



کارافن

فصلنامه علمی - پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دوره هفدهم - شماره چهار - شماره پیاپی ۵۰

زمستان ۱۳۹۹

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

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

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

آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴، سازمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

کد پستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

تلفن: ۰۲۱-۴۲۳۵۰۴۱۶

پست الکترونیک: karafan@tvu.ac.ir

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

فصلنامه علمی - پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دوره هفدهم - شماره چهار - شماره پیاپی ۵۰
زمستان ۱۳۹۹

کارافت



صاحب امتیاز: دانشگاه فنی و حرفه‌ای
مدیر مسئول: دکتر ابراهیم صالحی عمران
سر دبیر: دکتر نعمت‌اله عزیزی
مدیر داخلی: دکتر آذرچهره صحت

طراحی و اجرای جلد:
مهندس محمد مشتاقی - سمیرا داناسرشت
ویرایش و صفحه‌آرایی:
لامعه هاشمی، عاطفه طهماسبی
فاطمه راستی، مهری پوینده کیا

اعضای هیئت تحریریه:

استاد دانشگاه مازندران و دانشگاه فنی و حرفه‌ای
استاد دانشگاه کردستان
استاد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
استاد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
استاد دانشگاه تربیت مدرس
دانشیار دانشگاه یزد و دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دکتر ابراهیم صالحی عمران
دکتر نعمت‌اله عزیزی
دکتر محسن جهانشاهی
دکتر سید علی اصغر قریشی
دکتر مسعود شفیعی
دکتر حسن مسلمی نائینی
دکتر سید حیدر میرفخرالدینی
دکتر ویدا تقوایی
دکتر علیرضا فتحی
دکتر اکبر جعفری

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

مهدی احمدی، بهروز اسدی، اعظم انبارکی، ولی انجیل‌الی، محرم بختیاری، وحید بهلوری، ولی‌اله پناهی‌زاده، الیاس حدادی، امیر خالدیان، یعقوب دادگراصل، مسعود دهقانی، علیرضا رئیسی، پدram سوداگر، فرزاد شایوسی، محمدحسین صائمیان، فرزین عظیم‌پور، مریم عموهادی، هادی قاسمی، پرویز قدوسی، مانی قنبری، محمدعلی کاظمی، محسن کامیار، فرخنده کیائی، مریم مجیدزاده، محمدرضا مدبرنیا، امین معتمدی‌نسب، سیدحسن نبوی، محمود یوسفیان.

راهنمای نگارش و نحوه ارسال مقاله‌های علمی فصلنامه علمی - پژوهشی 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 فنی و حرفه‌ای موجود است) به نشانی karafan.tvu.ac.ir قابل ارسال است و تمامی فرایند داوری و پیگیری از طریق سایت امکان‌پذیر خواهد بود.
۴. نویسنده مسئول مکاتبات ابتدا باید در سامانه کارافن (بخش حساب کاربری) به عنوان «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 مجله 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 هیئت تحریریه، 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 تعهدنامه 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 نویسنده مسئول مکاتبات یک نسخه از مقاله (ترجیحاً نسخه Word) را بدون بیان مشخصات فردی در سامانه بارگذاری کند. همچنین در نسخه 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 مأخذ 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 مقاله‌های قابل داوری ثبت شود:

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

چکیده: باید دربرگیرنده طرح موضوع، مسئله، هدف، روش تحقیق، یافته‌ها و نتیجه باشد. چکیده فارسی

بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه و چکیده انگلیسی نیز برگردان کامل چکیده 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، روشن‌کننده بحث و بیانگر 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 ترتیب شماره آن در متن مقاله، پشت سر هم قرار گیرند. همچنین در منابع با سال 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: نام خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، عنوان کتاب، نام مترجم یا مصحح، محل نشر: نام ناشر.

مثال:

Gorman, J. M. (1996). *The new psychiatry: The essential guide to state-of-the-art therapy, medication and emotional health*. New York: St. Martin's Press.

Murphy, M. A., Lai, D., & Sookraj, D. (1997). *Evaluation of the neighborhood (congregate) meal program: Final report*. Kelowna, BC: Kelowna Home Support Society.

مقاله‌ها: نام‌خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، «عنوان مقاله»، نام مجله، جلد، شماره مجله، شماره صفحه‌های مقاله در مجله.

مثال:

Rutherford, B. J. (2006). »Reading disability and hemispheric interaction on a lexical decision task«. *Journal of Brain and Cognition*, 60 (1), 55-63.

Rush, K. L., Waldrop, S., Mitchell, C., & Dyches, C. (2005). »The RN-BSN distance education experience: From educational limbo to more than an elusive degree«. *Journal of Professional Nursing*, 21 (3), 283-292.

مقاله‌های کنفرانس: نام‌خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال نشر)، «عنوان مقاله»، نام کنفرانس، سال، ماه، روز، نام شهر، کشور.

مثال:

Jang, S. (2019, August 8–11). Deconstructing the opposition of natural/arbitrary in Coleridge's theory of language [Paper presentation]. NASSR 2019: Romantic Elements, Chicago, IL, United States.

پایان‌نامه: نام‌خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، «عنوان کامل پایان‌نامه»، مقطع تحصیلی، نام دانشگاه، صفحات.

مثال:

Lafdi, K. (2010). Nanoparticles and fiber walls interactions during nanocomposites fabrication. *Journal of Scientific Conference Proceedings*, 2(1), 15–23.

منابع الکترونیکی: نام‌خانوادگی نویسنده (ها)، نام نویسنده (ها)، (سال انتشار)، «نام مقاله»، نام نشریه، سال انتشار، ماه، شماره مقاله، نام سایت اینترنتی.

مثال:

Sharma, C. M. (2003), "Effect of exposure to aluminum on fish in acidic waters", See information in: <http://www.geocities.com/chhatra-sharma/ecotoxicology.pdf>. 17p.

۱۳. ارجاع داخل متن

- رشته های فنی و مهندسی، هنر و معماری، کشاورزی و علوم پایه:
- ارجاع منابع در متن مقاله به شیوه 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):

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

متن ارجاعی (نقل قول مستقیم) باید داخل گیومه و نشانی آن به ترتیب گفته شده، 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 چاپ شده از یک مؤلف 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 مؤلف، 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 اندازه A5 تهیه و علاوه بر متن، در فایل جداگانه‌ای ضمیمه مقاله شوند.

۱۵. مسئولیت هر مقاله از نظر علمی، ترتیب اسامی نویسنده‌ها و پیگیری، به عهده نویسنده مسئول آن خواهد بود. نویسنده مسئول باید تعهدنامه ارسال مقاله را از سایت دانلود و پس از تکمیل، در هنگام ثبت نام 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 نویسنده مسئول خواهد رسید.

۱۸. کارافن، مقاله‌های تأیید شده را طبق شیوه‌نامه خود ویرایش می‌کند.

۱۹. مطالب مطرح شده در مقاله‌ها، الزاماً بیانگر دیدگاه کارافن نیست.

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

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

- ۱۳ تشخیص نفوذ به شبکه به کمک داده کاوی و استفاده از یادگیری ماشین به روش ماشین بردار پشتیبان
امیر عباس نامجوی راد، مهدی دادگریور
- ۳۵ بررسی بعد متریکی گراف اشتراک در یک حلقه جابه‌جایی
رضا نیک اندیش
- ۴۵ مدلسازی زیرسیستم تأمین توان ماهواره سنجش از دور بر پایه سیستم‌های فازی چند ورودی-چند خروجی
مرتضی رمضانی
- ۶۱ شناسایی متغیرهای حالت یک هوانورد با استفاده از فیلتر ترکیبی کالمن / اچ-بینهایت فازی
محمدعلی کاظمی، مجتبی معصوم نژاد، نعمت اله عسکری
- ۸۱ بهینه‌سازی توان راکتور هسته‌ای با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی به کمک الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب
فرزانه محمدی، محمد مولایی، امید افرا
- ۹۹ طراحی مجدد رادیاتور موتور بر اساس تعداد فین‌های بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک
بهمن رحمتی نژاد، مهدی عباسقلی پور، بهزاد محمدی‌الستی
- ۱۱۹ تأثیر سیستم سوپاپ چند اندازه‌ای بر موتور EF7 پایه گازسوز به منظور بهبود جریان گردابه
سیاد نصیری، حسین رحیمی آسیاب‌کی، احسان رزاقی
- ۱۳۵ ارزیابی متغیرهای سیستم سوخت رسانی و جرقه‌زنی یک موتور بنزینی در اثر عدم تعویض به موقع فیلتر سوخت
مانی قنبری، لطفعلی مظفری وانانی

- ۱۴۹ طراحی سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم بدون جاروبک (PMBLDC) با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری
مرتضی عبدالحسینی، روح اله عبداللهی، معراج رجائی
- ۱۶۷ بهینه سازی پارامترهای عملکردی ماشینکاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش تاگوچی
کریم علی اکبری، محمدرضا صابری، مرتضی عندلیب
- ۱۸۷ بررسی تجربی کوپلینگ موتور استرلینگ گاما برای تبدیل انرژی حرارتی به سرمایشی در شرایط مختلف آزمایشگاهی
عزت‌اله حسن‌زاده، مهدی علی احمایی، سعید جعفری مهرآبادی، آرش محمدی، حسین مظاهری
- ۲۱۵ ارائه طرح اختلاط پیشنهادی بتن بازیافتی مورد استفاده در جداول بتنی شهری با استفاده از شبکه عصبی
سید رضا سلیم بهرامی، رضا شاکری، بهزاد حبیبی حاجیکلایی
- ۲۳۹ مطالعه اجمالی ایده‌های جدید و کاربردی میراگرهای اصطکاکی جهت کنترل ارتعاش غیرفعال سازه‌ها
رضا مرادی، ابراهیم خلیل زاده وحیدی
- ۲۵۹ بررسی اثر مقدار روان‌ساز و بازپخت پودرها بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های پودری مغناطیسی سنداست
مریم عموهادی
- ۲۷۱ طراحی فیلتر میانگذر میکرواستریپ با استفاده از فرامواد
سیدعلی هاشمی طالخونچه، احمد باصفا
- ۲۸۱ بررسی تأثیر هایپر ترمیای مغناطیسی نانوذرات فریت کبالت
احمدرضا یاسمیان
- ۲۹۱ بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلومینیوم ۵۰۱۰ به آلومینیوم ۶۰۶۱
پیمان قاسمی تمامی، ابوطالب جوادی منش، سعید مردانی

سخن سردبیر

تدریس و پژوهش در دانشگاه: ضرورت توازن در وظایف حرفه‌ای اساتید

از آنجا که یکی از حوزه‌های مهم مسئولیت دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی اهتمام به اعتلای فرایندهای یادگیری، آموزش و تدریس بوده و هست (عزیزی، ۱۳۸۵) بهبود اثربخشی تدریس یکی از اهداف مهم آموزش عالی و مؤسسات دانشگاهی می‌باشد. در سال‌های اخیر اهمیت چنین مقوله‌ای برای دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی به دلیل مواجه شدن آن‌ها با چالش‌هایی نظیر کاهش اعتبارات مالی و بودجه، بازرسی جدی‌تر دولتی و رقابت گسترده‌تر برای جذب دانشجویان جدید، بیشتر شده است. به همین سبب وجود نگرانی‌هایی درباره اثربخشی تدریس، سوآلاتی را درباره رابطه بین عملکرد تدریس استادان و فعالیت‌های پژوهشی آنان طرح می‌کند. از طرفی اغلب به پژوهش به‌عنوان فعالیتی نگرینسته می‌شود که تأکید بر آن سبب می‌شود تا اساتید برای وظایف آموزشی خود (تدریس) تعهد کمتری احساس کرده و وقت و انرژی کمتری صرف آن نمایند. بر همین مبنا یکی از انتقادات وارد بر آموزش عالی این است که میان اشتغال و فعالیت‌های پژوهشی اعضای هیأت علمی و عملکرد تدریس یک رابطه منفی و نامتعادل وجود دارد. منتقدان بر این باورند که اثربخشی تدریس اساتید به دلیل درگیری آنان در پروژه‌های تحقیقاتی و تلاششان برای چاپ مقالات علمی در حال تنزل است. از طرف دیگر بسیاری از صاحب‌نظران بر این باورند که هنگامی که اساتید دانشگاه در فعالیت‌های پژوهشی درگیر هستند، عملکرد پژوهشی آنان بهبود می‌یابد. موافقین این امر، اعتقاد دارند که زمانی که اعضای هیأت علمی به فعالیت‌های پژوهشی نمی‌پردازند آن‌ها به خاطر اینکه نمی‌توانند مهارت‌های حرفه‌ای خود را حفظ نمایند، دانش و توانایی‌های علمی خود را به روز کنند و یا دانشجویان خود را در چنین فعالیت‌هایی درگیر سازند، نمی‌توانند به اساتید اثربخشی نیز مبدل شوند. نتایج مطالعات پژوهشگران در این خصوص، ارتباط معنی‌دار میان بهره‌وری پژوهشی و اثربخشی تدریس استادان را در مراکز دانشگاهی تأیید نموده است. بر اساس یافته‌های مطالعه مذکور درگیری اعضای هیأت علمی در فعالیت‌های پژوهشی سبب بهبود عملکرد آموزشی آنان می‌گردد. با این وصف ایجاد توازن در ارزش و جایگاه سازمانی و حرفه‌ای تدریس و بازمینی نقش کیفیت تدریس اساتید در دانشگاه‌ها در فرایندهای سازمانی نظیر جذب، تغییر وضعیت، ترفیع و ارتقای مرتبه ضرورتی است که می‌بایست در آیین‌نامه‌های مربوطه مورد عنایت خاص قرار گیرد. بی‌تردید نتیجه غفلت از این مهم، تنزل کیفیت دانش، نگرش و مهارت حرفه‌ای دانش‌آموختگان دانشگاهی به‌ویژه در بخش کارشناسی و در نهایت نقصان کارآمدی و بهره‌وری سازمانی در نهادهای دولتی و غیردولتی خواهد بود.



Detection of Network Penetration by Data Mining and Using Machine Learning Via SVM Algorithm

Amir Abbas Namjooye Rad^{1*}, Mahdi Dadgarpour²

¹Faculty Member, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Dadbin, Kerman branch, Technical and Vocational University (TVU), kerman, Iran.

²MA Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Dadbin, Kerman branch, Technical and Vocational University (TVU), kerman, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.26.2020

Revised: 12.11.2020

Accepted: 01.24.2021

Keyword:

SVM algorithm
data mining
machine learning
intrusion detection

***Corresponding Author:**

Amir Abbas Namjooye Rad

Email:

amir_namjoorad@yahoo.com

ABSTRACT

Computer networks are spreading widely and one of the most outstanding challenges in computer network security is detecting intrusions into networks. One of the main tools for detection is controlling network traffic and analyzing users' behavior. One way of accomplishing this is to set classifications that specify the patterns in huge volumes of data. By means of data mining methods and introducing a binary label (normal pack, abnormal pack) and specifying the priority of data, abnormal data is detected leading to increased accuracy of network intrusion detection which in turn leads to improvement and maintenance of network security. In this paper, SVM algorithm is analyzed in terms of priorities and the effect of machine learning algorithm on accuracy of intrusion detection is investigated. The results show that using SVM is more advantageous compared to past approaches yielding better detection and increasing accuracy and right alarm detection.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تشخیص نفوذ به شبکه به کمک داده‌کاوی و استفاده از یادگیری ماشین به روش ماشین بردار پشتیبان

امیرعباس نامجوی راد^{۱*}، مهدی دادگرپور^۲

- ۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید دادبین، دانشگاه فنی حرفه‌ای استان کرمان، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید دادبین، دانشگاه فنی حرفه‌ای استان کرمان، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>با توجه به گسترش روزافزون شبکه‌های کامپیوتری، تشخیص نفوذ به شبکه، یکی از اجزای اصلی برقراری امنیت در شبکه‌های کامپیوتری شناخته می‌شود که ابزار اصلی آن، کنترل ترافیک شبکه و تحلیل رفتارهای کاربران است. یکی از راه‌های اجرای چنین سیستم‌هایی، استفاده از دسته‌بندی‌ها می‌باشد که با استفاده از مشخص کردن الگوها در حجم زیاد داده، کمک بزرگی به ما می‌کند. با استفاده از روش‌های داده‌کاوی و مشخص کردن یک برجسب دودویی (بسته نرمال، بسته غیرنرمال) و همچنین مشخص کردن ویژگی‌های داده‌ها که می‌توان داده‌های غیرنرمال را تشخیص داد؛ از این رو دقت درستی سیستم تشخیص نفوذ، افزایش می‌یابد و در نتیجه، امنیت شبکه بالا می‌رود. مدل پیشنهادی در این مقاله، به بررسی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در انتخاب خصیصه‌ها و تأثیر استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در میزان دقت و میزان تشخیص نفوذ در سیستم می‌پردازد که نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از این الگوریتم، به افزایش میزان دقت و تشخیص درست هشدارها نسبت به روش‌های قبلی می‌انجامد.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵</p> <p>کلید واژگان: سیستم تشخیص نفوذ الگوریتم یادگیری ماشین بردار پشتیبان داده‌کاوی</p> <p>*نویسنده مسئول: امیرعباس نامجوی راد پست الکترونیکی: amir_namjoorad@yahoo.com</p>



مقدمه

برای ایجاد امنیت کامل در یک سیستم کامپیوتری، علاوه بر دیوارهای آتش و دیگر تجهیزات جلوگیری از نفوذ، سیستم‌های دیگری به نام سیستم‌های تشخیص نفوذ، نیاز می‌باشد تا بتوانند در صورتی که نفوذگر از دیواره آتش، آنتی‌ویروس و دیگر تجهیزات امنیتی عبور کرد و وارد سیستم شد، آن را تشخیص داد و راه‌حلی برای مقابله با آن پیدا کرد. سیستم‌های تشخیص نفوذ را می‌توان از سه جنبه معماری، نحوه پاسخ به نفوذ و روش تشخیص طبقه‌بندی کرد. انواع مختلفی از معماری سیستم‌های تشخیص نفوذ وجود دارد که به طور کلی می‌توان آنها را به سه دسته تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از:

- ۱- مبتنی بر میزبان^۱: هر بسته ورودی به شبکه را برای حضور ناهنجاری‌های اطلاعات نادرست را کنترل می‌کند و براساس محتوا در هر آی‌پی یا سطح برنامه یک هشدار تولید می‌کند.
 - ۲- مبتنی بر شبکه^۲: رفتار هر سیستم را تجزیه و تحلیل می‌کند، تفاوت امکانات NIDS بیشتر از HIDS است. این سیستم‌ها تنها از میزبان‌هایی که روی آنها مستقر هستند محافظت می‌کند.
 - ۳- توزیع شده^۳: این سیستم از چندین NIDS یا HIDS یا ترکیبی از این دو نوع همراه یک ایستگاه مدیریت مرکزی تشکیل شده است. بدین صورت که هر IDS در شبکه موجود است گزارش‌های خود را برای ایستگاه مدیریت مرکزی ارسال می‌کند. ایستگاه مرکزی وظیفه بررسی گزارش‌های رسیده و آگاه‌سازی مسئول امنیتی سیستم را بر عهده دارد. این ایستگاه مرکزی همچنین وظیفه به‌روزرسانی پایگاه قوانین تشخیص هر یک از IDS‌های موجود در شبکه را بر عهده دارد. اطلاعات در ایستگاه مدیریت مرکزی ذخیره می‌شود. شبکه بین NIDS‌ها با سامانه مدیریت مرکزی می‌تواند خصوصی باشد یا اینکه از زیرساخت موجود برای ارسال داده‌ها استفاده می‌شود و وقتی از شبکه برای ارسال داده‌های مدیریتی استفاده شود امنیت‌های اضافی به وسیله رمزگذاری یا فناوری شبکه‌های خصوصی مجازی^۴ حاصل می‌شود [۱]. الگوریتم‌های تشخیص نفوذ^۵ از جنبه روش تشخیص، در دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند: تشخیص سوءاستفاده^۶ و تشخیص ناهنجاری^۷.
- الگوریتم‌های تشخیص سوءاستفاده حمله‌ها را بر مبنای امضای حملات شناخته‌شده شناسایی می‌کنند. با وجود اینکه این نوع از سیستم‌های تشخیص نفوذ در تشخیص حمله‌های شناخته شده با درصد خطای پایین کارآمدتر هستند اما نمی‌توانند حمله‌های جدیدی که ویژگی و خصوصیت مشابهی با حمله‌های شناخته‌شده ندارند را شناسایی کنند. در مقابل، الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری براساس این فرضیه هستند که رفتار حمله‌کننده با رفتار یک کاربر نرمال، متفاوت است؛ از این رو ترافیک‌های نرمال را آنالیز و الگوهای ترافیک نرمال را ایجاد می‌کنند. حال ترافیک ورودی را به‌عنوان حمله در نظر می‌گیرند اگر خصوصیات آن با الگوهای ترافیک نرمال متفاوت باشد. با وجود اینکه الگوریتم تشخیص ناهنجاری برای شناسایی حمله‌های جدید مناسب هستند اما در تشخیص حمله‌های شناخته‌شده به اندازه مدل‌های تشخیص سوءاستفاده، کارآمد نیستند [۲]. به دلیل حل معایب این دو روش تشخیص نفوذ معمولی، روش‌های تشخیص نفوذ ترکیبی از دو روش فوق ارائه شده است. در بسیاری از سیستم‌های تشخیص نفوذ ترکیبی یک مدل تشخیص سوءاستفاده و یک مدل تشخیص ناهنجاری به‌طور مستقل آموزش دیده و سپس نتایج آنها با هم جمع می‌شوند. برای مثال، بعضی از سیستم‌های تشخیص نفوذ ترکیبی، ترافیک ورودی را به‌عنوان حمله در نظر می‌گیرند اگر حداقل یکی از

¹ Host-based Detection System (HIDS)

² Network-based Intrusion Detection System (NIDS)

³ Distributed Intrusion Detection System (DIDS)

⁴ VPN

⁵ Intrusion Detection Algorithm

⁶ Misuse Detection

⁷ Anomaly Detection

دو مدل بیان شده تشخیص دهد که این ترافیک ارتباطی حمله است ترافیک ورودی را به عنوان حمله در نظر می‌گیرند و اگر هر دو مدل تشخیص دهند که ترافیک‌های ورودی حمله است ترافیک‌های ورودی را به‌عنوان حمله در نظر می‌گیریم. در حالت اول، سرعت کشف و شناسایی، بهبود می‌یابد اما سیستم تشخیص نفوذ هنوز نرخ مثبت کاذب^۱ بالایی خواهد داشت در حالی که در حالت دوم، پیغام کاذب کاهش خواهد یافت اما ممکن است بسیاری از ترافیک‌های حمله را نادیده بگیرد [۳]. در این پژوهش به جای بررسی روش‌هایی که فقط نتایج دو مدل تشخیص نفوذ را ترکیب می‌کنند، روش‌های ترکیب سلسله‌مراتبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لذا با این روش می‌خواهیم قبل از به‌کارگیری الگوریتم‌های کاهش ابعاد، در ابتدا بهترین الگوریتم را شناسایی می‌کنیم و الگوریتم‌هایی که از لحاظ کارایی نزدیک به هم هستند را ارزیابی و مقایسه خواهیم کرد. هدف این مقاله پیدا کردن دسته‌بندی با بیشترین نرخ دقت می‌باشد. همچنین این آزمایش‌ها در شبیه‌ساز و ابزار یادگیری ماشین وکا انجام می‌شود.

اهمیت و ضرورت تحقیق

هدف از این مقاله، استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی برای تشخیص نفوذ است؛ زیرا حملات همواره بروز می‌شوند و سیستم‌های تشخیص نفوذ سنتی نمی‌توانند این حملات شناسایی کنند. وقتی نفوذ اتفاق می‌افتد مهم‌ترین کار شناسایی است، رخداد مربوط به نفوذ در هر زمان مرتبط به الگویی از اتفاقات است که در گذشته رخ داده است. این داده‌های تاریخی، منبع بسیار مهمی از صفات هستند که نیاز است تا به‌طور مؤثر علامت و نشانه‌های نفوذ در مجموعه داده‌ها مشخص شود. داده‌کاوی با کشف الگوهای مناسب از میان داده‌های قبلی، به روند ساخت این مدل‌ها کمک زیادی می‌کند. در این روش، مجموعه‌ای از قانون‌های دسته‌بندی از داده‌های شبکه به‌دست می‌آید. این قانون‌ها توانایی تعیین رفتار عادی از غیرعادی را دارا می‌باشند و با استفاده از مجموعه داده KDDcup99 ارزیابی می‌شوند. هدف اصلی ما معرفی بهترین الگوریتم با توجه به مجموعه داده‌ها است که بتواند بسته‌های عادی را از غیرعادی تشخیص دهد. نوآوری تحقیق استفاده از تمام الگوریتم‌های موجود در روش‌های دسته‌بندی است که در نرم افزار وکا موجود است و پیشنهاد پنج نمونه داده که از داده اولیه استخراج شده و برای مدل‌های مختلف و الگوریتم‌ها بهترین جواب را می‌دهد. استخراج پنج نمونه داده، زمان بسیار زیادی را به خود اختصاص می‌دهد و همه الگوریتم‌های مختلف موجود در مدل‌های دسته‌بندی با مجموعه داده‌های مختلف، شبیه‌سازی و اجرا شدند که در نهایت، پنج نمونه داده اولیه پیشنهاد شد. فرضیه‌های تحقیق عبارتند از:

- ۱- می‌توان با طراحی یک سامانه ترکیبی در سیستم‌های تشخیص نفوذ علاوه بر داشتن مزایای سیستم‌های تشخیص نفوذ بر پایه تشخیص ناهنجاری به برخی از مزایای سیستم تشخیص سوءاستفاده رسید [۴].
- ۲- استفاده از روش تقسیم و غلبه در سیستم‌های تشخیص نفوذ باعث به دست آوردن کارایی بالاتر می‌گردد.
- ۳- یک پایگاه داده از حملات جهت آموزش سیستم طبقه‌بندی حملات وجود دارد.

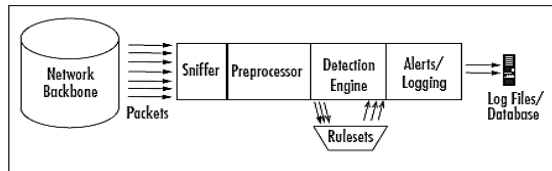
اهداف این پژوهش عبارتند از:

- ۱- کارایی بیشتر در تشخیص نفوذ، در مقایسه با سیستم‌های دستی
- ۲- توانایی رسیدگی به حجم زیادی از اطلاعات
- ۳- توانایی هشدار نسبتاً بلادرنگ که باعث کاهش خسارت می‌شود.
- ۴- دادن پاسخ‌های خودکار، مانند قطع ارتباط کاربر، غیرفعال‌سازی حساب کاربر، اعمال مجموعه دستورهای خودکار و غیره
- ۵- افزایش میزان بازدارندگی

^۱ False Positive

۶- توانایی گزارش‌دهی.

برای ایجاد سیستم مدیریت هشدار پیشنهادی، ابزاری به صورت دقیق تعریف شده‌اند. به همین دلیل از ابزار اسنورت استفاده می‌شود. اسنورت، یک ابزار مهم تولیدکننده هشدار می‌باشد که معروف‌ترین سیستم تشخیص نفوذ کدباز است [۵؛ ۶] که قادر است دیتاگرام TCP/IP را روی شبکه به صورت هم‌زمان تحلیل کند. این ابزار، یک نرم‌افزار انعطاف‌پذیر است که می‌تواند به بیشتر پایگاه‌داده‌های مهم، مانند اوراکل^۱ و ... متصل شود. اسنورت، یک موتور شناسایی نفوذ و یک پویشر درگاه دارد که آن را قادر می‌سازد تا هر گونه حمله از پیش تعریف شده را شناسایی و پیام هشدار مناسب را تولید کند. اسنورت برای سیستم‌عامل‌های مختلف مانند لینوکس، یونیکس و ویندوز ویرایش‌های مختلف دارد [۷]. اسنورت، یک سیستم تشخیص نفوذ و جلوگیری از آن است، از یک زبان تعریف قانون استفاده می‌کند تا مزایای روش‌های شناسایی از طریق پروتکل، شناسایی از طریق امضا (نمونه‌های از پیش تعریف شده) و شناسایی از طریق رفتار غیرمعمول را با هم ادغام کند. مارتین روزچ؛ مؤسس شرکت source file، اسنورت را در سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۸ توسعه داد. این شرکت به پشتیبانی فنی از این ابزار می‌پردازد و بر اساس این ابزار برای سازمان‌های مختلف ساختارها و راه‌حل‌های امنیتی ارائه می‌دهد. اسنورت تا سال ۲۰۱۱ با بیش از ۳ میلیون دانلود متداول‌ترین فناوری تشخیص نفوذ در دنیا می‌باشد. اسنورت از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. معماری اسنورت [۸]

قسمت جمع‌آوری اطلاعات

جمع‌کننده اطلاعات عبارت است از مجموعه‌ای از وسایل سخت‌افزاری و نرم‌افزاری که برای جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز به شبکه موردنظر متصل شده‌اند. مشابه ابزاری که در سیستم تلفن به سیم تلفن وصل گردیده است، با این تفاوت که به جای صدای مکالمه در ارتباط تلفنی، اطلاعات شبکه کامپیوتری جمع‌آوری می‌گردد. در شبکه اینترنت معمولاً ترافیک IP قابل مشاهده می‌باشد در حالی که در شبکه‌های محلی ترافیک‌های دیگری از قبیل IPX و Apple Talk مشاهده می‌گردد.

• قسمت آنالیز اولیه

این قسمت وظیفه دسته‌بندی و آماده‌سازی اطلاعات برای مرحله بعد را به عهده دارد. در این قسمت، اطلاعات خام ورودی متناسب با محتوا دسته‌بندی می‌گردد. از جمله حالت‌های موجود می‌توان به سه حالت ذیل اشاره کرد:

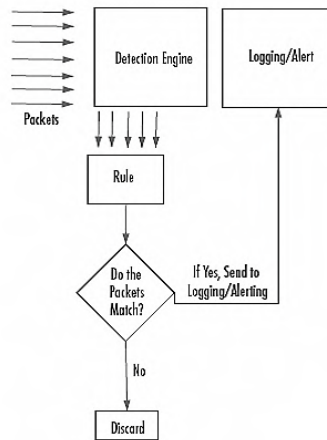
- RPC plug-in
- HTTP plug-in
- Port scanner plug-in

¹ MySQL Oracle

این قسمت به صورت کمی در عملکرد اسنورت بسیار مؤثر است. این قسمت می تواند به صورت مستقل فعال یا غیرفعال شود؛ لذا قادر است بسیاری از کنترل های اولیه را انجام و نسبت به ارائه پیام، اقدام یا سکوت کند.

• موتور شناسایی

پس از اینکه اطلاعات دسته بندی و آماده گردید تحویل این قسمت می گردد. قوانین (امضای حملات) در این قسمت قرار گرفته است. پس از ورود اطلاعات به این قسمت عملیات مقایسه و ارزیابی با قوانین انجام می گیرد. این قسمت دارای بیشترین تراکنش در عملیات تشخیص نفوذ می باشد. پس از مقایسه اطلاعات با قوانین موجود (امضای حملات)، در صورت تطابق با امضای حملات به قسمت هشدار ارسال می شود. در غیر این صورت اطلاعات رها و کنار گذاشته می شوند. در شکل ۲ روند کار موتور شناسایی نمایش داده شده است.



شکل ۲. موتور شناسایی [۸]

• خروجی هشدار

پس از تشخیص حمله، اطلاعات مورد نظر با فرمت از قبل پیش بینی شده به این قسمت ارسال می شود. با تنظیم اسنورت می توان اطلاعات را داخل پوشه لاگ در مجموعه دستورات اسنورت نگهداری ذخیره کرد. این اطلاعات با فرمت متن ذخیره می شود. در غیر این صورت می توان با کمک نرم افزارهای متعددی که دارای کنسول گرافیکی می باشند نسبت به جمع آوری اطلاعات خروجی اقدام نمود، از جمله این نرم افزارها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- SnortSnarf
- Snortplot.php
- Swatch
- ACID
- Kiwi Syslog Daemon

بعد دیگر از پیکربندی اسنورت به عنوان یک سیستم تشخیص نفوذ، استفاده از قوانین برای ایجاد معیار نفوذ برای اسنورت است. برای مثال می توان با قانونی، اسنورت را مکلف ساخت که نسبت به دسترسی های انجام شده مبتنی بر پروتکلی تعیین شده از/ به یک پورت خاص و از/ به یک مقصد معین با محتوایی شامل رشته ای خاص،

اخطاری یا واکنشی ویژه را اعمال کند. اسنورت را می‌توان به گونه‌ای پیکربندی کرد که قابلیت تشخیص حمله توسط ابزارهای پویش پورت را نیز داشته باشد؛ لذا با وجود استفاده از اسنورت نیازی به استفاده از ابزاری ثانویه برای تشخیص پویش‌گرهای پورت وجود ندارد. اسنورت با قابلیت‌های نسبتاً کاملی که در خود جای داده‌است، به همراه رایگان بودن آن و قابلیت نصب بر محیط‌ها و سیستم‌های عامل متداول، به یکی از معمول‌ترین IDSهای کنونی مبدل شده است. در ادامه، نحوه اعمال ترافیک KDDcup99 DARPA بر اسنورت برای تولید هشدار شرح می‌شود [۸].

مجموعه داده‌های KDDcup99

در هر IDS اولین قدم در داده‌کاوی، تأمین داده‌های ورودی است. این داده‌ها از منابع مختلف و با روش‌های مختلفی به دست می‌آیند. برای ردیابی رفتار غیرعادی در شبکه نت (نه در میزبان)، بهترین منبع ما ترافیک شبکه است که شامل بسته‌های فرستاده شده بین مبدأ و مقصد می‌باشد. در مجموعه داده‌های KDDcup99، ترافیک شبکه‌ای میزبان یا شبکه نت جمع‌آوری می‌شود. در این مجموعه داده استاندارد ۴۹۴۰۲۰ نمونه و ۴۱ ویژگی ثبت شده است. خصیصه‌های مجموعه داده KDDcup99 به سه طبقه تقسیم می‌شوند:

۱- خصیصه‌های پایه: شامل تمام ویژگی‌هایی است که می‌توان از یک اتصال TCP/IP به دست آورد. بیشتر این ویژگی‌ها منجر به تأخیر در تشخیص می‌شوند.

۲- خصیصه‌های ترافیک: این طبقه شامل ویژگی‌هایی است که براساس فاکتورهای مشابه در یک بازه زمانی محاسبه می‌شوند که شامل دو گروه می‌شود:

الف) ویژگی‌های مشابه میزبان: این سیستم اتصالات ۲ ثانیه آخر را بررسی می‌کند. هر میزبان با مقصد مشابه یک اتصال جاری تلقی می‌شود و آمار مربوط به رفتارها، خدمات، پروتکل‌ها و غیره محاسبه می‌شود.
ب) ویژگی‌های مشابه سرویس: این ویژگی‌ها هم اتصالات سرویس یکسانی را دو ثانیه آخر اتفاق افتاده‌اند به عنوان اتصالات جاری در نظر می‌گیرند.

۳- خصیصه‌های محتوایی: برخلاف بیشتر حملات DOS و Probe حملات UZR و RZL نفوذها (هک‌های) تکراری و نمونه‌های متوالی ندارند که به این علت است که حملات DOS و Probe اتصالات زیادی با تعدادی میزبان در یک بازه زمانی کوتاه دارند. برای تشخیص چنین حملاتی تعدادی خصیصه در نظر گرفته شده‌اند (مثل ورود ناموفق) که قادرند رفتارهای مشکوک را تشخیص دهند. به این خصیصه‌ها، خصیصه‌های محتوایی می‌گویند. KDDcup99 از نظر طراحی و اجرای IDS یک مجموعه داده قابل اعتماد است. هر داده ثبت شده در این مجموعه دارای ۴۱ ویژگی است. معمولاً ویژگی‌ها سه شکل دارند شامل پیوسته، گسسته و نمادین که دارای دامنه ارزشی متفاوتی می‌باشند. در این مجموعه داده چهار حمله اصلی تشخیص داده شده، وجود دارد و خارج از این طبقه‌بندی‌ها برخی بسته‌ها ارزش نرمال (عادی) دارند و برخی دیگران حملات شناسایی نشده هستند.

اعمال ترافیک DARPA KDDcup99 بر اسنورت

DARPA98 دارای ۴ گیگابایت داده آموزشی دوتایی (دوگانه) خام فشرده است که از ۷ هفته ترافیک شبکه‌ای تشکیل شده است. داده‌های آزمایشی ۲ هفته حدود ۲ میلیون ثبت اتصال دارند. مجموعه داده آموزشی KDDcup99 شامل حدود ۵ میلیون ثبت اتصال است (یک اتصال یعنی توالی بسته‌های TCP که در زمان‌های مشخصی شروع و تمام می‌شوند که بین آنها داده‌ها از آدرس IP مبدأ به آدرس IP مقصد تحت یکسری پروتکل مشخص در جریان هستند) که هر کدام از آنها دارای ۴۱ ویژگی است و به عنوان متعارف یا حمله برجسب‌گذاری شده‌اند و هر کدام دارای یک نوع حمله مشخص هستند. حملات شبیه‌سازی شده به یکی از چهار گروه حمله

سرویس (DOS)، حمله کاربر به روت (U2R)، حمله از راه دور به اتصال محلی (R2L) و حمله Probing تعلق دارند. ویژگی‌های KDDcup99 را می‌توان به سه گروه ویژگی‌های اصلی، محتوایی و ترافیک تقسیم کرد. مجموعه داده، یکی از قابلیت‌های ابزار اسنورت خواندن ترافیک شبکه از فایل‌های دودویی ذخیره شده است. این فایل‌های دودویی شامل تمامی ترافیک شبکه در زمان مشخص می‌باشد. فایل‌های دودویی عبارت است از مجموعه داده جمع‌آوری شده قبلی و این مجموعه داده‌ها حاوی نمونه حمله‌های واقعی هستند استفاده از این مجموعه داده باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. همچنین امکان اعمال روش‌های مختلف روی همان مجموعه داده امکان‌پذیر است. برخی از این مجموعه‌داده‌ها DARPA، DEFCON [۹] هستند. روش پیشنهادی این مقاله از هشدارهای ایجاد شده از مجموعه‌داده DARPA و KDDcup99 استفاده می‌کند. مجموعه داده بیان شده شامل ترافیک شبکه مربوط به هفت هفته (که هر هفته شامل پنج روز است) می‌باشد. دو فایل از میان فایل‌های هر روز مجموعه‌داده، استفاده می‌شوند که عبارتند از outside.tcpdump و tcpdump.list. فایل outside.tcpdump همان فایل دودویی شامل ترافیک شبکه است و فایل tcpdump.list حاوی فهرست بسته‌های ارسالی در شبکه به همراه برجسب مربوط به بسته‌ها است. این برجسب مشخص می‌کند که آیا بسته مورد نظر بخشی از یک حمله خاص است یا ترافیک معمولی می‌باشد. قسمتی از فایل tcpdump.list در شکل ۳ نمایش داده شده است.

```
۱۷۸۹ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ 09:12:17 00:00:01 frag/i--207.103.080.104 172.016.118.020 1 pod
۱۷۹۰ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۰۹:۱۲:۱۷ ۰۰:۰۰:۰۱ frag/i--۲۰۷,۱۰۳,۰۸۰,۱۰۴ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۸,۰۲۰ ۱ pod
۱۷۹۱ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۰۹:۱۲:۱۷ ۰۰:۰۰:۰۱ frag/i--۲۰۷,۱۰۳,۰۸۰,۱۰۴ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۸,۰۲۰ ۱ pod
۱۷۹۲ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۰۹:۱۲:۱۷ ۰۰:۰۰:۰۱ frag/i--۲۰۷,۱۰۳,۰۸۰,۱۰۴ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۸,۰۲۰ ۱ pod
۴۰۶۶ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۱۱:۳۶:۲۲ ۰۰:۰۰:۰۱ http ۲۰۱۹۰۸۰ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۵,۰۰۵ ۱۹۲,۱۵۰,۱۱۲,۱۰۳ ۰-
۴۰۶۷ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۱۱:۳۶:۲۷ ۰۰:۰۰:۰۱ http ۲۰۲۵۰۸۰ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۵,۰۰۵ ۱۳۰,۲۰۷,۲۴۴,۰۲۶ ۰-
۴۰۶۸ ۰۶/۲۴/۱۹۹۹ ۱۱:۳۶:۳۱ ۰۰:۰۰:۰۱ http ۲۰۲۵۱۸۰ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۴,۱۶۹ ۱۹۲,۱۵۱,۰۱۱,۰۲۲ ۰-
۱۳۸۱۷ ۰۶/۱۹/۱۹۹۹ ۱۴:۲۰:۰۲ ۰۰:۰۰:۰۱ eco/i--۲۰۸,۲۴۰,۱۲۴,۰۸۳ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۲,۱۸۰ ۱ nmap
۱۳۸۱۸ ۰۶/۱۹/۱۹۹۹ ۱۴:۲۰:۰۲ ۰۰:۰۰:۰۱ eco/i--۲۰۸,۲۴۰,۱۲۴,۰۸۳ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۲,۱۸۱ ۱ nmap
۱۳۸۱۹ ۰۶/۱۹/۱۹۹۹ ۱۴:۲۰:۰۲ ۰۰:۰۰:۰۱ eco/i--۲۰۸,۲۴۰,۱۲۴,۰۸۳ ۱۷۲,۰۱۶,۱۱۲,۱۸۲ ۱ nmap
```

شکل ۳. اعمال ترافیک DARPA KDDcup99

همان‌گونه که مشاهده می‌شود سه برجسب nmap، pod و به ترتیب مربوط به حمله nmap، pod و ترافیک معمولی می‌باشد.

داده‌کاوی

داده‌کاوی، پل ارتباطی میان علم آمار، علم کامپیوتر، هوش مصنوعی، الگوشناسی، فراگیری ماشین داده می‌باشد. داده‌کاوی، فرایند استخراج اطلاعات معتبر، از پیش ناشناخته، قابل فهم و قابل اعتماد از پایگاه داده‌های بزرگ و استفاده از آن در تصمیم‌گیری در فعالیتهای تجاری مهم است. اصطلاح داده‌کاوی، به فرایند نیم‌خودکار تجزیه و تحلیل پایگاه داده‌های بزرگ به منظور یافتن الگوهای مفید اطلاق می‌شود. داده‌کاوی، فرایندی پیچیده برای شناسایی الگوها و مدل‌های صحیح، جدید و به‌صورت بالقوه مفید، در حجم وسیعی از داده می‌باشد، به طریقی که این الگوها و مدل‌ها برای انسان‌ها قابل درک باشند. داده‌ها اغلب حجیم می‌باشند و به‌تنهایی قابل استفاده نیستند، اما دانش نهفته در داده‌ها قابل استفاده می‌باشد. بنابراین بهره‌گیری از قدرت فرایند داده‌کاوی برای شناسایی الگوها و مدل‌ها و نیز ارتباط عناصر مختلف در پایگاه داده به‌منظور کشف دانش نهفته در داده‌ها و نهایتاً

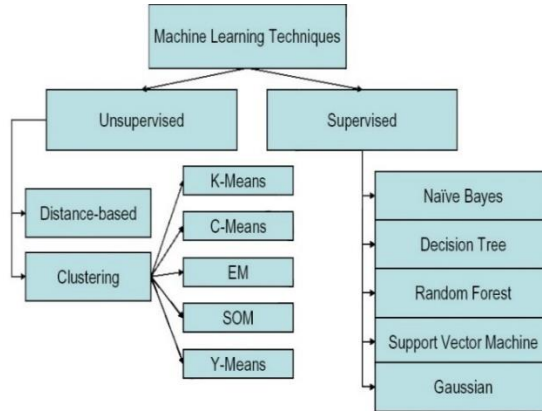
تبدیل داده به اطلاعات، روزبه‌روز ضروری‌تر می‌شود. در داده‌کاوی معمولاً به کشف الگوهای مفید از میان داده‌ها اشاره می‌شود. منظور از الگوی مفید، مدلی در داده‌ها است که ارتباط میان یک زیرمجموعه از داده‌ها را توصیف می‌کند و معتبر، ساده، قابل فهم و جدید است [۱۰].

نرم‌افزار WEKA

نرم‌افزار وکابا داشتن امکانات بسیار گسترده، امکان مقایسه خروجی روش‌های مختلف با هم، راهنمای خوب، واسط گرافیکی کارا، سازگاری با سایر برنامه‌های ویندوزی معرفی شد. میزکاروگا، مجموع‌های از الگوریتم‌های روز یادگیری ماشینی و ابزارهای پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد. این نرم‌افزار به گونه‌ای طراحی شده است که می‌توان به سرعت، روش‌های موجود را به صورت انعطاف‌پذیری روی مجموعه‌های جدید داده، آزمایش کرد. این نرم‌افزار، پشتیبانی‌های ارزشمندی را برای کل فرایند داده‌کاوی‌های تجربی فراهم می‌کند. این پشتیبانی‌ها، آماده‌سازی داده‌های ورودی، ارزیابی آماری چارچوب‌های یادگیری و نمایش گرافیکی داده‌های ورودی و نتایج یادگیری را در برمی‌گیرند. همچنین، هماهنگ با دامنه وسیع الگوریتم‌های یادگیری، این نرم‌افزار شامل ابزارهای متنوع پیش‌پردازش داده‌هاست. این جعبه ابزار متنوع و جامع، از طریق یک واسط متداول در دسترس است، به نحوی که کاربر می‌تواند روش‌های متفاوت را در آن با یکدیگر مقایسه کند و روش‌هایی را که برای مسائل مدنظر مناسب‌تر هستند، تشخیص دهد.

یادگیری ماشین

یادگیری ماشین زمینه نسبتاً جدیدی از هوش مصنوعی است که در حال حاضر دوران رشد و تکامل خود را می‌گذراند یادگیری ماشین یک زمینه تحقیقاتی بسیار فعال در علوم کامپیوتر است. علوم مختلفی از قبیل هوش مصنوعی، روانشناسی، فلسفه، تئوری اطلاعات، آمار و اطلاعات، تئوری کنترل با یادگیری ماشین در ارتباط هستند. یادگیری ماشین عبارت است از اینکه چگونه می‌توان رنامه‌ای نوشت که از طریق تجربه یادگیری کرده و عملکرد خود را بهتر کند در یادگیری ماشین با استفاده از تئوری اطلاعات مدل‌های ریاضی ساخته می‌شود که می‌تواند برای استنتاج استفاده شوند. تکنیک‌های یادگیری ماشین در شرایطی مناسب است که هیچ گونه دانش اولیه در مورد الگوهای داده‌ها وجود ندارد؛ به همین دلیل گاهی به این روش‌ها پایین به بالا می‌گویند. مزیت مهم این روش این است که معمولاً به انسان‌های خبره برای تعیین ملزومات موردنظر به منظور تشخیص نفوذ نیازی نیست به همین دلیل بسیار سریع عمل می‌کنند و مقرون‌به‌صرفه هستند. تکنیک‌های یادگیری ماشین در داده‌کاوی به طور کلی به دو دسته نظارت‌شده و غیرنظارت‌شده تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۴ روش‌های یادگیری ماشین و زیرمجموعه‌های موجود در آنها را نمایش می‌دهد که در ادامه قابل مشاهده است.



شکل ۴. تکنیک‌های یادگیری ماشین

یادگیری انواع مختلف دارد که به شرح زیر هستند:

کلاس‌بندی^۱: ماشین یاد می‌گیرد ورودی‌ها را به دسته‌های از پیش تعیین شده نسبت دهد. خوشه‌بندی^۲: سیستم یادگیر کشف می‌کند که کدام ورودی‌ها با هم در یک دسته قرار می‌گیرند. تخمین عددی^۳: ماشین یاد می‌گیرد به جای تعیین دسته‌بندی یک ورودی مقدار عددی آن را پیش‌بینی نماید.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص باشد استفاده می‌شود. ماشین بردار پشتیبان، دسته‌بندی‌کننده‌ای است که جزو شاخه روش هسته^۴ در یادگیری ماشین محسوب می‌شود. ماشین بردار پشتیبان را واپنیک در سال ۱۹۹۲ معرفی کرد و بر پایه تئوری یادگیری استاتیک^۵ بنا گردیده است. هدف این دسته الگوریتم‌ها تشخیص و متمایز کردن الگوهای پیچیده از طریق کلاسترینگ، دسته‌بندی، رنکینگ، پاکسازی و غیره در داده‌ها است. ایده اصلی در ماشین بردار پشتیبان این است که:

- با فرض اینکه دسته‌ها به صورت خطی جداپذیر باشند، ابرصفحه‌هایی با حداکثر حاشیه^۶ را به دست می‌آورد که دسته‌ها را جدا کنند.
- در مسایلی که داده‌ها به صورت خطی جداپذیر نباشند داده‌ها به فضای با ابعاد بیشتر نگاشت پیدا می‌کنند تا بتوان آنها را در این فضای جدید به صورت خطی جدا کرد.
- در مورد ماشین بردار پشتیبان تحقیقات زیادی در کشور انجام شده است؛ مانند صالح‌پور و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که این الگوریتم علی‌رغم دقت بالایی که دارد اما بهتر است که در کاربردهای عملی به عنوان ورودی شبکه قرار گیرد [۱۱].

¹ Classification

² Clustering

³ Numeric predication

⁴ Kernel Methods

⁵ Statistical learning theory

⁶ Maximum margin

ماشین بردار پشتیبان یک متد بر مبنای یادگیری ماشین است که اساس آن یادگیری با کمک اطلاعات است که داده‌ها را با کمک بردارهای پشتیبان که الگوهای داده‌ای را بیان می‌کنند کلاس‌بندی می‌کند. برای دسته‌بندی داده‌ها به دو دسته باید تابع $f(X)$ پیدا کنیم؛ به طوری که $Y_i = f(x_i)$ برای N داده تابع f را بتوان به این صورت تعریف کرد:

$$F(x) = \text{sgn}(\sum_{i=1}^I a_i y_i (x_i \cdot x - b)) \quad (1)$$

که در آن ۱ تعداد رکوردهایی هستند که برای آموزش استفاده می‌شوند $\{ -1, 1 \}$ و $a_i y_i$ عددی مثبت و کوچک‌تر از عدد ثابت C است و x_i نیز بردار پشتیبان است. اما اگر تابعی که برای دسته‌بندی استفاده می‌شود خطی نشود، باید داده‌ها را به ابعادی بالاتر ببریم تا تابع جداکننده آنها تابعی خطی بشود. برای این کار تبدیل به صورت زیر درمی‌آید که در آن $k(x_i, x)$ تابع هسته نامیده می‌شود که همان تابعی است که برای بردن داده‌ها به بعد بالاتر استفاده می‌شود.

$$F(x) = \text{sgn}(\sum_{i=1}^I a_i y_i k(x_i, x) + b) \quad (2)$$

تابع هسته می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد و به دسته‌های مختلفی تقسیم شود که به علت پیچیدگی ریاضی بیان آنها مشکل است. بیشتر انواع توابع هسته به صورت خطی هستند و تفاوتی میان خصوصیت‌های مختلف داده‌ها قائل نمی‌شوند. تابعی که در قسمت قبلی بیان شد یک تابع خطی است که همین خصوصیت را دارد که در آن با همه خصوصیات داده‌ها به طور یکسان رفتار می‌شود. این یکسان بودن رفتار کارایی را پایین می‌آورد و بر دقت ماشین بردار پشتیبان اثر منفی می‌گذارد. راه‌حلی که برای این کار به نظر می‌رسد این است که برای تابع هسته وزن در نظر بگیریم. این وزن‌ها برای تعیین اثر خصوصیت‌ها به کار می‌روند. در کاربرد مدرن یادگیری ماشینی، ماشین بردار پشتیبان یکی از قوی‌ترین و بادقت‌ترین روش‌ها در الگوریتم‌های یادگیری ماشینی است. ماشین بردار پشتیبان یکی از متدهای یادگیری امتحان شده است که برای طبقه‌بندی، پیش‌بینی و رگرسیون استفاده می‌شود. این متد، روشی نسبتاً جدید است که در سال‌های اخیر عملکرد خوبی در طبقه‌بندی در مقایسه با متدهای قدیمی‌تر مثل شبکه‌های عصبی پرسپترون^۱ داشته و روش بسیار ساده‌ای نیز می‌باشد. ماشین بردار پشتیبان به علت توانایی بالایش در طبقه‌بندی و برتری‌اش نسبت به سایر الگوریتم‌های طبقه‌بندی و رگرسیون بسیار محبوب شده است. در واقع ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی دوتایی^۲ طراحی شده است. بنابراین فرایند آن به سمت حل مسایل کلاسه‌بندی موجود بین رفتار عادی و غیرعادی یا مشکوک، بسیار مفید است. ماشین بردار، پشتیبان یک یادگیری ماشینی است که بردارهای یادگیری را در فضاهایی با ابعاد ویژگی‌های بالا ترسیم می‌کند و به هر بردار طبقه متناظرش برچسب می‌زند. اساس کار خوشه‌بندی ماشین بردار پشتیبان خوشه‌بندی داده‌ای خطی است و در بخش خطی داده‌ها، مهم‌ترین نکته این است که خط انتخاب شده بیشترین حاشیه اعتماد را داشته باشد. یافتن بهترین معادله خطی برای داده‌ها از طریق روش‌های QP انجام می‌شود که روش‌های معروفی در حل مسایل دارای محدودیت می‌باشند. قبل از عملیات تقسیم‌بندی خطی برای توانمندسازی ماشین برای طبقه‌بندی اطلاعات پیچیده‌تر، داده‌ها از طریق عملیات Phi به فضایی با بعد بالاتر منتقل می‌شوند. مشکلات و وجود آمده در ابعاد بالاتر را می‌توان از طریق قضیه دوتایی لاگرانژ برای تبدیل مسئله کمینه موردنظر به شکل

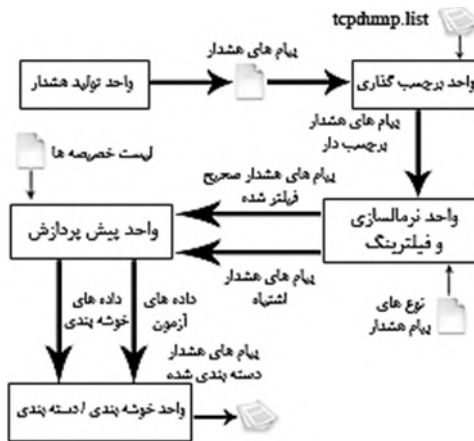
¹ Perceptron neural networks

² Binary

دوتایی حل کرد. بدین روش به جای استفاده از روش پیچیده‌ای مثل Phi می‌توان از عملیات ساده‌تری مثل کرنل استفاده کرد که بردار مضر بی از Phi می‌باشد. فرایند توسعه مدل ماشین بردار پشتیبان طبق آنچه در زیر می‌آید شامل سه مرحله است: پیش‌پردازش داده‌ها، توسعه مدل، استخراج مدل و در نهایت اجرا کردن آن. این الگوریتم قابل مقیاس‌گذاری است و حجم داده‌ها در عملکرد آن تأثیری ندارد. بنابراین پیچیدگی طبقه‌بندی بستگی به ابعاد فضای ویژگی‌ها ندارد. لذا در مقایسه با شبکه‌های عصبی، از این روش می‌توان برای یادگیری مجموعه بزرگی از مدل‌ها استفاده کرد. این الگوریتم براساس ساختار به حداقل‌رسانی ریسک طراحی شده و کاربردهای زیادی دارد و بسیار موفق بوده است [۱۲].

