتقال داده، داده‌ها را جمع‌آوری می‌کنند و به گره سینک می‌فرستند. در مرحله ساختاربندی مجدد، اگر خوشه‌هایی در مراحل راه‌اندازی و انتقال داده انرژی بیشتری مصرف کنند، DBCA با بازسازی نسبی آن خوشه‌ها، مصرف انرژی را متعادل می‌کند. شکل ۴ نحوه سازماندهی هر دوره از الگوریتم DBCA را نشان می‌دهد. پس از فاز ساختاربندی مجدد برای چندین دوره بعدی، مرحله راه‌اندازی که یک مرحله پرهزینه است را حذف می‌کنیم تا از ساختار خوشه‌ای کاملاً تثبیت‌شده استفاده کنیم. این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴، مرحله راه‌اندازی با مرحله بازسازی در دوره دوم جایگزین می‌شود و برای دوره‌های بعدی، مرحله راه‌اندازی حذف می‌شود و بنابراین نتیجه مرحله بازسازی حفظ می‌گردد. با حفظ ساختار خوشه‌ای و حذف مرحله پرهزینه راه‌اندازی، الگوریتم DBCA انرژی بیشتری را برای ارتباطات بین‌خوشه‌ای حفظ می‌کند. جزئیات عملیاتی بیشتر در زیربخش‌های بعدی شرح داده شده است.

بدون اینکه خللی به کلّیت موضوع وارد شود خصوصیات زیر را در مورد شبکه حسگر فرض می‌کنیم:

- گره سینک ثابت می‌باشد و دارای منابع انرژی نامحدود است.
- هر گره حسگر با توجه به قدرت دریافت سیگنال قادر به اندازه‌گیری فاصله خود از گره سینک است.
- گره‌های حسگر ثابت هستند و دارای قابلیت‌های مشابه (پردازش، ارتباطات، منابع انرژی) می‌باشند.
- گره‌های حسگر می‌توانند سطح قدرت انتقال خود را با توجه به فاصله مدیریت کنند.

مرحله راه‌اندازی الگوریتم DBCA

در مرحله راه‌اندازی، الگوریتم DBCA مجموعه‌ای از سرخوشه‌ها را تعیین می‌کند و سپس با گره‌های باقیمانده خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. الگوریتم DBCA از مکانیزم انتخاب سرخوشه با مصرف کم انرژی و به‌صورت توزیعی HEED[2] استفاده می‌کند [۲۵]. الگوریتم HEED سرخوشه‌ها را براساس انرژی باقیمانده آنها جایگزین می‌کند. معادله (۲) برای انتخاب سرخوشه در زیر آورده شده است. درصد اولیه تعداد سرخوشه‌ها با C_{prob} مشخص شده و غالباً مقدار ۵ درصد را دارد.

$$CH_{prob} = C_{prob} * \frac{E_{residual}}{E_{\max}} \qquad (۲)$$

که در آن CH_{prob} بیانگر احتمال تبدیل شدن به یک سرخوشه را نشان می‌دهد. $E_{residual}$ و E_{max} به‌ترتیب انرژی باقیمانده و ماکزیمم انرژی یک گره می‌باشند.

[1] Distibution Based Clustering Algorithm
[2] Hybrid energy-efficient distributed

پس از انتخابات سرخوشه، الگوریتم پیشنهادی ما (DBCA) با استفاده از پیام‌های ADV و Join، خوشه‌ها را تشکیل می‌دهد. گره سینک با توجه به قدرت سیگنال، فاصله بین یک سرخوشه و سینک را تخمین می‌زند و اندازه‌های مناسب خوشه و تعداد گره‌های عضو را به سرخوشه اعلام می‌کند. با استفاده از این اطلاعات، هر سرخوشه یک خوشه را تشکیل می‌دهد. تعداد گره‌های عضو اختصاص‌یافته به یک خوشه، از معادله (۳) پیروی می‌کند.

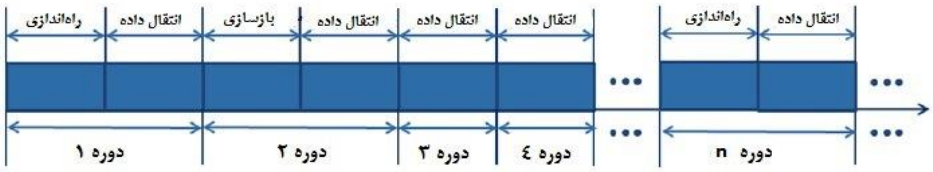
$$OSN = \frac{N}{CN} + P \qquad (۳)$$

که در آن، OSN[1] تعداد بهینه گره‌های حسگری است که باید در یک خوشه گنجانده شود. در حالی که N و CN به‌ترتیب تعداد گره‌های حسگر و تعداد سرخوشه‌ها برای شبکه حسگر می‌باشند. حرف P، یک ثابت برای مشخص کردن تراکم گره‌ها در هر خوشه با توجه به فاصله از گره سینک است. برای تعیین کارآمد ثابت P، الگوریتم DBCA از معادله (۴) پیروی می‌کند.

$$P = \frac{d(s_i, sink)}{F} * V \qquad (۴)$$

که در آن $d(S_i, Sink)$ فاصله بین سرخوشه S_i و گره سینک می‌باشد و F بیانگر اندازه میدان شبکه حسگر است. در حالی که V یک ثابت تعریف شده توسط کاربر برای اختصاص تعداد مناسب گره‌های عضو به یک خوشه می‌باشد. اگر یک خوشه، گره‌های عضو بیشتری نسبت به مقدار OSN داشته باشد، خوشه تقسیم شده یا گره‌های عضو را به خوشه‌های همسایه منتقل می‌کند تا یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی حداقل ایجاد کند. ما آستانه M را برای پارتیشن‌بندی خوشه به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$M = OSN * 1.5 \qquad (۵)$$



شکل ۴. مراحل الگوریتم DBCA

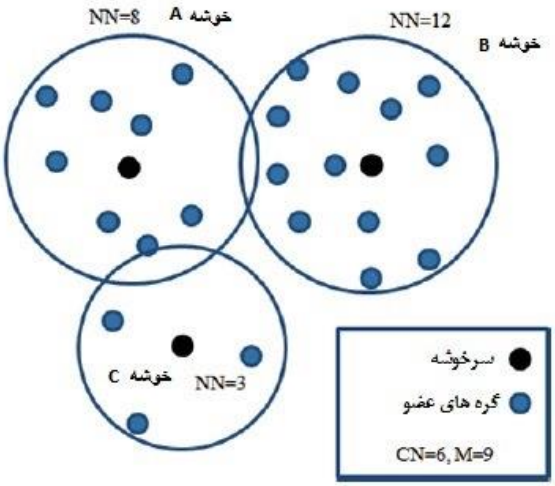
شکل ۵ و ۶ یک مثال در حال اجرا از یک خوشه را نشان می‌دهد که نیاز به پارتیشن‌بندی دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است خوشه B گره‌های حسگر بیشتری نسبت به M دارد (M=9). بنابراین خوشه B باید تقسیم شود تا میزان مصرف انرژی متعادل گردد. برای پارتیشنبندی، دو گره دورتر به‌عنوان سرخوشه‌های جدید انتخاب می‌شوند و سرخوشه‌های جدید خوشه‌هایی را با استفاده از پیام های ADV و Join تشکیل می‌دهند (همانطور که در بالا ذکر شد). شکل۶ نتیجه اعمال پارتیشن‌بندی را نشان می‌دهد. در شکل ۶، خوشه B به دو خوشه 'B و D

[1] Optimal sensor node

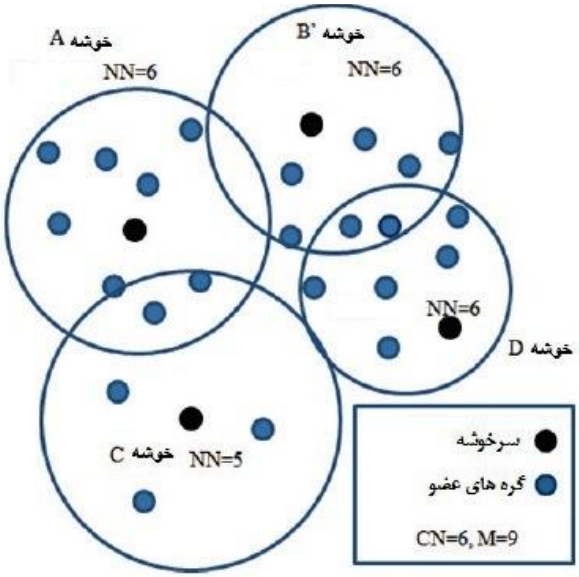
تقسیم شده است. همان‌طور که در مثال در حال اجرا قابل مشاهده است الگوریتم DBCA با محدود کردن حداکثر تعداد گره‌های عضو در هر خوشه، مصرف انرژی هر خوشه را متعادل می‌کند. حتی اگر اعمال پارتیشن‌بندی، ساختارهای خوشه‌ای با مصرف انرژی کارآمدی را تولید کند، این راهکار می‌تواند پرهزینه باشد. بر این اساس الگوریتم DBCA راهکار انتقال گره حسگر را برای خوشه‌هایی که گره‌های عضو آنها بیشتر یا کمتر از OSN است به‌منظور بهینه‌سازی بیشتر در نظر می‌گیرد. برای اینکه همه خوشه‌ها به اندازه مقدار OSN گره عضو داشته باشند خوشه‌هایی با تعداد عضو کمتر یا بیشتر از مقدار OSN پیام‌های Less یا Over را به سرخوشه‌های همسایه ارسال می‌کنند. اگر یک خوشه با گره‌های عضو بیشتر (C_o) و یک خوشه با گره‌های عضو کمتر(C_L) همسایه یکدیگر باشند، برخی از گره‌های عضو C_o که نزدیک به C_L هستند، به C_L منتقل می‌شوند؛ به‌طوری که همه خوشه‌ها به اندازه مقدار OSN، گره عضو داشته باشند. توجه داشته باشید که حداکثر تعداد گره‌های عضو با توجه به فاصله از گره سینک متفاوت می‌باشد. بنابراین نتایج الگوریتم DBCA از نظر کوچک بودن خوشه‌های نزدیک به گره سینک ممکن است مشابه با الگوریتم EEUC باشد اما الگوریتم DBCA با محدود کردن حداکثر تعداد گره‌های یک خوشه، (با توجه به فاصله از گره سینک) ساختارهای خوشه‌ای با مصرف بهینه انرژی را حتی برای مناطق شلوغ تضمین می‌کند.

مرحله انتقال داده

بعد از اتمام مرحله راه‌اندازی، سرخوشه‌ها با توجه به تعداد گره‌های عضو، برنامه‌های زمانی TDMA را ایجاد کرده و برنامه‌ها را به گره‌های عضو خود ارسال می‌کنند. سپس گره‌های عضو در اسلات‌های زمانی اختصاص داده شده، داده‌های خود را به سرخوشه منتقل می‌کنند. بعد از اینکه سرخوشه‌ها داده‌ها را جمع‌آوری کردند آنها را با استفاده از الگوریتم CSMA (برای جلوگیری از برخورد داده‌ها) به گره سینک هدایت می‌کنند. هنگام تحویل داده‌ها، اگر فاصله بین گره‌های فرستنده و گیرنده کمتر از d_0 باشد الگوریتم DBCA از مدل انتشار Friis free-space استفاده می‌کند و در غیر این صورت از مدل انتشار two-ray ground استفاده می‌شود.



شکل ۵. ساختار خوشه‌ای نامتعادل (پیش از پارتیشن‌بندی)



شکل ۶. ساختار خوشه‌ای متعادل (پس از پارتیشن‌بندی)

مرحله ساختاربندی مجدد

در طول مراحل راه اندازی و انتقال داده‌ها، سرخوشه‌ها انرژی مصرف شده برای ساخت ساختارهای خوشه‌ای و تجمیع و انتقال داده‌ها به گره سینک را برآورد می‌کنند (E_0). در مرحله ساختاربندی مجدد (بازسازی)، سرخوشه‌ها E_0 محاسبه‌شده را به گره سینک ارسال می‌کنند تا گره سینک متوسط هزینه انرژی (AEC[1]) و هزینه انرژی ساختاربندی مجدد (REC[2]) هر خوشه را برآورد کند. سپس گره سینک AEC و REC محاسبه‌شده را به سرخوشه‌ها می‌فرستد. در واقع REC آستانه تحریک مرحله ساختاربندی مجدد است.

$$AEC = \frac{E_{total}}{CN'} \quad (۶)$$

$$REC = AEC * 1.5 \quad (۷)$$

که در آن E_{total} نشان‌دهنده کل انرژی مصرفی شبکه حسگر و 'CN بیانگر تعداد سرخوشه‌ها می‌باشد. اگر یک سرخوشه دارای E_0 بزرگ‌تر از REC باشد (C_t)، برای بازسازی خوشه، پیام بازسازی را به سرخوشه‌های همسایه خود ارسال می‌کند. توجه داشته باشید که در معادله (۷) ضریب ثابت ۱/۵ را می‌توان با توجه به شرایط شبیه‌سازی تغییر داد و بنابراین باید براساس نتایج تجربی درباره آن تصمیم‌گیری شود. اگر سرخوشه‌هایی که E_0 آنها کمتر از AEC است وجود داشته باشد (C_r)، گره‌های عضوی خوشه C_t که نزدیک به C_r هستند به عضویت خوشه C_r درمی‌آیند. سپس سرخوشه C_r برنامه زمانی TDMA را دوباره ایجاد می‌کند و آن را برای گره‌های عضو ارسال می‌کند. پس از

[1] Average energy cost
[2] Re-construct energy cost

مرحله بازسازی، مرحله راه‌اندازی برای k دوره بعدی حذف می‌گردد تا از این ساختار خوشه‌ای بازسازی شده استفاده شود؛ این موضوع در شکل۴ نشان داده شده است. توضیحات دقیق‌تری در مورد محاسبه مقدار k در بخش۴ آورده شده است. اگر همه خوشه‌های همسایه دارای E_0 بزرگ‌تر از AEC باشند از مرحله بازسازی صرف‌نظر می‌شود و الگوریتم DBCA دوره بعدی را آغاز می‌کند تا کل ساختار خوشه‌ها در مرحله راه‌اندازی مجدداً ساخته شود. الگوریتم زیر روش کار DBCA را ارائه می‌دهد. در خط ۱، سرخوشه‌ها را با توجه به مکانیزم مورداستفاده در HEED انتخاب می‌کنیم. سپس DBCA یک ساختار خوشه‌ای را در مابقی الگوریتم ایجاد می‌کند. در هنگام ساخت ساختار خوشه، خوشه‌ای که گره‌های عضو آن بیش از M باشد در خطوط ۵ تا ۷ به دو یا چند خوشه تقسیم می‌شود. هنگامی که یک سرخوشه دارای گره‌های عضو بیشتری نسبت به مقدار OSN باشد سرخوشه، خوشه‌هایی را پیدا می‌کند که قادر به داشتن گره‌های بیشتری باشند و گره‌های عضو خود را در خطوط ۸ تا ۱۸ به آنها منتقل می‌کند. در خط ۱۹، هر خوشه تصمیم می‌گیرد که آیا مرحله ساختاربندی مجدد را آغاز کند یا خیر. اگر E_0> REC، سرخوشه با پخش یک پیام بازسازی به سرخوشه‌های همسایه در خط ۲۰ باعث تحریک مرحله بازسازی می‌گردد و منتظر پیام گسترش خوشه می‌شود. اگر سرخوشه، پیام گسترش خوشه را دریافت کند؛ مرحله ساختاربندی مجدد در خط ۲۲ آغاز می‌گردد. در غیر این صورت، DBCA به‌سادگی به دوره بعدی می‌رود تا کل ساختار خوشه‌ها در مرحله راه‌اندازی در خط ۲۴ دوباره ساخته شود. اگر خوشه‌ای که E_0 آن کمتر از AEC است پیام بازسازی را دریافت کند؛ پیام گسترش خوشه را ارسال می‌کند و مرحله ساختاربندی مجدد در خطوط ۲۶ تا ۳۱ آغاز می‌شود.

DBCA algorithm	
1.	Cluster head election // HEED
2.	For each cluster head (CH)
3.	Broadcast ADV message;
4.	Receive join-request message from non-CH node;
5.	If number of join request node > m then // node partitioning
6.	Selects cluster heads;
7.	Partitions the cluster;
8.	Else if number of join request node > OSN then
9.	Broadcast OVER message to nighboring chs;
10.	If CH receives LESS messages then
11.	Adjusting cluster;
12.	Endif
13.	Else
14.	Broadcast LESS messages to nighboring chs;
15.	If CH receives OVER messages then
16.	Adjusting cluster;
17.	Endif
18.	Endif
19.	If E_0 > REC then
20.	Broadcast reconstruct message to nighboring chs;
21.	If CH receives cluster extend message then
22.	Re-construction;
23.	Else
24.	Goto line 1;
25.	Endif
26.	Elseif CH receive reconstruct messages then
27.	If E_0< AEC then

DBCA algorithm
28. Broadcast cluster extend message to nighboring chs;
29. Re-construction;
30. Endif
31. Endif
32. Endfor

ارزیابی و تحلیل عملکرد

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی DBCA را با مقایسه آن با الگوریتم‌های LEACH، HEED و EEUC ارزیابی می‌کنیم. برای شبیه‌سازی از شبکه شبیه‌ساز NS2 استفاده کردیم و مدل مصرف انرژی در شبیه‌سازی‌ها، مدل رادیویی مرتبه اول[1] می‌باشد (معادله ۸) که برای LEACH و EEUC نیز استفاده شده است.

$$E_{TX}(t,d) = E_{elec} * t + \varepsilon_{amp} * t * d^{n} = \begin{cases} E_{elec} * t + \varepsilon_{fs} * t * d^{2}, d < d_0 \\ E_{elec} * t + \varepsilon_{mp} * t * d^{4}, d > d_0 \end{cases} \quad (۸)$$
$$E_{RX}(t,d) = E_{elec} * t$$

که در آن E_{TX} بیانگر انرژی مصرف شده در انتقال داده‌ها می‌باشد و E_{elec} انرژی مصرف‌شده برای پردازش یک بیت داده را نشان می‌دهد در حالی که t و d به‌ترتیب اندازه داده و فاصله انتقال می‌باشند. ε_{amp} انرژی موردنیاز برای تقویت سیگنال است. هنگامی که $d < d_0$ ما از ε_{fs} استفاده می‌کنیم که از مدل انتشار friis free-space می‌باشد. در غیر این صورت، از ε_{mp} استفاده می‌شود که از مدل انتشار two-ray ground است و E_{RX} بیانگر انرژی مصرف شده هنگام دریافت اطلاعات می‌باشد و d_0 توسط معادله ۹ محاسبه می‌شود.

$$d_0 = \frac{4\pi\sqrt{L}\, h_r h_t}{\lambda} \quad (۹)$$

که در آن L ضریب تلفات سیستم می‌باشد که مربوط به انتشار موج نیست و λ طول موج سیگنال حامل است. h_t و h_r به‌ترتیب ارتفاع از سطح زمین آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌باشد.

$L = 1$ نشان‌دهنده نبود اتلاف در سخت‌افزار سیستم است. $h_t = h_r = 1.5m$ و اگر از فرکانس حامل ۹۱۴ مگاهرتز استفاده کنیم، λ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{3*10^{8}}{914*10^{6}} = 3.28 \quad (۱۰)$$

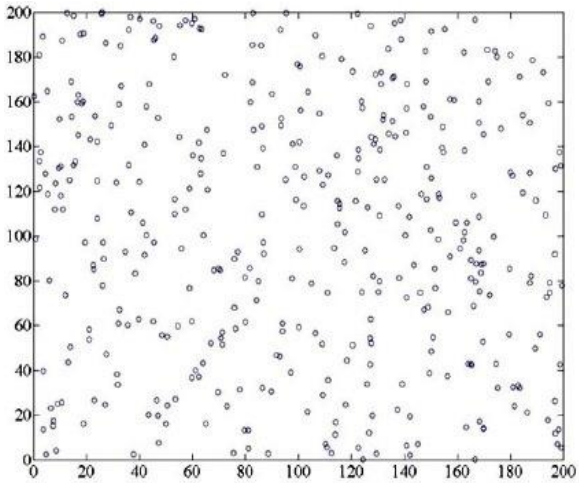
با استفاده از این پارامترها، $d_0 = 86.2$ m است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده و از مولد سناریوی NS2 برای توزیع تصادفی گره‌های حسگر استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اولین مجموعه از شبیه‌سازی‌ها برای یافتن بهترین مقدار برای k است (بخش ۳-۳)؛ زیرا با حذف مرحله راه‌اندازی برای k دوره بعد از

[1] First-order radio

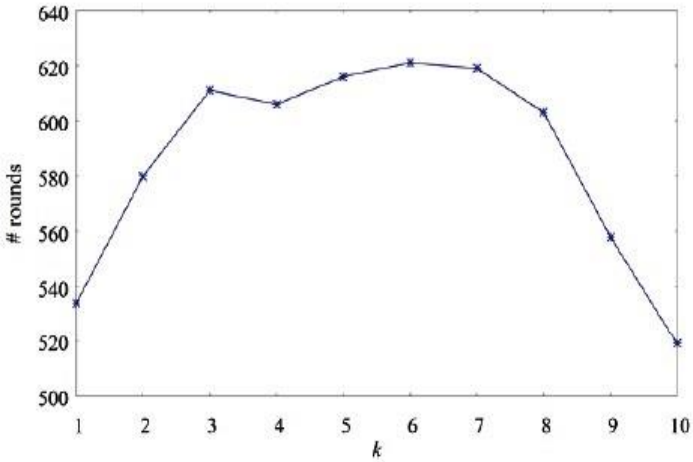
مرحله بازسازی، الگوریتم DBCA انرژی بیشتری را برای ارتباطات درون‌خوشه‌ای حفظ می‌کند و بنابراین می‌تواند طول عمر شبکه‌های حسگر را افزایش دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود زمانی که k کمتر از ۳ باشد الگوریتم DBCA عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهد. این بدان دلیل است که با چنین مقادیر کوچک k، الگوریتم DBCA نمی‌تواند به‌طور کامل از مزیت مرحله بازسازی بهره‌برداری کند. به‌طور دقیق‌تر در مرحله بازسازی، DBCA یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی کارآمد را تولید می‌کند اما انرژی بیشتری را در کل فرایند مصرف می‌کند؛ بنابراین برای جبران این انرژی مصرفی اضافی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای ارتباطات بین خوشه‌ای، الگوریتم DBCA مرحله راه‌اندازی را حذف می‌کند و نتیجه مرحله بازسازی را برای k دوره بعدی حفظ می‌نماید. با این حال شکل ۸ نشان می‌دهد که DBCA نمی‌تواند با چنین مقادیر کوچک k به این اهداف برسد. علاوه بر این، کارایی الگوریتم DBCA وقتی k بیشتر از ۸ باشد نیز کاهش می‌یابد؛ زیرا حفظ ساختار خوشه‌ای برای چنین مدت طولانی باعث کاهش سریع منابع انرژی سرخوشه‌ها می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است این کاهش سریع باعث می‌شود که رویکرد ما کمتر مثمرثمر باشد. در نتیجه برای بهینه‌سازی عملکرد DBCA، مرحله راه‌اندازی را برای ۶ دوره بعدی پس از مرحله بازسازی که بهترین مقدار برای k است حذف می‌کنیم. این موضوع در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

Parameter	Value
Network coverage (m)	(0,0)-(200,200)
Sink location (m)	(-100,100)-(100,100)
N	400
Initial energy (J)	2
T (bit)	4000
d_0(m)	86.2
E_{elec}(nJ/bit)	50
ε_{fs}(pJ/bit/m^2)	10
ε_{mp}(pJ/bit/m^4)	0.0013
E_{DA}(nJ/bit/signal)	5
C	0.5
Initial cluster head rate (%)	5
P	0.05



شکل ۷. استقرار اولیه نودهای حسگر

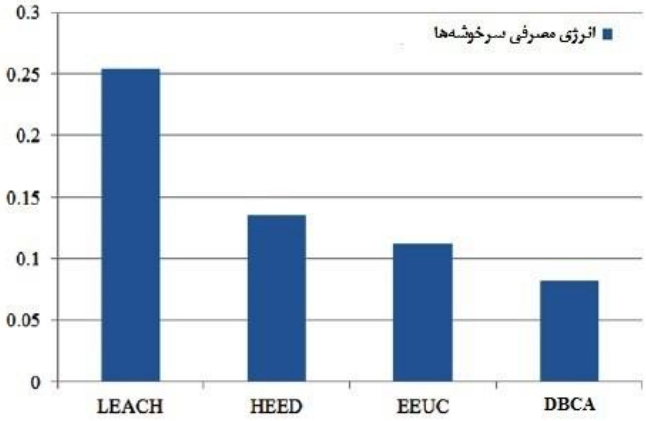


شکل ۸. تأثیر مقدار k روی عمر شبکه در الگوریتم DBCA

مجموعه بعدی شبیه‌سازی ما بررسی اثربخشی الگوریتم DBCA است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است ما مصرف انرژی هر گره حسگر را ارزیابی و مقایسه می‌کنیم. شکل ۹ میانگین مصرف انرژی هر دوره را برای چهار الگوریتم موردبحث نشان می‌دهد. الگوریتم DBCA از لحاظ صرفه‌جویی انرژی تا ۳ برابر کارآمدتر از LEACH و تا ۱/۶ برابر کارآمدتر از الگوریتم‌های HEED و EEUC است. عملکرد ضعیف LEACH به این دلیل است که تراکم گره‌ها و اندازه هر خوشه را در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، ارتباط مستقیم بین هر سرخوشه و گره سینک منجر به کاهش کارایی این الگوریتم می‌گردد.

الگوریتم HEED به دلیل استفاده از مدل ارتباطی چند هاپی برای ارسال اطلاعات، از LEACH بهتر عمل می‌کند اما ممکن است مشکل نقطه داغ باعث کاهش کارایی آن گردد؛ زیرا سرخوشه‌های نزدیک به گره سینک برای انتقال داده‌های خوشه‌های دورتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۶]. این مشکل نقطه داغ، مصرف انرژی گره‌های همسایه گره سینک را تسریع می‌کند و به‌نوبه خود ممکن است منجر به تقسیم شبکه حسگر و همچنین کاهش پوشش سنجش شود که برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مطلوب نیست.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود الگوریتم EEUC به دلیل رویکرد خوشه‌بندی آگاه از فاصله، انرژی کمتری نسبت به HEED مصرف می‌کند اما ممکن است برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی از کارآمدی کمتری برخوردار باشد. الگوریتم پیشنهادی ما، با در نظر گرفتن تراکم گره‌ها در هرخوشه، الگوریتم EEUC را توسعه داده و به‌طور متوالی باعث کاهش مصرف انرژی در هر دوره می‌شود این موضوع در شکل ۹ قابل مشاهده است.



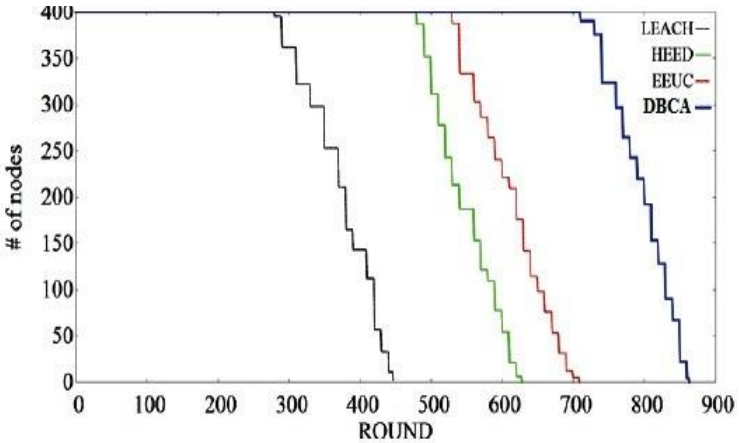
شکل ۹. میانگین مصرف انرژی در هر دوره

شکل ۱۰ تعداد گره‌های حسگری را نشان می‌دهد که در طول زمان شبیه‌سازی چهار الگوریتم موردبحث همچنان انرژی دارند و زنده هستند. همان‌طور که قابل مشاهده است الگوریتم DBCA به‌وضوح باعث افزایش طول عمر شبکه نسبت به LEACH، HEED و EEUC می‌شود. هنگام تشکیل ساختارهای خوش‌ای، الگوریتم‌های دیگر تراکم گره‌ها و مصرف انرژی هر خوشه را در نظر نمی‌گیرند و ممکن است ساختارهای خوشه‌ای نامتعادل ایجاد کنند. این ساختارهای نامتعادل خوشه‌ای ممکن است در هنگام پردازش و انتقال داده‌ها، انرژی بیشتری را هدر دهند. در مقابل الگوریتم DBCA یک خوشه را وادار می‌کند تا تعداد گره‌های عضو کمتری نسبت به مقدار OSN[1] داشته باشد که این مقدار با توجه به فاصله از گره سینک متفاوت است. این ویژگی DBCA مصرف انرژی متعادل‌تری را روی شبکه حسگر تضمین می‌کند حتی اگر گره‌های شبکه حسگر به‌صورت تصادفی توزیع شده باشند.

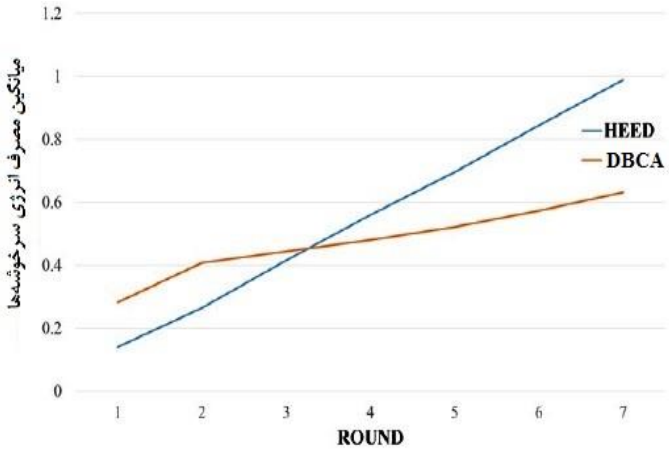
آخرین مجموعه از آزمایش‌های ما، مصالحه ناشی از حفظ ساختارهای خوشه‌ای را بررسی کرده است. شکل ۱۱ مصرف انرژی سرخوشه‌ها در الگوریتم DBCA و HEED را نشان می‌دهد. الگوریتم EEUC با در نظر گرفتن سطح انرژی هر گره، سرخوشه را انتخاب می‌کند اما ما در این مقاله DBCA را فقط با HEED مقایسه می‌کنیم؛ زیرا

[1] Optimal sensor node

جزئیات الگوریتم انتخاب سرخوشه در الگوریتم EEUC در مقاله آن آورده نشده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود منحنی الگوریتم DBCA نشان می‌دهد که سرخوشه‌ها به دلیل مرحله راه‌اندازی و مرحله ساختاربندی مجدد، انرژی بیشتری نسبت به HEED تا دو دوره مصرف می‌کنند اما پس از آن، DBCA انرژی کمتری مصرف می‌کند؛ زیرا DBCA ساختار خوشه را برای هفت دوره متوالی حفظ می‌کند. سرخوشه‌ها ممکن است در DBCA بار ترافیکی بیشتری داشته باشند اما پایداری ساختار خوشه‌ها، بارهای ترافیکی را به‌حداقل می‌رساند و الگوریتم را از لحاظ مصرف انرژی کارآمدتر می‌سازد.



شکل ۱۰. تعداد گره‌های حسگر زنده در طول زمان



شکل ۱۱. میانگین مصرف انرژی سرخوشه‌ها

نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم DBCA پیشنهاد شد که هدف آن افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است که معمولاً از منابع محدود انرژی تأمین می‌شوند. رویکرد DBCA ساختارهای خوشه‌ای را ایجاد می‌کند که می‌تواند با در نظر گرفتن تراکم گره‌ها و انرژی مصرفی در هر خوشه، مصرف انرژی را حتی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توزیع تصادفی نیز متعادل کند. آنالیزها و ارزیابی عملکرد نشان داد که روش DBCA تا سه برابر کارآمدتر از روش‌های قبلی است.

به‌عنوان کار آینده، قصد داریم رویکرد خود را با بررسی مدل ارتباطی همکاری‌کننده [۲۷; ۲۸] گسترش دهیم تا یک ساختار خوشه‌ای با مصرف انرژی بهینه‌تر ایجاد کنیم.

References

[1] Abdul-Salaam, G., Abdullah, A. H., Anisi, M. H., Gani, A., & Alelaiwi, A. (2016). A comparative analysis of energy conservation approaches in hybrid wireless sensor networks data collection protocols. *Telecommunication Systems*, *61*(1), 159-179. https//:doi.org/10.1007/s11235-015-0092-8

[2] Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, *3*(3), 325-349. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2003.09.010

[3] Chang, F.-C., & Huang, H.-C. (2016). A Survey on Intelligent Sensor Network and Its Applications. *J. Netw. Intell.*, *1*(1), 1-15 .

[4] Kong, L., Pan, J.-S., Tsai, P.-W., Vaclav, S., & Ho, J.-H. (2015). A balanced power consumption algorithm based on enhanced parallel cat swarm optimization for wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *11*(3), 729680. https://doi.org/10.1155/2015/729680

[5] Snasel, V., Kong, L., Tsai, P.-W., & Pan, J.-S. (2016). Sink Node Placement Strategies based on Cat Swarm Optimization Algorithm. *J. Netw. Intell.*, *1*(2), 52-60 .

[6] Horng, M.-F., & Shieh, C.-S. (2016). An Energy-based Cluster Head Selection Algorithm to Support Long-lifetime in Wireless Sensor Networks. *Network Intelligence*, *1*(1), 27-37 .

[7] Jangwan, H., & Negi, A .(2016) .Enhanced Energy-Efficient Balanced Clustering Protocol for WSN. *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(5), 3619-3623 .

[8] Liu, X. (2012). A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, *12*(8), 11113-11153 .https://doi.org/10.3390/s120811113

[9] Chengfa, L., Mao, Y., Guihai, C., & Jie, W. (2005, Nov 7-7). *An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks.* IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005., Washington, DC, USA. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1542849

[10] Heinzelman, W. B. (2000). *Application-specific protocol architectures for wireless networks.* [Massachusetts Institute of Technology]. Cambridge. http://hdl.handle.net/1721.1/26881

[11] Li, H. (2010, Oct 22-24). *LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for Heterogeneous WSN.* 2010 IEEE International Conference on Intelligent

Computing and Intelligent Systems, Taiyuan, China. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5620564

[12] Aslam, M., Javaid, N., Rahim, A., Nazir, U., Bibi, A., & Khan, Z. A. (2012, June 25-27). *Survey of Extended LEACH-Based Clustering Routing Protocols for Wireless Sensor Networks.* 2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems, Liverpool, UK. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6332317

[13] Ding, P., Holliday, J., & Celik, A. (2005). Distributed energy-efficient hierarchical clustering for wireless sensor networks. In *International conference on distributed computing in sensor systems* (pp. 322-339). Springer. https://doi.org/10.1007/11502593_25

[14] Nasri, N., Ben Fradj, A., & Kachouri, A. (2017). Optimised cross-layer synchronisation schemes for wireless sensor networks. *International Journal of Electronics*, *104*(7), 1178-1189. https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1292555

[15] Ali, H., Shahzad, W., & Khan, F. A. (2012). Energy-efficient clustering in mobile ad-hoc networks using multi-objective particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, *12*(7), 1913-1928. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.036

[16] Kuila, P., & Jana, P. K. (2012). Energy Efficient Load-Balanced Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Procedia Technology*, *6*, 771-777. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.093

[17] Aissa, M., Belghith, A., & Drira, K. (2013). New strategies and extensions in weighted clustering algorithms for mobile ad hoc networks. *Procedia Computer Science*, *19*, 297-304. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.042

[18] Singh, H., & Singh, D. (2019). An energy efficient scalable clustering protocol for dynamic wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, *109*(4), 2637-2662. https://doi.org/10.1007/s11277-019-06701-7

[19] Panag, T. S., & Dhillon, J. S. (2018). Dual head static clustering algorithm for wireless sensor networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *88*, 148-156. https://doi.org/10.1016/j.aeue.201.^03019

[20] Toor, A. S., & Jain, A. K. (2019). Energy Aware Cluster Based Multi-hop Energy Efficient Routing Protocol using Multiple Mobile Nodes (MEACBM) in Wireless Sensor Networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *102* ,41-53 .https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.02.006

[21] Nehra, V., Sharma, A. K., & Tripathi, R. K. (2019). NMR inspired energy efficient protocol for heterogeneous wireless sensor network. *Wireless Networks*, *25*(6), 3689-3700. https://doi.org/10.1007/s11276-019-01963-2

[22] Gupta, P., Raj, P., Tiwari, S., Kumari, P., & Mehra, P. S. (2020, Apr 1). *Energy efficient diagonal based clustering protocol in wireless sensor network.* Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communications (ICICC), Delhi 110089, India https://ssrn.com/abstract=3565781

[23] Elsmany, E. F. A., Omar, M. A., Wan, T. C., & Altahir, A. A. (2019). EESRA: Energy Efficient Scalable Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, *7*, 96974-96983. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929578

[24] Anzola, J., Pascual, J., Tarazona, G., & Gonzalez Crespo, R. (2018). A clustering WSN routing protocol based on kd tree algorithm. *Sensors*, *18*(9), 2899. https://doi.org/10.3390/s18092899

[25] Younis, O., & Fahmy, S. (2004). HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *3*(4), 366-379. https://doi.org/10.1109/TMC.2004.41

[26] Kim, K., & Cha, B. (2007, Aug 26-29). *A Topology Control Scheme for Avoiding Sensing Hole in Wireless Sensor Networks.* 2007 International Conference on Computational Science and its Applications (ICCSA 2007), Kuala Lampur, Malaysia https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4301174

[27] Asaduzzaman & ,Kong, H. Y. (2010). Energy efficient cooperative LEACH protocol for wireless sensor networks. *Journal of Communications and Networks*, *12*(4), 358-365. https://doi.org/10.1109/JCN.2010.6388472

[28] Kim, H., Kim, C., Kim, J., Seo, M., Lee, S., & Lee, T .(2015) .A context aware cooperative communication method in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *11*(6), 357509. https://doi.org/10.1155/2015/357509

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 273-289
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.132764
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.14.7

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Numerical Investigation of Boundary Layer Separation in a 3-D Divergent Channel under the influence of a non-Uniform Magnetic Field

Seyed Morteza Moghimi[1]*, Mehran Khaki Jamei[2], Morteza Abbasi[3], Mohammad Hasan Taheri[4], Nematollah Askari[5]

[1]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.
[2,3] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.
[4] PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
[5] Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 03.08.2021
Revised: 06.14.2021
Accepted: 06.29.2021

Keyword:
Boundary layer separation
3-D divergent channel
Non-uniform magnetic field
OpenFoam
Magnetohydrodynamics

***Corresponding Author:**
Seyed Morteza Moghimi
Email:
moghimi4999@yahoo.com

ABSTRACT

In the present research, the non-uniform magnetic field effect on separation phenomenon in divergent channels was investigated numerically. The governing equations, including continuity and momentum equations, were presented and simplified for the laminar, steady, and incompressible flow; then, a non-uniform magnetic field was applied to the flow. Hence, the finite volume method using the OpenFOAM CFD toolbox was employed and a code for 3-D divergent channel flow under a non-uniform magnetic field developed. The effect of non-uniform magnetic field intensity on the boundary layer separation phenomenon on the divergent channel wall was investigated. The results show that the separation in the flow without applying a magnetic field occurs in Re=250 on the channel's upper (lower) wall. By applying the magnetic field and increasing the Hartmann, the boundary layer separation was delayed and in Ha equals 4, the separation is completely deleted and not observed. Under the same conditions, near the sidewalls, the separation occurs sooner than the channel entrance. Furthermore, by reducing the Reynolds to 208.33, the separation occurs late. In a 3-D channel that has a width ten times bigger than its height, the separation points far from the side walls are almost the same as a 2-D channel.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۸۹-۲۷۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.132764
20.1001.1.23829796.1400.18.3.14.7
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

حل عددی جدایش لایه مرزی در کانال واگرا سه‌بعدی تحت تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت

سید مرتضی مقیمی[۱*]، مهران خاکی جامعی[۲]، مرتضی عباسی[۳]، محمدحسن طاهری[۴]، نعمت‌اله عسکری[۵]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.
۲ و ۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.
۴- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
۵- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

کلید واژگان:
جدایش لایه مرزی
کانال واگرای سه‌بعدی
میدان مغناطیسی غیریکنواخت
اوپن‌فوم
هیدرودینامیک مغناطیسی

***نویسنده مسئول:** سید مرتضی مقیمی
پست الکترونیکی:
moghimi4999@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر رفتار جریان سیال و پدیده جدایش در یک کانال واگرا سه‌بعدی به‌صورت عددی بررسی شده است. معادلات حاکم شامل پیوستگی و مومنتم تعمیم‌یافته برای جریان سیال آرام، پایدار و تراکم‌ناپذیر است. به‌منظور مدل‌سازی و حل عددی به روش حجم محدود، از نرم‌افزار متن باز اوپن‌فوم برای کانال واگرای سه‌بعدی تحت تأثیر میدان مغناطیسی متغیر استفاده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد در غیاب میدان مغناطیسی و در رینولدز ۲۵۰، بدون اعمال میدان مغناطیسی، جدایش در دیواره‌های بالا و پایین کانال واگرا ایجاد می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی مشاهده می‌گردد که جدایش لایه مرزی به تأخیر خواهد افتاد. مشاهده گردید که با افزایش عدد هارتمن تا چهار، پدیده جدایش کاملاً حذف می‌شود و از بین می‌رود. در شرایط مشابه نشان داده شد هراندازه به دیواره جانبی نزدیک شویم، جدایش لایه مرزی زودتر رخ خواهد داد و با کاهش عدد رینولدز به ۲۰۸/۳۳، جدایش لایه مرزی نسبت به ورودی کانال، دیرتر اتفاق خواهد افتاد. همچنین مشخص گردید اگر پهنای کانال بیش از ۱۰ برابر ارتفاع کانال در نظر گرفته شود، تأثیر دیواره‌های جانبی ناچیز است و نتایج جدایش در جریان سه‌بعدی همانند جریان دوبعدی خواهد شد.