طراحی روش پیشنهادی

در این بخش، سیستمی برای انتخاب خصیصه با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در واحد پیش‌پردازش سیستم تشخیص نفوذ ارائه می‌شود. واحد پیش‌پردازش، وظیفه تبدیل مقادیر مختلف خصیصه‌ها به مقادیر قابل قبول سیستم را دارد که در این پژوهش به خصیصه‌های موردنظر اعدادی نسبت داده شده است. همچنین در ادامه، عمل خوشه‌بندی توسط الگوریتم درخت ID3 ارائه شده است. شکل ۵-۳ شمای کلی این سیستم را نشان می‌دهد. این ساختار از چندین واحد و تعدادی فایل تشکیل می‌شود که به عنوان ورودی یا خروجی این واحدها هستند. سیستم ارائه شده مستقیماً به هشدارهای تولید شده توسط سیستم تشخیص نفوذ وابسته می‌باشد. این امر بدین معنی است که سیستم، هشدارهای تولید شده توسط سیستم تشخیص نفوذ را به عنوان ورودی گرفته و سپس شروع به پردازش آن‌ها می‌کند. برای آماده‌سازی هشدارها از ابزار اسنورت [۱۳] به همراه مجموعه داده DARPA KDDcup99 استفاده می‌شود. ابزار اسنورت ترافیک مستقیم DARPA KDD cup 99 را دریافت و سپس فایل‌های ثبت هشدار را ایجاد می‌کند. از این فایل‌های ثبت هشدار، به‌عنوان ورودی‌های اولیه سیستم استفاده می‌شود [۱۴].



شکل ۵. شمای کلی سیستم خوشه‌بندی و دسته‌بندی هشدار [۱۳]

در شکل ۵ روند اجرای خوشه‌بندی در روش پیشنهادی به صورت شماتیکی نمایش داده شده است. در این شکل، مراحل انجام خوشه‌بندی و دسته‌بندی هشدار توصیف شده است.

اجرا

در روش پیشنهادی از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای انتخاب خصیصه‌های مورد نظر استفاده شده است. روش تقسیم‌بندی داده‌ها با استفاده از ماشین بردار پشتیبان از روش‌های شناخته شده در کلاس‌بندی داده‌ها می‌باشد که نیازی به تنظیم پارامترها از قبل و همچنین دانش اولیه از داده‌ها نمی‌باشد. مجموعه داده‌های آموزشی D شامل n عضو (نقطه) را در اختیار داریم که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \{(x_i, y_i) | x_i \in R^p, y_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^n \quad (۳)$$

مقدار y_i برابر ۱ یا -۱ و هر x_i یک بردار حقیقی p -بعدی است. هدف پیدا کردن ابرصفحه جداکننده با بیشترین فاصله از نقاط حاشیه‌ای است که نقاط با $y_i = 1$ را از نقاط با $y_i = -1$ جدا کند. هر ابر صفحه می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از نقاط x که شرط زیر را برآورده می‌کند نوشت:

$$w \cdot x - b = 0 \quad (۴)$$

$$\text{if } Y_i = +1 \quad wx_i + b \geq 1 \quad (۵)$$

$$\text{if } Y_i = -1 \quad wx_i + b \leq 1 \quad (۶)$$

$$\text{for all } i \quad y_i(w_i + b) \geq 1 \quad (۷)$$

در این معادله x یک نقطه برداری و w یک وزن برداری است. بنابراین برای جداسازی داده‌ها همیشه باید بیشتر از ۰ باشد. در میان تمام ابرصفحه‌های بالقوه، ماشین بردار پشتیبان را انتخاب می‌کند که فاصله ابرصفحه آن حداکثر ممکن باشد. اگر داده‌های آزمون منطقی باشد و هر بردار آزمون در شعاع r از بردار آموزش قرار داشته باشد. اگر ابرصفحه انتخابی، در بیشترین فاصله از داده‌ها قرار گرفته باشد، حاشیه‌ها را به حداکثر می‌رساند و خطوط نزدیک‌ترین نقاط مجموعه داده‌های پوسته محدب دو مجموعه نصف می‌شود. فاصله نزدیک‌ترین نقطه روی ابرصفحه به مبدا با به حداکثر رساندن x به دست می‌آید چون x روی ابرصفحه است. برای نقاط سمت دیگر نیز استراتژی مشابهی را در پیش می‌گیریم. با ثابت‌سازی و کسر دو فاصله، مجموع فاصله ابرصفحه جداکننده از نزدیک‌ترین نقاط به دست می‌آید.

برای تمام نقاط $1 \geq y_i(w_t x_i + b)$ ، باید منشور قائم درجه دوم را برای تمام محدوده‌های خطی بهینه کرد. راه‌حل شامل ساختن یک مسئله دو مجهوله است که در آن ضریب لاگرانژ a_i با تمام محدوده‌ها در مسئله اولیه در ارتباط است که به حداکثر رسیده و برای تمام $a_i \geq 0$ محاسبه می‌شود.

$$Q(a) = \sum a_i - \frac{1}{2} \sum \sum a_i a_j y_i y_j x_i^T x_j$$

راه‌حل به شکل زیر است:

$$w = \sum a_i y_i x_i \quad (۸)$$

$$b = y_k - w_t x_k \quad (۹)$$

حتی a_i ‌های غیر صفر که معادل x_i هستند یک محور پشتیبان می‌باشند. پس طبقه‌بندی شکل زیر را صورت خواهد گرفت:

$$f(x) = \sum a_i y_i x_i t_x + b \quad (10)$$

که بستگی به یک محصول داخلی بین نقطه آزمون x و بردارهای پشتیبان x_i دارد. حل مسئله بهینه‌سازی شامل محاسبه محصولات داخلی $x_i^T x_j$ بین تمام جفت نقطه‌های آموزش می‌باشد. فرمول قدیمی: پیدا کنید w و b را به طوری که $\Phi(w) = \frac{1}{2} w^T w$ به حداقل برسد و برای تمام $\{y_i, x_i\}$ ، $y_i (w^T x_i + b) \geq 1$ در ادامه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای تشخیص نفوذ با توجه به TrainD و TestD توضیح داده می‌شود.

$$MM = \frac{2}{\|w\|} \quad (11)$$

$$\Phi(w) = \frac{1}{2} w^T w \quad (12)$$

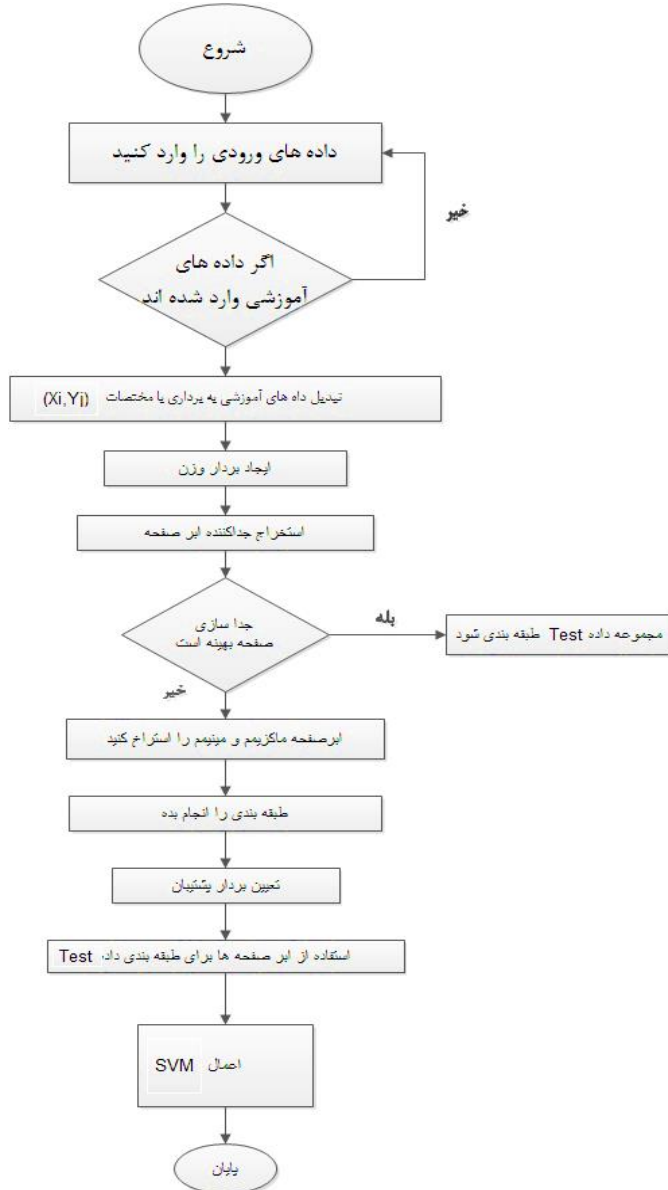
$$f(x) = \sum a_i y_i x_i^T x + b \quad (13)$$

پیش‌پردازش، اولین و مهم‌ترین گام در استفاده از ابزار استخراج داده می‌باشد. برای رسیدن به درست‌ترین نتایج از الگوریتم‌های استخراج داده، فرایند کشف اطلاعات نهفته در مجموعه داده باید انجام شود. در این الگوریتم داده‌ها باید مجزا باشند تا بتوان آنها را وارد الگوریتم lib ماشین بردار پشتیبان کرد. برای اجرای ماشین بردار پشتیبان هر نقطه داده باید توسط یک بردار شامل اعداد حقیقی نشان داده شود. برای یک ویژگی با تعداد m ردیف، m تعداد عدد استفاده می‌شوند و فقط یکی از این اعداد برابر با ۱ و بقیه برابر با ۰ هستند. بنابراین الگوریتم Discretize استفاده شده است. اندازه‌گیری داده‌ها قبل از اجرای ماشین بردار پشتیبان آن قدر مهم است که ویژگی‌های با بازه ارزشی کوچک‌تر توسط ویژگی‌هایی با بازه ارزشی بزرگ‌تر تحت تأثیر قرار نگیرند. مزیت دیگر این روش اجتناب از روبه‌رو شدن با مشکلات عددی در طول محاسبات است. از آنجایی که مقادیر هسته‌ای معمولاً مربوط به محصول درونی بردارهای ویژگی‌ها هستند (مثلاً هسته خطی یا هسته چند فرمولی) مقادیر بزرگ ویژگی‌ها ممکن است باعث ایجاد مشکلات عددی شوند. برای حل این مشکل هر ویژگی باید به صورت خطی روی نقاط $[1, 1]$ یا $[0, 1]$ اندازه‌گیری شود. گام بعدی، انتخاب ویژگی است. الگوریتم‌های زیادی برای انتخاب ویژگی وجود دارند. در این پروژه از ماشین بردار پشتیبان برای انتخاب استفاده شده است. بعد از تنظیم پارامترهای موجود در ماشین بردار پشتیبان ویژگی‌هایی که بالاترین تأثیر را در عملکرد سیستم دارند برای آزمایش دقت تشخیص استفاده می‌شوند. در این الگوریتم هسته RBF استفاده شده است. هسته RBF نمونه‌ها را به صورت غیرخطی وارد فضایی با ابعاد بزرگ‌تر می‌کند. RBF مشکلات عددی کمتری ایجاد می‌کند. در این روش، داده‌های آموزشی به دو بخش برابر تقسیم می‌شوند که یکی از آنها مبهم فرض می‌شود. بنابراین پیش‌بینی صحت مربوط به این مجموعه داده‌ها می‌تواند عملیات طبقه‌بندی را در مواجهه با داده‌های مبهم نشان دهد. در نرم‌افزار وکا تابع Lib ماشین بردار پشتیبان برای به‌کارگیری الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. این تابع یک مجموعه کامل برای طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (nu_svc) ، رگرسیون $(\text{epsilon_svr}, \text{nu_svr})$ و برآورد توزیع شده است. این تابع برای پشتیبانی از طبقه‌بندی چند مرحله‌ای طراحی شده است.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان مورد استفاده

داده‌های ورودی: مجموعه داده آموزش TrainD ، مجموعه داده آزمون TestD که طبقه‌بندی نشده است. داده‌های خروجی: مجموعه داده آزمون TestD که طبقه‌بندی شده است.

- ۱- تمام داده مجموعه داده آموزش را با (X_i, Y_j) شروع کنید که در آن X بردار داده x_1, \dots, x_n و Y بردار طبقات است.
- ۲- بردار وزن W را شروع کنید.
- ۳- تمام نقاط (x, y) را پخش کنید و جداکننده ابرصفحه را استخراج کنید.
- ۴- اگر ابرصفحه جداسازی بهینه داشته باشد از آن برای طبقه‌بندی مجموعه داده TestD استفاده کنید و پروسه را به پایان برسانید. در غیر این صورت گام‌های زیر را ادامه دهید.
- ۵- از طریق معادله (۳-۱۷) ابرصفحه را ماکزیمم و از طریق معادله (۳-۱۸) آن را مینیمم کنید.
- ۶- از طریق معادله ضریب لاگرانژ α_i بردار $\alpha_1 \dots \alpha_n$ را شروع کنید.
- ۷- از طریق معادله ۱۲ طبقه‌بندی را انجام دهید.
- ۸- بردارهای پشتیبان x_i را با α_i ناصفر تعیین کنید (یعنی نقاطی که محدوده ابرصفحه را نشان می‌دهند).
- ۹- ابرصفحه به وجود آمده از تعیین بردارهای پشتیبان به عنوان مدل طبقه‌بندی مجموعه داده آزمون TestD استفاده کنید.
$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i - b) \geq 1$$
 با اعمال الگوریتم ماشین بردار پشتیبان روی فایل ورودی نتایجی که در ادامه ارائه خواهند شد به دست می‌آیند.



شکل ۶. روند نمای روش پیشنهادی

نتایج به دست آمده

برای شبیه سازی سیستم ارائه شده، از نرم افزار وکا استفاده شده است. چندین ابزار جانبی توسط نرم افزار متلب نیز اجرا گردید که عملیات برچسب گذاری هشدارها، پیش پردازش آنها و عملیات ترکیب خوشه ها را انجام می دهند.

برای شبیه‌سازی سیستم ارائه شده ابتدا باید فایل‌های هشدار تولید شوند. برای این منظور ابزار اسنورت نصب می‌شود و سپس فایل‌های دودویی KDDcup99.DARPA که حاوی ترافیک ذخیره شده می‌باشند برای بررسی به اسنورت داده می‌شوند. ابزار اسنورت، این فایل‌ها را بررسی و هشدارهایی را تولید می‌کند. نرم‌افزار برچسب‌گذاری هشدارها، فهرست هشدارها را به همراه فایل‌های هشدار تولید شده، به‌عنوان ورودی دریافت و هشدارهای برچسب‌گذاری شده ایجاد می‌کند. برچسب‌های ایجاد شده برای هشدارها برای آموزش و آزمون صحت عملکرد و ایجاد داده‌های آماری استفاده می‌شوند. پس از برچسب‌گذاری هشدارها، هشدارها وارد واحد فیلتر کردن و نرمال‌سازی می‌شوند. نحوه عملکرد این واحد در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است. خروجی این بخش دو دسته می‌باشد که یکی حاوی هشدارهای اشتباه و دیگری حاوی هشدارهای صحیح برچسب‌دار است. بعد از این مرحله این دو دسته هشدار وارد واحد پیش‌پردازش می‌شوند. چون سیستم تشخیص نفوذ برای کار خود نیاز به بردارهای داده‌ای دارد؛ در این بخش، هشدارهای وارد شده به بردارهای داده‌ای تبدیل می‌شوند. پس از تبدیلات لازم و تولید بردارهای داده‌ای، این بردارها وارد بخش خوشه‌بندی و دسته‌بندی می‌شوند و ابتدا توسط داده‌های آموزش، آموزش می‌بینند. در ادامه، الگوریتم پیشنهادی در محیط وکا و با دیتاست‌های معرفی شده ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه‌ای که با روش‌های پیشین انجام شده است حاکی از این قضیه است که دقت شناسایی نسبت به روش‌های پیشین، بهبود یافته است.

در ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده، از عباراتی مانند میزان دقت و درستی و ... استفاده می‌شود که در این قسمت به ارائه روابط و توصیف هر یک پرداخته شده است. معیارهای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های یادگیری معمولاً شامل درستی^۱، دقت^۲، صحت^۳ می‌باشند. با توجه به نتایج این معیارها می‌توان در مورد عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده بحث کرد. برای توضیح این چهار معیار باید ابتدا اجزای موردنیاز برای محاسبه آنها بررسی شوند. این اجزا شامل چهار مورد مثبت درست^۴، مثبت نادرست^۵، منفی درست^۶ و منفی نادرست^۷ می‌باشند.

مثبت درست: نمونه‌های بیماری که درست بیمار تشخیص داده شده‌اند.

مثبت نادرست: نمونه‌های سالمی که نادرست بیمار تشخیص داده شده‌اند.

منفی درست: نمونه‌های سالمی که درست سالم تشخیص داده شده‌اند.

منفی نادرست: نمونه‌های بیماری که نادرست سالم تشخیص داده شده‌اند.

نرخ درستی تشخیص تصاویر ورودی در پردازش تصویر، یکی از مسائل مهمی است که در روش‌های مختلف به‌عنوان یک پارامتر اصلی برای تعیین دقت تشخیص و درستی کار موردنظر قرار می‌گیرد. در حالت کلی برای روش‌های یادگیری با نظارت، به‌طور معمول ۸۰ درصد از داده‌ها در یادگیری ماشین به داده آموزش Train و ۲۰ درصد برای داده آزمون تعلق می‌گیرند.

$$\text{precision} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (14)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{P + N} \quad (15)$$

1 Accuracy

2 precision

3 recall

4 True Positive (TP)

5 False Positive (FP)

6 True Negative (TN)

7 False Negative (FN)

$$\text{sensitivity} = TP / (TP + FN) \quad (۱۶)$$

$$\text{specificity} = TN / (FP + TN) \quad (۱۷)$$

بحث پیرامون نتایج

ماشین بردار پشتیبان به علت توانایی بالایش در طبقه‌بندی و برتری‌اش نسبت به سایر الگوریتم‌های طبقه‌بندی و رگرسیون، بسیار محبوب شده است. در واقع، ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی دوتایی طراحی شده است؛ بنابراین فرایند آن به سمت حل مسائل کلاسه‌بندی موجود بین رفتار عادی و غیرعادی یا مشکوک، بسیار مفید است. ماشین بردار پشتیبان، یک یادگیری ماشینی است که بردارهای یادگیری را در فضاهایی با ابعاد ویژگی‌های بالا ترسیم می‌کند و به هر بردار، طبقه متناظرش را برچسب می‌زند. اساس کار خوشه‌بند ماشین بردار پشتیبان، خوشه‌بندی داده‌ای خطی است و در بخش خطی داده‌ها، مهم‌ترین نکته این است که خط انتخاب شده، بیشترین حاشیه اعتماد را داشته باشد. یافتن بهترین معادله خطی برای داده‌ها از طریق روش‌های QP انجام می‌شود که روش‌های معروفی در حل مسائل دارای محدودیت هستند. قبل از عملیات تقسیم‌بندی خطی برای توانمندسازی ماشین برای طبقه‌بندی اطلاعات پیچیده‌تر، داده‌ها از طریق عملیات Phi به فضایی با بعد بالاتر، منتقل می‌شوند. مشکلات به‌وجودآمده در ابعاد بالاتر را می‌توان از طریق قضیه دوتایی لاگرانج برای تبدیل مسئله کمینه موردنظر به شکل دوتایی حل کرد. بدین روش به جای استفاده از روش پیچیده‌ای مثل Phi می‌توان از عملیات ساده‌تری مثل کرنل استفاده کرد که بردار مضربی از Phi می‌باشد. فرایند توسعه مدل ماشین بردار پشتیبان، شامل سه مرحله است: پیش‌پردازش داده‌ها، توسعه مدل، استخراج مدل و در نهایت اجرای آن. این الگوریتم قابل مقیاس‌گذاری است و حجم داده‌ها در عملکرد آن تأثیری ندارد؛ بنابراین پیچیدگی طبقه‌بندی، بستگی به ابعاد فضای ویژگی‌ها ندارد؛ از این رو در مقایسه با شبکه‌های عصبی، از این روش می‌توان برای یادگیری مجموعه بزرگی از مدل‌ها استفاده کرد. این الگوریتم براساس ساختار به حداقل رسانی ریسک، طراحی شده و کاربردهای زیادی دارد و بسیار موفق بوده است. با توجه به موارد گفته‌شده، درخت تصمیم، گزینه مناسبی برای تشخیص هشدارهای نادرست و طبقه‌بندی آنها می‌باشد. فایل Alert در بردارنده دیتاست مربوط به یک هفته کاری از پایگاه داده 99 DARPA KDD cup می‌باشد. این فایل بعد از اینکه توسط نرم‌افزار اسنورت، ارزیابی شد با استفاده از فایل Tcp list برچسب‌گذاری می‌شود و به‌عنوان فایل ورودی در اختیار وکا قرار می‌گیرد تا الگوریتم درخت روی این فایل اعمال گردد. بعد از اعمال الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، نتایجی که در ادامه ارائه شده است به‌دست می‌آید.

در قسمت اجرا شده با نرم‌افزار متلب، از ماشین بردار پشتیبان برای تشخیص نفوذ استفاده شده است که برای این هدف، ابتدا داده، نرم‌لایز شد و سپس برای استفاده از برنامه متلب، ویرایش شد و استرینگ‌ها به عدد تبدیل شدند. فایل ویرایش‌شده داده‌ها در KDDCup99.txt ارائه شده است. برای استفاده از این فایل، دو فایل با نام‌های traindata.txt و testdata.txt ایجاد شده است که هر دوی این فایل‌ها مجموعه‌ای از داده‌های موجود در KDDCup99.txt است. در اجرای انجام‌شده در ابتدا داده‌های آموزشی ماشین بردار پشتیبان با هدف آموزش روش پیشنهادی و همین‌طور در ادامه برای آزمون صحت روش ماشین بردار پشتیبان موردنظر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت، پس از انجام این مراحل، خروجی به‌دست‌آمده شامل تعداد نفوذها و غیرنفوذها می‌باشد در داده‌های آموزشی با استفاده از یادگیری ماشین بردار پشتیبان می‌باشد.

در جدول ۱ نتایج به‌دست‌آمده از سایر روش‌ها در تشخیص نفوذ که توسط سایر محققان صورت گرفته است در مقایسه با روش ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است و نتایج، نشان‌دهنده یک بهبود در دقت شناسایی در روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

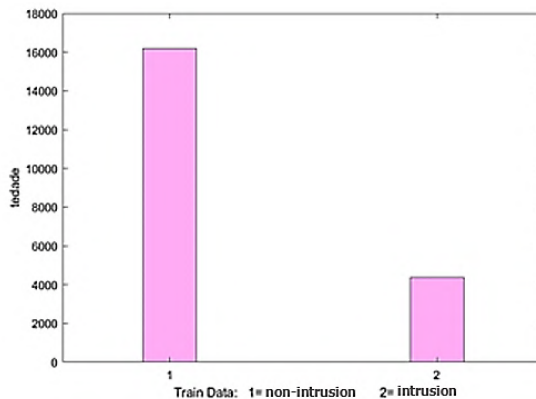
جدول ۱. مقایسه دقت شناسایی روش‌های مختلف

دقت شناسایی	الگوریتم
۹۸/۷۸	روش تابع عضویت اصلی ^۱
۹۷/۲۷	مدل ترکیبی گاوس کلاس نرمال
۹۳/۵۵	IID
۹۳.۳۰	ماشین بردار پشتیبان
۹۱	XCS سیستم طبقه‌بند
۸۶/۵۴	مدل ترکیبی گوسی داده‌های نرمال
۸۲/۰۲	درخت NB
۸۱/۵۹	درخت تصادفی
۸۰/۶۷	جنگل تصادفی ^۲
۷۷/۴۱	پرسپترون چندلایه ^۳
۷۶/۵۶	درخت بیز ساده ^۴

جدول ۲. ارائه پارامترهای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

پارامترها	ماشین بردار پشتیبان
Correctly Classified Instances	٪۹۸/۴۱۷۱
Incorrectly Classified Instances	٪۱/۵۸۲۹
Kappa statistic	٪۰/۹۶۸۱
Mean absolute error	٪۰/۰۲۸۶
Root mean squared error	٪۰/۱۲۱۷
Relative absolute error	٪۵/۷۵۲۸
Root relative squared error	٪۲۴/۴۰۵۵
Total Number of Instances	۱۲۵۹۷۳

در جدول ۲ مقادیر به‌دست‌آمده از اجرای روش پیشنهاد شده در محیط وکا ارائه گردیده است.



شکل ۷. مقایسه تشخیص نفوذ و غیرنفوذ در داده‌های آموزشی

¹ Membership function (MMF)

² Random forest

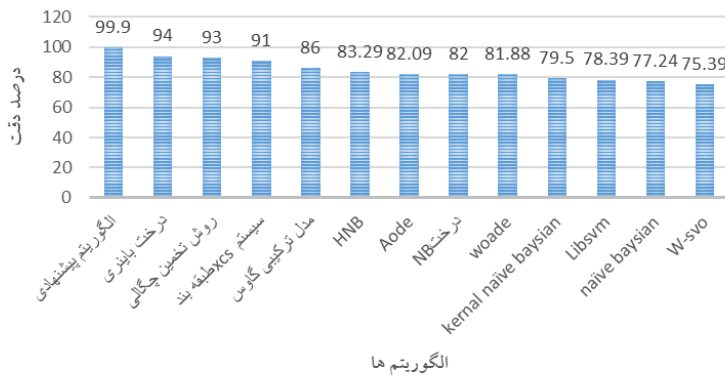
³ Multilayer perceptron (MLP)

⁴ Naive Bayes

در شکل ۷ نتایج حاصل از میزان تشخیص نفوذ و غیر نفوذ در روش پیشنهاد شده مبتنی بر روش ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است در این نمودار میزان نفوذ و غیر نفوذ در داده‌های آموزشی که ۷۰ درصد از کل داده‌های استفاده شده را تشکیل می‌دهند استفاده شده است. هدف از تشکیل این مقادیر و نمودار آموزش ماشین بردار پشتیبان برای تشخیص درست حملات می‌باشد.

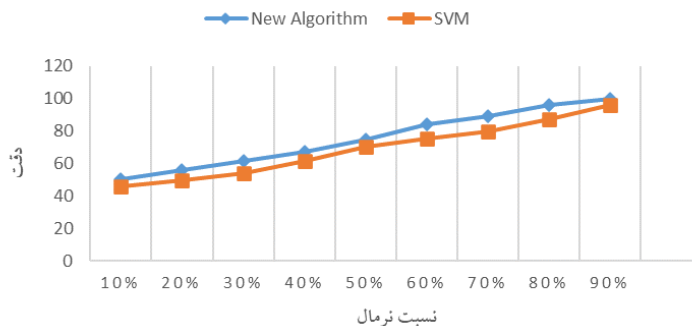
نتایج عددی و بررسی صحت نتایج

در این قسمت، مقادیر عددی به دست آمده ارائه شده است که نشان‌دهنده میزان افزایش دقت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی است. همین‌طور نمودارهای مقایسه‌ای در ادامه ارائه شده است. در نمودارهای زیر مقادیر نرخ تشخیص و دقت در روش‌های مختلف، مقایسه شده است.



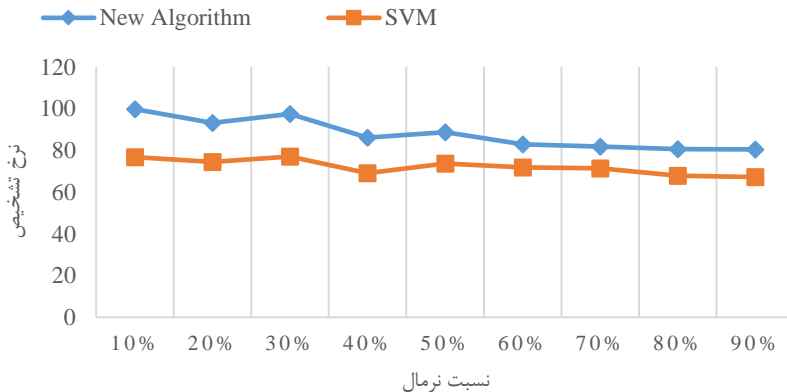
شکل ۸. نمودار مقایسه مقادیر دقت برای الگوریتم‌های مختلف

در شکل ۸ میزان دقت تشخیص نفوذ در سیستم‌های تشخیص نفوذ با استفاده از روش پیشنهادی و سایر روش‌ها که توسط سایر محققان و در مقالات متعدد صورت گرفته است، مقایسه‌ای صورت گرفته است و با توجه به نتایج به دست آمده روش ماشین بردار پشتیبان که در این مقاله به کار رفته به دلیل قدرت بسیار بالای این روش در طبقه‌بندی و دسته‌بندی بسیار خوب عمل کرده و بهبود قابل توجهی در مقایسه با روش‌های مشابه ایجاد کرده است.



شکل ۹. نمودار خطی مقایسه دقت شناسایی برای نسبت‌های مختلف

نمودار موجود در شکل دقت‌های مختلف به‌دست‌آمده در روش‌ها در روش پیشنهاد شده در این مقاله که مبتنی بر روش ماشین بردار پشتیبان است را نشان می‌دهد که طبق نمودار، روند دقت روش پیشنهادی، نسبت به مقادیر نسبی اعلام‌شده، سیر صعودی دارد و از دقت مناسبی در سیستم‌های تشخیص نفوذ برخوردار هستند.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه نرخ تشخیص هشدارها برای نسبت‌های مختلف

در شکل ۱۰ مقایسه‌ای در مقادیر به‌دست‌آمده از نرخ تشخیص در روش پیشنهادی در این مقاله که بر مبنای روش ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و درخت ID3 که برای انتخاب و خوشه‌بندی از این دو روش استفاده می‌کند، با روش ماشین بردار پشتیبان به‌تنهایی صورت گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از نرخ تشخیص، این روش به دلیل ترکیب با درخت و خوشه‌بندی داده‌ها توسط درخت ID3 کارایی بهتری نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان ساده پیدا کرده و نتایج قابل‌قبولی را برای سیستم‌های تشخیص نفوذ ارائه می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیستم جدید برای انتخاب خصیصه و مدیریت هشدار که قابلیت اجرای فعال را داشت، شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای آن ارائه شدند. نتایج به‌دست‌آمده از سیستم جدید با دیگر روش‌های مدیریت هشدار مقایسه گردید و مشاهده شد که سیستم جدید دارای دقت، سرعت و کارایی بسیار بالایی نسبت به دیگر روش‌های مدیریت هشدار مبتنی بر خوشه‌بندی است. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که این سیستم قادر به دسته‌بندی فعال هشدارهای سیستم‌های تشخیص نفوذ می‌باشد. دقت اجرای الگوریتم برای به‌دست آوردن هشدارهای درست به ۹۹/۹ درصد افزایش یافته است و نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه‌ای که با روش‌های پیشین انجام شده است حاکی از این قضیه است که دقت شناسایی نسبت به روش‌های پیشین، بهبود یافته است. با توجه به این نکته که هر روشی مزایا و معایب خاص خود را دارد روش پیشنهادی نیز در کنار مزایایی که بیان شد معایبی نیز دارد؛ از جمله معایبی که بر این روش وارد می‌باشد به این شرح است که محدودیت‌های ذاتی دارند؛ برای مثال، هنوز مشخص نشده است که به‌ازای یک تابع نگاشت، پارامترها را چگونه باید تعیین کرد، همین‌طور ماشین‌های مبتنی بر بردار پشتیبان به محاسبات پیچیده و زمان‌بر نیاز دارند و به دلیل پیچیدگی محاسباتی، حافظه زیادی نیز مصرف می‌کنند، از طرفی، داده‌های گسسته و غیرعددی هم با این روش سازگار نیستند و باید تبدیل شوند.

References

- [1] Liao, H.-J., Richard Lin, C.-H., Lin, Y.-C., & Tung, K.-Y. (2013). Intrusion detection system: A comprehensive review. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(1), 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.09.004>
- [2] García-Teodoro, P., Díaz-Verdejo, J., Maciá-Fernández, G., & Vázquez, E. (2009). Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges. *Computers & Security*, 28(1), 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2008.08.003>
- [3] Kim, G., Lee, S., & Kim, S. (2014). A novel hybrid intrusion detection method integrating anomaly detection with misuse detection. *Expert Systems with Applications*, 41(4, Part 2), 1690-1700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.066>
- [4] Azarksab, S., & Shiri Gheidari, S. (2009, February 17-18). *Detect database intrusions using event logging* Fifth International Conference on Information and Communication Technology Management, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/86437>
- [5] Brenton, C., & Hunt, C. (2006). *Mastering Network Security*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=1ismhXkqkc4C>
- [6] Maiwald, E. (2012). *Network Security A Beginner's Guide 3/E*. Mcgraw-hill. <https://books.google.com/books?id=te6071UbV0gC>
- [7] Ning, P., Cui, Y., & Reeves, D. S. (2002, November 18-22). Constructing attack scenarios through correlation of intrusion alerts. The 9th ACM conference on Computer and communications security, Washington, DC USA. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/586110.586144>
- [8] Wood, M., & Erlinger, M. (2007). Intrusion Detection Message Exchange Requirements. *RFC*, 4766, 1-25. <https://doi.org/10.17487/RFC4766>
- [9] Sweeney, M., Baumrucker, C. T., Burton, J. D., & Dubrawsky, I. (2003, November 20). *Cisco Security Professional's Guide to Secure Intrusion Detection Systems* (1st ed.). Syngress. <https://www.amazon.com/Security-Professionals-Intrusion-Detection-Systems/dp/1932266690>
- [10] McHugh, J. (2003). Testing Intrusion detection systems: a critique of the 1998 and 1999 DARPA intrusion detection system evaluations as performed by Lincoln Laboratory. *ACM Transactions on Information and System Security*, 3(4), 262-294. <https://doi.org/10.1145/382912.382923>
- [11] Salehpour, N., Nazari Farokhi, M., & Nazari Farokhi, E. (2015). Provida Method Based onSupport Vector Machines ForIntrusion Detectionin Computer Networks [Scientific research]. *Biannual Journal Monadi for Cyberspace Security (AFTA)*, 3(2), 51-64. <http://monadi.isc.org.ir/article-1-33-en.html>
- [12] Hashemi, S. M. (2013). Efficiency of SVM and PCA to enhance intrusion detection systems. *Journal of Asian Scientific research*, 3(4), 381-395.
- [13] Gollmann, D. (2011). *Computer Security*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=KTYxTfyjiOQC>
- [14] Hamidi, A., & Ziaei, S. M. (2009, July). *Introduction of Snort intrusion detection system*. T. I. Ferdowsi University of Mashhad and Iran Telecommunication Research Center. <https://cert.um.ac.ir/index.php?r=fileManager/getFile&id=193>



Investigating the Metric Dimension of an Intersection Graph in a Commutative Ring

Reza Nikandish^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Mathematics, Faculty of Science, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.28.2020

Revised: 01.18.2021

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Metric dimension

Resolving set

Metric basis Intersection graph

Ideal

Commutative ring

ABSTRACT

Suppose R is a uniform commutative ring. The R -dependent intersection graph, represented by the symbol $G(R)$, is a simple, directionless graph whose set of vertices is the set of all non-trivial ideals of R and two distinct vertices I, J are joined if and only if $I \cap J \neq (0)$. In this paper, the metric dimension of intersection graphs associated with commutative rings is examined and some metric dimension formulas for intersection graphs are provided.

*Corresponding Author:

Reza Nikandish

Email: r.nikandish@ipm.ir





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفاهول، تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۴۴-۳۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128394

20.1001.1.23829796.1399.17.4.2.0



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی بعد متریکی گراف اشتراک در یک حلقه جابه‌جایی

رضا نیک‌اندیش*

۱- استادیار، دپارتمان ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>فرض کنید R یک حلقه جابه‌جایی و یک‌دار باشد. گراف اشتراک وابسته به حلقه R که با نماد $G(R)$ نمایش می‌دهیم، گرافی ساده و بدون جهت است که مجموعه رئوس آن تمام ایده‌آل‌های نابدهی حلقه R است و دو رأس مجزای I و J با هم مجاور هستند اگر و تنها اگر $I \cap J \neq (0)$. در این مقاله بعد متریکی گراف‌های اشتراک وابسته به حلقه‌های جابه‌جایی را بررسی می‌کنیم و فرمول‌هایی برای بعد متریکی گراف‌های اشتراک ارائه می‌شود.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹</p> <p>کلید واژگان: بعد متریکی مجموعه تجزیه پایه متریک گراف اشتراک ایده‌آل حلقه جابه‌جایی</p>
	<p>*نویسنده مسئول: رضا نیک‌اندیش پست الکترونیکی: r.nikandish@ipm.ir</p>



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعه گراف‌های وابسته به حلقه‌ها، به یکی از مسائل جذاب در ترکیبیات جبری تبدیل شده است. بررسی خاصیت‌های گرافی، منجر به پیدایش خواص حلقه‌ها می‌شود. برای مثال می‌توان منابع [۴-۱] را نام برد. یکی از مسائلی که در این راستا بررسی می‌شود همان بعد متریکی گراف‌های وابسته به حلقه‌های جابه‌جایی است. این مفهوم، اولین بار در [۵] تعریف شده است. در [۴] بعد متریکی یکی از گراف‌های وابسته به حلقه‌ها محاسبه و بررسی شده است. در این مقاله، بعد متریکی گراف اشتراک وابسته به حلقه‌های جابه‌جایی را مطالعه می‌کنیم. در این مقاله، تمام حلقه‌ها جابه‌جایی و یک‌دار فرض می‌شوند و با R نمایش داده می‌شوند. حلقه R را کاهشی گویند هرگاه صفر آن تنها عنصر پوچ توان آن باشد در غیر این صورت آن را غیرکاهشی گویند. همچنین $Max(R)$ نشان‌دهنده مجموعه ایده‌آل‌های ماکسیمال R است. برای آشنایی تعاریف بیشتر در باره حلقه‌ها خواننده می‌تواند به [۶] مراجعه کند.

فرض کنید $G = (V, E)$ یک گراف باشد که در آن $V = V(G)$ مجموعه رئوس و $E = E(G)$ مجموعه یال‌ها است. یک گراف را هم‌بند گویند هرگاه بین هر دو رأس آن مسیر وجود داشته باشد. فرض کنید G یک گراف و x, y دو رأس متمایز از آن باشد. در این صورت کوتاه‌ترین مسیری که بین x و y وجود دارد را فاصله این دو رأس گویند و با $d(x, y)$ نمایش می‌دهند. همچنین قطر گراف G را که با $diam(G)$ نمایش می‌دهند برابر است با:

$$diam(G) = \sup\{d(u, v) \mid u, v \in V(G)\}.$$

فرض کنید G یک گراف باشد. مجموعه مرتب $S = \{V_1, V_2, \dots, V_k\} \subseteq V(G)$ را در نظر می‌گیریم. برای هر رأس $v \in V(G) \setminus S$ بردار $D(v|S) = (d(v, v_1), \dots, d(v, v_k))$ را متناظر می‌کنیم. مجموعه S را یک مجموعه تجزیه برای G گویند هرگاه هر رأس $v \in V(G) \setminus S$ دارای بردار متناظر متمایز باشد. به عبارت دیگر اگر $u, v \in V(G) \setminus S$ به طوری که داشته باشیم $D(u|S) = D(v|S)$ ، نتیجه شود که $u = v$. مجموعه تجزیه S از گراف G را که در بین تمام مجموعه‌های تجزیه G دارای کمترین تعداد عناصر باشد، را یک پایه متریک برای G نامند و تعداد عناصر این پایه را بعد متریکی گراف G گویند و با $dim_M(G)$ نمایش می‌دهند. برای نمادها و تعاریف بیشتر خواننده می‌تواند به [۴؛ ۷] مراجعه کند.

فرض کنید R یک حلقه جابه‌جایی و یک‌دار باشد. گراف اشتراک وابسته به حلقه R که با نماد $G(R)$ نمایش می‌دهیم، گرافی است که مجموعه رئوس آن تمام ایده‌آل‌های نابديهی حلقه R است و دو رأس I و J با هم مجاور هستند اگر و تنها اگر $I \cap J \neq (0)$. این گراف اولین بار در [۸] تعریف و به حلقه‌های جابه‌جایی وابسته شده است. در این مقاله بعد متریکی گراف‌های اشتراک وابسته به حلقه‌های جابه‌جایی را بررسی می‌کنیم و فرمول‌هایی برای به‌دست آوردن بعد متریکی این گراف ارائه می‌دهیم.

بعد متریکی گراف در حلقه‌های کاهشی

در این بخش، بعد متریکی گراف اشتراک را در حلقه‌های کاهشی به‌دست می‌آوریم. ابتدا نشان می‌دهیم که بعد متریکی گراف اشتراک متناهی است اگر و تنها اگر R تعداد متناهی ایده‌آل داشته باشد.

لم ۱-۲. فرض کنید R یک حلقه باشد. در این صورت گراف $G(R)$ هم‌بند است مگر آنکه R بصورت حاصل ضرب دو میدان باشد. علاوه بر این، در صورت هم‌بندی گراف، $diam(G(R)) \in \{0, 1, 2\}$.

اثبات: فرض کنید R به‌صورت حاصل ضرب دو میدان نباشد. فرض کنید I و J دو رأس متمایز از گراف $G(R)$ باشند به طوری که I و J مجاور نباشند. اگر $I + J \neq R$ ، آنگاه مسیر $I - I + J - J$ نشان می‌دهد که $d(I, J) = 2$.

اگر $R = I + J$ ، آن گاه با توجه به اینکه $I \cap J = (0)$ ، نتیجه می شود که $R = I \oplus J$. چون R به صورت حاصل ضرب دو میدان نیست، می توان ایده آل $K = I \oplus J'$ را طوری انتخاب کرد که $J' \subset J$ و $J' \neq (0)$. حال به راحتی می توان دید که $I - K - J$ یک مسیر به طول ۲ از I به J می باشد.

قضیه ۲-۲. فرض کنید R یک حلقه باشد. در این صورت $\dim_M(G(R)) < \infty$ اگر و تنها اگر R تعداد متناهی ایده آل داشته باشد.

اثبات: یک طرف حکم بدیهی است؛ زیرا اگر R تعداد متناهی ایده آل داشته باشد، آن گاه به طور بدیهی بعد متریکی آن متناهی است.

برعکس، فرض کنید که بعد متریکی گراف $G(R)$ متناهی باشد، نشان می دهیم که R تعداد متناهی ایده آل دارد. چون بعد متریکی گراف $G(R)$ متناهی است، فرض کنید که $S = \{x_1, \dots, x_k\}$ یک پایه متریک برای $G(R)$ باشد که در آن k یک عدد صحیح و مثبت است. چون $\text{diam}(G(R)) \in \{0, 1, 2\}$ ، نتیجه می شود که هر مؤلفه بردار $D(I|S)$ فقط ۳ حالت ممکن را دارد و لذا تعداد بردارها حداکثر $k - 3^k$ تا می تواند باشد. از طرف دیگر چون هر ایده آل باید یک بردار متمایز تولید کند؛ لذا نتیجه می شود که تعداد ایده آل های حلقه باید متناهی باشد.

قضیه ۳-۲. فرض کنید R یک حلقه کاهشی باشد. در این صورت اگر $\dim_M(G(R)) < \infty$ آن گاه:

$$\text{اگر } \dim_M(G(R)) = 1 \text{ آنگاه } |R| = 2 \text{ Max} \quad (1)$$

$$\text{اگر } \dim_M(G(R)) = 2 \text{ آنگاه } |R| = 3 \text{ Max} \quad (2)$$

$$\text{اگر } \dim_M(G(R)) = |R| \text{ آنگاه } |R| \geq 4 \text{ Max} \quad (3)$$

اثبات:

۱- چون $\dim_M(G(R)) < \infty$ ، از قضیه ۲-۲ نتیجه می شود که R تعداد متناهی ایده آل دارد. پس R یک حلقه آرینی است و چون کاهشی و $|R| = 2 \text{ Max}$ ، نتیجه می شود که R بصورت حاصل ضرب دو میدان می باشد. حال به سادگی دیده می شود که $G(R) = \bar{K}_2$. لذا $\dim_M(G(R)) = 1$.

۲- مشابه با اثبات ۱ و با توجه به اینکه $|R| = 3 \text{ Max}$ ، نتیجه می شود که $R \cong F_1 \oplus F_2 \oplus F_3$ که در آن F_1, F_2, F_3 میدان هستند. بنابراین:

$$V(G(R)) = \{0 \oplus F_2 \oplus F_3, F_1 \oplus 0 \oplus F_3, F_1 \oplus F_2 \oplus 0, F_1 \oplus 0 \oplus 0, 0 \oplus F_2 \oplus 0, 0 \oplus 0 \oplus F_3\}.$$

حال قرار می دهیم:

$$S = \{F_1 \oplus 0 \oplus 0, 0 \oplus 0 \oplus F_3\}$$

با محاسبه بردارهای متناظر برای سایر رئوس نشان می دهیم که S یک پایه متریک برای $G(R)$ می باشد. لذا داریم:

$$D(0 \oplus F_2 \oplus F_3 | S) = (2, 1)$$

$$D(F_1 \oplus 0 \oplus F_3 | S) = (1, 1)$$

$$D(F_1 \oplus F_2 \oplus 0 | S) = (1, 2)$$

$$D(0 \oplus F_2 \oplus 0|S) = (2,2).$$

دیده می‌شود که S یک پایه متریک برای $G(R)$ است و لذا $\dim_M(G(R)) = |S| = 2$.
 ۳- چون $\dim_M(G(R)) < \infty$ ، از قضیه ۲-۲ نتیجه می‌شود که R تعداد متناهی ایده‌آل دارد. پس R یک حلقه آرتینی است. لذا $\text{Max}(R)|\text{Max}(R)$ متناهی بوده و R به صورت حاصل ضرب n تا میدان نوشته می‌شود. پس $R \cong F_1 \oplus \dots \oplus F_n$ که در آن $\text{Max}(R) = n$. حال نشان می‌دهیم که $\dim_M(G(R)) = n$. لذا دو ادعای زیر را بیان و اثبات می‌کنیم.

ادعای ۱: $\dim_M(G(R)) \geq n$.

چون $\dim_M(G(R))$ متناهی است، فرض کنید که $W = \{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ یک پایه متریک برای گراف $G(R)$ باشد که در آن k یک عدد صحیح و مثبت است. چون $\text{diam}(G(R)) \in \{1, 2\}$ ، نتیجه می‌شود که برای هر $I \in V(G(R)) \setminus W$ فقط 2^k حالت ممکن برای بردار $D(I|W)$ وجود دارد. پس باید داشته باشیم، $|V(G(R)) \setminus W| \leq 2^k$ از طرف دیگر چون $|V(G(R)) \setminus W| = 2^n - k - 2$ ، نتیجه می‌شود که $2^n \leq 2^k + k + 2$. چون $n \geq 4$ ، بوضوح دیده می‌شود که $k = \dim_M(G(R)) \geq n$. بنابراین ادعای ۱ اثبات می‌شود.

ادعای ۲: $\dim_M(G(R)) \leq n$.

فرض کنید I_i ایده‌آلی از R باشد بطوری که مولفه i ام آن برابر F_i و بقیه مولفه‌های آن صفر باشند. قرار می‌دهیم:

$$W = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$$

نشان می‌دهیم که W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد؛ از این رو فرض کنید که $I, J \in V(G(R)) \setminus W$ دو رأس متمایز از گراف باشند. نشان می‌دهیم که $D(I|W) \neq D(J|W)$. اما این واضح است. چون باتوجه به اینکه $I \neq J$ نتیجه می‌شود که بعضی مولفه‌های I مخالف مولفه‌های J است. لذا بدون کاستن از کلیت می‌توان فرض کرد که مولفه اول I برابر با F_1 و مولفه اول J برابر با صفر باشد. بنابراین مؤلفه اول بردار $D(I|W)$ برابر با ۱ و مولفه اول بردار $D(J|W)$ برابر با ۲ است. این نشان می‌دهد که $D(I|W) \neq D(J|W)$ و لذا W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد. پس

$$k = \dim_M(G(R)) \leq |W| = n$$

حال از ادعاهای ۱ و ۲ نتیجه می‌شود که برای $n \geq 4$ ، $\dim_M(G(R)) = |\text{Max}(R)|$.

بعد متریکی گراف اشتراک در حلقه‌های غیر کاهشی

در این بخش، بعد متریکی گراف $G(R)$ را به دست می‌آوریم که در آن، R یک حلقه غیر کاهشی است. برای این کار اول به نکته زیر نیاز داریم:

نکته ۳-۱. فرض کنید G یک گراف هم‌بند باشد. فرض کنید

$$\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$$

یک بخش‌بندی برای رئوس G باشد، به طوری که برای هر $1 \leq i \leq k$ اگر $x, y \in v_i$ آنگاه داشته باشیم $N(x) = N(y)$ در این صورت:

$$\dim_M(G(R)) \geq |V(G)| - k$$

قضیه ۳-۱. فرض کنید $R \cong R_1 \oplus R_2 \oplus \dots \oplus R_n$ که در آن برای هر $1 \leq i \leq n$ ، (R_i, m_i) یک حلقه موضعی و آرتینی غیر میدان می‌باشد. فرض کنید $n_i \geq 3$ کوچک‌ترین عدد طبیعی باشد؛ به طوری که $m_i^{n_i} = (0)$. اگر برای هر $1 \leq i \leq n$ ، m_i یک ایده‌آل اصلی باشد، آن‌گاه:

$$\dim_M(G(R)) = \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^n - 1$$

اثبات: فرض کنید $I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n$ و $J = J_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus J_n$ دو رأس از $V(G(R))$ باشند. گوئیم I و J هم ارز هستند و می‌نویسیم $I \sim J$ ، اگر برای هر $1 \leq i \leq n$ ، داشته باشیم $I_i = (0)$ اگر و تنها اگر $J_i = (0)$ به راحتی می‌توان بررسی کرد که \sim یک رابطه هم‌ارزی روی $V(G(R))$ می‌باشد. فرض کنید $[I]$ نشان‌دهنده کلاس هم‌ارزی I باشد. فرض کنید $X, Y \in [I]$ حال چون برای هر ایده‌آلی مانند K ، $K \cap X \neq (0)$ اگر و تنها اگر داشته باشیم $K \cap Y \neq (0)$. نتیجه می‌شود که $N(X) = N(Y)$. چون تعداد کلاس‌های هم‌ارزی برابر با $2^n - 1$ تا است، لذا از نکته ۳-۱ نتیجه می‌شود که $\dim_M(G(R)) \geq |V(G(R))| - 2^n + 1$ از طرف دیگر چون

$$|V(G(R))| = \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2$$

لذا می‌توان نتیجه گرفت که

$$\dim_M(G(R)) \geq \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^n - 1$$

حال نشان می‌دهیم که

$$\dim_M(G(R)) \leq \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^n - 1$$

برای این کار مجموعه‌های

$$A = \{I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \in V(G(R)) \mid I_i \in \{(0), R_i\}\} \cup \{J(R)\}$$

و $W = V(G(R)) \setminus A$ را در نظر می‌گیریم. نشان می‌دهیم که W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد. فرض کنید:

$$I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \text{ و } J = J_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus J_n \text{ دو رأس متمایز از } A \text{ باشند. نشان می‌دهیم که}$$

$$D(I|W) \neq D(J|W)$$

اگر $I = J(R)$ باشد، آنگاه چون هیچ‌یک از مؤلفه‌های I صفر نمی‌باشد اما بعضی از مؤلفه‌های J برابر با صفر است لذا نتیجه می‌شود که $D(I|W) \neq D(J|W)$.

حال فرض کنید که هیچ کدام از I, J برابر $J(R)$ نباشد. چون مؤلفه‌های این دو رأس فقط از (0) و R_i تشکیل شده است، لذا بدون کاستن از کلیت می‌توان فرض کرد که $I_1 = (0)$ و $J_1 = R_1$. حال باتوجه به اینکه R_1 یک میدان نیست، می‌توان ایده‌آل نابديهی K_1 از R_1 را انتخاب کرد. قرار می‌دهیم $K = (0) \oplus \dots \oplus (0) \oplus K_1$. بهراحتی دیده می‌شود که K با J مجاور اما با I مجاور نمی‌باشد. با توجه به اینکه $K \in W$ ، نتیجه می‌گیریم که:

$$D(I|W) = (2, -, \dots, -) \neq (1, -, \dots, -) = D(J|W)$$

این نشان می‌دهد که W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد؛ لذا

$$\dim_M(G(R)) \leq |W|$$

از طرف دیگر چون $|W| = |V(G(R)) - A|$ و $|A| = 2^n - 1$ ؛ بنابراین:

$$\dim_M(G(R)) \leq \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - (2^n - 1) = \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^n + 1$$

قضیه ۳-۲. فرض کنید $F_m \oplus \dots \oplus F_1 \oplus R_n \oplus \dots \oplus R_2 \oplus R_1 \cong R$ که در آن برای هر $1 \leq i \leq n$ ، (R_i, m_i) یک حلقه موضعی آرتینی و برای هر $1 \leq i \leq m$ ، F_i یک میدان می‌باشد. فرض کنید $n_i \geq 3$ کوچک‌ترین عدد طبیعی باشد؛ به طوری که $m_i^{n_i} = (0)$. اگر برای هر $1 \leq i \leq n$ ، m_i یک ایده‌آل اصلی باشد، آن‌گاه:

$$\dim_M(G(R)) = 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} + m - 1$$

اثبات:

فرض کنید $I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \oplus I_{n+1} \oplus \dots \oplus I_{n+m}$ و $J = J_1 \oplus J_2 \oplus \dots \oplus J_n$ و $J_{n+1} \oplus \dots \oplus J_{n+m}$ دو رأس از $V(G(R))$ باشند. گوییم I و J هم‌ارز هستند و می‌نویسیم $I \sim J$ ، اگر برای هر $1 \leq i \leq n$ ، داشته باشیم $I_i = (0)$ و تنها اگر $J_i = (0)$ ، بهراحتی می‌توان بررسی کرد که \sim یک رابطه هم‌ارزی روی $V(G(R))$ می‌باشد. فرض کنید $[I]$ نشان‌دهنده کلاس هم‌ارزی I باشد. فرض کنید $X, Y \in [I]$. حال چون برای هر ایده‌آلی مانند K ، $K \cap X \neq (0)$ و تنها اگر $K \cap Y \neq (0)$ ، نتیجه می‌شود که $N(X) = N(Y)$. چون تعداد کلاس‌های هم‌ارزی برابر با $2^{n+m} - 1$ تا است؛ لذا از نکته ۳-۱ نتیجه می‌شود که

$$\dim_M(G(R)) \geq |V(G(R))| - (2^{n+m} - 1)J = |V(G(R))| - 2^{n+m} + 1$$

از طرف دیگر چون

$$|V(G(R))| = 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2$$

لذا می‌توان نتیجه گرفت که

$$\dim_M(G(R)) \geq 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} - 1$$

در واقع اگر فرض کنیم W یک پایه متریک برای $G(R)$ باشد، آن گاه ایده‌آلهایی که حداقل در یکی از مؤلفه‌های آنها ایده‌آل پوچتوان غیر صفر دارد به W تعلق دارد؛ زیرا کلاس‌های هم‌ارزی این عناصر بیشتر از یک عنصر دارند. پس می‌توان فرض کرد که حداکثر عناصری که بیرون از W می‌توانند قرار بگیرند عناصر مجموعه A است.

$$A = \{I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \oplus I_{n+1} \oplus \dots \oplus I_{n+m} \in V(G(R)) \mid I_i \in \{(0), R_i, F_i\}\} \cup \{m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \oplus F_{n+1} \oplus \dots \oplus F_{n+m}\}$$

حال مجموعه $B \subset A$ را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$B = \{I = R_1 \oplus \dots \oplus R_n \oplus I_{n+1} \oplus \dots \oplus I_{n+m} \in V(G(R)) \mid I_i \in \{(0), F_i\}\}$$

فرض کنید که I, J دو عنصر از B باشند. اگر واقعاً $W = V(G(R)) \setminus A$ باشد. آن گاه به راحتی دیده می‌شود که

$$D(I|W) = (1, 1, \dots, 1) = D(J|W)$$

که یک تناقض است. این تناقض نشان می‌دهد که برای پوشش دادن عناصر B یک رده از عناصر باید به W اضافه شود. فرض کنید E_{n+i} ایده‌آلی باشد که مؤلفه $n+i$ ام آن F_i و بقیه مؤلفه‌های آن صفر باشد. به کمک برهان قضیه ۲-۳ و با توجه به اینکه $|B| = 2^m - 1$ ، نتیجه می‌شود که حداقل عناصر برای پوشش دادن عناصر B ، عناصر C می‌باشد.

$$C = \{E_{n+1}, \dots, E_{n+m}\}$$

پس نتیجه می‌شود که

$$\dim_M(G(R)) \geq 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} - 1 + |C| = 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} - 1 + m$$

حال نشان می‌دهیم که

$$\dim_M(G(R)) \leq 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} - 1 + m$$

مجموعه‌های

$$A = \{I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \oplus I_{n+1} \oplus \dots \oplus I_{n+m} \in V(G(R)) \mid I_i \in \{(0), R_i, F_i\}\} \cup \{m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \oplus F_{n+1} \oplus \dots \oplus F_{n+m}\}$$

$$C = \{E_{n+1}, \dots, E_{n+m}\}$$

را در نظر می‌گیریم. قرار می‌دهیم $W = V(G(R)) \setminus \{A \setminus C\}$. نشان می‌دهیم که W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد.