مقدمه

بررسی و تحلیل جریان هیدرودینامیکی و هیدرومغناطیسی در داخل کانال‌های واگرا و تعیین نقطه جدایش از مباحث مهم در مهندسی مکانیک است. در کانال‌های واگرا با افزایش سطح مقطع در طول جریان، سرعت کاهش و فشار نامطلوب افزایش می‌یابد که سبب جدایش لایه مرزی و اتلاف زیاد انرژی می‌شود. این مسئله در گرمایش و تهویه مطبوع [۱] و سیستم خنک‌کننده رآکتورها [۲] قابل بررسی است. نیروی الکترومغناطیسی به‌واسطه تقابل جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی در سیال رسانا، باعث ایجاد نیروی رانش می‌شود که کاربرد آن در صنایع فضایی، دریایی، درمانی، مهندسی شیمی و محیط‌زیست [۳] در حال افزایش است و همچنین می‌توان از آن برای کنترل جدایش لایه مرزی در کانال‌های واگرا نیز استفاده شود.

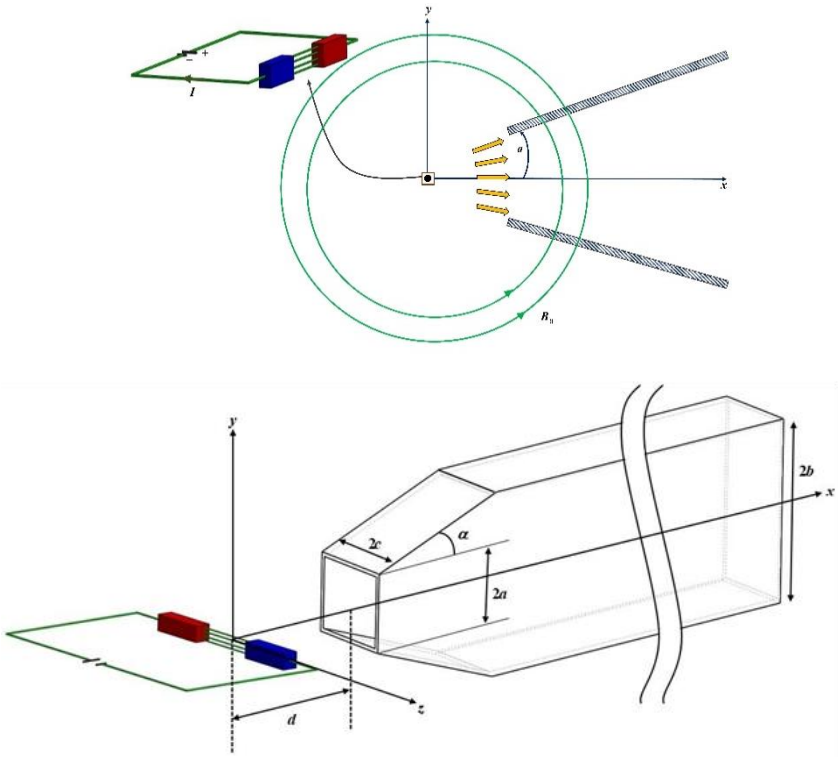
جریان هیدرودینامیک مغناطیسی با توجه به غیرخطی بودن معادلات مومنتم، به‌سادگی قابل بررسی نیست و محققان روش‌های مختلفی ازجمله روش تحلیلی [۲; ۴-۷]، روش عددی [۸-۱۰] و تجربی [۱۱; ۱۲] ارائه کردند. آکسفورد [۱۳] اولین محققی بود که جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در کانال واگرا را مطالعه کرد. پس از آن بررسی‌هایی به روش عددی [۱۴; ۱۵]، تحلیلی [۱۶; ۱۷] و تجربی [۱۸; ۱۹] بر روی این نوع جریان در کانال واگرا انجام شده است. دنیس و دولیکراویچ [۱۴] با مطالعه عددی المان محدود، نشان دادند که میدان مغناطیسی می‌تواند فشار استاتیکی را در کانال واگرا افزایش دهد. آلم و همکاران [۱۶] با استفاده از یک روش تحلیلی، تأثیرات رینولدز مغناطیسی را بر جریان هیدرودینامیک مغناطیسی جفری- همل بررسی کردند. باباشو [۱۸] با مطالعه تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر کانال واگرا به روش تجربی دریافت که رفتار سیال در نقاط مختلف کانال در تقابل با میدان مغناطیسی متفاوت می‌باشد. ماکینده [۲۰] تأثیر رینولدز مغناطیسی بر جریان سیال در یک کانال همگرا- واگرا را تحلیل کرد. همچنین احمد و همکاران [۲۱] با شبیه‌سازی عددی جریان خون به جریان جفری- همل، با اعمال میدان مغناطیسی رفتار خون را با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی بررسی کردند. همچنین مطالعاتی برای جریان هیدرودینامیک مغناطیسی نانوسیال [۲۲] و سیال غیرنیوتنی [۲۳] در کانال واگرا انجام شد.

یکی از روش‌های حل معادلات حاکم، روش عددی حجم محدود است که در اوپن‌فوم نیز برای گسسته‌سازی معادلات از این روش استفاده شده است. الگوریتم سیمپل یکی از الگوریتم‌هایی است که برای حل معادلات سرعت که با فشار کوپل شده ارائه گردیده است [۲۴]. در سال‌های اخیر نرم‌افزارهایی مانند فلوئنت، سی‌اف‌ایکس و اوپن‌فوم برای شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیک مغناطیسی توسعه یافته‌اند [۲۵; ۲۶]. همچنین پژوهشگران تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت در جریان داخل کانال واگرا برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی به روش نیمه‌تحلیلی را بررسی کردند [۲۷; ۲۸].

با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، برای کنترل و پیشگیری جدایش لایه مرزی در کانال واگرای سه‌بعدی با استفاده از میدان مغناطیسی غیریکنواخت به روش عددی تاکنون مطلبی ارائه نشده است. در واقع، بیشتر پدیده‌های میدان مغناطیسی به‌صورت غیریکنواخت اعمال می‌شوند؛ بنابراین هدف این تحقیق، بررسی عددی نقطه جدایش لایه مرزی برای یک کانال واگرای مشخص سه‌بعدی در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت می‌باشد. در واقع نوآوری اول این پژوهش، در نظر گرفتن میدان مغناطیسی غیریکنواخت است که به واقعیت پدیده‌ها نزدیک‌تر است. همچنین به‌عنوان نوآوری دیگر، توسعه برنامه عددی برای حل مسئله مورد نظر است. در این پژوهش از برنامه متن باز اوپن‌فوم استفاده شده است که برنامه پیش‌فرض و حلگر موجود در آن باید با توجه به شرایط میدان مغناطیسی غیریکنواخت و اعمال خواص ترموفیزیکی سیال توسعه داده شود تا بتوان با استفاده از آن، محل جدایش لایه مرزی تعیین و بحث شود.

بیان مسئله

در این پژوهش، تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر جدایش لایه مرزی در کانالی واگرا با زاویه واگرایی 2α بررسی شده است. مطابق شکل ۱ برای ایجاد میدان مغناطیسی عمود بر جریان شعاعی داخل کانال واگرا، از حلقه سیم‌های موازی استفاده شده که جریان الکتریکی از قطب مثبت باتری به یک صفحه توزیع‌کننده جریان، متصل به این سیم‌پیچ وارد می‌شود. پس از عبور جریان الکتریکی از داخل سیم‌پیچ، جریان وارد یک صفحه جمع‌کننده می‌شود و از آن به سمت قطب منفی باتری می‌رود. هنگام عبور جریان الکتریکی از داخل سیم‌پیچ، اطراف آن، میدان مغناطیسی القا می‌شود که در جهت θ است و سیم‌پیچ در مرکز هم‌گرایی کانال واگرا قرار دارد. همچنین شدت میدان مغناطیسی به‌وجودآمده در کانال واگرا توسط جریان الکتریکی قابل‌تنظیم است. در کانال واگرا، به دلیل به‌وجود آمدن پدیده جدایش لایه مرزی، جریان برگشتی به‌وجود می‌آید. در این حالت نمی‌توان شرایط مرزی ثابتی در خروجی اعمال کرد؛ بنابراین خروجی کانال واگرا با سطح مقطع ثابت امتداد می‌یابد تا جریان در آن به توسعه‌یافتگی برسد. در شکل ۱، $2b$ ارتفاع خروجی، $2c$ پهنای کانال، L_1 طول کانال واگرا، L_2 طول کانال با مقطع ثابت، 2α زاویه واگرایی و d فاصله بین مرکز سیم‌پیچ و ورودی کانال است.



شکل ۱. شماتیکی از هندسه مسئله

معادلات حاکم

برای سیال القاناپذیر، معادله مومنتوم با حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت نوشته می‌شود. میدان مغناطیسی کل برابر $B = B_o + b'$ می‌باشد که در آن B_o میدان مغناطیسی اعمالی و b' میدان مغناطیسی القایی است.

در این تحقیق عدد رینولدز مغناطیسی بسیار کوچک‌تر از یک فرض می‌شود. در چنین شرایطی، b' (میدان القایی ناشی از جریان الکتریکی القا شده در سیال) ضعیف می‌باشد و قابل صرف‌نظر است [۲۹]. این فرض برای کاربردهای مدنظر این پژوهش جواب‌های قابل‌قبولی را به همراه دارد که در بسیاری از مقالات استفاده و تأیید شده است. هنگامی که سیال، القاپذیر نباشد عدد رینولدز مغناطیسی بسیار کوچک‌تر از یک می‌شود و می‌توان از میدان مغناطیسی القایی صرف‌نظر کرد؛ بنابراین $B = B_o$ می‌شود.

معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتم و قانون اهم، در غیاب میدان الکتریکی خارجی و با صرف‌نظر از میدان الکتریکی القایی [۲۹] را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\nabla.\vec{V} = 0 \tag{۱}$$

$$\rho\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \mu_f\vec{\nabla}^2\vec{V} + \vec{J}\times\vec{B} \tag{۲}$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V}\times\vec{B}_o) \tag{۳}$$

که در آن $\vec{V}$، $\vec{J}$، P، μ_f و σ به‌ترتیب میدان سرعت، چگالی جریان الکتریکی، فشار، لزجت دینامیکی و ضریب رسانایی الکتریکی سیال است. میدان مغناطیسی غیریکنواخت در جهت مختصات استوانه‌ای اعمال می‌شود. مبدأ دستگاه مختصات استوانه‌ای روی مبدأ دستگاه مختصات دکارتی قرار دارد؛ بنابراین جملات چگالی جریان الکتریکی و نیروی لورنتز $\vec{F}_L$ را می‌توان به صورت زیر استخراج کرد:

$$\vec{J} = \sigma\left(\vec{V}\times\vec{B}\right) = \sigma\times\frac{1}{r}\begin{vmatrix}\vec{e}_r & r\vec{e}_\theta & \vec{e}_z\\ v_r & rv_\theta & v_z\\ 0 & rB_\theta & 0\end{vmatrix} = \sigma[(-v_zB_\theta)\vec{e}_r + (v_rB_\theta)\vec{e}_z] \tag{۴}$$

$$\vec{F}_L = \left(\vec{J}\times\vec{B}\right) = \begin{vmatrix}\vec{e}_r & \vec{e}_\theta & \vec{e}_z\\ -\sigma v_zB_\theta & 0 & \sigma v_rB_\theta\\ 0 & B_\theta & 0\end{vmatrix} = -\sigma v_r B_\theta^2\vec{e}_r - \sigma v_z B_\theta^2\vec{e}_z \tag{۵}$$

که V_r و V_θ به‌ترتیب سرعت در جهت r و θ در دستگاه استوانه‌ای هستند. میدان مغناطیسی غیریکنواخت ایجاد شده برابر است با:

$$B_\circ = \frac{\mu' I}{2\pi r} \quad , \quad \mu' = \mu_\circ . \mu_r \tag{۶}$$

که μ'، μ_r و μ_o به‌ترتیب ضریب تراوایی متوسط ویژه، ضریب تراوایی نسبی و ضریب تراوایی فضای آزاد (برابر $4\pi\times10^7$) هستند. لازم است نیروی لورنتز در مختصات دکارتی تعریف شود که از تبدیلات زیر استفاده می‌شود:

$$\vec{e}_r = \frac{x\,\vec{i} + y\,\vec{j}}{\sqrt{x^2+y^2}} \tag{۷}$$

$$r = \sqrt{x^2+y^2} \tag{۸}$$

$$v_r = \sqrt{u^2+v^2} \tag{۹}$$

که در آن u و v به‌ترتیب سرعت در جهت x و y در دستگاه دکارتی است. حال نیروی لورنتز در دستگاه دکارتی به شکل زیر خواهد شد:

$$\vec{F}_L = \left(\vec{J}\times\vec{B}\right) = -\sigma\,\frac{\mu_\circ^2 I^2\,(u^2+v^2)^{0.5}}{4\pi^2\,(x^2+y^2)^{1.5}}\,x\,\vec{i} - \sigma\,\frac{\mu_\circ^2 I^2\,(u^2+v^2)^{0.5}}{4\pi^2\,(x^2+y^2)^{1.5}}\,y\,\vec{j} - \sigma\,\frac{\mu_\circ^2 I^2\,w}{4\pi^2\,(x^2+y^2)}\,\vec{k} \tag{۱۰}$$

با جای‌گذاری معادله ۱۰ در معادله ۲، معادلات پیوستگی و مومنتم در جهت x، y و z و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{۱۱}$$

$$\rho\left[u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_f\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right] - \sigma\frac{\mu_\circ^2 I^2\,(u^2+v^2)^{0.5}}{4\pi^2\,(x^2+y^2)^{1.5}}\,x \tag{۱۲}$$

$$\rho\left[u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_f\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right] - \sigma\frac{\mu_\circ^2 I^2\,(u^2+v^2)^{0.5}}{4\pi^2\,(x^2+y^2)^{1.5}}\,y \tag{۱۳}$$

$$\rho\left[u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right]=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu_f\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right]-\sigma\frac{\mu_e^2 I^2\ w}{4\pi^2\ (x^2+y^2)} \quad (۱۴)$$

شرایط مرزی

با توجه به هندسه مسئله و فرضیاتی که پیشتر بیان شد، شرایط مرزی سرعت به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x=d \qquad u=u_{inlel}\,,\ v=v_{inlel}\,,\ w=0 \quad (۱۵)$$

$$x=d+L_1+L_2 \qquad P=0,\ \frac{\partial u}{\partial x}=0,\ \frac{\partial v}{\partial x}=0,\ \frac{\partial w}{\partial x}=0 \quad (۱۶)$$

$$d<x<d+L_1\,,\ y=\frac{a}{d}x \qquad u=v=w=0 \quad (۱۷)$$

$$d+L_1<x<d+L_1+L_2\,,\ y=\pm b \qquad u=v=w=0 \quad (۱۸)$$

$$z=0,2c \qquad u=v=w=0 \quad (۱۹)$$

از آنجا که نتایج حاصل از این پژوهش قابل‌تعمیم باشد، اعداد بی‌بعد رینولدز، هارتمن و ضریب فشار به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re=\frac{u_{inlet}\,L}{\upsilon} \quad (۲۰)$$

$$Ha=B_o\,L\sqrt{\frac{\sigma}{\mu_f}} \quad (۲۱)$$

$$c_P=\frac{p-p_0}{\frac{1}{2}\rho u_{inlet}^2} \quad (۲۲)$$

که در آن ν و L به‌ترتیب لزجت دینامیکی و طول مشخصه (برابر $r\alpha$) هستند.

حل عددی

در این تحقیق، یک کانال واگرای سه‌بعدی با سطح مقطع ۲×۳/۶ سانتی‌مترمربع و طول ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله، از برنامه متن باز اوپن‌فوم برای مدل‌سازی هندسه، گسسته‌سازی معادلات حاکم و در نهایت حل عددی (روش حجم کنترل) استفاده شده است. برای استفاده از الگوریتم سیمپل حلگر سیمپل‌فوم به‌کار گرفته شده است. همچنین به‌منظور گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی از طرح بالادست و برای جملات پخش، از طرح

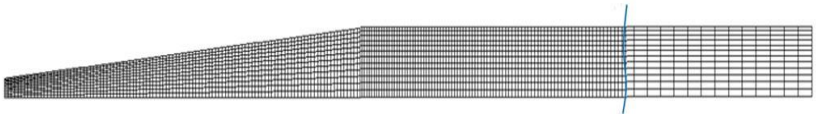
تفاضل مرکزی استفاده شده است. برای وارد کردن نیروی لورنتز ناشی از میدان مغناطیسی غیریکنواخت به اوپن‌فوم لازم است برنامه موجود توسعه داده شود و نیروی لورنتز به‌عنوان جمله چشمه به برنامه اضافه گردد. همچنین، فایل‌های جدیدی برای تعریف خواص ترموفیزیکی لیتیوم مایع (جدول ۱) به دلیل کاربرد در صنعت [۳۰-۳۳]، و محاسبه شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت با تغییر جریان الکتریکی در سیم‌پیچ، به حلگر اضافه شده‌اند.

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی لیتیوم مایع

ρ (kg/m^3)	ν (m^2/s)	σ (Ω.m)$^{-1}$	μ_0 (N/A^2)
۵۱۰	۱/۲×۱۰$^{-۶}$	۴×۱۰^{۶}	۱۰$^{-۶}$

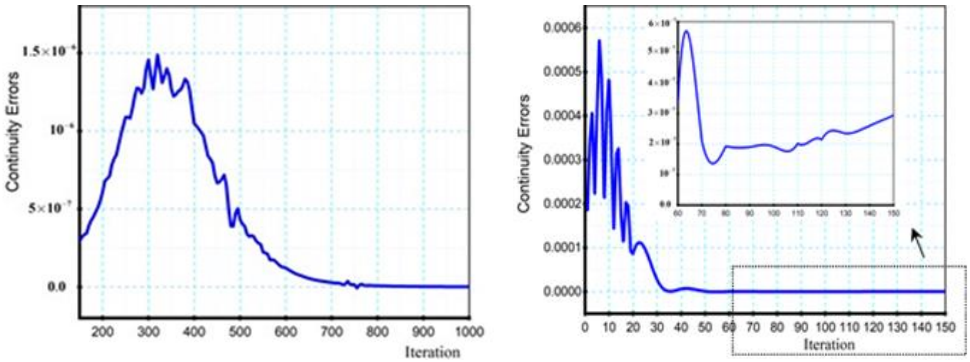
همگرایی و اعتبارسنجی

شبکه به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است که از یک شبکه‌بندی غیریکنواخت استفاده شده است. بدین‌گونه که با نزدیک شدن به دیواره کانال، اندازه شبکه‌بندی ریزتر می‌شود و فاصله آن‌ها از یکدیگر کاهش می‌یابد تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود. به سبب تقارن هندسی، نصف شکل مسئله شبکه زده شده است تا زمان حل رایانه کاهش یابد.



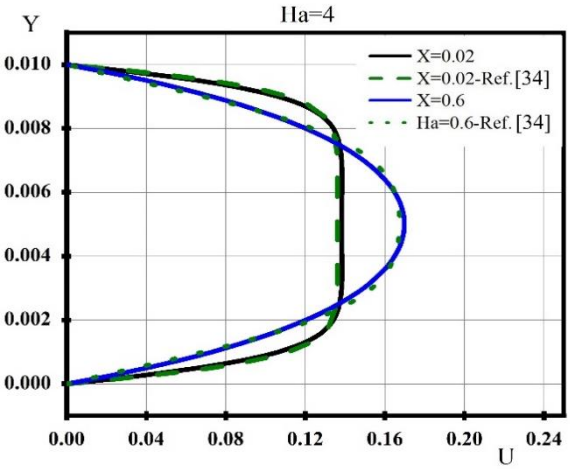
شکل ۲. ساختار هندسی شبکه

برای هم‌گرایی نتایج، خطای معادله پیوستگی حدود ۱۰$^{-۱۰}$ در نظر گرفته شده است (شکل ۳). همچنین مقایسه نتایج حاصل برنامه تغییریافته در این پژوهش با تحقیق طاهری و همکاران [۳۴] (شکل ۴) مشخص می‌کند که برنامه توسعه‌یافته از دقت قابل‌قبولی برخوردار است.



الف: تا ۱۵۰ تکرار **ب: تکرار از ۱۵۰ تا ۱۰۰۰**

شکل۳. بررسی فرایند تکرار برای هم‌گرایی



شکل ۴. مقایسه پروفیل سرعت حاصل از برنامه متن باز ویرایش شده با مرجع [۳۴]

جدول ۲. نتایج بررسی استقلال از شبکه برای کانال سه‌بعدی ($\alpha = 5^{o}$ ، Ha=1 و Re=250)

تعداد شبکه	$X_{Sep.}$ (cm)		
L_2#N×L_1×c×b×a	Z=5 mm	Z=3 mm	Z=1 mm
۱۶×۱۶×۱۴×۱۲۰×۳۲۰#۸۵۶۰	۱۳/۵۵۱۶	۹/۹۳۷۸	۶/۶۲۵۲
۱۸×۱۸×۱۶×۱۳۵×۳۶۰#۱۴۲۵۶۰	۱۳/۲۵۰۴	۹/۶۳۶۶	۶/۳۲۴۰
۲۰×۲۰×۱۸×۱۵۰×۴۰۰#۱۹۸۰۰۰	۱۳/۲۵۰۴	۹/۶۳۶۶	۶/۰۲۲۹
۲۶×۲۶×۲۴×۱۹۵×۵۲۰#۴۴۶۱۶۰	۱۳/۲۵۰۴	۹/۶۳۶۶	۶/۰۲۲۹

جدول ۲ نتایج حاصل از استقلال شبکه‌بندی از محل را برای محل نقطه جدایش ($X_{Sep.}$) روی دیواره XZ کانال واگرا با پهنای متفاوت Z را نشان می‌دهد. مقادیر گرادیان سرعت عمود بر صفحه برای Z=1، Z=3mm و Z=5mm بررسی شده است. دیده می‌شود در Ha=1، Re=250 و تعداد شبکه‌بندی ۱۹۸۰۰۰ و بیشتر، اندازه محل نقطه جدایش روی دیواره برای هر مقدار از Z، با ریزتر شدن شبکه تغییری نمی‌کند. در نتیجه، این اندازه شبکه برای انجام محاسبات در نظر گرفته شده‌اند.

بررسی نتایج

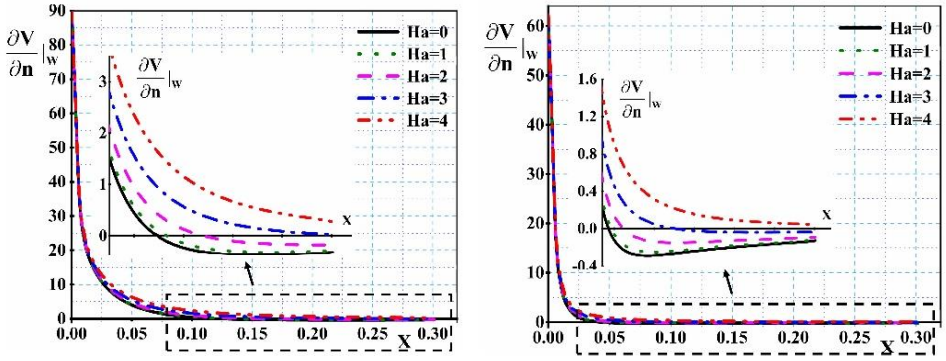
شکل ۵ و جدول ۳، تأثیر شدت میدان مغناطیسی را بر جدایش لایه مرزی جریان با عدد رینولدز ۲۵۰ روی صفحه بالایی (پایینی) کانال واگرا نشان می‌دهد. از نظر فیزیکی هنگامی جدایش اتفاق می‌افتد که گرادیان سرعت بی‌بعد روی دیواره صفر است. مشاهده می‌شود با افزایش شدت میدان مغناطیسی (عدد هارتمن)، گرادیان سرعت دیرتر در کانال به صفر می‌رسد. در نتیجه جدایش لایه مرزی روی دیواره با افزایش شدت میدان مغناطیسی دیرتر اتفاق می‌افتد.

برای مثال، با بررسی جدول ۳ مشاهده می‌شود در Z=3 mm هنگامی که میدان مغناطیسی وجود ندارد (عدد هارتمن صفر) جدایش در ۹/۰۳۴۳ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش آن تا عدد هارتمن

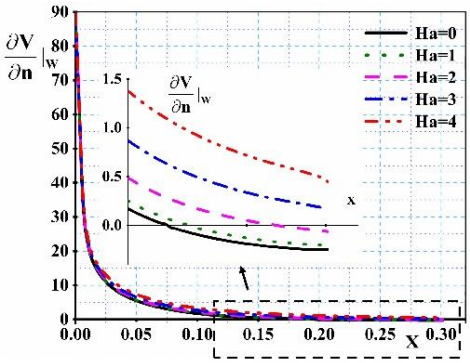
۳ جدایش تا ۲۵/۲۹۶۳ سانتی‌متر به تأخیر می‌افتد و زمانی که عدد هارتمن به ۴ می‌رسد دیگر جدایشی رخ نمی‌دهد. همچنین با نزدیک شدن به دیواره کناری، در اثر تنش دیواره کناری و افزایش نیروی مقاوم، جدایش نزدیک‌تر به ورودی کانال واگرا اتفاق می‌افتد. جدول ۳ نشان‌دهنده آن است که بدون اعمال میدان مغناطیسی در تمام قسمت پهنای جداره بالایی کانال، جدایش اتفاق می‌افتد که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش هارتمن، جدایش لایه مرزی به تأخیر افتاده تا زمانی که هارتمن به ۴ می‌رسد دیگر پدیده جدایش در هیچ مکانی مشاهده نمی‌شود. جدول ۴ همانند جدول ۳ تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر جدایش لایه مرزی اما برای عدد رینولدز ۲۰۸/۳۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در غیاب میدان مغناطیسی در بخش زیادی از جداره XZ جدایش اتفاق می‌افتد که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن، جدایش لایه مرزی به تأخیر افتاده تا جایی که در عدد هارتمن ۳، پدیده جدایش مشاهده نمی‌شود. با مقایسه جدول ۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که در هارتمن ثابت با افزایش رینولدز جدایش لایه مرزی نزدیک‌تر به ورودی کانال واگرا اتفاق می‌افتد.

جدول ۳. تأثیر هارتمن بر مکان جدایش بر حسب سانتی‌متر

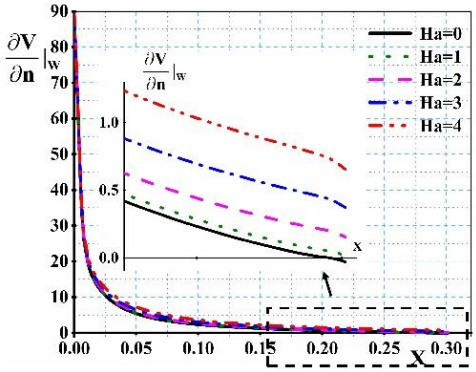
هارتمن / Z(mm)	۰	۱	۲	۳	۴
۰ و ۳۶	۴/۲۱۶۰	۴/۵۱۷۱	۶/۰۲۲۹	۱۲/۶۴۸۱	-
۱ و ۳۵	۵/۷۲۱۷	۶/۰۲۲۹	۸/۱۳۰۹	۱۶/۲۶۱۹	-
۵ و ۳۱	۱۲/۳۴۷۰	۱۳/۲۵۰۴	۱۶/۸۶۴۲	-	-
۹ و ۲۷	۱۹/۸۷۵۶	۲۱/۳۸۱۴	۲۶/۸۰۲۰	-	-
۱۳ و ۲۳	۲۶/۵۰۰۸	۲۸/۰۰۶۶	-	-	-
۱۷ و ۱۹	۲۹/۵۱۲۳	-	-	-	-
۱۸	۲۹/۵۱۲۳	-	-	-	-



الف: Z=0 ب: Z=5 mm



ج: Z=9 mm

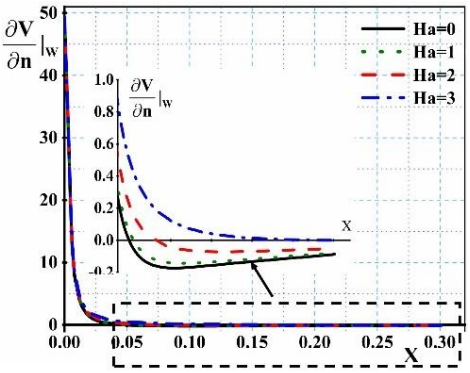


د: Z=18 mm

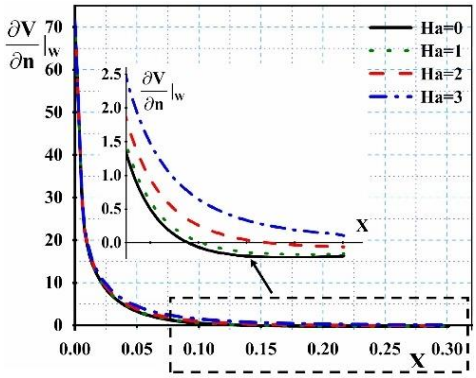
شکل ۵. تأثیر عدد هارتمن بر جدایش در مقطع مختلف عرضی دیواره بالایی

جدول ۴. تأثیر هارتمن بر مکان جدایش بر حسب سانتی‌متر با رینولدز ۲۰۸/۳۳ روی دیواره بالایی (پایینی) کانال واگرا

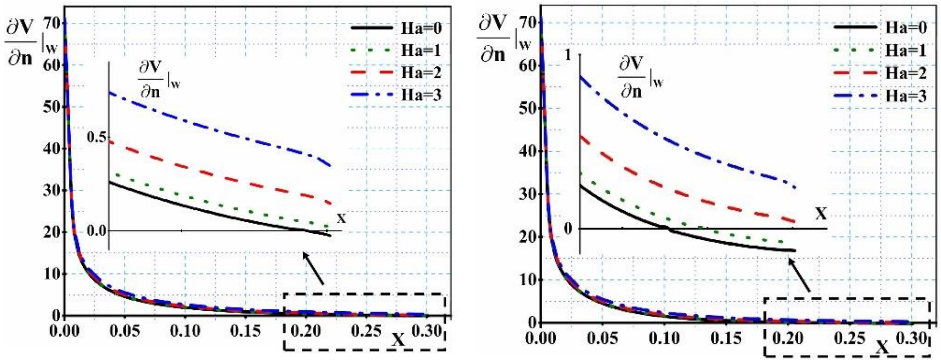
هارتمن / Z(mm)	۰	۱	۲	۳
۰ و ۳۶	۴/۸۱۸۳	۵/۴۲۰۶	۸/۱۳۰۹	-
۱ و ۳۵	۶/۶۵۵۲	۷/۲۲۷۵	۱۰/۵۴۰۴	-
۵ و ۳۱	۱۳/۸۵۲۷	۱۵/۳۵۸۵	۲۱/۹۸۳۶	-
۹ و ۲۷	۲۲/۵۸۵۹	۲۴/۶۹۴۰	-	-
۱۳ و ۲۳	۲۹/۲۱۱۱	-	-	-
۱۷ و ۱۹	-	-	-	-
۱۸	-	-	-	-



الف: Z=0



ب: Z=5 mm

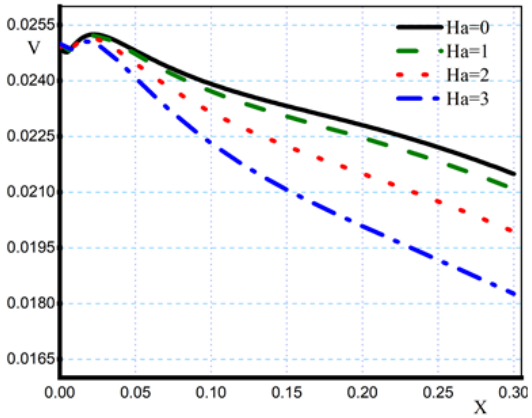


ج: Z=9 mm د: Z=18 mm

شکل ۶. تأثیر عدد هارتمن بر جدایش در مقطع مختلف عرضی دیواره بالایی

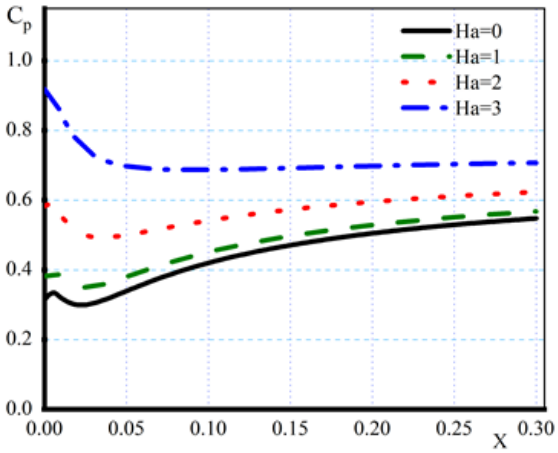
شکل ۶ نیز همانند شکل ۵ تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر جدایش لایه مرزی اما برای عدد رینولدز ۲۰۸/۳۳ را نشان می‌دهد که با کم شدن عدد رینولدز، در عدد هارتمن کم‌تر یعنی هارتمن برابر ۳ از پدیده جدایش جلوگیری می‌کند.

شکل ۷ تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت در مرکز کانال واگرا را نشان می‌دهد. دو عامل، یعنی کاهش سطح مقطع جریان ناشی از رشد لایه مرزی و نرخ افزایش هندسی سطح مقطع کانال در منحنی توزیع سرعت تأثیرگذار است که رفتار غیرعادی در ابتدای کانال را می‌توان این‌گونه بیان کرد. در ناحیه ورودی کانال، نرخ افزایشی سطح مقطع کانال، شدیدتر از کاهش مقطع جریان ناشی از تشکیل لایه مرزی می‌باشد. از این رو سرعت در مرکز کاهش می‌یابد و بعد از مسافت کوتاهی، عامل کاهش سطح مقطع جریان، به سبب نزدیک شدن لایه مرزی جداره‌ها به همدیگر برای یک ناحیه محدود، قوی‌تر می‌شود و سرعت در مرکز کانال افزایش می‌یابد. سپس عامل دوم در کل مسیر کاملاً غالب می‌گردد و روند کاهشی سرعت در مرکز کانال مشاهده می‌شود.



شکل ۷. تأثیر عدد هارتمن بر سرعت خط مرکز برای Re =208.33

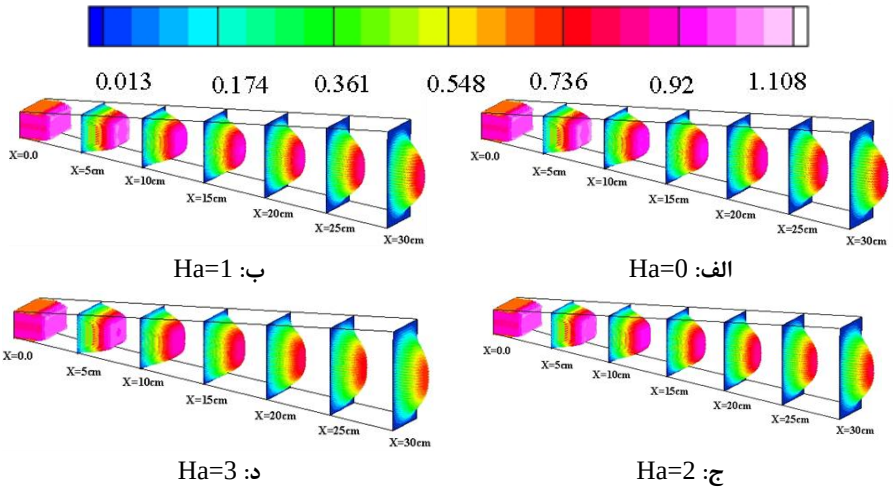
شکل ۸ تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر ضریب فشار در مرکز کانال را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، هنگامی که سرعت روند کاهشی دارد، فشار دینامیکی تبدیل به فشار استاتیکی می‌گردد و باعث افزایش فشار در مرکز کانال می‌شود.



شکل ۸. تأثیر عدد هارتمن بر ضریب فشار خط مرکز برای Re =208.33

شکل ۹ تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر کانتور توزیع سرعت بی‌بعد جریان در مقاطع مختلف کانال سه‌بعدی را نشان می‌دهد. مطابق رابطه (۶) شدت میدان مغناطیسی با فاصله نسبت عکس دارد؛ بنابراین، در ابتدای کانال شدت میدان مغناطیسی زیاد است و نیروی لورنتز بزرگی را به‌وجود می‌آورد. به‌گونه‌ای که در تقابل با نیروی اینرسی سیال، در توزیع سرعت فرورفتگی مشاهده می‌شود اما با فاصله گرفتن از ابتدای کانال و با کاهش شدت میدان مغناطیسی، مقدار نیروی لورنتز کم می‌شود و تأثیر آن بر نیروی اینرسی نیز کاهش می‌یابد و در توزیع سرعت، تورفتگی مشاهده نمی‌شود. با افزایش عدد هارتمن در نقاط مشابه، نیروی لورنتز نیز افزایش می‌یابد و توزیع سرعت پخ‌تری مشاهده می‌شود.

برای مقایسه نتایج کانال واگرای سه‌بعدی با کانال دوبعدی، کانالی سه‌بعدی با پهنای ۳۶ سانتی‌متر حل شده است که پهنای آن در مقایسه با ارتفاع ۲ سانتی‌متری ورودی آن زیاد می‌باشد. تحت شرایط Re=208.33 و Ha=1 محل جدایش روی خط تقارن صفحه بالایی یا پایینی (Z=18cm) برابر ۱۴/۴۴ سانتی‌متر به‌دست می‌آید. در شرایط مشابه در کانال دوبعدی، جدایش در ۱۴/۱۵۳ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. بنابراین اختلاف کمتر از ۲ درصد می‌شود؛ در نتیجه برای کانالی که پهنای آن نسبت به ارتفاع ورودی زیاد باشد، اثرات دیواره بر مرکز کانال ناچیز می‌باشد و نتایج دوبعدی را می‌توان برای مرکز کانال سه‌بعدی استفاده کرد.



شکل ۹. تأثیر عدد هارتمن بر توزیع سرعت بی‌بعد سه‌بعدی برای Re =208.33

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با به‌کارگیری روش عددی حجم کنترل و با استفاده از توسعه برنامه در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم، جدایش لایه مرزی برای یک جریان آرام در کانال واگرا تحت تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بررسی شد. نتایج پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱- نشان داده شد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی (عدد هارتمن)، محل جدایش در جهت جریان به تأخیر می‌افتد تا جایی که از پدیده جدایش جلوگیری می‌شود. مشاهده گردید برای جریان با رینولدز ۲۵۰، در غیاب میدان مغناطیسی، جدایش رخ خواهد داد. با اعمال میدان مغناطیسی، محل این جدایش به تأخیر می‌افتد تا جایی‌که در یک عدد هارتمن مشخص (در اینجا عدد هارتمن برابر با ۴) جدایش لایه مرزی کاملاً از بین می‌رود.

۲- مشاهده گردید که در جریان سه‌بعدی با عدد رینولدز ۲۰۸/۳۳، هرچه به دیواره‌های کناری نزدیک‌تر شویم، جدایش زودتر اتفاق می‌افتد؛ به‌طوری که بدون اعمال میدان مغناطیسی در تمام قسمت جداره بالایی کانال، جدایش اتفاق می‌افتد ولی با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش هارتمن، جدایش لایه مرزی به تأخیر می‌افتد و در عدد هارتمن برابر با ۴ پدیده جدایش در هیچ مکانی مشاهده نمی‌شود.

۳- نتایج به‌دست‌آمده از حل یک جریان سه‌بعدی در یک کانال واگرا با پهنای زیاد با نتایج جریان دوبعدی در یک کانال واگرا با تقریب قابل‌قبولی مطابقت داشته است. در نتیجه می‌توان محل جدایش در جریان دوبعدی را برای این نوع هندسه معتبر دانست.

۴- در کانال واگرا برای یک مقدار معین از دبی جریان، با افزایش شدت میدان مغناطیسی شاهد روند افزایش فشار در کانال واگرا خواهیم بود.

References

[1] Li, A., Yang, C., Ren, T., Bao, X., Qin, E., & Gao, R. (2017). PIV experiment and evaluation of air flow performance of swirl diffuser mounted on the floor. *Energy and Buildings*, *156*, 58-69. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.045

[2] Abbasi, M., Domiri Ganji, D., & Taeibi Rahni, M. (2014). MHD flow in a channel using new combination of order of magnitude technique and HPM. *Tehnički vjesnik*, *21*(2), 317-321.

[3] Al-Habahbeh, O. M., Al-Saqqa, M., Safi, M., & Abo Khater, T. (2016). Review of magnetohydrodynamic pump applications. *Alexandria Engineering Journal*, *55*(2), 1347-1358. https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.001

[4] Afsahi, M. M., & Cheraghi Sepahvand, T. (2018). T-history: A simple and cost effective method for determining thermal properties of phase change materials (PCMs). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *15*(44), 13-26.

[5] Ghadikolaei, S. S., Hosseinzadeh, K., Ganji, D. D., & Jafari, B. (2018). Nonlinear thermal radiation effect on magneto Casson nanofluid flow with Joule heating effect over an inclined porous stretching sheet. *Case Studies in Thermal Engineering*, *12*, 176-187. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.009

[6] JAMEI, M. K., KHAZAYINEJAD, M., & GANJI, D. D. (2014). New results for boundary layer flow and convection heat transfer over a flat plate by using the homotopy perturbation method. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, *11*(4), 325-340. https://doi.org/10.2004/wjst.v11i4.498

[7] Taheri, M. H., Abbasi, M., & Jamei, M. K. (2017). An integral method for the boundary layer of MHD non-Newtonian power-law fluid in the entrance region of channels. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *39*(10), 4177-4189. https://doi.org/10.1007/s40430-017-0887-5

[8] Askari, N., & Taheri, M. H. (2020). Numerical Investigation of a MHD Natural Convection Heat Transfer Flow in a Square Enclosure with Two Heaters on the Bottom Wall. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(1), 101-121. https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112759

[9] Ganesh, N. V., Al-Mdallal, Q. M., & Kameswaran, P. K. (2019). Numerical study of MHD effective Prandtl number boundary layer flow of γ Al2O3 nanofluids past a melting surface. *Case Studies in Thermal Engineering*, *13*, 100413. https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100413

[10] Mohebujjaman, M. (2017). *Efficient numerical methods for magnetohydrodynamic flow.* [Clemson University]. Upstate South Carolina. https://www.proquest.com/openview/693e9e1eb3663ef79da13c14e80ff494/1?pq-origsite=gscholar&cbl= 18750

[11] Chen, H., Zhou, T., Yang, Z., Lü, R., Zhu, Z., & Ni, M. (2010). Magnetohydrodynamic experimental design and program for Chinese liquid metal LiPb experimental loop Dragon-Iv. *Fusion Engineering and Design*, *85*(10), 1742-1746. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.05.033

[12] Picologlou, B., & Reed, C. (1989). Experimental investigation of 3-D MHD flows at high Hartmann number and interaction parameter. In *Liquid Metal Magnetohydrodynamics* (pp. 71-77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0999-1_9

[13] Axford, W. I. (1961). The Magnetohydrodynamic Jeffrey-Hamel Problem For A Weakly Conducting Fluid. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, *14*(3), 335-351. https://doi.org/10.1093/qjmam/14.3.335

[14] Dennis, B. H., & Dulikravich, G. S. (2001). Optimization of magneto-hydrodynamic control of diffuser flows using micro-genetic algorithms and least-squares finite elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, *37*(5), 349-363. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00052-4

[15] Matsuo, T., Ishikawa, M., & Umoto, J. (1994). Numerical analysis of bifurcation phenomena in supersonic MHD generator with supersonic diffuser. *Energy Conversion and Management*, *35*(6), 507-516. https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90092-2

[16] Alam, M. S., Khan, M., & Rahman, M. (2013). Critical analysis of the influence of magnetic Reynolds number on MHD Jeffery-Hamel flows. *Int. J. of Appl. Math and Mech.*, *9*(5), 31-46.

[17] Moghimi, S., domiri ganji, D., Soleimani, S., Ghasemisahebi, E., & Bararnia, H. (2011). Application of homotopy analysis method to solve MHD Jeffery–Hamel flows in non-parallel walls. *Advances in Engineering Software*, *42*(3), 108-113. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.12.007

[18] Bobashev, S., Erofeev, A., Lapushkina, T. y., Poniaev, S., Vasil'eva, R., & Van Wie, D. (2002, Sept 29-oct 4). *Effect of MHD-interaction in various parts of diffuser on inlet shocks: Experiment.* AIAA/AAAF 11th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Orleans, France. https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-5183

[19] Murakami, T., & Okuno, Y. (2013, June 27-30). *Experiment and simulation of MHD power generation using convexly divergent channel.* 42nd AIAA plasmadynamics and lasers conference in conjunction with the 18th international conference on MHD Energy Conversion (ICMHD), Honolulu, Hawaii. https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2011-3287

[20] Makinde, O. D. (2008). Effect of arbitrary magnetic Reynolds number on MHD flows in convergent-divergent channels. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, *18*(6), 697-707. https://doi.org/10.1108/09615530810885524

[21] Ahmad, I., Ilyas, H., & Bilal, M. (2014). Numerical solution for nonlinear MHD Jeffery-Hamel blood flow problem through neural networks optimized techniques. *J. Appl. Environ. Biol. Sci*, *4*(75), 33-43.

[22] Ananthaswamy, V., & Yogeswari, N. (2016). A study on mhd jeffery–hamel flow in nanofluids using new homotopy analysis method. *International Journal of Scientific Research and Modern Education*, *1*(1), 2455-5630.

[23] Nourazar, S. S., Nazari-Golshan, A., & Soleymanpour, F. (2018). On the expedient solution of the magneto-hydrodynamic Jeffery-Hamel flow of Casson fluid. *Scientific Reports*, *8*(1), 1-16. https://doi.org/10.1038/s41598-018-34778-w

[24] Xisto, C., Páscoa, J., Oliveira, P., & Nicolini, D. (2010). Implementation Of A 3d Compressible Mhd Solver Able To Model Transonic Flows. In *V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010* (pp. 13). https://doi.org/10.13140/2.1.3128.8320

[25] De les Valls, E. M., & Batet, L. (2008, July 10-11). *OpenFOAM capabilities for MHD simulation under nuclear fusion technology conditions.* OpenFOAM workshop Milan, Barcelona, Spain. https://woodruffscientific.com/files/ElisabetMasDeLesValls.pdf

[26] Mistrangelo, C., & Bühler, L. (2011). Development of a numerical tool to simulate magnetohydrodynamic interactions of liquid metals with strong applied magnetic

fields. *Fusion Science and Technology*, *60*(2), 798-803. https://doi.org/10.13182/FST11-A12483

[27] Moghimi, S. M., Abbasi, M., Khaki Jamei, M., & Domiri Ganji, D. (2020). Boundary-layer separation in circular diffuser flows in the presence of an external non-uniform magnetic field. *Mech. Sci.*, *11*(1), 39-48. https://doi.org/10.5194/ms-11-39-2020

[28] Moghimi, S. M., Abbasi, M., Khaki Jamei, M., & Ganji, D. D. (2020). Effect of Non-uniform Magnetic Field on Non-newtonian Fluid Separation in a Diffuser. *International Journal of Engineering*, *33*(7), 1354-1363. https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.07a.23

[29] Roberts, P. H. (1967). *An introduction to magnetohydrodynamics*. Longmans London. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32683602/_P._H_Roberts__An_introduction_to_magnetohydrodyna(Bookos.org)-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642407226&Signature=fDND~tROBVIBS7Z8MGdsHT0Ijp6hVh9P0VpImQ1Kt5FA-xKItGwWdwQfWo7ZyJ02~WnrK~iKIK71hmV89n2MpEChlc9MR2F1bfg2-0-VsfexrYS7wafvgiqxj6skuNaMB4z~iq-lEoJqTXaAjngmdSOaE-4LRo~um1N~NiNU9Ru9pWW38l1BDowtBkuYlF0HDOczuqZF0qdNpS1LbBwF9NZ5WsTyz7IH~gByAlv1xaC~X8Sy7mxyLmSIgeAhePKTDp6v1O5xH1dB3mYfCUp3ySQfS7SiSJgu8Gj9AUlzfgPcyeycPSkV0~Vg-27x~cn489XkP48ExxvFORwdPsZFTg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

[30] Davison, H. W. (1968). *Compilation of thermophysical properties of liquid lithium*. National Aeronautics and Space Administration. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680018893/downloads/19680018893.pdf

[31] Lee, G. H., & Kim, H. R. (2018). Numerical analysis of the electromagnetic force for design optimization of a rectangular direct current electromagnetic pump. *Nuclear Engineering and Technology*, *50*(6), 869-876. https://doi.org/10.1016/j.net.2018.04.010

[32] Okita, T., Matsuda, S., Yamaoka, N., Hoashi, E., Yokomine, T., & Muroga, T. (2018). Study on measurement of the flow velocity of liquid lithium jet using MHD effect for IFMIF. *Fusion Engineering and Design*, *136*, 178-182. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.01.039

[33] Zinkle, S. (1998, July 27028). *Summary of physical properties for lithium, Pb-17Li, and (LiF) n• BeF2 coolants.* APEX study meeting, Sandia National Lab. http://www.fusion.ucla.edu/APEX/meeting4/1zinkle0798.pdf

[34] Taheri, M. H., Abbasi, M., & Khaki Jamei, M. (2019). Using artificial neural network for computing the development length of MHD channel flows. *Mechanics Research Communications*, *99*, 8-14. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2019.06.003

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 291-307
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
:10.48301/KSSA.2021.296120.1643
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.15.8

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Numerical and Experimental Investigation of Low Pressure Hydroforming of Aluminum Tubes

Seyed Jalal Hashemi[1]*, Yaghoub Dadgar Asl[2]

[1,2]Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.26.2021
Revised: 08.11.2021
Accepted: 09.05.2021

Keyword:
Low pressure hydroforming (LPTH)
Thickness distribution
Corner radius

***Corresponding Author:**
Seyed Jalal Hashemi
Email: *J_hashemi@tvu.ac.ir*

ABSTRACT

Tube hydroforming process is used widely in production of car structural parts. High strength to weight ratio is one of the properties of parts which is produced using this process. Low pressure tube hydroforming (LPTH) is one method recommended for solving problems of tube hydroforming such as requiring high pressure of fluid and sealing problems. LPTH method is similar to crushing a hollow solid body. Unlike high pressure tube hydroforming, upper die is not fixed in this process and it moves at the same time by applying internal pressure and squeezes the tube. Main defects in low pressure hydroforming are tube wall thinning and geometric errors at final form of the part. In this paper, LPTH of AA6063 aluminum tubes was carried out and circular cross section of tube was deformed to rectangular. Thickness distribution, formed corner radius and flatness of top surface of part was investigated under three different loading paths. Results show that lower corner radius can be achieved with higher internal pressure while thinning is increased. Maximum of flatness was obtained when moving of the upper die was carried out after reaching the maximum of internal pressure. Minimum of radius was formed at upper corner equal to 5.63mm and at lower corner equal to 5.62mm under internal pressure of 10MPa. Concavity of upper surface of part was decreased to 0.2mm by applying 10MPa internal pressure.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۰۷-۲۹۱
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.296120.1643
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.15.8
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی عددی و تجربی هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی

سید جلال هاشمی[1*]، یعقوب دادگر اصل[2]

۱و۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

کلید واژگان:
هیدروفرمینگ لوله فشار پایین
توزیع ضخامت
شعاع گوشه

***نویسنده مسئول:** سید جلال هاشمی
پست الکترونیکی:
J_hashemi@tvu.ac.ir

چکیده

فرایند هیدروفرمینگ لوله به‌طور گسترده در تولید قطعات ساختاری اتومبیل استفاده می‌شود. یکی از خصوصیات قطعات تولید شده با این فرایند، نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشد. هیدروفرمینگ لوله فشار پایین، یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای حل مشکلات هیدروفرمینگ لوله از قبیل نیاز به فشار بالای سیال و مشکلات آب‌بندی می‌باشد. روش انجام هیدروفرمینگ فشار پایین لوله شبیه فشردن یک جسم جامد توخالی است و در آن برخلاف هیدروفرمینگ فشار بالا، قالب بالایی در طول فرایند ثابت نمی‌باشد و هم‌زمان با اعمال فشار داخلی به لوله حرکت می‌کند و لوله را تحت فشار قرار می‌دهد. نازک‌شدگی دیواره‌های لوله پس از شکل‌دهی و خطاهای هندسی در فرم نهایی قطعه، از عیوب مهم فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین می‌باشند. در این مقاله، فرایند هیدروفرمینگ فشارپایین لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA6063انجام شده و مقطع گرد لوله به‌وسیله فرایند هیدروفرمینگ به مقطع مستطیلی تغییر شکل داده است. توزیع ضخامت، مقادیر شعاع گوشه شکل داده شده و تختی سطح بالایی قطعه تحت مسیرهای بارگذاری متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار داخلی می‌توان به شعاع گوشه کمتری دست پیدا کرد اما نازک‌شدگی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین تختی سطح بالایی قطعه زمانی حاصل می‌شود که جابه‌جایی قالب بالایی بعد از رسیدن فشار داخلی به مقدار ماکزیمم خود انجام شود. حداقل شعاع گوشه تولید با فشار داخلی ۱۰ مگاپاسکال در گوشه بالایی مقطع ۵/۶۳mm و در گوشه پایینی مقطع ۵/۶۲mm شکل داده شده است. با اعمال فشار داخلی ۱۰ مگاپاسکال، فرورفتگی سطح بالایی قطعه به ۰/۲mm رسیده است.

مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله در بسیاری از صنایع برای شکل‌دهی قطعات پیچیده به‌کار می‌رود. از صنایعی که در آن‌ها فرایند هیدروفرمینگ استفاده گسترده‌ای دارد، می‌توان به صنایع نفت و گاز، خودروسازی، هوا فضا، ساخت شیرآلات بهداشتی، لوازم خانگی و صنایع نظامی اشاره کرد.

اگر چه فرایند هیدروفرمینگ لوله از دهه‌های اخیر در صنعت مورد توجه قرارگرفته است ولی پیشرفت‌های تجربی و نظری آن به سال 1940 میلادی برمی‌گردد. گری و همکارانش [۱] در مورد تولید قطعات مسی T- شکل به‌وسیله فشار داخلی و تغذیه محوری در سال 1940 مقاله‌ای را منتشر کردند. معمولاً در فرایند هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی لوله و اطمینان از شکل‌گیری گوشه‌های قطعه از فشار بالای داخلی استفاده می‌شود. در هیدروفرمینگ لوله فشار بالا (HPTH) دو نیمه قالب بسته و با اعمال فشار زیاد شکل‌دهی انجام می‌شود [۲]. اما در HPTH مشکلاتی مانند نیاز به یک سیستم تأمین‌کننده فشار بالا و نیروی زیاد بسته نگهداشتن دو نیمه قالب وجود دارد. در راستای حذف مشکلات HPTH فرایند جدیدی به نام هیدروفرمینگ لوله فشار پایین (LPTH) مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند فشار داخلی مورد استفاده برای شکل‌دهی لوله کمتر از 83 مگاپاسکال می‌باشد [۳]. در LPTH لوله با سیال با فشار پایین پر می‌شود در حالی که قالب بالایی متحرک است و در طول انجام فرایند قالب‌ها بسته می‌شوند [۴]. استفاده از فشار شکل‌دهی پایین، علاوه بر کاهش اندازه قالب و تجهیزات، از خطرات احتمالی استفاده از فشار بالا را کمتر خواهد کرد. مطالعات تحلیلی و تجربی زیادی روی HPTH مقاطع غیرگرد انجام شده است. در این مطالعات، پارامترهای فرایندی و رفتار تغییرشکل ماده بررسی شده است. چوی و همکارانش [۵] تولید یک مقطع مربعی با استفاده از هیدروفرمینگ دوطرفه را بررسی کردند و نشان دادند که با اعمال فشار خارجی توزیع ضخامت در سطح مقطعه قطعه در ناحیه انتقال بهبود می‌یابد. ژو و همکارانش [۶] تأثیر ضریب اصطکاک، ضریب کارسختی و ضریب ناهمسانگردی بر توزیع ضخامت مقطع مربعی در هیدروفرمینگ فشار بالا را به‌صورت تحلیلی و عددی بررسی کردند. اوربان و هو [۷] یک مدل تحلیلی را برای تعیین تنش‌ها و کرنش‌ها در سطح مقطع لوله در هیدروفرمینگ یک قطعه مربعی در حالت دوبعدی توسعه دادند. در این مدل، تأثیر ضریب اصطکاک و پارامترهای ماده در نظر گرفته شد. مانابه و آمینو [۸] به‌صورت عددی و تجربی تأثیر فاکتورهای مختلف بر هیدروفرمینگ مقطع مربعی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغذیه محوری و روانکاری بهتر باعث بهبود کیفیت محصول خواهد شد. چو و یانگ [۹] با در نظر گرفتن تأثیر ناهمسانگردی شرایط منجر به ترکیدگی لوله را در یک قالب مربعی پیش‌بینی کردند. هوانگ و چن [۱۰] مدلی را برای تعیین توزیع ضخامت و فشار موردنیاز برای شکل‌دهی شعاع گوشه مشخص در فرایند هیدروفرمینگ لوله فشار بالا توسعه دادند. نتایج مدل توسعه داده شده، تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد. تحقیقات زیادی نیز در مورد تأثیر دما بر HPTH انجام شده است. براساس پژوهش‌های انجام گرفته در دمای بالا [۱۱; ۱۲] هیدروفرم‌پذیری لوله‌های آلومینیومی و منیزیمی در هیدروفرمینگ گرم افزایش می‌یابد. هاشمی و همکارانش [۱۳] تحقیقی را در مورد پیش‌بینی ترکیدگی در هیدروفرمینگ لوله انجام دادند. براساس نتایج آن‌ها معیار آیادای اصلاح‌شده بهترین پیش‌بینی را مقاطع مربعی در فرایند هیدروفرمینگ دارد.

بر خلاف HPTH تحقیقات زیادی در مورد LPTH انجام نشده است. هوانگ و آلتان [۱۴] تبدیل مقطع گرد لوله را به مثلث با استفاده از LPTH بررسی کردند. همین نویسندگان در مطالعه دیگری [۱۵] تولید مقطع مستطیلی را به‌وسیله LPTH مطالعه کرده‌اند. نیخاره و همکارانش [۱۶] یک مدل تحلیلی را برای تعیین نیروی بسن قالب در LPTH توسعه دادند. همین نویسندگان در یک پژوهش دیگر [۴] به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود LPTH و HPTH مقطع مربعی را مقایسه کردند و توزیع ضخامت و تنش را در سطح مقطع بررسی کردند. نیخاره و همکارانش [۱۷] شرایط بحرانی ایجاد کمانش در هیدروفرمینگ فشار پایین مقاطع مربعی را به‌صورت تحلیلی تعیین کردند. چو و همکارانش

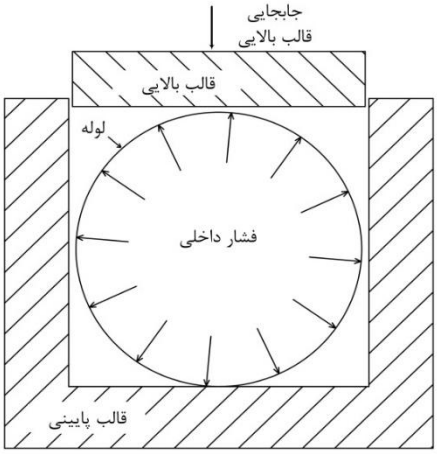
[۱۸] برگشن فنری را در هیدروفرمینگ فشار پایین مقاطع مربعی به‌صورت تحلیلی مطالعه کردند. تروت و همکارانش [۱۹] با استفاده از مدل عددی دوبعدی و با در نظر گرفتن پرشدگی گوشه‌های قالب برای شکل‌دهی بهتر از پیش‌فرم در هیدروفرمینگ فشار پایین استفاده کردند. ژانگ و همکارانش [۲۰] به‌صورت تجربی دقت ابعادی مقطع مربعی را در شکل‌دهی با هیدروفرمینگ را بررسی کردند و اصطکاک را به‌عنوان عامل بازدارنده در دستیابی به دقت بالاتر می‌باشد.

با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود تا به حال فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی با مقطع مستطیلی انجام نشده است. در ضمن در پژوهش‌های قبل که روی این مقطع تحقیقاتی انجام گرفته، تأثیر منحنی بارگذاری و مقدار فشار بر شعاع گوشه، ایجاد شده و دقت شکل‌دهی مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، تولید یک مقطع مستطیلی با استفاده از LPTH روی لوله‌های آلومینیومی بررسی شده است. در این راستا، شبیه‌سازی سه بعدی فرایند شکل‌دهی انجام شده و برای صحت‌سنجی نتایج عددی یک دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین طراحی و ساخته شده است. روش‌های مختلف اعمال منحنی بارگذاری شامل تغییرات فشار داخلی نسبت به جابه‌جایی قالب بالایی استفاده شده است تا توزیع ضخامت بهتری در سطح مقطع محصول ایجاد شود و کمترین فرورفتگی در سطح بالای قطعه به‌وجود آید. شعاع گوشه شکل گرفته نیز در حالت‌های مختلف بررسی شده است.

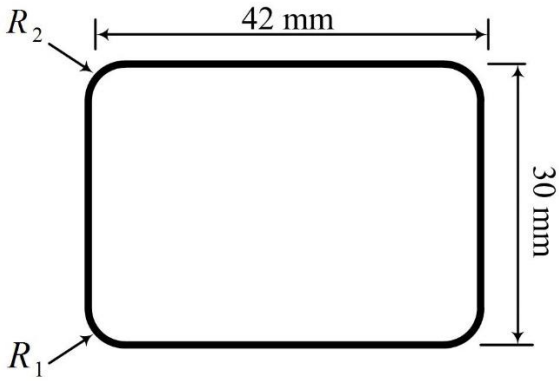
بخش تجربی

طرح شماتیک نحوه انجام LPTH در این پژوهش به‌صورت دوبعدی در شکل ۱ نمایش داده شده است. قالب پایین ثابت می‌باشد و لوله درون آن قرار می‌گیرد. قالب بالا متحرک می‌باشد و با حرکت به سمت پایین باعث تغییر شکل لوله می‌شود. به‌منظور جلوگیری از فرورفتگی در قسمت بالای لوله و هم‌چنین ایجاد گوشه‌های با شعاع کمتر فشار داخلی در داخل لوله ایجاد می‌شود. نسبت تغییرات فشار داخلی لوله به جابه‌جایی قالب بالایی در زمان بسته شدن، تأثیر زیادی بر شکل و کیفیت محصول نهایی خواهد داشت.

بررسی عددی و تجربی هیدروفرمینگ فشار پایین لوله آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر بیرونی اولیه ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول اولیه لوله ۱۴۰ میلی‌متر و تبدیل آن به یک مقطع مستطیل مطابق با شکل ۲ در داخل قالب هیدرو فرمینگ با گوشه‌های تیز و بررسی اختلاف کمینه و بیشینه نقاط طول و عرض قطعه و شعاع گوشه بالایی مقطع (R_2) و پایینی مقطع (R_1) و توزیع ضخامت می‌باشد.



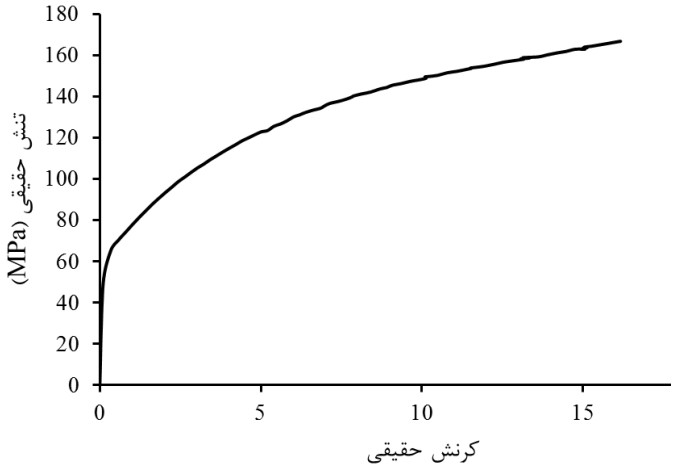
شکل ۱. طرح شماتیک نحوه انجام LPTH



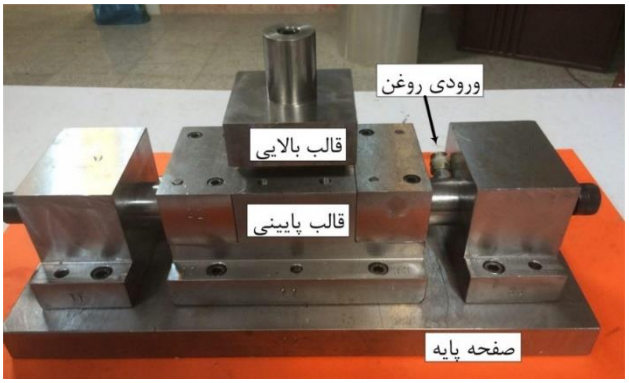
شکل ۲. سطح مقطع مورد بررسی

آزمون کشش، آزمایش استاندارد تک‌محوری، روشی است که معمولاً برای تشخیص رفتار تغییر شکل مواد لوله‌ای استفاده می‌شود. براساس آزمون کشش لوله‌ها که طبق استاندارد ASTM–E8M، در آزمایشگاه شکل‌دهی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است، نمودار تنش- کرنش حقیقی نشان داده شده در شکل ۳ به‌دست آمده است.

به‌منظور بررسی تجربی تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی یک دستگاه هیدروفرمینگ فشارپایین، طراحی و ساخته شد. اجزای دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. آب‌بندی دو انتهای لوله از نوع فلز به فلز می‌باشد؛ درنتیجه دو انتهای لوله ثابت است و تغذیه محوری انجام نشده است. طول ناحیه تغییر شکل در قالب ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. اجزای مجموعه به‌صورت دمونتاژ شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. برای اعمال فشار داخلی از پمپ هیدرولیک دستی با ظرفیت ۴۰۰ بار نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شد. به‌منظور کنترل حداکثر فشار داخلی نیز از یک شیر فشارشکن و گیج فشار استفاده شد که در شکل ۵ نمایش داده شده است و جابه‌جایی قالب بالایی توسط پرس هیدرولیک ۶۰ انجام گردید. نحوه قرار گرفتن مجموعه زیر دستگاه پرس در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار تنش- کرنش حقیقی لوله آلومینیومی AA6063



شکل ۴. مجموعه آزمایشگاهی LPTH

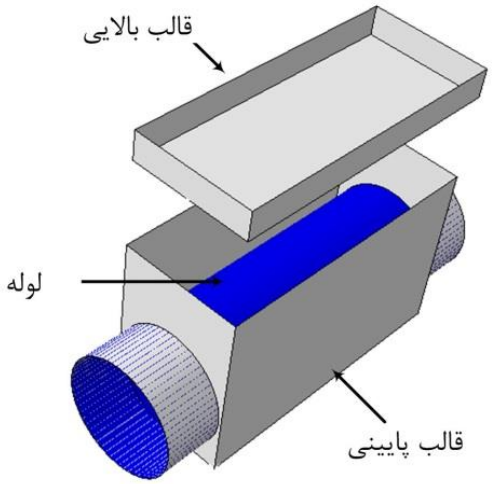
شکل ۵. اجزای مجموعه و مدار هیدرولیکی

شکل ۶. نحوه قرارگیری مجموعه LPTH زیر دستگاه پرس

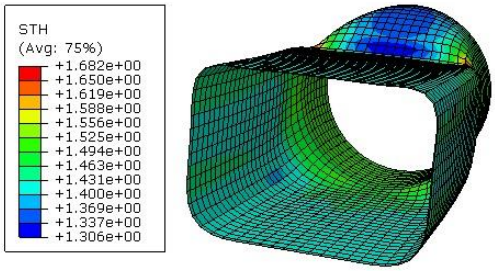
شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌منظور بررسی بیشتر تغییر شکل لوله طی فرایند هیدروفرمینگ فشارپایین، از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل سه‌بعدی ایجاد شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود. قالب بالایی و قالب پایینی به‌صورت سطح صلب گسسته مدل شده‌اند. لوله به‌عنوان یک سطح شکل‌پذیر مدل شده و برای مش‌بندی آن از المان S4R با اندازه المان ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در زمان شکل‌دهی، قالب پایین در مکان خود ثابت می‌باشد و قالب بالایی مطابق با منحنی بارگذاری ازپیش تعریف‌شده باعث تغییر شکل مقطع لوله می‌شود. منحنی تنش– کرنش حقیقی ساده طبق نتایج کشش تک‌محوری در دمای محیط به‌دست‌آمده برای خواص پلاستیک به نرم‌افزار داده شده است. برای شرایط تماسی سطح خارجی لوله و قالب در این تحقیق، مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک طبق مدل اصطکاکی کولمب با مقدار ۰/۳ استفاده شد. در زمان شکل‌دهی لوله تحت همه منحنی‌های بارگذاری دو انتهای لوله مقید می‌باشد و تغذیه محوری اعمال نشده است. فشار سیال هیدرفرمینگ نیز با فشار یکنواخت سطحی جایگزین شده است. نمونه‌ای از تغییر شکل لوله توسط محنی بارگذاری و حرکت قالب بالایی به همراه توزیع ضخامت در شکل ۸ مشاهده می‌شود. به‌منظور مشخص شدن بهتر تغییر سطح مقطع، نصف لوله نمایش داده شده است.

مهم‌ترین پارامتر در راستای تولید قطعه هیدروفرمینگ با حداقل عیوب، شامل چروکیدگی و ترکیدگی منحنی بارگذاری می‌باشد. اعمال فشار داخلی بیش‌ازحد باعث ترکیدگی قطعه می‌شود و از طرف دیگر اعمال فشار داخلی کم باعث تنش‌های فشاری زیاد در دیواره لوله و در نتیجه چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، تعیین منحنی بارگذاری مناسب برای تولید مقطع مستطیل با گوشه‌های تیز می‌باشد. در این راستا تأثیر سه نوع منحنی بارگذاری متفاوت بررسی شده است.



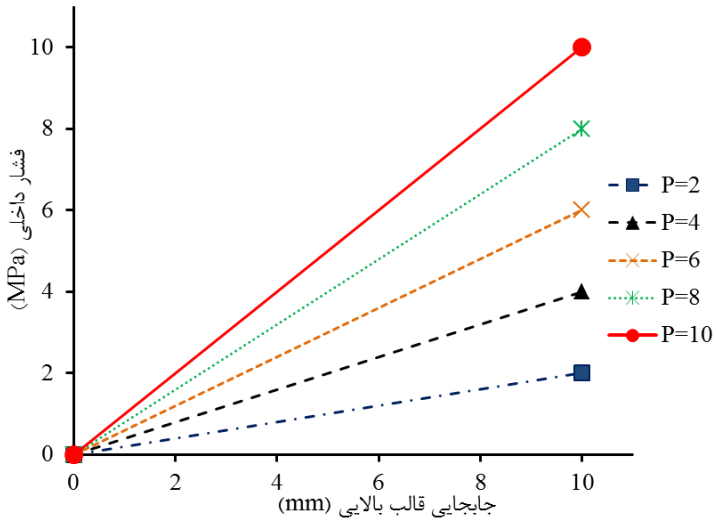
شکل ۷. مدل شبیه‌سازی عددی



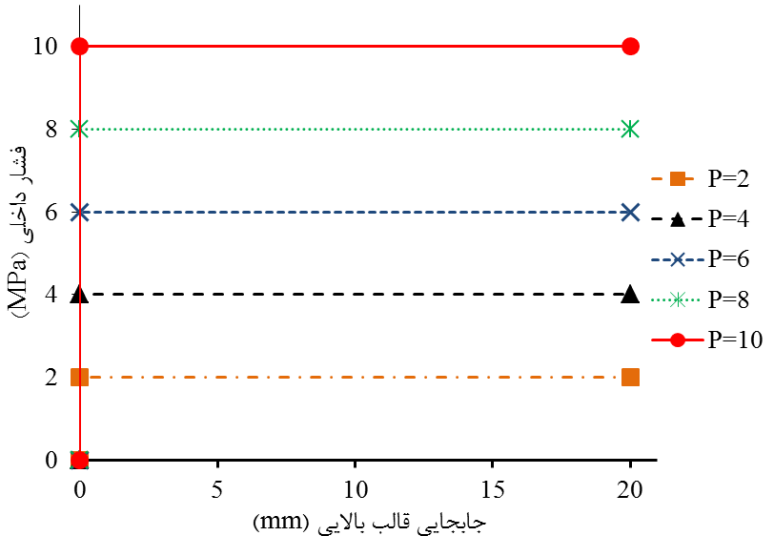
شکل ۸. تغییر شکل لوله

در منحنی بارگذاری نوع اول، افزایش فشار داخلی لوله و جابه‌جایی قالب بالایی به‌صورت هم‌زمان انجام شده است. به این صورت که در ابتدای فرایند، قالب بالایی با لوله بدون فشار داخلی در تماس است. سپس با افزایش فشار، قالب بالایی نیز حرکت می‌کند و در زمان جابه‌جایی ماکزیمم قالب بالایی یعنی ۱۰ میلی‌متر، فشار داخلی نیز به ماکزیمم خود می‌رسد. منحنی‌های بارگذاری نوع اول با فشار داخلی ماکزیمم متفاوت در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

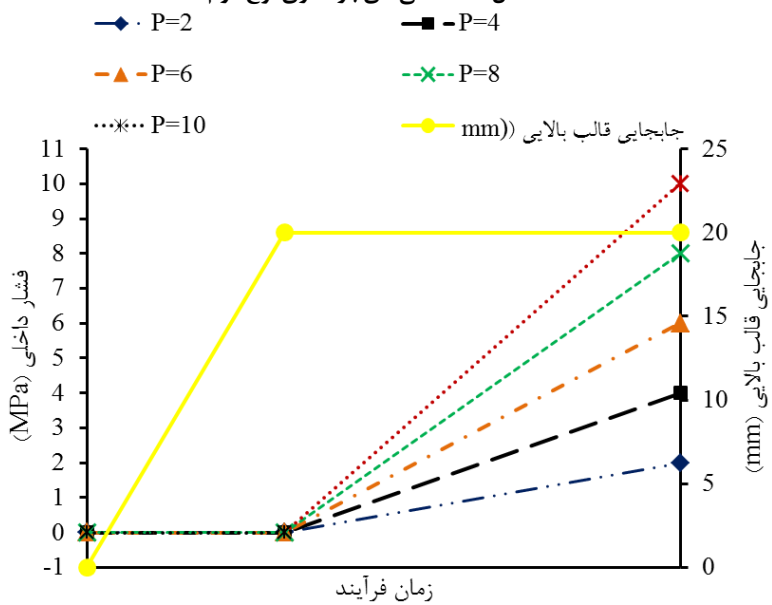
در منحنی بارگذاری نوع دوم، ابتدا قالب بالایی ثابت می‌باشد و در فاصله ۱۰ میلی‌متر از سطح لوله بدون تماس اولیه با آن قرار می‌گیرد، در حالی که فشار داخلی افزایش می‌یابد. پس از رسیدن فشار به مقدار مشخص و حداکثر خود، قالب بالایی برای تغییر شکل لوله به سمت پایین حرکت می‌کند. شکل ۱۰ نحوه تغییرات فشار داخلی نسبت به جابه‌جایی قالب را برای این نوع منحنی نمایش می‌دهد. منحنی‌های بارگذاری نوع سوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ابتدا فشار داخلی صفر می‌باشد و قالب بالایی تا مقدار موردنیاز پایین می‌آید تا ارتفاع قطعه که برابر با ۳۰ میلی‌متر است حاصل شود. سپس فشار داخلی تا مقدار مشخص‌شده افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ نمودارهای تغییرات فشار داخلی به‌صورت مجزا از نمودار جابه‌جایی قالب بالایی رسم شده است.



شکل ۹. منحنی‌های بارگذاری نوع اول



شکل ۱۰. منحنی‌های بارگذاری نوع دوم



شکل ۱۱. منحنی‌های بارگذاری نوع سوم

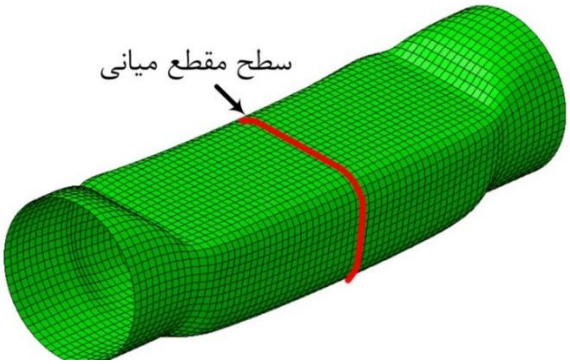
نتایج و بحث

دو نمونه از قطعات شکل داده شده توسط دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین در شکل ۱۲ نشان داده شده است. هرچه فشار داخلی اعمال‌شده کمتر باشد، احتمال ایجاد فرورفتگی در سطح بالایی قطعه بیشتر می‌شود. مقطع میانی قطعه شکل داده شده به‌وسیله منحنی بارگذاری نوع اول با فشار ۱۰ مگاپاسکال در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

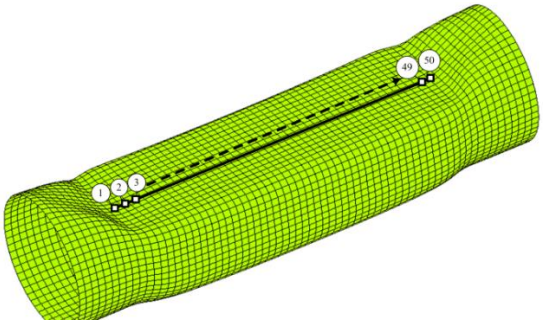
شکل ۱۲. قطعات شکل داده شده

شکل ۱۳. سطح مقطع میانی قطعه شکل داده شده

به‌منظور بررسی دقت ابعادی و کیفیت قطعات شکل داده شده توسط منحنی‌های بارگذاری مختلف دو مسیر روی محیط قطعه انتخاب شد. مسیر اول، محیطی و در مقطع میانی قطعه می‌باشد و مسیر دوم طولی است و سطح بالایی قطعه شکل داده شده وجود دارد. موقعیت این دو مسیر در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است.