فرض کنید $I = I_1 \oplus I_2 \oplus \dots \oplus I_n \oplus I_{n+1} \oplus \dots \oplus I_{n+m}$ و $J = J_1 \oplus J_2 \oplus \dots \oplus J_n \oplus \dots \oplus J_{n+1} \oplus \dots \oplus J_{n+m}$ دو رأس متمایز از $A \setminus C$ باشند. نشان می‌دهیم که

$$D(I|W) \neq D(J|W)$$

اگر $I = F_{n+m} \oplus \dots \oplus F_{n+1} \oplus m_n \oplus \dots \oplus m_2 \oplus m_1$ باشد، آن‌گاه چون هیچ‌یک از مؤلفه‌های I صفر نمی‌باشد اما بعضی از مؤلفه‌های J برابر با صفر است؛ لذا نتیجه می‌شود که

$$D(I|W) \neq D(J|W)$$

حال فرض کنید که هیچ‌کدام از I, J برابر با $F_{n+m} \oplus \dots \oplus F_{n+1} \oplus m_n \oplus \dots \oplus m_2 \oplus m_1$ نباشد. چون مؤلفه‌های این دو رأس فقط از (0) و R_i تشکیل شده است؛ لذا اگر برای بعضی از $1 \leq i \leq n$ ، $I_i = (0)$ و $J_i \neq (0)$ باشد، آن‌گاه بدون کاستن از کلیت می‌توان فرض کرد که $I_1 = (0)$ و $J_1 = R_1$. حال با توجه به اینکه R_1 یک میدان نیست، می‌توان ایده‌آل نابدهی K_1 از R_1 را انتخاب کرد. قرار می‌دهیم $K = K_1 \oplus (0) \oplus \dots \oplus (0)$. به راحتی دیده می‌شود که K با J مجاور اما با I مجاور نمی‌باشد. با توجه به اینکه $K \in W$ نتیجه می‌گیریم که

$$D(I|W) = (2, -, \dots, -) \neq (1, -, \dots, -) = D(J|W)$$

اگر برای هر $1 \leq i \leq n$ ، $I_i = (0)$ و تنها اگر $J_i = (0)$ ، آن‌گاه به راحتی می‌توان $K \in C$ را طوری پیدا کرد که با J مجاور اما با I مجاور نمی‌باشد. با توجه به اینکه $K \in W$ ، نتیجه می‌گیریم که

$$D(I|W) \neq D(J|W)$$

این نشان می‌دهد که W یک مجموعه تجزیه برای $G(R)$ می‌باشد. لذا

$$\dim_M(G(R)) \leq |W|$$

از طرف دیگر چون $|A| = 2^{n+m} - 1$ و $|W| = |V(G(R))| - |A| - |C|$. لذا داریم

$$\dim_M(G(R)) \leq 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2 - (2^{n+m} - 1) + m$$

و لذا

$$\dim_M(G(R)) \leq 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} - 1 + m$$

پس نتیجه می‌شود که

$$\dim_M(G(R)) = 2^m \prod_{i=1}^n (n_i + 1) - 2^{n+m} + m - 1$$

نتیجه‌گیری

در این مقاله، بعد متریکی گراف اشتراک بررسی و مطالعه شده است. نشان داده شده است که بعد متریکی این گراف، متناهی است اگر و تنها اگر حلقه R تعداد متناهی ایده‌آل داشته باشد. چون هر حلقه‌ای که تعداد متناهی ایده‌آل دارد، یک حلقه آرئینی است؛ لذا بعد متریکی این حلقه در صورت متناهی بودن فقط در حلقه‌های آرئینی بحث شده است؛ از این رو در چندین رده از حلقه‌های آرئینی بعد متریکی گراف $G(R)$ به دست آمده است.

تقدیر و تشکر

از داوران محترم که با ارائه پیشنهادهای ارزشمند خود موجب ارتقای سطح کیفی مقاله شدند بسیار سپاسگزاریم.

References

- [1] Nikandish, R., Nikmehr, M. J., & Bakhtiyari, M. (2015). Coloring of The Annihilator Graph of a Commutative ring. *Journal of Algebra and Its Applications*, 15(7), 1650124. <https://doi.org/10.1142/S0219498816501243>
- [2] Nikmehr, M., Nikandish, R., & Bakhtiyari, M. (2017). More on the annihilator graph of a commutative ring. *Hokkaido Mathematical Journal*, 46(1), 107-118. <https://doi.org/10.1142/S0219498819501603>
- [3] Pirzada, S., & Raja, R. (2017). On the metric dimension of a zero-divisor graph. *Communications in Algebra*, 45(4), 1399-1408. <https://doi.org/10.1080/00927872.2016.1175602>
- [4] Pirzada, S., Raja, R., & Redmond, S. (2014). Locating sets and numbers of graphs associated to commutative rings. *Journal of Algebra and Its Applications*, 13(07), 1450047. <https://doi.org/10.1142/S0219498814500479>
- [5] Harary, F., & Melter, R. A. (1976). On the Metric Dimension of a Graph. *Ars Combinatoria*, 2, 191-195. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=388665](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=388665)
- [6] Sharp, R. Y. (2000). *Steps in Commutative Algebra* (2nd ed.). London Mathematical Society student texts, Cambridge University Press. https://esploro.lib.uga.edu/discovery/fulldisplay?vid=01GALI_UGA:UGA&docid=alma9926528343902959&context=L
- [7] West, D. B. (2001). *Introduction to Graph Theory*. Prentice Hall. <https://books.google.com/books?id=TuvuAAAAMAAJ>
- [8] Chakrabarty, I., Ghosh, S., Mukherjee, T. K., & Sen, M. K. (2009). Intersection graphs of ideals of rings. *Discrete Mathematics*, 309(17), 5381-5392. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2008.11.034>



Electric Power Subsystem Modeling of a Remote Sensing Satellite Based on Multi-Input and Output Fuzzy Systems

Morteza Ramezani^{1*}

¹Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Enghelab Islami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.28.2020

Revised: 11.07.2020

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Satellite conceptual design
Fuzzy systems
Multi-input and multi-output
fuzzy
Remote sensing satellite
Electric power subsystem (EPS)

***Corresponding Author:**

Morteza Ramezani

Email: m-ramezani@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Modeling and analysis of systems, particularly in complex systems with noise and uncertainty in behavior recognition and decision making of systems, is of vital importance. In this article, such system problems were solved to the greatest degree possible based on fuzzy theory. This fuzzy system has four input variables and two output variables. Since the fuzzy rules were obtained from an experienced expert in Electric Power Subsystem (EPS) design, the results were expected to be more practical and logical in comparison with the real behavior of the subsystem. The proposed fuzzy system can model the qualitative data of an expert. The simulated results had suitable accuracy in conceptual design compared with the practical data of remote sensing satellites. The results also showed that fuzzy systems can be used effectively to design the EPS of a remote sensing satellite.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی زیرسیستم تأمین توان ماهواره سنجش از دور بر پایه سیستم‌های فازی چند ورودی-چند خروجی

مرتمزی رضائی^{۱*}

۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، ایران.

چکیده

از دیرباز، مسئله مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌ها خصوصاً در سیستم‌های پیچیده با دینامیک بالا همراه با نویز و عدم قطعیت در شناخت رفتار سیستم‌ها و تصمیم‌گیری، بسیار بااهمیت می‌باشد. در طراحی سیستم فازی مورد نظر از چهار متغیر به‌عنوان ورودی و دو متغیر به‌عنوان خروجی استفاده می‌شود. قوانین فازی بر مبنای تجربه فرد خبره در طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره سنجش از دور ارائه می‌گردد؛ لذا انتظار می‌رود نتایج عملی و منطقی‌تری بر اساس رفتار واقعی سیستم به‌دست آید. طراحی سیستم فازی پیشنهادی توانایی مدل‌کردن اطلاعات کیفی یک طراح خبره را نیز داراست. نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده در طراحی مفهومی دارای دقت مناسبی در مقایسه با داده‌های تجربی ماهواره‌های سنجش از دور می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های فازی می‌توانند برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره سنجش از دور به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

طراحی مفهومی ماهواره
سیستم‌های فازی
فازی چند ورودی- چند خروجی
ماهواره سنجش از دور
زیرسیستم تأمین توان

*نویسنده مسئول: مرتمزی رضائی

پست الکترونیکی:

m-ramezani@tvu.ac.ir



مقدمه

طراحی ماهواره، یکی از فرایندهای تکراری با پیچیدگی بالاست. علت اصلی این پیچیدگی، وجود متغیرها و پارامترهای زیاد و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر می‌باشد [۱-۴]. این موضوع در مرحله طراحی مفهومی از مراحل دیگر طراحی بیشتر نمود پیدا می‌کند. اهمیت پرداختن به مرحله طراحی مفهومی به عنوان اولین و مؤثرترین قدم در طراحی یک سیستم فضایی، کاملاً قابل درک است. از طرفی، به‌دست آوردن یک فرمول کلی که بتوان با آن طراحی مفهومی را با سرعت و بازده قابل قبول تخمین زد، وجود ندارد؛ بنابراین ایده استفاده از روش فازی که می‌تواند روش تفکر انسانی را اجرا کند می‌تواند به کیفیت و سرعت طراحی مفهومی محصولات هوافضا و به‌ویژه ماهواره کمک شایانی کند. یکی از زیرسیستم‌های اصلی در به انجام رسیدن مأموریت یک ماهواره، زیرسیستم تأمین توان ماهواره می‌باشد. در طراحی زیرسیستم تأمین توان، پارامترهای بسیاری وجود دارند که در این بین به‌دست آوردن اندازه و توان تولیدی آرایه‌های خورشیدی نقش به‌سزایی در سایزینگ این زیرسیستم را دارا می‌باشند.

سیستم‌های فازی یک محاسبات ریاضی مفهومی را برای تبدیل فرایندهای واقعی دانش بشری ارائه می‌کنند. این روشی است که برای ساختن دانش تجربی با در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده می‌شود. تئوری مجموعه‌های فازی را اولین بار لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ ارائه کرد. رفتار چنین سیستم‌هایی از طریق قوانین فازی به صورت اگر-آن‌گاه و با استفاده از متغیرهای زبانی قابل تشریح می‌باشد. سازوکار استنتاج فازی، شامل چهار مرحله است که عبارتند از: فازی‌سازی^۱، پایگاه داده و پایگاه قواعد، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی^۲ [۵].

منطق فازی، روشی بسیار مؤثر برای طراحی و کنترل سیستم‌های پیچیده است که از تجربه انسانی برای تهیه قوانین حاکم استفاده می‌کنند. این روش دارای امتیازات بسیاری از قبیل سادگی اجرا و عدم نیاز به مدل ریاضی برای طراحی است. بسته به طبیعت پیچیده طراحی زیرسیستم تأمین توان ماهواره، این روش دارای بازده بالایی برای شبیه‌سازی این نوع طراحی می‌باشد و لذا دارای پیشینه تحقیق بسیاری در علوم مختلف از قبیل پزشکی، شیمیایی، مهندسی برق، مکانیک و البته هوافضا می‌باشد. چنگ و همکارانش (۲۰۰۹) [۶] با استفاده از روش فازی یک کنترلر زیرسیستم کنترل وضعیت ماهواره طراحی کردند که نتایج نشان‌دهنده کوتاه‌تر شدن زمان هم‌گرایی و پایین‌تر آمدن خطای حالت پایدار بدون محاسبات پیچیده است. در تحقیق عزیز ارومیه همکارانش (۲۰۱۳) [۷] که به طراحی مفهومی در حوزه هوایی مرتبط می‌شود از روش فازی با تعداد ۵۹ قانون و سیستم استنتاج ممدانی استفاده شده و نتایج با میزان حداکثر خطای ۲۰/۹ درصد ارائه شده است. منتظری و سفری (۲۰۱۱) [۸] یک متدولوژی برای طراحی کنترلر سوخت موتور توربین گاز به‌منظور برآوردن الزامات عملکرد و قیود ایمنی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهند که این نظریه یک عملکرد تراست قابل قبول و حفاظت موتور در برابر سرعت‌های بالای موتور، درجه حرارت بالا و ضربان در کمپرسور را ارائه می‌دهد. شاهی آشتیانی و ملائک (۲۰۰۸) [۹] نشان دادند که چگونه یک ابزار تصمیم‌گیری می‌تواند بر مبنای منطق فازی توسعه یابد. تمایل اصلی این کار در نمایش قابلیت ارتجاعی و قدرت سیستم‌های منطق فازی به‌عنوان ابزاری در طراحی اولیه هواپیما می‌باشد. شاهی آشتیانی و ملائک، نتایج را بر اساس قوانین موتور استنتاج ممدانی در توافق بهتری نسبت به طرح‌های واقعی موجود در کلاس سیستم‌های حمل‌ونقل با مسافت بلند می‌دانند. نوابی و همکارانش [۱۰؛ ۱۱] به کنترل تلاطم سوخت در یک ماهواره در طول مانور مداری می‌پردازد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ اقدام به طراحی کنترلر فازی کرده است. نوابی و همکارانش (۲۰۱۸) [۱۲] برای طراحی یک کنترلر PD کوانترنیوم به‌منظور کنترل

¹ Fuzzification

² Defuzzification

³ Particle swarm optimization algorithm

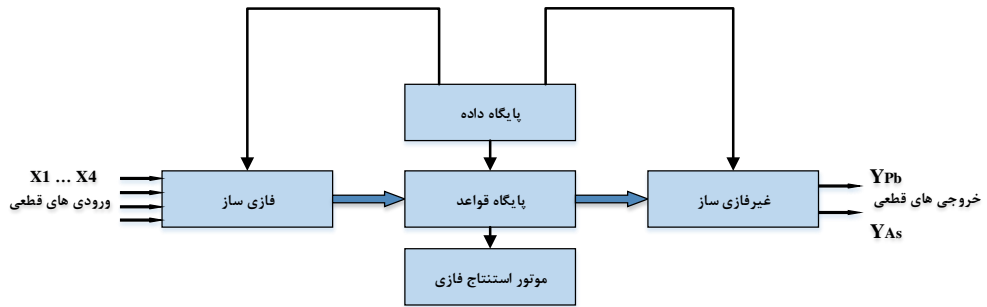
وضعیت ماهواره از روش فازی برای دینامیک غیرخطی استفاده کردند. ویلاموسکی و لی [۱۳] یک کنترلر منطق فازی برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان سیستم فتوولتائیک خورشیدی تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف را طراحی کردند. طاهربانه و منهاج (۲۰۰۷) [۱۴] همان منطق را برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان پنل‌های خورشیدی برای یک ماهواره LEO به کار بردند. مینگلیانگ و همکاران (۲۰۱۹) [۱۵] با استفاده از منطق فازی تکاملی به تشخیص عیوب داده‌ای در زیرسیستم توان یک ماهواره اقدام کردند. میرشمس و همکاران [۱۶] نیز از سیستم عصبی- فازی برای مدل‌سازی طراحی آرایه‌های خورشیدی در مرحله طراحی مفهومی اقدام کردند. دبیری و صفری [۱۷] برای برنامه‌ریزی‌های آموزشی و تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره و معصوم‌نژاد و همکاران [۱۸] به‌منظور تخمین مسیر حرکت یک جرثقیل سقفی از روش فازی استفاده کرده‌اند. از تلفیق ساختارهای فازی با شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی- فازی حاصل می‌شوند که برای شناسایی سیستم‌ها، طراحی کنترلرها و موارد متنوع دیگر به کار برده شده‌اند [۱۹-۲۲].

مدل‌سازی طراحی ماهواره یا زیرسیستم‌های ماهواره بر مبنای منطق فازی یا عصبی- فازی تا به حال در هیچ مرجعی ارائه نشده است و هدف اصلی این مقاله، نشان دادن میزان تأثیر و سرعت بخشیدن با دقت مطمئن تر روش فازی در طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این ابزار در راستای انتخاب و طراحی مناسب از قوانین نوشته‌شده توسط طراح خبره استفاده می‌کند. برای ارزش‌گذاری، از اجرای این روش در پنج ماهواره سنجش از دور بهره گرفته می‌شود و با داده‌های تجربی ماهواره‌ها مقایسه صورت می‌پذیرد.

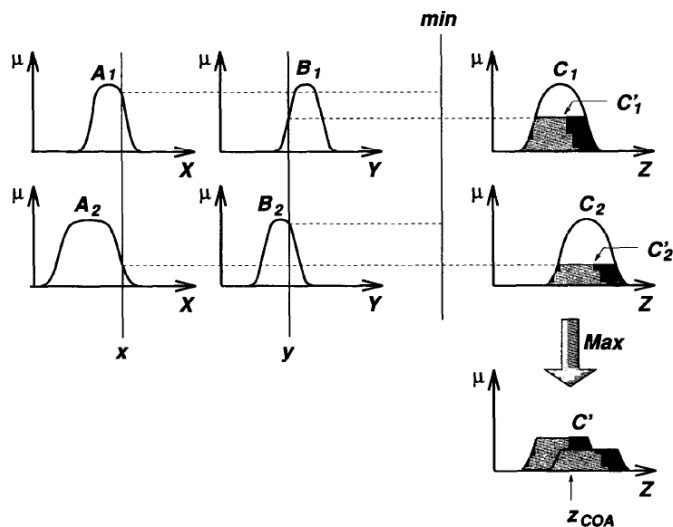
ساختار مفهومی سیستم فازی

هنگام طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره، پارامترهای بسیاری مدنظر قرار می‌گیرند. این پارامترها در بین مصالحات مختلف انجام گرفته سیستمی و زیرسیستمی به یکپارچگی و انسجام طراحی، منجر می‌گردند. رسیدن به یک طرح یکپارچه، مستلزم دارا بودن تجربه کاری و صرف زمان در حل محاسبات پیچیده است. با استفاده از روش فازی می‌توان تجربه را با در نظر گرفتن جامعیت پارامترها/داده‌ها به حل مسئله اعمال کرد و در زمان کوتاه‌تری به جواب مسئله هم‌گرا شد. باید توجه داشت که هراندازه داده‌های سیستم فازی بیشتر باشند، به همان اندازه، طراحی، از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. از طرفی، بیشتر بودن تعداد داده‌ها به بالاتر رفتن زمان محاسباتی و تعداد قواعد حاکم منجر می‌گردد؛ لذا با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل سرعت و دقت موردنظر می‌توان با در نظر گرفتن تجربه، تعداد متغیرها و میزان مؤثر بودن آنها را مشخص کرد.

ساختار کلی سیستم فازی با بخش‌های مرتبط در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل پنج بخش فازی‌ساز، پایگاه داده، پایگاه قواعد، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌ساز می‌باشد. بخش اول موجب می‌گردد تا متغیرهای ورودی به متغیرهای فازی یا غیرقطعی تبدیل گردند و بخش قواعد شامل کلیه قوانینی است که ارتباط متغیرهای زبانی را به یکدیگر و تولید قواعد موجب می‌گردد. بخش موتور استنتاج می‌تواند از روش‌های استنتاج ممدانی یا تاکاگی- سوگینو که دو تا از معروف‌ترین موتورهای استنتاج فازی هستند، برای نگاهت بخش اگر قواعد، به آن‌گاه آنها استفاده کند. در نهایت، بخش غیرفازی‌ساز موجب تبدیل مقادیر فازی خروجی به متغیرهای قطعی در خروجی می‌گردد. این‌ها مراحل اصلی یک سیستم فازی را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق، از موتور استنتاج ضرب ممدانی به دلیل سادگی محاسبات استفاده شده است [۷].



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم فازی با موتور استنتاج ضرب ممدانی



شکل ۲. نمایش موتور استنتاج مینیمم ممدانی [۷]

موتور استنتاج ممدانی، از عملگرهای حداقل و حداکثر برای ترکیب قوانین منطقی AND و OR استفاده می‌کند. این موتور استنتاج، برای اولین بار در کنترل مجموعه دیگ و موتور بخار، توسط برخی از قوانین زبانی به دست آمده از تجربه، توسعه داده شد. نحوه اجرای یک موتور استنتاج مینیمم ممدانی با دو قانون برای حالتی که تحت تأثیر دو ورودی X و Y قرار گرفته و خروجی فازی Z حاصل شده، در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۳].

در حالت کلی می‌توان مزایای سیستم‌های فازی را قابلیت بیان عدم قطعیت‌های ذاتی دانش بشری و سیستم‌ها را با استفاده از متغیرهای زبانی، تعامل ساده و مفهومی متخصصان یک حوزه با مهندسان طراح سیستم، تفسیر ساده با مفهوم منطقی نتایج به علت ارائه قوانین طبیعی، قابلیت تعمیم دانش فرد خیره از طریق اضافه کردن قوانین جدید یا اصلاح قوانین موجود، پایداری نسبی در برابر اغتشاشات احتمالی در سیستم و قابلیت توسعه برای سیستم‌های چندمتغیره، طبق تحقیق حاضر و معایب سیستم‌های فازی را ناتوان در عمومیت بخشیدن یا به عبارت

دیگر پاسخ دادن تنها به آنچه به عنوان قانون آن نوشته می‌شود و مشکل در سیستم‌های با ابعاد بالا که تفسیرپذیری را کاهش یا به‌طور قطعی از دست می‌دهد، در نظر گرفت.

طراحی سیستم فازی برای زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره

زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره، یکی از اصلی‌ترین زیرسیستم‌ها در طراحی یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این زیرسیستم از چهار بخش اصلی تأمین توان، ذخیره انرژی، کنترل و تنظیم توان و توزیع توان تشکیل می‌شود. در طراحی مفهومی این زیرسیستم، تأکید بیشتر بر طراحی معماری و راه‌اندازهای مأموریت ماهواره می‌باشد. وظایف اصلی این زیرسیستم در یک ماهواره سنجش از دور را به‌طور خلاصه می‌توان تأمین پیوسته توان الکتریکی ماهواره در طول کل مأموریت، کنترل و توزیع توان الکتریکی ماهواره، تأمین الزامات توان در حالت‌های حداکثر و میانگین مصرف و حفاظت محموله ماهواره در برابر واماندگی‌های ناشی از توان الکتریکی و تغییرات ولتاژ بیان کرد.

با توجه به موارد بالا و منبع [۴]، الزامات اصلی به‌دست‌آمده از مأموریت ماهواره شامل توان مصرفی، اطلاعات مداری (شامل شیب و ارتفاع مداری) و طول عمر ماهواره است که منجر به به‌دست‌آوردن نوع، اندازه و توان تولیدی آرایه‌های خورشیدی در مراحل اولیه طراحی می‌باشد. البته برای واضح‌تر گردیدن ارتباط زیرسیستم تأمین توان ماهواره با دیگر زیرسیستم‌ها جدول ۱ بیانگر مصالحات مختلف این زیرسیستم با دیگر زیرسیستم‌هاست. برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره ابتدا نیاز است که متغیرهای اصلی با در نظر گرفتن تجربه طراح و طراحی کلاسیک موجود [۴] مشخص شوند. جدول ۲ بیانگر متغیرهای ورودی و خروجی زیرسیستم تأمین توان در یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این متغیرها در مرحله مرور الزامات سیستم مشخص و ثابت می‌گردند. مدل‌سازی برخی از متغیرها مانند شرایط محیطی و نیازمندی‌های ولتاژ به مواردی فراتر از یک یا چند متغیر وابسته هستند و لذا خود نیازمند به مدل‌سازی مستقلی می‌باشند که هدف این مقاله نیست. در این متغیرها/پارامترها هدف، ثابت کردن و تعیین اولیه آنها برای وارد شدن به مرحله بعدی طراحی می‌باشد. بیان این نکته ضروری است که هر چند متغیری مانند مدت‌زمان خورشیدگرفتگی به ارتفاع مداری وابسته است اما در مدل‌سازی طراحی سیستمی می‌توان ثابت فرض کردن مقدار اولیه هر یک از این متغیرها را به‌عنوان متغیر مستقل ارائه‌شده از طرف مأموریت ماهواره در نظر گرفت. در این مقاله از چهار متغیر ورودی و دو متغیر خروجی برای طراحی زیرسیستم بر مبنای سیستم فازی استفاده شده است که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. پس از اتخاذ متغیرهای ورودی و خروجی زیرسیستم، باید برای این متغیرها با استفاده از تجربیات یک طراح خیره، مبادرت به انتخاب محدوده متغیرها، تعیین توابع تعلق فازی و نوع آنها و سپس تولید قواعد فازی براساس موتور استنتاج کرد.

محدوده در نظرگرفته شده برای هر یک از متغیرهای طراحی در قالب جدول ۴ نشان داده شده است. این محدوده‌ها با استفاده از پورتال مشاهده زمین [۲۴] طوری انتخاب شده‌اند که تقریباً بیشتر ماهواره‌های سنجش از دور را پوشش می‌دهند.

جدول ۱. مصالحات زیرسیستم تأمین توان ماهواره با دیگر زیرسیستم‌ها

خروجی از زیرسیستم توان	ورودی به زیرسیستم توان	زیرسیستم
مشخصه‌های ولتاژی باس	توان موردنیاز	الکترونیک محموله
ملاحظات EMC	سطوح ولتاژ موردنیاز	
	حفاظت‌های مورد نظر	

زیرسیستم	ورودی به زیرسیستم توان	خروجی از زیرسیستم توان
مخابرات محموله	توان موردنیاز سطوح ولتاژ موردنیاز اثر سایه‌اندازی حفاظت‌های موردنظر	مشخصه‌های ولتاژی باس ملاحظات EMC
حرارت	توان موردنیاز هیترها و روند کنترل آن‌ها سطوح ولتاژ موردنیاز تحلیل حرارتی آرایه‌های خورشیدی	مشخصه‌های ولتاژی باس محدوده‌های دمایی عملکرد اجزای زیرسیستم توان تلفات حرارتی اجزای زیرسیستم توان
پردازش	توان مورد نیاز محدودیت‌ها/ نوع/تعداد سیگنال‌های کنترلی نوع پردازش (متمرکز/گسسته)	مشخصه‌های ولتاژی باس الگوریتم‌های مدیریت/ جایگزینی توان نوع و تعداد سیگنال‌های مونتورشونده
کنترل وضعیت و موقعیت	توان مورد نیاز سطوح ولتاژ مورد نیاز نوع پایداری الزامات نشانه روی مدهای عملیاتی	مشخصه‌های ولتاژی باس
سازه	شکل و ابعاد ماهواره	نیاز به مکانیزم‌های بازشونده نیاز به مکانیزم‌های دنبال‌کننده خورشید وزن و ابعاد پانل‌ها، باتری و اجزای الکترونیکی ملاحظات اثر سایه‌اندازی چیدمان قطعات ملاحظات EMC
TT&C	توان مورد نیاز سطوح ولتاژ مورد نیاز اثر سایه‌اندازی حفاظت‌های موردنظر	مشخصه‌های ولتاژی باس ملاحظات EMC

با توجه به پراکندگی زیاد اعداد متغیرها، برای مدل‌سازی فازی طراحی زیرسیستم، تمامی آنها بین محدوده [۰، ۱] نرمالیزه شده‌اند. پس از تعیین محدوده، باید رفتار متغیرهای ورودی و خروجی را در قالب توابع تعلق سیستم فازی مشخص کرد. رفتار این توابع، تأثیر بسیار زیادی بر نتایج کار خواهند داشت؛ بنابراین ابتدا فراوانی کاربرد آنها تعیین و سپس به مدل‌سازی توابع اقدام شده است. توابع تعلق مجموعه‌های فازی ورودی، توابع گاوسی مطابق با اشکال مندرج در ضمیمه (۱) استفاده شده است.

جدول ۲. متغیرهای ورودی و خروجی طراحی زیرسیستم تأمین توان در مرحله مرور الزامات سیستم

خروجی‌های زیرسیستم توان	ورودی‌های زیرسیستم توان
ابعاد پانل‌ها	مدار (ارتفاع، مدت‌زمان خورشیدگرفتگی، شیب مداری)
نوع سلول‌های خورشیدی	طول عمر ماهواره
سایزینگ باتری‌ها	شرایط محیطی
توان تولیدی	الزامات انتخاب قطعات
معماری زیرسیستم	(پروفایل) توان مصرفی ماهواره
ولتاژهای قابل تأمین	نیازمندی‌های ولتاژ
	محدودیت‌های ابعادی
	محدودیت‌های فناوری

جدول ۳. متغیرهای انتخاب شده برای طراحی زیرسیستم تأمین توان و واحدهای در نظر گرفته شده

واحد	علامت به‌کارگرفته شده	نام متغیر	
km	H	ارتفاع مداری (کیلومتر)	متغیرهای ورودی
°	i	شیب مداری (درجه)	
year	L	طول عمر (سال)	
watt	Pe	توان مصرفی (وات)	متغیرهای خروجی
m ²	As	ابعاد آرایه خورشیدی (مترمربع)	
watt	Pb	توان تولیدی (وات)	

جدول ۴. محدوده انتخاب شده برای متغیرهای طراحی

محدوده خروجی‌های زیرسیستم توان	محدوده ورودی‌های زیرسیستم توان
ابعاد پانل‌ها [۴As, ۴۸]	مدار (ارتفاع) [H=۴۰۰, ۱۰۰۰]
توان تولیدی [Pb=۵۰۰, ۸۰۰۰]	مدار (شیب مداری) [i=۹۶, ۱۰۰]
	طول عمر ماهواره [L=۰, ۱۰]
	توان مصرفی ماهواره [Pe=۷۰۰, ۵۰۰۰]

برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره سنجش از دور، از مدل ممدانی و بلوک دیاگرام پیشنهادی شکل ۳ استفاده شده است. مطابق با بلوک دیاگرام نشان داده شده، سیستم فازی چند ورودی-چند خروجی بر مبنای قواعد به فرم زیر اجرا شده است:

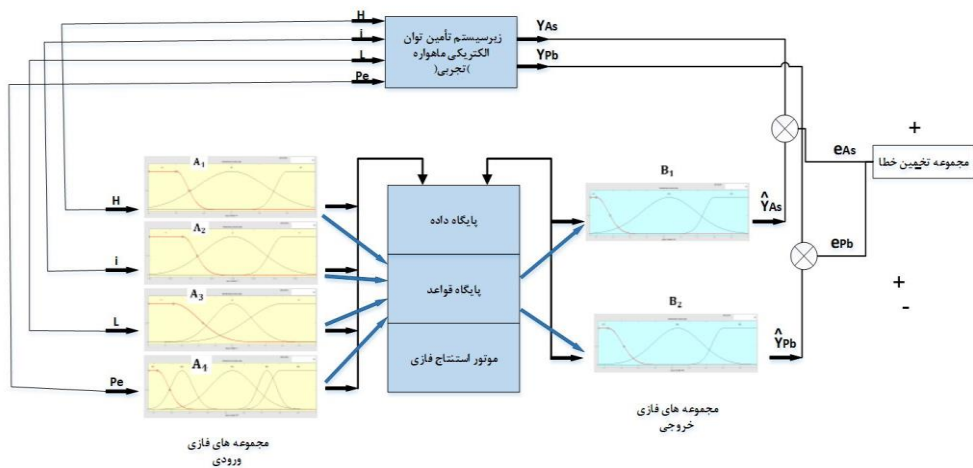
$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^l \text{ and } x_3 \text{ is } A_3^l \text{ and } x_4 \text{ is } A_4^l \text{ Then } y_j \text{ is } B_j^l R_l \quad (1)$$

که R_l بیانگر قانون l -ام $(l = 1, 2, \dots, m_1, m_2)$ ، x_i بیانگر متغیرهای ورودی $(i = 1, \dots, 4)$ ، y_j بیانگر متغیرهای خروجی $(j = 1, 2)$ و A_i^l و B_j^l بیانگر توابع تعلق مرتبط با متغیرهای به ترتیب شامل ورودی و خروجی می‌باشند. خروجی قطعی سیستم فازی با توجه به فرمول (۱) به صورت زیر می‌باشد:

$$y_1 = y_{As} = \frac{\sum_{l=1}^{m_1} \bar{y}_1^l \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i}^l}{\sum_{l=1}^{135} \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i}^l} \quad (2)$$

$$y_2 = y_{Pb} = \frac{\sum_{l=1}^{m_2} \bar{y}_2^l \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i}^l}{\sum_{l=1}^{135} \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i}^l} \quad (3)$$

تعداد قواعد به کار گرفته شده برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی مشتمل بر $(m_1, m_2=135)$ قانون با وزن های یکسان است (مطابق شکل (۳) نشان دهنده تعداد توابع تعلق ورودی می باشد) که بر مبنای تجربیات طراح زیرسیستم تأمین توان استخراج شده اند. همچنین برای اجرای سیستم فازی، از موتور استنتاج مددانی و جعبه ابزار فازی نرم افزار متلب^۱ استفاده شده است.



شکل ۳. بلوک دیاگرام پیشنهادی طراحی زیرسیستم تأمین توان سیستم فازی بر اساس فازی ساز و غیرفازی ساز مددانی

شبیه سازی و نتایج

نتایج به دست آمده از طراحی با مشخصات عملی پنج ماهواره سنجش از دور با مأموریت های عملیاتی معروف، مقایسه شده اند. داده های تجربی در نظر گرفته شده برای این ماهواره ها [۲۴] در قالب جدول (۵) لیست شده اند. همان طور که از جدول ۶ ملاحظه می شود، نتایج به دست آمده از شبیه سازی علاوه بر سرعت بسیار بالا در به دست آوردن نتایج، دارای دقت خوبی در مقایسه با داده های تجربی می باشند و این موضوع، بیانگر مناسب بودن سیستم در طراحی زیرسیستم تأمین توان ماهواره است. شکل های ۴ و ۵ مبین ابعاد آرایه خورشیدی و توان تولیدی در ابتدای مأموریت برای زیرسیستم تأمین توان می باشد. درصد خطا در هر یک از ماهواره ها و میانگین خطای مربوط به هر کدام از متغیرهای خروجی در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به اینکه این طراحی در فاز مفهومی می باشد، میانگین ۱۲/۰۵ درصد برای ابعاد آرایه خورشیدی و ۹/۳ درصد برای توان تولیدی آغاز مأموریت، نشان از دقت خوب این طراحی دارد.

^۱ MATLAB Fuzzy Toolbox

جدول ۵. داده‌های تجربی ماهواره‌های سنجنش از دور

نام ماهواره					متغیرها
Landsat-7	Aura	GOSAT	Spot-4	Resourcesat-2	
۷۰۵	۷۰۵	۶۶۶	۸۳۲	۸۱۷	ارتفاع
۹۸.۲	۹۸.۲	۹۸.۰۶	۹۸.۷	۹۸.۷۲	شیب مداری
۷	۶	۵	۵	۵	طول عمر
۱۵۵۰	۴۶۰۰	۳۸۰۰	۲۲۰۰	۱۲۵۰	توان مصرفی
۱۷	۴۰-۵۶	۲۵-۳۶	۲۵	۱۰۰۰۸	ابعاد آرایه خورشیدی
۱۹۵۳.۳۳	۵۶۰۸.۵۷	۴۴۸۲.۵۹	۲۵۹۵.۱۸	۱۴۷۴.۵۴	توان تولیدی

ورودی

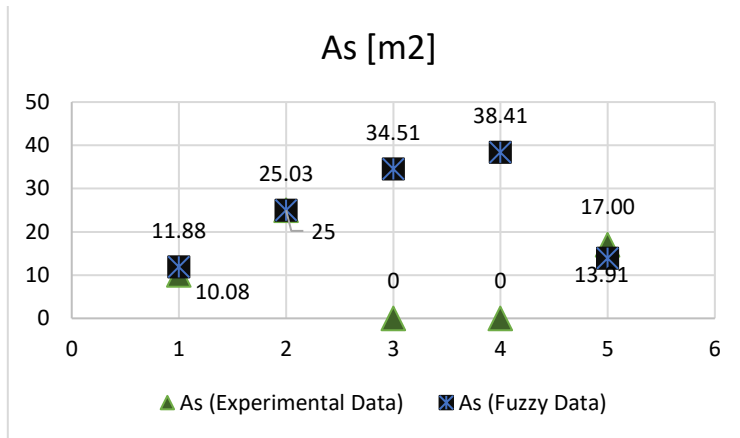
خروجی

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی طراحی زیرسیستم تأمین توان با مدل سازی سیستم‌های فازی

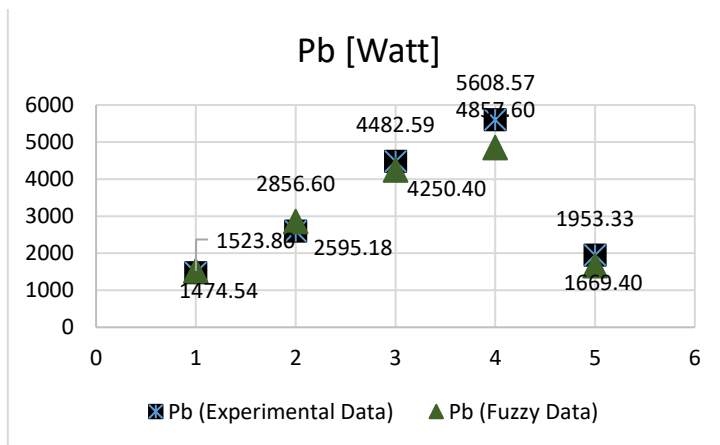
نام ماهواره					متغیرهای ورودی و خروجی
Landsat-7	Aura	GOSAT	Spot-4	Resourcesat-2	
۱۳.۹۱	۳۸.۴۱	۳۴.۵۱	۲۵.۰۳	۱۱.۸۸	ابعاد آرایه خورشیدی
۱۶۶۹.۴	۴۸۵۷.۶	۴۲۵۰.۴	۲۸۵۶.۶	۱۵۲۳.۸	توان تولیدی

جدول ۷. درصد خطای نسبی متغیرهای خروجی

درصد خطا	
توان تولیدی	ابعاد آرایه خورشیدی
۳.۳۴	۱۷.۸۶
۱۰.۰۷	۰.۱۲
۵.۱۸	۱۸.۱۸
۱۳.۳۹	
۱۴.۵۴	
میانگین	
۹.۳	۱۲.۰۵



شکل ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از طراحی متغیر سطح آرایه های خورشیدی زیرسیستم توان با داده های تجربی



شکل ۵. مقایسه نتایج به دست آمده از طراحی متغیر توان تولیدی زیرسیستم توان با داده های تجربی

نتیجه گیری

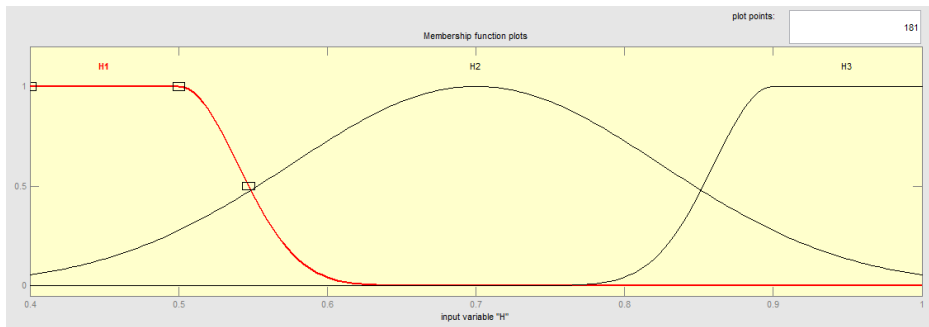
در این مقاله، به کاربرد مفهومی و توان تخمین سیستم های فازی براساس سیستم فازی ممدانی با موتور استنتاج ضرب چندورودی- چند خروجی، به طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره سنجش از دور پرداخته شده است. با استفاده از تجربیات طراح خبره، قواعد حاکم برای روش فازی استخراج گردید و توابع تعلق متغیرهای ورودی و خروجی نیز براساس بازه و فراوانی کاربرد آنها تعریف شد. مقایسه نتایج به دست آمده از این روش با داده های تجربی پنج ماهواره نشان داد که این روش، انطباق خوبی با داده های تجربی دارد و می توان از سیستم های فازی که قابلیت تخمین مناسبی دارند برای سرعت بخشیدن به فرایند طراحی مفهومی استفاده کرد.

References

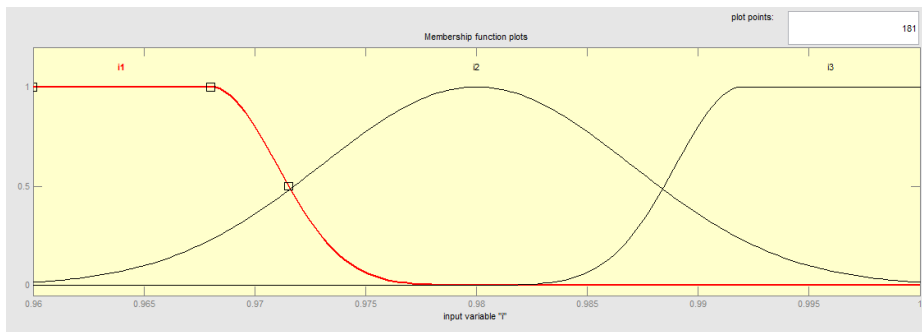
- [1] Larson, W., Kirkpatrick, D., Sellers, J., Thomas, L., & Verma, D. (2009). *Applied Systems Engineering - Space*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com/books?id=lyGjQQAACAAJ>
- [2] Ley, W., Wittmann, K., & Hallmann, W. (2009). *Handbook of Space Technology*. Wiley. https://books.google.com/books?id=vR7pg0xJQ_UC
- [3] Pisacane, V. L. (2005). *Fundamentals of Space Systems*. Oxford University Press. <https://books.google.com/books?id=uTwb7d8PTXMC>
- [4] Wertz, J. R., Everett, D. F., & Puschell, J. J. (2011). *(Space Mission Engineering: The New SMAD*. Microcosm Press. <https://books.google.com/books?id=VmQmtwAACAAJ>
- [5] Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall PTR. <https://books.google.com/books?id=wbJQAAAAMAAJ>
- [6] Cheng, C.-H., Shu, S.-L., & Cheng, P.-J. (2009). Attitude control of a satellite using fuzzy controllers. *Expert Systems with Applications*, 36(3, Part 2), 6613-6620. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.08.053>
- [7] Azizi Oroumieh, M. A., Mohammad Bagher Malaek, S., Ashrafzaadeh, M., & Mahmoud Taheri, S. (2013). Aircraft design cycle time reduction using artificial intelligence. *Aerospace Science and Technology*, 26(1), 244-258. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2012.05.003>
- [8] Montazeri-Gh, M., & Safari, A. (2011). Tuning of fuzzy fuel controller for aero-engine thrust regulation and safety considerations using genetic algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 15(3), 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2010.10.004>
- [9] Ashtiani, M., & Malaek, S. (2008). Optimum Selection of 'Number of Seats/Cargo Volume' for Transports in Uncertain Business Environment. *Journal of Aircraft - J AIRCRAFT*, 45(1), 98-105. <https://doi.org/10.2514/1.27865>
- [10] Navabi, M., & Davoodi, A. (2018, February 28-March 2). Fuzzy control of fuel sloshing in a spacecraft. 2018 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS), Kerman, Iran. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8336660>
- [11] Navabi, M., Davoodi, A., & Reyhanoglu, M. (2020). Optimum fuzzy sliding mode control of fuel sloshing in a spacecraft using PSO algorithm. *Acta Astronautica*, 167, 331-342. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.11.017>
- [12] Navabi, M., & Rajabali Fardi, M. (2018, February 28-March 2). Quaternion based fuzzy gain scheduled PD law for spacecraft attitude control. 2018 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS), Kerman, Iran. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8336660>
- [13] Wilamowski, B. M., & Li, X. (2002, November 5-8). Fuzzy system based maximum power point tracking for PV system. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, Seville, Spain. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1182924>
- [14] Taherbaneh, M., & Menhaj, M. B. (2007, May 6-11). A Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker for Body Mounted Solar Panels in LEO Satellites. 2007 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, Edmonton, AB, Canada. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4292092>
- [15] Suo, M., Zhu, B., An, R., Sun, H., Xu, S., & Yu, Z. (2019). Data-driven fault diagnosis of satellite power system using fuzzy Bayes risk and SVM. *Aerospace Science and Technology*, 84, 1092-1105. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.049>

- [16] Mirshams, M., Teshneh Lab, M., & Ramezani, M. (2018). Modeling the Solar Array Design of Remote Sensing Satellites Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Journal of Space Science and Technology*, 11(3), 1-8. http://jsst.ias.ir/article_81058.html?lang=en
- [17] Dabiri, M., & Safari, B. (2016). Application of the inventive fuzzy hierarchy process (IFAFP) integration methodology in prioritizing new fields in each region at the Technical and Vocational University of Iran. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 13(40), 63-75. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100494.html?lang=en
- [18] Masoumnezhad, M., Yasti Balaghi, A., & Nariman Zadeh, N. (2020). State Estimation of a Crane Using Fuzzy UHF. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 123-142. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112760>
- [19] Farooq, U., Khan, M. S., Ahmed, K., Saeed, M. A., & Abbas, S. (2011). Autonomous system controller for vehicles using neuro-fuzzy. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(6), 1-5. <https://www.researchgate.net/publication/259080180>
- [20] Marza, V., Seyyedi, A., & Capretz, L. F. (2008). Estimating development time of software projects using a neuro fuzzy approach. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 46(10), 575-579. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1061597>
- [21] Topalov, A. V., Kayacan, E., Oniz, Y., & Kaynak, O. (2009, August 27-29). Adaptive neuro-fuzzy control with sliding mode learning algorithm: Application to Antilock Braking System. 2009 7th Asian Control Conference, Hong Kong, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5276234>
- [22] Wang, W., Ismail, F., & Golnaraghi, F. (2004). A neuro-fuzzy approach to gear system monitoring. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12(5), 710-723. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2004.834807>
- [23] Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). *Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall. <https://books.google.com/books?id=vN5QAAAAMAAJ>
- [24] eoPortal. (2022, February 19). *Satellite Missions Directory - Earth Observation Missions - eoPortal*. The ESA Earth Observation Portal (eoPortal). <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>

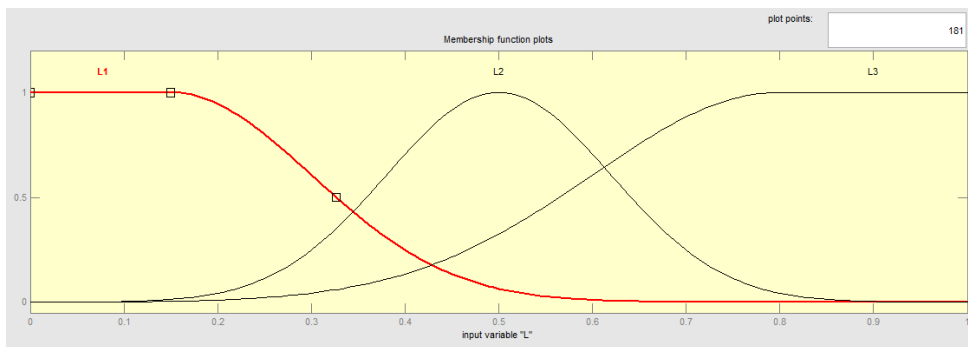
ضمیمه ۱. توابع تعلق متغیرهای زبانی ورودی و خروجی



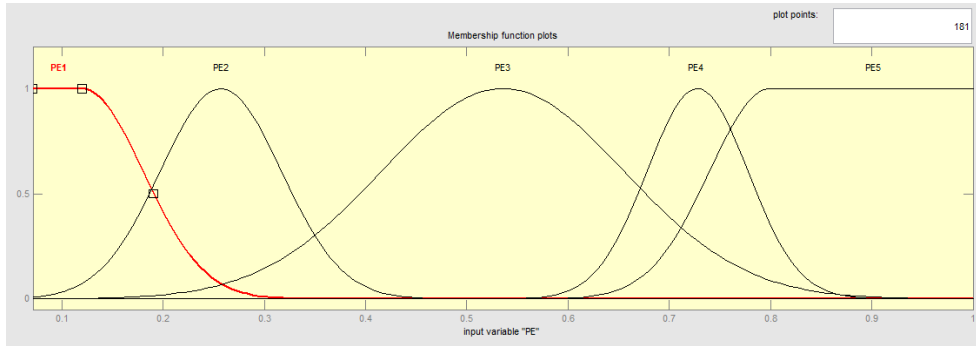
متغیر زبانی ورودی **H**



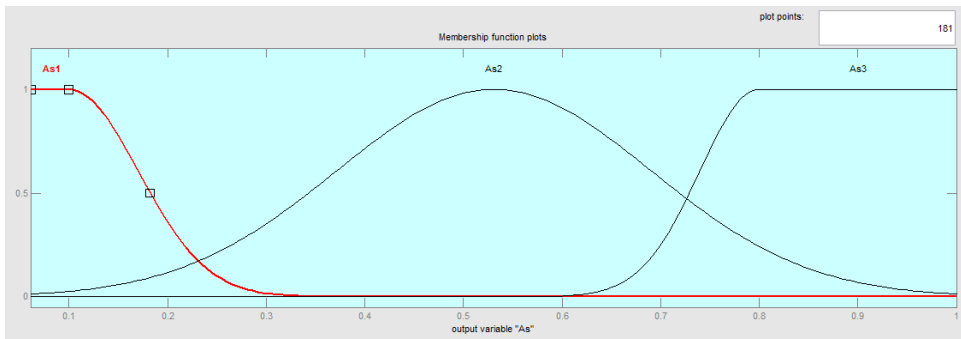
متغیر زبانی ورودی **i**



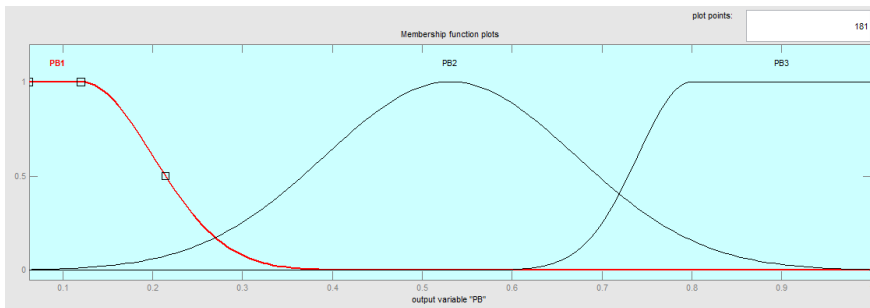
متغیر زبانی ورودی **L**



متغیر زبانی ورودی Pe



متغیر زبانی خروجی As



متغیر زبانی خروجی Pb



State Estimation of an Aviator Using Fuzzy Mixed Kalman/H-infinity Filter

Mohammad Ali Kazemi¹, Mojtaba Masoumnezhad^{2*} , Nematollah Askari³ 

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mofateh, Hamedan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Hamedan, Iran.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Chamran, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Guilan, Iran.

³Department of Mechanical Engineering, Faculty Member of Imam Khomeini, Behshahr Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mazandaran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.01.2020

Revised: 10.09.2020

Accepted: 01.15.2021

Keyword:

Kalman Filter
H-infinity Filter
State Estimation
Aviator
Fuzzy Logic Method

***Corresponding Author:**

Mojtaba Masoumnezhad

Email:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir

ABSTRACT

One of the most important problems in control engineering is state estimation of a dynamical system based on measured data corrupted by noises. One of the most popular algorithms used for state estimation of a linear discrete time dynamical system is mixed Kalman/H-infinity filter. The performance of this filter is essentially depending on how exact statistics of noise characteristics are available. It is also not guaranteed that the process noise covariance matrix, and the measurement noise covariance matrix remain constant with time in a highly non-stationary noise condition. Thus, it is imperative to continuously tune the mixed Kalman/H-infinity accounting for the changing noise conditions in order to get good filter performance. This paper presents an algorithm of fuzzy based mixed Kalman/H-infinity filter for dynamically tuning the process noise and measurement noise covariance matrices. Fuzzy system in every step of the process using the difference between the actual position and speed of the balloon and the amount of observed data by the observer, an adaptive produce and this factor is used to update covariance matrix values. In this way, the Fuzzy Mixed Kalman/H-infinity filter can be more accurately estimated system state variables and therefore always mean square estimation error is minimized.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تکنولوژی و مهارت

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۸۰-۶۱

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128396

20.1001.1.23829796.1399.17.4.4.2



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

شناسایی متغیرهای حالت یک هوانورد با استفاده از فیلتر ترکیبی کالمن / اچ - بینهایت فازی

محمدعلی کاظمی^۱، مجتبی معصوم نژاد^{۲*}، نعمت اله عسکری^۳

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده شهید مفتح همدان، دانشگاه فنی حرفه‌ای استان همدان، ایران.
- ۲- استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده شهید چمران رشت، دانشگاه فنی حرفه‌ای استان گیلان، ایران.
- ۳- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده امام خمینی بهشهر، دانشگاه فنی حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلات در مهندسی کنترل تخمین متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده مخدوش با نویز است. تخمین به کمک فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بینهایت یکی از روش‌های قدرتمند تخمین است که یک روش غیر تصادفی می‌باشد. به عبارت دیگر در این روش اندازه‌گیری‌ها و متغیرهای مدنظر تخمین نویزی بوده و اطلاعات دقیقی در مورد آنها وجود ندارد. در سیستم‌های دینامیکی با نویزهای شدید هیچ تضمینی برای ثابت ماندن مقادیر کوواریانس نویزهای فرآیند و مشاهده‌گر در طی زمان وجود ندارد، بنابراین بهتر است که به‌طور پیوسته مقادیر کوواریانس نویزهای فرآیند و مشاهده‌گر در الگوریتم فیلتر تخمین بهینه تغییر یابد، تا بتواند تخمین درستی از متغیرهای حالت سیستم ارائه دهد. در این مقاله یک راهبرد تطبیقی جدید از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بینهایت بر پایه منطق فازی برای تنظیم ماتریس‌های کوواریانس نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری ارائه شده است. سیستم فازی در هر مرحله از فرآیند با استفاده از اختلاف موقعیت و سرعت واقعی بالن و مقدار مشاهده شده توسط مشاهده‌گر، یک عامل تطبیقی برای بروزسانی مقادیر ماتریس کوواریانس تولید می‌کند. به این طریق فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بینهایت فازی می‌تواند متغیرهای حالت سیستم را دقیق‌تر تخمین زده و در نتیجه همواره مقدار تابع میانگین مجذور مربعات خطای تخمین حداقل می‌گردد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶

کلید واژگان:

فیلتر کالمن
فیلتر اچ-بینهایت
شناسایی متغیرهای حالت
هوانورد
منطق فازی

*نویسنده مسئول: مجتبی معصوم نژاد

پست الکترونیکی:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

در بافت‌های بدن، مسئله تخمین متغیرهای حالت سیستم‌های خطی و غیرخطی، موضوع مهمی در بسیاری از مسائل مهندسی کنترل می‌باشد. فیلتر بیزین^۱، مرسوم‌ترین روش تخمین است. از دیدگاه تئوری بیزین مسئله تخمین به معنای تخمین تابع چگالی احتمال پسین^۲ است. با دانستن چگالی احتمال پسین می‌توان تخمین بهینه حالت‌ها را نسبت به هر تابع معیاری محاسبه کرد اما این فیلتر دارای یک حل بسته نیست و از این رو برای اجرای عملی، مناسب نمی‌باشد. بسته به مدل فرایند و اندازه‌گیری، روش‌های مختلفی برای حل عملی فیلتر بیز وجود دارد. اگر مدل سیستم دینامیکی به صورت خطی باشد و نویزهای فرایند و اندازه‌گیری دارای ماهیت گوسی باشند یکی از متداول‌ترین روش‌ها استفاده از فیلتر کالمن است [۱].

فیلتر کالمن، یک الگوریتم پردازش اطلاعات بازگشتی است که تخمین متغیر حالت سیستم را از میان اغتشاشات با کوواریانس معلوم ارائه می‌دهد. این فیلتر زمانی بهینه است که شناخت دقیق از ماهیت نویزهای سیستم و اندازه‌گیری در دست باشد [۲] قالب اصلی فیلتر کالمن بر پایه سیستم خطی دارای نویز سفید بنا شده است. به همین دلیل فقط تحت فرضیات محدودکننده خطی بودن سیستم و همچنین سفید و مستقل بودن نویزهای سیستم و اندازه‌گیری بهینه بودن فیلتر کالمن تضمین شده است. هدف این فیلتر این است که از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ای که مشاهده‌گر دارای نویز با بی‌دقتی در طی زمان ثبت کرده است، استفاده کند و بتواند متغیرهای سیستم را تا حد بسیار نزدیکی به مقدار متغیر صحیح فرایند تخمین بزند [۳]. برای استفاده از فیلتر کالمن باید اطلاعات دقیق از ماهیت نویز از جمله میانگین، واریانس و انحراف معیار در دسترس باشد که گاهی اوقات این امر، مشکل یا غیرممکن است [۴].

در سال ۲۰۰۱ سونگ تاک و همکاران [۵] بر طراحی بهبودیافته فیلتر کالمن برای ردگیری رادار سه‌بعدی تحقیقاتی انجام دادند و به رویکرد جدیدی برای بهبود ردیابی رادار سه‌بعدی دست یافتند. این الگوریتم، یک ارزیابی صحیح از بی‌دقتی در تخمین غیرخطی می‌دهد. در سال ۲۰۱۱ یادایاه و همکاران [۶] یک فیلتر کالمن فازی برای تخمین حالت یک سیستم دینامیکی و تطبیق ماتریس نویز فرایند معرفی کردند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر فیلتر کالمن فازی نسبت به فیلتر کالمن ساده بوده است. به‌گونه‌ای که عملکرد فیلتر کالمن فازی در فقدان آمار صحیح از نویزهای فرایند و شرایط نویزهای غیرثابت و مدل غیرخطی سیستم بسیار قوی می‌باشد. همچنین در سال ۲۰۱۶ موسوی موید و همکاران از فیلتر کالمن فازی برای پالایش و تخمین داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های GPS استفاده کردند [۷].

در دهه‌های اخیر فیلتر اچ-بی نهایت توجه بسیاری از محققان را در مسائل مهندسی به خود جلب کرده است هدف اصلی فیلتر اچ-بی نهایت حداقل کردن خطای تخمین در بدترین حالت ممکن است. فیلتر اچ-بی نهایت فیلتری می‌باشد که به‌طور مشخص برای مقاوم‌سازی طراحی شده است و در این فیلتر به هیچ پیش‌فرضی از نویزهای سیستم و اندازه‌گیری نیاز نمی‌باشد و تنها شرط استفاده از آن متناهی بودن انرژی است. به همین دلیل تخمین فیلتر اچ-بی نهایت از فیلتر کالمن بسیار مقاوم‌تر است [۳]. در سال‌های اخیر، استفاده از این فیلتر در زمینه کنترل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به‌خصوص در مواردی که ویژگی‌های آماری نویز نامشخص می‌باشد و مدل‌سازی آن سخت است [۲].

به منظور دستیابی به بهترین ویژگی‌های فیلترهای کالمن و اچ-بی نهایت باید از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت بهره برد [۴؛ ۵] در نتیجه، این فیلتر ترکیبی مقدار بهترین میانگین مجذور مربعات خطای تخمین را از میان تمام تخمین‌های بدترین حالت تخمین خطا تعیین می‌کند [۸] که این منجر به نتایج دقیق‌تری در تخمین پارامترها و متغیرهای حالت شده است.

¹ Bayesian Field

² Probability Density Function Posterior

عملکرد مناسب فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت وابسته به نحوه انتخاب حد بالای طراحی فیلتر توسط طراح و همچنین غیرثابت در نظر گرفتن کوواریانس نویزهای فرایند و اندازه‌گیری است.

در سال ۲۰۱۴ معصوم‌نژاد و همکاران [۲] برای بهبود عملکرد فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت از بهینه‌سازی چندهدفه NSGA II استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در مقابل تغییرات نویزهای فرایند و مشاهده‌گر مقاوم بود و تخمین مناسبی از متغیرهای حالت عاری از نویز مدل دینامیکی ارائه می‌دهد و این به آن معنی است که می‌توان دقت تخمین فیلتر کالمن و مستقل از کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر بودن فیلتر اچ-بی نهایت را هم‌زمان در مقادیر تخمین زده شده مشاهده کرد.

تاکنون انواع مختلفی از ترکیب فیلترهای کالمن و اچ-بینهایت ارائه شده است که تمامی آن‌ها دارای نقاط ضعفی مانند ثابت در نظر گرفتن ماتریس‌های کوواریانس نویز و اندازه‌گیری هستند [۹-۱۱]. ولی در سیستم‌های دینامیکی با نویزهای شدید، هیچ تضمینی برای ثابت ماندن مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر در طی زمان وجود ندارد. بنابراین لازم به نظر می‌رسد که به‌طور پیوسته مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر در الگوریتم‌های فیلتر کالمن و اچ-بی نهایت تغییر یابد تا بتوانند این فیلترها تخمینی مناسب از متغیرهای حالت سیستم ارائه دهد. برای دستیابی به این هدف، در این مقاله، یک راهبرد تطبیقی جدید از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت بر پایه منطق فازی برای تنظیم ماتریس‌های کوواریانس نویزهای فرایند و اندازه‌گیری ارائه شده است. روش فازی به همراه فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت پیشنهاد می‌گردد. در فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت با استفاده از منطق فازی متناسب با تغییرات تابع خطای تخمین مقدار کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر به‌گونه‌ای تغییر می‌یابد که همواره میانگین مجذور مربعات خطای تخمین حداقل گردد.

تعریف مسئله و بیان فضای حالت

وقتی تحلیل‌های معادلات حرکت در حوزه زمانی مشخص گردد، بهتر است برای بیان چنین معادلاتی از مجموعه معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول استفاده شود. با در نظر گرفتن یک سیستم با k درجه آزادی که در آن q_1, q_2, \dots, q_k مختصه‌های تعمیم‌یافته جابه‌جایی می‌باشند، می‌توان معادلات حرکت را در شکلی از مختصه‌های تعمیم‌یافته در نظر گرفت و با به‌دست آوردن مختصه‌های سرعت تعمیم‌یافته به‌صورت $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_k$ و مختصه‌های شتاب تعمیم‌یافته به‌صورت $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_k$ که در آن $n=3k$ است. بردار n بعدی $\{x\}$ به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

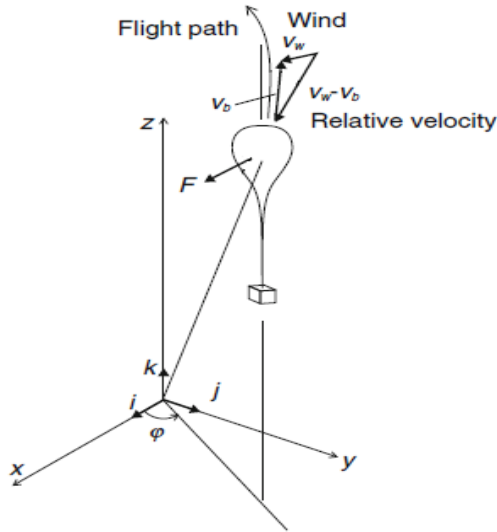
$$[x] = \begin{bmatrix} [q] \\ [\dot{q}] \\ [\ddot{q}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

سیستم مورد بررسی یک هوانورد هواشناسی می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. هوانورد به صورت یک ذره در فضا در نظر گرفته شده است. عوامل محیطی مانند وزش باد و عدم قطعیت‌های مدل به صورت نویزهای تصادفی و غیرثابت به سیستم اعمال شده‌اند. معادلات حرکتی زمان گسسته آن در فضای حالت به‌صورت معادلات (۲) و (۳) است [۴].

$$x_k = A x_{k-1} + w_{k-1} \quad (2)$$

$$y_k = H x_k + v_k \quad (3)$$

که در آن بردار متغیر حالت و بردار اندازه‌گیری، y_k بردار اندازه‌گیری، w_k نویز سفید با توزیع گوسی فرایند و v_k نویز سفید گوسی مشاهده‌گر است. ماتریس انتقال حالت و ماتریس H ماتریس خروجی می‌باشد [۵].
مدل فضای حالت هوانورد و مقداردهی اولیه برای ماتریس‌های کوواریانس‌های نویزهای فرایند و مشاهده‌گر Q ، R ، X_0 ، P_0 و A به صورت روابط (۴) تا (۸) در نظر گرفته شده است (تمام واحدها برحسب کیلومتر هستند).



شکل ۱. مدل پرواز هوانورد

ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R

انحراف استاندارد خطای اندازه‌گیری در راستای محورهای x ، y و z به صورت $\sigma = 0.01 \text{ km}$ و $\sigma^2 = 10^{-4}$ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مقداردهی اولیه ماتریس کوواریانس اندازه‌گیری نویز به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$R = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q

انحراف استاندارد از عناصر مختلف ماتریس نویز فرایند به صورت $\sigma_x = \sigma_y = 0.005 \text{ km}$ و $\sigma_z = 0.0025 \text{ km}$ و $\sigma_{\dot{x}} = \sigma_{\dot{y}} = 10^{-5} \text{ km/s}$ و $\sigma_{\dot{z}} = 5 \times 10^{-5} \text{ km/s}$ و $\sigma_{\ddot{x}} = \sigma_{\ddot{y}} = 10^{-4} \text{ km/s}^2$ و $\sigma_{\ddot{z}} = 5 \times 10^{-6} \text{ km/s}^2$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به مقادیر انحراف استاندارد، ماتریس اولیه نویز فرایند به صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$Q = \text{diag} \begin{bmatrix} 25 \times 10^{-6} \\ 1 \times 10^{-8} \\ 1 \times 10^{-10} \\ 25 \times 10^{-6} \\ 1 \times 10^{-8} \\ 1 \times 10^{-10} \\ 625 \times 10^{-6} \\ 25 \times 10^{-10} \\ 25 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

شایان ذکر است که سیستم فازی گنجانده شده در فیلتر ترکیبی پیشنهادی با توجه به مقادیر مختلف نویز، ارزش‌های متفاوتی را برای مقادیر کوواریانس‌های نویزهای فرایند و اندازه‌گیری در نظر می‌گیرد و به این صورت باعث عملکرد بهتر فیلتر پیشنهادی در این مقاله می‌شود.

ماتریس اولیه نویز خطا

انحراف استاندارد در راستاهای x ، y و z برابر 0.1 در نظر گرفته شده است. این مقدار برابر با مقدار خطای اندازه‌گیری واقعی مربوط به حالت‌ها می‌باشد. بنابراین $\sigma_{ez} = \sigma_{ey} = \sigma_{ex} = 0.01 \text{ km}$ و همچنین خطای استاندارد سرعت‌ها و شتاب‌های حالت به صورت $\sigma_{e\dot{x}} = \sigma_{e\dot{y}} = 0.002 \text{ km/s}$ و $\sigma_{e\ddot{x}} = \sigma_{e\ddot{y}} = 0.001 \text{ km/s}^2$ و $\sigma_{e\ddot{z}} = 4.4 \times 10^{-5} \text{ km/s}^2$ و $8.4 \times 10^{-5} \text{ km/s}^2$ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر انحراف استاندارد ماتریس اولیه کوواریانس خطا به صورت معادله (۶) خواهد بود:

$$P_o = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 \times 10^{-4} \\ 4 \times 10^{-6} \\ 7 \times 10^{-9} \\ 1 \times 10^{-4} \\ 4 \times 10^{-6} \\ 7 \times 10^{-9} \\ 1 \times 10^{-4} \\ 1 \times 10^{-6} \\ 2 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (6)$$

همچنین بردار متغیرهای حالت اولیه X_o و ماتریس انتقال حالت معادله دینامیکی هوانورد A به ترتیب در معادلات (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$X_o = \begin{bmatrix} 2/1298 \\ -0/0083 \\ -0/0525 \\ 3/2520 \\ 0/0281 \\ -0/2036 \\ 0/1430 \\ 0/0292 \\ -0/0376 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0/1 & 0/005 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0/1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0/1 & 0/005 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0/1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0/1 & 0/005 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0/1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

الگوریتم ترکیبی کالمن/اچ-بینهایت

فیلتر کالمن، میانگین مجذور مربعات خطای تخمین را کمینه می‌کند ولی فیلتر اچ-بی نهایت اثر نویز را در بدترین حالت کمینه می‌کند و از این رو از فیلتر کالمن بسیار مقاوم‌تر است [۸]. در [۱۲؛ ۱۳] به منظور ترکیب بهترین ویژگی فیلتر کالمن و بهترین ویژگی فیلتر اچ-بی نهایت، الگوریتم ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت ارائه شده است. تابع‌های هدف فیلترهای کالمن و اچ-بی نهایت به ترتیب توسط توابع هدف نشان داده شده در معادلات (۹) و (۱۰) تعیین می‌شوند.

$$J_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^N E(\|x_k - \hat{x}_k\|^2) \quad (۹)$$

$$J_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^N E(\|x_k - \hat{x}_k\|^2)}{\|x(0) - \hat{x}(0)\|_{P_0}^2 + \sum_{k=0}^N (\|w_k\|_{Q_0}^2 + \|v_k\|_{R_0}^2)} \quad (۱۰)$$

برای اینکه در معادلات سیستم هر دو تابع هدف منظور شوند، باید از معادله (۱۱) مقدار \hat{x}_{k+1} را با در نظر گرفتن شرایط مربوطه به دست آورد.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{F}_k x_k + K y_k \quad (۱۱)$$

الف) ماتریس \hat{F} باید پایدار باشد.

ب) تابع هدف فیلتر اچ-بی نهایت توسط محدوده انرژی نشان داده شده در معادله (۱۲) مقید باشد [۱۴].

$$J_\infty < 1/\theta \quad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن شرایط در حل مسئله، کمترین مقدار میانگین مجذور مربعات خطای تخمین در میان تمام تخمین‌گرهایی که بدترین خطای تخمین را محدود می‌کند، حاصل می‌شود. روند حل فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت به صورت معادلات (۱۳) تا (۱۷) است:

برای تعیین \hat{F} در الگوریتم فیلتر ترکیبی کالمن و H_∞ ماتریس مثبت نیمه معین P به گونه‌ای تعیین می‌گردد که معادله ریکاتی نشان داده شده در معادله ۱۳ برآورده شود. در هر مرحله ماتریس مثبت معین P که معادله ریکاتی (۱۳) را ارضا می‌کند، حاصل می‌گردد [۱۴]:

$$P = FPF^T + Q + FP \left(\frac{1}{\theta^2} - P \right)^{-1} PF^T - P_a V^{-1} P_a^T \quad (۱۳)$$

که در آن P_v و V به صورت معادلات (۱۴) و (۱۵) تعریف شده‌اند:

$$P_a = FPH^T + FP \left(I/\theta_2 - P \right)^{-1} PH^T \quad (14)$$

$$V = R + HPH^T + HP \left(I/\theta_2 - P \right)^{-1} PH^T \quad (15)$$

مقادیر ماتریس‌های \hat{F} و K به صورت معادلات (۱۶) و (۱۷) تعیین می‌گردند:

$$K = P_a V^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{F} = F - K \quad (17)$$

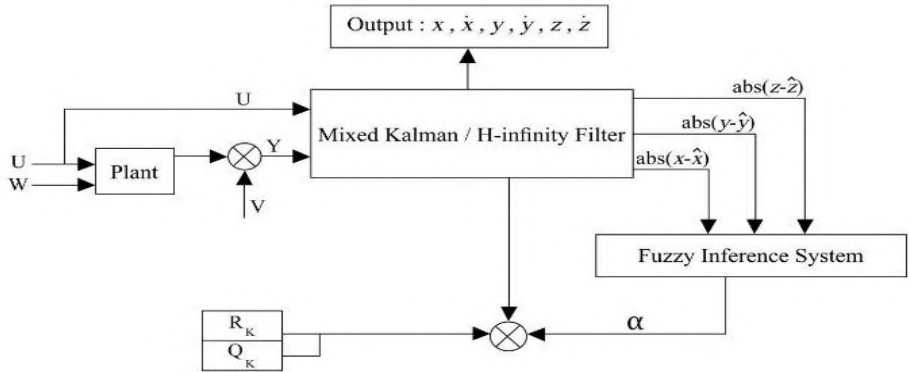
فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت فازی

فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت فازی، یک نوع زمان گسسته از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت است که ساختار فازی در آن یک عامل اسکالر α را برای تطبیق ماتریس‌های کوواریانس نویز فرایند Q و نویز اندازه‌گیری R تولید می‌کند. این عامل α در هر مرحله از زمان برای انطباق ماتریس‌های Q و R استفاده می‌شود تا بهترین تخمین از متغیرهای حالت سیستم برآورده شود و به این صورت به بهبود عملکرد زمان گسسته فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بینهایت در حضور نویزهای تصادفی و غیرثابت کمک می‌کند.

ساختار فازی

دیگرام بلوکی نشان داده شده در شکل ۲ عملکرد فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت فازی را نمایش می‌دهد. با مقداردهی اولیه خطای اولیه کوواریانس P_0 و بردار متغیرهای حالت‌های اولیه X_0 در الگوریتم ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت، زیرسیستم‌های فازی یک عامل اسکالر مناسب α را برای تطبیق ماتریس‌های کوواریانس Q و R در هر مرحله از زمان تولید می‌کنند تا ماتریس‌های کوواریانس به مقادیر جدید Q_k^{new} و R_k^{new} به روزرسانی شوند. همچنین در هر مرحله از زمان بردار اندازه‌گیری شده Z_k شامل مختصات هوانورد در سه راستا محاسبه می‌شود. اولین اختلاف بازگشتی S_k در هر مرحله از رابطه (۱۸) محاسبه شده و به عنوان ورودی زیر سیستم‌های فازی در نظر گرفته می‌شود.

$$S_k = Z_k - Z_{k-1} \quad (18)$$



شکل ۲. دی‌گرام بلوکی فیلتر ترکیبی کالمن /اچ-بی-نهایت فازی

انطباق فیلتر ترکیبی کالمن /اچ-بی-نهایت با استفاده از منطق فازی

زیرسیستم‌های فازی، اولین اختلاف بازگشتی S_k از موقعیت سه مختصات اندازه‌گیری شده در هر مرحله زمانی را به‌عنوان ورودی می‌پذیرد و پس از تولید عامل α با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) مقادیر کوواریانس را به‌روزرسانی می‌کند.

$$R_k^{new} = R_k / \alpha_k \quad (۱۹)$$

$$Q_k^{new} = Q_k / \alpha_k \quad (۲۰)$$

انتخاب ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی

متغیرهای ورودی از مقدار قدر مطلق اختلاف اندازه‌گیری شده از مختصات موقعیت واقعی هوانورد و موقعیت مشاهده شده با نام‌های x_{fa} ، y_{fa} و z_{fa} انتخاب می‌شوند. بنابراین ورودی سیستم فازی مقادیر $x - \hat{x}$ ، $y - \hat{y}$ ، $z - \hat{z}$ بوده و خروجی آن α_k می‌باشد. بازه متغیرهای ورودی مفروضه مربوطه جامعه آماری خوانده می‌شود. این جامعه آماری، از محاسبات مقادیر مطلق اولین اختلاف بازگشتی موقعیت اندازه‌گیری شده مختصات x ، y و z بدست می‌آید. جامعه آماری مربوطه از سه متغیر ورودی در جدول ۱ نشان داده شده است. بازه تغییرات متغیر خروجی زیرسیستم فازی α_k به‌صورت [0 100] انتخاب شده است [۶].

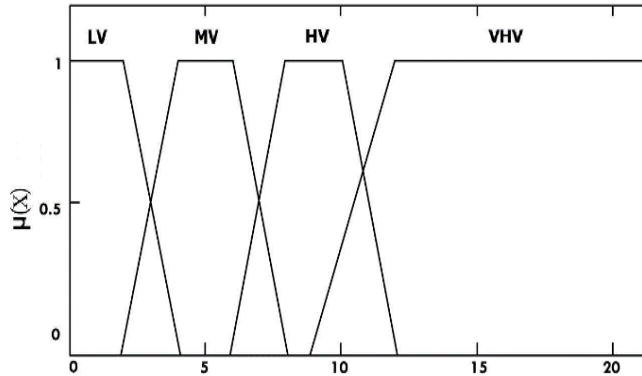
فازی‌سازی

منطق فازی برای هر یک از متغیرهای ورودی به زیرسیستم فازی، یک متغیر زبانی اختصاص می‌دهد. این متغیرهای زبانی با نام‌های ارزش کم (LV)، ارزش متوسط (MV)، ارزش بالا (HV) و ارزش خیلی بالا (VHV) معرفی می‌گردند.

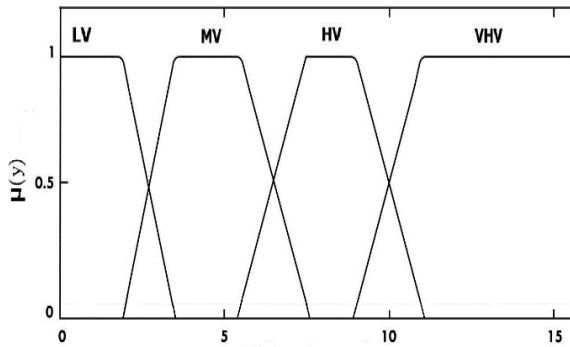
جدول ۱. جامعه آماری از متغیرهای ورودی و خروجی

متغیرهای ورودی	جامعه آماری
X	[0 40]
Y	[0 25]
Z	[0 23]

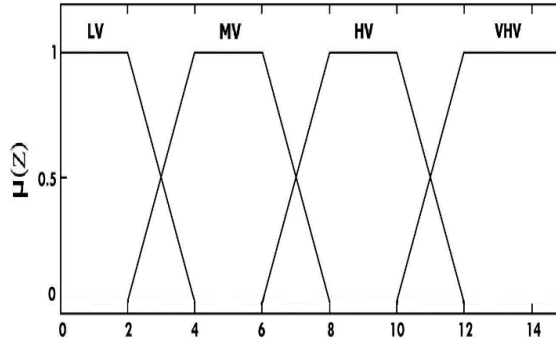
تمامی این متغیرهای زبانی به کار رفته در توابع عضویت ذوزنقه‌ای از متغیرهای ورودی در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده‌اند. به‌طور مشابه، برای متغیر خروجی تنظیم‌شده فازی با نام عامل انطباق α_{r_i} نیز چهار متغیر زبانی با نام‌های افزایش کم (IL)، افزایش متوسط (IM)، افزایش زیاد (IH) و افزایش خیلی زیاد (IVH) تعریف می‌گردد. این چهار متغیر زبانی در تابع عضویت مثلثی از متغیر خروجی بکار رفته‌اند که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



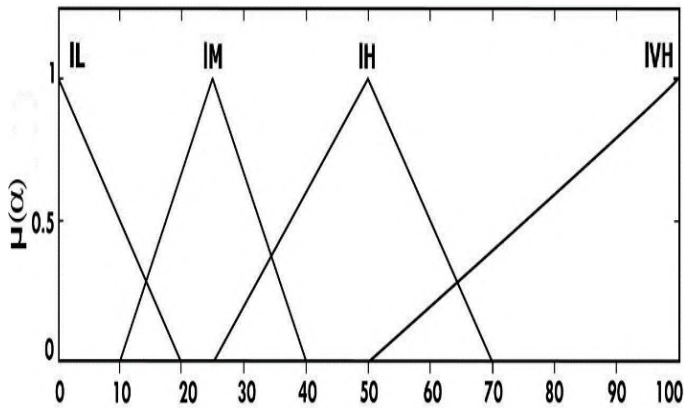
شکل ۳. تابع عضویت از متغیر ورودی x



شکل ۴. تابع عضویت از متغیر ورودی y



شکل ۵. تابع عضویت از متغیر ورودی z



شکل ۶. تابع عضویت از متغیر خروجی α_k

ساختار پایگاه دانش

پایگاه دانش زیرسیستم فازی به کمک دانش و اطلاعات فنی کاربر انسانی از سیستم دینامیکی مربوطه ساخته می‌شود. این پایگاه شامل ۶۴ قانون فازی می‌باشد که از چهار ماتریس زبانی 4×4 نشان داده شده در جدول‌های ۲ تا ۵ به دست آمده است. در هر بانک قانون، متغیرهای زبانی از x و y متنوع با ثابت نگه‌داشتن متغیر زبانی z به دست می‌آیند.

جدول ۲. بانک فازی با " LV "

y x	LV	MV	HV	VHV
LV	IL	IL	IL	IL
MV	IL	IL	IL	IL
HV	IL	IL	IL	IL
VHV	IL	IL	IL	IL

جدول ۳. بانک فازی با "MV" z

y x	LV	MV	HV	VHV
LV	IL	IL	IL	IL
MV	IL	IM	IM	IM
HV	IL	IM	IM	IM
VHV	IL	IM	IM	IM

جدول ۴. بانک فازی با "HV" z

y x	LV	MV	HV	VHV
LV	IL	IL	IL	IL
MV	IL	IM	IM	IM
HV	IL	IM	IH	IH
VHV	IL	IM	IH	IH

جدول ۵. بانک فازی با "VHV" zfd_k

y x	LV	MV	HV	VHV
LV	IL	IL	IL	IL
MV	IL	IM	IM	IM
HV	IL	IM	IH	IH
VHV	IL	IM	IH	IVH

نافازی‌سازی

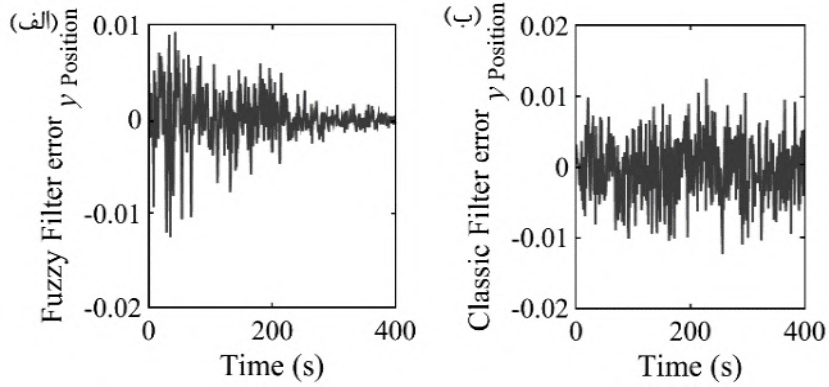
فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت به یک مقدار اسکالر و بهترین عامل برای تنظیم ماتریس‌های کوواریانس نیاز دارد. بنابراین بهترین و تنها ارزش از طریق عملیات نافازی‌سازی از خروجی‌های زیرمجموعه فازی به دست خواهد آمد. برای این عملیات از روش مرکزی^۱ استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی

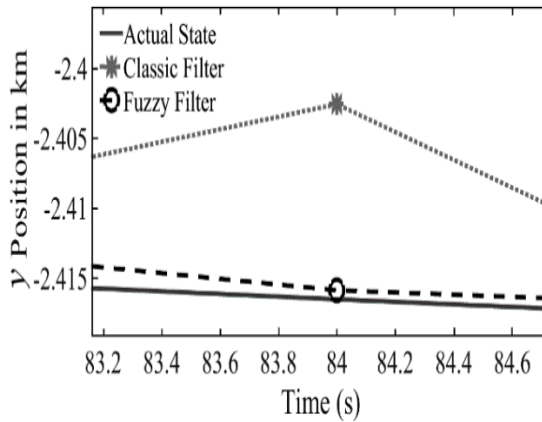
برای نشان دادن عملکرد الگوریتم پیشنهادی، سیستم دینامیکی هوانورد هواشناسی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. تخمین سه متغیر حالت موقعیت در شکل‌های ۷، ۹ و ۱۱ و سه متغیر حالت سرعت در شکل‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۷ با استفاده از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک و فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی نشان داده شده‌اند. همچنین شکل‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ بیانگر خطای تخمین موقعیت و شکل‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ بیانگر خطای تخمین سرعت با فیلترهای ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی و کلاسیک برای زمان نهایی ۳۲۰ ثانیه (۴۰۰ نمونه) و زمان نمونه‌برداری ۰.۸ ثانیه می‌باشند.

در شکل‌های ۷، ۹ و ۱۱ نمودار موقعیت هوانورد در راستای محورهای x، y و z با استفاده از فیلترهای ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی و کلاسیک و حرکت واقعی هوانورد رسم شده است. همچنین خطای تخمین موقعیت دو فیلتر فازی و کلاسیک در شکل‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر فازی پیشنهادی در این مقاله با خطای تخمین به مراتب کمتری به تخمین موقعیت هوانورد در این سه راستا پرداخته است.

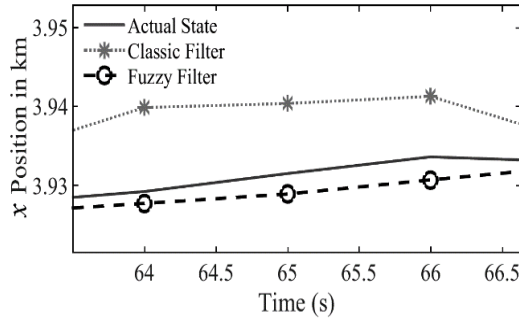
^۱ Centroid



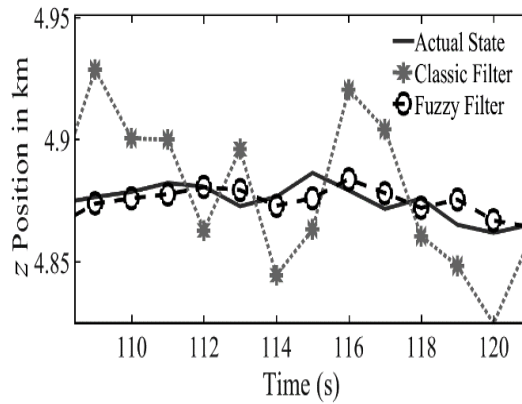
شکل ۷. الف) نمودار حرکت واقعی، تخمین موقعیت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای x بر حسب کیلومتر.



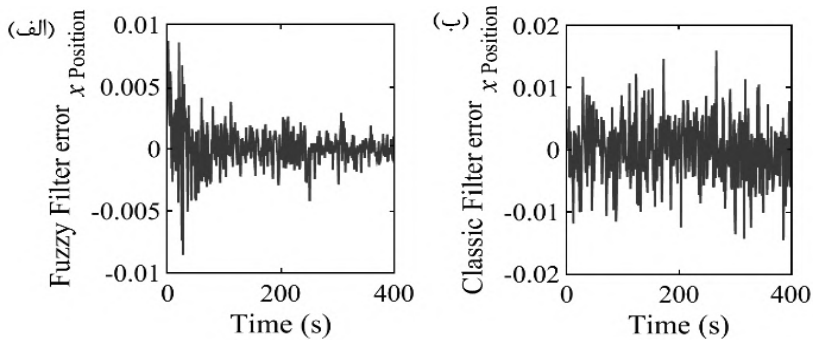
شکل ۸. الف) خطای تخمین موقعیت فیلتر فازی. ب) خطای تخمین موقعیت فیلتر کلاسیک در راستای x بر حسب کیلومتر (۴۰۰ نمونه)



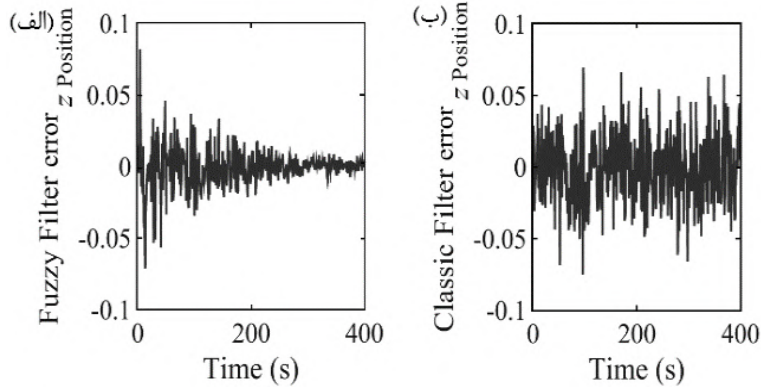
شکل ۹. نمودار حرکت واقعی، تخمین موقعیت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای y بر حسب کیلومتر.



شکل ۱۰. (الف) خطای تخمین موقعیت فیلتر فازی. (ب) خطای تخمین موقعیت فیلتر کلاسیک راستای y بر حسب کیلومتر (۴۰۰ نمونه).

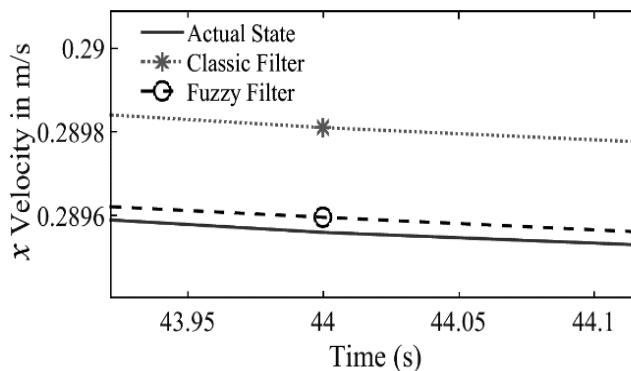


شکل ۱۱. نمودار حرکت واقعی، تخمین موقعیت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای z بر حسب کیلومتر.

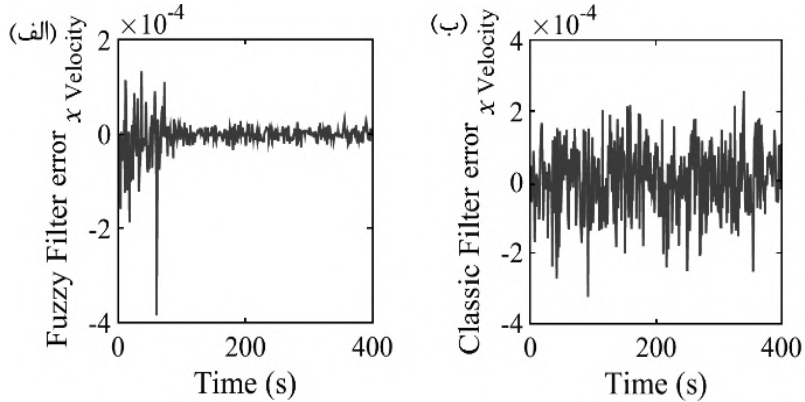


شکل ۱۲. (الف) خطای تخمین موقعیت فیلتر فازی. (ب) خطای تخمین موقعیت فیلتر کلاسیک راستای z بر حسب کیلومتر (۴۰۰ نمونه).

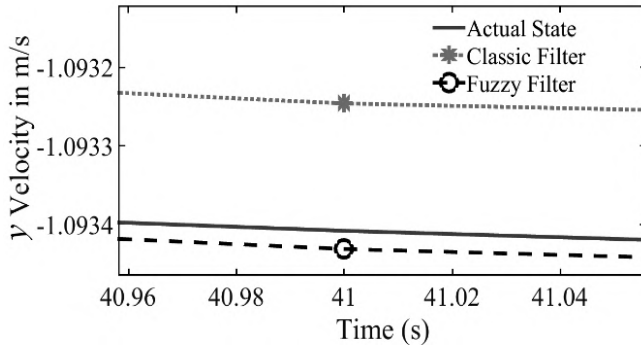
در شکل‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۷ نمودار سرعت هوانورد در راستای محورهای x ، y و z با استفاده از دو فیلتر ترکیبی مورد بررسی در این مقاله (فیلترهای ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی و کلاسیک) و سرعت واقعی هوانورد رسم شده است. مقادیر حقیقی نشان داده شده در شکل ۱۳ تا شکل ۱۷ براساس روش مونت کارلو برای ۵۰۰ داده احتمالی با توزیع یکنواخت که به وسیله تابع غیرخطی مدل زمان گسسته هوانورد انتشار یافته، به دست آمده است. همچنین خطای تخمین سرعت دو فیلتر فازی و کلاسیک در شکل‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر فازی با خطای کمتری به تخمین سرعت هوانورد در این سه راستا پرداخته است و همچنین این نمودارها بیانگر این موضوع هستند که تخمین سرعت با استفاده از فیلتر فازی پیشنهادی در این مقاله دارای حداقل نوسان می‌باشد.



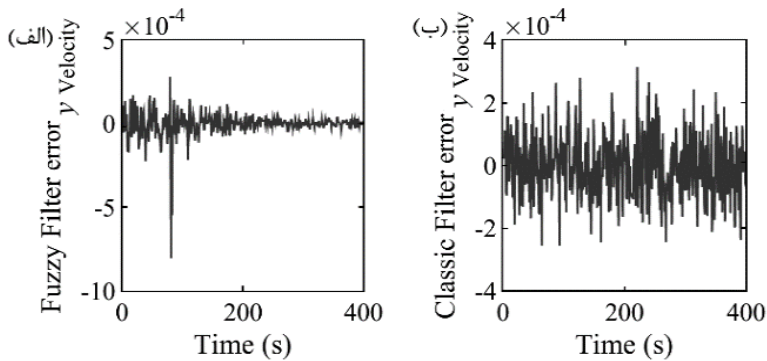
شکل ۱۳. نمودار سرعت واقعی، تخمین سرعت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای x بر حسب متر/ثانیه.



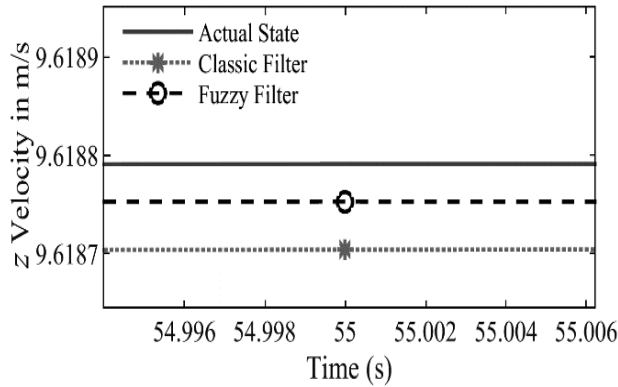
شکل ۱۴. الف) خطای تخمین سرعت فیلتر فازی. ب) خطای تخمین سرعت فیلتر کلاسیک در راستای x بر حسب متر/ثانیه (۴۰۰ نمونه).



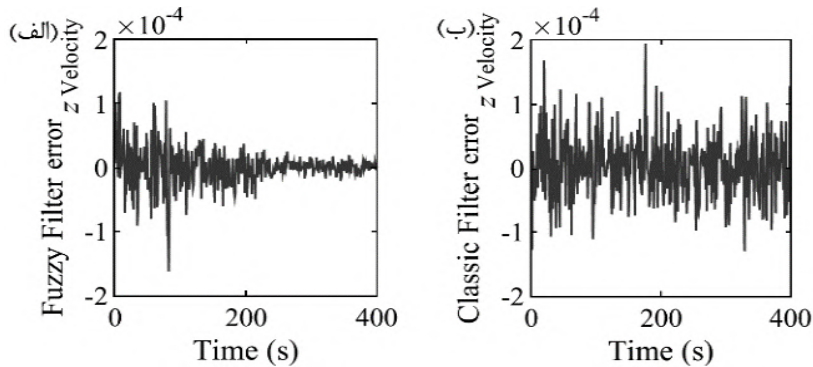
شکل ۱۵. نمودار سرعت واقعی، تخمین سرعت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای y بر حسب متر/ثانیه.



شکل ۱۶. الف) خطای تخمین سرعت فیلتر فازی. ب) خطای تخمین سرعت فیلتر کلاسیک در راستای y بر حسب متر/ثانیه (۴۰۰ نمونه).



شکل ۱۷. نمودار سرعت واقعی، تخمین سرعت با فیلتر کلاسیک و فیلتر فازی در راستای z بر حسب متر/ثانیه.

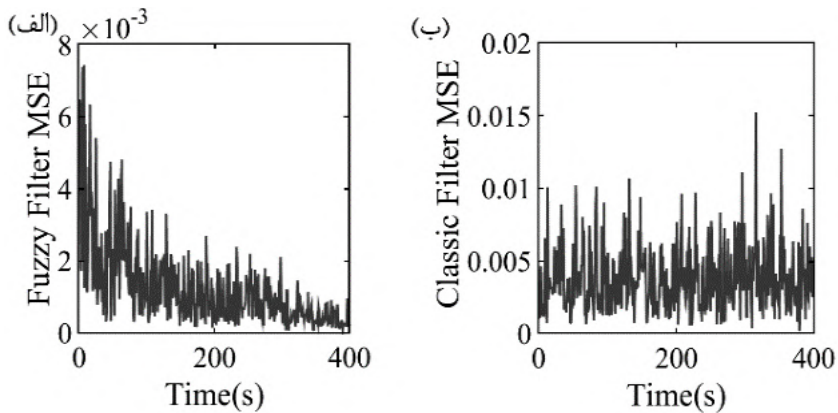


شکل ۱۸. (الف) خطای تخمین سرعت فیلتر فازی. (ب) خطای تخمین سرعت فیلتر کلاسیک در راستای z بر حسب متر/ثانیه (۴۰۰ نمونه)

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با تقریب مناسب و حداقل خطای تخمین که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، به تخمین و شناسایی متغیرهای حالت سیستم دینامیکی هوانورد پرداخته است. همچنین شکل ۱۹ بیانگر این موضوع است که میزان پراکندگی خطای تخمین برای الگوریتم فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی نسبت به الگوریتم فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک، به صفر نزدیک‌تر است. منطق فازی در الگوریتم جدید باعث تطبیق ماتریس‌های کوواریانس نویز و فرایند شده و به بهبود عملکرد تخمین بسیار کمک کرده است. شایان ذکر است برای نمایش بهتر چگونگی تغییرات مقادیر توابع میانگین مجذور خطای تخمین و میزان پراکندگی آنها برای دو فیلتر مورد بررسی در این مقاله نمودارهای هر فیلتر در شکل ۱۹ به صورت مجزا ترسیم گردیده‌اند. تابع MSE در شکل ۱۹ بیانگر میانگین مجذور مربعات خطای تخمین است که از رابطه ۲۱ تعیین می‌گردد.

$$MSE = \frac{\sqrt{norm(\hat{x}_k - x_k)}}{L} \quad (21)$$

که در آن x_k بیانگر متغیر حالت مغشوش با نویز و \hat{x}_k بیانگر مقدار متغیر حالت تخمین زده شده به وسیله فیلتر است.



شکل ۱۹. الف) میانگین مربعات خطای تخمین فیلتر فازی. ب) میانگین مربعات خطای تخمین فیلتر کلاسیک.

به منظور بررسی مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی نسبت به تغییرات نویزهای فرایند و مشاهده گر، مقدار میانگین و واریانس میانگین مجذور مربعات خطای تخمین با استفاده از ۵۰۰ مقدار تصادفی نویزهای فرایند و اندازه گیری بررسی شده و در جدول ۶ ارائه گردیده است. همان طور که مشخص است میانگین مجذور مربعات خطای تخمین برای فیلتر فازی پیشنهادی حدود ۲۰ درصد مقدار میانگین مجذور مربعات خطای تخمین برای فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک است. همچنین واریانس این مقدار برای فیلتر فازی پیشنهادی نیز به طور مشهودی از مقدار تابع واریانس خطای تخمین حاصل از فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک کمتر است. این امر نشان دهنده مقاوم بودن الگوریتم فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی در مقابل نویزهای تصادفی مدل و مشاهده گر اعمالی به سیستم است.

جدول ۶. میانگین خطای تخمین و واریانس خطای تخمین دو فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک و فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی

نوع الگوریتم	میانگین خطا	واریانس خطای تخمین
الگوریتم کلاسیک	0/0245	2×10^{-5}
الگوریتم فازی	0/0048	7×10^{-6}

نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از منطق فازی و توانایی این منطق در مسائل دارای عدم قطعیت یک راهبرد تطبیقی برای بهبود عملکرد فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت در تخمین متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی خطی پیشنهاد گردیده است. فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت فازی بر اساس ماتریس های کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده گر پویا ارائه گردیده است. الگوریتم این فیلتر مشابه الگوریتم فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت است با این تفاوت که در هر مرحله ماتریس های کوواریانس با توجه به اختلاف مقادیر واقعی موقعیت و سرعت سیستم با مقادیر تخمین زده شده موقعیت و سرعت، با استفاده از قوانین فازی به روزرسانی می شوند. این تطبیق و به روزرسانی ماتریس های کوواریانس در راستای

کاهش میانگین مجذور مربعات خطا انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده عملکرد برتر الگوریتم ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت فازی در تخمین متغیرهای حالت سیستم است. این برتری حتی در شرایطی که آمار دقیقی از نویزها وجود ندارد و نویزها به‌صورت کاملاً تصادفی و دارای عدم قطعیت هستند، حفظ می‌شود؛ بنابراین، فیلتر ترکیبی کالمن/اچ-بی نهایت فازی، جایگزینی ساده و مؤثر برای فیلتر ترکیبی کالمن/اچ بی نهایت کلاسیک در شرایط سیستم‌های دینامیکی خطی در حضور نویزهای دارای عدم قطعیت می‌باشد.

علائم یونانی:

θ	پارامتر عملکرد فیلتر که توسط طراح تعیین می‌شود.
σ	انحراف معیار
α	عامل اسکالر خروجی سیستم فازی
μ	درجه عضویت توابع فازی

فهرست علائم:

P	کوواریانس خطای تخمین متغیر حالت
Q	کوواریانس نویز سیستم
R	کوواریانس نویز اندازه‌گیری
V	نویز اندازه‌گیری
W	نویز سیستم
X	برداری متغیر حالت
Y	برداری اندازه‌گیری
Z	برداری اندازه‌گیری موقعیت

References

- [1] Bejarbaneh, E. Y., Masoumnezhad, M., Armaghani, D. J., & Pham, B. T. (2020). Design of robust control based on linear matrix inequality and a novel hybrid PSO search technique for autonomous underwater vehicle. *Applied Ocean Research*, 101, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102231>
- [2] Masoumnezhad, M., Moafi, A., Jamali, A., & Nariman Zadeh, N. (2014). Optimal Design of Mixed Kalman-H infinity Filter Using Multi-objective Optimization Method. *Modares Mechanical Engineering*, 14(2), 128-132. <http://mme.modares.ac.ir/article-e-15-238-en.html>
- [3] Zhang, X., Xu, W., & Zhou, B. (2009). Mean first-passage time in a bistable system driven by multiplicative and additive colored noises with colored cross-correlation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(12), 4220-4225. <https://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2009.02.029>
- [4] Geist, M., & Pietquin, O. (2011). *Kalman filtering & colored noises: the (autoregressive) moving-average case* Proceedings of the IEEE Workshop on Machine Learning Algorithms, Systems and Applications (MLASA 2011). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660607>

- [5] Park, S.-T., & Lee, J. G. (2001). Improved Kalman filter design for three-dimensional radar tracking. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 37(2), 727-739. <https://doi.org/10.1109/7.937485>
- [6] Yadaiah, N., Srikanth, T., & Rao, V. S. (2011, December 5-8). Fuzzy Kalman Filter based trajectory estimation. 2011 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS), Malacca, Malaysia. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6122167>
- [7] Mousavi Moaiied, M., & Mosavi, M. R. (2016). Increasing accuracy of combined GPS and GLONASS positioning using fuzzy kalman filter. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 12(1), 21-28. <https://doi.org/10.22068/IJEEE.12.1.21>
- [8] 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>
- [9] Jamali ,A., Masoumnezhad, M., Nahaleh, M., & Nariman Zadeh, N. (2015). Optimal state estimation of a dynamical system corrupted with colored noises using Mixed Kalman/H-infinity filter. *Modares Mechanical Engineering*, 14(12), 67-74. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-11172-en.html>
- [10] Masoumnezhad, M., Jamali, A., & Nariman-Zadeh, N. (2014). A Robust Unscented Kalman Filter for Nonlinear Dynamical Systems with Colored Noise. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2(3), 310-315. <https://doi.org/10.12720/joac e.2.3.310-315>
- [11] Stoica, A.-M., & Dragasanu, C. (2013). A Mixed Kalman/ H-infinity Filtering Approach for Augmented Proportional Navigation Guidance. The 64th International Astronautical Congress, Beijing, China. https://www.researchgate.net/publication/257365920_A_Mixed_Kalman_H-infinity_Filtering_Approach_for_Augmented_Proportional_Navigation_Guidance
- [12] Hsieh, C.-S. (2014). H-Infinity Kalman Estimation for Rectangular Descriptor Systems With Unknown Inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(3), 826-832. <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2279897>
- [13] Masoumnezhad, M., Yasti Balaghi, A., & Nariman Zadeh, N. (2020). State Estimation of a Crane Using Fuzzy UHF. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 123-142. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112760>
- [14] Drózdź, K., Orłowska-Kowalska, T., & Szabat, K. (2015, March 17-19). Application of the modified fuzzy Kalman filter to states estimation of the two-mass system. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7125169>



Optimization of Nuclear Reactor Power with Control Rods Driven by Switched Reluctance Motor (SRM) with Differential Evolution and Firefly Algorithms

Farzaneh Mohammadi^{1*}, Mohammad Molaei², Omid Afra³

¹Faculty Member, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Beheshti, Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Former M.Sc. Student, Power Plant Manager of ITCO Company, Tehran, Iran.

³PhD, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Beheshti, Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.27.2020

Revised: 11.14.2020

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Small Modular Reactor Control Rod

Switched Reluctance Motor
Firefly Algorithm

Differential Evolution Algorithm

*Corresponding Author:

Farzaneh Mohammadi

Email:

farzane_mohammade@yahoo.com

ABSTRACT

Over the previous few decades, bio-inspired (BI) organic process improvement techniques have experienced extraordinary popularity in the field of engineering. These techniques gift a troublesome competition to ancient numerical procedures that suffer from convexity and continuity assumptions and that usually use a gradient based mostly search that's sensitive to the initial resolution. Whereas initial BI techniques specially have been investigated by novel and improved variants. The population primarily based computing strategies are notably engaging for finding multi-objective (MO) problems due to their capability of producing an outsized variety of Pareto-optimal solutions in one run. In this paper, two algorithms of firefly and differential evolution concept is proposed as a performance metrics for switched reluctance motor (SRM) as control rod drive in small modular reactor. This work aims to prevail and amend the remarkable drawback of switched reluctance motor, which is torque ripple, by executed current control of the motor based on the PI controller in a closed-loop controller. Furthermore, the output power of the plant is optimized to trace the reference properly. The effectiveness and advantage of the system control scheme are presented in MATLAB software in real-time.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی توان راکتور هسته‌ای با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی به کمک الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب

فرزانه محمدی*^۱، محمد مولایی^۲، امید افرا^۳

- ۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مدیر نیروگاه ایتکو، تهران، ایران.
- ۳- دکتری، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در چند دهه اخیر، تکنیک‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت، محبوبیت ویژه‌ای را در مهندسی تجربه کرده‌اند. این تکنیک‌ها رقابت سختی را در مقایسه با روش‌های عددی سنتی دارند که گرفتار پیچیدگی پیوستگی هستند و معمولاً از یک جستجوی مبتنی بر گرادیان حساس به راه‌حل اولیه، استفاده می‌کنند. درحالی‌که تکنیک‌های الهام گرفته از طبیعت اولیه به‌طور خاص توسط متغیرهای بهبودیافته و تکاملی، بررسی شده‌اند. روش‌های محاسبه مبتنی بر جمعیت به‌ویژه برای حل مشکلات چندهدفه به دلیل توانایی تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو در یک اجراء جذاب هستند. در این مقاله از دو الگوریتم تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب به‌عنوان معیارهای عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی به‌عنوان درایو میله کنترل در یک نیروگاه هسته‌ای استفاده شده است. این کار، با هدف غلبه و بهبود بخشیدن بر نقطه‌ضعف قابل توجه موتور رلوکتانس سوئیچی که دارای گشتاور موج‌دار است، به کمک کنترل جریان موتور بر اساس کنترلر PI در یک کنترلر حلقه بسته، انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، اثربخشی و مزیت عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی را در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK در زمان واقعی، نشان می‌دهد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

راکتور هسته‌ای
میله کنترل
موتور رلوکتانس سوئیچی
الگوریتم کرم شب‌تاب
الگوریتم تکامل تفاضلی

*نویسنده مسئول: فرزانه محمدی

پست الکترونیکی:

farzane_mohammade@yahoo.com



مقدمه

بهینه‌سازی، نوعی تصمیم‌گیری یا به‌طور خاص‌تر، یکی از مهم‌ترین ابزارهای کمی در تصمیم‌گیری است که برای بهینه‌سازی یک یا چند هدف تحت شرایط تعیین شده خاص می‌باشد. مشکلات بهینه‌سازی از نظر ماهیت، بسیار فراگیر هستند؛ زیرا بسیاری از مشکلات زندگی واقعی را می‌توان از نظر مدل‌های بهینه‌سازی، بر اساس معیارها و اهداف مختلفی، فرمول‌بندی کرد. کاربرد آن، زمینه‌های مختلفی را از جمله ریاضیات، علوم محاسباتی، تحقیقات کاربردی، مهندسی، اقتصاد، فیزیک، زیست‌شناسی و غیره تشکیل می‌دهد [۱]. بهینه‌سازی بازه گسترده‌ای از تحقیقات است که روش خاصی را برای حل مرتبه خاصی از مشکلات مانند مشکلات برنامه‌نویسی خطی، مشکلات برنامه‌نویسی عدد صحیح، مشکل برنامه‌نویسی درجه دوم، بهینه‌سازی غیرمحدب و موارد دیگر ارائه می‌دهد. باین وجود پیچیدگی زمانی به وجود می‌آید که تشخیص ماهیت مشکل دشوار می‌شود. در چنین شرایطی وقتی ماهیت مسئله قابل پیش‌بینی نباشد، انتخاب روش مناسب برای به دست آوردن راه‌حل بسیار دشوار است؛ بنابراین محققان روی الگوریتم‌های عمومی متمرکز شده‌اند که قابل استفاده برای حل طیف گسترده‌ای از مشکلات است. چند دهه گذشته شاهد رونق چنین الگوریتم‌هایی با هدف کلی هستیم که می‌تواند تحت عنوان فراابتکاری قرار بگیرد که در این مقاله به دو نمونه تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب اشاره می‌گردد [۲].

امروزه درایوها سهم بزرگی از صنعت الکتروموتورها را از آن خود کرده‌اند. این درایوها باید خصوصیتی چون گشتاور بالا و چگالی قدرت بالا، دامنه سرعت گسترده در هنگام کار با برق ثابت، راندمان بالا در کلیه محدوده گشتاور و سرعت، قابلیت اضافه‌بار، استحکام بالا، قابلیت اطمینان بالا، تولید گشتاور کم و صدای کم و هزینه پایین داشته باشند [۳]. در حال حاضر، این الزامات با استفاده از موتورهای سه فاز آسنکرون، درایوهای موتور DC بدون جاروبک، موتور سنکرون آهنربای دائمی و موتور رلوکتانس سوئیچی^۱ قابل تحقق است [۴].

درایوهای رلوکتانس سوئیچی به دلیل مزایای واضح مانند ساختار ساده و مستحکم، رفتار مقاوم در برابر خطا، قابلیت کنترل ساده و خصوصیات سرعت گشتاور ممتاز، نسبت به سایر انواع درایوهای موتور برتر هستند. فقدان جاروبک باعث می‌شود موتور رلوکتانس سوئیچی قادر به کار با سرعت بالا و محدوده مشخصات قدرت ثابتی باشد. علاوه بر این، نبود آهن‌ربا به آن امکان می‌دهد از قابلیت خنک‌کننده برجسته در شرایط دمایی بالا برخوردار باشد. ویژگی‌های مطلوب بیان شده باعث می‌شود که در کاربردهای هسته‌ای از این دستگاه استفاده کنند. باین حال، بزرگ‌ترین اشکال عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی، موج گشتاور (ریپل) و لرزش است. بر همین اساس حل این نقطه‌ضعف باعث می‌شود تا موتور فوق بهترین نامزد در کاربرد راکتورهای هسته‌ای باشد.