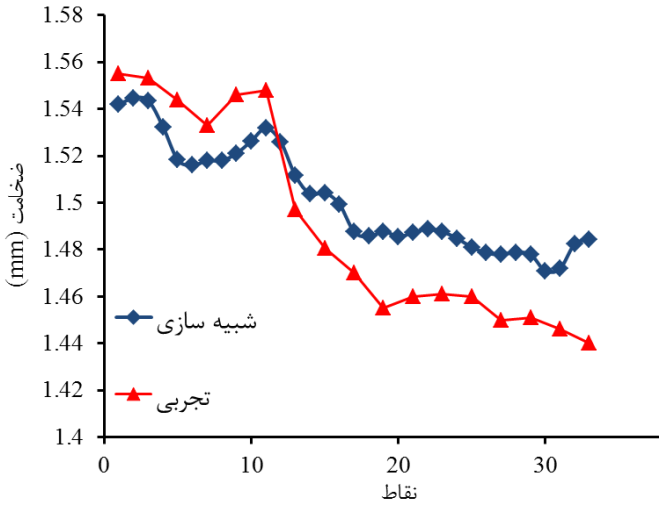


شکل ۱۴. مسیر مقطع میانی

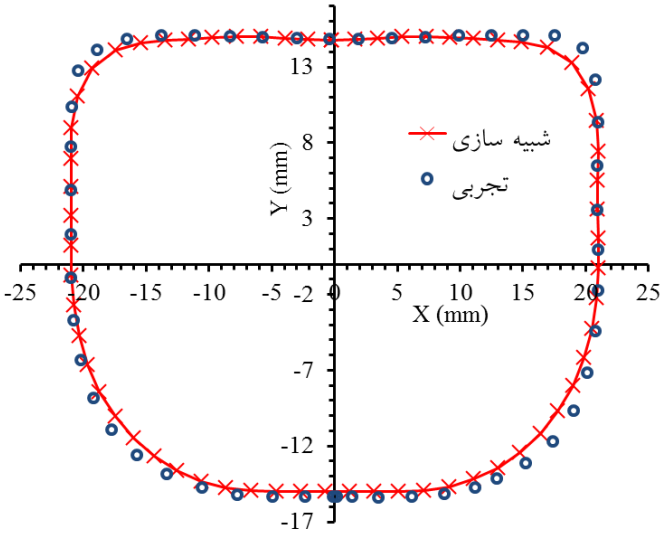


شکل ۱۵. مسیر طولی بررسی شده

به‌منظور بررسی صحت نتایج عددی، در دو حالت مقایسه با نتایج تجربی صورت گرفت. قطعه شکل داده شده به‌وسیله منحنی بارگذاری نوع سوم با فشار داخلی حداکثر ۱۰ مگاپاسکال از مقطع میانی بریده شد و توزیع ضخامت و پروفیل سطح بیرونی آن با نتایج عددی مقایسه گردید. برای اندازه‌گیری ضخامت از یک میکرومتر دیجیتال استفاده شد و پروفیل مقطع نیز با استفاده از دستگاه CMM به‌دست آمد. شکل ۱۶ توزیع ضخامت به‌دست‌آمده از نتایج عددی و تجربی برای این حالت را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن، فقط ضخامت در نصف مقطع رسم شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده حداکثر خطای ۳ درصد بین نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، مطابق شکل ۱۷، پروفیل مقطع میانی به‌دست‌آمده از نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی خطای چندانی ندارد و در نتیجه می‌توان برای بررسی بیشتر به نتایج عددی اعتماد کرد.



شکل ۱۶. توزیع ضخامت در مقطع میانی

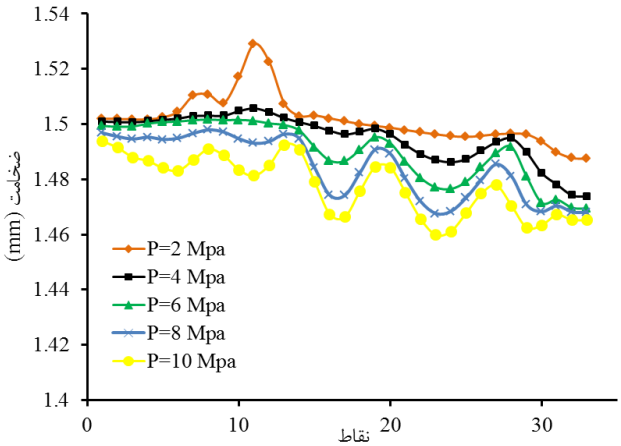


شکل ۱۷. توزیع ضخامت در مقطع میانی

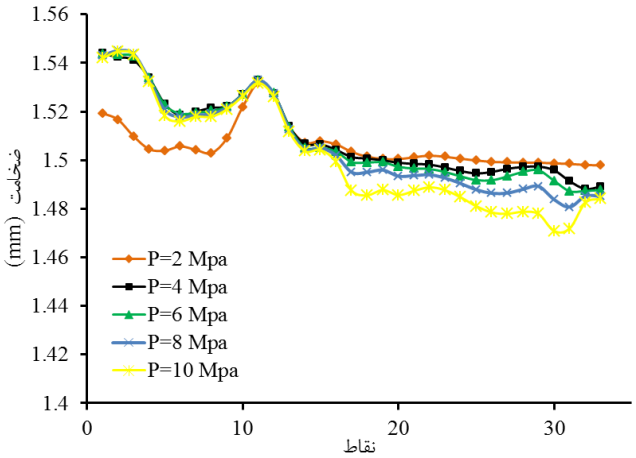
تأثیر نوع منحنی بارگذاری اعمال‌شده بر توزیع ضخامت در مسیر رسم شده در شکل ۱۴ بررسی شد. نمودارهای توزیع ضخامت از نتایج عددی به‌دست‌آمده و به دلیل تقارن نصف مقطع بررسی شده است. توزیع ضخامت برای منحنی‌های بارگذاری نوع اول با فشارهای ماکزیمم مختلف در شکل ۱۸ آمده است. هرچه فشار داخلی بیشتر باشد تنش کششی در راستای محیطی مقطع، بیشتر و در نتیجه، ضخامت دیواره کمتر می‌شود. البته همان‌طور که در بخش بعد شرح داده می‌شود این تنش‌های کششی باعث شکل‌گیری شعاع گوشه کمتری خواهند شد. در زمان شکل‌دهی لوله با این نوع منحنی بارگذاری، در ابتدای فرایند به دلیل کم بودن فشار داخلی، سطح بالایی قطعه دچار فرورفتگی کمی

می‌شود و سپس با افزایش فشار، این فرورفتگی کاهش می‌یابد. این موضوع باعث نوسان ضخامت مقطع در بالای قطعه خواهد شد. از طرف دیگر دیواره عمودی مقطع که در ابتدای فرایند با قالب تماس کمتری دارد، بیشترین نازک‌شدگی را خواهد داشت.

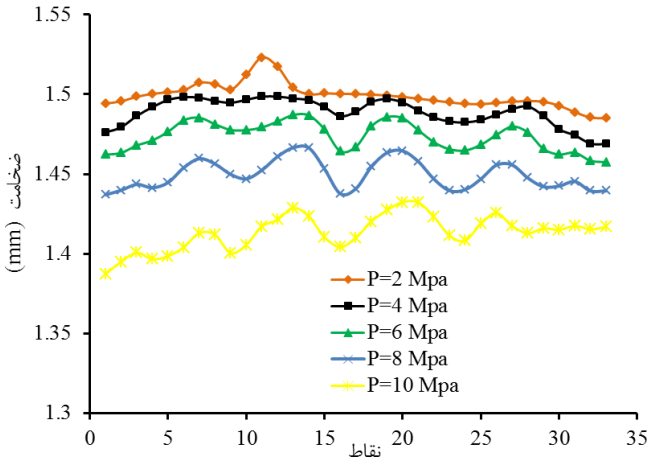
توزیع ضخامت مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و نوع سوم به‌ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شوند. در مورد منحنی بارگذاری نوع دوم، حداکثر ضخامت در بالاترین نقطه مقطع که با قالب بالایی در تماس می‌باشد رخ داده است. حداکثر نازک‌شدگی برای منحنی‌های بارگذاری نوع سوم رخ می‌دهد که اعمال فشار داخلی بعد از جابه‌جایی کامل قالب بالایی انجام می‌شود. بهترین توزیع ضخامت و با کمترین نوسان توسط منحنی‌های نوع دوم ایجاد شده است.



شکل ۱۸ . توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع اول



شکل۱۹. توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع دوم



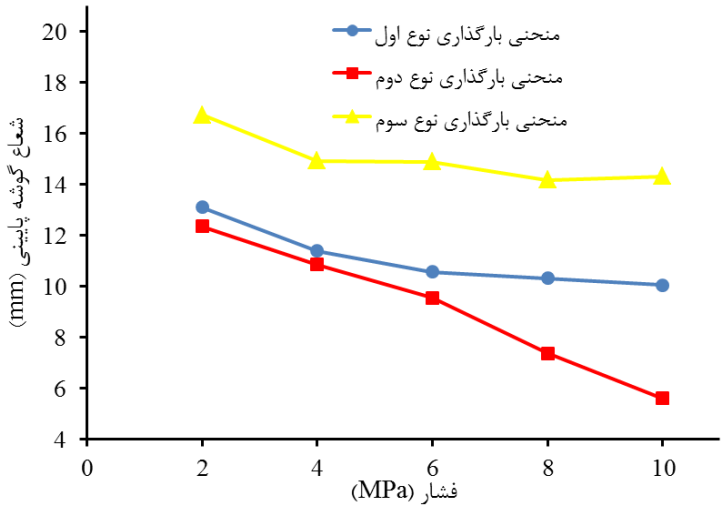
شکل ۲۰. توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع سوم

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت قطعات شکل داده شده، شعاع گوشه مقطع می‌باشد که هرچه کمتر باشد کیفیت قطعه بالاتر محسوب می‌شود. اعمال فشار داخلی بیشتر می‌تواند به شکل‌گیری شعاع گوشه کمتر کمک کند اما از طرف دیگر نازک‌شدگی بیشتری رخ خواهد داد. مقدار شعاع گوشه پایینی و گوشه بالایی مقطع میانی قطعه برای منحنی‌های بارگذاری مختلف در شکل ۲۱ و ۲۲ آورده شده است.

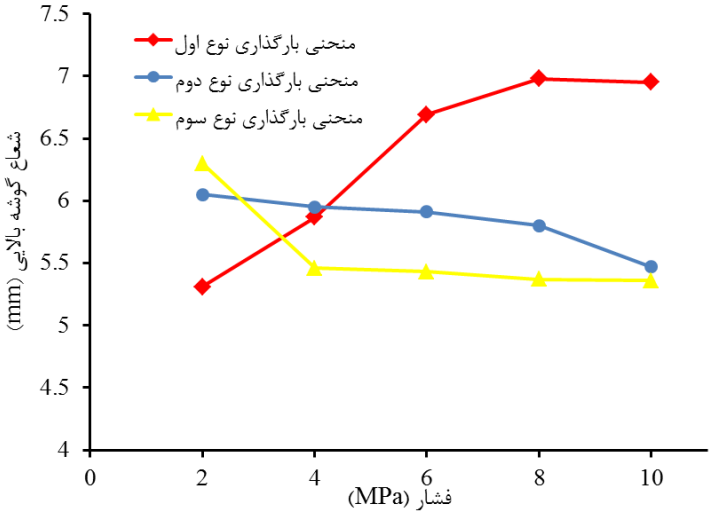
در مورد هر سه نوع منحنی بارگذاری نوع اول و دوم و سوم با افزایش فشار داخلی شعاع گوشه شکل‌گرفته در قسمت پایین قطعه (R_1) کاهش یافته است. اما تیزترین گوشه پایینی به‌وسیله منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و با فشار ۱۰ مگاپاسکال تولید شده است. در مورد منحنی‌های بارگذاری نوع دوم، مقدار R_1 کمتری حاصل شده است. در این نوع منحنی، بارگذاری ابتدا فشار داخلی روی لوله اعمال می‌گردد؛ در نتیجه دیواره لوله دچار تنش کششی می‌شود و ضخامت آن کاهش می‌یابد و در ادامه با حرکت قالب بالایی و استحکام کمتر دیواره لوله شعاع کمتری به‌دست می‌آید. اما در مورد منحنی بارگذاری نوع سوم، با توجه به اینکه حرکت قالب بالایی در فشار صفر انجام می‌شود ضخامت لوله تغییر چندانی نمی‌کند و اعمال فشار داخلی نمی‌تواند باعث ایجاد گوشه تیز شود.

در مورد شعاع گوشه بالا، روند تغییرات با شعاع گوشه پایین متفاوت است. در مورد منحنی بارگذاری نوع دوم، همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود در همه فشارها فرورفتگی سطح بالایی قطعه از بین رفته است و در نتیجه ماده در سطح بالایی به گوشه منتقل می‌شود. با افزایش فشار تا ۱۰ مگاپاسکال گوشه قطعه دچار کشش می‌شود و شعاع کاهش می‌یابد. شعاع گوشه بالایی ایجادشده با منحنی بارگذاری نوع اول، با افزایش فشار نهایی بیشتر می‌شود. با بررسی تاریخچه تغییر شکل سطح مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع اول، مشخص می‌شود که در فشارهای نهایی پایین مانند ۲ مگاپاسکال، در ابتدای فرایند شکل‌دهی، سطح بالایی به‌واسطه پایین آمدن قالب بالایی تخت می‌شود و به دلیل فشار پایین ماده به سمت منطقه شعاع پایینی حرکت نمی‌کند اما در فشارهای بالاتر پس از تخت شدن سطح بالایی قطعه، منطقه شعاع پایینی تحت کشش قرار می‌گیرد و ماده را از ناحیه شعاع بالا به سمت خود می‌کشد. در نتیجه طول ماده قرار گرفته در ناحیه شعاع بالایی کم می‌شود و شعاع افزایش می‌یابد. تاریخچه تغییر شکل سطح مقطع میانی برای منحنی بارگذاری نوع دوم با فشار نهایی ۱۰ مگاپاسکال در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در مورد منحنی بارگذاری

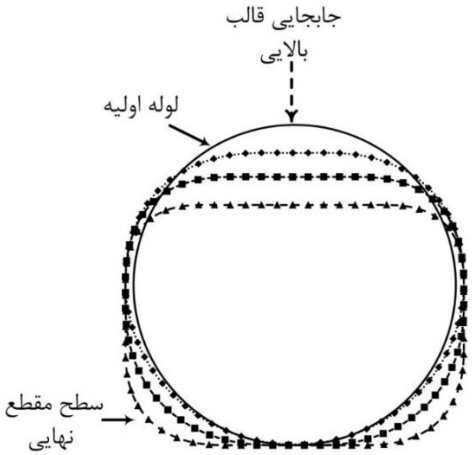
نوع سوم، در مورد فشار نهایی ۲ مگاپاسکال که فرورفتگی سطح بالایی زیاد است شعاع گوشه نیز بیشتر است. در ادامه نیز با توجه به اینکه فرورفتگی تا فشارهای بالا کاملاً از بین نمی‌رود، R_2 تقریباً مقدار ثابتی دارد.



شکل ۲۱. شعاع گوشه پایین در مقطع میانی

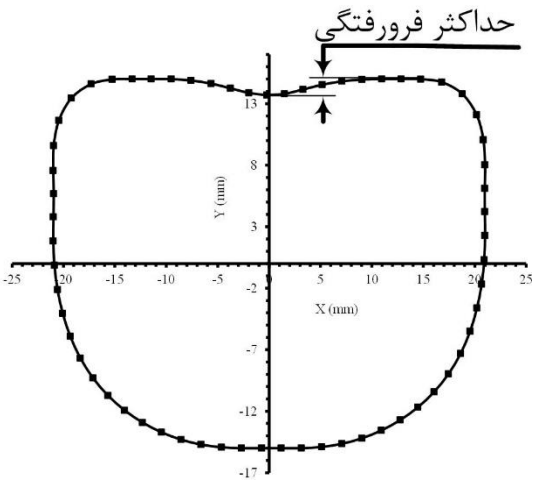


شکل۲۲. شعاع گوشه بالایی در مقطع میانی

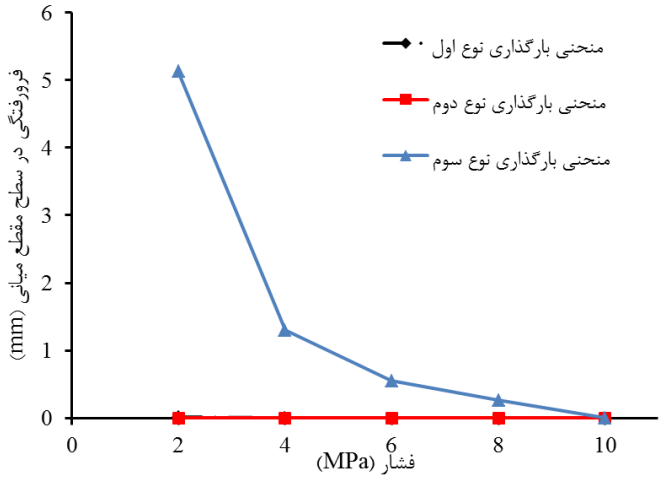


شکل ۲۳. تاریخچه تغییر شکل مقطع میانی تحت منحنی بارگذاری نوع دوم با فشار نهایی ۱۰ مگاپاسکال

یکی از مشکلات قطعات تولید شده به روش هیدروفرمینگ، فشار پایین فرورفتگی سطح بالایی قطعه می‌باشد. شکل ۲۴ میزان این عیب را در مقطع میانی قطعه شکل داده شده به‌وسیله منحنی بارگذاری نوع سوم با فشار ماکزیمم ۴ مگاپاسکال نمایش می‌دهد. به‌منظور بررسی این عیب، مقادیر آن در قطعات شکل داده شده به‌وسیله منحنی‌های بارگذاری مختلف اندازه‌گیری شده که در شکل ۲۵ آمده است. برای منحنی‌های بارگذاری نوع اول و دوم این عیب به صفر رسیده است و مقدار این عیب برای منحنی نوع سوم حداکثر می‌باشد. هرچه فشار ماکزیمم بالاتر باشد مقدار عیب کمتری ایجاد می‌شود. در مورد نحنی نوع سوم، به دلیل این که پایین آمدن قالب بالایی تحت فشار صفر انجام می‌شود، فرورفتگی زیادی در سطح بالایی قطعه ایجاد می‌شود که حتی با اعمال فشار داخلی تا ۱۰ مگاپاسکال از بین نمی‌رود.

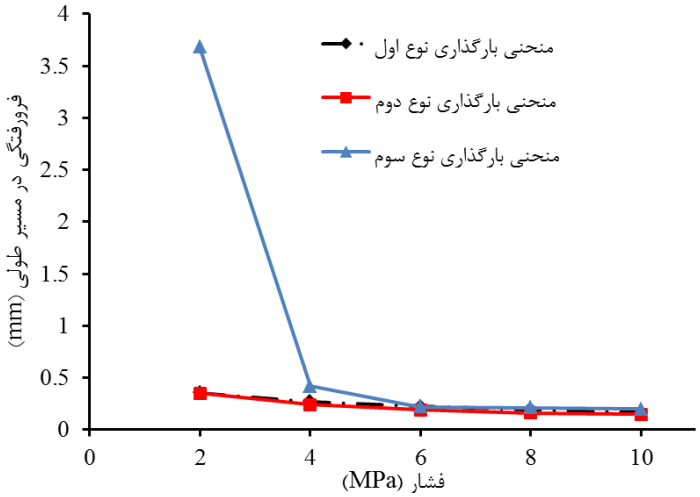


شکل ۲۴. حداکثر فرورفتگی در مقطع میانی



شکل ۲۵. فرورفتگی در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف

برای بررسی میزان تختی سطح بالایی قطعه، مقدار حداکثر اختلاف ارتفاع در نقاط مختلف مسیر طولی نشان داده شده در شکل ۱۵ اندازه‌گیری شد. هرچه این اختلاف ارتفاع در قطعه شکل داده شده کمتر باشد، تختی سطح بالایی بیشتر خواهد بود. مقدار اختلاف ارتفاع برای قطعات شکل داده شده توسط منحنی‌های بارگذاری مختلف در شکل ۲۶ نشان داده شده است. با افزایش فشار داخلی مقدار فرورفتگی برای همه منحنی‌های بارگذاری کاهش یافته است. همانند فرورفتگی عرضی، در اینجا نیز بیشترین مقدار عیب برای منحنی بارگذاری نوع سوم به‌وجود آمده است. البته با افزایش فشار داخلی مقدار عیب برای این نوع بارگذاری به بارگذاری نوع اول و دوم نزدیک شده است.



شکل ۲۶. حداکثر فرورفتگی در مسیر طولی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، هیدروفرمینگ فشارپایین یک لوله آلومینیومی با آلیاژ AA6063 بررسی گردید و یک سطح مقطع مستطیلی تولید شد. توزیع ضخامت، پروفیل سطح مقطع و تختی سطح بالایی قطعه بررسی گردید و از منحنی‌های بارگذاری متفاوت در شبیه‌سازی عددی و کار تجربی استفاده شد. مهم‌ترین نتایج عبارتند از:

۱- بهترین پروفیل سطح مقطع به‌وسیله منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و با فشار ۱۰ مگاپاسکال ایجاد می‌شود که باعث شکل‌گیری شعاع گوشه بالایی به اندازه ۵/۴۷ میلی‌متر و شعاع گوشه پایینی ۵/۶۲ میلی‌متر می‌شود. در این منحنی بارگذاری ابتدا فشار داخلی تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و سپس قالب بالایی لوله را تحت تغییر شکل قرار می‌دهد. با افزایش فشار داخلی تا حد تحمل ترکیدگی لوله می‌توان شعاع گوشه را کاهش داد.

۲- در صورتی که حرکت قالب بالایی در فشار صفر انجام شود، فرورفتگی زیادی در سطح بالایی قطعه به‌وجود می‌آید که فقط با اعمال فشارهای داخلی زیاد از بین خواهد رفت. هم‌چنین منحنی بارگذاری نوع دوم بیشترین تختی را برای سطح بالایی قطعه در دو راستای طولی و عرضی ایجاد می‌کند.

۳- یکنواخت‌ترین توزیع ضخامت به‌وسیله منحنی بارگذاری نوع دوم ایجاد گردید و بیشترین نازک‌شدگی برای منحنی بارگذاری نوع سوم ایجاد شد.

References

[1] Gray, J. E., Devereaux, A. P., & Parker, W. M. (1940). Apparatus for making wrought metal T's. In: Google Patents.

[2] Zafar, N. (2002). *Optimization of tube hydroforming process*. Michigan State University. https://books.google.com/books/about/Optimization_of_Tube_Hydroforming_Proces.html?id=03BXnS6JIYkC

[3] Singh, H. (2003). *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers. https://cart.sme.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details/productId/115604#

[4] Nikhare, C., Weiss, M & ,.Hodgson, P. D. (2009). FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. *Computational Materials Science*, *47*(1), 146-152. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.024

[5] Cui, X.-L., Wang, X.-S., & Yuan, S.-J. (2014). Deformation analysis of double-sided tube hydroforming in square-section die. *Journal of Materials Processing Technology*, *214*(7), 1341-1351. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.005

[6] Xu, X., Li, S., Zhang, W., & Lin, Z. (2009). Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, *209*(1), 158-164. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.034

[7] Orban, H., & Hu, S. J. (2007). Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *194*(1), 7-14. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.112

[8] Manabe, K.-i., & Amino, M. (2002). Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *123*(2), 285-291. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00094-8

[9] Chow, C. L., & Yang, X. J. (2002). Bursting for fixed tubular and restrained hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *130-131*, 107-114. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00754-9

[10] Hwang, Y.-M., & Chen, W.-C. (2005). Analysis of tube hydroforming in a square cross-sectional die. *International Journal of Plasticity*, *21*(9), 1815-1833. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.09.004

[11] Hashemi, S., Naeini, H. M., Liaghat, G., & Tafti, R. A. (2015). Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *15*(1), 19-29. https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.08.003

[12] He, Z., Yuan, S., Liu, G., Wu, J., & Cha, W. (2010). Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, *210*(6), 877-884. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.020

[13] Hashemi, S. J., Moslemi Naeini, H., Liaght, G. H., Shahbazi, J., & Roohi, A. H. (2015). Prediction of Bursting in Warm Tub Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria. *Modares Mechanical Engineering*, *14*(16) ,201-211.

[14] Hwang, Y.-M., & Altan, T. (2002). FE simulations of the crushing of circular tubes into triangular cross-sections. *Journal of Materials Processing Technology*, *125-126*, 833-838. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00385-0

[15] Hwang ,Y.-M., & Altan, T. (2003). Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die. *Finite Elements in Analysis and Design*, *39*(11), 1071-1082. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00157-9

[16] Nikhare, C., Weiss, M., & Hodgson, P. D .(2010) .Die closing force in low pressure tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *210*(15), 2238-2244. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.011

[17] Nikhare, C., Weiss, M., & Hodgson, P. D. (2017). Buckling in low pressure tube hydroforming. *Journal of Manufacturing Processes*, *28*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.015

[18] Chu, G.-n., Lin, C.-y., Li, W., & Lin, Y.-l. (2018). Effect of internal pressure on springback during low pressure tube hydroforming. *International Journal of Material Forming*, *11*(6), 855-866. https://doi.org/10.1007/s12289-017-1395-y

[19] Trott, A., & Nikhare, C. P. (2018). *Effect of preform during low pressure tube hydroforming*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

[20] Zhang, X., Chu, G., He, J., & Yuan, S. (2019). Research on a hydro-pressing process of tubular parts in an open die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *104*(5), 2795-2803. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03893-x

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 309-325
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.298358.1654
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.16.9

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

The Effect of Tire Non-Uniformity on Engine Power Loss

Sayyad Nasiri[1]*, Hossein Rahimi Asiabaraki[2]

[1]Faculty Member, Center for Engineering Skills, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
[2]Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 08.04.2021
Revised: 09.10.2021
Accepted: 09.13.2021

Keyword:
Tire
Non-uniformity
Imbalance
Power loss
Engine

***Corresponding Author:**
Sayyad Nasiri
Email: *nasiri@sharif.edu*

ABSTRACT

An ideal tire should be completely uniform in geometric dimension, mass distribution and stiffness coefficient. Under such conditions, the tire would rotate without any unwanted and harmful vibrations and/or force alterations delivered to the vehicle body as it moves. However, the ideal conditions are only theoretically possible and cannot be the case in actual conditions. Accordingly, a tire has some non-uniformities in actual conditions. This paper aims to study the lost energy of a non-uniform tire of a passenger car. To achieve this, the vertical force on the tire, which is due to initial loading and also each case of non-uniformity, was analytically calculated. Then, the equations were simulated in MATLAB software package. This was followed by comparing the frictional force between the tire and ground to the engine force to calculate the power loss. Finally, the value of power loss as a result of all kinds of tire non-uniformity was evaluated.

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۲۵-۳۰۹

آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/

doi:10.48301/KSSA.2021.298358.1654 20.1001.1.23829796.1400.18.3.16.9

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تأثیر ناهمسانی تایر بر میزان هدررفت توان تولیدی موتور

صیاد نصیری[1*]، حسین رحیمی آسیابرکی[2]

۱- عضو هیات علمی، مرکز آموزش مهارت‌های مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۲- عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

کلید واژگان:

تایر

ناهمسانی

نابالانسی

اتلاف توان

موتور

***نویسنده مسئول:** صیاد نصیری

پست الکترونیکی:

nasiri@sharif.edu

چکیده

در حالت ایده‌آل باید تایر از نظر ابعاد هندسی، ضریب فنریت (سختی) و توزیع جرم، کاملاً همسان باشد. در این شرایط، هنگام حرکت خودرو، تایر بدون اعمال هیچ‌گونه نیرو و ارتعاشات اضافه و مضر به حرکت دورانی خود ادامه خواهد داد اما فرضیه حالت ایده‌آل فقط در شرایط تئوری امکان‌پذیر است و هیچ‌گاه در عمل قابل دستیابی نخواهد بود؛ بنابراین در عمل، تایر همواره دارای مقداری از انواع ناهمسانی‌های مختلف می‌باشد. این پژوهش به بررسی هدررفت انرژی یک تایر ناهمسان می‌پردازد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از روش‌های تحلیلی، میزان نیروهای عمودی خالص اعمال‌شده به چرخ که ناشی از ناهمسانی و بارگذاری اولیه می‌باشد، استخراج گردید. سپس مدل‌سازی موردنظر در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفت. پس از آن، نیروی اصطکاک بین تایر و زمین محاسبه شد و با نیروی محرک موتور مقایسه شد تا میزان هدررفت انرژی بین تایر و زمین استخراج گردد. در نهایت میزان توان تلف‌شده به دلیل وجود ناهمسانی تایر بررسی و ارزیابی شد.

مقدمه

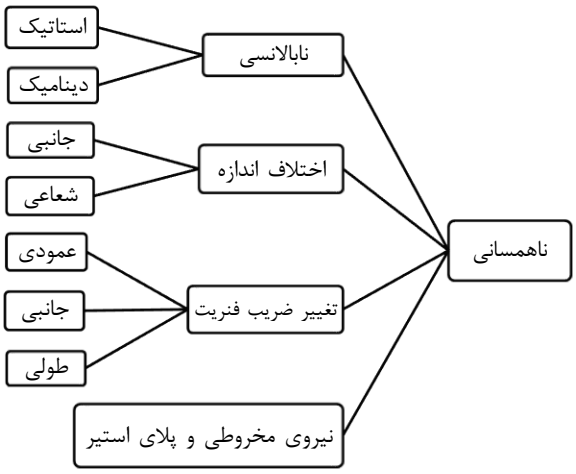
تایر به‌عنوان فصل مشترک خودرو و زمین، نقشی حیاتی در پایداری خودرو و راحتی سرنشین دارد. افزون بر این، تایر نقطه مشترک سیستم‌های انتقال قدرت، ترمز، تعلیق، فرمان و بدنه خودرو می‌باشد و نیروهای طولی، جانبی و عمودی خودرو از طریق تایر به زمین منتقل می‌شود [۱]. تایر خودرو باید وظایف ضروری زیر را تأمین کند [۲]:

- تولید و بهبود نیروهای طولی در حالت شتابگیری و ترمزگیری
- تولید و بهبود نیروهای جانبی در هنگام مانور به‌منظور افزایش پایداری جهتی خودرو
- تحمل نیروهای عمودی
- جذب برخی ناهمواری‌های جاده به‌منظور افزایش راحتی سرنشین
- ایجاد ضریب اصطکاک بالا در تمام شرایط رانندگی و جاده

درصورتی‌که تایر کاملاً همسان باشد، هنگام دوران، ارتعاشاتی به سیستم تعلیق وارد نمی‌کند اما در عمل این‌گونه نیست. در مرحله تولید تایر و در طول زمان استفاده از آن، ناهمسانی به یکی از اشکال زیر در تایر ایجاد می‌شود [۳]:

- تغییر اندازه
- تغییر جرم
- تغییر ضریب فنریت

هریک از عوامل فوق سبب تولید نیرو و گشتاورهای مزاحم در تایر و اعمال آن‌ها به سیستم‌های تعلیق، ترمز، فرمان و بدنه خودرو می‌شود. تایر ناهمسان به‌طورمعمول ارتعاشاتی تولید خواهد کرد که به‌تدریج و با افزایش سرعت خودرو بیشتر می‌شود. سرعتی که در آن، ارتعاشات آشکار می‌شود، بسته به اندازه و وزن چرخ و تایرها، اندازه و وزن خودرو، حساسیت سیستم فرمان و تعلیق و میزان ناهمسانی، متفاوت خواهد بود. ارتعاشات ناشی از ناهمسانی تایر معمولاً در سرعت ۶۵ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت شروع می‌شود و شدت آن همراه با افزایش سرعت، بیشتر می‌گردد. شناخته‌شده‌ترین نوع ناهمسانی تایر نتیجه عدم‌توزیع یکنواخت جرم در محیط تایر است. برای مثال مادامی‌که آج لاستیک ساییده می‌شود، توزیع جرم روی محیط تایر، بالانس مجموعه چرخ و تایر را تغییر می‌دهد. در حالت کلی می‌توان انواع ناهمسانی را مطابق شکل ۱ دسته‌بندی کرد.



شکل ۱. انواع ناهمسانی

میزان ارتعاشات خودرو که بیانگر راحتی خودرو نیز می‌باشد توسط عوامل مختلفی ازجمله ناهمواری‌های جاده، ارتعاشات موتور، ارتعاشات سیستم انتقال قدرت و مجموعه چرخ و تایر به‌وجود می‌آید. بالانس چرخ‌ها با به‌حداقل‌رساندن لرزش و پرش تایر، سواری نرم‌تری را فراهم می‌کند. این امر به بهبود کنترل کشش و فرمان کمک می‌کند و عمر تایر را افزایش می‌دهد [۴]. پژوهش‌های فراوانی انجام شده است که به بررسی عوامل تأثیرگذار بر راحتی یک خودرو می‌پردازد. علاوه بر آن، تحقیقات زیادی نیز در زمینه ارتعاشات ناشی از ناهمسانی تایر انجام گرفته است که عامل راحتی خودرو تنها یکی از موارد تأثیر آن است. برای مثال، مامبرِتی[1] تأثیر ناهمواری‌های جاده و ناهمسانی‌های تایر بر ارتعاشات سیستم تعلیق، غربیلک فرمان و بدنه خودرو را در قالب آزمون جاده و تست آزمایشگاهی اندازه‌گیری کرده است [۵]. سانگ[2] و همکارانش به بررسی ارتعاشات غربیلک فرمان یک خودروی سواری در اثر ناهمسانی تایر پرداخته‌اند [۶]. کیم[3] و همکارانش ارتعاشات غربیلک فرمان خودرو را در حالت‌های ناهمسانی تعمدی ایجاد شده در شرایط مختلف به‌صورت تجربی اندازه‌گیری کرده‌اند [۷].

همچنین تایر تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف سوخت و انرژی خودرو دارد و حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از تقاضای انرژی خودرو در چرخه‌های رانندگی شناخته شده را به خود اختصاص می‌دهد [۸]. ضمن اینکه در سال‌های گذشته، قوانین مختلفی در راستای محدود کردن مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن خودروها وضع شده است و این موضوع سبب شده که بهبود مصرف انرژی خودروها از جنبه‌های مختلف اهمیت پیدا کند. ازاین‌رو، پژوهش‌های متعددی به مطالعه تأثیر تایر بر بهره‌وری انرژی خودروها پرداخته‌اند. برای مثال، باراند[4] و بوکار[5] تأثیر استفاده از تایرهای با مقاومت غلتشی پایین در خودروهای سواری را بررسی و بهبود انتشار دی‌اکسیدکربن را به میزان ۳ گرم بر کیلومتر گزارش کرده‌اند [۹]. استفاده از فناوری‌های نوین کنترل فشار باد تایر هم در این راستا مطرح بوده است و حدود ۲ درصد بهبود در مراجع [۱۰] و [۱۱] حاصل شده است.

با وجود اینکه در اغلب مقالات، مقاومت غلتشی به‌تنهایی عامل اتلاف انرژی در نظر گرفته می‌شود پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که لغزش تایر نیز منجر به اتلاف توان و انرژی می‌شود و لحاظ کردن این عامل باعث افزایش دقت محاسبات می‌شود. سینا و همکاران در سال ۲۰۱۵ برخی آزمایش‌های واقعی روی چرخ‌های محرک و متحرک خودرو که مجهز به تایر ایده‌آل هستند و تأثیر ناهمسانی در آن‌ها لحاظ نشده است را با تغییر در پارامترهای میزان فشار باد تایر و شیب جاده انجام دادند و تأثیر پارامترهای فوق به انضمام میزان لغزش طولی بین تایر و زمین را بر میزان هدررفت انرژی و آلایندگی دی‌اکسیدکربن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که میزان هدررفت انرژی در چرخ‌های محرک و به‌خصوص در نیروهای محرک زیاد قابل‌ملاحظه‌تر از نیروی ناشی از مقاومت غلتشی تایر می‌باشد [۱۲]. سینا و همکاران در سال ۲۰۱۸ توان اتلافی ناشی از لغزش را معرفی کردند [۱۳] و در مقالات دیگر، تأثیر توان اتلافی لغزش تایر بر عملکرد خودرو بررسی شده است [۱۴-۱۶].

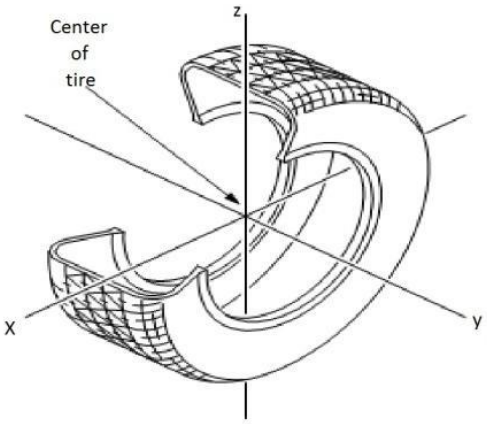
در این تحقیق، انرژی اتلافی یک تایر ناهمسان مطالعه می‌شود. برای این منظور، با استفاده از روش‌های تحلیلی محاسبه نیروی عمودی و گشتاورهای ناشی از ناهمسانی، نمودارهای مربوط به هریک برای جرم‌های مختلف ناهمسانی و در سرعت‌های مختلف رسم شده‌اند. سپس با استفاده از نیروی عمودی محاسبه‌شده، نیروی اصطکاک طولی محاسبه شد و درنهایت نیروی اصطکاک طولی برای یک تایر ناهمسان، با نیروی محرکه موتور و حداکثر شتاب قابل دست‌یابی برای خودرو مقایسه شده‌اند تا میزان هدررفت توان تولیدی موتور استحصال گردد.