در این مقاله عملکرد یک راکتور هسته‌ای مدولار کوچک با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی به‌عنوان یک محرک میله کنترل، ارائه شده است. بررسی حاضر، مهم‌ترین نقطه‌ضعف موتور رلوکتانس سوئیچی را که موج‌دار بودن گشتاور است، برطرف می‌کند. یک کنترل‌کننده PI آفلاین در یک کنترلر حلقه بسته، برای کنترل قدرت یک راکتور مدولار کوچک استفاده می‌شود. ضرایب PI بهینه در نظر گرفته شده، از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی یعنی تکامل تفاضلی^۲ و کرم شب‌تاب^۳ به‌طور موازی به دست آمده است. برای به حداقل رساندن موج گشتاور، جریان موتور رلوکتانس سوئیچی توسط کنترلر PI تنظیم می‌شود که باعث کاهش نوسانات می‌شود. در پایان شبیه‌سازی در MATLAB/ SIMULINK، کارایی موتور رلوکتانس سوئیچی را تأیید می‌کند.

¹ Switched Reluctance Motor (SRM)

² Differential Evolution (DE)

³ Firefly Algorithm (FA)

کارهای انجام شده

انواع مختلفی از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌منظور بهینه‌سازی در رابطه با مکانیزم مونتاژ سوخت و کنترل واکنش در راکتور هسته‌ای استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از آن عبارت‌اند از: بهینه‌سازی کلونی مورچگان [۵؛ ۶]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۷-۹]، بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی [۱۰؛ ۱۱]، الگوریتم جستجوی هارمونی [۱۲] و الگوریتم شب‌تاب پیوسته [۱۳؛ ۱۴]؛ که در مورد آخر، نویسندگان در مقاله خود چهار الگوریتم فراابتکاری، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم آنتروپی متقابل، کلونی زنبورهای مصنوعی و یادگیری افزایشی مبتنی بر جمعیت را براساس معیارهای فیزیکی راکتور به کار گرفتند. مرجع [۱۵] چندین الگوریتم را برای تعیین رویکردی مناسب برای حل مشکل بهینه‌سازی چندهدفه مدیریت سوخت در هسته راکتور مقایسه کرده است. همین نویسندگان در سال ۲۰۱۸ یک تکنیک فوق‌ابتکاری مبتنی بر چندین الگوریتم فرعی برای حل مسئله استفاده کردند [۱۶].

بررسی‌های بسیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است از جمله برخی نویسندگان [۱۷] مدیریت سوخت هسته‌ای در راکتورهای تحت فشار آب، راکتورهای آب جوشان، راکتورهای آب سنگین تحت فشار^۱ و راکتورهای اتمی سریع را بررسی کرده‌اند [۱۷]. در جوشکاری راکتورهای آب جوش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی الگوی بارگیری و موقعیت‌یابی میله کنترل استفاده می‌شود [۱۸-۲۰]. در مراجع [۲۱؛ ۲۲] از الگوریتم فوق برای سوخت‌گیری آنلاین راکتور آب سنگین فشرده استفاده شده است. همچنین برای بهینه‌سازی بارگذاری توریم در هسته راکتور فوق، الگوریتم ژنتیک بررسی شد [۲۳].

مدل راکتور هسته‌ای

رفتار راکتور مدل شده در یک وضعیت پایدار، شامل یک گروه مؤثر از نوترون تأخیری در معادلات جنبشی ۱ و ۲ بیان می‌گردد:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho_{ext} + \rho_{fb} - \beta_{eff}}{\Lambda} P + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} C \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \lambda(P - C) \quad (2)$$

که در آن P ، C ، ρ_{ext} ، ρ_{fb} ، β_{eff} ، λ_{eff} و Λ به ترتیب توان راکتور نرمالیزه شده، غلظت نرمال پیش ماده، اکتیویته خارجی تزریق شده به هسته، بازخوردهای ذاتی هسته، کسر مؤثر نوترون تأخیری، ثابت تأخیر پیش ماده مؤثر و میانگین زمان تولید نوترون است. افزایش دمای سوخت ناشی از گرمای شکافت تولیدشده در معادله (۳) نشان داده شده است. تعادل گرما در مایع خنک‌کننده اول و دوم مدل با ۱ سوخت و ۲ خنک‌کننده در معادلات (۴) و (۵) به شرح زیر است [۲۴].

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{PP_0}{\mu_f} - \frac{\Omega}{\mu_f} (T_f - T_{c1}) \quad (3)$$

$$\frac{dT_{c1}}{dt} = \frac{2\mu_i}{\mu_c} (T_{in} - T_{c1}) - \frac{\Omega}{\mu_c} (T_f - T_{c1}) \quad (4)$$

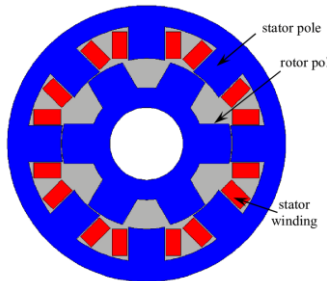
$$\frac{dT_{c2}}{dt} = \frac{2\mu_i}{\mu_c} (T_{c1} - T_{c2}) - \frac{\Omega}{\mu_c} (T_f - T_{c1}) \quad (5)$$

که T_{c1}, T_{c2} و T_f مربوط به دمای سوخت، درجه خنک‌کننده اول و درجه خنک‌کننده دوم است. μ_f, μ_i و μ_c به ترتیب نرخ جریان (دبی) در ظرفیت گرمای جریان ورودی، ظرفیت حرارتی سوخت و مایع خنک‌کننده را نشان می‌دهند. آهنگ تغییر اکتیویته خارجی در هسته، وابسته به واحد طول سرعت میله v_i و ارزش میله G_r به شرح معادله ۶ است:

$$\frac{d\rho_{ext}(t)}{dt} = G_r v_r(t) \quad (6)$$

موتور رلوکتانس سوئیچی

ساختار موتور رلوکتانس سوئیچی حاوی سیم‌پیچ استاتور و روتور بدون هادی و مغناطیس دائمی است. شکل ۱ موتور رلوکتانس سوئیچی ۸/۶، چهار فاز را نشان می‌دهد که دارای هشت قطب برجسته روی استاتور و شش قطب برجسته در روتور است. چهار فاز از سیم‌پیچ استاتور به صورت قطر متقارن سری توزیع می‌شود. سیم‌پیچ استاتور توسط یک مبدل نامتقارن نیم‌پل با دو عدد سوئیچ و دیود در هر فاز مطابق با شکل ۲ تغذیه می‌شود. در این ساختار با الگوریتم کلیدزنی منفرد سوئیچ‌ها به صورت جداگانه می‌توان جریان فاز استاتور را به طور مستقل کنترل کرد [۲۵].



شکل ۱. موتور سوئیچ رلوکتانسی ۸/۶، چهار فاز [۲۶]

مطابق استاندارد مدار الکتریکی، معادله ولتاژ فاز k^{th} به شرح معادله ۷ است [۲۷]:

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (7)$$

که R_k, i_k, ψ_k و U_k به ترتیب مقاومت، جریان، شار پیوندی و ولتاژ فاز k ام است. شار پیوندی فاز به شرح زیر است:

$$\psi_k = L_k(i_k, \theta_k) i_k \quad (8)$$

که در آن L_k اندوکتانس و θ_k موقعیت زاویه‌ای فاز است، گشتاور تولیدشده هر فاز با نادیده گرفتن اشباع مغناطیسی برای یک موقعیت روتور مشخص شده برابر است با:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{dt} \quad (9)$$

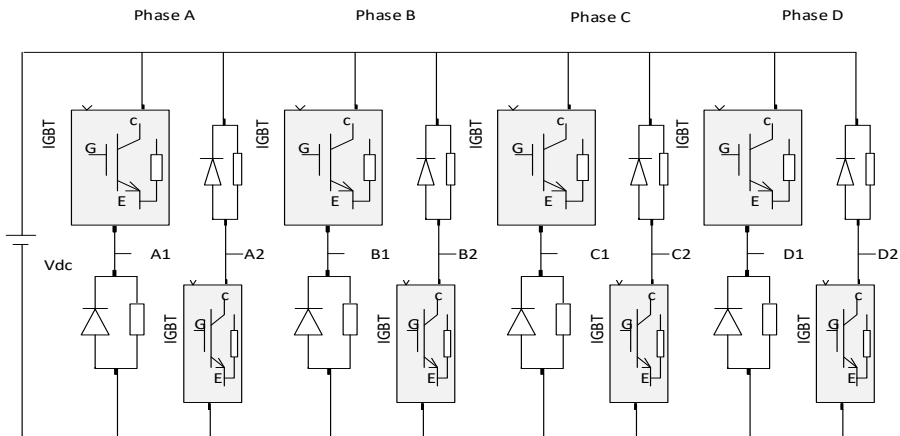
که حالت موتور و ژنراتور به ترتیب با مقدار مثبت و منفی $\frac{dL(\theta)}{dt}$ مرتبط است. گشتاور کل، مجموع گشتاور فازها است:

$$T_n = \sum_{j=1}^N T_n(\theta, j) \quad (10)$$

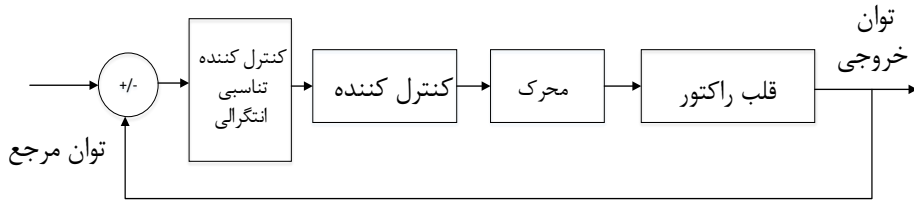
در رابطه فوق n تعداد فاز است. در شکل (۳)، شماتیکی از کنترل حلقه بسته نیروگاه هسته‌ای توضیح داده شده است. تابع انتقال موتور رلوکتانس سوئیچی بکار گرفته‌شده در این مقاله با رابطه زیر بیان می‌گردد [۲۸]:

$$G_{SRM} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (11)$$

k : به‌عنوان بهره‌ای شناخته می‌شود که از تقسیم سرعت حالت پایدار بر بار ماشین به دست می‌آید. τ : زمان افزایش به ۶۳ درصد از سرعت حالت پایدار است. در تابع انتقال فوق جریان به‌عنوان ورودی و سرعت به‌عنوان سیگنال خروجی استفاده شده است. در شکل ۳ همان‌گونه که مشاهده می‌شود بازخوردی از توان خروجی راکتور، پس از عبور از کنترل‌کننده پیشنهادی و تناسبی-انتگرالی وارد درایو رلوکتانس سوئیچی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر کنترل‌کننده پیشنهادی جهت حذف نوسانات گشتاور و کنترل‌کننده تناسبی - انتگرال برای تطابق توان خروجی با توان مرجع استفاده می‌شود.

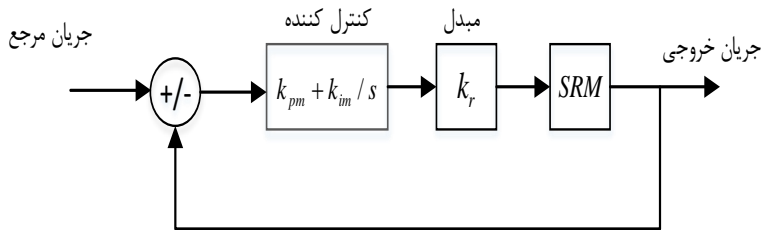


شکل ۲. مبدل نیم پل موتور رلوکتانس سوئیچی [۲۹]



شکل ۳. شماتیک کنترل قدرت هسته راکتور

از آنجا که اندوکتانس به موقعیت روتور و القای متقابل بین دو فاز مجاور بستگی دارد، دینامیک حلقه فوق متغیر با زمان و غیرخطی تعیین می‌گردد. با این وجود، برای دستیابی به عملکرد مطلوب، جریان فاز باید به وضوح کنترل شود. برای این منظور، از کنترلر جریان برای خطی سازی چرخه کنترل موجود استفاده می‌شود. خطی سازی بازخورد، سیستم غیرخطی را به صورت جبری به خطی تبدیل می‌کند. از این رو می‌توان از تکنیک‌های کنترل خطی استفاده کرد. سیستم کنترل جریان با استفاده از کنترلر کنبده PI مدل شده در شکل ۴ اساس کار را نشان می‌دهد [۲۹]. مدل کنترلی شکل ۴ به عنوان یک حلقه داخلی در نمودار بلوک کنترل مرکزی نیروگاه استفاده می‌شود. ضرایب کنترلر PI برای ردیابی تغییرات در شرایط کاری تنظیم می‌شود.



شکل ۴. حلقه کنترل جریان موتور رلوکتانس سوئیچی [۳۰]

الگوریتم کرم شب تاب

مسائل بهینه سازی مختلف برای یافتن راه حل های بهینه، از تکنیک های فراگرایی استفاده می کنند. الگوریتم کرم شب تاب در حال حاضر به عنوان یکی از این تکنیک ها در نظر گرفته شده است. این الگوریتم بر اساس وضعیت کرم شب تاب و سه اصل زیر است:

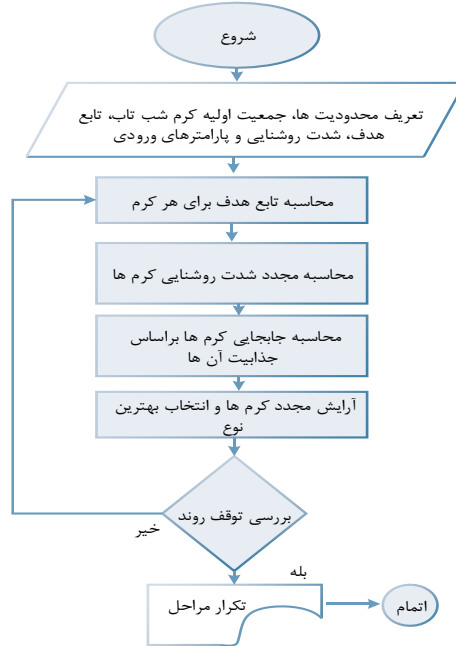
- ۱- کرم های شب تاب به دلیل جذابیت ناشی از ماهیت تک جنسیتی به یکدیگر جذب می شوند.
 - ۲- جذابیت مربوط به روشنایی است، به این معنی که کرم شب تاب روشن تر باعث جذب کمتری خواهد شد.
 - ۳- تابع هدف با خصوصیات روشنایی چشمک زن کرم شب تاب در ارتباط است.
- روش الگوریتم، مبتنی بر سه عامل است که عبارت اند از جذابیت، روش تصادفی سازی و جذب. جذابیت متناسب با شدت روشنایی است. تغییر جذابیت β به صورت زیر تعریف شده است:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (12)$$

که در آن r فاصله و β_0 جذابیت در $r=0$ است. فرض بر این است که موقعیت x_i و x_j به کرم شب‌تاب i و j اختصاص دارد. اگر مقدار جذابیت i از j بالاتر باشد، j توسط i انتقال می‌یابد:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-r r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t \varepsilon_i^t \quad (13)$$

در معادله فوق بخش دوم مربوط به جذابیت است و سومین بخش به تصادفی‌سازی با پارامتر α_t تعلق دارد. علاوه بر این، بردار ε_i^t یک عدد تصادفی است که از توزیع یکنواخت در t استخراج می‌شود. فلوجارت اصلی الگوریتم کرم شب‌تاب در شکل ۵ توضیح داده شده است.



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم تکامل تفاضلی

تکامل تفاضلی یک الگوریتم فراابتکاری، مبتنی بر جمعیت است که برای مسئله بهینه‌سازی فراتر از دامنه پیوسته توسعه یافته است. فرایند بهینه‌سازی از سه مرحله اصلی تشکیل شده است: جهش، تقاطع^۱ و انتخاب. جمعیت با بُعد D که تعداد متغیرهای کنترل را نشان می‌دهد، بردارهای با ارزش واقعی در پارامتر اولیه هستند. در هر نسل، جمعیت فعلی، بردارهای هدف می‌شوند. برای هر بردار هدف، با افزودن اختلاف وزن بین دو بردار به یک بردار سوم که به‌طور تصادفی تولید شده‌اند، بردار جهش تولید می‌شود. با عمل تقاطع پارامترهای بردار جهش با بردار هدف، بردار جدیدی به نام بردار آزمایش ایجاد می‌شود. اگر مقدار تابع هدف برای بردار آزمایشی مطلوب‌تر از مقدار آن برای

1 Crossover

بردار هدف باشد، آنگاه بردار آزمایشی جایگزین بردار هدف در نسل بعدی می‌شود. عملگرهای تکاملی در زیر شرح داده شده است:

مقداردهی اولیه

مقادیر اولیه جمعیت از محدوده مرز پایین x_j^l و مرز بالای x_j^u انتخاب می‌شوند.

جهش

بردار جهش $v_{i,G+1}$ توسط سه بردار تولید می‌شود $(x_{r1,G}, x_{r2,G}, x_{r3,G})$. اختلاف وزن بین دو بردار اضافه‌شده به بردار سوم به شرح زیر است:

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (14)$$

که F به‌طور پیوسته بین 0 تا 2 انتخاب می‌شود.

تقاطع

مرحله تقاطع از نسل واقعی $x_{i,G}$ و عناصر مربوط به مجموعه جهش $v_{i,G+1}$ به شرح زیر تولید می‌شود:

$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1} & \rightarrow r \leq CR \text{ or } i = k \\ x_{j,i,G+1} & \rightarrow r > CR \text{ or } i \neq k \end{cases} \quad (15)$$

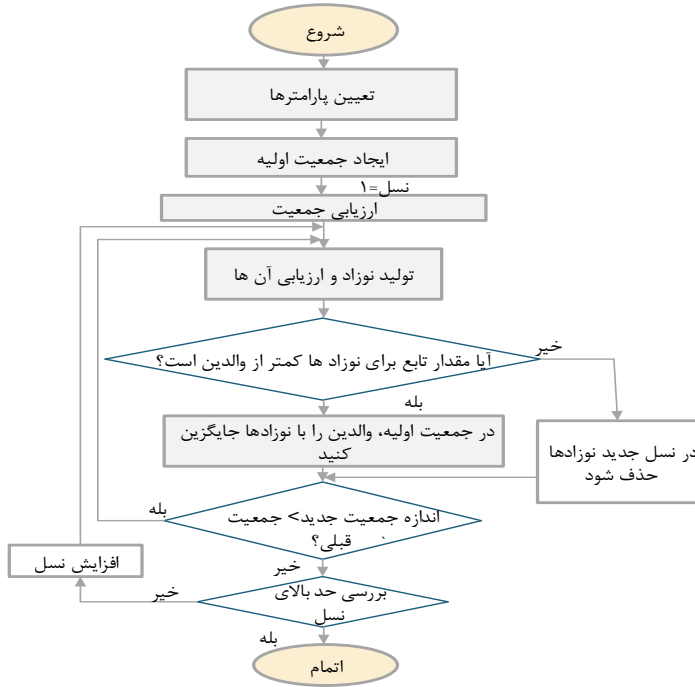
که در آن CR بین صفر و یک انتخاب می‌شود. این پارامتر نقش کنترلی دارد. علاوه بر آن، K عدد صحیح تصادفی از $(1, 2, \dots, D)$ است.

انتخاب

در این مرحله، تابع هدف برای $x_{i,G}$ و $v_{i,G+1}$ مقایسه و بردار مناسب برای نسل بعدی به شرح زیر انتخاب می‌شود:

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \rightarrow f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \rightarrow \text{Otherwise } i \in [1, 2, \dots, D] \end{cases} \quad (16)$$

بدین ترتیب، تمام مراحل همان‌طور که در شکل ۶ آمده است، تکرار می‌گردد.



شکل ۶. فلوجارت الگوریتم تکامل تفاضلی

بهینه‌سازی چندهدفه

ضرایب کنترل‌کننده‌های PI، k_p ، k_c ، k_{pm} و k_{im} به‌عنوان پارامترهای کنترل برای بهینه‌سازی توان خروجی و موج‌های گشتاور استفاده می‌شود. تابع هدف بر اساس سیگنال خطای حلقه بسته توسعه یافته است. شاخص‌های عملکرد که بیانگر انتگرال سیگنال خطای مطلق^۱ و انتگرال مربع خطا^۲ است، به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (۱۷)$$

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (۱۸)$$

نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، شبیه‌سازی مدل راکتور و موتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گردید. پارامترهای کنترل‌کننده PI به‌صورت آفلاین توسط الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب و تکامل تفاضلی در نرم‌افزار MATLAB تعیین شدند و هدف اصلی، ردیابی توان مرجع در راکتور موتور رلوکتانس سوئیچی است که این توان مرجع

1 Integral Absolute Error (IAE)

2 Integral Square Error (ISE)

دارای تغییرات ۱۰۰ درصد توان راکتور در ۲۰۰ میلی ثانیه اول، سپس کاهش نرم توان به ۵۰ درصد مقدار نامی در ۲۰۰ میلی ثانیه دوم و در آخر افزایش شیب دار توان به ۱۰۰ درصد مقدار نامی در ۲۰۰ میلی ثانیه آخر هست که شکل پالس را می سازد.

($100\% P \leftarrow 50\% P \leftarrow 100\% P$ در ۶۰۰ sec در نظر گرفته شده است). همچنین مقادیر پارامترهای اولیه مطابق جدول ۱ در مرجع [۲۶] است.

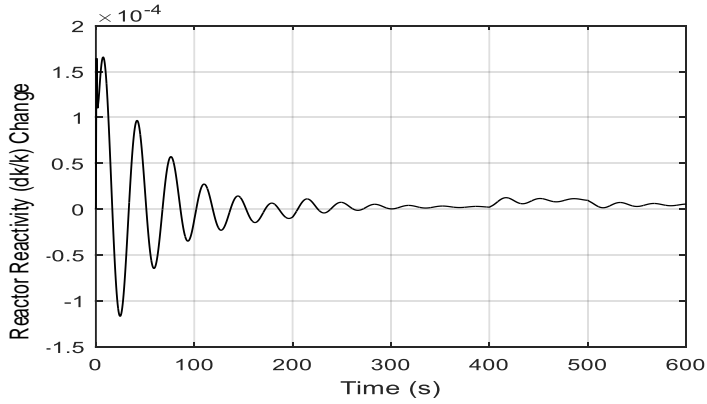
پاسخ بخش های مختلف نیروگاه حلقه بسته در شکل های (۷) تا (۱۱) برای موتور نشان داده شده است. الگوریتم های تکامل تفاضلی و کرم شبتاب، شاخص های عملکرد را همان طور که از شکل (۱۴ و ۱۵) مشخص است، بهینه سازی می کنند. فرایند بهینه سازی در ۳۰ نسل و ۴۰ نمونه واقع در مجاورت نقطه بهینه انجام شده است.

مقادیر محاسبه شده بهینه کنترلرهای PI و تابع هدف در جدول (۱) برای هر دو الگوریتم و موتور به نمایش در آمده است. نتایج شبیه سازی عملکرد و رفتار همگرایی موتور رلوکتانس سوئیچی را تأیید می کند. دو الگوریتم بهینه سازی به موازات هم تأیید شدند تا اثربخشی روش پیشنهادی را نشان دهند.

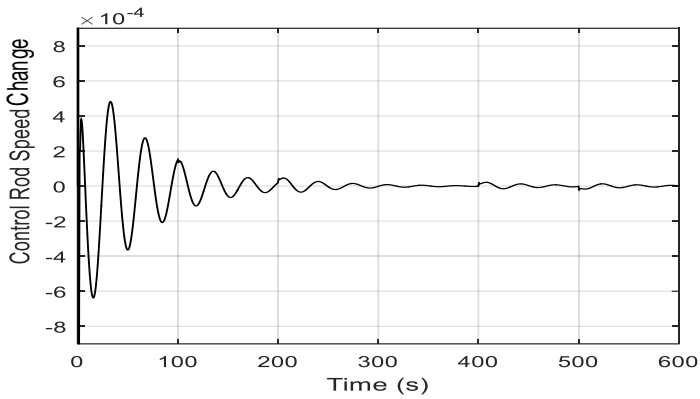
در این راکتور با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی، شکل های ۷ تا ۱۰ به ترتیب اکتیویته ورودی قلب راکتور، سرعت میله کنترل، تغییرات دمای سوخت و رفتار تغییرات توان خروجی بدون کنترل نوسانات را نشان می دهد. همچنین در شکل ۱۱ توان خروجی راکتور با سیستم کنترلی پیشنهادی به ترسیم در آمده است. همان گونه که مشاهده می شود نوسانات توان خروجی در صورت نبود کنترل جریان ۲۰ درصد است. پیشرفت چشمگیر در شکل ۱۱ در ردیابی توان هسته مورد نظر و افزایش توانایی در کاهش ریبیل برای راکتور مجهز به درایو مورد بررسی توسط حلقه کنترل گشتاور داخلی مشاهده می شود. توان مورد نظر به سرعت و بدون برانگیختگی و نوسان به دست می آید. علاوه بر این، تغییر در دمای سوخت، سرعت میله کنترل و اکتیویته حالت پایدار و قابل قبولی دارند. در شکل (۸)، پس از یک نوسان قابل قبول، تغییرات سرعت به 10^{-4} رسید که مقدار بسیار ناچیزی هست. علاوه بر این، راکتیویته ورودی هسته در حاشیه اطمینان قرار دارد ($\rho_{ext} < \beta_{eff}$). عملکرد الگوریتم های بهینه سازی مورد استفاده در این مقاله را به وضوح در شکل های ۱۲ و ۱۳ می توان مشاهده کرد که به ترتیب بیانگر تغییرات جریان موتور رلوکتانس سوئیچی در حالت استفاده از الگوریتم های فوق و استفاده نکردن از آنها است. تغییرات جریان در حالت بهینه شده 5×10^{-4} یا به عبارت دیگر نزدیک به صفر است در حالی که در حالت بهینه نشده، نوسانات بیشتر و تغییرات دامنه نزدیک به ۸۰۰۰ برابر حالت استفاده از الگوریتم های بهینه سازی دارد که بیانگر ردیابی دقیق مقادیر مرجع و کارکرد درست کنترل کننده جریان پیشنهادی است.

جدول ۱. مقادیر بهینه ضراب کنترلی برای موتور رلوکتانسی

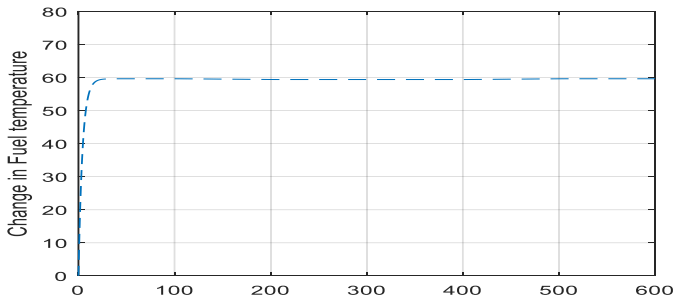
Algorithm	$k_{p,best}$	$k_{i,best}$	$k_{pm,best}$	$k_{im,best}$	$f_{obj,best}(IAE)$	$f_{obj,best}(ISE)$
FA	8×10^{-4}	5×10^{-8}	4.5	6.17	1.71	-
FA	8.3×10^{-4}	5.9×10^{-8}	4.37	6.62	-	1.044
DE	8.6×10^{-4}	4.8×10^{-8}	4.02	6.51	1.64	-
DE	8.5×10^{-4}	4.4×10^{-8}	4.21	6.38	-	1.03



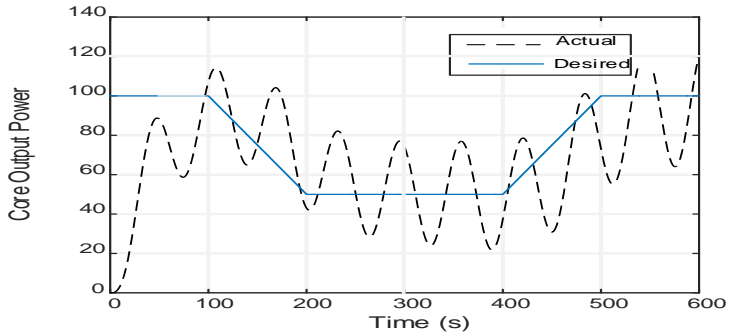
شکل ۷. تغییرات راکتیویته ورودی قلب راکتور



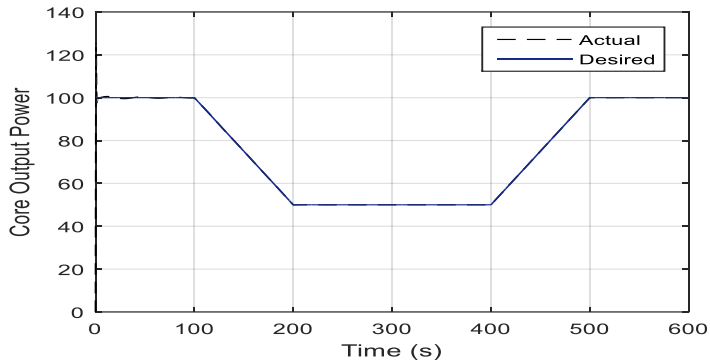
شکل ۸. تغییرات سرعت میله کنترل



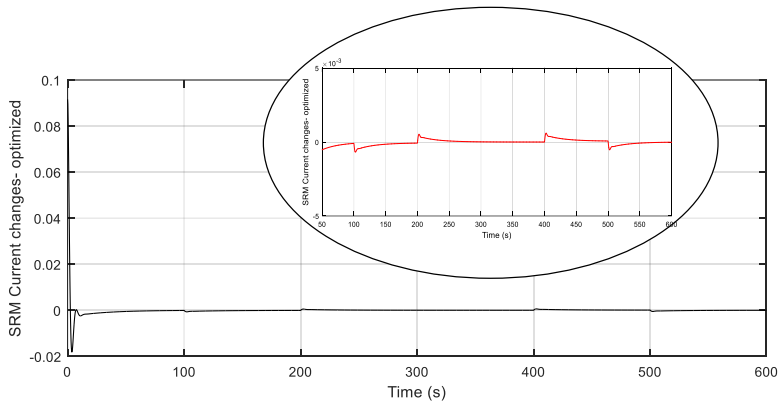
شکل ۹. تغییرات دمای سوخت راکتور



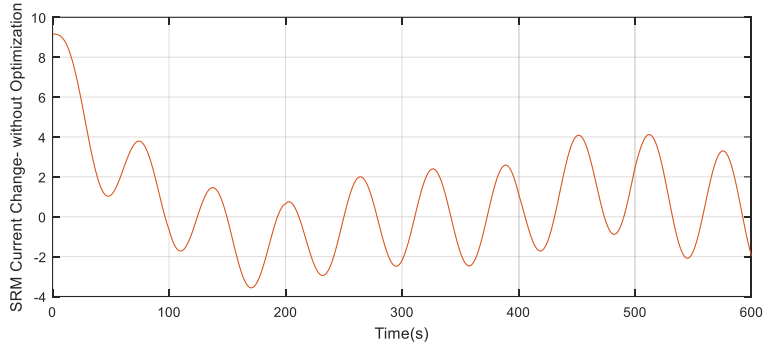
شکل ۱۰. توان خروجی راکتور بدون کنترل ریپل



شکل ۱۱. توان خروجی راکتور با کنترل ریپل

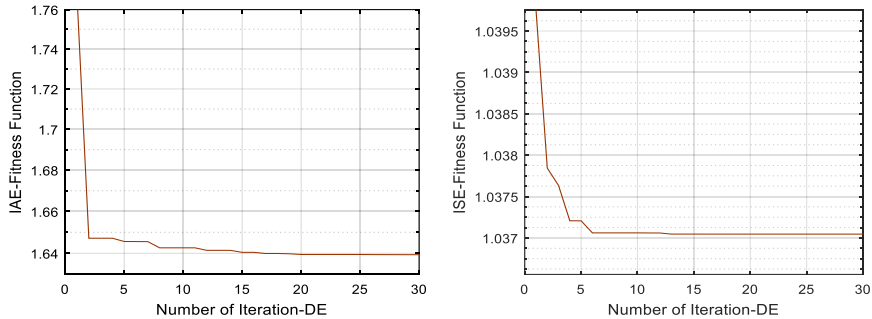


شکل ۱۲. تغییرات جریان موتور رلوکتانسی در حالت بهینه‌سازی

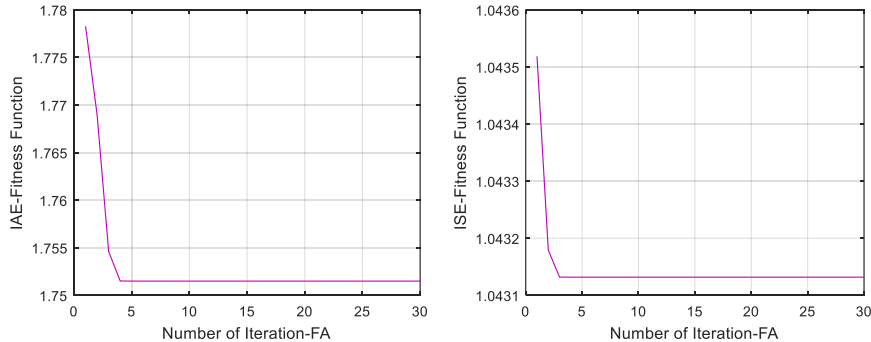


شکل ۱۳. تغییرات جریان موتور رلکتانسی بدون بهینه‌سازی

به‌طور کلی، در مقاله حاضر، از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی موجود در طرح پیشنهادی، برای حذف نوسانات توان خروجی و ردیابی بهتر آن، استفاده شده است. از سیگنال خطای توان و سیگنال سرعت موتور که توسط سنسورهای موجود گرفته می‌شود، گشتاور و بدین ترتیب جریان محاسبه می‌شود و با جریان مرجع مقایسه می‌گردد و از اختلاف سیگنال به‌دست‌آمده در ساختار کنترلی پیشنهادی، سیگنال‌های آتش مبدل تأمین می‌شود. لذا باز خورد توان راکتور تأثیر مستقیم بر روی مبدل دارد و نوسانات توان را کاهش می‌دهد. در عمل، افزایش یا کاهش جریان از مقادیر مرجع خود باعث تغییر ساختار کلیدزنی مبدل خواهند شد. افزایش جریان از مقدار مرجع خود باعث خاموش شدن یکی از سوئیچ‌های مبدل یا هردو می‌شود و کاهش مقدار آن از مقدار مرجع منجر به کارکرد هر دو سوئیچ خواهد شد. ضرایب کنترل‌کننده‌های ذکر شده توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست می‌آید.



شکل ۱۴. رفتار الگوریتم تکامل تفاضلی



شکل ۱۵. رفتار الگوریتم کرم شب تاب

نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان سنجی و جایگزینی موتورهای سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد در راکتور هسته‌ای به‌عنوان هدایت‌کننده میله کنترل بررسی شده است. مدل‌سازی راکتور هسته‌ای با موتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای بررسی هم‌گرایی و کشش سیستم موردنظر انجام شد. یک کنترلر PI حلقه بسته ارائه شده است. با استفاده از کنترلر پیشنهادی، در موتورهای رلوکتانس سوئیچی ارائه‌شده، ریبیل و متعاقباً لرزش مشاهده شد. از این رو با کاهش ریبیل‌ها، موتور فوق‌کاندیدای پیشنهادی قلب هسته‌ای است. برای بهبود رفتار ریبیل، کنترل‌کننده جریان استفاده‌شده در مدلی که در آن پارامترهای کنترل به‌صورت آفلاین بر اساس الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شب تاب بهینه می‌شوند، استفاده شد؛ نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که الگوریتم‌های ذکر شده، در مسائل چند محوره دارای سرعت عملکرد بالاتر، تعداد تکرار پایین، ساختار کدنویسی ساده‌تر و عملکرد موفق می‌باشند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که استراتژی‌های کنترل پیشنهادی از اهمیت زیادی برای کاهش ریبیل، لرزش و جهش برخوردار هستند. در نهایت، موتور رلوکتانس سوئیچی دارای مزایای اصلی کم‌هزینه بودن، در دسترس بودن، بدون خطر احتراق مجدد و بدون ریبیل است.

Reference

- [1] Boyd, S., Boyd, S. P., Vandenberghe, L., & Press, C. U. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press. <https://books.google.com/books?id=mYm0bLd3fcoC>
- [2] Bilal, Pant, M., Zaheer, H., Garcia-Hernandez, L., & Abraham, A. (2020). Differential Evolution: A review of more than two decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103479>
- [3] Ranjini Kizhakkethil, S., & Murugan, S. (2018). Design and performance comparison of permanent magnet brushless motors and switched reluctance motors for extended temperature applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, 67, 137-146. <https://doi.org/10.2528/PIERM18022502>
- [4] Andrada, P., Blanqué, B., Martinez, E., & Torrent, M. (2014). A Novel Type of Hybrid Reluctance Motor Drive. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61(8), 4337-4345. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2279384>

- [5] Lin, C., & Lin, B.-F. (2012). Automatic pressurized water reactor loading pattern design using ant colony algorithms. *Annals of Nuclear Energy*, 43, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.12.002>
- [6] Ortiz, J. J., Castillo, A., Montes, J. L., & Perusquía, R. (2007). A new system to fuel loading and control rod pattern optimization in boiling water reactors. *Nuclear Science and Engineering*, 157(2), 236-244. <http://repositorio.fcencias.unam.mx:8080/jspui/handle/11154/1090>
- [7] Ahmad, A., & Ahmad, S.-u.-I. (2018). Optimization of fuel loading pattern for a material test reactor using swarm intelligence. *Progress in Nuclear Energy*, 103, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.11.007>
- [8] de Moura Meneses, A. A., Machado, M. D., & Schirru, R. (2009). Particle Swarm Optimization applied to the nuclear reload problem of a Pressurized Water Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 51(2), 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.07.002>
- [9] Waintraub, M., Schirru, R., & Pereira, C. M. N. A. (2009). Multiprocessor modeling of parallel Particle Swarm Optimization applied to nuclear engineering problems. *Progress in Nuclear Energy*, 51(6), 680-688. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.02.004>
- [10] de Oliveira, I. M. S., & Schirru, R. (2011). Swarm intelligence of artificial bees applied to In-Core Fuel Management Optimization. *Annals of Nuclear Energy*, 38(5), 1039-1045. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.009>
- [11] Safarzadeh, O., Zolfaghari, A., Norouzi, A., & Minucmehr, H. (2011). Loading pattern optimization of PWR reactors using Artificial Bee Colony. *Annals of Nuclear Energy*, 38(10), 2218-2226. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.008>
- [12] Poursalehi, N., Zolfaghari, A., & Minucmehr, A. (2013). PWR loading pattern optimization using Harmony Search algorithm. *Annals of Nuclear Energy*, 53, 288-298. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.02.004>
- [13] de Moura Meneses, A. A., Araujo, L. M., Nast, F. N., da Silva, P. V., & Schirru, R. (2018). Application of metaheuristics to Loading Pattern Optimization problems based on the IAEA-3D and BIBLIS-2D data. *Annals of Nuclear Energy*, 111, 329-339. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.09.008>
- [14] Poursalehi, N., Zolfaghari, A., Minucmehr, A., & Moghaddam, H. K. (2013). Continuous firefly algorithm applied to PWR core pattern enhancement. *Nuclear Engineering and Design*, 258, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.011>
- [15] Schlünz, E., Bokov, P., & Vuuren, J. (2016). An optimisation-based decision support system framework for multi-objective in-core fuel management of nuclear reactor cores. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(3), 201-209. <https://doi.org/10.7166/27-3-1650>
- [16] Schlünz, E., Bokov, P., & Vuuren, J. (2018). Multiobjective in-core nuclear fuel management optimisation by means of a hyperheuristic. *Swarm and Evolutionary Computation*, 42, 58-76. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.019>
- [17] Jayalal, M. L., Murty, S. A. V. S., & Magapu, S. B. (2014). A Survey of Genetic Algorithm Applications in Nuclear Fuel Management. *Journal of Nuclear Engineering and Technology*, 4(1), 45-62. <http://www.stmjournals.com/index.php?journal=JoNET&page=article&op=view&path%5B%5D=4616>
- [18] del Campo, C. M. n., Francois, J., & López, H. (2001). AXIAL: a system for boiling water reactor fuel assembly axial optimization using genetic algorithms. *Annals of*

- Nuclear Energy*, 28(16), 1667-1682. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:33033264
- [19] Martín del Campo, C., Palomera-Pérez, M.-Á., & François, J. (2009). Advanced and flexible genetic algorithms for BWR fuel loading pattern optimization. *Annals of Nuclear Energy* 36(10), 1553-1559. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.07.013>
- [20] Ortiz, J. J., & Requena, I. (2004). An Order Coding Genetic Algorithm to Optimize Fuel Reloads in a Nuclear Boiling Water Reactor. *Nuclear Science and Engineering*, 146(1), 88-98. <https://doi.org/10.13182/NSE04-A2395>
- [21] Do, B., Choi, H., & Roh, G. (2006). An Evolutionary Optimization of the Refueling Simulation for a CANDU Reactor. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 53(5), 2957-2961. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.882369>
- [22] Huo, X., & Xie, Z. (2005). A novel channel selection method for CANDU refueling based on the BPANN and GA techniques. *Annals of Nuclear Energy* 32(10), 1081-1099. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2005.03.003>
- [23] Mishra, S., Modak, R. S., & Ganesan, S. (2009). Optimization of Thorium loading in fresh core of Indian PHWR by evolutionary algorithms. *Annals of Nuclear Energy*, 36(7), 948-955. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.03.003>
- [24] Zarei, M. (2019). An optimization based output power regulation in small modular reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 344, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.01.032>
- [25] Pratapgiri, S., & Prasad, P. V. N. (2011). Direct Instantaneous torque control of 4 phase 8/6 switched reluctance motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 1(2), 121-128. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v1i2.102>
- [26] Le-Huy, H., & Chakir, M. (2010, September 6-8). Optimizing the performance of a switched reluctance generator by simulation. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5608165>
- [27] Zhu, Y., Zhao, C., Zhang, J., & Gong, Z. (2020). Vibration Control for Electric Vehicles With In-Wheel Switched Reluctance Motor Drive System. *IEEE Access*, 8, 7205 - 7216. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964582>
- [28] Pasquesoone, G. (2011). *Controls for High Performance Three-Phase Switched Reluctance Motors* [Doctoral Dissertations, University of Akron]. Ohio, United States.
- [29] Bae, H.-K. (2000). *Control of switched reluctance motors considering mutual inductance* [Doctoral Dissertations, Virginia Polytechnic Institute and State University]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/28593>
- [30] Lim, H. S., Roberson, D. G., Lobo, N. S., & Krishnan, R. (2005, November 6-10). Novel flux linkage control of switched reluctance motor drives using observer and neural network-based correction methods. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005, Raleigh, NC, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1569115>



Redesign of Engine Radiator Based on Number of Optimal Fans Using a Genetic Algorithm

Bahman Rahmatinejad¹, Mahdi Abbasgholipour^{2*} , Behzad Mohammadi Alasti³

¹PhD student, Department of Biosystem Mechanical engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran.

^{2, 3} Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanical engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.26.2020

Revised: 11.01.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Genetic algorithm
Radiator function
Cooling system
Engine
Redesign

***Corresponding Author:**

Mahdi Abbasgholipour

Email:

Abbasgholipour@bonabiau.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the thermal performance of a sample radiator under defined environmental conditions was studied. The relations governing the heat transfer for the air flow and the cooling fluid of water and ethylene glycol (50% -50%) were written in the radiator and then the characteristics of the radiator were changed and the relations re-examined. It was observed that the thermal performance of a radiator whose length was reduced by 25% but number of fins increased from 385 to 437 was equal to the thermal performance of the original radiator. The ϵ -NTU method was used to investigate this matter. Its optimal value was determined by the designed genetic algorithm 436. In addition, the distance between the two fins was reduced from 3.92 mm to 2.94 mm, the optimal value of which was determined by a genetic algorithm of 2.867 mm. Reducing the length of the radiator makes the radiator lighter and reduces construction costs, but reducing it too much can cause the cooling fans to come closer together and create a problem with heat dissipation.





طراحی مجدد رادیاتور موتور بر اساس تعداد فین‌های بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک

بهمن رحمتی نژاد^۱، مهدی عباسقلی پور^{۲*}، بهزاد محمدی الستی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.
۲- و ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.

چکیده

در این تحقیق، عملکرد حرارتی یک رادیاتور نمونه در شرایط محیطی تعریف شده، مطالعه شد. روابط حاکم بر انتقال حرارت برای جریان هوا و سیال خنک‌کننده آب و اتیلن گلیکول (۵۰٪-۵۰٪) در رادیاتور نوشته شد و سپس مشخصات رادیاتور، تغییر داده شدند و روابط، مجدد بررسی شد. مشاهده شد عملکرد حرارتی یک رادیاتور که طول آن ۲۵ درصد کاهش داده شده ولی تعداد فین‌های آن از ۳۸۵ به ۴۳۷ افزایش داده شده است با عملکرد حرارتی رادیاتور اولیه، برابر است. برای بررسی این موضوع، از روش ϵ -NTU استفاده گردید. مقدار بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک طراحی شده ۴۳۶ فین تعیین گردید. همچنین فاصله بین دو فین از $mm92/3$ به $mm94/2$ کاهش یافت که مقدار بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک $mm867/2$ تعیین گردید. کاهش طول رادیاتور، باعث سبک‌تر شدن رادیاتور و کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود اما کاهش بیش‌ازحد آن می‌تواند باعث نزدیک شدن فین‌های خنک‌کننده به هم شود و مشکل در دفع حرارت را به وجود آورد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

الگوریتم ژنتیک
عملکرد رادیاتور
سیستم خنک‌کننده
موتور
طراحی مجدد

*نویسنده مسئول: مهدی عباسقلی پور

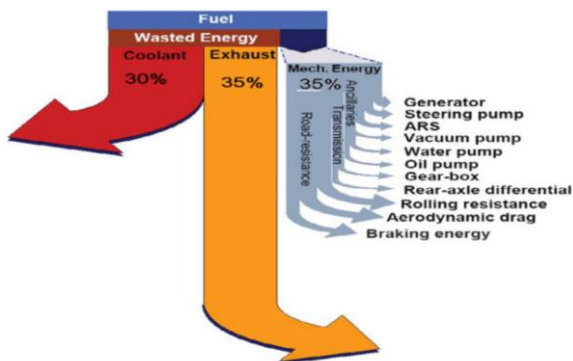
پست الکترونیکی:

abbasgholipour@bonabiau.ac.ir



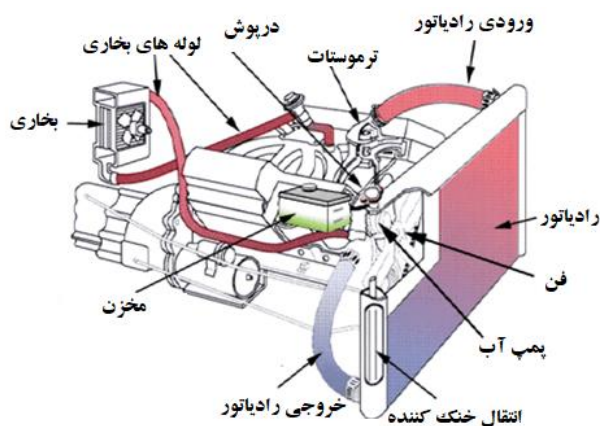
مقدمه

احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتورهای احتراق داخلی، تولید قدرت می‌کند که بخشی از آن مفید است و بخش دیگر آن توسط سیستم خنک‌کننده و اگزوز، تلف می‌شود. تقاضا برای موتورهای قدرتمند در فضای کوچک‌تر موتور و سیستم‌های خنک‌کاری، مشکلاتی در میزان تلفات گرما در رادیاتور خودرو به وجود آورده است. بیش از ۳۰ درصد انرژی حرارتی تولیدشده موتور توسط سیستم خنک‌کاری منتقل می‌شود و اگر این انتقال حرارت، به‌درستی صورت نگیرد گرمای موتور افزایش می‌یابد و با از بین رفتن فیلم، روغن بین قطعات باعث ساییدگی قطعات می‌شود.



شکل ۱. بخش انرژی در یک وسیله نقلیه [۱]

رادیاتور، جزو مهمی از سیستم خنک‌کاری است. زمانی که سیال خنک‌کننده از میان موتور حرکت می‌کند گرمای تولیدشده در آن را جمع می‌کند و زمانی که به یک حد مشخص رسید ترموستات، اجازه ورود آب گرم را به رادیاتور می‌دهد. در داخل رادیاتور، دمای آب از بدنه رادیاتور به صورت هدایتی و از جداره بیرونی آن به روش جابه‌جایی به محیط حرارت انتقال داده می‌شود. شکل ۲ شماتیک یک سیستم خنک‌کاری را نشان می‌دهد.



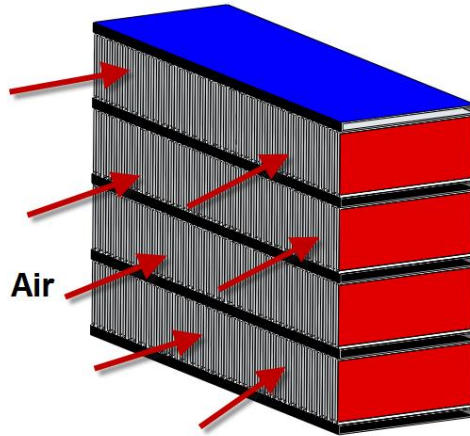
شکل ۲. طرح شماتیک سیستم خنک‌کننده موتور

مطالعات مختلفی به منظور افزایش کارایی انتقال حرارت رادیاتور با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند میزان جریان خنک کننده، سرعت هوا، پیکربندی فن و غیره انجام شده است. جوگر و کروک یک آزمایش تجربی را روی دو رادیاتور با منطقه جریان مشابه اما با لوله‌هایی در موقعیت عمودی یا افقی گزارش کردند؛ لذا تأثیر طول لوله در مقابل تعداد لوله‌های موازی را مطالعه کردند. آنها این تجزیه و تحلیل را برای سه مایع خنک کننده مختلف انجام دادند [۲]. گانگا چاریولو و همکاران یک تجزیه و تحلیل عددی (بر اساس روش ϵ -NTU) از یک رادیاتور در یک موتور دیزل، با توجه به تأثیر مواد تشکیل دهنده فن و لوله و شرایط مرزی روی هر دو مایع ارائه دادند [۳]. لین و همکاران، مطالعه جالبی از حساسیت اتلاف خاص (SD) به شرایط مرز رادیاتور (دمای ورودی هوا و مایع خنک کننده و دبی جرم) ارائه دادند. نتیجه گیری آنها توسط مقاله‌ای عددی و آزمایشی ارزیابی شد [۴]. چن و همکاران، به طور تجربی یک رادیاتور را به عنوان نمونه، تجزیه و تحلیل کردند و معادلات رگرسیون سرعت اتلاف حرارت، افت فشار خنک کننده و افت فشار هوا را در عملکرد شرایط مرزی ایجاد کردند [۵]. جاما و همکاران، تحت تأثیر توزیع جریان هوا و نامنظم بودن آن در امتداد رادیاتور در اندازه کامل قرار گرفته‌اند. این آزمایش نتیجه‌ای را بیان کرد که بهترین گزینه برای محافظت از قسمت جلویی خودرو / وسیله نقلیه است. جریان هوا برابر با امتداد افقی به روش عمودی است که به دلیل محافظت در هوا، سرعت بالایی را وارد می‌کند که باعث خنک شدن سریع و خنک شدن خودرو می‌شود. این یک روند منظم یا یکنواخت از توزیع جریان هوا برای ایجاد اثر خنک کننده روی خودرو و افزایش ظرفیت خنک کنندگی است [۶]. تسویوشی و همکاران، مطالعات عددی و تجربی در مورد گردش مایعات در رادیاتور قطره مایع ارائه دادند. مدل گردش سیال فعال در رادیاتور قطره مایع ایجاد شده است. رفتار گردش سیال فعال محاسبه شده از مدل با رفتار حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شد؛ البته در موردی که میزان گردش جریان سیال فعال تغییر کند. وی بررسی کرد که با کاهش میزان جریان با فشار زمان، اختلاف در مایع فعال افزایش یافت و با تنظیم تعداد دور در پمپ دنده‌ای که در مدل استفاده می‌شود، می‌توان این پدیده‌ها را بهبود بخشید [۷]. اولیت و همکاران، مطالعات پارامتریک در مورد رادیاتور خودرو ارائه کردند. آنها بررسی کردند که ضریب کلی انتقال گرما تقریباً مستقل از دمای ورودی هوا است. اما به رویه جریان خنک کننده بستگی دارد. ظرفیت خنک کننده با افزایش جریان خنک کننده و جریان هوا افزایش می‌یابد. دمای ورودی هوا، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و ظرفیت خنک کننده نیز کاهش می‌یابد. فاصله فن‌های کوچک و زاویه‌های فن آجدار بالاتر، انتقال حرارت بالاتری دارند [۸]. مائو-یو و همکاران سه تنظیمات فن را برای بهبود انتقال حرارت یک مبدل حرارتی فن و لوله، مطالعه و بررسی کردند. در میان فن صاف، موج‌دار و مرکب، آنها انتقال گرمای بالاتری برای فن مرکب دارند [۹]. یاداو و همکاران، به بررسی مطالعه پارامتریک رادیاتور خودرو پرداخته‌اند. سرعت دبی جرم خنک کننده و غیره برای مطالعه پارامترهای مختلف رادیاتور مانند درجه حرارت خنک کننده، متفاوت است. علائم زیر در هنگام خواندن ثبت می‌شوند. رابطه مستقیم بین میزان دبی جرم خنک کننده و میزان جریان خنک کننده وجود دارد. با افزایش دمای ورودی، دمای ورودی مایع خنک کننده باعث افزایش ظرفیت خنک کننده رادیاتور می‌شود که در نهایت عملکرد بهتری برای موتور ایجاد می‌کند و گرمای ناخواسته تولید شده در موتور را کاهش می‌دهد [۱۰]. سینگ و همکاران، پارامتر هندسی تیغه که در فن برای خمیدگی عقب و جلو تیغه در فن گریز از مرکز استفاده می‌شود را بررسی کردند. عمدتاً از این فن سانتریفیوژ برای بهبود اتلاف گرما از احتراق داخلی سطح موتور استفاده می‌شود. در این مورد، ما در مورد نسبت قطر، تعداد پره‌ها و زاویه و غیره از فن جلو استفاده می‌کنیم تا سیستم خنک کننده را در مواردی که موتور خنک کننده بیشتر مورد نیاز است، افزایش دهیم. از آنجا که تعداد تیغه ضریب جریان بیشتری است و ضریب قدرت افزایش می‌یابد، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد [۱۱]. وایسی و همکاران، عملکرد انتقال حرارت مبدل حرارتی را با تنظیمات متقارن و نامتقارن فن مطالعه کردند. آنها چیدمان متقارن سرعت انتقال حرارت بالاتری را مشاهده کردند [۱۲]. شاتی و همکاران اثر زبری سطح و قابلیت انتشار در خروجی رادیاتور را ارائه دادند. تأثیر تغییر میزان انتشار و سفتی دیواره پشت رادیاتور بر خروجی گرمای رادیاتور به صورت تجربی و با استفاده از دینامیک

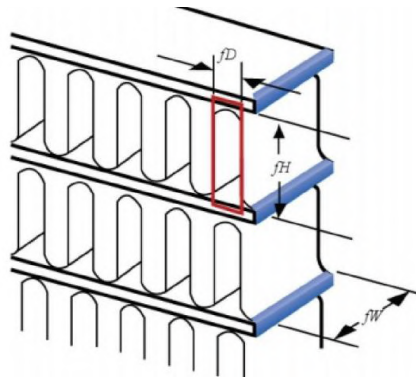
سیالات محاسباتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود زبری سطح مقیاس بزرگ و سطح انتشار زیاد، هم سرعت جریان گرما و هم سرعت هوا در پشت رادیاتور را در مقایسه با سطح براق صاف افزایش می‌دهد. زبری و سفتی سطح، هم سطح انتقال حرارت و هم شدت تلاطم را افزایش می‌دهد که باعث افزایش انتقال جرم و شار گرمای هم‌رفت آزاد از طریق شکاف هوا می‌شود. وی متوجه شد که افزایش شکاف هوا، باعث افزایش خروجی گرما و سرعت انتقال حرارت می‌شود [۱۳]. تریودی و همکاران، اثر لوله پیچ برای پیکربندی موردنیاز را بررسی کردند. برای افزایش انتقال حرارت می‌توانیم لوله را با تغییر شکل و ابعاد آنها اصلاح کنیم تا سطح کانون تابش‌یافته افزایش یابد؛ بنابراین عملکرد خنک‌کننده بهتری را روی رادیاتور خودرو خواهد داشت. تاکنون می‌توان حدس زد که گام لوله ۱۲ میلی‌متر برای کارایی بهتر است [۱۴]. چاوان و همکاران، عملکرد انتقال حرارت رادیاتورهای مختلف و توان مصرف شده توسط فن رادیاتور را مطالعه و پیشنهاد کردند که گوشه‌های رادیاتور را برای بهره‌وری مطلوب از بین ببرید. در این مقاله، بهینه‌سازی با تغییر شکل رادیاتور انجام می‌شود. بسته نرم‌افزاری CFD ANSYS FLUENT برای تجزیه و تحلیل استفاده شد [۱۵]. کوماوات و همکاران بررسی کردند که فن‌های جریان محوری این اصل در فشار بالا مناسب نیستند و در حجم زیاد هوا، در فشار کم عمل می‌کنند. این تیغه‌های محوری به‌گونه‌ای در اصلاح ایروفیل در چنین تیغه‌ای طراحی شده‌اند که نیاز به هزینه کم و کارایی بهتر دارند و دارای حداقل تعداد تیغه هستند که از نظر کارایی موتور خودرو، عملکرد مناسبی دارد [۱۶]. پرچاپاتی و همکاران، یک مبدل حرارتی جریان متقابل غیرمخلوط با سرعت جریان مختلف و ترکیب متفاوت سیال گرم را آزمایش کردند و تأثیر این پارامترها بر دمای خروجی و ضریب انتقال حرارت کلی را مطالعه کردند. مشخص شد که با افزایش سرعت دبی جرم مایع سرد، دمای خروجی مایع سرد کاهش می‌یابد. همچنین برای یک مبدل حرارتی مخلوط‌نشده، هنگامی که درصد خنک‌کننده در مخلوط خنک‌کننده آب از ۵۰ درصد بیشتر می‌شود، کاهش می‌یابد؛ زیرا ویسکوزیته در غلظت بالاتر، بالاتر می‌رود و بر گردش مایع تأثیر می‌گذارد و سرعت انتقال حرارت، کاهش می‌یابد [۱۷]. پراساد و همکاران، مبدل حرارتی پره‌ای مستطیلی و آلیاژی شده را با ۵۰/۵۰ اتیلن‌گلیکول و مخلوط آب به‌عنوان سیال فعال، مقایسه کردند و مشاهده نمودند که باله‌های پره‌ای شکل در مقایسه با باله‌های مستطیلی شکل، ویژگی‌های انتقال حرارت بهتری دارند. نرخ انتقال حرارت در مقایسه با باله‌های مستطیل شکل برای باله‌های پره‌ای شکل ۴۹ درصد بیشتر بود. آنها همچنین دریافتند که سرعت هوا برای باله‌های پره‌ای شکل به‌طور قابل توجهی بیشتر است که ممکن است عاملی برای افزایش سرعت انتقال حرارت در باله‌های پره‌ای شکل باشد [۱۸]. بهتر است برای بهبود کارایی و از بین بردن تنش‌های حرارتی، رادیاتور با حجم کوچک طراحی شود. بررسی پدیده‌های طبیعی مانند جریان سیال، انتقال گرما و الکترومغناطیس، همواره مورد توجه محققان بوده است [۱۹]. در این تحقیق قصد داریم نشان دهیم با حفظ سطح انتقال حرارت می‌توان تا حد زیادی از حجم رادیاتور را کم کرد. این کار بدون تغییر قابل توجهی در ساختار داخلی انجام می‌شود. روش‌های مختلفی در این زمینه وجود دارد: ۱- تغییر شکل طراحی فین‌ها ۲- افزایش عمق دیواره ۳- تغییر نوع لوله ۴- تغییر تنظیم جریان ۵- تغییر جنس فین‌ها ۶- افزایش مساحت سطح نسبت به نرخ مایع خنک‌کننده، مورد آخر در این مطالعه، بررسی شد؛ بدین صورت که عملکرد حرارتی یک رادیاتور که طول آن ۲۵ درصد کاهش داده شده ولی تعداد فین‌ها آن از ۳۸۵ به ۴۳۷ افزایش داده شده است با عملکرد حرارتی رادیاتور اولیه، برابر می‌باشد. برای بررسی این موضوع از روش $NTU - \epsilon$ استفاده گردید. همچنین مقدار بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه شد.

مواد و روش‌ها

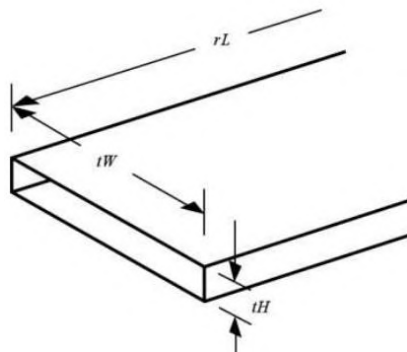
بیشتر موتورهای احتراق داخلی چهار سیلندر، بسته به اندازه‌شان، از رادیاتورهایی با ابعاد $11 \times 19/0 \times 5/7$ تا $0 \times 17 \times 27/9$ اینچ استفاده می‌کنند. به‌منظور بررسی امکان کاهش حجم رادیاتور و ثابت نگهداشتن کارایی حرارتی آن با افزایش تعداد فین‌ها از یک رادیاتور آلومینیومی با ابعاد $1 \times 17 \times 24$ اینچ و توان حرارتی $70/73 \frac{Kj}{s}$ استفاده شد. نمونه اولیه از شماتیک لوله‌ها و فین‌ها و مسیر جریان هوا روی رادیاتور در نرم‌افزار Solidwork طراحی گردید.



شکل ۳. شماتیک لوله‌ها و فین‌ها و مسیر جریان هوا روی رادیاتور طراحی شده در نرم‌افزار Solidwork



شکل ۴. شماتیک گسترده باله‌ها (فین‌ها)



شکل ۵. شماتیک گسترده لوله

خواص ترموفیزیکی آب، هوا و نانوذرات بر اساس منبع [۲۰] انتخاب گردید و در جدول ۱ آورده شد.

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی آب، اتیلن گلیکول و هوا [۲۰]

$\mu \left(\frac{Kg}{m.s} \right)$	$K \left(\frac{W}{m.K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{KgK} \right)$	$\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$	
۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۶۷۸	۴۲۱۲	۹۶۲	آب
-----	۰/۲۵۳	۲۴۲۰/۶	۱۱۱۰/۲	اتیلن گلیکول
۰/۰۰۰۰۱۸۶	۰/۰۲۶۳	۱۰۰۷/۱۲	۱/۱۵	هوا

ابعاد رادیاتور اصلی و پیشنهاد شده به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲. ابعاد رادیاتور اصلی

نام مشخصه	علامت اختصاری	اندازه بر حسب متر
طول رادیاتور	rL	۰/۶۰۶۹
عرض رادیاتور	Rw	۰/۴۳۱۷
ارتفاع رادیاتور	rH	۰/۰۲۴۶
عرض لوله	Tw	۰/۰۲۴۶
ارتفاع لوله	tH	۰/۰۰۱۵
عرض فین	Fw	۰/۰۲۴۶
ارتفاع فین	fH	۰/۰۱۱۸
ضخامت فین‌ها	fT	۰/۰۰۰۰۲
فاصله بین دو فین	fD	۰/۰۰۱۵
تعداد لوله‌ها	n_{tube}	۳۳

جدول ۳. ابعاد رادیاتور اصلاح شده (پیشنهادی)

نام مشخصه	علامت اختصاری	اندازه بر حسب متر
طول رادیاتور	rL	۰/۴۵۷۲
عرض رادیاتور	Rw	۰/۴۳۱۷
ارتفاع رادیاتور	rH	۰/۰۲۴۶
عرض لوله	Tw	۰/۰۲۴۶
ارتفاع لوله	tH	۰/۰۰۱۵
عرض فین	Fw	۰/۰۲۴۶
ارتفاع فین	fH	۰/۰۱۱۸
ضخامت فین‌ها	fT	۰/۰۰۰۰۲
فاصله بین دو فین	fD	۰/۰۰۱۵
تعداد لوله‌ها	n_{tube}	۳۳

یعنی در رادیاتور اصلاح شده، ۲۵ درصد از طول رادیاتور را کم می‌کنیم. مشخصات هوا، سیال خنک‌کننده و شرایط عملیاتی رادیاتور بر اساس منبع [۲۱] تعیین گردید.

جدول ۴. مشخصات سیال هوا [۲۱]

مقدار عددی	علامت مشخصه	مشخصه
$0.02663 \frac{W}{m.K}$	K_a	ضریب هدایت حرارتی هوا
$1004/16 \frac{J}{kg.K}$	C_a	گرمای ویژه
$1/1373 \text{ Kg}/(m^3)$	ρ_a	چگالی
0.0001912 Pa.s	μ_a	ویسکوزیته دینامیکی
$338/7 \text{ K}$	T_a	دمای هوای خنک کننده

جدول ۵. مشخصات مایع خنک کننده آب و اتیلن گلیکول (50%-50%) [۲۱]

مقدار عددی	علامت مشخصه	مشخصه
$0.415098 \frac{W}{m.K}$	K_c	ضریب هدایت حرارتی مایع
$3681/92 \frac{J}{kg.K}$	C_c	گرمای ویژه
$1015/57 \text{ Kg}/(m^3)$	ρ_c	چگالی
0.000744 Pa.s	μ_c	ویسکوزیته دینامیکی
$371/15 \text{ K}$	T_c	دمای سیال خنک کننده

جدول ۶. شرایط عملیاتی رادیاتور [۲۱]

مقدار عددی	علامت مشخصه	مشخصه
$0.001892 \frac{m^3}{s}$	ϑf_c	جریان حجمی خنک کننده مایع
$1/1086 \frac{m^3}{s}$	ϑf_a	جریان حجمی هوا
$4/470.4 \frac{m}{s}$	ϑ_a	سرعت باد
$70.730 \frac{J}{s}$	q_{cur}	کارایی انتقال حرارت

برای شروع تحلیل، انتظار داریم انتقال حرارت رادیاتور پیشنهادی ما با توجه به اینکه طول آن حدوداً ۲۵ درصد از مدل اصلی کوچکتر انتخاب شده، کمتر باشد؛ زیرا سطح خنک کننده را کاهش دادیم. سؤالی که در این قسمت قصد پاسخ دادن به آن را داریم این است که عملکرد انتقال حرارت چقدر کوچکتر شده است؟ اگر عملکرد انتقال حرارت کوچکتر شود می توان به کمک روشهایی چون افزایش تعداد فین ها در هر ردیف، تغییر شکل مواد فین ها و تغییر تنظیم جریان آن را افزایش داد. از روش $\varepsilon - NTU$ برای پیش بینی عملکرد انتقال حرارت سیستم جدید استفاده شده است. معادلاتی که در این خصوص مورد استفاده قرار خواهد گرفت به شرح ذیل می باشد:

نرخ انتقال حرارت هدایت شده:

$$Q = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{water} - T_{air}) = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot ITD \quad (1)$$

مقاومت کلی حرارت موجود در سیستم:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_c A_c} + \frac{1}{h_a A_a} \quad (2)$$

در رابطه ۲ مقدار A_c مساحت سطح خنک کننده و A_a مساحت سطح هوا است و از رابطه (۳) به دست می آید.

$$A_c = n_{tube} \times (2t_H \cdot r_L + 2T_W \cdot r_L) \quad (3)$$

$$A_a = (2f_D \cdot f_H + 2f_H \cdot f_w) \times \text{تعداد کل مسیرهای عبوری}$$

اگر تعداد کل مسیرهای عبور هوا را با $Total_{NAP}$ نشان دهیم داریم:

$$Total_{NAP} = \left(\frac{\text{طول رادیاتور}}{\text{فاصله فین ها}} \right) \times (n_{tube} - 1) \times \left(\frac{r_L}{f_D} \right) \quad (۴)$$

در نهایت، مساحت کلی (A_{total}) از جمع A_c با A_a به دست می آید.

$$A_{total} = A_c + A_a$$

مقدار h_c به خواص فیزیکی و حرارتی سیال، سرعت سیال و هندسه آن بستگی دارد. بنابراین می توان از معادله رینولدز برای تعیین ویژگی های جریان خنک کننده عبوری از داخل لوله ها استفاده کرد.

$$Re = \left(\frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\mu} \right) \quad (۵)$$

پارامتر D_H قطر هیدرولیکی می باشد و از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$D_H = \frac{4 \cdot A_{min}}{WP} \quad (۶)$$

در این رابطه WP محیط خیس شده سطح مقطع جریان و A_{min} سطح مقطع جریان است و برای سیال خنک کننده از روابط (۷) به دست می آیند:

$$A_{min_c} = (t_w \times t_H) \quad (۷)$$

$$WP_c = 2(t_w + t_H)$$

حال با استفاده از A_{min_c} و WP_c می توان قطر هیدرولیکی را محاسبه کرد. در ادامه، سرعت جریان خنک کننده از میان لوله ها را از رابطه (۸) محاسبه می کنیم.

$$v_c = \frac{\vartheta f_c}{n_{tube} \times A_{min_c}} \quad (۸)$$

با محاسبه v_c می توان عدد رینولدز را محاسبه کرد. با توجه به عدد رینولدز محاسبه شده می توان عدد نوسلت را محاسبه کرد. برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته با درجه حرارت ثابت در سطوح لوله عدد نوسلت از رابطه (۹) محاسبه می شود [۲۱].

$$Nu = \frac{hD}{K} = 3.66 \quad (۹)$$

برای محاسبه عدد نوسلت موضعی در جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته در لوله های صاف از تشابه چیلتون- کولبرن می توان استفاده کرد که در نهایت به شکل رابطه (۱۰) تحت عنوان رابطه کولبرن، ساده می شود:

$$Nu_u = 0.023 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

دیتوس و بولتر برای جریان متلاطم توسعه یافته در لوله های صاف، رابطه (۱۱) را پیشنهاد دادند [۲۲].

$$Nu_u = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (11)$$

خواص در این رابطه، در دمای کپهای سیال در نظر گرفته می شود و مقدار نمای n برابر است با:

$$n = \begin{cases} 0.4 & \text{برای گرمایش سیال} \\ 0.3 & \text{برای سرمایش سیال} \end{cases}$$

رابطه دیتوس - بولتر^۱ نسبت به رابطه کولبرن، ترجیح داده می شود. این رابطه برای جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته در لوله های صاف برای سیالاتی با عدد پرانتل $0.6 < Pr < 100$ و اختلاف دمای کپهای 0.6 تا 100 بین شرایط سطح دیواره و سیال معتبر است. عدد پرانتل از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$Pr = \frac{C\mu}{K} \quad (12)$$

در مورد عدد پرانتل می توان گفت [۲۲]:

۱. رشد لایه مرزی سرعت، سریع تر از لایه مرزی حرارتی است ($Pr > 1$)
 ۲. رشد لایه مرزی حرارتی، سریع تر از لایه مرزی سرعتی است ($Pr < 1$)
 ۳. می توان فرض کرد در تمام ناحیه ورودی حرارتی پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته می باشد. ($Pr \gg 1$)
- پس از به دست آوردن عدد پرانتل می توان عدد نوسلت را از طریق رابطه کولبرن محاسبه کرد. با دریافتن عدد نوسلت می توان از رابطه (۱۳) h_c را محاسبه کرد.

$$Nu_u = \frac{h_c D_H}{K_c} \Rightarrow h_c = \frac{Nu_u K_c}{D_H} \quad (13)$$

برای تعیین h_a از روابط اشاره شده برای h_c استفاده می شود با این تفاوت که عدد رینولدز هوا را باید در نظر گرفت. در صورتی که جریان آرام باشد برای ارتباط عدد رینولدز و عدد نوسلت نمی توان از رابطه دیتوس و بولتر استفاده کرد. یکی از رویکردها برای محاسبه h_a محاسبه آن زمانی است که $h_a = h_{a_{cur}}$ باشد. در ادامه نشان خواهیم داد که $h_{a_{cur}}$ توسط ضریب انتقال حرارت برای رادیاتور اصلی به دست خواهد آمد (UA_{cur}). معادله مربوط به تعداد واحدهای انتقال یافته (NTU) برای تعیین ضریب انتقال حرارت کلی (UA_{cur}) استفاده خواهد شد.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) مقدار C_{min} از مقایسه ظرفیت حرارتی سیال خنک کننده و هوا به دست می آید. نرخ ظرفیت حرارتی از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است.

$$CR = C \times mf_r \quad (15)$$

در این رابطه mf_r نرخ جریان توده ای است و از طریق رابطه (۱۶) برای سیال خنک کننده و هوا قابل محاسبه می باشد.

$$mf_r = \rho \times \text{جریان حجمی سیال} \quad (16)$$

حال می توان نرخ ظرفیت حرارتی (CR) برای سیال خنک کننده و هوا را محاسبه کرد. زمانی که $CR_a < CR_c$ باشد. داریم:

$$\begin{cases} C_{min_{cur}} = CR_a \\ C_{max_{cur}} = CR_c \end{cases}$$

در این رابطه:

CR_a : نرخ ظرفیت گرمایی هوا

CR_c : نرخ ظرفیت گرمایی سیال خنک کننده

$C_{min_{cur}}$: حداقل ظرفیت حرارتی مقایسه ای سیال خنک کننده و هوا برای رادیاتور

$C_{max_{cur}}$: حداکثر ظرفیت حرارتی مقایسه ای سیال خنک کننده و هوا برای رادیاتور

در رابطه مطرح شده زیرنویس cur به معنی رادیاتور می باشد.

گرمای ویژه رادیاتور از رابطه (۱۷) به دست می آید.

$$C_{ratio_{cur}} = \frac{CR_a}{CR_c} \quad (17)$$

در ادامه نیاز داریم NTU را برای رادیاتور به دست آوریم. برای این کار نیاز است از روابط ITD، ε و q استفاده شود.

$$ITD = \text{دمای هوا} - \text{دمای مایع خنک کننده} \quad (18)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{C_{max}(1 - e^{-C_{ratio} \times NTU})}{C_{min}}} \quad (19)$$

$$q = \varepsilon \times C_{min} \times ITD \quad (20)$$

رابطه (۲۰) را می توان برای یک رادیاتور به صورت رابطه (۲۱) تغییر داد.

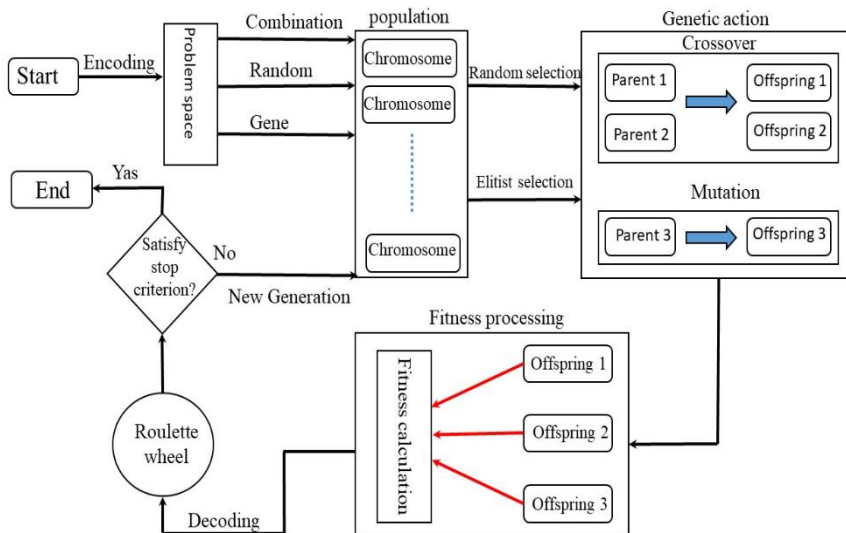
$$q_{cur} = \varepsilon_{cur} \times C_{min} \times ITD \Rightarrow \varepsilon_{cur} = \frac{q_{cur}}{C_{min} \times ITD} \quad (21)$$

از رابطه (۲۱) مقدار ε_{cur} محاسبه می شود و در (۱۹) به جای ε استفاده می گردد و از آن رابطه، مقدار NTU محاسبه می شود که همان NTU_{cur} رادیاتور می باشد. این مقدار را به همراه C_{min} در رابطه (۱۴) قرار می دهیم و از آن مقدار

UA_{cur} را حساب می‌کنیم. این محاسبات را هم برای رادیا تور اصلی و هم رادیا تور پیشنهادی انجام و نتایج را با هم مقایسه می‌کنیم.

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روشی برای جستجوی تصادفی عددی است که از فرایند ساده‌شده تکامل طبیعی، تقلید می‌کند. این الگوریتم روی جمعیتی از پاسخ‌ها عمل می‌کند و با به‌کاربردن اصل بقای بهترین و تکامل، به ایجاد جواب‌های بهتر و مناسب‌تر می‌پردازد [۲۳؛ ۲۴]. در حقیقت، الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی است که در آن، روند جستجوها مشابه تکامل طبیعی موجود بیولوژیکی است که در آن، نسل موجودات، زاده و بزرگ می‌شوند تا زمانی که قادر به رشد باشند. دقیقاً مثل قلمروی حیوانات، تنها، اصلح برای تولیدمثل زنده خواهد ماند، در حالی که ضعیف‌ترین، حذف خواهد شد [۲۵]. اولین گام برای استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعیین نحوه تعریف کروموزوم‌هاست که این موضوع با توجه به ویژگی‌های مسئله تعیین می‌گردد. در الگوریتم پیشنهادی، کروموزوم‌ها به‌صورت آرایه‌ای از اعداد صحیح تعریف می‌شود. از آنجایی که این الگوریتم مبتنی بر جمعیت است برای شروع باید تعدادی جواب اولیه تولید کرد. تولید این جواب‌ها به‌صورت کاملاً تصادفی می‌باشد. برای تولید جمعیت جدید در هر نسل، مکانیزم انتخاب و عملگرهای تقاطع و جهش استفاده می‌شود. برای انتخاب والدین، به‌منظور شرکت در عملگرهای تقاطع و جهش، از روش چرخ رولت استفاده شد که در آن، احتمال انتخاب هر جواب متناسب با مقدار تابع برازش آن جواب می‌باشد. در این الگوریتم برای تقاطع احتمال ۸۰ درصد و برای عمل جهش از میان جواب‌های تقاطع‌یافته احتمال ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. مقدار تابع هدف مدل پیشنهادی، به‌عنوان تابع برازندگی در نظر گرفته شده است؛ از این رو باید پس از ایجاد جمعیت اولیه و همچنین تولید جواب‌های جدید حاصل از عملگرها، مقدار تابع هدف را برای این جواب‌ها محاسبه کرد. برای انتخاب هر نسل از جواب‌ها، ترکیبی از نخبه‌گرایی و انتخاب تصادفی استفاده شد. برای اتمام الگوریتم پیشنهادی، انجام تعداد ۲۰۰ تکرار یا سپری شدن تعداد ۱۰۰ تکرار بدون هیچ‌گونه بهبود در مقدار هدف، در نظر گرفته شد. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. فلوجارت الگوریتم طراحی شده

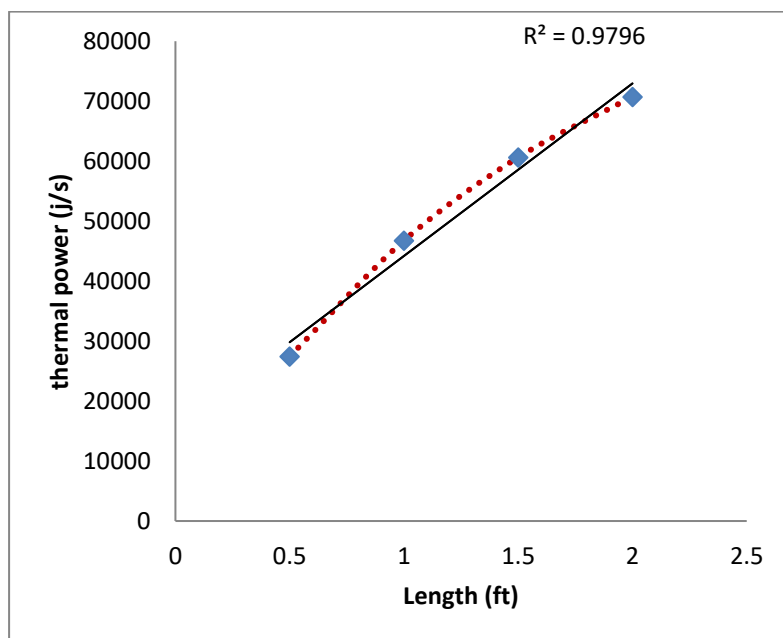
نتایج و بحث

در این تحقیق، فرض بر این است که با حفظ سطح انتقال حرارت می‌توان تا حد زیادی از حجم رادیاتور موتور را کاهش داد. این کار بدون تغییر قابل توجهی در ساختار داخلی انجام می‌شود. برای اثبات این فرضیه، از یک رادیاتور با ابعاد $1 \times 1 \times 24$ اینچ استفاده شد. عملکرد انتقال حرارت برای این رادیاتور در شرایط معمولی تعیین گردید. این رادیاتور قادر به اتلاف حرارت با سرعت $70/73 \frac{Kj}{s}$ می‌باشد. سپس عملکرد انتقال حرارت را توسط روش $\epsilon - NTU$ برای رادیاتور موجود و رادیاتورهای پیشنهادی محاسبه کردیم. برای شروع تحلیل ابتدا طول رادیاتور، تغییر داده شد و توان حرارتی هر کدام محاسبه گردید. این مقادیر در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. تغییرات توان حرارتی با تغییر در طول رادیاتور

توان حرارتی ($\frac{Kj}{s}$)	طول رادیاتور (in)	طول رادیاتور (ft)
۲۷۴۱۴	۶	۰/۵
۴۶۷۶۱	۱۲	۱
۶۰۶۳۲	۱۸	۱/۵
۷۰۷۷۶	۲۴	۲

بر اساس داده‌های جدول ۷ مشخص است که اگر تنها طول رادیاتور را کاهش دهیم توان آن کاهش خواهد یافت. با کاهش ۲۵ درصد و ۵۰ درصد از طول رادیاتور به ترتیب توان حرارتی آن ۱۴ درصد و ۳۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش توان منتقل شده می‌توان تعداد فین‌های خنک‌کننده در سطح (سطح انتقال حرارت) را افزایش داد.

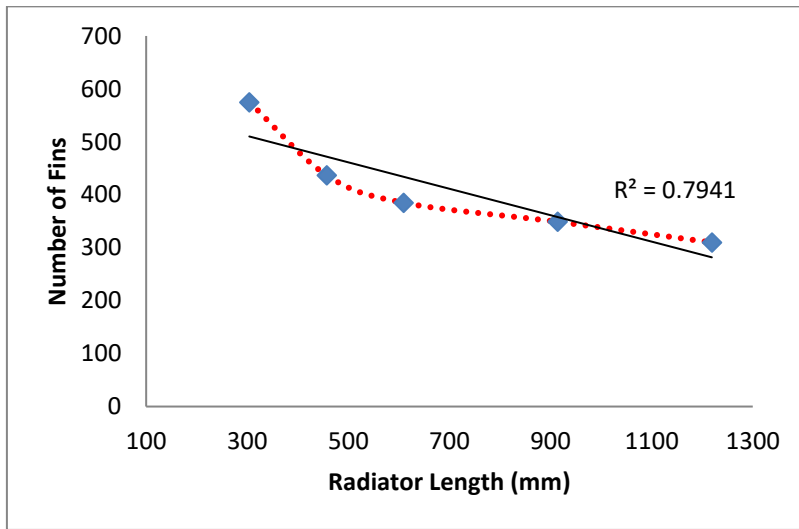


شکل ۷. تغییرات توان حرارتی با تغییر در طول رادیاتور

پس برای اینکه توان رادیاتورهای طراحی شده با رادیاتور اصلی یکسان باشد با توجه به اینکه از طول رادیاتورها کم شده است باید سطح مقطع انتقال حرارت با افزایش فین‌ها جبران شود. تعداد فین‌های موردنیاز بر اساس طول رادیاتور در جدول ۸ ارائه شده است.

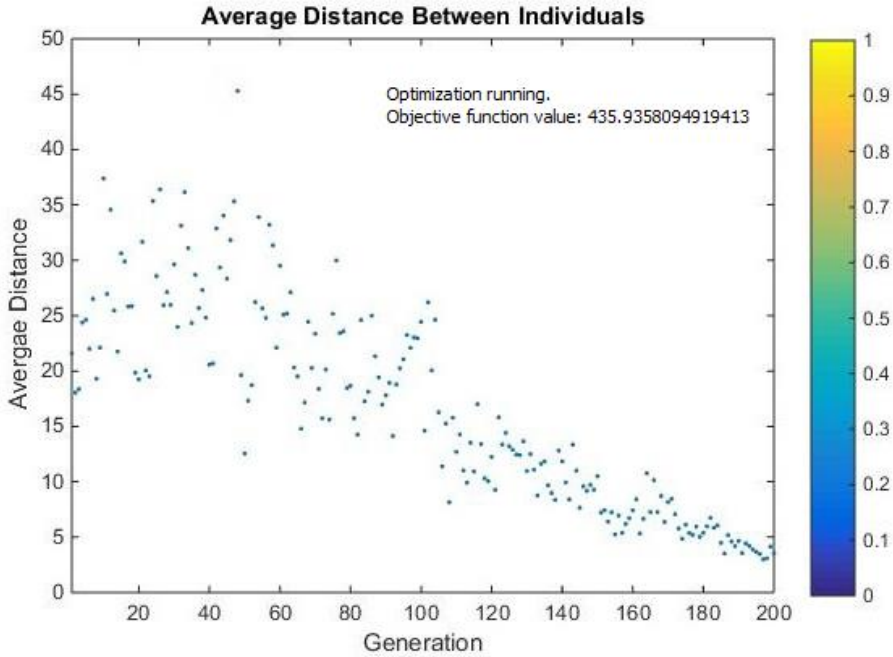
جدول ۸. تعداد فین‌های مورد نیاز بر اساس طول رادیاتور

تعداد فین‌ها	طول رادیاتور (in)	طول رادیاتور (ft)
۵۷۵	۱۲	۱
۴۳۷	۱۸	۱/۵
۳۸۵	۲۴	۲
۳۴۹	۳۶	۳
۳۱۰	۴۸	۴



شکل ۸. نمودار تعداد فین‌های موردنیاز بر اساس طول رادیاتور

با کاهش ۲۵ درصد از طول رادیاتور، تعداد فین‌های مورد نیاز از ۳۸۵ به ۴۳۷ افزایش می‌یابد. حال اگر بخواهیم مقدار بهینه آن را توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه کنیم به مقدار ۴۳۶ خواهیم رسید (شکل ۹)



شکل ۹. تعیین فین های مورد نیاز رادیاتور به کمک الگوریتم ژنتیک زمانی که ۲۵ درصد از طول رادیاتور کم شده است.

با توجه به موارد مطرح شده مشخص است که اگر طول رادیاتور تغییر کند برای ثابت نگه داشتن توان حرارتی باید تعداد فین ها را تغییر داد. زمانی که تعداد فین ها تغییر کند تنها پارامتری که تغییر پیدا خواهد کرد فاصله بین دو فین است. برای تعیین فاصله بین فین ها در رادیاتورهای پیشنهادی می توان از رابطه ۲۲ استفاده کرد.

$$F_D = \frac{r_L - (n_{tube} \times F_T)}{\text{Number of Fins}} \quad (22)$$

در این رابطه:

F_D : فاصله بین دو فین

r_L : طول رادیاتور

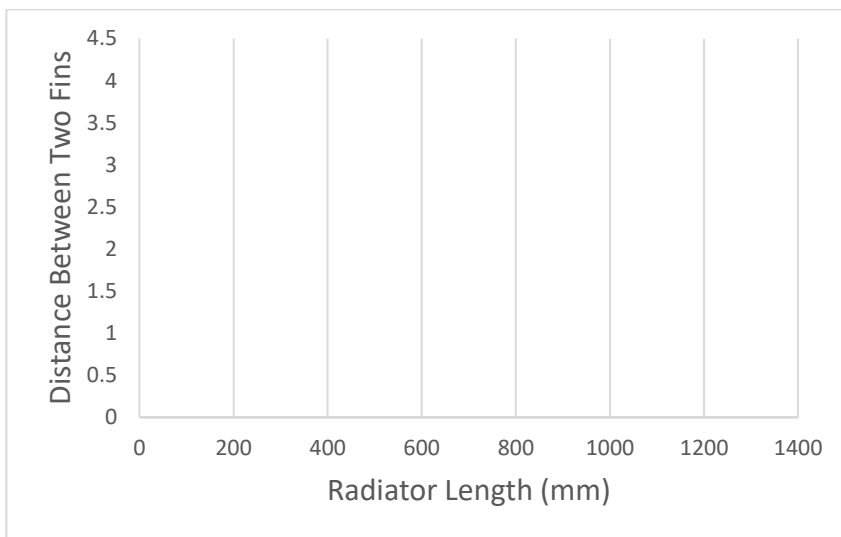
n_{tube} : تعداد لوله ها

F_T : ضخامت یک فین

Number of Fins : تعداد فین پیشنهادی برای هر رادیاتور.

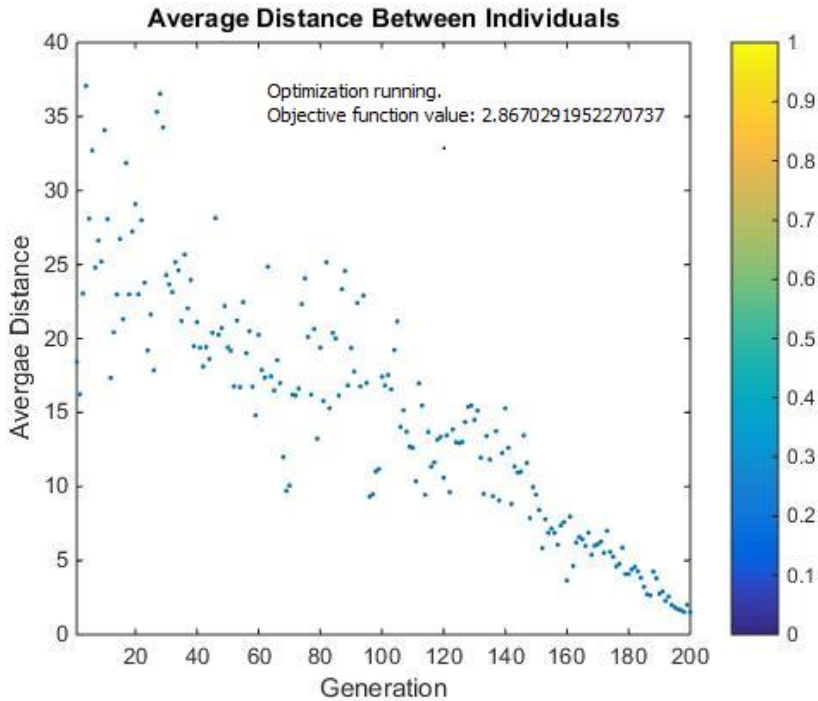
جدول ۹. تعیین فاصله بین فین‌ها

فاصله بین فین‌ها (mm)	طول رادیاتور (mm)	طول رادیاتور (ft)
۰/۵۲	۳۰۴	۱
۱/۰۴	۴۵۷	۱/۵
۱/۵۸	۶۰۹	۲
۲/۶۱	۹۱۴	۳
۳/۹۲	۱۲۱۹	۴

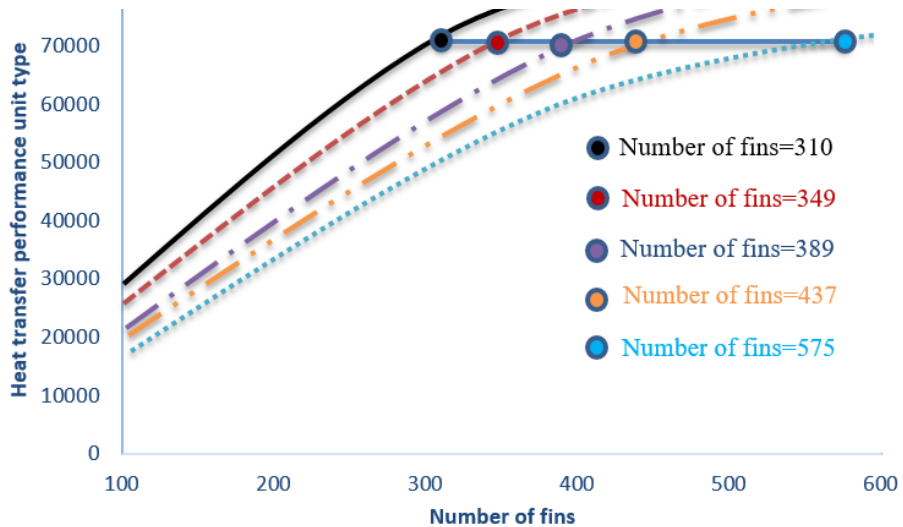


شکل ۱۰. تعیین فاصله بین فین‌ها نسبت به طول رادیاتور

با توجه به شکل ۱۰ با کاهش ۱۵ درصد از طول رادیاتور فاصله بین فین‌ها ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس اطلاعات جدول ۹ با کاهش ۲۵ درصد از طول رادیاتور، فاصله بین دو فین از ۳/۹۲ mm به ۲/۹۴mm کاهش می‌یابد. حال اگر بخواهیم مقدار بهینه آن را توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه کنیم به مقدار ۲/۸۶۷ mm خواهیم رسید (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. تعیین فاصله بین دو فین توسط الگوریتم ژنتیک زمانی که ۲۵ درصد از طول رادیاتور کم شده است.



شکل ۱۲. توان حرارتی ثابت رادیاتور با افزایش تعداد فین‌های خنک‌کننده

با توجه به شکل ۱۲ با افزایش فین‌های خنک‌کننده توان حرارتی رادیاتور می‌تواند ثابت بماند اما با توجه به اینکه با افزایش تعداد فین‌ها، فاصله بین آنها کم می‌شود کاهش بیش از حد طول رادیاتور می‌تواند باعث مشکل در دفع حرارت از فین‌ها شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرض بر این بود که با حفظ سطح انتقال حرارت می‌توان تا حد زیادی از حجم رادیاتور را کاهش داد. برای اثبات این فرضیه، از یک رادیاتور با ابعاد 17×24 اینچ استفاده شد. این رادیاتور قادر به اتلاف حرارت با سرعت $70/73 \frac{KJ}{s}$ می‌باشد. سپس عملکرد انتقال حرارت توسط روش $\epsilon - NTU$ برای رادیاتور موجود و رادیاتور پیشنهادی محاسبه شد. نتایج نشان داد با فرض ثابت بودن فین‌های خنک‌کننده رادیاتور اگر تنها طول رادیاتور را کاهش دهیم توان آن کاهش خواهد یافت. با کاهش ۲۵ درصد و ۵۰ درصد از طول رادیاتور، به ترتیب توان حرارتی آن ۱۴ درصد و ۳۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش توان منتقل شده، تعداد فین‌های خنک‌کننده در سطح افزایش داده شد. با کاهش ۲۵ درصد از طول رادیاتور، تعداد فین‌های موردنیاز از ۳۸۵ به ۴۳۷ افزایش یافت. مقدار بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک ۴۳۶ محاسبه گردید. همچنین فاصله بین دو فین از $3/92$ mm به $2/94$ mm کاهش یافت که مقدار بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک $2/867$ mm تعیین گردید. کاهش طول رادیاتور باعث سبک‌تر شدن رادیاتور و کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود و در خودروهایی که مشکل فضا در قسمت موتور دارند می‌تواند مفید واقع شود. اما کاهش بیش از حد آن می‌تواند باعث نزدیک شدن فین‌های خنک‌کننده به هم شود و مشکل در دفع حرارت را به وجود آورد.

References

- [1] Shariff, K., Abdullahi, B., & Abubakar, S. B. (2018). Modelling and Simulation of Car Radiator: Effects of Fins under the Atmospheric Condition of Kano, Nigeria. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 48(1), 1-16. <https://akademiabaru.com/submit/index.php/arfmts/article/view/2255>
- [2] JuGer, J. J., & Crook, R. F. (1999). Heat transfer performance of propylene glycol versus ethylene glycol coolant solutions in laboratory testing. *Journal of Engines, SAE Transactions*, 108(3), 71-81. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0129>
- [3] Charyulu, D. G., Singh, G., & Sharma, J. K. (1999). Performance evaluation of a radiator in a diesel engine—a case study. *Applied Thermal Engineering*, 19(6), 625-639. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00064-7)
- [4] Lin, C., Saunders, J., & Watkins, S. (2000). The Effect of Changes in Ambient and Coolant Radiator Inlet Temperatures and Coolant Flowrate on Specific Dissipation. *Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems Journal, SAE Transactions*, 109(6), 760-771. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0579>
- [5] Chen, J. A., Wang, D. F., & Zheng, L. Z. (2001). Experimental study of operating performance of a tube-and-fin radiator for vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 215(8), 911-918. <https://doi.org/10.1243/0954407011528473>
- [6] Jama, H. H., Watkins, S., Dixon, C., & Ng, E. (2004, December 13-17). Airflow Distribution through the Radiator of a Typical Australian Passenger Car. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Sydney, Australia. <https://www.aeromech.usyd.edu.au/15afmc/proceedings/papers/AFMC00216.pdf>

- [7] Totani, T., Kodama, T., Watanabe, K., Nanbu, K., Nagata, H., & Kudo, I. (2006). Numerical and experimental studies on circulation of working fluid in liquid droplet radiator. *Acta Astronautica*, 59(1), 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.02.034>
- [8] Oliet, C., Oliva, A., Castro, J., & Pérez-Segarra, C. D. (2007). Parametric studies on automotive radiators. *Applied Thermal Engineering*, 27(11), 2033-2043. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.006>
- [9] Wen, M.-Y., & Ho, C.-Y. (2009). Heat-transfer enhancement in fin-and-tube heat exchanger with improved fin design. *Applied Thermal Engineering*, 29(5), 1050-1057. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.05.019>
- [10] Yadav, J., & Singh, P. B. R. (2015). Study on Performance Evaluation of Automotive Radiator. *SAMRIDDIH: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 2(2), 47-56. <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v2i2.1604>
- [11] Singh, O. P., Khilwani, R., Sreenivasulu, T., & Kannan, M. (2011). Parametric Study of Centrifugal Fan Performance: Experiments and Numerical Simulation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET)*, 1(2), 33-50. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.215.523&rep=rep1&type=pdf>
- [12] Vaisi, A., Esmaeilpour, M., & Taherian, H. (2011). Experimental investigation of geometry effects on the performance of a compact louvered heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3337-3346. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.06.014>
- [13] Shati, A. K. A., Blakey, S. G., & Beck, S. B. M. (2011). The effect of surface roughness and emissivity on radiator output. *Energy and Buildings*, 43(2), 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.002>
- [14] Trivedi, P. K., & Vasava, N. B. (2012). Effect of Variation in Pitch of Tube on Heat Transfer Rate in Automobile Radiator by CED Analysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 1(6), 180-183. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.676.465&rep=rep1&type=pdf>
- [15] Chavan, D. K., & Tasgaonkar, G. S. (2013). Study, analysis and design of automobile radiator proposed with CAD drawings and geometrical model of fan. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 3(2), 137-146. <http://paper.researchbib.com/view/paper/5040>
- [16] Kumawat, H. (2015). Modeling and simulation of axial fan using CFD. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 8(11), 1892-1896. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1337905>
- [17] Chopra, M., & Prajapati, R. S. (2014). Thermal performance analysis of cross-flow unmixed-unmixed heat exchanger by the variation of inlet condition of hot fluid. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 1, 29-31.
- [18] Prasad, P., & Prasad, L. S. V. (2017). CFD Analysis On Louvered Fin. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(1), 1458-1462. <https://www.irjet.net/archives/V4/i1/IRJET-V4I1265.pdf>
- [19] 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>
- [20] Mohammed Ali, F., Yunus, W. M., Moxsin, M. M., & Talib, Z. A. (2010). The effect of volume fraction concentration on the thermal conductivity and thermal diffusivity

- of nanofluids: numerical and experimental. *Review of scientific instruments*, 81(7), 074901. <https://doi.org/10.1063/1.3458011>
- [21] Maplesoft. (2008, July 02). *Designing a More Effective Car Radiator - Maple Application Center*. Maplesoft. <https://www.maplesoft.com/Applications/Detail.aspx?id=6403>
- [22] Holman, J. P. (2002). *Heat Transfer*. McGraw-Hill. <https://books.google.com/books?id=M3wpAQAAAJ>
- [23] McCall, J. (2005). Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184(1), 205-222. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2004.07.034>
- [24] Whitley, L. D. (1989). The GENITOR Algorithm and Selection Pressure: Why Rank-Based Allocation of Reproductive Trials is Best. Third International Conference On Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann.
- [25] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 33-55. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100504.html?lang=en



The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine

Sayad Nasiri^{1*} , Hossein Rahimi Asiabaraki² , Ehsan Razaghi³

¹Faculty Member, Center for Engineering Skills, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

²Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Karaj (Shahid Beheshti), Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Alborz, Iran.

³Former Student, Department of Mechanical Engineering, Sapco Center of Applied Science and Technology, University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.19.2020

Revised: 01.17.2021

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Swirl flow
Combustion efficiency
Multi-size valve
Inlet port
Flow coefficient

***Corresponding Author:**

Sayad Nasiri

Email: nasiri@sharif.edu

ABSTRACT

One of the methods to increase the combustion efficiency in an internal combustion engine is to create swirl flow. In EF7 engine, there are two inlet valves per cylinder so small amount of swirl flow may be created. Most of the conventional methods for generating vortex current, even used in new engines, require major design and modifications of cylinder head, and their costs are significant. In this study, a new low-cost method was developed to create vortex flow. The goal of the changes is to develop inlet flow difference between the two inlet valves led to develop swirl flow in the cylinder in order to increase the combustion efficiency provided that the flow coefficient doesn't face a loss. First, the swirl flow in an EF7 engine was measured at steady state and then the intended changes was implemented on the two ends of the cylinder head. After that, all valves sits' angle were fabricated in accordance with corresponding standards. Then, this method was experimentally evaluated using the flow bench test so that in addition to measure the accuracy of swirl flow, the swirl flow coefficient can be compared with other methods such as flow control valve. The results show that there is a minor reduction in flow coefficient for low valve lifts, but It can be gained an acceptable amount of swirl flow for high valve lifts with minor costs and changes for cylinder head in comparison with other designs.





تأثیر سیستم سوپاپ چند اندازه‌ای بر موتور EF7 پایه گازسوز به منظور بهبود جریان گردابه

صیاد نصیری^{۱*}، حسین رحیمی آسیابری^۲، احسان رزاقی^۳

- ۱- عضو هیئت علمی، مرکز آموزش مهارت های مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۳- دانش آموخته، دپارتمان مهندسی مکانیک، مرکز آموزش علمی - کاربردی ساپکو، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از راه‌های افزایش راندمان احتراق، ایجاد جریان گردابه در موتور است. در موتور EF7 به دلیل استفاده از دو سوپاپ ورودی به‌ازای هر سیلندر، جریان گردابه‌ای ناچیزی در سیلندر وجود دارد. بیشتر روش‌های موجود برای ایجاد جریان گردابه که در موتورهای جدید نیز استفاده می‌شوند، به طراحی و تغییرات اساسی در سرسیلندر احتیاج دارند و هزینه‌های آن نیز چشمگیر است. در این مقاله، روشی جدید و کم‌هزینه به‌منظور تولید جریان گردابه در سیلندر ارائه شده است. هدف از این تغییرات، ایجاد اختلاف جریان بین دو سوپاپ ورودی در سیلندر و تولید جریان گردابه و در نهایت افزایش راندمان احتراق است، با این شرط که ضریب جریان افت نداشته باشد. ابتدا جریان گردابه داخل موتور EF7 استاندارد، درون آزمایشگاه در شرایط پایا اندازه‌گیری و تغییرات بر دو ناحیه سرسیلندر اعمال شد. سپس تمامی زوایای نشیمن‌گاه سوپاپ به‌صورت استاندارد ساخته شد. پس از آن با استفاده از آزمون میز جریان، عملکرد این روش مورد بررسی قرار گرفت تا علاوه بر صحت ایجاد جریان گردابه، بتوان میزان ضریب جریان گردابه را نسبت به روش‌های دیگری همچون دریچه کنترل جریان مقایسه کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش جزئی ضریب جریان در گشودگی‌های کم سوپاپ، می‌توان به جریان گردابه قابل‌قبولی در گشودگی‌های بالای سوپاپ با هزینه کم و تغییرات کم در سرسیلندر نسبت به طرح‌های دیگر دست یافت.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

جریان گردابه
راندمان احتراق
سوپاپ چند اندازه‌ای
راهگاه ورودی
ضریب جریان

*نویسنده مسئول: صیاد نصیری

پست الکترونیکی:

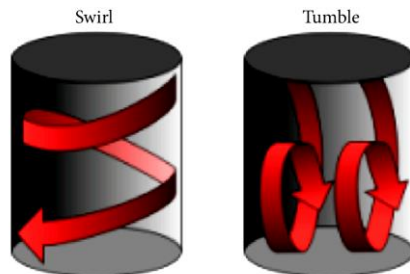
nasiri@sharif.edu



مقدمه

امروزه استانداردهای سخت‌گیرانه محیط‌زیست و افزایش قیمت سوخت، بیشتر محققان را بر آن داشته که موتورهای با راندمان احتراق^۱ بالا و آلاینده‌گی کم، طراحی کنند. طراحان به دنبال افزایش گشتاور در سرعت‌های کم موتور به‌وسیله بهینه‌سازی پارامترهایی همچون زمان‌بندی سوپاپ^۲، نسبت تراکم^۳ و چندراهه‌های متغیر^۴ هستند [۱]. زیرا گشتاور بالا در سرعت کم موتور، عاملی است که اکثر خودروهای شهری به آن نیاز دارند.

گشتاور در سرعت‌های کم موتور، تابع میزان هوا و سوخت واردشده به سیلندر است؛ بنابراین هدف از به‌کارگیری سیستم‌های جدید سوپاپ، همانند زمان‌بندی متغیر سوپاپ^۵، افزایش راندمان حجمی^۶ به‌منظور افزایش گشتاور در سرعت‌های کم موتور است. اما یکی از اهداف پژوهشگران، افزایش گشتاور از طریق بهبود راندمان احتراق می‌باشد. مهم‌ترین عامل کنترل فرایند احتراق در موتورهای احتراق داخلی، نحوه حرکت سیال ورودی به داخل سیلندر است [۲]؛ زیرا باعث بهتر سوخته شدن مخلوط سوخت و هوا می‌شود. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که علاوه بر آشفته‌گی معمول، جریان گردابه^۷ و غلتش^۸ نیز در ورود سوخت و هوا به موتور اتفاق می‌افتد. شکل ۱ جریان گردابه و جریان غلتش در داخل یک سیلندر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. جریان گردابه و غلتش درون سیلندر [۳]

در موتورهای چهار سوپاپ معمولی که دارای سیستم جریان گردابه اجباری نیستند، جریان گردابه بسیار ناچیز است اما غلتش به مقدار خوبی وجود دارد. غلتش، معمولاً در گشودگی‌های بالای سوپاپ که حجم هوای ورودی به سیلندر زیاد است به‌خوبی اتفاق می‌افتد اما زمانی که مقدار هوای ورودی به موتور کم باشد مثلاً هنگام گشودگی کم سوپاپ یا در بارهای جزئی و سرعت‌های کم موتور، این جریان به‌خوبی شکل نمی‌گیرد و نمی‌تواند مؤثر واقع شود [۴]، به‌طوری که لی و همکارانش در مطالعه یک سرسیلندر چهار سوپاپ مجهز به دریچه کنترل گردابه^۹ به این نتیجه دست یافتند که به هنگام باز بودن دریچه، غلتش جریان به‌خوبی وجود دارد، اما این جریان در انتهای کورس تراکم از

¹ Combustion efficiency

² Valve timing

³ Compression ratio

⁴ Variable manifolds

⁵ Variable valve timing (VVT)

⁶ Volumetric efficiency

⁷ Swirl flow

⁸ Tumble flow

⁹ Swirl control valve (SCV)

بین می‌رود. در عوض هنگامی که در پیچه بسته است جریان گردابه به مقدار زیادی تا انتهای کورس تراکم وجود دارد و سرعت جریان در سیلندر نزدیک به دو برابر می‌شود [۵].

یکی دیگر از مزایای جریان گردابه، بهبود جریان گاز داخل سیلندر و اختلاط سوخت و هوا در بارهای کم موتور است که باعث افزایش چشمگیر پایداری احتراق در موتورهای احتراق جرقه‌ای می‌شود [۶]. همچنین عبدالله و همکارانش نیز در تحقیق تجربی خود به این نتیجه رسیدند که جریان گردابه باعث افزایش گشتاور، بهبود مصرف سوخت ویژه ترمزی^۱، افزایش سرعت احتراق و کاهش دو درصدی آلاینده CO₂ می‌شود [۷].

چانگ و همکارانش در مطالعه تأثیر جریان‌های داخل سیلندر بر راندمان موتور ۱۵۰ سی‌سی به این نتیجه رسیدند که با استفاده از یک در پیچه کنترل جریان، می‌توان جریان گردابه خوبی در موتور به وجود آورد که در بارهای جزئی مصرف سوخت را ۱۲ درصد بهبود می‌بخشد [۸].

پژوهش تجربی لی و همکارانش نشان داد، غلظت و گردابه، هر دو باعث افزایش تبخیر سوخت و اختلاط بهتر می‌شوند و نتایج در عملکرد بهتر استارت سرد، نمود پیدا می‌کند. همچنین به علت افزایش سرعت انتشار شعله می‌توان زمان بندی جرقه را به تأخیر انداخت که با این عمل زمان بیشتری برای تبخیر سوخت و اختلاط سوخت و هوا وجود دارد [۹].

ناگیاما و همکارانش در بررسی جریان گردابه بر احتراق و آلایندگی به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان گردابه، سرعت احتراق افزایش می‌یابد و قابلیت رانندگی و مصرف سوخت را بهبود می‌بخشد [۱۰]. همچنین کاپلان در تحقیق خود بیان کرد که جریان گردابه، غلظت و جریان شعاعی رو به مرکز^۲ باعث افزایش شدت آشفستگی در انتهای مرحله تراکم می‌شوند که این امر منجر به افزایش سرعت شعله آشفته و نرخ احتراق می‌شود [۱۱].

پلک رابک نیز در کتاب خود به این موضوع اشاره کرده که جریان گردابه، باعث افزایش آشفستگی و همگن‌تر شدن آن در تمامی سیلندر می‌شود. از طرفی، آشفستگی زیاد در انتهای مرحله تراکم برای احتراق بسیار مطلوب است؛ زیرا از خوداشتعالی و کوبش^۳ جلوگیری می‌کند [۱۲].