---

[1] Mambretti
[2] Song
[3] Kim
[4] Barrand
[5] Bokar

مدل‌سازی ناهمسانی تایر

سیستم مختصات در نظر گرفته‌شده برای تایر در شکل ۲ نشان داده شده است. در این بخش، مواردی از ناهمسانی تایر که بر نیروی طولی یا عمودی تأثیرگذار است به همراه روابط آن‌ها بررسی می‌شود. جدول ۱ پارامترهای استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

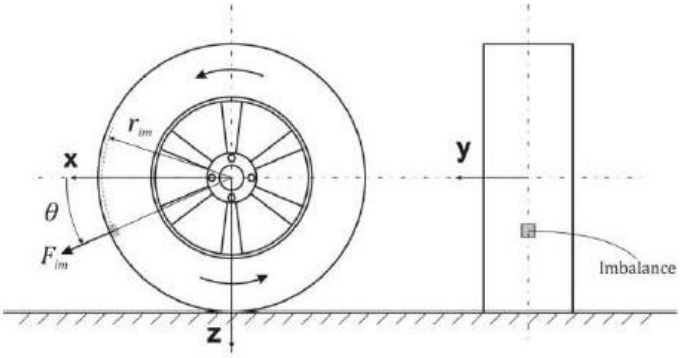


شکل ۲. سیستم مختصات تایر

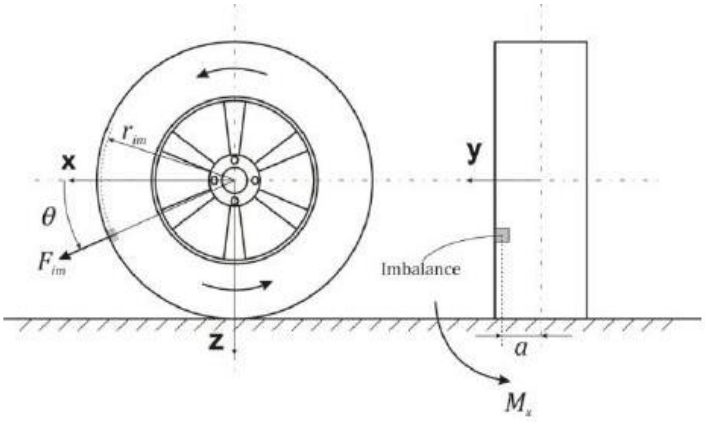
جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	پارامتر	توضیح	مقدار
۱	F_{z_i}	نیروی عمودی اولیه	2500 N
۲	m_{im}	جرم نامیزانی استاتیک، دینامیک یا قسمت ضربه‌خورده	20-40-60-80 gr
۳	m_w	جرم چرخ	12 kg
۴	e	مقدار خروج از مرکز در حالت هارمونیک مرتبه اول	5 mm
۵	ω_w	سرعت زاویه‌ای چرخ	معادل سرعت 80، 100 و 120 کیلومتر بر ساعت
۶	ζ	درصد تغییر ضریب فنریت	5%
۷	b	انحراف جانبی چرخ	2 deg
۸	$K_{T,ave}$	ضریب فنریت میانگین تایر	16.08 kN.m
۹	a	موقعیت عرضی نامیزانی استاتیک، دینامیک یا قسمت ضربه‌خورده	165 mm
۱۰	R	شعاع چرخ	272 mm
۱۱	r_{im}	موقعیت شعاعی نامیزانی استاتیک، دینامیک یا قسمت ضربه‌خورده	272 mm
۱۲	K_f	ضریب فنریت فنرهای جلو	16.08 kN/m
۱۳	θ	زاویه دوران چرخ	0-360 deg
۱۴	t	زمان	s

مطابق شکل ۳ توزیع جرم غیریکنواخت حول محور دوران تایر، نابالانسی استاتیک نامیده می‌شود. نیروی حاصل از این نوع نابالانسی در صفحه چرخ در حال دوران، تولید شده و در جهت شعاع تایر می‌باشد. نابالانسی استاتیک ممکن است در مرحله ساخت تایر یا هنگام استفاده از تایر ایجاد شود. با توجه به شکل ۴ وجود جرم نامتقارن بر تایر در راستای محور عرضی یا محور دوران تایر، نابالانسی دینامیک نامیده می‌شود. این مورد به دلیل هندسه نادرست سیستم‌های تعلیق و فرمان که ناشی از زاویه بیش‌ازحد کمبر، تنظیم نبودن فاصله عرضی بین چرخ‌ها، برخورد شدید تایر به لبه‌های تیز مانند جدول حاشیه خیابان، اضافه‌وزن خودرو، فشار باد کم تایر نسبت به مقدار مجاز و ساییده‌شدن بیش‌ازحد تایر بر اثر رانندگی سریع در پیچ‌ها ایجاد می‌شود.



شکل ۳. نابالانسی استاتیک



شکل ۴. نابالانسی دینامیک

نیروی حاصل از نابالانسی استاتیک از رابطه ۱ حاصل می‌شود.

$$\mathbf{F = m_{im} r_{im} \omega_w^2} \quad (۱)$$

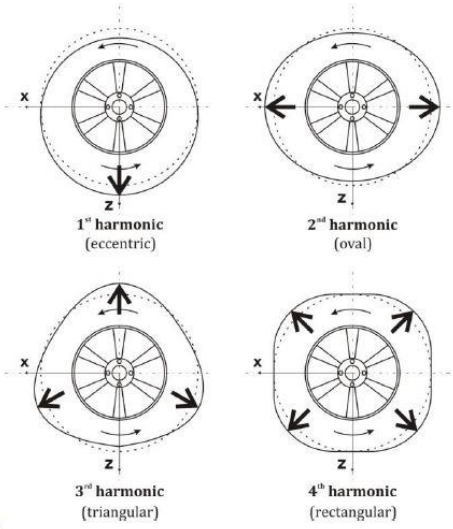
با توجه به متناوب بودن نیروی حاصل از نابالانسی، رابطه نهایی به‌صورت روابط ۲ و ۳ خواهد بود. این رابطه، تأثیر نابالانسی استاتیک بر نیروی عمودی و طولی تایر را نشان می‌دهد.

$$\mathbf{F_x = m_{im} r_{im} \omega_w^2 \cos(\theta)} \quad (۲)$$

$$F_z = m_{im} r_{im} \omega_w^2 \sin(\theta) \quad (۳)$$

تغییر نیروی عمودی و طولی در اثر نابالانسی دینامیک مشابه حالت استاتیک است. علاوه بر این، در صورت وجود نابالانسی دینامیک، به علت انطباق نداشتن مرکز نابالانسی و مرکز تایر، علاوه بر تغییرات نیرو، گشتاور وارد بر مرکز چرخ نیز دچار تغییر خواهد شد اما ازآنجایی‌که تمرکز این مقاله بر تغییرات نیرو است، از بیان روابط تغییر گشتاور اجتناب می‌شود. خوانندگان می‌توانند برای اطلاعات بیشتر به مراجع [۱۷] و [۱۸] مراجعه کنند. اگر فرض کنیم که کج شدن رینگ در اثر ضربه، نوعی نامیزانی دینامیک است می‌توان با محاسبه جرم و مختصات مرکز جرم قسمت کج شده، با استفاده از رابطه مربوط به نامیزانی دینامیک، نیرو و گشتاور را در این حالت محاسبه کرد.

هرگونه اختلاف اندازه در شعاع آزاد تایر را اختلاف اندازه شعاعی گویند. شعاع تایر در حالتی که هیچ بار و وزنی به آن اعمال نمی‌شود، شعاع آزاد تایر نامیده می‌شود. درصورتی‌که تایری مطابق شکل ۵ خارج از مرکز باشد، هم در جهت طولی و هم در جهت عمودی نیرو اعمال خواهد کرد. در این حالت علاوه بر نیروی ناشی از خارج از مرکز بودن، مرکز تایر دائماً در حال تغییر مکان عمودی است که این موضوع نیز به دلیل اعمال به سیستم تعلیق و فنر خودرو، منتهی به تغییر نیروی عمودی خواهد شد. در اختلاف اندازه شعاعی هارمونیک مرتبه دوم و بالاتر تایر با محور خود هم‌مرکز است. لذا تنها نیروی ایجادشده حاصل از جابه‌جایی مرکز چرخ و تایر است که در راستای عمودی اعمال می‌شود.



شکل ۵. اختلاف اندازه شعاعی

در این حالت نیروهای وارد بر تایر به‌صورت زیر محاسبه خواهند شد. پارامترهای استفاده‌شده در روابط زیر و مقدار آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

$$\mathbf{F = F_{ecc} + F_{dis}} \quad (۴)$$

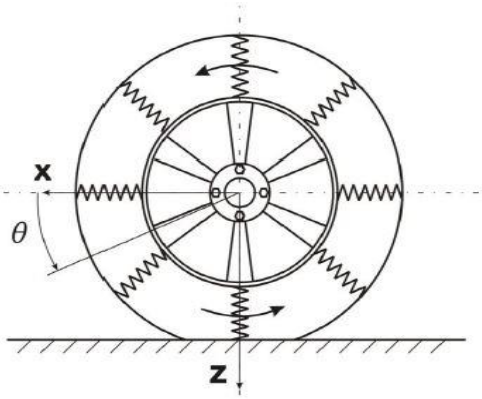
$$F_{ecc} = m_w e \omega_w^2 \quad (۵)$$

$$F_{dis} = K_f \Delta z \quad (۶)$$

$$F_x = m_{im} r_{im} \omega_w^2 \cos(\theta) \quad (۷)$$

$$F_z = m_{im} r_{im} \omega_w^2 \sin(\theta) + K_f \Delta z \sin(\theta) \quad (۸)$$

تغییر ضریب فنریت در راستای جانبی و طولی در مقایسه با راستای عمودی کمتر است. در این پژوهش نیز به بررسی اثر تغییر ضریب فنریت در راستای عمودی پرداخته شده است. می‌توان تایر را مطابق شکل ۶ با استفاده از تعداد زیادی فنر مدل‌سازی کرد. هنگامی‌که تایر تحت وزن خودرو قرار می‌گیرد، در آن مقداری فشردگی ایجاد می‌شود. اگر ضریب فنریت فنرهای شعاعی یکسان نباشد، این فشردگی نیز متغیر است؛ یعنی تایر در یک دور چرخش، فشردگی یکسانی ندارد و مقداری حرکت عمودی خواهد داشت؛ بنابراین نیروی حاصل از جابه‌جایی به‌صورت متناوب به مرکز چرخ و تایر اعمال می‌شود.



شکل ۶. فنریت شعاعی تایر

می‌توان تغییرات ضریب فنریت را بر حسب درصد یعنی ζ بیان کرد؛ بنابراین حداکثر و حداقل ضریب فنریت از روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید.

$$\mathbf{K_{T,max} = (1 + \zeta) K_{T,ave}} \quad (۹)$$

$$K_{T,min} = (1 - \zeta) K_{T,ave} \quad (۱۰)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\mathbf{F_{dis} = K_f (S_{max} - S_{min})} \quad (۱۱)$$

$$S_{max} = \frac{F_z}{K_{T,min}} \tag{۱۲}$$

$$S_{min} = \frac{F_z}{K_{T,max}} \tag{۱۳}$$

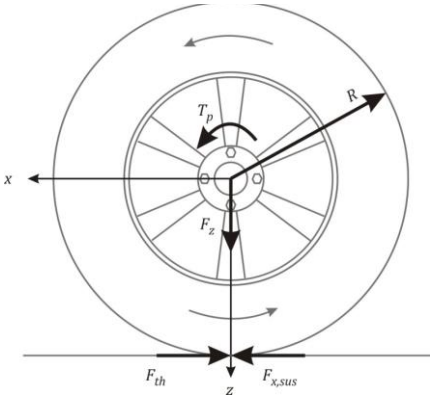
$$F_z = K_f\left(\frac{F_z}{K_{T,min}} - \frac{F_z}{K_{T,max}}\right)\sin\theta = K_f\frac{F_z}{K_{T,ave}}\left(\frac{2\zeta}{1-\zeta^2}\right)\sin\theta \tag{۱۴}$$

روابط به‌دست‌آمده را می‌توان به فرم ماتریسی خلاصه کرد. رابطه ۱۵ روابط تحلیلی انواع ناهمسانی را به‌صورت ماتریسی نشان می‌دهد. همچنین در این رابطه فرض شده است که همه انواع ناهمسانی در یک نقطه قرار گرفته‌اند.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x_i} & \cos\theta & \cos\theta & 0 \\ F_{z_i} & \sin\theta & \sin\theta & K_f\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \sum(m_{im}r_{im}\omega_w^2)_i \\ m_w e\omega_w^2 \\ e + \frac{F_z}{K_{T,ave}}\left(\frac{2\zeta}{1-\zeta^2}\right) \end{bmatrix} \tag{۱۵}$$

در این مرحله با استفاده از روابط تحلیلی، نیروی عمودی و گشتاور ایجادشده روی تایر در نرم‌افزار متلب مدل شده‌اند و نمودارهای نیرو و گشتاور برای جرم‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ گرم نابالانسی در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و در جهت‌های متفاوت ترسیم شد. همچنین فرض شده است که وزن خودرو ۱۰۰۰۰ نیوتن است؛ بنابراین نیروی اولیه‌ای به میزان ۲۵۰۰ نیوتن به هر چرخ وارد می‌شود.

در مرحله بعد، با استفاده از نیروی عمودی محاسبه‌شده در راستای عمودی، نیروی اصطکاک طولی محاسبه‌شده است. دینامیک تایر در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. دینامیک تایر

با توجه به رابطه ۱۶ گشتاور حاصل از این نیرو محاسبه شده است.

$$\mathbf{F_{x,sus} = \mu . F_z \Rightarrow T_R = R \times F_{x,sus}} \quad (۱۶)$$

سپس با استفاده از رابطه ۱۷ این گشتاور با گشتاور محرکه واردشده به چرخ از سوی موتور مقایسه شده و شتاب زاویه‌ای تایر یعنی α، به دست آمده است. در نهایت با استفاده از رابطه ۱۸ می‌توان شتاب خطی تایر ناهمسان در نظر گرفته‌شده را محاسبه کرد. بیشترین گشتاور محرکه موتور در خودروی در نظر گرفته‌شده برابر ۱۰۳ نیوتون‌متر می‌باشد که در ۲۵۰۰ دور بر دقیقه حاصل می‌شود. با در نظر گرفتن نسبت تبدیل دنده ۲ در گیربکس، این حالت در سرعت حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد. پارامترهای استفاده‌شده در رابطه ۱۷ در جدول ۲ آمده است.

$$\mathbf{T_{tot} = \frac{1}{2}\eta . T_p . N_t . N_f - R \times \mu . F_z = I . \alpha} \quad (۱۷)$$

$$R . \alpha = a_x \quad (۱۸)$$

جدول ۲. پارامترهای در نظر گرفته‌شده برای خودرو

ردیف	پارامتر	توضیح	مقدار
۱	T_p	بیشترین گشتاور محرکه موتور اعمال‌شده به هر چرخ	51.5 N
۲	η	بازده موتور	0.9
۳	N_t	نسبت تبدیل گیربکس	1.944
۴	N_f	نسبت تبدیل دیفرانسیل	4.777
۵	μ	ضریب اصطکاک تایر و زمین	0.6
۶	c	فاصله مرکز جرم خودرو تا محور عقب	1425 mm
۷	L	فاصله بین محور جلو و عقب خودرو	2345 mm

در نهایت به‌منظور دست‌یابی به میزان لغزش و هدررفت توان در یک تایر ناهمسان، شتاب خطی به‌دست‌آمده از رابطه ۱۸، با حداکثر شتاب قابل دست‌یابی برای یک تایر ایده‌آل مقایسه شده است. رابطه ۱۹ حداکثر شتاب قابل دست‌یابی برای یک تایر ایده‌آل را بیان می‌کند. در این رابطه، L برابر با فاصله بین محور جلو و عقب خودرو و c فاصله مرکز جرم خودرو تا محور عقب (محور محرک خودروی در نظر گرفته‌شده) می‌باشد.

$$\mathbf{a_{max} = \mu . g . \frac{c}{L}} \quad (۱۹)$$

بنابراین اگر شتاب خطی به‌دست‌آمده برای تایر ناهمسان از حداکثر شتاب قابل دست‌یابی بیشتر باشد، لغزش اتفاق می‌افتد. در این حالت، با توجه به رابطه ۱۷ و تبدیل گشتاور به نیرو می‌توان افت نیروی محرکه موتور در چرخ را از رابطه ۲۰ محاسبه کرد. شایان ذکر است که محاسبه میزان توان تلف‌شده بین تایر و زمین را می‌توان از طریق محاسبه لغزش طولی بین تایر و زمین محاسبه کرد و این مهم مستلزم اندازه‌گیری سرعت خطی خودرو و مقایسه آن با سرعت محیطی تایر می‌باشد که موضوع اندازه‌گیری سرعت خطی خودرو مقوله‌ای بسیار پیچیده می‌باشد که بعضاً به‌منظور کاهش هزینه‌های مرتبط با این موضوع از روش‌هایی برای تخمین سرعت خطی خودرو استفاده شده است [۱۹]. با

توجه به بروز انواع ناهمسانی‌ها در تایر که طبیعتاً در هر دور از تایر، تأثیر این نوع ناهمسانی‌ها بر نیروی عمودی اعمالی به تایر در نقاط مختلف و به‌صورت ترکیبی قابل مشاهده می‌باشد و عنایت به این موضوع که در این پژوهش، تغییر نیروی عمودی وارد بر تایر به‌عنوان منشأ این نوع لغزش طولی بین تایر و جاده در نظر گرفته شده است؛ از این رو پارامتر لغزش طولی بین تایر و زمین مجهول می‌باشد و به همین دلیل از الگوی شتاب خطی تایر و شتاب مرجع قابل‌تحمل تایر استفاده شده است. درصورتی‌که شتاب خطی تایر ناهمسان از حداکثر شتاب قابل‌تحمل تایر کمتر باشد، لغزش اتفاق نمی‌افتد و افت نیرو وجود ندارد. از طرفی با توجه به رابطه ۲۰ می‌توان میزان اتلاف نیروی طولی بین تایر و جاده را محاسبه کرد.

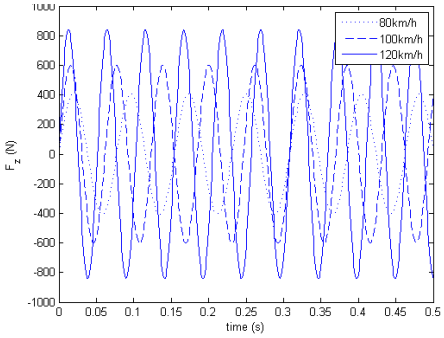
$$\mathbf{\Delta F = \frac{\frac{1}{2}\eta.T_p.N_t.N_f}{R} - \mu.F_z - m.a_x} \qquad (۲۰)$$

با ضرب نیرو در سرعت خطی می‌توان توان را محاسبه کرد؛ بنابراین با ضرب مقدار افت نیروی طولی بین تایر و زمین محاسبه‌شده در رابطه ۲۰ و سرعت خطی تایر، می‌توان به معیاری برای میزان توان اتلافی در یک تایر ناهمسان دست یافت.

$$P_{loss} = \Delta F.V = \Delta F.R.\omega \qquad (۲۱)$$

نتایج و بحث

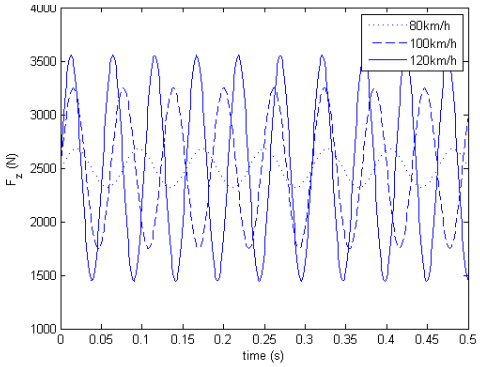
نیروی عمودی حاصل از ناهمسانی‌های مختلف که از رابطه ۱۵ قابل محاسبه است، برای جرم‌های متفاوت نابالانسی و در سرعت‌های مختلف رسم شده است. شکل ۸ تغییرات نیروی عمودی حاصل از جرم نابالانسی ۴۰ گرم در سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت، دامنه تغییرات نیروی عمودی حاصل از ناهمسانی‌ها افزایش یافته است.



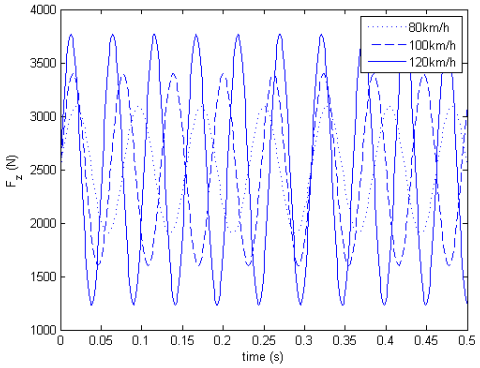
شکل ۸. نیروی عمودی بدون در نظر گرفتن نیروی اولیه برای جرم نابالانسی ۴۰ گرم برای سرعت‌های مختلف

در شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات نیروی عمودی تایر ناهمسان با جرم‌های نابالانسی ۶۰ و ۸۰ گرم، در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه نمودارهای رسم‌شده، مشاهده می‌شود که افزایش جرم نابالانسی، باعث

افزایش دامنه‌ی تغییرات نیروی عمودی روی چرخ می‌شود. در این نمودارها نیروی اولیه ۲۵۰۰ نیوتون روی چرخ قرار داده شده است.

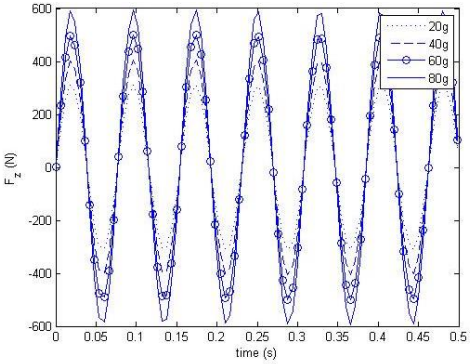


شکل ۹. نیروی عمودی با در نظر گرفتن نیروی اولیه برای جرم نابالانسی ۶۰ گرم برای سرعت‌های مختلف



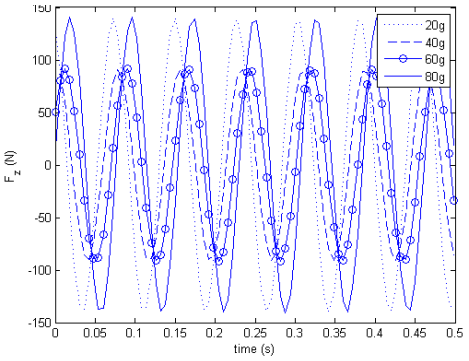
شکل ۱۰. نیروی عمودی با در نظر گرفتن نیروی اولیه برای جرم نابالانسی ۸۰ گرم برای سرعت‌های مختلف

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در یک سرعت مشخص، افزایش جرم نابالانسی باعث افزایش نیروی عمودی در یک تایر ناهمسان می‌شود. در این شکل، به علت یکسان بودن سرعت در حالات مختلف و قرار گرفتن همه انواع ناهمسانی در یک نقطه، نمودارهای رسم‌شده هم‌فاز هستند که سبب افزایش دامنه تغییرات نیروی عمودی می‌شود.



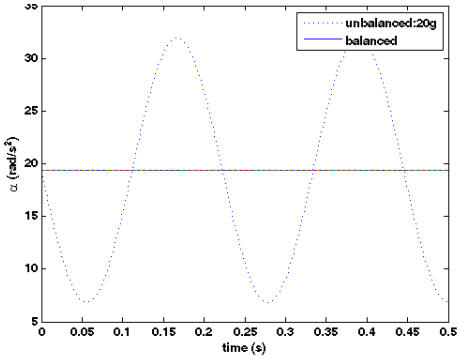
شکل ۱۱. نیروی عمودی بدون در نظر گرفتن نیروی اولیه برای سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت برای جرم‌های نابالانسی مختلف

در شکل ۱۲، نیروی عمودی تایر ناهمسان در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت، برای جرم‌های مختلف نابالانسی و با جهت‌گیری‌های مختلف رسم شده است. در این حالت هریک از انواع ناهمسانی در موقعیت‌های مختلفی روی تایر قرار داده شده‌اند. این موقعیت‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند. با توجه به این‌که در عمل نیز موقعیت قرارگیری ناهمسانی‌ها متفاوت است، این حالت به واقعیت نزدیک‌تر است. با مقایسه شکل ۱۱ و ۱۲ می‌توان دریافت که قرارگیری ناهمسانی‌ها در نقاط مختلف تایر، باعث کاهش بزرگی نیروی عمودی روی تایر شده است؛ زیرا اثر یک ناهمسانی در طول زمان می‌تواند توسط ناهمسانی دیگر تضعیف یا تقویت شود.

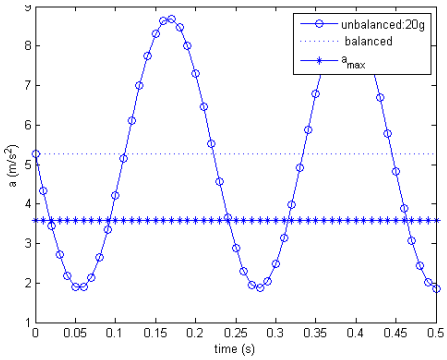


شکل ۱۲. نیروی عمودی بدون در نظر گرفتن نیروی اولیه برای سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت برای جرم‌های نابالانسی مختلف و ناهمسانی‌های با جهت‌گیری‌های مختلف

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ شتاب زاویه‌ای و خطی اعمال‌شده به تایر همسان و تایر ناهمسان که در رابطه ۱۷ و ۱۸ محاسبه شد را نشان می‌دهد. بیشینه گشتاور محرکه موتور در دور موتور ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و نسبت تبدیل دنده ۲ در گیربکس فرض شده است. در این حالت سرعت اتومبیل حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت است.

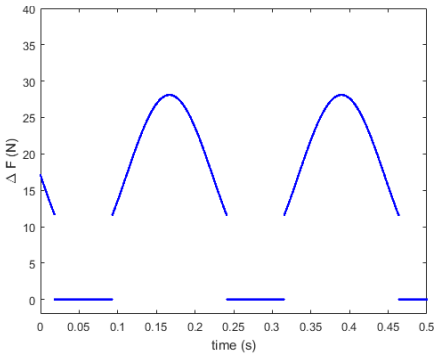


شکل ۱۳. شتاب زاویه‌ای تایر همسان و تایر ناهمسان برای ۲۰ گرم نابالانسی



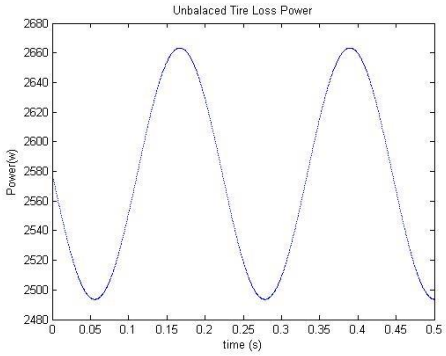
شکل ۱۴. شتاب خطی تایر همسان و تایر ناهمسان و مقایسه آن‌ها با بیشینه شتاب خطی قابل دستیابی برای ۲۰ گرم نابالانسی

در شکل ۱۴ شتاب خطی تایر ناهمسان با بیشینه شتاب قابل دست‌یابی برای یک تایر ایده‌آل مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در برخی از بازه‌های زمانی، شتاب خطی تایر از حداکثر شتاب بیشتر شده است؛ بنابراین در این بازه‌ها لغزش اتفاق می‌افتد و افت نیرو مشاهده می‌شود. شکل ۱۵ افت نیروی حاصل از لغزش تایر را در سرعت حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد. با مقایسه شتاب خطی تایر با حداکثر شتاب قابل دست‌یابی نمودار افت نیرو در زمان‌های مختلف رسم شده است. دلیل ناپیوستگی نمودار افت نیرو این است که در بعضی از بازه‌های زمانی شتاب خطی تایر از بیشینه شتاب کمتر است یا به عبارتی افت نیروی حاصل از لغزش صفر است. برای محاسبه مقدار افت نیرو از رابطه ۲۰ استفاده شده است.

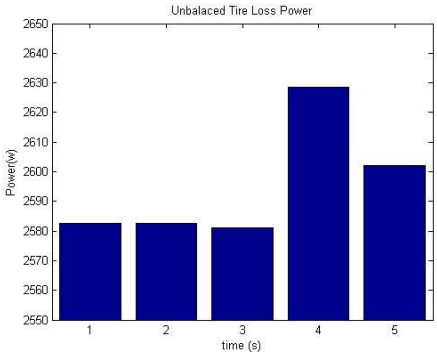


شکل ۱۵. افت نیرو نسبت به زمان

در نهایت، شکل‌های ۱۶ و ۱۷ توان اتلافی در تایر با همه انواع ناهمسانی و تایر با یک نوع ناهمسانی را برای دور موتور و نسبت تبدیل در نظر گرفته شده نشان می‌دهند. برای محاسبه توان اتلافی از رابطه ۲۱ استفاده شده است. مشاهده می‌شود که بخشی از توان تولیدی موتور، در اثر ناهمسان بودن تایر تلف شده است.



شکل ۱۶. توان اتلافی در تایر با همه انواع ناهمسانی



شکل ۱۷. توان اتلافی بر اثر ناهمسانی‌های مختلف ۱- استاتیک ۲- دینامیک ۳- کجی رینگ در اثر ضربه ۴- هارمونیک نوع اول ۵- تغییر ضریب فنریت

نتیجه‌گیری

وجود انواع مختلف ناهمسانی در تایر خودرو موجب بروز مشکلات مختلف اعم از کاهش راحتی سرنشین، کاهش پایداری خودرو، افزایش مصرف سوخت، افزایش آلایندگی، کاهش طول عمر قطعات خودرو و غیره می‌شود. در این پژوهش ضمن بررسی انواع ناهمسانی‌های تایر، به روش تحلیلی روابط حاکم بر انواع ناهمسانی‌ها استخراج گردید. سپس مدل‌سازی روابط موردنظر در نرم‌افزار متلب انجام شد. با انجام شبیه‌سازی در شرایط مختلف میزان هدررفت توان تولیدی موتور خودرو در اثر ناهمسانی تایر بررسی گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وجود ناهمسانی در تایر خودرو باعث هدررفت بخشی از توان تولیدی موتور خودرو می‌گردد.

References

[1] Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). John Wiley & Sons. https://www.wiley.com/en-us/Theory+of+Ground+Vehicles%2C+4th+Edition-p-9780470170380

[2] Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of vehicle dynamics* (2nd ed.). SAE International. https://www.sae.org/publications/books/content/r-506 /

[3] Reimpell, J., Stoll, H., & Betzler, J. W. (2001). *The automotive chassis: engineering principles* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. https://www.elsevier.com/books/the-automotive-chassis-engineering-principles/reimpell/978-0-7506-5054-0

[4] Nasiri, S., Sina, N., & Eslami, A. (2015). Multi-objective optimisation of McPherson strut suspension mechanism kinematics using random search method. *Indian journal of science and technology*, *8*(16) ,10 .https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i16/62548

[5] Mambretti, F. N. (1989, June 14-16). *Road and tyre non-uniformities: Simulation of their effects inside a vehicle.* 2nd International Conference on New Developments in Powertrain and Chassis Engineering, Strasbourg, France. https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=200902057981930111

[6] Song, S. K., Pak, C. H., Hong, S. C., Oh, J. W., Kim, J. H., & Kim, C. S. (1993, November 15-19). *Vibration analysis of the steering wheel of a passenger car due to the tire nonuniformity.* Seventh International Pacific Conference On Automotive Engineering, Phoenix, Arizona. https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/931918/

[7] Kim, K.-W., Park, J.-B., & Lee, S.-J. (2005, May 16-19). *Tire mass imbalance, rolling phase difference, non-uniformity induced force difference, and inflation pressure change effects on steering wheel vibration.* SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition, Traverse City, Michigan.https://doi.org/10.4271/2005-01-2317

[8] Sina, N., Hayeri Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2021). Investigation of Vehicle Energy Demand considering the Modified Tire Power Loss. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, *53*(6), 11-11. https://doi.org/10.22060/mej.2021.18333. 6802

[9] Barrand, J., & Bokar, J. (2008). Reducing tire rolling resistance to save fuel and lower emissions. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, *1*(1), 9-17. https://doi.org/10.4271/2008-01-0154

[10] d'Ambrosio, S., & Vitolo, R. (2019). Potential impact of active tire pressure management on fuel consumption reduction in passenger vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *233*(4), 961-975. https://doi.org/10.1177/0954407018756776

[11] Sina, N., Hairi Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2020). A novel method to improve vehicle energy efficiency: Minimization of tire power loss. *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, *234*(4) ,1153-1166. https://doi.org/10.1177/0954407019861241

[12] Sina, N., Nasiri, S., & Karkhaneh, V. (2015). Effects of resistive loads and tire inflation pressure on tire power losses and CO2 emissions in real-world conditions. *Applied Energy*, *157*, 974-983 .https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.010

[13] Sina, N., Esfahanian, V., Hairi Yazdi, M. R., & Azadi, S. (2018). Introducing the modified tire power loss and resistant force regarding longitudinal slip. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, *11*(2), 167-176. https://doi.org/10.4271/06-11-02-0014

[14] D'ambrosio, S., De Mattei, E., Vitolo, R., & Amati, N. (2021). Automatic adjustment of tire inflation pressure through an intelligent CTIS: Effects on the vehicle lateral dynamic behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *235*(14), 3487-3508. https://doi.org/10.1177/09544070211014292

[15] Sina, N., Hairi Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2021). Modified Dynamic Model for Longitudinal Motion of Ground Vehicles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *18*(1), 8550 – 8562. https://doi.org/10.15282/ijame.18.1. 2021.14.0649

[16] Torinsson, J., Jonasson, M., Yang, D., & Jacobson, B. (2020). Energy reduction by power loss minimisation through wheel torque allocation in electric vehicles: a simulation-based approach. *Vehicle System Dynamics*, 1-24. https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1858121

[17] Nasiri, S., Sina, N., & Rezaei Dasht Arjaneh, J .(2012) .Analytical Modeling and Simulation of Tire Non-uniformities. *Iranian Rubber Magazine*, *16*(65), 38. https://www.magiran.com/paper/1018524?lang=en

[18] Sina, N., & Nasiri, S. (2014, February 25-26). *Excitation Behavior of Tire and Wheel Assembly Faults in Shape of Non-uniformity in a Vehicle* .8th Condition Monitoring and Fault Diagnosis Conference, Tehran, Iran. https://www. researchgate. net/publication/339181103_Excitation_Behavior_of_Tire_and_ Wheel_ Assembly_ Faults_in_Shape_of_Non-uniformity_in_a_Vehicle

[19] Moaveni, B., Khosravi Roqaye Abad, M., & Nasiri, S. (2015). Vehicle longitudinal velocity estimation during the braking process using unknown input Kalman filter. *Vehicle System Dynamics*, *53*(10), 1373-1392. https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1038279

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 327-341
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.275252.1405
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.17.0

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Experimental Investigation on Mechanical Properties of PA6/NBR/Graphene Nanocomposite by Response Surface Methodology

Mohammad Reza Nakhaei[1]*, Ali Ghorbankhan[2]

[1]Assistant Professor, Department of Applied Design, Faculty of Mechanic and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
[2]MSc. Student, Department of Applied Design, Faculty of Mechanic and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 03.05.2021
Revised: 06.09.2021
Accepted: 09.01.2021

Keyword:
Nanocomposite
Polyamide/ Nitrile Butadiene Rubber/ Graphene
Tensile test
Hardness test
Scanning electron microscopy

***Corresponding Author:**
Mohammad Reza Nakhaei
Email: *m_nakhaei@sbu.ac.ir*

ABSTRACT

In this paper, the feasibility study of the production of PA6/NBR/Graphene nanocomposite by an internal mixer was investigated. The effect of nitrile and graphene content on modulus strength and hardness was studied by response surface methodology. Analysis of variance was used to study the effect of input parameters and mathematical models. The mechanical properties and microstructure were investigated by tensile test, hardness, and scanning electron microscopy. The comparison of the experimental results and response surface methodology results showed a small percentage of error. The results show that at the different percentage of NBR content, modulus strength and hardness increased with an increase in graphene content at 0 to 2 wt% and the maximum modulus strength (2354 MPa) and hardness (111 shore A) was obtained at the graphene content of 2 % and nitrile content of 20 %. At a low percentage of graphene nanoparticle, an increase in the NBR content lead to a higher decrease of modulus strength so that in graphene content of 0.5%, with increasing NBR content from 20 % to 40 %, modulus strength decreased from 2229 to 1859 MPa. However, for graphene content of 1.5 %, increasing the NBR content lead to decreases of modulus strength from 2354 to 2164 MPa.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۴۱-۳۲۷
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.275252.1405
20.1001.1.23829796.1400.18.3.17.0
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PA6/NBR/Graphene با روش پاسخ سطح

محمد رضا نخعی[1*]، علی قربانخان[2]

۱- استادیار، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

کلید واژگان:
نانوکامپوزیت
پلی‌آمید/ نیتریل بوتادین رابر/ گرافن
آزمون کشش
آزمون سختی
میکروسکوپ الکترونی روبشی

*نویسنده مسئول: محمد رضا نخعی
پست الکترونیکی:
m_nakhaei@sbu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، امکان‌سنجی تولید نانوکامپوزیت‌های پلی‌آمید/ آکریلونیتریل بوتادین/ گرافن (PA۶ /NBR/Graphene) با استفاده از میکسر داخلی بررسی شده است. با استفاده از روش پاسخ سطح تأثیر درصد لاستیک نیتریل و گرافن بر مدول کششی و سختی این مواد بررسی گردید. با استفاده از جدول آنالیز واریانس، تأثیر پارامترها ورودی و مدل‌های ریاضی مطالعه شد. خواص مکانیکی و ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از آزمون کشش، آزمون سختی و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. مقایسه نتایج روش سطح پاسخ با نتایج تجربی، درصد خطای کمی را نشان داد. نتایج نشان داد که در درصدهای مختلف نیتریل، با افزایش گرافن از ۰ تا ۲ درصد، مدول کششی و سختی افزایش می‌یابد و بیشترین مدول کششی (۲۳۵۴MPa) و سختی (۱۱۱ shore A) در گرافن ۲ درصد و ۲۰ درصد نیتریل به‌دست خواهد آمد. در درصدهای پایین نانوذرات گرافن، افزایش مقدار NBR باعث کاهش بیشتر مدول خواهد شد؛ به‌طوری که در ۰/۵ درصد گرافن با افزایش NBR از ۲۰ تا ۴۰ درصد، مدول از ۲۲۲۹ به MPa ۱۸۵۹ کاهش می‌یابد. در حالی که برای ۱/۵ درصد گرافن، افزایش NBR منجر به کاهش مدول از ۲۳۵۴ به MPa ۲۱۶۴ خواهد شد.

مقدمه

پلی‌آمید یکی از پلیمرهای مهندسی با خواص مکانیکی بالا و کارایی و فرایندپذیری بالا یکی از پرکاربردترین پلیمرها می‌باشد [۱]. مقاومت ضربه کم در دماهای پایین و نرخ کرنش بالا، باعث محدودیت استفاده از پلی‌آمید شده است [۲]. ظهور ترموپلاستیک الاستومرها شاید مهم‌ترین عامل در نزدیک شدن این دو دسته از پلیمرها شده است. ترموپلاستیک الاستومرها آلیاژهای پلیمری هستند که از ترکیب یک ترموپلاستیک و یک الاستومر به‌وجود می‌آیند [۲; ۳]. آلیاژسازی پلی‌آمید (PA۶) با لاستیک‌هایی مثل اکریلونیتریل بوتادین (NBR) منجر به افزایش چقرمگی آن می‌شود. اگرچه آلیاژسازی پلی‌آمید با لاستیک باعث بهبود ضربه‌پذیری این ماده می‌شود ولی از طرفی بعضی خواص مکانیکی مثل مدول و سختی را کاهش می‌دهد [۴]. افزودن درصد بسیار کم تقویت‌کننده‌هایی مثل نانوذرات گرافن خواص مکانیکی و حرارتی را می‌تواند به‌طور شگفت‌انگیزی بهبود دهد [۵]. از روش‌های مختلفی برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود که استفاده از دستگاه‌های اکسترودر، میکسر داخلی و روش اصطکاکی اغتشاشی جزء روش‌های اختلاط مذاب هستند [۶]. اینو و همکارانش [۷] تأثیر غلظت فاز لاستیک را بر خواص مکانیکی ترموپلاستیک الاستومرهای PA۶/NBR بررسی کردند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی وابسته به ریزساختار مواد و سیستم پخت خواهد بود. محلاتی و همکارانش [۸] تأثیر درصد نانوذرات خاک رس و غلظت فاز لاستیک بر خواص مکانیکی و مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های PA۶/NBR انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت فاز لاستیک از ۱۰ تا ۳۰ درصد باعث افزایش تنش برشی در فرایند می‌گردد که این باعث پخش بهتر نانوذرات در فاز پلاستیک می‌شود. با افزایش نانوذرات خاک رس اندازه فاز لاستیک کوچک‌تر می‌شود؛ به‌طوری که با افزایش نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد وزنی، اندازه متوسط فاز لاستیک از ۴μm به ۱μm خواهد رسید. نتایج تحقیقات محراب‌زاده و همکاران [۹] روی PA۶/NBR نشان داد که پخت دینامیکی باعث افزایش گشتاور و بهتر شدن خواص مکانیکی مثل استحکام کششی و سختی خواهد شد. تقی‌زاده و همکارانش [۱۰] اثر درصد خاک رس را بر مورفولوژی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های دو فازی PA۶/ECO در درصدهای مختلف الاستومر و نانوذرات خاک رس را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت مثل استحکام و مدول کششی با افزایش نانوذرات خاک رس تا ۵ درصد افزایش می‌یابد و همچنین پخش شدن نانوذرات در فاز پایه با افزایش مقدار لاستیک بهبود خواهد یافت.