بنابراین می‌توان این نتیجه کلی را گرفت که با افزایش جریان گردابه در یک موتور گازسوز یا بنزینی، سرعت احتراق افزایش می‌یابد و راندمان موتور بهبود می‌یابد و جریان گردابه در سرعت‌های کم موتور، به‌طور مؤثری باعث بهبود احتراق، کاهش آلایندگی و افزایش فشار مؤثر متوسط ترمزی^۴ می‌شود [۱۳]. از طرفی باید به این نکته توجه داشت که افزایش بیش‌از‌حد جریان گردابه نه‌تنها باعث بهبود احتراق و کاهش آلایندگی نمی‌شود بلکه باعث افت راندمان حجمی در اثر کاهش انرژی جنبشی جریان سیال می‌گردد [۱۴].

همچنین به دلیل استفاده موتور EF7 به عنوان موتور پایه گازسوز، باید این نکته را در نظر گرفت که سرعت احتراق گاز طبیعی، کمتر از بنزین می‌باشد که این مسئله باعث کاهش راندمان موتور به دلیل افزایش انتقال حرارت به دیواره محفظه احتراق که ناشی از افزایش مدت زمان احتراق است، می‌شود که با ارائه راه‌کار جدید برای افزایش جریان گردابه، میزان اختلاط سوخت و هوا، بهبود و سرعت انتشار شعله، افزایش می‌یابد و در نتیجه، میزان انتقال حرارت به سیلندر، کاهش و راندمان حرارتی موتور، افزایش پیدا می‌کند.

بنابراین تمامی تحقیقات و مطالعات، نشان از تأثیرات مثبت جریان گردابه در موتور به خصوص در بارهای جزئی دارد.

¹ Brake-specific fuel consumption (BSFC)

² Squish

³ Knock

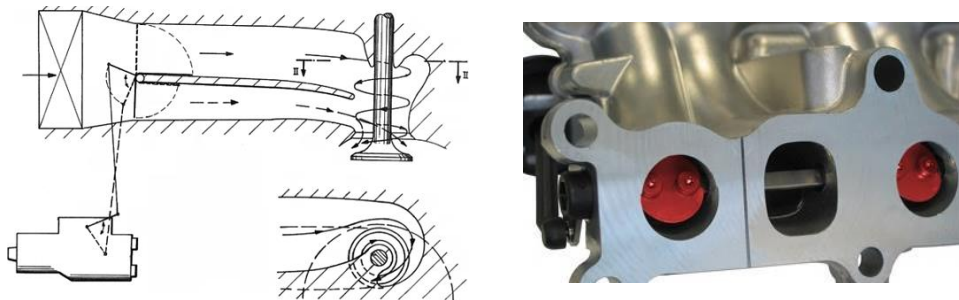
⁴ Brake mean effective pressure (BMEP)

چندین روش برای به وجود آوردن جریان گردابه در موتور استفاده می‌شود که دو روش زیر بیشترین مورد استفاده را دارند: روش اول، تخلیه جریان به صورت مماسی به سمت دیواره سیلندر و روش دوم، ایجاد جریان گردابه و چرخش جریان حول محور سوپاپ، قبل از ورود به سیلندر است. این دو روش در شکل ۲ قابل رؤیت هستند.



شکل ۲. روش‌های اساسی برای به وجود آوردن جریان گردابه [۱۵]

استفاده از راه‌گاه‌های مارپیچی برای ایجاد جریان گردابه و چرخش جریان حول محور سوپاپ، بیشتر در موتورهای دیزلی رایج است و در موتورهای بنزینی برای ایجاد این جریان، از دریچه کنترل جریان گردابه همانند شکل استفاده می‌شود [۱۴].



شکل ۳. دریچه کنترل جریان گردابه در چندراهه ورودی

علاوه بر دریچه کنترل جریان گردابه، یکی از روش‌های افزایش میزان گردابه، توجه به طراحی میل سوپاپ است؛ چنان‌که طراحی میل سوپاپ به گونه‌ای باشد که سوپاپ هرچه سریع‌تر به مقدار ماکزیمم گشودگی خود برسد، جریان گردابه قوی‌تری درون محفظه سیلندر ایجاد خواهد شد [۱۶].

پی‌پی‌تن و همکارانش در بررسی و مقایسه استفاده از دریچه کنترل جریان گردابه و اختلاف گشودگی سوپاپ برای تولید جریان گردابه به این نتیجه رسیدند که هر دو روش مؤثر هستند اما مکانیزم اختلاف گشودگی سوپاپ که مقدار سطح اطراف سوپاپ را کنترل می‌کند، مقدار نابالانسی بیشتری در جریان به وجود می‌آورد که تأثیر بیشتری دارد و دارای محدوده کارکرد بیشتری نسبت به دریچه کنترل جریان گردابه است [۱۷].

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که هدف از به‌کارگیری سیستم‌هایی مثل دریچه کنترل جریان گردابه یا اختلاف گشودگی سوپاپ توسط پژوهشگران، ایجاد نابالانسی در جریان هوای عبوری از راه‌گاه‌های ورودی^۱ سرسیلندر

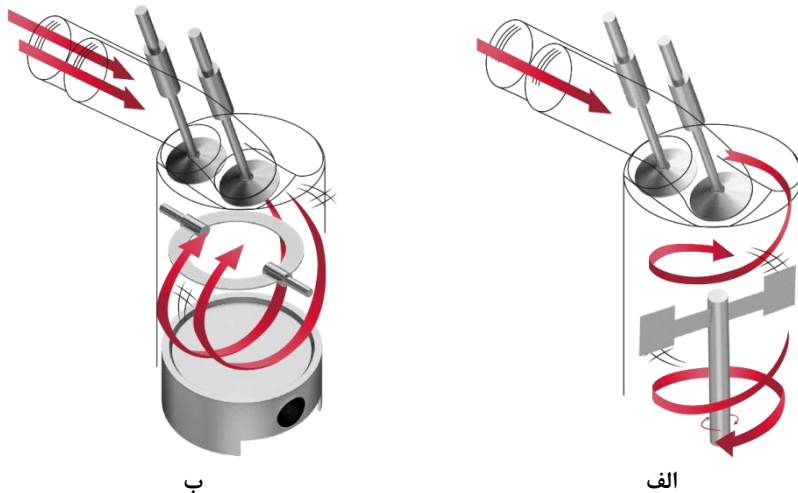
^۱ Inlet ports

است. در پژوهش حاضر، دستیابی به روشی برای ایجاد جریان گردابه در موتور EF7 مدنظر می‌باشد اما ایجاد این روش در موتور باید بدون تغییرات اساسی در میل بادامک و استفاده از دریچه کنترل جریان باشد؛ زیرا هزینه تمام‌شده این تغییرات بر موتور، چشمگیر است.

در این پژوهش، برای ایجاد نابالانسی در جریان هوا از طریق تغییر قطر سوپاپ‌های ورودی و شکل راه‌گاه‌های ورودی سرسیلندر به ایجاد جریان گردابه در موتور پرداخته شده است که نسبت به سیستم‌های دیگر مثل سیستم متغیر سوپاپ و دریچه کنترل جریان گردابه، هزینه کمتری دارد. در تحقیق حاضر، این روش به صورت تجربی با استفاده از آزمون میز جریان، بررسی شد تا علاوه بر صحت ایجاد جریان گردابه، بتوان میزان ضریب جریان گردابه را نسبت به روش‌های دیگری همچون دریچه کنترل جریان مقایسه کرد.

روش انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری و بررسی جریان هوای ورودی به موتور، از آزمون میز جریان استفاده شد که به کمک آن می‌توان میزان جریان گردابه و غلتش را با استفاده از سرسیلندر و سوپاپ مشابه اندازه‌گیری کرد. در مراکز تحقیقاتی، عموماً از دو روش برای اندازه‌گیری جریان گردابه یا غلتش استفاده می‌شود: روش اول، اندازه‌گیری سرعت دورانی جریان گردابه با استفاده از چرخ پره‌دار و روش دوم، اندازه‌گیری گشتاور اعمالی جریان گردابه با استفاده از یک هندسه لانه زنبوری می‌باشد [۳]. در این پژوهش، اندازه‌گیری جریان گردابه، بر مبنای سرعت چرخ پره‌دار^۱ که شماتیک آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود صورت پذیرفت.



شکل ۴. شماتیک میز جریان و چرخ پره‌دار جهت الف: اندازه‌گیری گردابه، ب: اندازه‌گیری غلتش

شدت جریان گردابه با مقدار گشودگی سوپاپ تغییر می‌کند؛ بنابراین از یک سازوکار ویژه همانند شکل ۵ جهت تنظیم مقدار بلند شدن سوپاپ استفاده می‌شود.

^۱ Paddle wheel



شکل ۵. تنظیم گشودگی سوپاپ با قید مخصوص و ساعت اندازه گیر

به دلیل تلرانس‌ها و خطاها در فرایند ساخت و تولید، قبل از ایجاد تغییرات روی سرسیلندر مقدار دبی جریان، غلظت و جریان گردابه هر یک از سیلندرها اندازه‌گیری شد؛ زیرا مقادیر مذکور در هر یک از سیلندرها متفاوت است و برای به حداقل رساندن خطای آزمایش، مقادیر داده‌ها به صورت دقیق ثبت گردید. جدول ۱ مشخصات موتور تحت آزمایش را نشان می‌دهد.

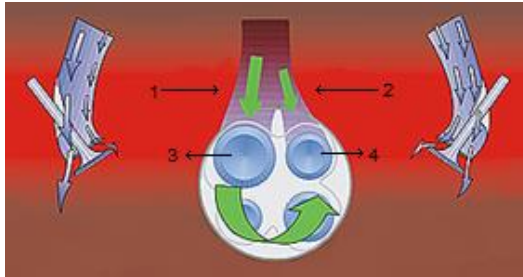
جدول ۱. مشخصات موتور تحت آزمایش

ردیف	موضوع	مقدار	واحد
۱	حجم موتور	۱۶۴۸	سی‌سی
۲	قطر سیلندر	۷۸/۶	میلی‌متر
۳	کورس پیستون	۸۵	میلی‌متر
۴	مدت مکش هوا	۱۹۸/۷	درجه
۵	حجم محفظه احتراق	۳۶/۲	سی‌سی
۶	نسبت تراکم	۱۱/۲:۱	
۷	قطر سوپاپ ورودی	۳۱/۳	میلی‌متر

پیش از ایجاد تغییرات، میزان مقادیر مجاز و فواصل ایمن سرسیلندر در نظر گرفته شد. بر مبنای سطح مؤثر سوپاپ‌های ورودی، یکی از دو سوپاپ ورودی ۱ میلی‌متر بزرگ‌تر و دیگری ۱ میلی‌متر کوچک‌تر طراحی شدند. دلیل انتخاب این مقدار اختلاف در اندازه دو سوپاپ، محدودیت در ابعاد محفظه احتراق و جای‌گذاری نشیمن‌گاه سوپاپ جدید می‌باشد. در این روش، با ثابت نگه‌داشتن سطح مؤثر سوپاپ‌های ورودی، اختلاف اندازه در سوپاپ نیز به وجود آمد. سپس سوپاپ‌های جدید با رعایت تلرانس‌های ساخت ساخته شدند. با توجه به تغییرات صورت‌گرفته روی سوپاپ، نشیمن‌گاه سوپاپ نیز طراحی و ساخته شد و به صورت انطباقی در سرسیلندر، جای‌گذاری گردید و طی فرایند تراش هم‌مرکز^۱، سوپاپ‌ها با نشیمن‌گاه خود آب‌بندی شدند. شایان ذکر است که در طراحی سوپاپ و نشیمن‌گاه ورودی،

^۱ Concentric turning

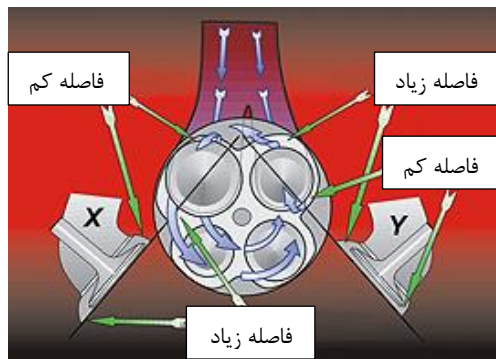
هیچ‌یک از زوایای ساخت قبلی تغییر نکردند و تراش سه زاویه نشیمن‌گاه^۱ نیز در ساخت رعایت گردید. در گذرگاه ورودی با ابزار آلات ویژه، انحنا با شعاع بیشتر در سمت دیواره‌ی بلند سوپاپ بزرگ‌تر و انحنا با شعاع کوچک‌تر در سمت دیواره سوپاپ کوچک‌تر ایجاد گردید. شکل ۶ نحوه تغییرات قطر سوپاپ و انحنا راه‌گاه ورودی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. تغییرات انحنا در راه‌گاه ورودی (۱-۲) و تغییرات قطر سوپاپ (۳-۴)

به علت آنکه برای سوپاپ کوچک‌تر، از نشیمن‌گاه کوچک‌تری استفاده شد، لبه نشیمن‌گاه در راه‌گاه ورودی به‌صورت یک پله ظاهر گردید که وجود این پله باعث ایجاد آشفتگی در جریان هوا می‌شود و با اصول سیالاتی طراحی موتور، تضاد دارد. به همین دلیل، برای اینکه وجود این پله، نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار ندهد، خمیر سیلیکون و چسب رزین به‌صورت قالب ثابت در راه‌گاه ورودی جایگذاری گردید و سپس طبق انحنا طراحی قبلی، تغییرات روی مواد قالب‌گیری شده در راه‌گاه دوباره اعمال شد.

هندس‌ه محفظه احتراق نیز بر تولید جریان گردابه تأثیر دارد و باید که محفظه احتراق نیز متناسب با تغییرات سوپاپ هماهنگ گردد. طبق شکل ۷ در طرفی از سوپاپ که جریان برای ایجاد گردابه نیاز به تقویت دارد، دیواره محفظه احتراق از لبه سوپاپ فاصله‌دار طراحی گردید و در سمت سوپاپ کوچک‌تر که جریان با حرکت گردابه تناقض دارد دیواره محفظه احتراق، فاصله کمی دارد.



شکل ۷. ایجاد تغییرات در محفظه احتراق و لبه سوپاپ

(در شکل بالا در مناطقی از محفظه احتراق که نیاز به تقویت جریان برای ایجاد جریان گردابه بوده، فاصله بین لبه سوپاپ و دیواره محفظه افزایش یافته است)

^۱ Three angle seat cut

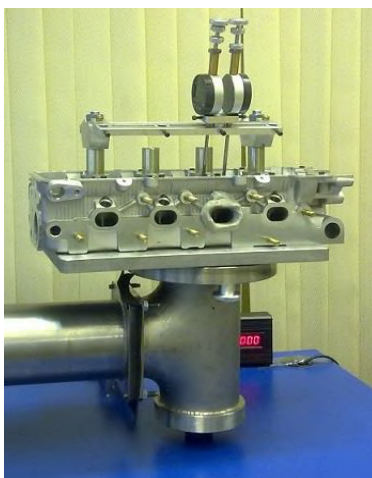
شکل ۸ نمای نهایی از کار انجام شده در سرسیلندر را نشان می دهد.



شکل ۸. تغییرات انجام شده در سرسیلندر جدید

اندازه گیری گردابه و ضریب جریان

تعیین طبیعت جریان گردابه در یک موتور واقعی در حال کار، بسیار مشکل است؛ بنابراین اغلب برای تعیین گردابه، از آزمایش های جریان پایدار^۱ درون دستگاه چرخش سنج، استفاده می گردد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده هوا به صورت یکنواخت از سوپاپی که روی سرسیلندر قرار گرفته است، به درون محفظه ای که معادل با محفظه سیلندر است عبور داده می شود و در انتهای این محفظه سیلندر، توربین سبکی قرار دارد که می تواند به آسانی حول محور سیلندر دوران کند [۱۸].



شکل ۹. نصب سرسیلندر روی میز جریان و آزمایش جریان

^۱ Steady flow

در دستگاه‌های چرخش‌سنج برای اندازه‌گیری، یک ضریب گردابه^۱ تعریف می‌شود که اساساً مقایسه‌ای بین ممنتوم زاویه‌ای جریان با ممنتوم محوری‌اش می‌باشد. بر این اساس، ضریب گردابه در چرخش‌سنج توربینی، به صورت رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$C_S = \frac{B \omega_P}{V_0} \quad (1)$$

در این رابطه B قطر سیلندر، V_0 سرعت محوری و ω_P سرعت زاویه‌ای توربین است که سرعت زاویه‌ای از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\omega_P = 2\pi N_P \quad (2)$$

در رابطه فوق N_P ، سرعت دورانی توربین است. همچنین سرعت محوری در رابطه ۱ می‌تواند از رابطه ۳ به طور تقریبی و با خطای قابل قبول در شرایط پایدار با استفاده از رابطه افت فشار در جریان‌های تراکم‌ناپذیر محاسبه شود.

$$V_0 = \left[\frac{2(P_0 - P_C)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3)$$

اگر رابطه موجود برای جریان‌های تراکم‌پذیر استفاده شود، با فرض ایزنتروپیک بودن جریان هوا در شرایط گاز ایده‌آل رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$V_0 = \left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma - 1)} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

که P_C فشار درون سیلندر و P_0 و V_0 به ترتیب فشار و سرعت در بالادست جریان (قبل از سوپاپ ورودی) است که با توجه به فشار داخل سیلندر و نسبت گرماهای ویژه (γ) محاسبه می‌شود [۱۵]. برای به دست آوردن نسبت گردابه^۲ که در زمان مکش اتفاق می‌افتد از رابطه ۵ استفاده می‌گردد.

$$R_S = \pi \eta_V B L \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} (A_V C_F) C_S d\theta}{\left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} (A_V C_F) d\theta \right]^2} \quad (5)$$

که در آن B قطر سیلندر، L کورس موتور و θ_1 و θ_2 زمان‌بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورودی هستند. برای دستیابی به هدف موردنیاز در پژوهش، به اندازه‌گیری ضریب جریان برای مقایسه نتایج و کارایی سیستم احتیاج داریم. ضریب جریان، به حداقل سطح جریان در راه‌گاه یا سطح داخلی نشیمن‌گاه سوپاپ مربوط می‌شود و به صورت نسبت نرخ جریان واقعی به نرخ جریان تئوری، تعریف می‌گردد [۱۵]. ضریب جریان با افزایش گشودگی سوپاپ افزایش می‌یابد که این ضریب با هندسه راه‌گاه محدود می‌شود و زمانی که فاصله لبه نشیمن‌گاه و سوپاپ زیاد باشد، محدودیت جریان به گلوبی سطح راه‌گاه وابسته می‌شود. به دلیل اینکه درصد زیادی از شارژ هوای ورودی در گشودگی‌های زیاد سوپاپ، اتفاق می‌افتد، تأثیر ضریب جریان بر راندمان حجمی موتور، بسیار مهم است [۱۹].

¹ Swirl coefficient

² Swirl ratio

استفاده از ضریب جریان، به تنهایی نمی تواند اختلاف ظرفیت جریان در گشودگی های کم سوپاپ را به آسانی نشان دهد؛ زیرا مقدار ضریب جریان در گشودگی های کم سوپاپ، بسیار کوچک است. برای محاسبه ضریب جریان از روابط ۶ و ۷ استفاده می شود.

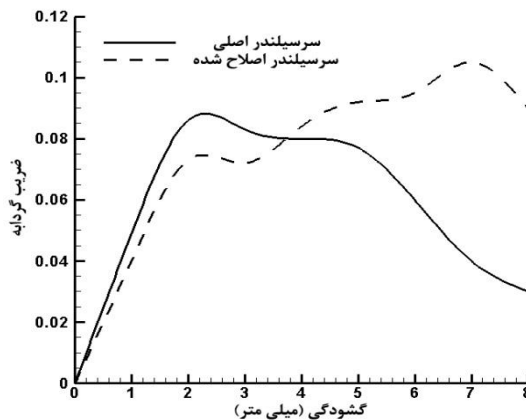
$$C_f = \frac{\dot{m}}{\rho V_0 A_V} \quad (6)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad A_V = \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

نتایج و بحث

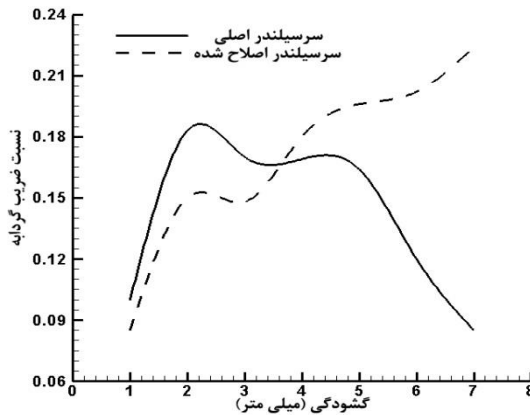
در این پژوهش، هدف افزایش جریان گردابه می باشد اما دستیابی به این هدف، زمانی مورد قبول است که راندمان حجمی موتور در سیستم سوپاپ جدید، کاهش پیدا نکند. محققان برای رسیدن به اهداف خود در دستیابی به راندمان احتراق و کاهش مصرف سوخت، ناچار به استفاده از سیستم هایی برای تولید جریان گردابه در سیلندر هستند، حتی اگر ایجاد جریان گردابه باعث کاهش ضریب جریان در سرسیلندر شود. نتایج به دست آمده از آزمون میز جریان به شرح زیر است:

با اندازه گیری مقدار چرخش توربین و محاسبه ضریب گردابه می توان سیستم سوپاپ معمولی و سیستم سوپاپ جدید را در شکل ۱۰ مقایسه کرد.



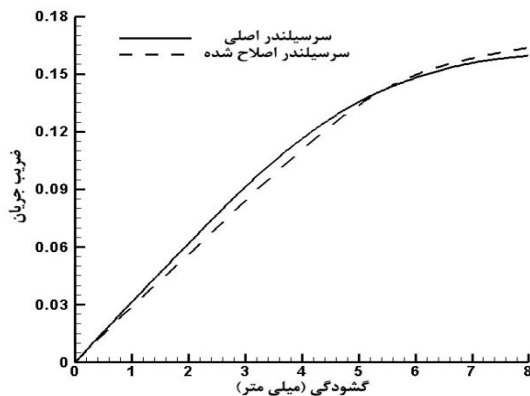
شکل ۱۰. مقایسه ضریب جریان گردابه در سیلندر

شکل ۱۱ اطلاعات لازم برای مقایسه نسبت جریان گردابه در آزمایش را بر حسب رابطه ۵ نمایش می دهد.



شکل ۱۱. مقایسه نسبت جریان گردابه در دو حالت اصلی و اصلاح شده

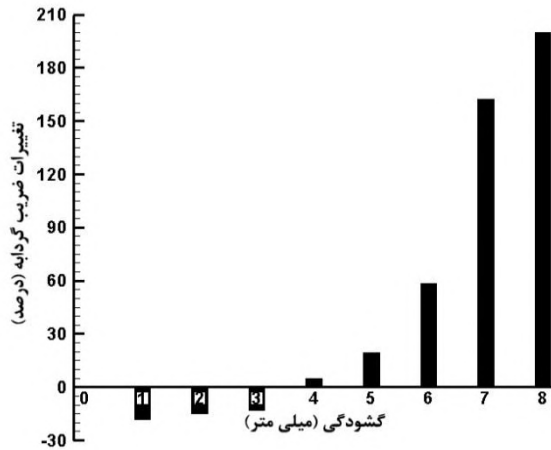
مقایسه نتایج حاصل از ضریب جریان در سرسیلندر استاندارد و سرسیلندر با سیستم جدید سوپاپ را می توان در شکل ۱۲ بررسی کرد.



شکل ۱۲. مقایسه ضریب جریان در دو سرسیلندر اصلی و اصلاح شده

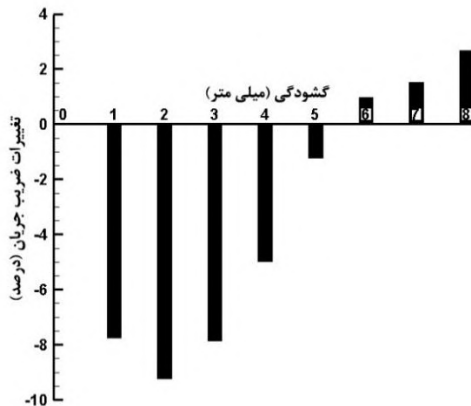
استخراج مقادیر ضریب جریان حاصل از آزمایش نشان می دهد که مقدار جریان گردابه برای سرسیلندر اصلی در گشودگی ۲ میلی متر به حداکثر مقدار خود می رسد و در گشودگی های بالاتر، روند نزولی دارد که این روند نزولی در گشودگی های ۵ الی ۷ میلی متر بیشتر نمود پیدا می کند. اما پس از اعمال تغییرات در سرسیلندر و اندازه گیری پارامترهای مختلف سیستم سوپاپ جدید، نتایج به این صورت حاصل می شود که مقدار ضریب جریان گردابه، در گشودگی ۱ میلی متر نزدیک به ۱۸ درصد نسبت به سرسیلندر اصلی کاهش می یابد که در گشودگی های ۲ الی ۳ میلی متر این مقدار به ۱۳ تا ۱۵ درصد کاهش می رسد. در گشودگی ۴ میلی متر که در سرسیلندر اصلی جریان گردابه شروع به افت شدید می کند، سرسیلندر جدید، روند افزایشی جریان گردابه را به وجود می آورد؛ به طوری که با بررسی درصد تغییرات جریان گردابه بر حسب گشودگی که در شکل ۱۳ مشاهده می شود می توان دریافت که در

گشودگی‌های ۵ الی ۷ میلی‌متر، بین ۲۰ تا ۱۶۰ درصد تغییر ضریب جریان وجود دارد و در گشودگی ۸ میلی‌متر این مقدار به ۲۰۰ درصد افزایش می‌رسد.



شکل ۱۳. درصد تغییرات ضریب گردابه برحسب گشودگی

در مورد ضریب جریان نیز همان‌طور که گفته شد این ضریب در گشودگی‌های کم سوپاپ، به‌طور خاص، تابع طراحی لبه سوپاپ و نشیمن‌گاه آن است. بررسی سرسیلندر اصلی نسبت به سرسیلندر جدید با توجه به شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در گشودگی‌های ۱ الی ۵ میلی‌متر ضریب جریان بین ۱/۴ تا ۹/۲ درصد کاهش و در گشودگی‌های ۵ الی ۸ میلی‌متر به مقدار ۱/۳۶ تا ۲/۵ درصد افزایش یافته است. اگرچه با سیستم جدید سوپاپ، ضریب جریان در گشودگی‌های کم کاهش داشته ولی از آنجاکه بیشترین حجم مخلوط ورودی به سیلندر در گشودگی‌های بالای سوپاپ اتفاق می‌افتد [۱۹]، ضریب جریان نیز در گشودگی‌های بالای سوپاپ افزایش داشته است و این افزایش ضریب جریان، با توسعه راه‌گاه ورودی حاصل شده است؛ زیرا ضریب جریان در گشودگی‌های بالای سوپاپ، محدود به ابعاد و گلوبی داخل راه‌گاه می‌شود.



شکل ۱۴. درصد تغییرات ضریب جریان برحسب گشودگی

شایان ذکر است که سرعت توربین در این سیستم به حدود ۶۵۰ دور بر دقیقه می‌رسد و در مقایسه با راه‌گاه موتورهایی که دارای یک سوپاپ ورودی یا دریچه کنترل جریان گردابه هستند و مقدار چرخش توربین به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد کمتر است. در این پژوهش، هدف، دستیابی به جریان گردابه با کمترین میزان تغییرات و هزینه است؛ به نحوی که فقط با تغییر قطر سوپاپ و زوایای راه‌گاه ورودی می‌توان به مقدار جریان گردابه خوبی دست‌یافت.

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، ایجاد اختلاف جریان بین دو سوپاپ ورودی در سیلندر و تولید جریان گردابه و در نهایت افزایش راندمان احتراق بود. نتایج نشان می‌دهند که با ایجاد اختلاف اندازه در سوپاپ‌های ورودی می‌توان در جریان ورودی به سیلندر نابالانسی ایجاد کرد که وجود این نابالانسی، باعث تولید جریان گردابه در سیلندر می‌شود. پس از اعمال تغییرات روی سرسیلندر، جریان گردابه در سیلندر تا گشودگی ۴ میلی‌متری سوپاپ، کاهش، و از گشودگی ۴ میلی‌متر به بعد، جریان گردابه تا ۲۰۰ درصد افزایش یافت. همچنین در سرسیلندر اصلاح‌شده تا گشودگی ۵ میلی‌متر، کاهش ضریب جریان مشاهده شد اما در گشودگی ۵ الی ۸ میلی‌متر، ضریب جریان، افزایش یافت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با هزینه کم و تغییرات ناچیز نسبت به سیستم‌های دیگر برای تولید جریان گردابه می‌توان با این سیستم به جریان گردابه قابل‌قبولی دست‌یافت.

فهرست علائم

A_V	سطح مقطع سوپاپ ورودی (mm^2)
B	قطر سیلندر (mm)
C_f	ضریب جریان
C_s	ضریب جریان گردابه
D_V	قطر سوپاپ ورودی (mm)
L	کورس موتور (mm)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
N_p	سرعت دورانی توربین (RPM)
P_0	فشار بالادست جریان (Pa)
P_c	فشار درون سیلندر (Pa)
R_s	نسبت جریان گردابه
V_0	سرعت بالادست جریان (ms^{-1})

علائم یونانی

γ	نسبت گرمای ویژه
η	راندمان
θ	زمان‌بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورودی
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ω	سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از مدیریت و پرسنل محترم مرکز تحقیقات موتور ایران‌خودرو که کمال همکاری را در فراهم آوردن امکانات برای اجرای آزمایش‌ها با نویسندگان داشتند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

- [1] Rahimi Asiabaraki, H. (2014). *Investigation of Geometry and Material Properties Effects on the Performance of Intake Manifold*. [MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Technology, Tehran, Iran].
- [2] Heywood, J. B. (1987). Fluid motion within the cylinder of internal combustion engines—the 1986 Freeman scholar lecture. *ASME, Transactions, Journal of Fluids Engineering*, 109(1), 3-35. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987ATJFE.109....3H/abstract>
- [3] Mohammadebrahim, A. (2016). Investigation of the in-cylinder swirl flow measurement methods and comparison between them in a cylinder head. *The Journal of Engine Research*, 42(42), 51-58. <http://engineerresearch.ir/article-1-562-en.html>
- [4] Mohammadebrahim, A., Shafiei, B., & Kazemzadeh Hannani, S. (2012). Numerical simulation of in-cylinder tumble flow field measurements and comparison to experimental results. *The Journal of Engine Research*, 26(Spring 2012), 11-19. <http://engineerresearch.ir/article-1-283-en.pdf>
- [5] Li, Y., Liu, S., Shi, S.-X., & Xu, Z. (2000). Effect of the swirl control valve on the in-cylinder air motion in a four-valve SI engine. *Journal of Fuels and Lubricants, SAE Transactions*, 109(4), 2223-2232. <https://doi.org/10.4271/2000-01-2058>
- [6] Zhang, K., Chang, Y., Xie, Z., Sun, T., & Chen, F. (2019). Effect of intake swirl on combustion performance in an unthrottled spark ignition engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(5), 1269-1279. <https://doi.org/10.1177/0954407018769172>
- [7] Abdalla, A. N., Bakar, R. A., Tao, H., Ramasamy, D., Kadirgama, K., Fooj, B., Tarlochan, F., & Sivaraos, S. (2020). Effect of swirl at intake manifold on engine performance using ethanol fuel blend. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(1), 73-88. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587056>
- [8] Chang, H.-T., Huang, C.-W., Lin, K.-H., & Hu, W.-C. (2013). Effects of Intake System with Swirl and Tumble Valve on the Combustion in a Small Four Stroke Engine. *JSAE/SAE 2013 Small Engine Technology Conference*, Taipei, Taiwan. <https://trid.trb.org/view/1829354>
- [9] Lee, S., Tong, K., Quay, B. D., Zello, J. V., & Santavicca, D. A. (2000). Effects of swirl and tumble on mixture preparation during cold start of a gasoline direct-injection engine. *Journal of Engines, SAE Transactions*, 109(3), 1783-1796. <https://doi.org/10.4271/2000-01-1900>
- [10] Nagayama, I., Araki, Y., & Iioka, Y. (1977). Effects of swirl and squish on SI engine combustion and emission. *SAE transactions*, 86(2), 990-999. <https://doi.org/10.4271/770217>
- [11] Kaplan, M. (2019). Influence of swirl, tumble and squish flows on combustion characteristics and emissions in internal combustion engine- review. *International*

- Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(2), 83-102. <https://doi.org/10.18245/ijaet.558258>
- [12] Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice Hall. <https://books.google.com/books?id=uZSAAAAMAAJ>
- [13] Han, B.-H., Suh, J.-W., & Kim, W.-T. (1991). Effects of In-Cylinder Swirl on Part Load Performance and Combustion Characteristics in a SI Engine. International Pacific Conference on Automotive Engineering, Seoul, South Korea. <https://saemobilus.sae.org/content/912468/>
- [14] Kumar, C. R., & Nagarajan, G. (2012). Investigation of flow during intake stroke of a single cylinder internal combustion engine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(2), 180-186. <https://www.semanticscholar.org/paper/INVESTIGATION-OF-FLOW-DURING-INTAKE-STROKE-OF-A-Kumar-Nagarajan/0ace5dc23526974efd69e8c605ea79cc6fcc76c7>
- [15] Heywood, J. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals 2E*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com/books?id=OmJUDwAAQBAJ>
- [16] Kang, K. Y., & Reitz, R. D. (1999). The effect of intake valve alignment on swirl generation in a DI diesel engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 20(2), 94-103. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(99\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(99)00034-5)
- [17] Pipitone, E., & Mancuso, U. (2005). An experimental investigation of two different methods for swirl induction in a multivalve engine. *International Journal of Engine Research*, 6(2), 159-170. <https://doi.org/10.1243/146808705x7365>
- [18] Ghazikhani, M., & Borjian, S. (2004). Evaluation of the amount of rotation of the flow inside the cylinder chamber of a diesel engine by a rotary gauge. *International Journal of Engineering Science*, 15(3), 143-155. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=55740>
- [19] Xu, H. (2001). Some critical technical issues on the steady flow testing of cylinder heads. SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1308>



Evaluation of Fuel and Spark System Variables of a Gasoline Engine Due to Lack of Timely Replacement of Fuel Filter

Mani Ghanbari^{1*} , Lotfali Mozafari Vanani²

¹Faculty Member, Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Shahriar, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Boroujen, Chaharmahal and Bakhtiari Branch, Technical and Vocational University (TVU), Chaharmahal and Bakhtiari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.27.2020

Revised: 10.31.2020

Accepted: 01.14.2021

Keyword:

Gasoline engine

Fuel pump

Electric current

Gasoline temperature

Fuel filter

***Corresponding Author:**

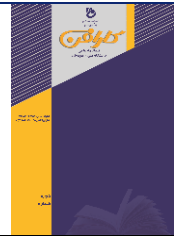
Mani Ghanbari

Email: Manighanbari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the effect of fuel filter lifetime on the temperature of gasoline output from the fuel pump, ignition advance, injector injection pressure and electric current of the fuel pump of a gasoline engine was examined experimentally with the aim of improving the variables of fuel and ignition systems. The results of this study showed that the lowest temperature of gasoline output from the fuel pump and the amount of electric current of the pump using a new filter were 37.5 °C and 2.88 A, respectively. The highest temperature of gasoline output from the fuel pump and the amount of electric current of the pump, measured using a filter with a range of 60,000 km, were 40.5 °C and 4.12 A, respectively. The highest injection pressure of the injectors and the lowest amount of ignition advance at 1000 rpm engine speed and using the new filter were 3.5 bars and 7 degrees, respectively. The lowest injection pressure of the injectors and the highest amount of ignition advance at 5000 rpm engine speed by using a 50,000 km filter lifetime were reported as 2.5 bars and 37 degrees, respectively. It is lucid that filters with a lifespan of more than 15,000 km reduce the combustion quality and efficiency of the engine.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

ارزیابی متغیرهای سیستم سوخت‌رسانی و جرقه‌زنی یک موتور بنزینی در اثر عدم تعویض به موقع فیلتر سوخت

مانی قنبری^{۱*}، لطفعلی مظفری وانانی^۲

- ۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، آموزشکده فنی کشاورزی شهریار، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی پسران بروجن، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان چهار محال بختیاری، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، با هدف بهبود متغیرهای سیستم سوخت‌رسانی و جرقه‌زنی، تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر میزان دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت، پیش‌رسی جرقه، فشار پاشش انژکتورها و میزان جریان الکتریکی پمپ سوخت یک موتور بنزینی، به صورت تجربی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که کمترین دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت و میزان جریان الکتریکی آن با استفاده از فیلتر نو (صفر کیلومتر) به ترتیب برابر $2/88 \text{ A}$ و $37/5 \text{ }^\circ\text{C}$ و بیشترین دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت و میزان جریان الکتریکی آن با استفاده از فیلتر با کارکرد ۶۰۰۰ کیلومتر به ترتیب برابر $4/12 \text{ A}$ و $40/5 \text{ }^\circ\text{C}$ خواهد بود. همچنین بیشترین میزان فشار پاشش انژکتورها و کمترین مقدار پیش‌رسی جرقه در دور موتور ۱۰۰۰ rpm با استفاده از فیلتر نو (صفر کیلومتر) به ترتیب برابر $3/5 \text{ bar}$ و ۷ درجه و کمترین میزان فشار پاشش انژکتورها و بیشترین مقدار پیش‌رسی جرقه در دور موتور rpm ۵۰۰۰ با استفاده از فیلتر با کارکرد ۵۰۰۰ کیلومتر به ترتیب برابر $2/5 \text{ bar}$ و ۳۷ درجه مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که فیلترهایی با کارکرد بیش از ۱۵۰۰۰ کیلومتر موجب کاهش کیفیت احتراق و راندمان موتور می‌شوند.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵

کلید واژگان:

موتور بنزینی
پمپ سوخت
جریان الکتریکی
دمای بنزین
فیلتر سوخت

*نویسنده مسئول: مانی قنبری

پست الکترونیکی:

Manighanbari@tvu.ac.ir



مقدمه

در دنیای حاضر با ماشینی شدن بسیاری از کارها و تولید انبوه موتورهای درون سوز، نیاز به سوخت‌های فسیلی افزایش پیدا کرده و در نتیجه با استخراج نفت خام، منابع زیرزمینی کاهش یافته است. یکی از مهم‌ترین سیستم‌های یک موتور چهار زمانه بنزینی که کاربرد وسیعی در خودرو، ماشین‌های کشاورزی و صنعتی دارد، سیستم سوخت‌رسانی آن می‌باشد. اجزای اصلی یک سیستم سوخت‌رسانی در این موتورها شامل باک، پمپ‌بنزین، شلنگ‌های انتقال‌دهنده سوخت، فیلتر بنزین، ریل سوخت و انژکتورها است. یکی از سرویس‌های مهم در زمینه سیستم سوخت‌رسانی یک موتور بنزینی، تعویض به‌موقع فیلتر سوخت آن است. این سرویس، تأثیر زیادی در عملکرد اجزای مختلف سیستم سوخت‌رسانی، سلامت اجزای آن و افزایش طول عمر مفید این قطعات دارد. عملکرد مناسب سیستم سوخت‌رسانی یک موتور نیز به‌طور مستقیم بر بهبود احتراق در موتور، افزایش عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی خروجی از آگزوز آن تأثیر دارد. با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی و به‌دنبال آن ارتقای سطح کیفی سیستم‌های سوخت‌رسانی، اهمیت و دقت مکانیزم فیلتراسیون سوخت نیز افزایش یافت. پیدایش خودروهای انژکتوری، سازندگان را مجبور به تولید فیلترهایی کرد که دقت لازم در امر جداسازی ناخالصی‌های موجود در سوخت را داشته باشند. دقت و حساسیت در فیلتراسیون سوخت در خودروهای انژکتوری امروزی، مهم‌تر از سیستم‌های سوخت‌رسانی کاربراتوری و قدیمی است؛ زیرا در خودروهای کاربراتوری، بنزین بر اثر تأثیر خلأ ونتوری کاربراتور از دورن ژینگلورهایی به قطر حدود ۰/۵ میلی‌متر عبور می‌کند اما در خودروهای امروزی، هر انژکتور دارای یک یا چند سوراخ بسیار ریز است که بسته به تعداد آن‌ها، قطری کمتر از ۰/۲ میلی‌متر دارند و با توجه به اینکه هر انژکتور برای مدت‌زمانی کمتر از ۰/۰۵ ثانیه برای پاشش سوخت باز می‌شود، وجود ذرات خارجی در سوخت می‌تواند به‌راحتی منجر به گرفتگی مجاری سوخت‌پاش گردد [۱]. یک موتور احتراقی، دستگاهی است که انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی گرمایی و کار مکانیکی تبدیل می‌کند. در این مبدل انرژی، ورودی‌ها سوخت و هوا و خروجی‌های در حالت احتراق کامل موادی همچون بخار آب، دی‌اکسید کربن و نیتروژن است. تمام تلاش در موتورهای احتراقی بر این است که احتراق کامل باشد، همچنین جذب و تبدیل انرژی گرمایی تولیدی در محفظه احتراق موتور به حداکثر مقدار خود برسد. با توجه به این که سیستم سوخت‌رسانی موتورهای احتراقی، یکی از مهم‌ترین و دقیق‌ترین سیستم‌های این موتورها به‌شمار می‌رود؛ مطالعه در مورد این سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. از زمان اختراع موتورهای درون‌سوز تاکنون که بنزین و گازوئیل به‌عنوان سوخت اصلی مورد استفاده قرار می‌گرفت، تقریباً همه موتورها مجهز به سیستم فیلتراسیون و تصفیه سوخت هستند. ناخالصی‌های موجود در انواع سوخت‌ها و تأثیرات نامطلوب آنها بر عملکرد خودرو علت استفاده از این سیستم در انواع خودروها است [۳]. از این‌رو بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه سوخت اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. از عوامل اصلی کثیف شدن سوخت می‌توان به مواردی همچون رسوبات موجود در تانکرهای حمل سوخت یا ذرات معلق و رسوبات ته‌نشین‌شده در مخازن جایگاه‌های سوخت که بیشتر آنها در وضعیت نامناسبی نیز هستند، اشاره کرد. همچنین گرفتگی و ذرات ناخالصی در لوله‌های ارتباطی سیستم سوخت‌رسانی و ذرات حاصل از خوردگی مجاری سوخت‌گیری خودرو نیز از عوامل کثیف‌کننده سوخت هستند. همه این موارد باید توسط فیلتر سوخت، تصفیه و از ورود آنها به سیستم سوخت‌رسانی جلوگیری شود. بعضی از شرکت‌های خودروسازی، زمان مناسب برای تعویض صافی بنزین را هر ۱۵۰۰۰ کیلومتر توصیه کرده‌اند، اما کارکرد کیلومتر خودرو به‌تنهایی ملاک مناسبی برای تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت نیست؛ زیرا میزان گرفتگی فیلتر سوخت، به شرایط مختلفی مانند شرایط و محل کارکرد خودرو، کیفیت بنزین جایگاه‌ها، سیستم سوخت‌رسانی خودرو و رسوبات موجود در باک وابسته است. با گذشت زمان و افزایش کارکرد خودرو، فیلتر بنزین به دلیل به دام انداختن ذرات معلق سوخت، دچار گرفتگی و انسداد می‌شود. کثیفی و گرفتگی فیلتر بنزین باعث پایین آمدن بازده موتور، افزایش زمان استارت‌زنی به‌خصوص در هوای سرد، کثیف شدن و گرفتگی انژکتورها، خاموشی خودرو و کوتاه شدن عمر تجهیزاتی مانند پمپ بنزین، انژکتور و حس‌گر

اکسیژن و در بعضی موارد سوختن سوپاپ‌های موتور می‌شود [۴]. با توجه به نیاز روزافزون به سوخت‌های فسیلی و در نتیجه، استخراج نفت خام، منابع زیرزمینی کاهش و از طرفی میزان آلاینده‌های هوا نیز افزایش یافته است [۳].

با توجه به اهمیت فیلتراسیون سوخت، اجتهادی [۵] در سال ۱۳۸۴ عوامل مهم در فیلتراسیون سوخت موتورهای دیزل پیشرفته را بررسی کرد. طبق نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق ایشان، به‌کارگیری اصول مناسب در تهیه و نگهداری و توزیع سوخت، کارکرد دستگاه‌های مزبور را تا حد قابل‌توجهی ارتقا می‌دهد و باعث کاهش چشمگیر هزینه تعمیرات نیز خواهد شد. حسینخانی و همکاران [۶] در یک بررسی تجربی، تأثیر عوامل دیگری همچون کیفیت فیلتر هوا بر میزان مصرف سوخت موتورهای بنزینی را بررسی کرده‌اند و از نتایج آن در زمینه ارائه برچسب مصرف سوخت خودروهای بنزینی انژکتوری استفاده کردند. همچنین جعفریان جلودار و همکاران [۷] در پژوهش خود با استفاده از روش سطح پاسخ، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید فیلترهای بنزین به روش تزریق پلاستیک کردند. نتایج ایشان در زمینه بهینه‌سازی تولید فیلترهای بنزین مفید بوده است. غفاری و همکاران [۸] در سال ۱۳۹۴ علل آلاینده‌های هوا توسط اتوبوس‌های با موتور دیزل را بررسی کرده‌اند. طبق نتایج ایشان، وجود ذرات ناخالصی در سوخت گازوئیل، درصد گوگرد بالا و همچنین فرسودگی سیستم سوخت‌رسانی، مهم‌ترین دلایل افزایش آلاینده‌های موتورهای دیزلی هستند. در زمینه چگونگی تأثیر فیلترهای سوخت بر عملکرد موتورهای بنزینی، رحمتی‌نژاد و اکبرلو [۹] در سال ۱۳۹۷ طی یک بررسی تجربی، اقدام به مانیتورینگ فشار سوخت ارسالی از پمپ بنزین در محل قبل از فیلتر سوخت کردند. سپس با مقایسه مقادیر فشار به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف، نتیجه گرفتند در صورتی که فشار سوخت در مجرای ورودی فیلتر به میزان ۴ تا ۴/۵ بار باشد، فیلتر سوخت سالم است ولی در صورت گرفتگی و کثیف بودن فیلتر، مقادیر فشار سوخت در محل مجرای ورودی فیلتر، بالا می‌رود و تا حدود ۶/۵ تا ۷ بار افزایش خواهد یافت. در تحقیق ایشان، شرایط آزمون در حالت موتور خاموش و پارامتر اندازه‌گیری شده فقط فشار سوخت در مرحله قبل از فیلتر بوده است. نصرآبادی و کاکایی [۱۰] در پژوهش خود، اقدام به بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی یک موتور بنزین‌سوز EF7 بر آوانس جرعه آستانه کوبش^۱ (KLSA) کردند. در تحقیق ایشان، پارامترهای موتور برای عملکرد در شرایطی که موتور در آستانه کوبش قرار گیرد ولی دچار کوبش نشود، بهینه‌سازی شدند. نتایج ایشان حاکی از آن بود که در صورت افزایش هر واحد عدد اکتان سوخت، به همان اندازه قادر به افزایش آوانس جرعه خواهیم بود. از طرفی، افزایش دمای هوای ورودی و یا کاهش فشار هوای ورودی، باعث کاهش آوانس آستانه کوبش خواهند شد. همچنین در صورتی که نسبت اختلاط هوا به سوخت، از حالت استوکیومتریک انحراف پیدا کند (رقیق یا غلیظ شود)، در این صورت، نیاز به کاهش آوانس جرعه جهت جلوگیری از پدیده کوبش، ضروری خواهد بود. در برخی از تحقیقات پیشین، با استفاده از روش‌های نرم‌افزاری، پارامترهای موتور بررسی شده‌اند. شارما و کومار [۱۱] به بررسی تأثیر فشار سوخت و دور موتور بر پارامترهایی همچون احتراق، عملکرد موتور و آلاینده‌های موتور بنزینی با استفاده از ترکیب سوخت‌های مختلف پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که فشار سوخت می‌تواند در کنار متغیرهای دیگر موتور به عنوان متغیر تأثیرگذار در عملکرد موتور نقش داشته باشد. توماس دوربین و همکاران [۱۲] به صورت تجربی به بررسی تأثیر فیلترهای سوخت دیزل و همچنین نوع سوخت دیزل بر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای در خودروهای دیزلی با وزن متوسط پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد فیلترهای سوخت دیزل (DPFs) Diesel Particular Filters قادر هستند که مقادیر ذرات معلق PM، هیدروکربن‌های نسوخته THC و مونوکسید کربن CO را به ترتیب تا حدود ۹۸ درصد، ۸۰ درصد و ۹۰ درصد کاهش دهند. در پژوهشی، کامیاب و همکاران [۱۳] با تمرکز بر شبیه‌سازی رفتار سیال در فیلتر سوخت و مدار سوخت‌رسانی یک بالگرد، مشخص شد که فیلتر مورد استفاده با توجه به میزان تمیزی، افت فشاری در بازه ۰ bar تا ۱ bar ایجاد خواهد کرد که این امر سبب ایجاد اختلال و وقفه در انجام مأموریت‌های نظامی بالگرد خواهد شد.

^۱ Knock Limited Spark Advance (KLSA)

با بررسی تحقیقات پیشین، ملاحظه می‌شود که بیشتر فعالیت‌ها در مورد آلاینده‌گی سوخت انجام شده و تأثیر پارامتر مهمی همچون فیلتر سوخت بر بسیاری از مشخصه‌های اصلی موتور از قبیل قدرت، آوانس جرقه، عملکرد پمپ بنزین، میزان کوبش موتور و کیفیت احتراق تاکنون بررسی نشده‌اند. بر این اساس، هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر میزان گرفتگی فیلتر سوخت بر عواملی همچون جریان مصرفی پمپ بنزین، تغییر در فشار سیستم سوخت‌رسانی قبل و بعد از فیلتر، کیفیت احتراق و همچنین تأثیر آن بر سیستم جرقه‌زنی و آوانس جرقه در نظر گرفته شده است. پارامترهای هدف در این تحقیق عبارتند از: میزان مصرف جریان الکتریکی پمپ سوخت و دمای بنزین خروجی از آن، فشار سیستم سوخت‌رسانی و پیش‌رسی جرقه که از عوامل اصلی عملکرد موتور و کنترل کوبش در موتور هستند.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق، دو موتور چهار سیلندر خطی متعلق به خودروهای پراید Euro2 و پژو ۲۰۶ Tu5 Euro4 انتخاب شدند. مشخصات فنی موتورهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است. شرایط سوخت‌گیری هر دو خودرو یکسان در نظر گرفته شد و هر دو خودرو از یک جایگاه و در یک زمان، سوخت‌گیری کردند. همچنین ۶ عدد فیلتر ساخت شرکت Perflex و با یک درجه از فیلتراسیون شامل یک عدد فیلتر نو و ۵ عدد فیلتر کارکرده که به ترتیب دارای کارکردهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ هزار کیلومتر با ضریب خطا ۲۰ کیلومتر بودند انتخاب شدند. دلیل این نوع انتخاب فیلتر، امکان انجام مقایسه بین فیلترهای سوخت با کارکردهای مختلف بوده است. دلیل انتخاب دو موتور Euro2 و موتور Euro4 به دست آوردن اطلاعات و مقایسه بین دو نسل از موتورهای جهت طراحی و ساخت سیستم هوشمند کنترل و تشخیص گرفتگی فیلتر است.

شرایط و میزان کارکرد یک فیلتر، تأثیر مهمی بر میزان عبور سوخت از فیلتر خواهد داشت؛ لذا معیار مشخص میزان کارکرد فیلتر در این تحقیق، کیلومتر کارکرد هر فیلتر بوده است. تصویر نمونه‌ای از فیلتر و فشارسنج مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ قابل مشاهده است. برای اندازه‌گیری فشار در مواضع مختلف مدار سوخت‌رسانی از فشارسنج NEK که قابلیت اندازه‌گیری فشار تا ۶ bar (۸۰ psi) با دقت اندازه‌گیری ۱/۱ bar را دارد، استفاده گردید. همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف سیستم سوخت‌رسانی از یک دستگاه عیب‌یاب دیاگ (شکل ۲) استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات فنی موتور بنزینی چهار سیلندر Euro2 و Euro4 مورد آزمایش

ردیف	نوع مشخصه	مقدار مشخصه در موتور Euro2	مقدار مشخصه در موتور Euro4
۱	مدل خودرو	پراید صبا	پژو ۲۰۶
۲	کارخانه سازنده	شرکت سایپا ایران	شرکت ایران خودرو ایران
۳	تعداد سیلندر	۴	۴
۴	گشتاور موتور	۱۰۳N.m	۱۴۲N.m
۵	حجم موتور	۱۳۲۳	۱۵۸۷CC
۶	ترتیب احتراق	۲،۴،۳،۱	۲،۴،۳،۱
۷	نوع سیستم سوخت‌رسانی و نوع ECU	انژکتوری تک پاششی زیمنس	انژکتوری تک پاششی بوش
۸	حداکثر توان	۶۲hp	۱۱۰hp



ب



الف

شکل ۱. الف) فیلتر بنزین موتور بنزینی Euro2 و ب) دستگاه فشارسنج مورد استفاده در تحقیق



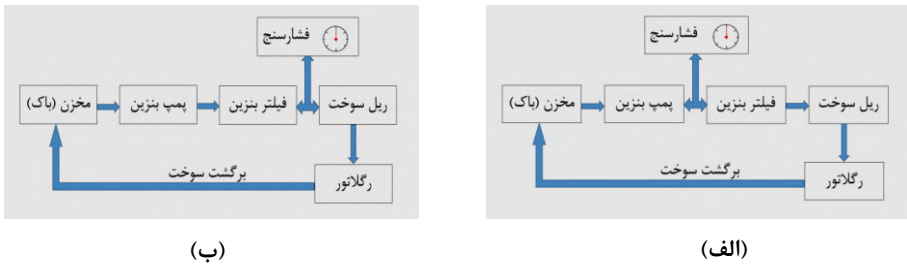
شکل ۲. دستگاه عیب‌یاب خودهای انژکتوری (دیاگ)

دمای محیطی محل آزمون ۳۰ درجه سانتیگراد بود و پس از نصب هر فیلتر، موتور در حالت درجا حدود ده دقیقه کار کرد. سپس با دستگاه دیاگ، دمای آب موتورها پایش شد و زمانی که دمای موتور به ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید، اندازه‌گیری‌ها انجام شد. پارامترهای مختلف موتور مانند دور موتور، فشار هوای ورودی مانیفولد، ولتاژ سنسور اکسیژن، آوانس جرقه، پاشش انژکتورها و زاویه دریچه گاز توسط دستگاه عیب‌یاب خودرو آزما در زمان نصب هر یک از فیلترها در دو موتور مشاهده و ثبت گردید. از دو موتور بنزینی خطی ۴ سیلندر پراید Euro2 و پژو ۲۰۶ Euro4 Tu5 در انجام آزمایش‌ها استفاده شد. در مرحله اول، آزمایش‌ها ابتدا با استفاده از فیلتر صفر کیلومتر (نو) و فشارسنج، فشار سیستم سوخت‌رسانی ابتدا قبل از فیلتر و سپس بعد از فیلتر اندازه‌گیری شد و با فشار سایر فیلترها مقایسه گردید. با استفاده از دستگاه عیب‌یاب در زمان نصب هر فیلتر در ۵ دور ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ rpm پارامترهای ذکر شده موتورها ثبت و با یکدیگر مقایسه شدند. سپس به ترتیب فیلترهای

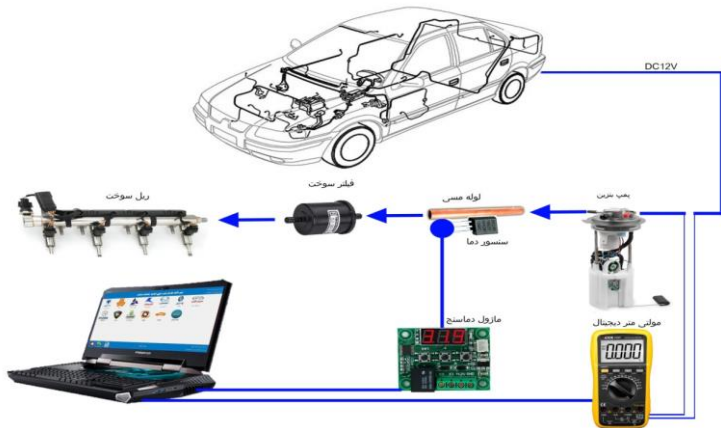
دیگر روی موتور نصب شدند و آزمایش‌ها برای آنها نیز انجام شد. یک طرح کلی از چگونگی اندازه‌گیری مقادیر فشار سیستم سوخت‌رسانی در شکل ۳ مشخص است.