رویه پاسخ[1]، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است. برای برآورد پارامترها در تقریب چندجمله‌ای‌ها، از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود. پس از آن، تحلیل رویه پاسخ براساس رویه برازنده شده انجام می‌گیرد. اگر رویه برازنده شده، تقریبی کافی برای تابع واقعی پاسخ باشد، آن‌گاه تحلیل رویه برازنده شده تقریباً هم‌ارز تحلیل سیستم واقعی است. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها و رویه پاسخ، برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و متغیرهای مواد برای ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری استفاده شده است [۱۳-۱۱]. دانش‌پایه و همکاران به بررسی مدول کششی و استحکام ضربه در ترکیب $PP/LLDPE/Tio_2$ پرداختند که با استفاده از روش پاسخ سطح تعداد آزمایش و هزینه کاهش یافت [۱۱]. مقری و همکاران به بررسی رفتار رئولوژیکی ترکیب PVC/NBR با نانوذره خاک رس پرداختند که داده‌های تجربی با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA[2]) تجزیه و تحلیل شد [۱۲].

در این مقاله تأثیر افزودن نانوذرات گرافن و الاستومر NBR بر خواص مکانیکی بررسی می‌شود. بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت $PA_6/NBR/Graphene$ در درصد ترکیب‌های مختلف انجام خواهد شد. بدین منظور

[1] Response surface methodology
[2] Analysis of variance

بهینه‌سازی به‌گونه‌ای انجام خواهد شد که خواص مکانیکی مانند: مدول کششی و سختی به‌صورت مجزا و هم‌زمان بیشترین مقدار را داشته باشند. برای بررسی ریزساختار سطح نانوکامپوزیت و همچنین برای بررسی اندازه قطر فاز لاستیک پس از اضافه شدن نانوذره از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) استفاده شده است.

ساخت نانوکامپوزیت‌ها

مواد

برای ساخت ماده از پلی‌آمید ۶ با کد تجاری کوپا کن ۱۳۶، محصول شرکت کولون پلاستیک کره جنوبی، آکریلونیتریل بوتادین با نام تجاری ۳۵ ال، محصول شرکت کومهو کره جنوبی و گرافن با نشان تجاری ایکس جی ان پی ۷۵۰، محصول شرکت ایرانی همپار استفاده شده است که خصوصیات آنها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات مواد

ماده	ویژگی	مقدار	واحد
پلی‌آمید ۶	چگالی	۱/۱۴	gr/cm^3
	شاخص جریان مذاب	۳۱/۴	gr/۱۰min
	دمای ذوب	۲۲۰	°C
آکریلونیتریل بوتادین	درصد آکریلونیتریل	۳۴	W.t %
	چگالی	۰/۹۸	gr/cm^3
	گرانروی مونی	۴۱	ML(۱+۴) , ۱۰۰°C
گرافن	چگالی	۲/۲	gr/cm^3
	مساحت سطح ویژه	۷۵۰	m^2/gr
	ضخامت	۲- ۱۵	nm

دستگاه‌ها و روش‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، رطوبت‌گیری PA۶ و نانوذرات گرافن به مدت ۲۴h و در دمای ۸۰ °C در کوره انجام شد. اختلاط مواد PA۶، NBR و گرافن با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی برابندر- مدلw ۵۰ ساخت آلمان در سرعت ۸۰rpm، ۲۳۰ °C و به مدت ۶ min انجام شد. آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون‌های کشش و ضربه توسط دستگاه قالب‌گیری فشاری نوع mini Test Press ساخت Toyo-Seiki ژاپن مدل WCH در دمای ۲۴۰ °C و به مدت ۵ min انجام شد.

بررسی خواص مکانیکی کشش مطابق با استاندارد ASTM D ۶۳۸ (نوع ۱) در دمای محیط انجام شد، برای آزمون کشش از دستگاه کشش Zwick استفاده شد و بررسی خواص کششی در سرعت فک ۵ mm/min انجام شد [۱۳]. برای هر نمونه ساخته شده سه آزمون کشش انجام شد و در جدول نتایج میانگین اعداد گزارش گردید. سختی نمونه‌های ساخته شده براساس استاندارد ASTM D ۲۲۴۰ (نوع D) در دمای محیط اندازه‌گیری شده است که برای این منظور صفحات با ضخامت ۶ mm آماده شد [۱۴].

پس از ساخت نمونه‌ها، برای مطالعه سطح شکست و اندازه فاز لاستیک درون نانوکامپوزیت‌ها، نمونه‌ها بعد از شکست در نیتروژن مایع، به مدت ۲۴ ساعت در محلول استون قرار گرفت تا NBR در آن حل شود. بعد از آن، سطح

[1] Scanning Electron Microscope

شکست با لایه نازکی از طلا به ضخامت ۵۰۰-۱۰۰ آنگستروم پوشش داده شد و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدلTescan VEGA-II ساخت کشور چک مطالعه گردید.

در این تحقیق، طراحی آزمایش براساس طرح Central Composite و مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی پاسخ‌ها به کمک روش رویه پاسخ انجام شده است. سطح هریک از متغیرها که شامل گرافن و نیتریل می‌باشند در جدول ۲ آورده شده است. همچنین طرح‌های آزمایش خروجی از طرح Central Composite در جدول ۳ آورده شده‌اند. با توجه به وجود دو متغیر و پنج سطح، طرح‌های لازم از ۲۵ به ۱۱ کاهش یافته است.

جدول ۲. سطوح متغیرهای آزمایش

پارامترها	واحد	علائم	سطوح				
			-۲	-۱	۰	۱	۲
NBR	%	N	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
گرافن	%	G	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲

ارائه نتایج و بحث

مدول کششی

در جدول ۴، آنالیز واریانس (ANOVA) مربوط به داده‌های مدول کششی دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل به‌دست‌آمده به دلیل داشتن ضریب پی (P-value) کمتر از ۰/۰۵ مدلی قابل‌قبول می‌باشد و معادله به‌دست‌آمده یک معادله درجه دوم است که با استفاده از آن می‌توان مدول کششی را پیش‌بینی کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی یا ضریب همبستگی تعدیل‌یافته به‌ترتیب برابر ۹۸ و ۹۶ درصد است و این نشان می‌دهد مدل به‌دست‌آمده تطابق زیادی با نقاط آزمایش با تقریب قابل‌قبول است [۱۵; ۱۶].

جدول ۳. طراحی آزمایش بر اساس سطوح متغیرهای ورودی

کدها	NBR (%)	G (%)	مدول کششی (MPa)	سختی (Shore D)
PN۳۰G۱	۳۰	۱	۲۱۷۰	۸۲
PN ۴۰G۰/۵	۴۰	۰/۵	۱۸۹۰	۶۵
PN۵۰G۱	۵۰	۱	۱۹۲۰	۶۲
PN۳۰G۱	۳۰	۱	۲۱۵۵	۸۱
PN۳۰G۲	۳۰	۲	۲۲۴۰	۱۰۱
PN۳۰G۱	۳۰	۱	۲۱۹۰	۸۲
PN۳۰G۰	۳۰	۰	۱۸۱۰	۷۲
PN۲۰G۰/۵	۲۰	۰/۵	۲۳۱۵	۸۴
PN۴۰G۱/۵	۴۰	۱/۵	۲۱۶۵	۷۱
PN۱۰G۱	۱۰	۱	۲۴۸۵	۱۱۸
PN۲۰G۱/۵	۲۰	۱/۵	۲۳۸۰	۱۱۱

با در نظر گرفتن این استاندارد مقدار ضریب پی، تمامی ضرایب خطی متغیرهای ورودی شامل NBR و گرافن و ضرایب مرتبه دوم شامل G^2 و ضرایب مربوط به تأثیر متقابل پارامترهای مواد شامل NBR × G بر پاسخ نهایی یا مدول

کششی تأثیرگذارند. مدل درجه ۲ ارائه شده برحسب ضرایب این متغیرهای مؤثر در معادله (۱) آمده است، پارامتر $N^۲$ به دلیل اینکه مقدار P از ۵ درصد بزرگ‌تر است در معادله حضور ندارند؛ زیرا براساس استاندارد مدنظر، مهم تلقی نمی‌شوند [۱۷; ۱۸].

$$\text{مدول کششی} = ۲۶۵۲/۴ - ۲۹/۱\times G + ۱۸۷/۷\times N + ۱۰/۵\times G\times N - ۱۵۱/۳ \times G^۲ \quad (۱)$$

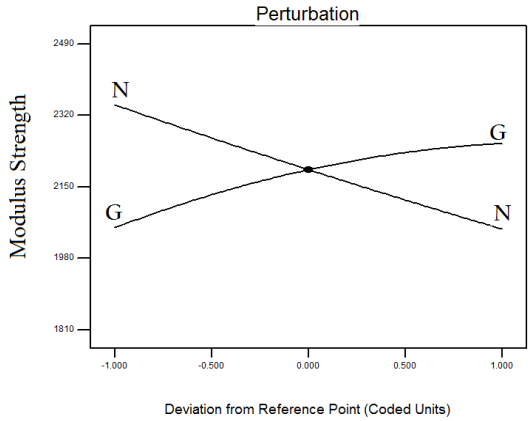
شکل (۱) تأثیرات خطی متغیرهای ورودی یا پارامترهای مقدار مواد بر مدول کششی نانوکامپوزیت را نمایش می‌دهد. منحنی‌های مربوط به هر پارامتر در حالتی ترسیم شده‌اند که دیگر پارامترها در حد وسط قرار دارند و این منحنی‌ها مستخرج از معادله (۱) است. در تمامی سطوح، افزودن نیتریل سبب کاهش مدول کششی می‌گردد؛ دلیل این امر نرم‌تر بودن فاز الاستومر نسبت به زمینه می‌باشد و در دیگر مقالات نیز روندی مشابه این نتیجه گزارش شده است [۱۳]. علاوه بر این، تعامل کم بین نیتریل و پلی‌آمید و چسبندگی ضعیف بین این دو فاز، تشدیدکننده نرخ کاهش است [۱۹]. در رابطه با اثر اضافه کردن گرافن، مدول کششی به‌طور مداوم با افزودن نانوذرات زیاد می‌شود ولی افزایش مدول در ابتدای محدوده نسبت به انتها بیشتر است.

جدول ۴. آنالیز واریانس برای مدول کششی

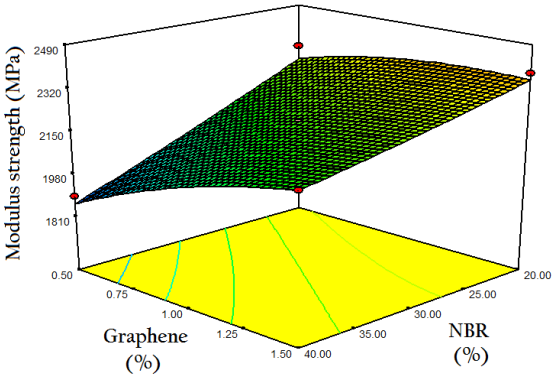
پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	تست فیشر	ضریب پی
رابطه	$۴/۳\times۱۰^۵$	۵	۸۶۰۷۶	۵۳/۹۸	۰/۰۰۰۲
N	$۲/۶\times۱۰^۵$	۱	$۲/۶\times۱۰^۵$	۱۶۳/۷۳	<۰/۰۰۰۱
G	$۱/۲\times۱۰^۵$	۱	$۱/۲\times۱۰^۵$	۷۵/۲۶	۰/۰۰۰۳
N×G	۱۱۰۲۵	۱	۱۱۰۲۵	۶/۹۱	۰/۰۴۶۶
$N^۲$	۸۲۲	۱	۸۲۲	۰/۵۲	۰/۵۰۵۴
$G^۲$	۲۷۶۴۵	۱	۲۷۶۴۵	۱۷/۳۴	۰/۰۰۸۸
باقیمانده[1]	۷۲۷۹/۲	۵	۱۵۹۴		
عدم تناسب[2]	۷۳۵۶	۳	۲۴۵۲	۷/۹۵	۰/۱۱۳۷
ضریب همبستگی تعدیل‌یافته = ۰/۹۶۹۳				ضریب همبستگی= ۰/۹۸۱۸	
ضریب همبستگی پیش‌بینی = ۰/۸۶۴۳					

تأثیر متقابل درصد نیتریل و گرافن بر مدول کششی در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش گرافن تا ۲ درصد در درصدهای مختلف نیتریل مدول کششی به‌طور مداوم افزایش می‌یابد و بیشترین مدول کششی در گرافن ۲ درصد و ۲۰ درصد نیتریل برابر ۲۳۵۴ MPa است. نتایج نشان می‌دهد که در درصدهای پایین نانوذرات گرافن، افزایش مقدار NBR باعث کاهش بیشتر مدول خواهد شد؛ به‌طوری که در ۰/۵ درصد گرافن با افزایش NBR از ۲۰ تا ۴۰ درصد، مدول از ۲۲۲۹ به ۱۸۵۹ MPa خواهد رسید در حالی که برای ۱/۵ درصد گرافن، افزایش NBR در این محدوده باعث کاهش مدول از ۲۳۵۴ به ۲۱۶۴ MPa خواهد شد.

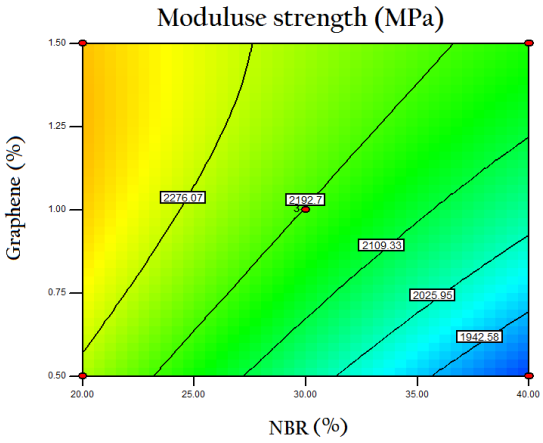
[1] Residual
[2] Lack of Fit



شکل ۱. تأثیر پارامترهای فرایند بر مدول کششی



(a)



(b)

شکل ۲. نمودار a) سه بعدی و b) دو بعدی اثر برهمکنش N و G بر مدول کششی

سختی

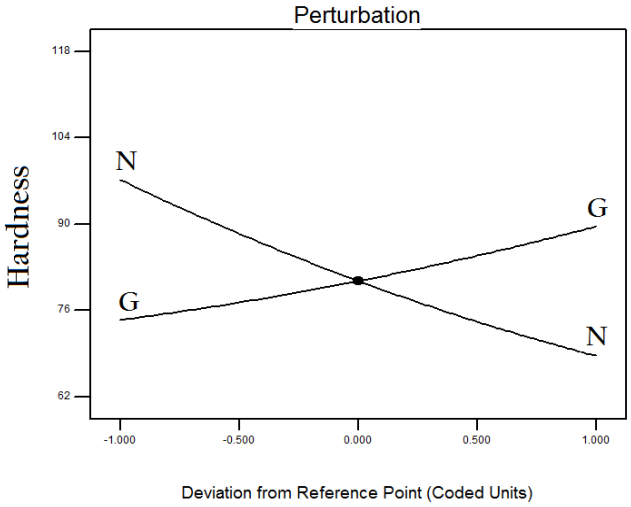
از جدول آنالیز واریانس (جدول ۵) به‌دست‌آمده برای سختی مشاهده می‌شود که تمامی پارامترها، توان دوم آن‌ها و ضرب پارامترهای G×N دارای ضریب پی کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این پارامترها بر سختی موثر است و در رابطه ریاضی وجود خواهند داشت. براساس جدول ۵، ضریب همبستگی یا ضریب همبستگی تعدیل‌یافته برای سختی به‌ترتیب برابر ۹۹ و ۹۸ درصد است که این مقادیر نشان می‌دهد روابط به‌دست‌آمده تطابق زیادی با نقاط آزمایش دارند؛ بنابراین رابطه تجربی نهایی که می‌توان از آن برای پیش‌بینی سختی در محدوده پارامترها استفاده کرد عبارتند از:

$$\text{سختی} = ۱۰۱ - ۱/۶۵\times G + ۳۹/۵\times N - ۱/۰۵\times G\times N + ۰/۰۲ \times N^{۲} + ۵/۰۶ \times G^{۲} \qquad (۲)$$

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است افزایش درصد گرافن باعث افزایش سختی می‌شود در حالی که افزایش درصد نیتریل، سختی را کاهش می‌دهد. دلیل این امر، نرم‌تر بودن فاز الاستومر نسبت به زمینه و همچنین خواص ذاتی الاستومر که رفتاری مانند لاستیک طبیعی دارد و قابلیت کشسانی بالا و مدول کمی از خود نشان می‌دهد [۲۰]. افزایش گرافن در تمامی سطوح باعث افزایش سختی گردیده است که با توجه به مدول، استحکام، ساختار گرافن و محدودیت اعمالی آن بر حرکت زنجیره‌های پلیمری و نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات گذشته قابل تفسیر است [۲۰; ۲۱].

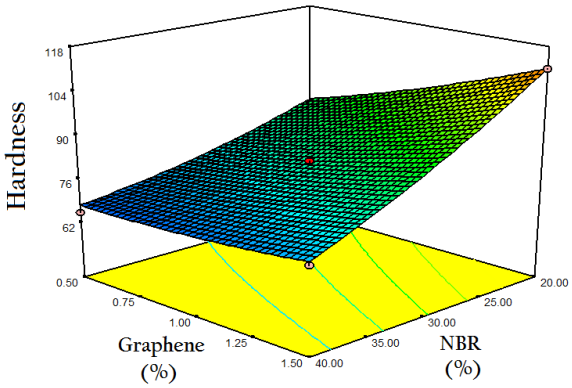
جدول ۵. آنالیز واریانس برای سختی

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربعات اصلی	تست فیشر	ضریب پی
رابطه	۳۳۲۹/۵	۵	۶۶۵/۹۱	۱۹۴/۱۰	<۰/۰۰۰۱
N	۲۴۳۶/۷	۱	۲۴۳۶/۷	۷۱۰/۲۸	<۰/۰۰۰۱
G	۶۹۰/۰۸	۱	۶۹۰/۰۸	۲۰۱/۱۵	<۰/۰۰۰۱
N×G	۱۱۰/۲۵	۱	۱۱۰/۲۵	۳۲/۱۴	۰/۰۰۲۴
$N^{۲}$	۸۸/۵۱	۱	۸۸/۵۱	۲۵/۸۰	۰/۰۰۳۸
$G^{۲}$	۳۰/۹۶	۱	۳۰/۹۶	۹/۰۲	۰/۰۳۰۰
باقیمانده	۱۷/۱۵	۵	۳/۴۳		
عدم تناسب	۱۶/۴۹	۳	۵/۵	۱۶/۴۹	۰/۰۵۷۷
ضریب همبستگی تعدیل‌یافته= ۰/۹۸۹۷				ضریب همبستگی= ۰/۹۹۴۹	
ضریب همبستگی پیش‌بینی= ۰/۹۶۲۷					

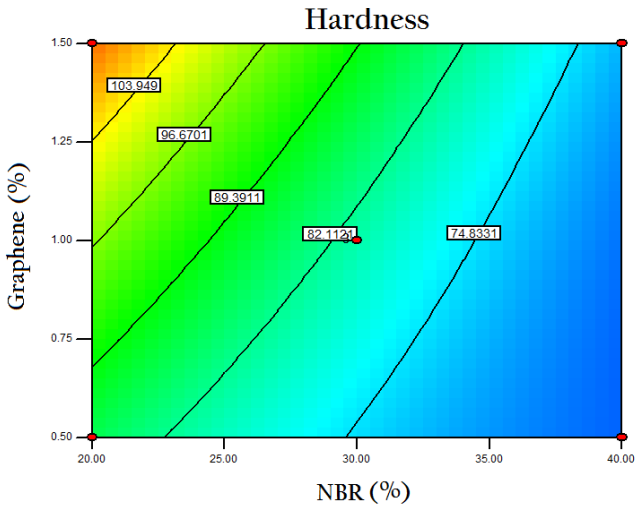


شکل ۳. تأثیر پارامترهای فرایند بر سختی

شکل ۲، نشانگر تغییرات سختی نانوکامپوزیت به‌ازای تغییرات سطوح مختلف دو متغیر، الاستومر نیتریل و نانوذرات تقویت‌کننده گرافن می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی سطوح نیتریل، افزایش گرافن سبب افزایش سختی می‌شود که با توجه به تأثیر گرافن بر کوچک‌تر شدن ذرات لاستیک و پراکندگی بهتر در زمینه قابل‌تفسیر است و مطابق نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات گذشته است [۲۲]. از سطح پاسخ موردمطالعه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشترین سختی در گرافن ۱/۵ درصد و درصد نیتریل ۲۰ درصد به‌دست می‌آید و مقدار آن برابر ۱۱۱ است.



(a)

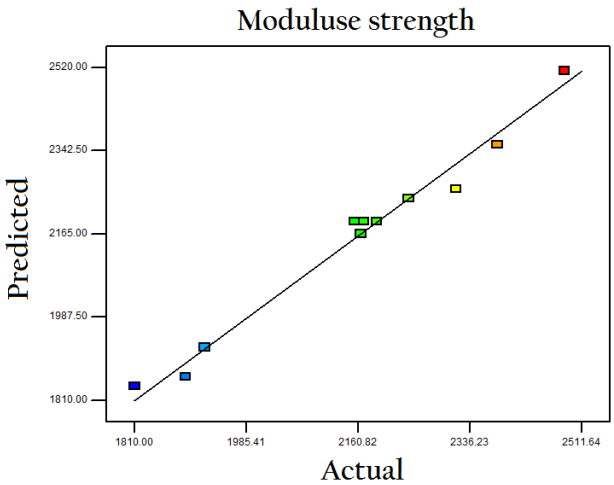


(b)

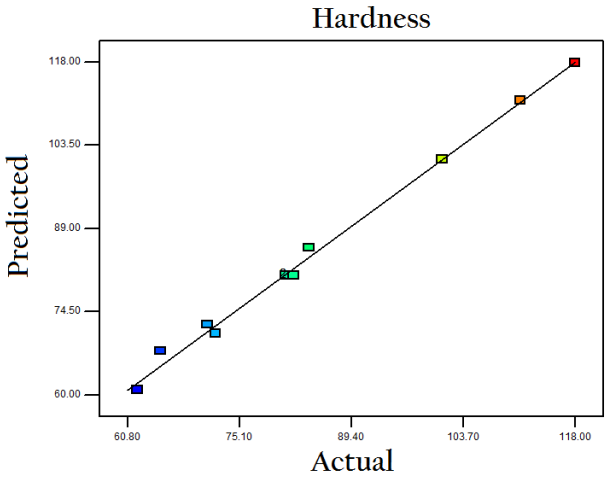
شکل ۴. نمودار a) سه بعدی و b) دو بعدی اثر برهمکنش N و G بر سختی

اعتبارسنجی داده‌ها

شکل ۵ نمودار مقایسه‌ای بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده مدول کششی و سختی را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه ۱ و ۲ به‌ترتیب در محدوده موردآزمایش پیش‌بینی خوبی از مدول کششی و سختی را خواهد داشت چون نقاط مشخص‌کننده همگی در اطراف خط °۴۵ قرار دارند [۲۳]. برای مشخص کردن اعتبار ۱ و ۲، سه آزمایش در حالت‌های به غیر از آزمایش‌های جدول ۳ انجام شد که مقایسه مقادیر واقعی به‌دست‌آمده با پیش‌بینی شده توسط روابط ۱ و ۲ نشان داد که خطا زیر ۵ درصد خواهد بود (جدول ۶).



(a)



(b)

شکل ۵. نمودار مقدار واقعی به مقدار پیش‌بینی برای (a) مدول کششی و (b) سختی

جدول ۶. اعتبارسنجی نتایج

N (%)	G (%)	مدول کششی (واقعی) / سختی (واقعی)	پیش‌بینی	|خطا| ٪
۲۰	۱	۲۳۸۰	۲۳۴۴	۱/۵
		۹۳/۴	۹۷/۱	۴/۰
۳۰	۱/۵	۲۳۰۷	۲۲۵۲	۲/۳
		۸۵/۶	۸۹/۵	۴/۵
۴۰	۱	۱۹۷۶	۲۰۴۹	۳/۶
		۶۹/۸	۶۸/۶	۱/۷

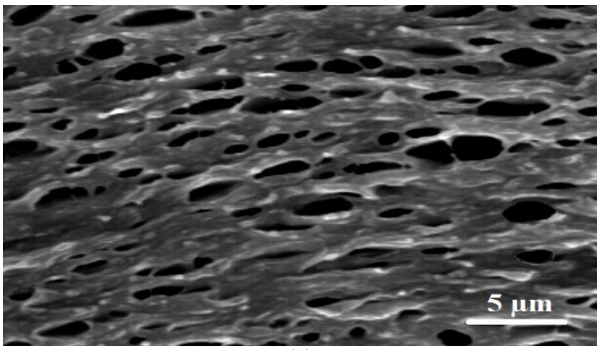
ریزساختار

با توجه به اینکه خواص مکانیکی ترموپلاستیک الاستومر نانوکامپوزیت‌ها وابسته به توزیع، اندازه و شکل هر دو فاز لاستیکی و ترموپلاستیکی است؛ بنابراین در اولین فاز قطر متوسط (D_n) ذرات فاز NBR با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

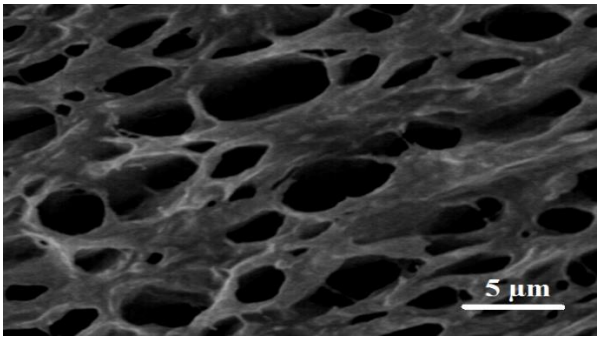
$$D_n = \frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i} \quad (۳)$$

در این روابط N_i تعداد ذرات است که دارای قطر معادل D_i هستند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش فاز لاستیک NBR از ۲۰ تا ۴۰ درصد اندازه فاز لاستیک از ۱/۹۸ به ۴/۳۵ میکرومتر افزایش یافته است و از طرفی با افزایش گرافن از ۰/۵ به ۱/۵ درصد، اندازه فاز لاستیک از ۴/۳۵ به ۲/۹۸ میکرومتر کاهش یافته است. طبق تحقیقات گذشته، افزایش درصد نانوذرات اضافه شده به فاز پایه کامپوزیت برپایه PA۶/NBR ، باعث کوچک‌تر شدن

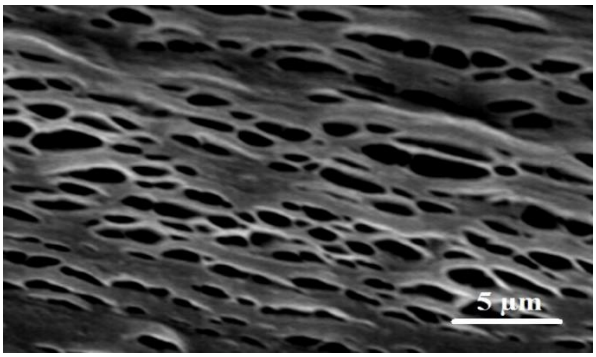
اندازه فاز لاستیک می‌شود. با کوچک‌تر شدن فاز لاستیک سطح تماس و برهم‌کنش ذرات لاستیک با فاز ماتریس PA۶ بیشتر می‌شود که این خود عاملی برای افزایش استحکام و مدول خواهد بود [۲۴].



(a)



(b)



(c)

شکل ۶. تصایر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اندازه ذرات NBR در a) نمونه PN۲۰G۰/۵ b) نمونه PN۴۰G۰/۵ C) نمونه PN۴۰G۱/۵

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ترموپلاستیک الاستومر PA۶/NBR تقویت شده با نانوصفحات گرافن (GNP) تولید شد که تأثیر مقدار گرافن و درصد NBR بر خواص مکانیکی (مدول کششی و سختی) و ریزساختار بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار گرافن مدول کششی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که با افزودن ۲ درصد گرافن به ترموپلاستیک الاستومر PA۶/NBR با ۳۰ درصد لاستیک مدول از ۱۸۱۰MPa به ۲۲۴۰MPa خواهد رسید. همچنین با افزایش مقدار NBR در نانوکامپوزیت، مدول کششی کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که در نانوکامپوزیت PA۶/NBR با ۱ درصد گرافن، با افزایش NBR از ۱۰ تا ۵۰ درصد مقدار مدول کششی ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون سختی نشان داد که با افزودن گرافن تا ۲ درصد به PA۶/NBR با ۳۰ درصد لاستیک، سختی به مقدار ۴۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش مقدار NBR از ۱۰ تا ۵۰ درصد مقدار سختی از ۱۱۸ به shore A ۶۲ می‌رسد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی، در محدوده طراحی آزمایش، بیشترین مدول کششی و سختی در گرافن ۲ درصد و ۲۰ درصد نیتریل به‌ترتیب برابر MPa ۲۳۵۴ و shore A ۱۱۱ است. با افزایش فاز لاستیک از ۲۰ تا ۴۰ درصد، اندازه فاز لاستیک از ۱/۹۸ به ۴/۳۵ میکرومتر، افزایش و از طرفی با افزایش گرافن از ۰/۵ به ۱/۵ درصد، اندازه فاز لاستیک از ۴/۳۵ به ۲/۹۸ میکرومتر کاهش یافته است.

References

[1] Azdast, T., & Hasanzadeh, R. (2018). Tensile and morphological properties of microcellular polymeric nanocomposite foams reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Engineering*, *31*(3), 504-510.

[2] Fakirov, S. (2006). *Handbook of condensation thermoplastic elastomers*. John Wiley & Sons. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/3527606610

[3] Amin, S., & Amin, M. (2011). Thermoplastic elastomeric (TPE) materials and their use in outdoor electrical insulation. *Rev. Adv. Mater. Sci*, *29*(1), 30-115.

[4] Lim, S.-H., Dasari, A., Yu, Z.-Z., Mai, Y.-W., Liu, S., & Yong, M. S. (2007). Fracture toughness of nylon 6/organoclay/elastomer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, *67*(14), 2914-2923. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.007

[5] Yasemian, A. R. (2018). Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles and Evaluation of the Effect of Concentration on Magnetic Hyperthermia. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *15*(44), 127-136.

[6] Asadi Boroojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, *17*(1), 143-155. https://doi.org /10.48301/kssa.2020.112761

[7] Fagundes, E., & Jacobi, M. A. (2012). PA/NBR TPVs: crosslink system and properties. *Polímeros*, *22*(2), 206-212. https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000021

[8]Mahallati, P., Arefazar, A., & Naderi, G. (2010). Thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR. *International Polymer Processing*, *25*(2), 132-138. https://doi.org/10.3139/217.2311

[9] Mehrabzadeh, M., & Delfan, N. (2000). Thermoplastic elastomers of butadiene-acrylonitrile copolymer and polyamide. Vi. Dynamic crosslinking by different systems. *Journal of applied polymer science*, *77*(9), 2057-2066. https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000829)

[10] Taghizadeh, E., Naderi, G., & Razavi-Nouri, M. (2011). Effects of organoclay on the mechanical properties and microstructure of PA6/ECO blend. *Polymer Testing*, *30*(3), 327-334. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.01.007

[11] Ghasemi, F. A., Daneshpayeh, S., Ghasemi, I., & Ayaz, M. (2016). An investigation on the Young's modulus and impact strength of nanocomposites based on polypropylene/linear low-density polyethylene/titan dioxide (PP/LLDPE/TiO 2) using response surface methodology. *Polymer Bulletin*, *73*(6), 1741-1760. https://doi.org/10.1007/s00289-015-1574-2

[12] Moghri, M., Zanjanijam, A. R., Seifi, L., & Ramezani, M. (2017). An investigation on rheological behavior of the PVC/NBR/Nanoclay nanocomposites by torque rheometry: the effects of formulation variables using response surface approach. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *27*(1), 264-273. https://doi.org/10.1007/s10904-017-0682-x

[13] Nakhaei, M. R., Naderi, G., & Ebrahimpour, A. (2020). Mathematical modeling of mechanical properties of PA6/NBR/Clay Nanocomposites Fabrication using the Thermal Friction Stirs Processing. *Journal of Science and Technology of Composites*, *7*(2), 833-842. https://doi.org/10.22068/jstc.2020.112864.1582

[14] Mostafapour, A., Akbari, A., & Nakhaei, M. (2017). Application of response surface methodology for optimization of pulsating blank holder parameters in deep drawing process of Al 1050 rectangular parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *91*(1-4), 731-737. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9781-z

[15] Mostafapour, A., Naderi, G., & Nakhaei, M. R. (2018). Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted friction stir processing. *Polymer Composites*, *39*(7), 2336-2346. https://doi.org/10.1002/pc.24214

[16] Zhang, Y., Zhang, X., Yang, L., & Yu, X. (2019). Optimization design for downhole dynamic seal based on response surface method. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(2), 1687814019828441. https://doi.org/10.1177/1687814019828441

[17] Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2017). Simulation of the Effects of Input Parameters on Weld Quality in Laser Transmission Welding (LTW) Using a Combined Response Surface Methodology (RSM)-Finite Element Method (FEM) Approach. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, *36*(4), 225-243.

[18] Mamaghani Shishavan, S., Azdast, T., Mohammadi Aghdam, K., Hasanzadeh, R., Moradian, M., & Daryadel, M. (2018). Effect of different nanoparticles and friction stir process parameters on surface hardness and morphology of acrylonitrile butadiene styrene. *International Journal of Engineering*, *31*(7), 1117-1122. https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.07a.16

[19] Paran, S. M. R., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., & Dubois, C. (2018). Essential work of fracture and failure mechanisms in dynamically vulcanized thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR/XNBR-grafted HNTs. *Engineering Fracture Mechanics*, *200*, 251-262. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.07.018

[20] Taghizadeh, E., Naderi, G., & Dubois, C. (2010). Rheological and morphological properties of PA6/ECO nanocomposites. *Rheologica acta*, *49*(10), 1015-1027. https://doi.org/10.1007/s00397-010-0476-3

[21] Paran, S. M. R., Naderi, G., & Ghoreishy, M. H. R. (2016). Effect of halloysite nanotube on microstructure, rheological and mechanical properties of dynamically

vulcanized PA6/NBR thermoplastic vulcanizates. *Soft Materials*, *14*(3), 127-139. https://doi.org/10.1080/1539445X.2016.1157694

[22] Nakhaei, M. R., & Naderi, G. (2020). Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR/Graphene Nanocomposite Using Central Composite Design. *International Journal of Engineering*, *33*(9), 1803-1810. https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.09c.15

[23] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2009). Some Studies in Metal Matrix Composites Machining using Response Surface Methodology. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *28*(20), 2445-2457. https://doi.org/10.1177/0731684408092375

[24] Esmizadeh, E., Irani, A., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., & Dobious, C. (2018). Effect of carbon nanotube on PA6/ECO composites: Morphology development, rheological, and thermal properties. *Journal of applied polymer science*, *135*(12), 459-477. https://doi.org/10.1002/app.45977

Karafan
Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University
Autumn 2021, Vol. 18, No. 3, p. 343-367
Journal homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en
TVU
doi:10.48301/KSSA.2021.130311
:20.1001.1.23829796.1400.18.3.18.1

Original Research

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

Experimental Study of the Gaseous Coolants Influence in the Milling of Polytetrafluoroethylene on the Surface Characteristics

Ayub Karimzad Ghavidel[1], Gholamreza Kiani[2]*

[1]Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
[2]Associate Professor, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.31.2021
Revised: 04.26.2021
Accepted: 05.09.2021

Keyword:
PTFE machining
Gaseous coolant
Surface roughness
Morphology
Decreasing of elastoplastic effect

***Corresponding Author:**
Gholamreza Kiani
Email: *g.kiani@tabrizu.ac.ir*

ABSTRACT

The achievement of a desirable surface roughness with an efficient structure is a major challenge in machining of Polytetrafluoroethylene (PTFE) owing to its viscoelastic behavior. The aim of this research is to investigate the effect of gaseous coolants utilization on the roughness and structure of surfaces. For this purpose, the effect of Argon noble and CO_2 effective gases on the machining of PTFE were evaluated, taking into consideration the cutting and feed velocities as input factors. The surface roughness was measured by Ra criterion. The microscopic structure of surfaces was investigated using optical and scanning electron microscopes. To measure the machining temperature, the operation was recorded by high accurate thermal camera. The results show that the utilization of CO_2 due to decreasing local machining temperature to below -40°C can change the cutting behavior of material from viscoelastic to elastoplastic, and reduces the surface roughness up to Ra=0.2 µm. Microscopic studies indicate that the using of CO_2 can govern the viscous behavior during cutting which causes the viscous-flowing of material and prevents the generation of surface cracks. CO_2 also protects the surface from chemical interactions and creation of functional groups during the machining. Microscopic examination revealed that the use of carbon dioxide gas prevents separated chips from re-adhering to the surface.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۶۷-۳۴۳
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/
doi:10.48301/KSSA.2021.130311
20.1001.1.23829796.1400.18.3.18.1
شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

مطالعه تجربی تأثیر خنک‌کننده گازی در فرزکاری پلی‌تترافلئورواتیلن بر خصوصیات سطح

ایوب کریم‌زاد قویدل[۱]، غلامرضا کیانی[۲*]

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلید واژگان:
ماشین‌کاری پلی‌تترافلئورواتیلن
خنک‌کننده گازی
صافی سطح
مورفولوژی
کاهش اثر الاستوپلاستیک

***نویسنده مسئول:** غلامرضا کیانی
پست الکترونیکی:
g.kiani@tabrizu.ac.ir

چکیده

دستیابی به صافی سطح مطلوب با ساختاری کارا در ماشین‌کاری پلی‌تترافلوئوراتیلن (PTFE) به دلیل رفتار ویسکوالاستیک آن، معضلی اساسی است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر به‌کارگیری خنک‌کننده‌های گازی و فاکتورهای ماشین‌کاری بر صافی و ساختار سطوح قطعات از این جنس است. برای این منظور اثر دمش گاز نجیب آرگون و گاز فعال دی‌اکسیدکربن با طرح سرعت برشی و پیشروی به‌عنوان متغیرهای مستقل در ماشین‌کاری PTFE ارزیابی گردید. صافی سطوح توسط معیار Ra اندازه‌گیری شد. ساختار میکروسکوپی سطوح نیز توسط میکروسکوپ‌های نوری و روبشی الکترونی بررسی گردید. برای اندازه‌گیری دمای ماشین‌کاری، عملیات توسط دوربین حرارتی با دقت بالا فیلم‌برداری گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند با کاهش دمای موضع ماشین‌کاری تا ۴۰°C-، رفتار برشی ماده را از ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک تغییر دهد و زبری سطح را تا Ra=0.2 µm پایین آورد. مطالعات میکروسکوپی نشان داد گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند رفتار ویسکوز در حین برش را که موجب سیلان ماده می‌شود، کنترل و از پیدایش ترک‌های سطحی جلوگیری کند و همچنین سطح را از تشکیل گروه‌های عاملی و تغییرات شیمیایی حین ماشین‌کاری محافظت کند. در بررسی‌های میکروسکوپی معلوم شد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن از چسبیدن مجدد براده‌های جدا شده به سطح جلوگیری می‌کند.

مقدمه

پلی‌تترافلوئوراتیلن[1] (PTFE) از جمله پلیمرهای مهندسی است که در رده ترموپلاست‌ها طبقه‌بندی می‌شود. این پلیمر کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پتروشیمی، الکتریک و پزشکی دارد که دلیل آن را می‌توان در ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن دانست [۱; ۲]. از جمله این ویژگی‌ها داشتن مقاومت دمایی بالا، اصطکاک سطحی بسیار پایین، نداشتن واکنش‌پذیری با سایر مواد، مقاومت عالی در برابر اسیدها و بازهای قوی و خصوصیات دی‌الکتریک مثال‌زدنی این پلیمر است [۱; ۳-۶]. این خصوصیات برجسته سبب شده است تا در سالیان اخیر کامپوزیت‌سازی آن با میکرو و نانوذرات به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و گسترش کاربردهای آن، موردتوجه بسیاری از پژوهشگران قرار گیرد [۷-۹].

یکی از کاربردهای گسترده PTFE و کامپوزیت‌های آن، در زمینه آب‌بندی انواع سیال‌ها، اسیدها و بازهای قوی است. اجزایی مانند پکینگ توسط فرایند ماشین‌کاری از این نوع پلیمر تولید می‌شوند که در این اجزا کیفیت سطح موجب آب‌بندی بهتر و نیز کاهش اصطکاک در محورهای گردنده و در نهایت افزایش عمر و کیفیت قطعه می‌شود [۱; ۱۰]. با توجه به ماهیت ذاتی این پلیمر در اصطکاک سطحی پایین، مهندسان و طراحان انتظار دارند تا در سطوح تماس با قطعاتی از جنس PTFE، حداقل اصطکاک ممکن ایجاد شود. زبری سطح یک ویژگی مهم است که در بیشتر مواقع کیفیت ماشین‌کاری را توصیف می‌کند. علاوه بر این زبری سطح چندین ویژگی از قطعات ماشین‌کاری مانند سایش، انتقال گرما و خصوصیات موئینگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۱-۱۳].

از سوی دیگر رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها، ماشین‌کاری آن‌ها را به معضلی برای محققان تبدیل کرده است [۱۴-۱۶]. این خصوصیت حتی در مورد اپوکسی‌رزین‌ها نیز وجود دارد و ماشین‌کاری آن‌ها را نیز تحت شعاع قرار می‌دهد [۱۷; ۱۸]. در این راستا، در پلیمرهایی که ساختار شبه‌کریستالی دارند ماشین‌کاری در دمایی پایین‌تر از دمای شیشه‌ای شدن (T_g)، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در این دماها با انتقال رفتار پلیمر از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک و جلوگیری از خمیری شدن براده‌ها، احتمال تشکیل لایه مرزی مجددا منجمد شده، کاهش می‌یابد [۱۶]. به‌عنوان یک نتیجه کلی رفتار ویسکوالاستیک و دمای شیشه‌ای شدن دو فاکتور اصلی در به چالش کشیدن ماشین‌کاری پلیمرهاست. محققانی در این راستا کوشیده‌اند تا با تحت کنترل درآوردن این رفتارها، معضلات ماشین‌کاری پلیمرها را رفع کنند [۱۴-۱۹]. از جمله تکنیک‌هایی که در این زمینه توانسته است مؤثر واقع گردد، خنک‌کاری شدید پلیمر حین براده‌برداری توسط نیتروژن مایع است که به ماشین‌کاری کرایوژنیک[2] شهرت یافته است [۱۴; ۱۹]. این روش کمک می‌کند تا پدیده انتقال به حالت الاستوپلاستیک روی دهد و دمای ماشین‌کاری، در مقادیری پایین‌تر از T_g تثبیت گردد. پژوهش‌های مختلفی، تأثیرات مثبت این روش در کاهش زبری سطح حاصل از ماشین‌کاری را به اثبات رسانده‌اند [۱۴; ۱۹; ۲۰].

در سوی مقابل، علاوه بر روش‌های خنک‌کاری، فاکتورهای ماشین‌کاری از عوامل دخیل در شکل‌گیری مورفولوژی سطوح است. در این راستا نیز محققانی تلاش کرده‌اند تا زبری سطح حاصل از فرایند ماشین‌کاری را بر جنس‌های مختلف پلیمری تحت کنترل درآورند [۲۱-۲۳]. در پژوهش ژیاو[3] و همکارانش عوامل تأثیرگذار بر کیفیت سطح ماشین‌کاری پلی‌اتیلن با چگالی‌های بالا و پایین ارزیابی شده است. آن‌ها با ثابت نگه‌داشتن عمق برش و تغییر در متغیرهای ماشین‌کاری از جمله عده دوران و نیز میزان پیشروی پی‌بردند که خاصیت ویسکوالاستیک بر کیفیت سطح ماشینکاری نقشی مهم و تأثیرگذار دارد. ارتباط مستقیم تغییر شکل ویسکوالاستیک با میزان سرعت و دمای

[1] Polytetrafluoroethylene
[2] Cryogenic
[3] Xiao

ماشین‌کاری از جمله نتایج مهم این پژوهش است که انتخاب پارامترهای مناسب و استفاده از خنک‌کننده‌های مخصوص را ضروری می‌سازد [۲۳].

در پژوهش پتروپلوس[1] و همکارانش که در رابطه با تأثیر انواع الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها بر کیفیت سطح آنها می‌باشد، از روش تحلیل آماری رگرسیون و تجزیه‌وتحلیل واریانس به‌منظور بررسی شرایط برش و جنس ابزار استفاده شده است. نتایج کار آن‌ها نشان داد که میزان پیشروی، بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد، در حالی‌که سرعت برشی در جایگاه دوم قرار داشت. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که حضور الیاف شیشه‌ای موجب افزایش زبری سطح نسبت به الیاف کربنی می‌شود. ضریب انتقال حرارتی متفاوت این دو کامپوزیت را می‌توان عامل اصلی تفاوت زبری سطح در آن‌ها دانست [۲۲]. در بررسی تجربی مشابه دیگری که پالانیکومار[2] انجام داده است، تأثیر پارامترهای برش در فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه[3] بررسی شده است ولی هرکدام از دو تحقیق فوق، بر استفاده از روش‌های تحلیلی متفاوتی تمرکز داشتند. نکته قابل‌توجه، دستیابی به نتایج مشابه توسط هر دو مقاله است؛ به‌نحوی که افزایش سرعت برش و پیشروی باعث افزایش ساییدگی ابزار می‌شود [۲۱].

تغییر ترکیبات PTFE با استفاده از ابزار برشی پلی‌کریستال تحقیقی بود که کاتالین[4] و همکارانش انجام دادند که در آن تأثیر پارامترهای برشی و شعاع نوک ابزار بر نیروی برشی و زبری سطح بررسی شده است. از نتایج مهم این پژوهش می‌توان به اثرگذاری بیشتر عمق برش و مقدار پیشروی بر نیروی برش، همچنین زبرتر شدن سطح با افزایش میزان پیشروی اشاره کرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که زبری سطح به‌ترتیب با افزایش عمق برش و سرعت برش کاهش می‌یابد [۱۱].

تورنر[5] و همکارانش پژوهشی در زمینه بررسی تأثیرات خنک‌کننده‌های ماشین‌کاری بر کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن[6] صورت داده‌اند. هدف اصلی این تحقیق، تعیین درصد جذب خنک‌کننده‌ها توسط ماده تحت ماشین‌کاری بود. شش نمونه از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در شش محیط خنک‌کاری از جمله هوا، آب و چهار نوع خنک‌کننده دیگر در دمای ۶۰°C ، به مدت هفت روز قرار گرفتند. در نهایت از میان خنک‌کننده‌ها تنها یک ماده با نام Cindolube V30ML کمترین میزان جذب توسط کامپوزیت‌ها را داشت. همچنین این سیال، کمترین اثر مضر را نیز بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها ایجاد کرد. در این بین آب نیز به دلایل تخریب مکانیکی و نیز میزان نفوذ بیشتر، به‌عنوان بدترین نوع خنک‌کننده شناخته شد [۲۴].

براساس مطالعات صورت گرفته استفاده از خنک‌کننده‌های رایج برای ماشین‌کاری PTFE اثر نامطلوبی بر خواص قطعات تولیدی دارد. از سوی دیگر با توجه به رفتار الاستوپلاستیک PTFE در ماشین‌کاری، دستیابی به کیفیت سطح مطلوب، تنها با به‌کارگیری ماده خنک‌کاری امکان‌پذیر است. این پژوهش در تلاش است تا به‌جای استفاده از مایعات خنک‌کاری مرسوم، از سیال‌های گازی برای خنک‌کاری موضع ماشین‌کاری بهره برده و به بررسی تأثیر آن بر صافی سطح، ساختار میکروسکوپی و مورفولوژیکی و همچنین بر ترکیب شیمیایی سطح بپردازد. در این راستا، تأثیر دو نوع گاز آرگون (Ar) و دی‌اکسیدکربن (CO_2) با در نظر گرفتن متغیرهای ماشین‌کاری نظیر سرعت برشی و پیشروی بررسی خواهد شد.

---

[1] Petropoulos
[2] Palanikumar
[3] Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)
[4] Catalin
[5] Turner
[6] Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ورق PTFE تولیدی شرکت پارس پلیمر ایران در ابعاد ۵×۱۷۰×۱۷۰میلی‌متر که به روش اکستروژن تهیه شده بود، استفاده گردید. عملیات فرزکاری توسط دستگاه FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز انجام شد. برای حصول اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و کالیبره بودن آن، ارزیابی توسط ابزارهای استاندارد دورسنج و ساعت اندازه‌گیری انجام شد. نتایج این ارزیابی نشان داد خطای پیشروی دستگاه کمتر از۳+٪ و خطا در تعداد دوران کمتر از ۵+٪ مقادیر اسمی است. از ابزار انگشتی به قطر۴ میلیمتر از جنس فولاد تندبر[1] با روکش تیتانیم نیتراید به‌عنوان ابزار برشی استفاده شد. برای انجام مراحل مختلف آزمایش‌ها، ورق PTFE مطابق با شکل ۱، بر فیکسچر مخصوصی که قبلاً طراحی و ساخته شده بود، توسط پیچ‌ها بسته شد. فاصله نزدیک این پیچ‌ها به یکدیگر کمک می‌کند تا در حین انجام عملیات از ارتعاش و خم شدن نمونه جلوگیری به‌عمل آید.

شکل ۱. قطعه آماده‌شده برای ماشین‌کاری

از دو کپسول حاوی گاز دی‌اکسیدکربن و آرگون برای تأمین گاز برای خنک‌کاری استفاده شد. به منظور تنظیم فشار خروجی گازهای خنک‌کاری، روی هر دو کپسول مانومتر مربوطه نصب گردید و فشار خروجی روی ۳ بار تنظیم گردید. انتقال گازهای خنک‌کاری از خروجی کپسول به محل برش، توسط شیلنگ پنوماتیکی به قطر ۶ میلی‌متر انجام شد. برای اندازه‌گیری دمای حین ماشین‌کاری از روش تصویربرداری حرارتی[2]، توسط دوربین حرارتی CAT S60-FLIR با گستره دمایی۵۰- تا ۱۵۰°C با ریزنمایی ۰/۱ °C استفاده شد. ساختار میکروسکوپی سطوح پس از ماشین‌کاری با استفاده از میکروسکوپ نوری[3]رادیکال[4] مجهز به دوربین تصویربرداری در بزرگنمایی‌های ۱۰۰X و X ۲۰۰ بررسی شد. صافی سطوح ماشین‌کاری شده با استفاده از صافی‌سنج Ttr200 ساخت کشور تایوان با در نظر گرفتن Lt =2.4 mm و Lc =0.8 mm مطابق استاندارد ISO 25178 با معیار Ra اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مورفولوژی سطوح ماشین‌کاری شده با بزرگن‌مایی بیشتر، تصاویر از سطوح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-TESCAN-MIRA3) گرفته شد. این بررسی روی نمونه‌ها با حداقل و حداکثر زبری ایجاد شده با به‌کارگیری گاز آرگون و دی‌اکسیدکربن صورت پذیرفت. ترکیب شیمیایی این سطوح نیز با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی انرژی پراش اشعه ایکس (EDX) آنالیز شد. شایان ذکر است آماده‌سازی نمونه‌های مطالعه شده در SEM، پیرامون شیار ایجاد شده در ماشین‌کاری توسط دستگاه برش لیزری سهند به قطرmm ۸ با توان W ۸۰ و با سرعت برشی mm/s ۱۰ برش داده شد، چون در صورت استفاده از روش‌های برش مکانیکی برای آماده‌سازی نمونه-

[1] High-speed steel (HSS)
[2] Thermal imaging camera
[3] Optical microscope
[4] Radical

های SEM در این مرحله احتمال تغییر ساختار مورفولوژیکی سطوح وجود داشت. سطح نمونه‌ها قبل از تصویربرداری توسط این میکروسکوپ، به روش کند و پاش در ضخامت تقریبی ۲۰ انگسترم با طلا پوشش داده شد. شکل ۲ تصویری از نمونه‌ها پس از برش توسط لیزر و پوشش با لایه طلا را نشان می‌دهد.

شکل ۲. تصویر نمونه‌های آماده شده پس از برش لیزری و پوشش‌دهی با طلا برای تصویربرداری و آنالیز توسط SEM

طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل، با در نظر گرفتن سرعت برشی در سه سطح m/min ۱۵/۷، ۲۰/۱ و ۲۵/۲ ، سرعت پیشروی در سطوح mm/min ۴۰، ۱۰۰ و۱۶۰ و دو نوع گاز خنک‌کاری آرگون و دی‌اکسیدکربن به‌عنوان متغیرهای مستقل انجام شد. عمق برش به میزان ۰/۳ میلی‌متر در تمام مراحل ثابت در نظر گرفته شد. هر مرحله از آزمایش، با سه بار تکرار انجام شد و میانگین صافی سطوح اندازه‌گیری‌شده به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. مراحل مختلف آزمایش‌ها و پارامترهای تنظیمی هر مرحله در جدول ۱ داده شده است.

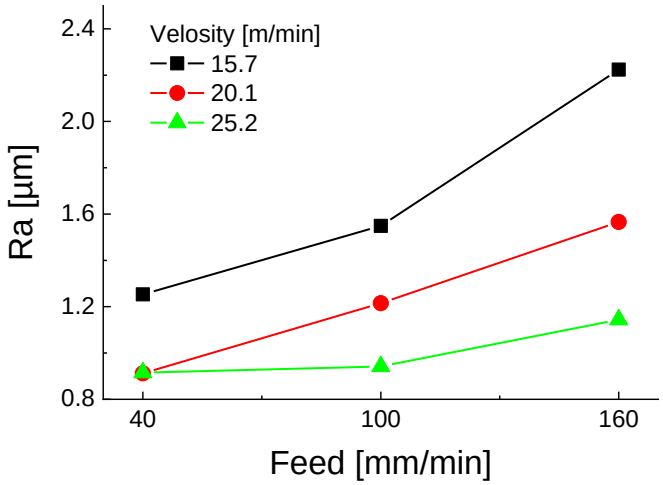
جدول ۱. مراحل انجام آزمایش‌ها

مرحله	نوع گاز خنک‌کننده	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت برشی (m/min)
۱	CO_2	۴۰	۱۵/۷
۲	Ar	۴۰	۱۵/۷
۳	CO_2	۱۰۰	۱۵/۷
۴	Ar	۱۰۰	۱۵/۷
۵	CO_2	۱۶۰	۱۵/۷
۶	Ar	۱۶۰	۱۵/۷
۷	CO_2	۴۰	۲۰/۱
۸	Ar	۴۰	۲۰/۱
۹	CO_2	۱۰۰	۲۰/۱
۱۰	Ar	۱۰۰	۲۰/۱
۱۱	CO_2	۱۶۰	۲۰/۱
۱۲	Ar	۱۶۰	۲۰/۱
۱۳	CO_2	۴۰	۲۵/۲
۱۴	Ar	۴۰	۲۵/۲
۱۵	CO_2	۱۰۰	۲۵/۲
۱۶	Ar	۱۰۰	۲۵/۲
۱۷	CO_2	۱۶۰	۲۵/۲
۱۸	Ar	۱۶۰	۲۵/۲

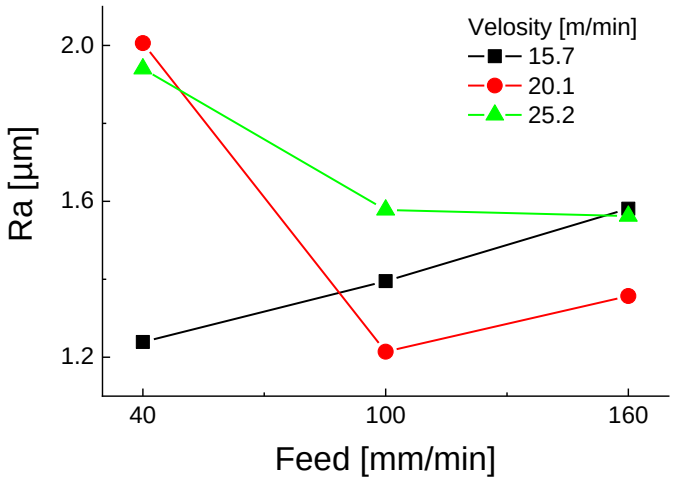
بحث و نتایج

صافی سطوح

تأثیر فاکتورهای سرعت برشی و پیشروی، همچنین نوع گاز خنک‌کاری بر صافی سطح در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ (الف) و (ب) به‌ترتیب نتایج مربوط به اندازه‌گیری صافی سطوح تحت خنک‌کاری گاز دی‌اکسیدکربن و آرگون را نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل مشخص می‌گردد که به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان عامل خنک‌کاری، روند تغییرات صافی سطح را قابل‌پیش‌بینی می‌کند در حالی که این امکان برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده تحت گاز آرگون مقدور نیست. مواد پلیمری از نظر مکانیکی، رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند [۲۵]. در مورد PTFE نیز این رفتار صادق است و زمانی که دما بالا می‌رود این رفتار کاملاً متمایل به ویسکوز می‌شود [۲۶]. در فرایند ماشین‌کاری پلیمرها به دلیل اصطکاک بالای بین ابزار و قطعه‌کار، دما بسیار بالا می‌رود و سبب می‌گردد تا در لایه مزری بین ابزار و قطعه، رفتار برشی ویسکوالاستیک اتفاق افتد [۲۰; ۲۷]. بدیهی است در چنین شرایطی، عمل برش برمبنای تئوری‌های موجود قابل‌پیش‌بینی نخواهد بود؛ زیرا بخشی از براده‌های جدا شده می‌توانند به سطح ابزار بچسبند و با تشکیل لبه انباشته، شرایط ماشین‌کاری را تحت تأثیر قرار دهند [۲۶]. همچنین در حالت برش ویسکوالاستیک احتمال چسبیدن بخشی از براده‌های جدا شده به سطح ماشین‌کاری‌شده وجود دارد که منجر به تغییرات تصادفی در مقادیر صافی سطح می‌گردد [۲۸]. در صورتی که عملیات خنک‌کاری بتواند رفتار برشی ویسکوالاستیک را در لایه مرزی بین ابزار و قطعه‌کار به رفتار الاستوپلاستیک تبدیل کند؛ تغییرات صافی سطح قابل‌پیش‌بینی خواهد بود. برای انجام این تغییر در رفتار برشی ماده، لازم است که دمای ماده در لایه مرزی تا زیر دمای T_g پلیمر به‌شدت کاهش یابد تا براده‌برداری از ماده از حالت ویسکوز به الاستیک یا حتی پلاستیک (ترد) تبدیل گردد [۱۴; ۲۰]. برای اثبات این فرضیه، دمای ماشین‌کاری تحت خنک‌کاری دو گاز آرگون و دی‌اکسیدکربن با دوربین حرارتی فیلم‌برداری شد. شکل ۴ دو تصویر حرارتی از فرایند را برای دو گاز خنک‌کاری استفاده‌شده نشان می‌دهد. در شکل ۴ (الف) خنک‌کاری با گاز دی‌اکسیدکربن و در شکل ۴ (ب) توسط گاز آرگون صورت پذیرفته است. در این تصاویر به‌وضوح مشاهده می‌گردد که گاز CO_2 توانسته است دمای کانون ماشین‌کاری را تا حدود ۴۰- °C تقلیل دهد. این در حالی است که بهره‌گیری از گاز آرگون تنها توانسته است دما را در موقعیت درگیری ابزار با قطعه، تا حدود ۲۰°C تقلیل دهد. در مورد PTFE دمای شیشه‌ای شدن معمولاً بالاتر از ۱۱۰°C گزارش شده است [۲۹] ولی در حوالی ۲۷°C تغییرات قابل‌توجهی در رفتار ویسکوزی ماده روی می‌دهد [۳۰]. بنابراین کاهش دما به مقادیر بسیار منفی می‌تواند کمک چشمگیری در انتقال رفتار برشی PTFE ایفا کند. گزارش‌های برخی منابع نشان می‌دهد در دماهای کم‌تر از ۰°C ضریب اصطکاک بین فولاد و PTFE به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که خود می‌تواند در کاهش اصطکاک در ماشینکاری و نهایتاً کنترل صافی سطح نقش به‌سزایی داشته باشد [۲۹]. بنابراین استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان عامل خنک‌کاری قادر است با ایجاد دمای منفی قابل‌توجه و کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه، رفتار برشی PTFE را از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک سوق دهد و در نتیجه روند تغییرات صافی سطح با تغییر پارامترهای ماشین‌کاری قابل‌پیش‌بینی باشد.

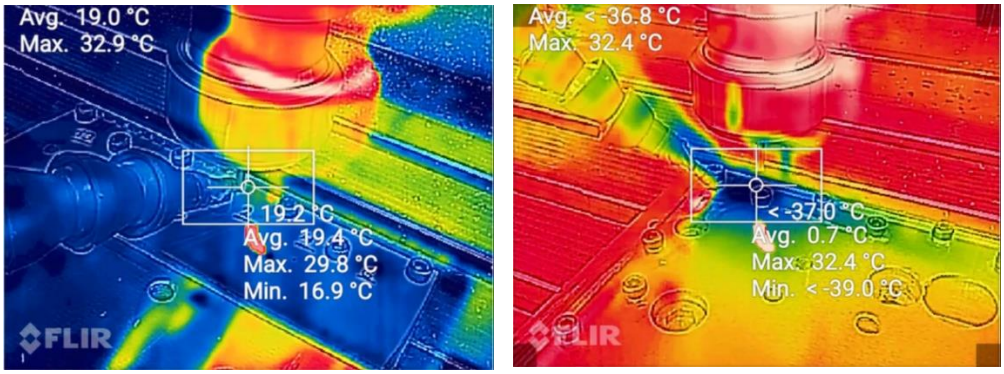


(الف)



(ب)

شکل ۳. تأثیر فاکتورهای فرایند بر صافی سطح حاصل از فرزکاری با ابزار انگشتی روی جنس PTFE با خنک‌کاری توسط گازهای: (الف) CO2 (ب) Ar

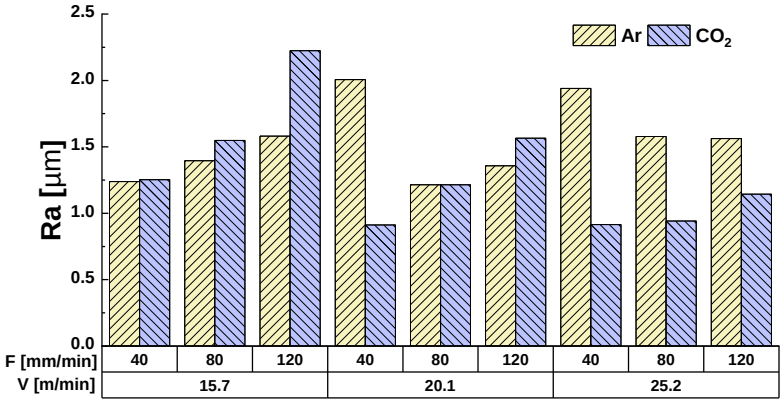


(ب) (الف)

شکل ۴. تصویر حرارتی فرایند ماشین‌کاری برای خنک‌کاری با گاز: (الف) CO_2 (ب) Ar

در شکل ۳ (الف) مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی برای تمامی سرعت‌های برشی مطالعه‌شده مشاهده می‌گردد که در توافق با تئوری‌های گذشته تأثیر پیشروی بر صافی سطح است [۱۶]؛ به‌نحوی که در فرایند فرزکاری با تعداد دوران ثابت ابزار، با افزایش سرعت پیشروی، گام‌های طی‌شده به‌ازای هر دور ابزار روی قطعه افزایش می‌یابد و سبب می‌گردد تا صافی سطح ایجاد شده تقلیل پیدا کند [۳۱]. بهبود صافی سطح با افزایش سرعت برشی، نکته قابل‌توجه دیگر در این شکل است که در فرزکاری مواد الاستوپلاستیک این اثر مشاهده می‌گردد؛ زیرا با افزایش سرعت برشی لبه انباشته کاهش می‌یابد و صافی سطح بهبود پیدا می‌کند. این یافته به همراه نتایج اندازه‌گیری دمای ماشینکاری مؤید انتقال رفتار برشی از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک تحت تأثیر دمای شدید منفی ایجاد شده با گاز دی‌اکسیدکربن است [۳۰].

شکل ۳ (ب) نیز مقادیر صافی سطوح را برای حالت استفاده از گاز آرگون نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در مورد استفاده از گاز آرگون شرایط متفاوت‌تر از حالت بهره‌گیری از گاز دی‌اکسیدکربن بوده و رفتار نسبت به سرعت برشی، روند تغییرات منظمی ندارد. به‌نظر می‌رسد در سرعت برشی ۱۵/۷ m/min به دلیل پایین بودن دمای ماشین‌کاری و نیروی اصطکاکی کم‌تر، رفتار برشی از مدل الاستوپلاستیک تبعیت می‌کند ولی با افزایش سرعت برشی به ۲۰/۱ و سپس ۲۵/۲ m/min، به دلیل افزایش دمای در محل تماس ابزار با ماده، برش تحت تأثیر تئوری برش ویسکوز صورت می‌پذیرد. بدیهی است در این شرایط، به دلیل کاهش شدید ویسکوزیته پلیمر به‌صورت لحظه‌ای در لایه مرزی بین ابزار و قطعه‌کار [۳۲]، بخشی از آن به ابزار و سطح ماشین‌کاری‌شده می‌چسبد و روند تغییرات در مقدار صافی سطح را به حالت تصادفی متمایل می‌سازد. برای مقایسه بهتر، اثر نوع گاز خنک کننده نتایج در نمودار شکل ۵ نیز نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که در سرعت برشی ۱۵/۷ m/min استفاده از گاز آرگون عملکرد بهتری را در ایجاد صافی سطح دارد ولی با افزایش سرعت برشی به‌تدریج عملکرد گاز دی‌اکسیدکربن مطلوب‌تر است. به‌عنوان یک نتیجه کلی و مقدماتی، به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن برای افزایش سرعت برشی در فرایند و ایجاد زبری سطح کم‌تر، توصیه می‌گردد.



شکل ۵. تأثیر استفاده از خنک کننده‌های گازی و فاکتورهای ماشینکاری بر صافی سطح فرزکاری PTFE

جدول ۲ آنالیز واریانس داده‌ها و تحلیل رگرسیون خطی نتایج برای حالت استفاده از گاز CO_2 را نشان می‌دهد. براساس رابطه ارائه شده در این جدول می‌توان صافی سطوح را با توجه به فاکتورهای ورودی سرعت برشی، سرعت پیشروی در بازه‌های مطالعه شده تخمین زد.

جدول ۲. آنالیز واریانس و رگرسیون خطی نتایج مربوط به حالت استفاده از گاز CO2

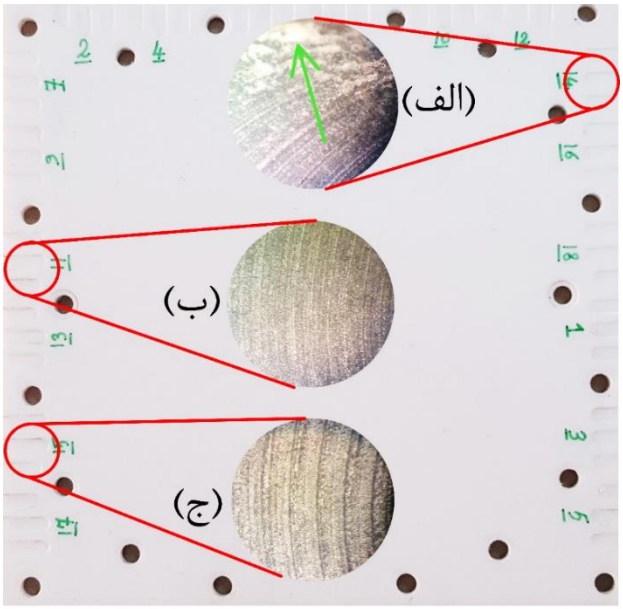
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P-value
رگرسیون	۲	۱/۲۴۴۵	۰/۶۲۲۶	۱۸/۴۲	۰/۰۰۳
سرعت برشی	۱	۰/۵۷۲۹	۰/۵۷۲۹۸	۱۶/۹۶	۰/۰۰۶
پیشروی	۱	۰/۶۷۱۶	۰/۶۷۱۶۴	۱۹/۸۸	۰/۰۰۴
خطا	۶	۰/۰۳۳۷۸		----	
مجموع	۸	۱/۲۴۴۷	S = ۰/۱۸۳۷۸۹	Rsq = ۸۶٪	Rsq(adj) = ۸۱.۳۳٪
زبری سطح=۲/۲۱۸ + ۰/۰۰۵۱۵ × پیشروی − ۰/۰۷۰۴ × سرعت برشی					

ساختار میکروسکوپی سطوح

ساختار سطوح در بزرگنمایی‌های کوچک توسط میکروسکوپ نوری مطالعه گردید. شکل ۵ نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده برخی از سطوح پس از ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. مطالعات میکروسکوپی انجام شده نشان داد در سطوح ماشین‌کاری شده‌ای که توسط گاز آرگون خنک‌کاری گردیدند، تکه‌های کوچکی از پلیمر ویسکوز شده در لایه مرزی بین ابزار و سطح گذرا در بسیاری از نقاط به سطح چسبیده‌اند که سبب می‌گردند تا زبری سطح افزایش یابد. نمونه‌ای از این پدیده در شکل ۶ (الف) با فلش سبز رنگ نشان داده شده است. تعداد این نقاط درمورد سرعت‌های برشی ۲۰/۱ و ۲۵/۲ m/min با کاهش سرعت‌های پیشروی به‌شدت افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد به دلیل اصطکاک بالای موجود بین ابزار و سطح در حال ماشین‌کاری تحت این شرایط، پروسه بیشتر متمایل به حالت رفتاری ویسکوالاستیک می‌باشد و موجب ازدیاد این نقاط شده است [۳۳]. با افزایش مقدار پیشروی در سرعت برشی ۲۰/۱ m/min، تعداد این نقاط کم‌تر مشاهده گردید که نشان می‌دهد علاوه بر خنک‌کاری، کاهش اصطکاک توسط تنظیم فاکتورهایی نظیر افزایش پیشروی، نقش مؤثری در هدایت پروسه ماشینکاری پلیمرها به سمت حالت الاستوپلاستیک دارد. شایان ذکر

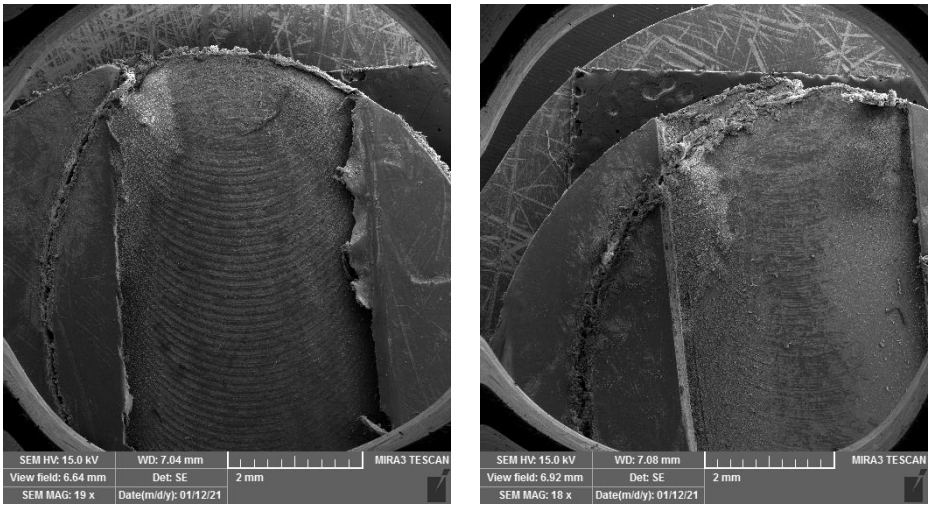
است که افزایش زبری سطح در سرعت برشی ۲۰/۱ m/min با افزایش پیشروی از ۱۰۰ به ۱۶۰ mm/min (مطابق با شکل ۲ (ب)) به دلیل تعمیق اثر خواب ابزار و بزرگ‌تر شدن گام این اثر است که در تصویر میکروسکوپی شکل ۵ (ج) به‌وضوح مشاهده می‌گردد. مقایسه اثر سرعت برشی بر سطوح نشان داد که با افزایش سرعت برشی از ۲۰/۱ به ۲۵/۲ متر بر دقیقه تعداد نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز شدیداً بالا می‌رود و به این دلیل زبری سطح با ازدیاد سرعت برشی به بیشینه مقدار خود برخلاف تصور رایج، موجب بدتر شدن کیفیت سطح می‌گردد. در سرعت برشی m/min ۱۵/۷رفتار کاملاً متفاوتی مشاهده شد. در این سطح از سرعت برشی چون اصطکاک حین ماشین‌کاری کم‌تر است، نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز مشاهده نشد. در این مقدار از سرعت برشی، افزایش زبری سطح با فزونی یافتن پیشروی نیز می‌تواند به اثر خواب ابزار نسبت داده شود؛ زیرا در بررسی‌های میکروسکوپی صورت گرفته، گام‌های اثر خواب ابزار بزرگ‌تر و برجسته‌تر مشاهد گردید.

در سطوح ماشین‌کاری‌شده تحت اثر گاز دی‌اکسیدکربن هیچ علایمی به نفع وجود نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز مشاهده نشد. این یافته به‌وضوح بیان می‌کند که به‌کارگیری این سیال گازی برای خنک‌کاری می‌تواند در پدیده انتقال رفتار ماشین‌کاری از حالت ویسکوالاستیک به حالت الاستوپلاستیک و همچنین کاهش ضریب اصطکاک حین ماشین‌کاری موفق عمل کند و سبب گردد تا زبری سطح براساس شناخت‌های رایج از اثر فاکتورهای ماشین‌کاری قابل پیش‌بینی باشد [۳۱]. نکته قابل ذکر در مورد سطوح خنک شده با این گاز اثر معمول افزایش پیشروی در عمق بخشیدن به خطوط و اثرات خواب ابزار است که همان‌گونه که در شکل ۶ (ب) و (ج) نشان داده شده است در حین مطالعات میکروسکوپی مشاهده گردید و اثبات می‌کند که رفتار ماده تحت برش بیشتر متمایل به الاستوپلاستیک است [۳۴].

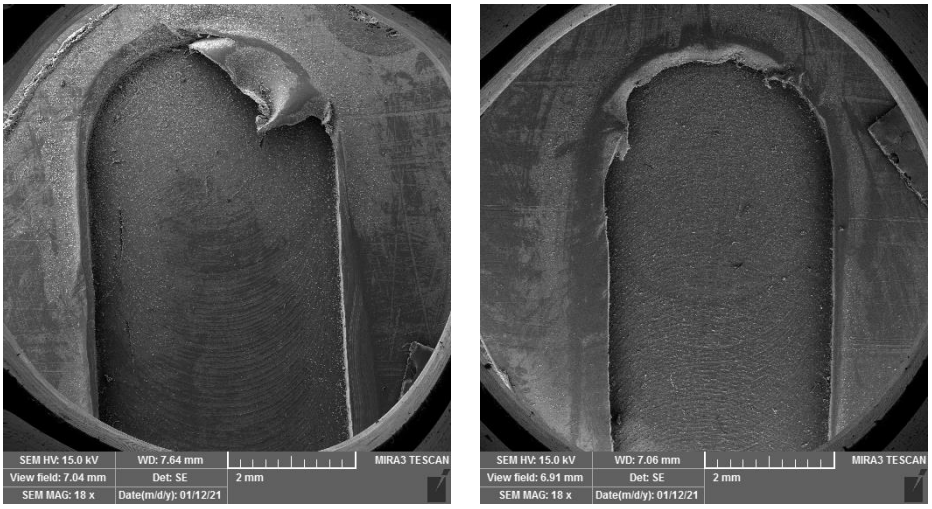


شکل ۶. تصویر میکروسکوپی برخی از سطوح ماشین‌کاری شده: (الف) گاز خنک‌کاری آرگون، سرعت برشی ۲۵/۲ m/min و پیشروی ۴۰ mm/min (ب) گاز خنک‌کاری دی‌اکسیدکربن، سرعت برشی ۲۰/۱ m/min و پیشروی ۱۶۰ mm/min (ج) گاز خنک‌کاری دی‌اکسیدکربن، سرعت برشی ۲۵/۲ m/min و پیشروی ۱۰۰ mm/min

شکل ۷ تصاویر گرفته شده توسط حالت میدانی SEM (Field) از نمونه‌ها با حداقل و حداکثر زبری سطح برای گازهای آرگون و دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر ارائه شده در این شکل بوضوح نشان می‌دهد که برای نمونه با حداقل زبری سطح با به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن (شکل ۷(الف)) لبه‌های شیار کاملاً مستقیم و عاری از هرگونه پلیسه ایجاد شده‌اند. در لبه سمت چپ، قسمت بالایی شکل ۷ (الف) مواد زاید مشاهده می‌گردد که در اثر پاشش مذاب در فرایند برش لیزری نمونه‌ها شکل گرفته است و مربوط به عملیات فرزکاری نیست. در شکل ۷ (ب) نیز که نمونه تحت گاز دی‌اکسیدکربن با فاکتورهای ماشین‌کاری متفاوت از حالت (الف) خنک‌کاری شده است، وجود پلیسه‌های ناشی از ماشین‌کاری مواد ویسکوز دیده می‌شود. این یافته اثبات می‌کند که علاوه بر خنک‌کاری نمونه تا دمای زیر T_g، فاکتورهای متغیر ماشین‌کاری خود نیز تأثیر غیرقابل‌انکاری بر رفتار برشی ماده می‌گذارد. در شکل (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min و در شکل (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min است. با مقایسه شرایط ماشین‌کاری دو نمونه به‌نظر می‌رسد اگر فرایند در دمایی بسیار کم‌تر از دمای T_g انجام گردد، سرعت‌های برشی پایین رفتار ویسکوزی ماده تحت برش را تشدید می‌کنند در صورتی که سرعت‌های برشی بالاتر این رفتار را تضعیف می‌کند. در نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده تحت دمش گاز آرگون که در شکل‌های (ج) و (د) نشان داده شده‌اند نیز لبه‌ها دارای پلیسه هستند که نشانگر رفتار برشی ویسکوز است. انتظار می‌رود در پروسه ماشین‌کاری پلیمرها با تمایل یافتن عملیات به‌سوی برش الاستوپلاستیک، این پلیسه‌ها به حداقل میزان ممکن برسند. شواهد موجود این یافته را تأیید می‌کند که اگر بتوان برش در حالت ویسکوز را تقلیل داد مقدار صافی سطح نیز بهبود خواهد یافت که به‌کارگیری هم‌زمان گاز دی‌اکسیدکربن و سرعت‌های برشی بالا می‌تواند به این پدیده کمک شایانی کند.



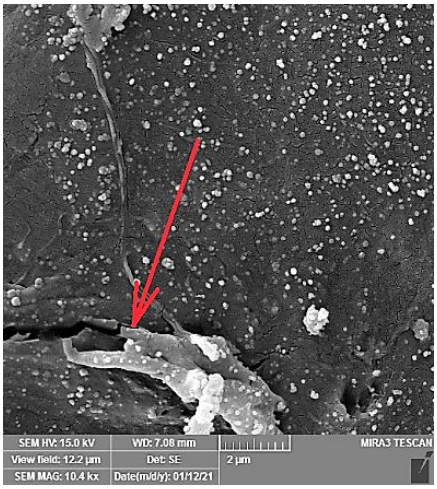
(ب) (الف)



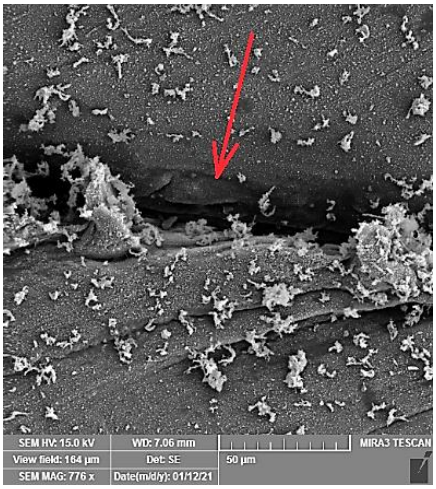
(د) (ج)

شکل ۷. تصاویر میدانی نمونه‌های مطالعه شده با میکروسکوپ روبشی الکترونی. (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز CO_2 و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min (ج) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (د) V=20.1 m/min و F=40 mm/min

همان‌گونه که بحث شد یکی از مشکلاتی که در ماشین‌کاری مواد ویسکوالاستیک روی می‌دهد لایه مرزی بین ابزار و قطعه‌کار به دلیل افزایش دما به منطقه‌ای بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن انتقال می‌یابد [۱۶]. در تداوم عملیات پس از کاهش دمای این لایه به زیر T_g، مجدداً کریستال‌های این ناحیه به حالت ویسکوالاستیک بازمی‌گردند. این پدیده انتقالی و برگشت‌پذیر احتمال شکل‌گیری میکروترک‌ها و سوراخ‌های ناشی از انقباض ترمودینامیکی را در این لایه افزایش می‌دهد [۳۵; ۳۶]. میکروترک‌ها خطری حیاتی برای عملکرد قطعات پلیمری محسوب می‌گردند؛ زیرا تحت اثر بارگذاری احتمال رشد و شکست قطعه را قوت می‌بخشند [۳۶]. برای این منظور سطوح با SEM به‌صورت دقیق و جزئی مورد بازرسی قرار گرفت. در نمونه خنک‌کاری شده با CO_2 ترک در سطوح مشاهده نگردید ولی برای سطوح خنک‌کاری شده با Ar ترک‌هایی مشاهده شد که دو نمونه از آن‌ها در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. این نتایج نشان می‌دهد گاز CO_2 نه‌تنها در بهبود صافی سطح نقش مؤثری دارد بلکه در جلوگیری از پیدایش ترک‌های ناشی از پدیده انتقالی به دمای T_g نیز مفید است؛ زیرا تغییرات دمایی اتفاق افتاده با پوشش این گاز نمی‌تواند لایه گذرا بین ابزار و ماده تحت ماشین‌کاری را به دمای بالاتر از T_g رهنمون سازد.



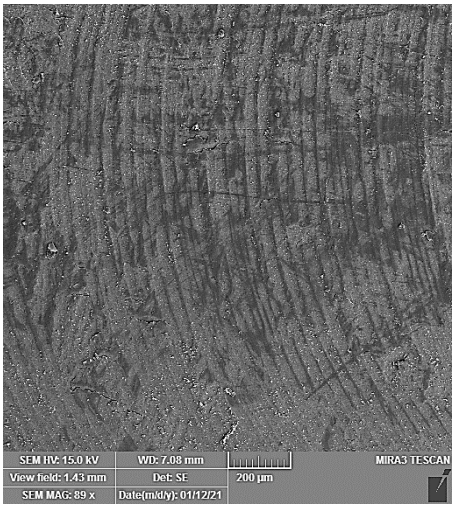
(الف)



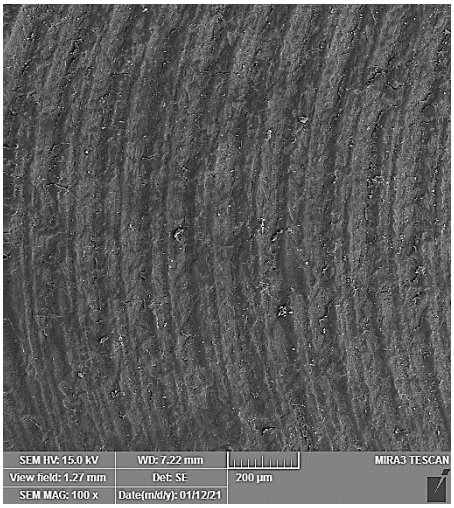
(ب)

شکل ۸. میکروترک‌های ایجاد شده در لایه مرزی بین ابزار و قطعه‌کار برای سطوح ماشین‌کاری شده تحت دمش گاز Ar با شرایط ماشین‌کاری متفاوت: (الف) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (ب) V=20.1 m/min و F=40 mm/min

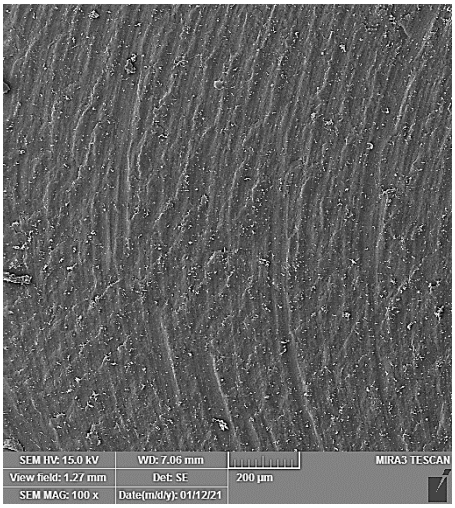
میکروگراف‌های تهیه شده توسط SEM برای نمونه‌های مطالعه شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. شکل ۹ (الف) و (ب) مربوط به نمونه‌های ماشین‌کاری شده تحت دمش گاز CO_2 است. در این تصاویر مشاهده می‌گردد که اثر خواب ابزار به‌صورت مشهود، مشابه با مواد با رفتار برشی الاستوپلاستیک مانند فولاد ایجاد شده است [۳۷; ۳۸]. در شکل ۹ (ج) و (د) میکروگراف‌های سطوح مربوط به نمونه‌های خنک‌کاری شده با گاز Ar نمایش داده شده است. در این دو شکل نیز مشاهده می‌گردد ماده در حین برش علاوه بر براده‌برداری دچار سیلان نیز شده است. این تفسیر با آنالیز فاصله خطوط خواب ابزار با گام پیشروی مشاهده شده در این تصاویر قابل استنباط است. مقدار پیشروی به‌ازای هر دور ابزار برای حالت مطالعه شده، می‌تواند از حاصل تقسیم سرعت پیشروی بر عده دوران ابزار به‌دست آید. در اشکال (ج) و (د) در شکل ۹ مقادیر محاسبه شده با فاصله خطوط اثر ابزار تطابق ندارد که می‌تواند علایمی برای سیلان لایه سطحی یا انتقال و بازانتقال این لایه به دمای T_g تلقی شود. در شکل ۹ (و) سطح PTFE قبل از عملیات ماشین‌کاری نشان داده شده است که می‌تواند برای مقایسه مفید باشد. مقایسه این تصویر با شکل‌های (ب) و (ج) حاکی از سیلان لایه سطحی ماشین‌کاری شده است.


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.08 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 1.43 mm
Det: SE
200 µm
SEM MAG: 89 x
Date(m/d/y): 01/12/21

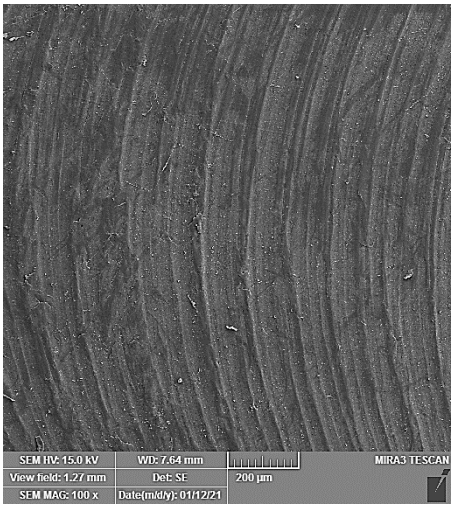
(الف)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.22 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 1.27 mm
Det: SE
200 µm
SEM MAG: 100 x
Date(m/d/y): 01/12/21

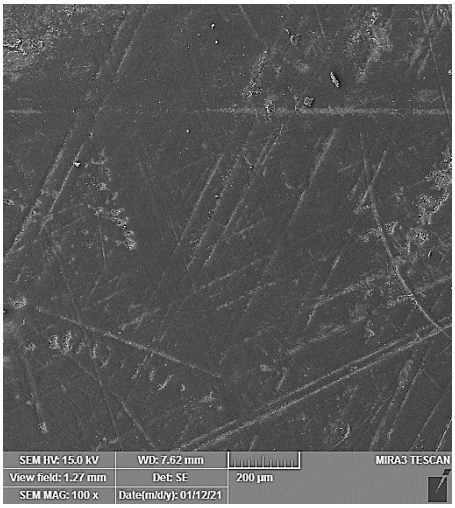
(ب)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.06 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 1.27 mm
Det: SE
200 µm
SEM MAG: 100 x
Date(m/d/y): 01/12/21

(ج)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.64 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 1.27 mm
Det: SE
200 µm
SEM MAG: 100 x
Date(m/d/y): 01/12/21

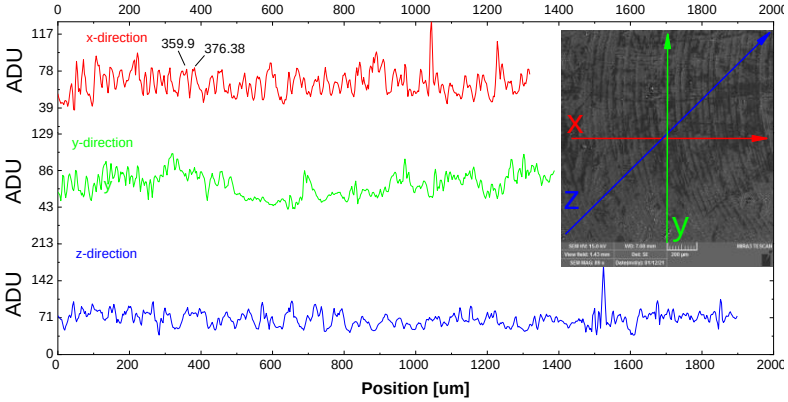
(د)



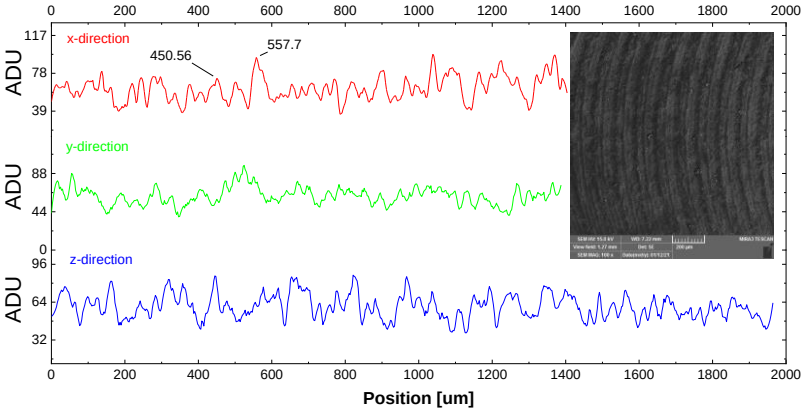
(و)

شکل ۹. میکروگراف‌های SEM سطوح با بزرگ‌نمایی 100X. (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز CO_2 و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min (ج) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (د) V=20.1 m/min و F=40 mm/min (و) سطح خام و ماشین‌کاری نشده

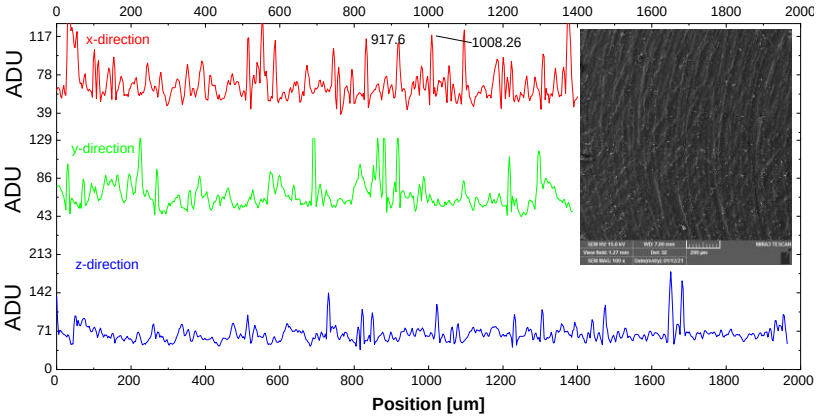
برای تعمیق تفاسیر فوق پروفیل سطوح هر میکروگراف می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید بررسی شود که در شکل ۱۰ این پروفیل‌ها ترسیم گردیده است. پروفیل‌ها توسط دستگاه SEM در سه راستای نام‌گذاری شده با x,y,z اندازه‌گیری شده است که جهت این امتدادها در شکل ۱۰ الف مشخص شده است. راستای x امتداد حرکت پیشروی است که قاعدتاً اگر رفتار برشی الاستوپلاستیک روی دهد باید گام تکرار پستی و بلندی‌های سطح از گام پیشروی ابزار تبعیت نسبی داشته باشد. اگر رفتار نوسانی پروفیل سطح در این راستا، رفتاری نامتعارف و خارج از پیش‌بینی مذکور نشان دهد، اثبات می‌گردد که لایه سطحی دچار سیلان شده یا ارتعاش روی داده است. در پلیمرها ارتعاش به دلیل ضریب میرایی قابل‌توجه آن‌ها غیرمحتمل است [۳۷] ولی سیلان ناشی از انتقال و بازانتقالی ترمودینامیکی به T_g می‌تواند روی دهد. فاصله اثر خطوط ابزار در هر پروفیل با اعداد سیاه درج شده است که موقعیت x هر اثر را معرفی می‌کند. تفاضل دو عدد معرفی شده برابر با اثر خواب ابزار است که می‌تواند با پیشروی به‌ازای هر دور ابزار مقایسه گردد. آنالیز پروفیل امتداد x نمونه‌ها نشان داد که فرکانس نوسانی سطوح ماشین‌کاری شده با CO_2 از مقدار پیشروی ابزار برحسب دور تا حدودی تبعیت می‌کند در صورتی که این روند، در مورد گاز Ar مشاهده نمی‌گردد. بدین ترتیب اثر مثبت گاز دی‌اکسیدکربن در تغییر رفتار برشی PTFE به الاستوپلاستیک مجدداً اثبات می‌گردد.


x-direction
359.9
376.38
y-direction
z-direction
ADU
Position [um]
x
y
z

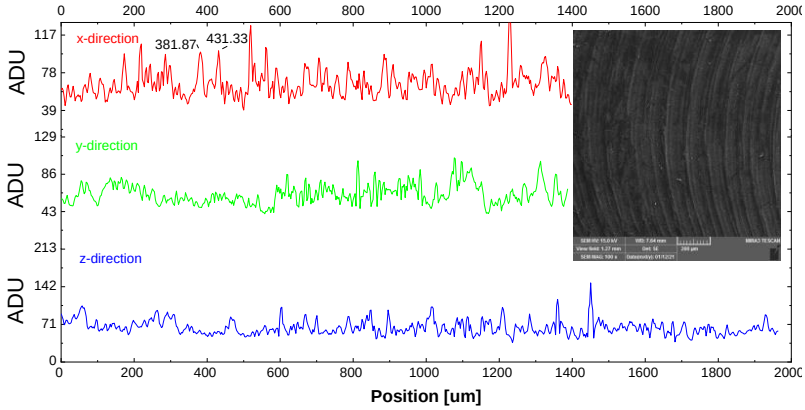
(الف)


x-direction
450.56
557.7
y-direction
z-direction
ADU
Position [um]

(ب)


x-direction
917.6
1008.26
y-direction
z-direction
ADU
Position [um]

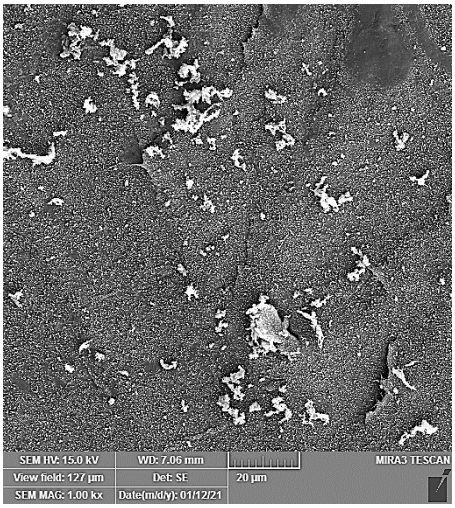
(ج)



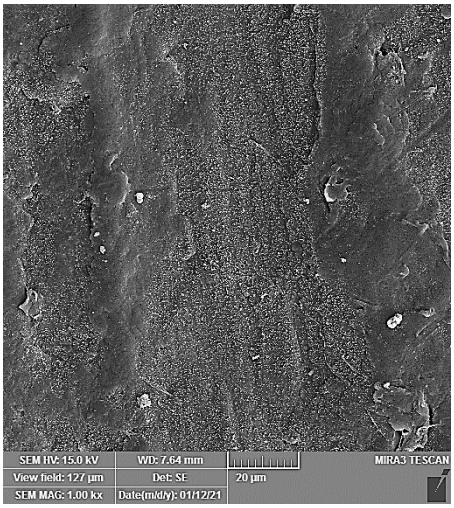
(د)

شکل ۱۰. پروفیل سطوح ماشین‌کاری شده در راستاهای x (امتداد پیشروی)، y (عمود بر امتداد پیشروی) و z (زاویه °۴۵ با امتداد پیشروی). (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز CO_2 و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min (ج) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (د) V=20.1 m/min و F=40 mm/min. مقدار پیشروی به‌ازای هر دور ابزار برای (الف) ۲۰ (ب) ۱۲۸ (ج) ۶۲.۵ و (د) ۲۵ µm می‌باشد.

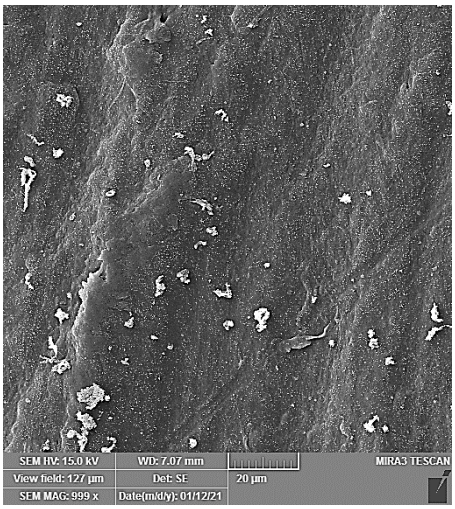
برای مشاهده عینی پدیده‌های مشروح در فوق، میکروگراف‌هایی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر توسط SEM تصویربرداری شدند که نتایج حاصل به همراه تصویری از سطح خام نمونه در شکل ۱۱ گزارش شده است. در شکل ۱۱ (الف) که حداقل زبری سطح در بین تمام مراحل انجام آزمایش‌ها را دارد، تکه‌هایی روی سطح مشاهده می‌گردد. به‌نظر می‌رسد به دلیل نرخ خنک‌کاری بالا با دمش گاز CO_2، زمان برای انجماد لایه ویسکوز فراهم نگردیده است و بخش از براده‌ها که دمای آن‌ها به بالاتر از T_g رسیده است، به‌سرعت منجمد می‌گردد و فرصت جدایش کامل از سطح را پیدا نکرده‌اند. در شکل (ب) نیز که مربوط به خنک‌کاری با CO_2 با شرایط ماشین‌کاری متفاوت است این تکه‌ها با تعداد بیشتر و با سایز کوچک‌تر مشاهده می‌شوند. در نمونه‌های مربوط به گاز Ar که در شکل‌های (ج) و (د) نشان داده شده‌اند این تکه‌ها وجود ندارند ولی اعوجاج سطح و پستی‌بلندی‌ها بیانگر انتقال و بازگشت دمای سطح به T_g است. بدیهی است این اعوجاج‌های ناشی از انقباض حین انجماد لایه، تأثیر قابل‌ذکری بر صافی سطح دارد و می‌تواند موجب افزایش زبری سطح گردد. این نتایج مؤید تحلیل صورت گرفته در مورد پروفیل‌های سطح هستند.


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.06 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 127 µm
Det: SE
20 µm
SEM MAG: 1.00 kx
Date(m/d/y): 01/12/21

(الف)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.64 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 127 µm
Det: SE
20 µm
SEM MAG: 1.00 kx
Date(m/d/y): 01/12/21

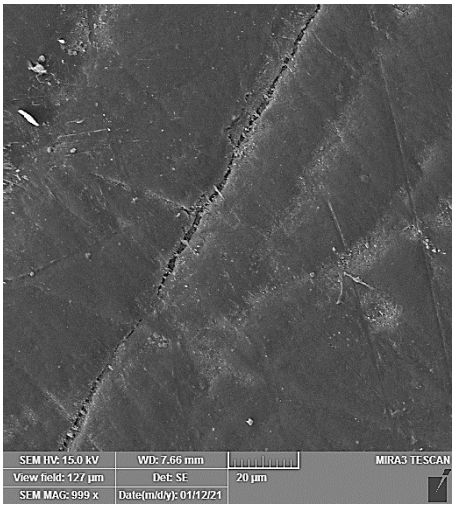
(ب)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.07 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 127 µm
Det: SE
20 µm
SEM MAG: 999 x
Date(m/d/y): 01/12/21

(ج)


SEM HV: 15.0 kV
WD: 7.08 mm
MIRA3 TESCAN
View field: 127 µm
Det: SE
20 µm
SEM MAG: 1.00 kx
Date(m/d/y): 01/12/21

(د)

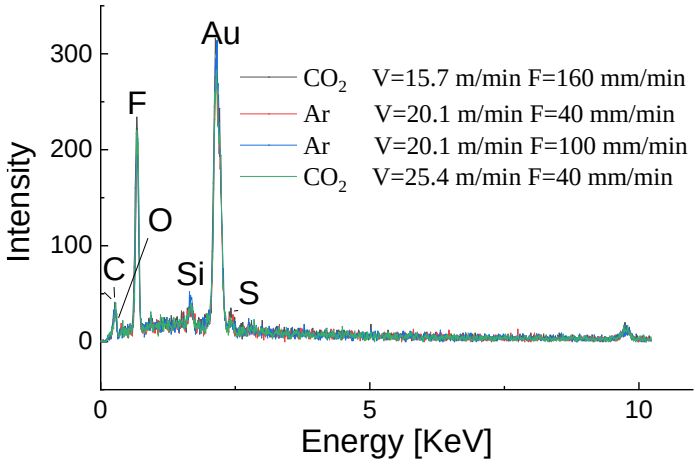


(و)

شکل ۱۱. میکروگراف‌های SEM سطوح با بزرگ‌نمایی 1000X. (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز CO_2 و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min (ج) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (د) V=20.1 m/min و F=40 mm/min (و) سطح خام و ماشین‌کاری نشده

آنالیز عنصری سطوح

شکل ۱۰ نمودار حاصل از نتایج EDX نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۳ نتایج آنالیز عنصری انجام شده توسط EDX برحسب درصد وزنی عناصر حاضر در سطح درج شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود پنج عنصر کربن، اکسیژن، فلوئورن، سیلیسیم و گوگرد در تمامی سطوح مطالعه شده وجود دارند. در این بین، سیلیسیم و گوگرد می‌توانند ناشی از آلودگی‌های محیطی در حین ماشین‌کاری یا انتقال آلودگی از طریق گاز باشند؛ زیرا گازهای استفاده شده از نظر خلوص در رده گازهای صنعتی است. عناصر مهم تشکیل‌دهنده PTFE شامل کربن و فلئورن می‌باشند که می‌توانند در حضور گاز اکسیدشده یا تشکیل گروه‌های عاملی جدید را بدهند که در آن صورت مقداری اکسیژن نیز در سطح ظاهر خواهد شد [۳۹; ۴۰]. مشاهده می‌شود استفاده از گاز فعال دی‌اکسیدکربن توانسته است از اکسیداسیون فلوئورن تا حد قابل‌توجهی جلوگیری کند و مقدار اکسیژن در سطح که معرف گروه‌های اکسیدشده یا عامل‌دار در سطح می‌باشند، در این نمونه‌ها به‌مراتب کمتر از حالت ماشین‌کاری تحت گاز آرگون است. این یافته نشان می‌دهد اگرچه گاز آرگون در زمره گازهای نجیب دسته‌بندی می‌شود و کم‌ترین اثر واکنشی با سطوح را دارد ولی به دلیل بالا رفتن دما و انتقال لایه سطحی به دمایی بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن، گروه‌های عاملی می‌توانند در سطح ظاهر گردند. این واکنش برخلاف انتظار اولیه است که ناتوانی گاز آرگون در سطح را می‌توان به خلوص پایین آن نیز نسبت داد. به‌عنوان یک نتیجه کلی گاز دی‌اکسیدکربن از نظر حفاظت شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده سطح نیز موفق‌تر از گاز آرگون عمل می‌کند.



شکل ۱۲. طیف‌نگاری نمونه‌ها توسط آنالیز EDX

جدول ۳. نتایج آنالیز EDX از سطح نمونه‌ها برحسب درصد وزنی عناصر حاضر در سطح

گاز خنک‌کننده	CO_2		Ar	
شرایط ماشین‌کاری	V=25.4 m/min F=40 mm/min	V=15.7 m/min F=160 mm/min	V=20.1 m/min F=100 mm/min	V=20.1 m/min F=40 mm/min
Ra (µm)	0.2	2.2	1.2	2.06
کربن (C)	33.75%	32.14%	30.2%	33.72%
اکسیژن(O)	3.27%	3.28%	6.55%	4.05%
فلوئورین (F)	54.46%	56.66%	53.05%	52.82%
سیلیسم (Si)	3.71%	3.2%	4.5%	3.7%
گوگرد (S)	4.81%	4.9%	5.7%	5.2%

نتیجه‌گیری

مطالعه تجربی ماشین‌کاری PTFE تحت خنک‌کاری گاز نجیب آرگون و گاز فعال دی‌اکسیدکربن با در نظر گرفتن سرعت برشی و پیشروی به‌عنوان متغیرهای فرایند انجام شد. تأثیر گازها بر کنترل دمای موضع ماشین‌کاری توسط فیلم‌برداری حرارتی ارزیابی گردید. زبری سطوح پس از عملیات اندازه‌گیری شد و سطوح توسط میکروسکوپ-های نوری و الکترونی روبشی مورد بازرسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که:

گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند دمای موضع ماشین‌کاری را به دمایی در حدود ۴۰ °C- تقلیل دهد و بدین ترتیب موجب تغییر رفتار ماشین‌کاری PTFE از ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک شود. با این انتقال رفتار، صافی سطح می‌تواند تا حدود Ra=0.2 µm کاهش یابد و روند تغییرات صافی سطح با تغییرات سرعت برشی و پیشروی منطبق بر مواد الاستوپلاستیک قابل پیش‌بینی باشد. این در حالی است که گاز آرگون تنها می‌تواند دما را تا حدود ۲۰ °C کاهش دهد که تأثیر قابل ذکر بر رفتار ماشین‌کاری PTFE ندارد.

بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد به‌کارگیری گاز آرگون با نبود توانایی مطلوب در انتقال حرارت و ایجاد نشدن تغییر در رفتار برشی PTFE می‌تواند موجب بالا رفتن دما در لایه مرزی بین ابزار و قطعه به دماهای بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن گردد و در نتیجه موجب سیلان در این لایه شود. در انجماد مجدد این لایه اعوجاج‌هایی ایجاد می‌گردد و بدین طریق زبری سطح افزایش یابد. نتیجه مهم دیگر این پدیده، ظهور ترک‌هایی در سطح ماشین‌کاری شده است که می‌توانند در زمان بارگذاری رشد کنند و شکست سریع را موجب شوند. این ترک‌ها در سطوحی که با دمش گاز دی‌اکسیدکربن ماشین‌کاری شده بودند، مشاهده نگردید.

آنالیز عنصری سطح نمونه‌ها نشان داد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن در جلوگیری از تشکیل گروه‌های عاملی سطحی موفق‌تر از گاز آرگون عمل می‌کند.

References

[1] Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *1*(2), 247-268. https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8

[2]Dupont. (2021). *Teflon PTFE fluoropolymer resin*. Rjchase. http://www.rjchase.com/ptfe_handbook.pdf

[3] Bijwe, J., & Sharma, M. (2012). Nano and Micro PTFE for Surface Lubrication of Carbon Fabric Reinforced Polyethersulphone Composites. In *Tribology of Nanocomposites* (19-39) .Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33882-3_2

[4] Feng, Y., Xiong, T., Jiang, S., Liu, S., & Hou, H. (2016). Mechanical properties and chemical resistance of electrospun polyterafluoroethylene fibres. *RSC advances*, *6*(29), 24250-24256. https//:doi.org/doi.org/10.1039/C5RA27676D

[5] Khedkar, J., Negulescu, I., & Meletis, E. I. (2002). Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, *252*(5), 361-369. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00859-6

[6] Li, J., & Ran, Y. (2010). Evaluation of the friction and wear properties of PTFE composites filled with glass and carbon fiber. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *41*(2), 115-118. https://doi.org/10.1002/mawe.200900545

[7] Khoddamzadeh, A., Liu, R., & Wu, X. (2009). Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed Tribaloy alloy additive for sliding bearings. *Wear*, *266*(7), 646-657. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.08.007

[8] Cheng, X., Xue, Y., & Xie, C. (2003). Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earths-modified glass fiber. *Materials Letters*, *57*(16), 2553-2557. https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01310-1

[9] Unal, H., Kurtulus, E., Mimaroglu, A., & Aydin, M. (2010). Tribological Performance of PTFE Bronze Filled Composites under Wide Range of Application Conditions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *29*(14), 2184-2191. https://doi.org/10.1177/0731684409345617

[10] Younse, P., Alwis, T. d., Backes, P., & Trebi-Ollennu, A. (2012, March 3-10). *Sample sealing approaches for Mars Sample Return caching*. 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6187048

[11] Fetecau, C., & Stan, F. (2012). Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool. *Measurement*, *45*(6), 1367-1379. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.03.030

[12] Feng, D., Shen, M.-x., Peng, X.-d., & Meng, X.-k. (2017). Surface roughness effect on the friction and wear behaviour of acrylonitrile–butadiene rubber (NBR) under oil lubrication. *Tribology Letters*, *65*(1), 1-14. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0793-5

[13] Hecht, K., Messerschmidt, F., Pfeifer, P., Dittmeyer, R., Kraushaar-Czarnetzki, B., & Hecht, S. (2013). Surface roughness of machined microchannels and its effect on multiphase boundary conditions. *Chemical Engineering Journal*, *227*, 2-12. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.127

[14] Aldwell, B., O'Mahony, J., & O'Donnell, G. E. (2015). The Effect of Workpiece Cooling on the Machining of Biomedical Grade Polymers. *Procedia CIRP*, *33*, 305-310. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.058

[15] Campos Rubio, J. C., Panzera, T. H., & Scarpa, F. (2015). Machining behaviour of three high-performance engineering plastics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *229*(1), 28-37. https://doi.org/10.1177/0954405414525142

[16] Kakinuma, Y., Kidani, S., & Aoyama, T. (2012). Ultra-precision cryogenic machining of viscoelastic polymers. *CIRP Annals*, *61*(1), 79-82. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.039

[17] Amini, S., Baraheni, M., & Moeini Afzal, M. (2018). Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Science and Technology of Composites*, *5*(1), 41-50. https://doi.org/10.22068/jstc.2018.28562

[18] Azad Hassan, M., Shakouri, E., & Saraeian, P. (2017). Investigation of Surface Roughness in Turning of Epoxy-Glass Composite Tubes. *Modares Mechanical Engineering*, *16*(12), 629-636 .

[19] Ghosh, R., Knopf, J. A., Gibson, D. J., Mebrahtu, T., & Currie, G. (2007, September). *Cryogenic machining of polymeric biomaterials: An intraocular lens case study.* Medical Device Materials IV: Proceedings of the Materials &Processes for Medical Devices Conference 2007, USA. https://www.researchgate.net/publication/272494251_Cryogenic_Machining_of_Polymeric_Biomaterials_An_Intraocular_Lens_Case_Study?enrichId=rgreq-1ae115a3a1583e145610b5333098ce34-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3MjQ5NDI1MTtBUzoxOTg4NzQ1NzM2MTEwMDhAMTQyNDQyNjgwMTY0OA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

[20] Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., & Gemi, L. (2018). Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, *147*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.024

[21] Palanikumar, K., & Paulo Davim, J. (2007). Mathematical model to predict tool wear on the machining of glass fibre reinforced plastic composites. *Materials & Design*, *28*(7), 2008-2014. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.018

[22] Petropoulos, G., Mata, F., & Davim, J. P. (2008). Statistical study of surface roughness in turning of peek composites. *Materials & Design*, *29*(1), 218-223. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.005

[23] Xiao, K. Q., & Zhang, L. C. (2002). The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences*, *44*(11), 2317-2336. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00178-9

[24] Turner, J., Scaife, R. J., & El-Dessouky, H. M. (2015). Effect of machining coolant on integrity of CFRP composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, *1*(1), 54-60. https://doi.org/10.1179/2055035914Y.0000000008

[25] Di Lorenzo, S., Di Paola, M., La Mantia, F. P., & Pirrotta, A. (2017). Non-linear viscoelastic behavior of polymer melts interpreted by fractional viscoelastic model. *Meccanica*, *52*(8) ,1843-1850 .https://doi.org/10.1007/s11012-016-0526-8

[26] Tan, B., & Stephens, L. S. (2019). Evaluation of viscoelastic characteristics of PTFE-Based materials. *Tribology International*, *140*, 105870. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105870

[27] Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., & Li, N. (2016). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *82*(9-12), 1517-1525. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2

[28] Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2012). Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *57*, 102-121. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006

[29] Nicholson, J. (2017). *The chemistry of polymers*. Royal Society of Chemistry. https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-78262-832-3

[30] Calleja, G., Jourdan, A., Ameduri, B., & Habas, J.-P. (2013). Where is the glass transition temperature of poly(tetrafluoroethylene)? A new approach by dynamic rheometry and mechanical tests. *European Polymer Journal*, *49*(8), 2214-2222. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.04.028

[31] Natarajan, E., Kaviarasan, V., Lim, W. H., Tiang, S. S., Parasuraman, S., & Elango, S. (2020). Non-dominated sorting modified teaching–learning-based optimization for multi-objective machining of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Journal of Intelligent Manufacturing*, *31*(4), 911-935. https://doi.org/10.1007/s10845-019-01486-9

[32] Tomkovic, T., & Hatzikiriakos, S. G. (2020). Rheology and processing of polytetrafluoroethylene (PTFE) paste. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *98*(9), 1852-1865. https://doi.org/10.1002/cjce.23816

[33] Theiler, G., Hübner, W., Gradt, T., Klein, P., & Friedrich, K. (2002). Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures11Extended version of the paper presented at the 2nd World Tribology Congress, Vienna, 3–7 September 2001. *Tribology International*, *35*(7), 449-458. https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00035-X

[34] Knight, W. A., & Boothroyd, G. (2005). *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press. https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Metal-Machining-and-Machine-Tools/Knight-Boothroyd/p/book/9781574446593

[35] Karimzad Ghavidel, A., Navidfar, A., Shabgard, M., & Azdast, T. (2016). Role of CO2 laser cutting conditions on anisotropic properties of nanocomposite contain carbon nanotubes. *Journal of Laser Applications*, *28*(3), 032006. https://doi.org/10.2351/1.4947491

[36] Karimzad Ghavidel, A., Shabgard, M., & Biglari, H. (2016). Microscopic and mechanical properties of semi-crystalline and amorphous polymeric parts produced by laser cutting. *Journal of applied polymer science*, *133*(44). https://doi.org/10.1002/app.44179

[37] Chung, D. (2001). Materials for vibration damping. *Journal of materials science*, *36*(24), 5733-5737. https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012999616049

[38] Lalwani, D. I., Mehta, N. K., & Jain, P. K. (2008). Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, *206*(1), 167-179. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.018

[39] Grisorio, R., Suranna, G. P., Mastrorilli, P., & Nobile, C. F. (2007). Insight into the Role of Oxidation in the Thermally Induced Green Band in Fluorene-Based Systems. *Advanced Functional Materials*, *17*(4), 538-548. https://doi.org/10.1002/adfm.200600083

[40] Rivas, F. J., Beltrán, F. J., Gimeno, O., & Carbajo, M. (2006). Fluorene Oxidation by Coupling of Ozone, Radiation, and Semiconductors: A Mathematical Approach to the Kinetics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *45*(1), 166-174. https://doi.org/10.1021/ie050781i

Table of contents

Karafan

Quarterly Scientific Journal of
Technical and Vocational University
Fall, 2021
Vol. 18, No. 3, Serial Number 55

License Holder: Technical and Vocational University
Director- in-Charge: Ebrahim Salehi Omran (Ph.D)
Editor-in- Chief: Nematollah Azizi (Ph.D)
Journal Internal Manager: Azarchehr Sehat (Ph.D)

Cover designer & implementation:
M. Moshtaghi - S. Danaseresht
Language Editors & Content designer:
L.. Hashemi, A. Tahmasbi- M. Pouyandehkia

Dear Reviewers of the articles in this issue:

Alireza Akoushideh, Mohammad Amiri, MohammadReza Arvan, Farzaneh Askari, Yaghoub DadgarAsl, GholamReza Davoudi, MohammadMahdi Davoudi, Vali Enjil, Amir Fathi, Morteza Fathi, Hadi GhasemiZavaregh, Hossein GhazizadehEhsaee, Mostfa JafariKermanipour, Meysam JafariNokandi, Ali Kaflo, Amir Khaledian, Farkhondeh Kiaee, Mojtaba MasoumNezhad, Sara Minagar, MohammadReza Modabernia, SeyedMahmoud MohseniMotlagh, MohammadReza Mojtabaee, Mohammad OmidPanah, Valiollah PanahiZadeh, Farzad Rahmani, Alireza Raiesi, Meraj Rajaee, Nastaran RiyahiNori, AliAkbar Sadri, Vala Saleh, Zoya SanatiMasboughi, Hamed SepehrZadeh, MohammadAli ShakerArdakani, Naser Sina, Mahmoud Yousefian, Zahra ZamanZadehDarban.

In the Name of God

Karafan

Quarterly Scientific Journal of
Technical and Vocational University

Fall, 2021

Vol. 18, No. 3, Serial Number 55

Due to certificate No. 3/18/60837 dated 21/07/2013 from the scientific publications review of Commission of the Ministry of Science, Research and Technology this journal has been licensed to publish.

Address: Central Organization of Technical and Vocational University, No. 4, Eastern Brazil St., Vanak Sq., Tehran, Iran

Postal Code: 1435761137

Tel: (+98-21) 42350418

Email: karafan@tvu.ac.ir

Website:http://karafan.tvu.ac.ir