به‌منظور اندازه‌گیری دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت که نمایانگر دمای مغزی پمپ سوخت نیز است، یک لوله مسی در خروجی پمپ سوخت که بنزین خروجی پمپ از آن عبور کند و به لوله‌های انتقال‌دهنده برسد تعبیه گردید. دلیل استفاده از لوله مسی ضریب انتقال حرارت بالای مس می‌باشد. از یک حسگر دما که قابلیت اندازه‌گیری دما تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درجه را دارد، روی بدنه لوله مسی استفاده گردید. همچنین برای اندازه‌گیری میزان جریان الکتریکی پمپ سوخت با استفاده از فیلت‌های مختلف، از یک مولتی‌متر دیجیتالی با مدل DT9205A استفاده شد (شکل ۴).

در این تحقیق، پارامترهایی همچون فشار پاشش انژکتورها، پیش‌رسی جرقه در سیستم جرقه‌زنی، میزان مصرف جریان الکتریکی پمپ سوخت و در نهایت، دمای بنزین خروجی از پمپ بنزین که تابع دمای مغزی پمپ سوخت (آرمیچر) است بررسی شد. در خلال اندازه‌گیری پارامترهای هدف، سایر پارامترهای موتور؛ از قبیل پاشش انژکتورها، فشار هوای مانیفولد ورودی و ولتاژ حسگر اکسیژن نیز بررسی شدند. اما مشاهده شد که تغییر وضعیت فیلتر سوخت، تأثیر ناچیزی روی پارامترهای مذکور دارد و تغییرات محسوسی در آنها وجود نداشت؛ لذا از بررسی موارد فوق در این تحقیق، صرف‌نظر شد.



شکل ۳. اندازه‌گیری فشار سیستم سوخت‌رسانی قبل از فیلتر (الف) و بعد از فیلتر (ب)



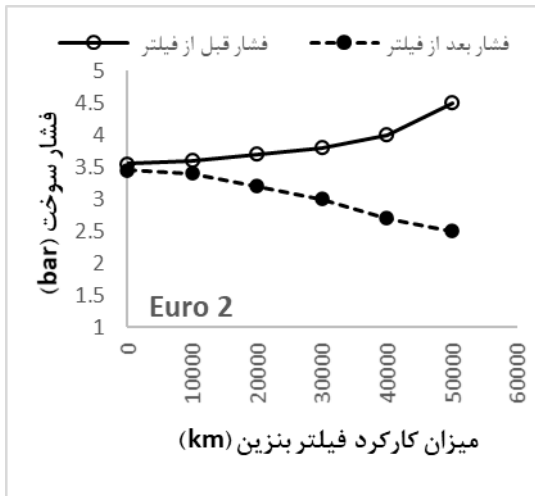
شکل ۴. اندازه‌گیری جریان مصرفی پمپ بنزین و دمای بنزین خروجی از پمپ

نتایج و بحث

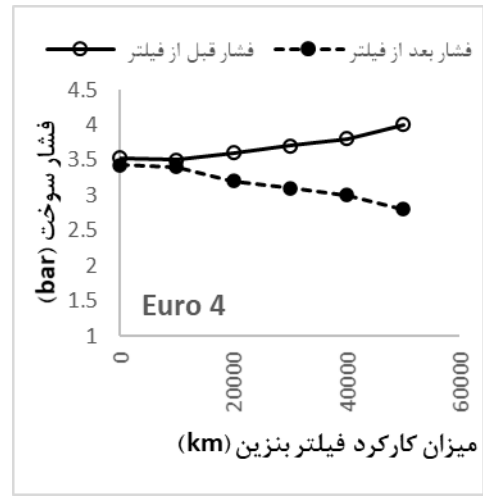
بررسی فشار سیستم سوخت‌رسانی

با بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری فشار سوخت در قبل و بعد از فیلتر بنزین در کارکردهای مختلف دو موتور، مشاهده شد که در پی افزایش کارکرد فیلتر بنزین، اختلاف فشار ورودی و خروجی فیلتر بنزین نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش کارکرد فیلتر بنزین و افزایش گرفتگی فیلتر مقاومت در برابر عبور سوخت، زیاد و فشار در مقطع ورودی فیلتر، افزایش و در خروجی آن، کاهش خواهد داشت. نتایج مشاهده‌شده در این بخش از تحقیق در توافق کامل با نتایج تحقیق رحمتی‌نژاد و همکاران [۹] است. علاوه بر آن، در تحقیق حاضر در حالت روشن بودن موتور نیز تأثیر میزان مسافت کارکرد فیلتر بر اختلاف فشار سوخت در ناحیه قبل و بعد از فیلتر بررسی گردید که این امر در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده است.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد در موتور Euro2 با افزایش کارکرد صافی بنزین، میزان گرفتگی صافی افزایش می‌یابد و بیشترین فشار ورودی در فیلتر با کارکرد ۵۰۰۰۰ کیلومتر ۴/۵ bar و کمترین فشار ورودی با فیلتر نو ۳/۵ bar می‌باشد. کمترین فشار خروجی نیز با فیلتر با کارکرد ۵۰۰۰۰ کیلومتر به میزان ۲/۵ bar و بیشترین فشار خروجی با فیلتر نو حدود ۳/۵ bar اندازه‌گیری شد. نتایج در مورد موتور Euro4 حاکی از آن بود که با افزایش کارکرد صافی بنزین، میزان گرفتگی صافی، افزایش می‌یابد و بیشترین فشار ورودی در فیلتر با کارکرد ۵۰۰۰۰ کیلومتر ۴ bar و کمترین فشار ورودی با فیلتر نو ۳/۵ bar می‌باشد. کمترین فشار خروجی نیز با فیلتر با کارکرد ۵۰۰۰۰ کیلومتر به میزان ۲/۸ bar و بیشترین فشار خروجی با فیلتر نو حدود ۳/۵ bar اندازه‌گیری شد.



ب



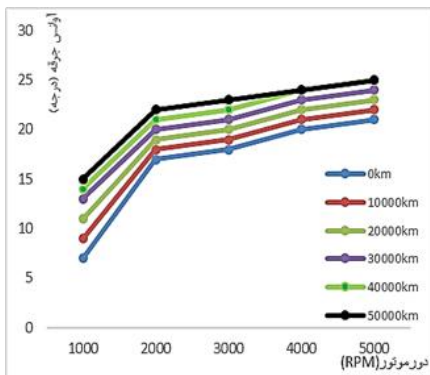
الف

شکل ۵. تأثیر کارکرد فیلتر بر فشار سوخت مدار (الف- موتور چهار سیلندر Euro4) (ب- موتور چهار سیلندر Euro2)

بررسی آوانس جرعه

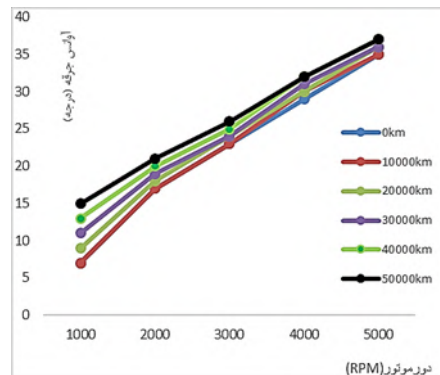
افت فشار سیستم سوخت‌رسانی بعد از فیلتر، در ریل سوخت و ورودی انژکتورها تا حدود $2/5 \text{ bar}$ در فیلترهایی با کارکرد بالا منجر به کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت، تغییر در نسبت استوکیومتری و فقیر شدن مخلوط سوخت و هوا می‌گردد که این عوامل باعث احتراق ناقص در موتور خواهند شد و واحد کنترل الکترونیکی موتور (ECU)، اقدام به آوانس جرعه برای بهبود کیفیت احتراق خواهد کرد. به دنبال پایش پارامترهای مختلف موتور با استفاده از دستگاه دیاگ، صحت این موضوع مشاهده شد و مشخص گردید که در صورت افزایش کارکرد فیلتر بنزین، مقدار آوانس جرعه نیز افزایش قابل توجهی خواهد داشت. نمودار تغییرات آوانس جرعه نسبت به دور موتور با استفاده از فیلترهای دارای کارکرد مختلف برای دو موتور Euro2, Euro4 در شکل ۶ قابل مشاهده است.

با توجه به مشاهدات صورت‌گرفته در موتور Euro2 کمترین میزان آوانس جرعه در دور موتور 1000 rpm به اندازه ۷ درجه با فیلتر نو گزارش شد و بیشترین میزان آوانس جرعه در دور موتور 5000 rpm به میزان ۳۷ درجه و با فیلتر با کارکرد 50000 کیلومتر اندازه‌گیری شد. بررسی‌ها در موتور Euro4 حاکی از آن است که کمترین میزان آوانس جرعه در دور موتور 1000 rpm به اندازه ۷ درجه با فیلتر نو مشاهده شد و بیشترین میزان آوانس جرعه در دور موتور 5000 rpm به میزان ۲۵ درجه و با فیلتر با کارکرد 50000 کیلومتر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش کارکرد فیلتر سوخت و افزایش میزان گرفتگی فیلتر، فشار سوخت در ریل سوخت کاهش یافت و منجر به کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت، تغییر در نسبت استوکیومتری، فقیر شدن مخلوط و کاهش کیفیت احتراق می‌گردد. بنابراین ECU برای جبران احتراق ناقص و به منظور افزایش کیفیت احتراق میزان آوانس در جرعه شمع را افزایش می‌دهد که مشابه این نتایج در مراجع [۱۰؛ ۱۴؛ ۱۵] نیز گزارش شده است. دلیل اختلاف زیاد آوانس جرعه در دور 1000 rpm نسبت به اختلاف این پارامتر در سایر دوره‌های موتور با فیلترهای مختلف این است که در دوره‌های پایین‌تر به دلیل داشتن تعداد احتراق کمتر در واحد زمان، کیفیت احتراق در میزان عملکرد موتور تأثیر بیشتری خواهد گذاشت. بنابراین در دوره‌های پایین موتور، در فیلترهای با کارکرد بیشتر نسبت به فیلترهای با کارکرد کمتر، در راستای خنثی کردن احتراق ناقص، نیاز به آوانس جرعه بیشتری می‌باشد. علاوه بر این دلیل، باید در نظر داشت که افزایش دور موتور، منجر به کوتاه شدن زمان احتراق خواهد شد.



Euro4

ب



Euro2

الف

شکل ۶. تأثیر کارکرد فیلتر بر آوانس جرعه (الف- موتور چهار سیلندر Euro2) (ب- موتور چهار سیلندر Euro4)

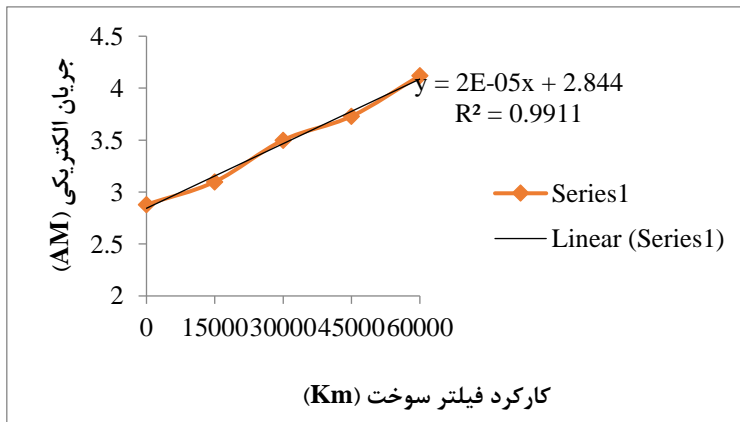
بنابراین در دوره‌های بالا آن‌قدر فرصت در اختیار ECU خودرو نیست که بتواند فاصله زیادی بین آوانس جرقه در فیلترهای با کارکرد مختلف ایجاد کند. در واقع، با افزایش دور، مقادیر آوانس جرقه در فیلترهای با طول عمر متفاوت، به سمت یک مقدار متمرکز می‌شود که این پدیده در نمودار شکل ۶- الف به خوبی قابل مشاهده و نشان‌دهنده محدودیت ECU در افزایش آوانس جرقه است. از طرفی، افزایش بیش‌ازحد آوانس جرقه نیز معایبی دارد. افزایش آوانس جرقه، میزان کوبش و ضربه در موتور را افزایش می‌دهد که خود باعث کوتاه شدن عمر قطعات موتور خواهد شد و از سوی دیگر، منجر به افزایش دمای گازهای خروجی از اگزوز می‌شود که این امر نیز به افزایش میزان آلاینده NOx در اگزوز ختم می‌گردد [۲؛ ۱۶؛ ۱۷].

بررسی مصرف جریان الکتریکی پمپ بنزین

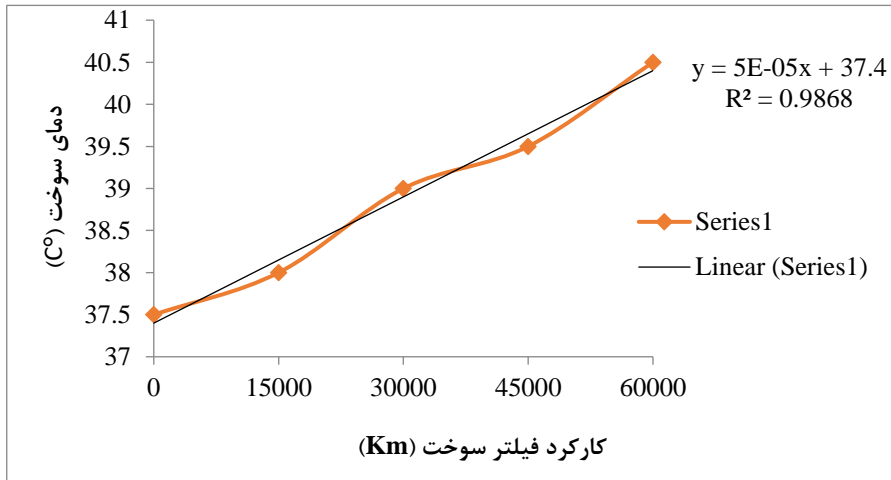
افزایش کارکرد فیلتر بنزین و افزایش گرفتگی فیلتر باعث افزایش مقاومت در برابر عبور سوخت و فشار در مقطع ورودی فیلتر خواهد شد؛ بنابراین پمپ بنزین برای غلبه بر این مقاومت و به جریان انداختن بنزین در مدار سوخت‌رسانی موتور، جریان الکتریکی بیشتری مصرف خواهد کرد. در شکل ۷ تغییرات جریان الکتریکی پمپ سوخت فیلترهای دارای کارکرد مختلف نشان داده شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد در موتور با افزایش کارکرد فیلتر بنزین، میزان گرفتگی آن افزایش می‌یابد و منجر به افزایش جریان مصرفی پمپ بنزین خواهد شد. با افزایش بار روی پمپ سوخت، مصرف جریان الکتریکی پمپ برای انجام کار افزایش می‌یابد و این امر منجر به افزایش استهلاک و کاهش کارکرد مفید پمپ بنزین، باتری و دینام نیز خواهد شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها توسط مولتی‌متر نشان داد که کمترین میزان مصرف جریان الکتریکی در پمپ با استفاده از فیلتر نو (صفر کیلومتر) با ۲.۸۸A و بیشترین میزان جریان الکتریکی با استفاده از فیلتر با کارکرد ۶۰۰۰۰ کیلومتر به مقدار ۴.۱۲ A ثبت شده است.

بررسی دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت

افزایش جریان مصرفی پمپ بنزین، منجر به افزایش دمای پمپ و در نتیجه افزایش دمای بنزین که در حال عبور از داخل مغزی پمپ (آرمیچر) است خواهد شد. شکل ۸ تغییرات دمای بنزین در مدار سوخت‌رسانی (دمای بنزین خروجی پمپ سوخت) را با توجه به میزان کارکرد فیلتر سوخت نشان می‌دهد.



شکل ۷. تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر مصرف جریان الکتریکی پمپ سوخت



شکل ۸. تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر دمای بنزین خروجی از پمپ بنزین

با توجه به شکل ۸ قابل مشاهده است که با افزایش میزان کارکرد فیلتر بنزین، دمای بنزین در مدار سیستم سوخت‌رسانی افزایش می‌یابد. بررسی نتایج در مورد دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت نشان داد که در پی افزایش مقاومت در خروجی پمپ سوخت و افزایش مصرف جریان الکتریکی پمپ، دمای مغزی پمپ سوخت افزایش می‌یابد. با توجه به عبور بنزین از داخل آرمیچر (مغزی پمپ) در نتیجه دمای بنزین خروجی از پمپ نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی، کمترین دمای بنزین خروجی از پمپ 37.5°C با استفاده از فیلتر نو (صفر کیلومتر) و بیشترین دمای بنزین از پمپ خروجی 40.5°C با استفاده از فیلتر با کارکرد ۶۰۰۰۰ کیلومتر مشاهده شد. افزایش بیش از اندازه دمای بنزین به‌ویژه در مناطق گرمسیر و تابستان می‌تواند باعث بروز پدیده خودسوزی یا کوبش در موتور شود و این امر، کاهش عمر مفید قطعات اصلی موتور را در پی خواهد داشت. از طرف دیگر، افزایش دمای سوخت و محفظه احتراق موجب افزایش آلاینده NOx نیز خواهد شد. همچنین دمای بالای سوخت، منجر به کاهش چگالی سوخت و در نتیجه تغییر نسبت اختلاط و رقیق شدن مخلوط سوخت و هوا خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر مشخصه‌هایی از موتور مانند فشار سیستم سوخت‌رسانی، میزان پیش‌رسی جرقه در سیستم جرقه‌زنی، جریان الکتریکی مصرفی پمپ سوخت و در نهایت دمای بنزین خروجی از پمپ بررسی شد. پس از انجام این تحقیق نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- با افزایش میزان کارکرد فیلتر سوخت، گرفتگی فیلتر بیشتر می‌شود و منجر به افزایش فشار در ناحیه قبل از فیلتر (بعد از پمپ بنزین) و در نتیجه، مصرف بیشتر انرژی و کاهش عمر مفید پمپ بنزین می‌گردد. از طرفی، گرفتگی فیلتر سوخت باعث کاهش فشار در ناحیه بعد از فیلتر یا همان فشار ریل سوخت می‌شود و بر کیفیت تزریق سوخت توسط انژکتورها تأثیر منفی دارد؛ زیرا کاهش فشار تزریق سوخت، منجر به کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت در زمان پاشش انژکتورها و عدم تنظیم صحیح

- نسبت استوکیومتری هوا به سوخت و رقیق شدن مخلوط خواهد شد. این امر در نهایت سبب کاهش کیفیت احتراق در محفظه احتراق می‌شود.
- ۲- افزایش کارکرد فیلتر بنزین، بر سیستم جرقه‌زنی نیز تأثیر می‌گذارد. به این دلیل که ECU به‌منظور بهبود فرایند احتراق در حالتی که مخلوط سوخت و هوا رقیق باشد، میزان آوانس جرقه شمع را افزایش می‌دهد که باعث بروز عوارض بعدی همچون پیدایش پدیده کوبش و آسیب رسیدن به قطعات اصلی موتور خواهد شد.
- ۳- استفاده از فیلترهای سوخت با کارکردهای بالا به‌ویژه بیش از ۱۵۰۰۰ کیلومتر باعث افزایش جریان الکتریکی مصرفی پمپ بنزین، افزایش دمای مغزی آن و در نتیجه کوتاه‌تر شدن عمر پمپ سوخت خواهد شد. همچنین دوائر افزایش جریان الکتریکی پمپ بنزین، دمای سوخت ارسالی به مدار سوخت‌رسانی نیز افزایش خواهد یافت که این پدیده در مناطق گرمسیر و تابستان‌های گرم می‌تواند موجب عوارضی همچون احتراق زودرس، کوبش در موتور و کاهش عمر مفید قطعات اصلی موتور در کنار افزایش آلایندگی NOx شود.

References

- [1] Ahmad, A., Aminian, S., Najafzadeh, D., & Ghajarieh, K. (2015). *Fuel and Ignition systems in passenger cars*. Publishing Iranian Textbooks.
- [2] Ghanbari, M. (2019). *Technology and design of internal combustion engines (gasoline and diesel)*. Technical and Vocational University.
- [3] Eberhardt, J. J. (2002, August 25-29). *Fuels of the future for Cars and Trucks* 8th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Workshop 2002, San Diego, CA (US), http://www.global-greenhouse-warming.com/support-files/biodiesel_deer_future.pdf
- [4] Yaghoobzadeh, N., & Katanchi, M. (2015, September 6). *Investigating the types of cost estimates and its trend in construction projects (Case study: Estimating the cost of constructing a diversion dam in Gorgan neighborhood)* International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture, Urban Planning, Nikan Higher Education Institute, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/475324/>
- [5] Ejtehadi, R. (2005, September 11-12). *Fuel systems and principles of filtration* Third National Conference on Maintenance, Iran Maintenance and Repair Association, Maintenance and Repair Association, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/6907>
- [6] Hosseinkhani, V., Ziaei Moayed, M., & Basirat Tabrizi, H. (2009, May 9-21). *Development of test procedure and fuel consumption label for air filter of injector passenger cars* 17th Annual Conference on Mechanical Engineering, University of Tehran, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/90884>
- [7] Jafarian Jelodar, M., & Momeni, E. (2010, March 6-7). *Presenting a Combined Refrigeration Simulation Algorithm and Response Level Method in Solving Optimization Problems (Case Study of Vehicle Fuel Filter)* The Third International Conference of the Iranian Operations Research Association, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/671269>
- [8] Ghaffari, H., Seyedi, S. M., & Mostafaei, A. (2015, December 17). *Investigating the cause of smoke in the buses of Birjand Bus Organization and estimating the cost of counterfeiting* The first international conference and the third national conference

- on architecture, civil engineering and urban environment, Permanent Conference Secretariat, Hamedan, Iran. <https://civilica.com/doc/434784>
- [9] Rahmatinejad, B., & Akbarloo, M. (2018, November 21). *Check for clogged petrol filter on a linear four-cylinder engine* The first international conference on new approaches in engineering sciences, Payame Noor University, Georgia International Branch, Tbilisi, Georgia. <https://civilica.com/doc/814830>
- [10] Nasrabadi, M., & Kakai, A. H. (2013). Investigation of the effect of performance parameters on spark advance threshold and required octane number in internal combustion engine. *Aerospace Mechanics Journal*, 9(1), 1-14. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=195375>
- [11] Sharma, N., & Agarwal, A. K. (2017). Effect of the Fuel Injection Pressure on Particulate Emissions from a Gasohol (E15 and M15)-Fueled Gasoline Direct Injection Engine. *Energy & Fuels*, 31(4), 4155-4164. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02877>
- [12] Durbin, T. D., Zhu, X., & Norbeck, J. M. (2003). The effects of diesel particulate filters and a low-aromatic, low-sulfur diesel fuel on emissions for medium-duty diesel trucks. *Atmospheric Environment*, 37(15), 2105-2116. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00088-8)
- [13] Kamyab, M. H., Vahedi, K., & Esfandeh, S. (2019, July 7). *Numerical simulation of fluid flow in portable refueling systems of helicopters: focusing on simulation of fluid behavior in the fuel filter and refueling path* Fifth National Conference on Defense Science and Engineering, Faculty of Defense Science and Engineering, Imam Hussein (AS) Guards Officer and Guards Training University, Tehran, Iran, <https://civilica.com/doc/920695>
- [14] Goering, C. E., & Hansen, A. C. (2014). *Engine and Tractor Power*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://www.amazon.com/Engine-Tractor-Power-Carroll-Goering-ebook/dp/B00IN94C2W>
- [15] Ghanbari, M., Mozaffari Vanani, L., & Rahimi Asiaberki, H. (2020, February 18-20). *Investigating the effect of gasoline engine fuel filter function on spark advance* 11th International Conference on Combustion Engines and Oil, Iran Motor Science Association, Iran Motor Science Association, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1015461>
- [16] Bharadwaz, Y. D., Rao, B. G., Rao, V. D., & Anusha, C. (2016). Improvement of biodiesel methanol blends performance in a variable compression ratio engine using response surface methodology. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1201-1209. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.006>
- [17] Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Carlucci, A. P., & Kiani Deh Kiani, M. (2017). Performance and emission characteristics of a CI engine using nano particles additives in biodiesel-diesel blends and modeling with GP approach. *Fuel*, 202, 699-716. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.117>



Designing of PI λ D δ Controller for PMBLDC Motor Using Metaheuristic Algorithms

Morteza Abdolhosseini¹, Rohollah Abdollahi^{2*}, Meraj Rajaei³

^{1,2} Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Qom Boys Technical College, Technical and Vocational University (TVU), Qom, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Dr. Shariaty, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.10.2020

Revised: 12.02.2020

Accepted: 01.15.2021

Keyword:

PMBLDC

Fractional Order Proportional

Integral Derivative (FOPID)

Controller

Metaheuristic algorithm

Genetic algorithm

Differential Evolutionary

algorithm

***Corresponding Author:**

Rohollah Abdollahi

Email: abdollahi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Antioxidants Today, vehicles are increasingly equipped with brushless DC permanent magnet motors due to the nature of sensorless operation. BLDC motor controllers can operate the effective speed and position control in a closed loop feedback system without a position sensor mounted on the shaft. The fractional order PID controller is one of the most common examples of a feedback control algorithm used in many control processes. The BLDC sensorless motor drive has better optimal control over the rotor speed and accuracy with the help of PID fractional controller (FOPID). In this paper, using two metaheuristic optimization algorithms, the FOPID control parameters including sitting time, rising time, overload and step response stability of the mentioned system were optimized. The results show that the PMBLDC stepper motor response using the proposed genetic algorithm provides better control performance compared to other available methods.





طراحی سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم بدون جاروبک (PMBLDC) با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

مرتضی عبدالحسینی^۱، روح الله عبداللهی^۲، معراج رجایی^۳

۱- و ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق، دانشکده فنی پسران قم، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، قم، ایران.
۳- استادیار، دپارتمان مهندسی برق، دانشکده دکتر شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

آنتی‌اکسیدان‌ها، امروزه وسایل نقلیه، به‌طور روزافزونی با موتورهای DC مغناطیس دائم بدون جاروبک به‌واسطه ماهیت عملکرد بدون سنسور، مجهز شده‌اند. کنترل‌کننده‌های موتور BLDC می‌توانند کنترل سرعت و موقعیت مؤثر را بدون سنسور موقعیت نصب‌شده روی شفت، در سیستم فیدبک حلقه بسته عمل کنند. کنترل‌کننده PID مرتبه کسری، از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی، کاربرد دارد. درایو موتور بدون سنسور BLDC کنترل بهینه‌تری روی سرعت روتور و دقت آن با کمک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری (FOPID) دارد. در این مقاله با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، پارامترهای کنترل‌کننده FOPID شامل زمان نشست، زمان خیز، اورشوت و پایداری پاسخ پله سیستم مذکور بهینه شده است. نتایج نشان می‌دهد پاسخ پله موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های موجود، عملکرد کنترلی مناسب‌تری را ارائه می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶

کلید واژگان:

PMBLDC
Fractional Order Proportional
Integral Derivative (FOPID)
Controller
الگوریتم‌های فراابتکاری
الگوریتم ژنتیک
الگوریتم تقاض تکاملی

*نویسنده مسئول: روح الله عبداللهی

پست الکترونیکی:

abdollahi@tvu.ac.ir



مقدمه

امروزه، موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم بدون جاروبک (PMBLDC) به علت دارا بودن مزایای زیادی نسبت به سایر موتورهای مورد استفاده در صنعت، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. موتور PMBLDC، موتور مغناطیس دائم است و سیم پیچ استاتور آن مشابه موتورهای معمولی می‌باشد. در این موتور برای کموتاسیون به جاروبک نیاز نیست بلکه این کار به وسیله ادوات الکترونیکی انجام می‌شود. این موتورها می‌توانند یک یا چند قطب داشته باشند. هنگام کار کردن با این موتورها، اینورتر نقش کموتاتور را ایفا می‌کند. از نظر فنی موتور PMBLDC در مقایسه با موتورهای DC معمولی و القایی از مزایای شامل سادگی سیستم کنترل و حداقل نیاز به سنسور، عمر طولانی و نیاز کم به نگهداری، مشخصه گشتاور- سرعت مناسب، پاسخ دینامیکی مناسب، بازده بالا، عملکرد بدون نویز، محدوده سرعت بالا و بالا بودن نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور برخوردار است [۱].

ریاضیات مرتبه کسری (FOC)، از قرن‌ها پیش از محاسبات سیستم مرتبه صحیح ایجاد شده‌اند. لیوویل، اولین مطالعه در مورد FOC را در سال ۱۸۳۲ انجام داد و گرونوالد در سال ۱۸۶۷ مطالعات خود را بر سیستم مرتبه کسری ادامه داد. ریمان در سال ۱۸۹۲ تجزیه و تحلیل نظری و توسعه سیستم یکپارچه سازی به صورت مرتبه کسری را به دست آورد. سیستم مرتبه کسری، عملکرد بهتری نسبت به سیستم مرتبه صحیح در خصوص اجرای مفاهیم اساسی و پدیده‌های با مدل زمان واقعی دارد. ساختار منعطف کنترلر FOPID را پادلوینی بیان کرده است که در واقع گسترش مفهوم کنترل کننده PID سنتی می‌باشد. کنترل کننده FOPID برای سیستم کنترل فرایند، سیستم کنترل توزیع شده (DCS) یا کنترل نظارت و کسب اطلاعات (SCADA) و همچنین به ویژه در کاربردهای کنترل سرعت موتورهای الکتریکی مناسب است. ویناگر با استفاده از روش‌های بهینه سازی برای تولید مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده FOPID، مطالعه مفصلی در حوزه آنالیز فرکانس و زمان داشت [۲].

طی سالیان اخیر، کوشش‌هایی برای طراحی کنترل کننده مناسب و بهینه برای موتور PMBLDC انجام شده است [۳-۷]. در این مقالات از روش‌هایی مانند کنترل فازی، سیستم درایو و کنترل کننده PI استفاده شده است. در بسیاری از دستگاه‌های صنعتی از کنترلر PID به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. اگر پارامترهای PID به گونه‌ای تنظیم شده باشد که عملکرد حلقه بسته را به خوبی تضمین کند، می‌تواند برای بسیاری از سیستم‌ها عملکرد مقاوم و قابل اطمینانی را فراهم می‌کند [۸؛ ۹]. کنترل کننده‌های PID و FOPID و همچنین ترکیب آنها با سایر کنترل کننده‌ها هم چنان در بسیاری از مقالات جدید برای کنترل سیستم‌ها استفاده می‌شود [۱۰-۱۴]. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، یک روش مناسب برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده FOPID و قابل اجرا روی موتورهای PMBLDC است.

از مزایای کنترل کننده‌های FOPID نسبت به کنترل کننده‌های PID مرتبه صحیح می‌توان به کاهش خطای حالت ماندگار، کاهش نوسانات و اورشوت، کاهش تلاش‌های کنترلی، زمان پاسخ بهتر، مقاومت به تغییر در بهره سیستم (خاصیت ایزو میرایی)، رد اغتشاش خروجی و مشخصات حافظه ذاتی اشاره کرد. کنترل کننده‌های FOPID در چند مکان مانند کنترل سطح مخزن کروی، کنترل سرعت موتور DC جاروبک دار و آهنربا دائمی، کنترل موقعیت سیستم‌های Maglev یا کنترل سیستم‌های آشنوباک آزمایش شده‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی روش‌های بهینه سازی مؤثر برای کنترل سرعت موتور BLDC بدون سنسور با استفاده از کنترل کننده FOPID است. این الگوریتم‌ها یک تکنیک بهینه سازی جستجوی محلی هستند که برای این کار از مقادیر نزدیک به پارامترهای FOPID از طریق همکاری و رقابت بین راه‌حل‌های بالقوه استفاده می‌کنند. الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی تنظیم بهینه پنج پارامتر K_i ، K_p ، K_d ، λ و μ از کنترل کننده FOPID را تعیین می‌کنند [۱۵].

در این مقاله سعی شده است با تنظیم پارامترهای دو الگوریتم بهینه سازی و به کارگیری روی سیستم مرتبه دوم PMBLDC، کنترل سرعت مناسب روی این موتورها انجام شود. در این مقاله با استفاده از معیارهای خطا مختلف

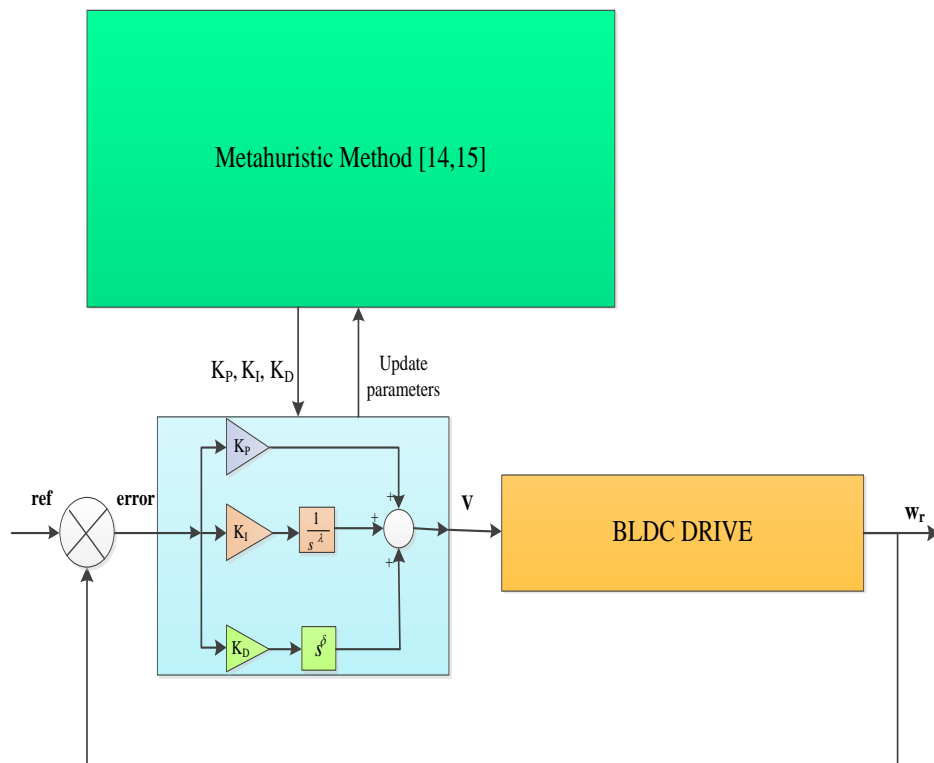
عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک از لحاظ تابع هزینه و پارامترهای پاسخ پله، بهترین عملکرد را داشته است. در این مقاله، از جعبه ابزار FOMCON در نرم‌افزار متلب برای اجرای کنترل‌کننده مرتبه کسری استفاده شده است [۱۶]. هدف این مقاله، ارائه یک طرح کنترل جدید با یک کنترل‌کننده FOPID قابل اجرا برای درایو موتور PMBLDC است. تقریب، تنظیم پارامتر و اجرای کنترلر FOPID در مقاله نشان داده شده است. نتایج، بیانگر بهبود عملکرد گذرا و حالت پایدار سیستم است. مقایسه‌ای با یک کنترل‌کننده PID معمولی و تجزیه و تحلیل آن برای اثبات اثربخشی طرح کنترل ارائه شده است. اهداف اصلی این مقاله عبارتند از:

- ۱- مدل‌سازی و طراحی کنترل‌کننده سرعت موتور PMBLDC مبتنی بر کنترل‌کننده FOPID
- ۲- بهینه‌سازی کنترل‌کننده FOPID از طریق الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و سهم آن در بهبود عملکرد کنترل‌کننده
- ۳- کاهش زمان نشست، زمان خیز و اورشوت با استفاده از کنترل‌کننده پیشنهادی.

معرفی کنترل‌کننده و سیستم

کنترل‌کننده FOPID

کنترل‌کننده FOPID از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار و کنترل دما، کاربرد دارد. کنترل‌کننده FOPID مقدار «خطا» بین خروجی فرایند و مقدار ورودی مطلوب (setpoint) را محاسبه می‌کند. هدف کنترل‌کننده، به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرایند است. کنترل‌کننده FOPID از سه قسمت مجزا به نام‌های تناسبی (Proportional)، انتگرال‌گیر مرتبه کسری (Integral) و مشتق‌گیر مرتبه کسری (Derivative) تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها سیگنال خطا را به عنوان ورودی می‌گیرند و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت، خروجی آن‌ها با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه، همان خروجی کنترل‌کننده FOPID است که برای اصلاح خطا (error) به سیستم فرستاده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. ساختار سیستم کنترل موتور PMBLDC

فرمول استاندارد تابع تبدیل کنترل کننده FOPID به صورت رابطه (۱) است:

$$G_c = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\delta \quad (1)$$

در این مقاله، ضرایب K_p ، K_i ، K_d ، λ و δ با استفاده الگوریتم‌ها فراابتکاری هوشمند، به منظور بهینه کردن تابع هدف طراحی، تنظیم شده است.

مشخصه سیستم موتور PMBLDC

تابع تبدیل سیستم موتور PMBLDC در رابطه (۲) نشان داده شده است [۱۷]. همچنین مشخصات موتور PMBLDC مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است:

$$G(s) = \frac{w_r(s)}{V(s)} = \frac{1}{k_e(s^2\tau_m\tau_e + s\tau_m + 1)} = \frac{1}{k_e(s\tau_m + 1)(s\tau_e + 1)} \quad (2)$$

جدول ۱. مشخصات موتور PMBLDC مورد مطالعه [۱۷]

پارامتر	مقدار	
R	2.8750Ω	مقاومت هر فاز
L_a	2.7mH	سلف خودالقایی هر فاز
k_t	0.0042 Nm/A	ثابت گشتاور
k_e	0.0042 V/rad/s	ثابت نیروی ضد محرکه
j	0.0005 Kg-m ²	اینرسی موتور

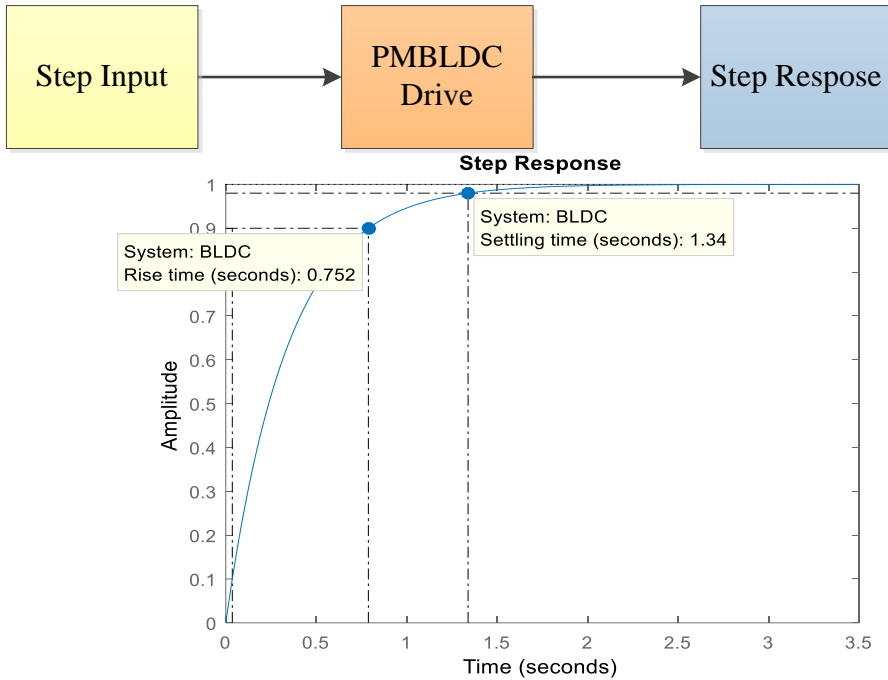
الگوریتم‌های فراابتکاری

یک روش برای حل مسائل بهینه‌سازی این است که تمامی جواب‌های امکان‌پذیر در نظر گرفته و توابع هدف مربوط به آن محاسبه شود و در نهایت، بهترین جواب انتخاب گردد. روشن است که شیوه شمارش کامل، نهایتاً به جواب دقیق مسئله منتهی می‌شود اما در عمل به دلیل زیاد بودن تعداد جواب‌های امکان‌پذیر، استفاده از آن غیرممکن است. با توجه به مشکلات مربوط به روش شمارش کامل، همواره بر ایجاد روش‌های مؤثرتر و کارا تر مانند روش‌های ابتکاری^۱ یا فراابتکاری^۲ یا جستجوی تصادفی^۳ تأکید شده است. روش‌های جستجوی ابتکاری، روش‌هایی هستند که می‌توانند جوابی خوب (نزدیک به بهینه) در زمانی محدود برای یک مسئله ارائه کنند. روش‌های جستجوی ابتکاری عمدتاً بر مبنای روش‌های شمارشی هستند، با این تفاوت که از اطلاعات اضافی برای هدایت جستجو استفاده می‌کنند. این روش‌ها از نظر حوزه کاربرد، کاملاً عمومی هستند و می‌توانند مسائل خیلی پیچیده را حل کنند. عمده این روش‌ها، تصادفی بوده و از طبیعت الهام گرفته شده‌اند. این الگوریتم‌ها به سه دسته کلی الگوریتم‌های بر مبنای هوش جمعی، الگوریتم‌های تصادفی و الگوریتم‌های تکاملی تقسیم می‌شوند. در این مقاله با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری یعنی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی توابع معیار و پارامترهای پاسخ پله سیستم بهینه شده است.

روش شناسی و معرفی توابع خطا

در این مقاله، مشخصات پاسخ پله سیستم با استفاده از کنترل کننده FOPID مطالعه شده و ضرایب آن به وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری تنظیم و بهینه شده است. پارامترهای مهم در پاسخ پله سیستم عبارتند از: زمان خیز^۴، میزان فراجش^۵، زمان نشست^۶ و پایداری^۷. مشخصه پاسخ پله موتور PMBLDC بدون استفاده از کنترل کننده به صورت شکل ۲ است. در این پاسخ مشاهده می‌شود زمان نشست ۱/۳۴ ثانیه، فراجش صفر درصد و زمان خیز آن ۰/۷۵۲ ثانیه است.

1 Heuristic
 2 Metaheuristic
 3 Random Method
 4 Rise Time
 5 Over Shoot
 6 Settling Time
 7 Stability



شکل ۲. پاسخ سیستم PMBLDC به پله واحد

به طور کلی سیگنال خطا به صورت رابطه (۲) بیان می شود:

$$e(t) = u(t) - y(t) \quad (۳)$$

در مقالات، سیگنال خطای تعریف شده در رابطه (۱۱)، به طور گسترده در چهار معیار عملکرد زیر استفاده می شوند. این معیارها عبارتند از:

- ۱) معیار انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) Integral of Absolute value of Error
 - ۲) معیار انتگرال مجذور خطا (ISE) Integral of Square value of Error
 - ۳) معیار انتگرال قدر مطلق خطا با وزن زمانی (ITAE) Integral of Time weighted Absolute value of Error
 - ۴) معیار انتگرال مجذور خطا با وزن زمانی (ITSE) Integral of Time weighted Squared value of Error
- فرمول های این معیارهای خطا در روابط (۴-۷) بیان شده اند [۱۸]. در این روابط t_{ss} زمانی است که پاسخ به حالت ماندگار رسیده است.

$$IAE = \int_0^{t_{ss}} |e(t)| dt \quad (۴)$$

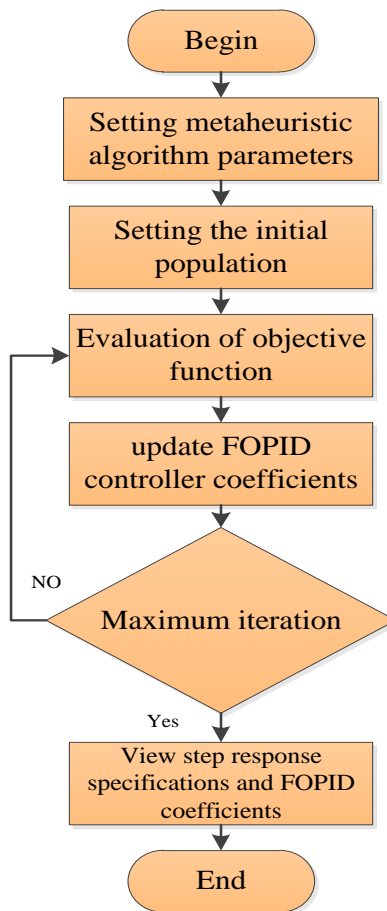
$$ISE = \int_0^{t_{ss}} e^2(t) dt \quad (۵)$$

$$ITAE = \int_0^{t_{ss}} t|e(t)|dt \quad (۶)$$

$$ITSE = \int_0^{t_{ss}} te^2(t)dt \quad (۷)$$

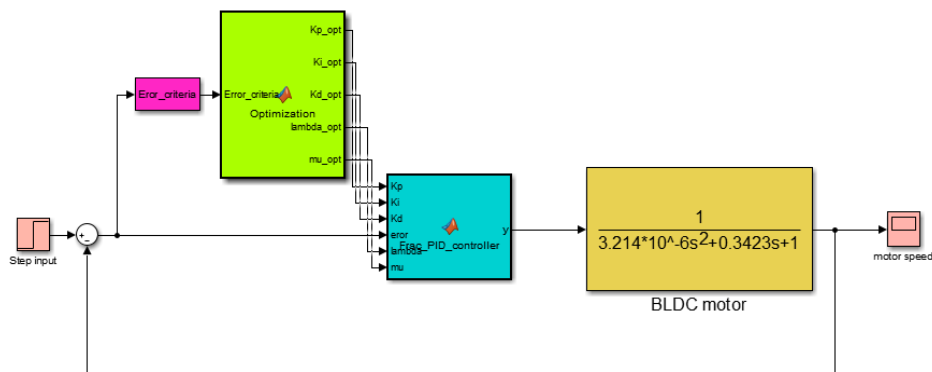
شبیه سازی و ارائه نتایج

شکل ۳ فلوجارت اجرای این مقاله را نشان می دهد. ابتدا با انتخاب پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری و تنظیم جمعیت اولیه، تابع هدف ارزیابی می شود. با توجه به نتایج ارزیابی، پارامترهای کنترل کننده FOPID، به روز و مجدداً الگوریتم تکرار می شود. این الگوریتم تا جایی ادامه می یابد که تعداد تکرار مدنظر و در نتیجه خطا به حداقل برسد.



شکل ۳. فلوجارت اجرای الگوریتم

شکل ۴ مدل سیمولینک سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری به منظور کنترل سرعت موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را نشان می‌دهد. در این مدل با توجه به نوع معیار خطا با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و DE پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری بهینه می‌شود.



شکل ۴. مدل سیمولینک سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری به منظور کنترل سرعت موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

جدول ۲ مشخصات پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری برای دو الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی بیان شده است. پارامترهای مربوط به الگوریتم تکاملی شامل اندازه جمعیت، حداقل مقدار ضریب شتاب، حداکثر مقدار ضریب شتاب و احتمال متقاطع و هم چنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل اندازه جمعیت، احتمال متقاطع، عامل تورم متقاطع، احتمال جهش، نرخ جهش، اندازه گام جهش و روش انتخابی می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات الگوریتم‌های فراابتکاری

Parameters of DE algorithm								
Crossover Probability	Maximum Value of Acceleration Coefficient	Minimum Value of Acceleration Coefficient	Population Size					
0.1	0.9	0.1	20					
Parameters of GA algorithm								
Selecti on Pressure	Selecti on Method	Mutati on Step Size Damp	Mutati on Step Size	Mutati on Rate	Mutati on Probability	Crossov er Inflation Factor	Crossov er Probability	Populati on Size
5	Roulette wheel	0.99	0.6	0.1	0.3	0.4	0.7	1000

از این رو، شاخص توقف حداکثر تعداد مجاز برای دستیابی به حداقل مقدار تابع هدف است. در نهایت، با انجام یک تکرار مشخص، برنامه از حلقه خارج می‌گردد و پارامترهای پاسخ پله و هم چنین ضرایب کنترل کننده FOPID تعیین می‌شوند. در این مقاله، با استفاده از دو الگوریتم، تابع هدف، بهینه‌سازی و ضرایب کنترل FOPID تنظیم می‌شوند. فضای جستجوی پارامترهای الگوریتم FOPID به صورت رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$1 \leq K_p \leq 200, \quad 1 \leq T_i \leq 500, \quad 1 \leq T_d \leq 150, \quad 0 < \lambda, \delta \leq 2 \quad (8)$$

در این مقاله، کنترل کننده مرتبه کسری، اجرا و سپس با استفاده از تقریب استالوپ [۱۹] به مرتبه صحیح تبدیل شده است. تابع تبدیل تقریب استالوپ در رابطه (۹) بیان شده است. پارامترهای این تابع، تبدیل شامل قطب‌ها، صفرها و بهره در رابطه (۱۰) بیان گردیده است. بازه فرکانس مورد انتظار $w \in [w_b, w_h]$ است و N مرتبه تقریب را نشان می‌دهد.

$$A(s) = k \prod_{i=1}^N \frac{s + w_i'}{s + w_i} \quad (9)$$

$$w_i' = w_b w_u^{(2i-1-\alpha)/N}, \quad w_i = w_b w_u^{(2i-1+\alpha)/N}, \quad K = w_h^\alpha, \quad w_u = \sqrt{\frac{w_h}{w_b}} \quad (10)$$

جدول ۳ و اشکال ۵-۷، مقدار تابع هزینه، پارامترهای کنترل کننده FOPID و مشخصات پاسخ پله سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد. در این جدول برای الگوریتم ژنتیک و همچنین برای الگوریتم تکامل تفاضلی هر چهار تابع هزینه JSE، IAE، ITSE و ITAE در نظر گرفته شده و در هر مورد پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری نیز به دست آمده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در هر کدام از چهار معیار خطا، الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی تابع هزینه (Z) مقدار کمتر و عملکرد بهتری دارد.

جدول ۳. مقدار تابع هزینه، ضرایب کنترل FOPID و مشخصات پاسخ پله سیستم حلقه بسته

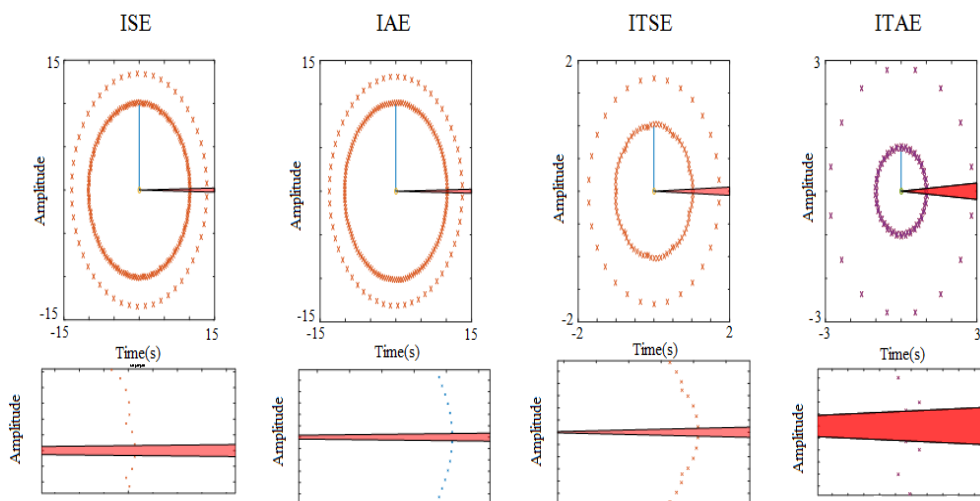
δ	Λ	K_d	K_i	K_p	Z	
1.4688	0.3645	22.7078	111.1140	93.4415	3.9208e-07	ISE (GA)
1.4123	0.1365	34.8495	367.0355	129.9276	5.4308e-07	IAE (GA)
1.3995	0.1814	42.8632	173.2260	168.6936	3.9211e-13	ITSE (GA)
1.3570	1.8053	56.3248	74.0164	162.0778	5.4314e-12	ITAE (GA)
1.6004	0.0109	6.8002	465.8016	11.6419	3.9103e-07	ISE (DE)
1.3035	1.0000e-03	94.1657	58.9362	1.3480	5.4107e-07	IAE (DE)
1.4491	1.0000e-03	27.2739	9.9096	200	3.9009e-13	ITSE (DE)
1.4965	2	1	277.9794	1	4.7206e-11	ITAE (DE)

در این مقاله با توجه به اهمیت شاخص پایداری، با استفاده از سه روش پایداری کنترل کننده، مرتبه کسری بررسی شده است. در روش اول با استفاده از قطب‌های حلقه بسته و در روش دوم و سوم به ترتیب به وسیله نمودار بود^۱ و دیاگرام نایکوئیست^۲ پایداری کنترل کننده پیشنهادی تحلیل شده است. شکل ۵ با استفاده از روش اول وضعیت پایداری موتور PMBLDC با کنترل کننده مرتبه کسری را با در نظر گرفتن چهار تابع خطا نشان می‌دهد. شرط پایداری در سیستم‌های مرتبه کسری، قطب در یک قطاع مشخص است؛ لذا همان‌طور که در شکل‌های زوم

¹ Bode

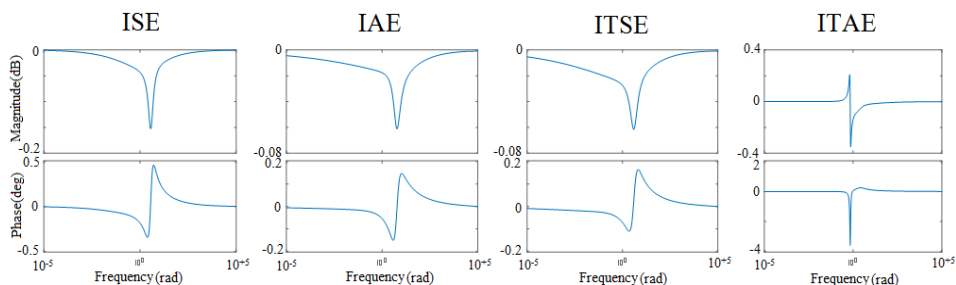
² Nyquist

شده در قسمت پایینی شکل ۵ مشاهده می‌شود در هیچ حالی، قطبی در قطاع وجود ندارد؛ بنابراین کنترل کننده پیشنهادی، کاملاً پایدار است.



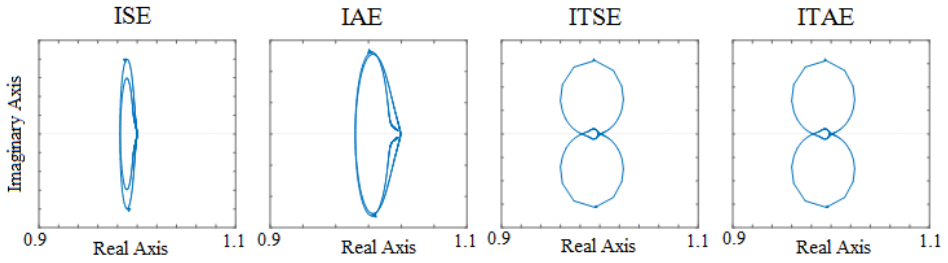
شکل ۵. بررسی پایداری کنترل کننده مرتبه کسری در چهار شاخص خطا

روش دیگری که بتوان به کمک آن، پایداری کنترل کننده پیشنهادی را بررسی کرد، دیاگرام‌های بود و نایکوئیست است که در اشکال ۶-۵ بیان شده است. همان‌طور در دیاگرام بود (شکل ۶) مشاهده می‌شود در هر دو نمودار فاز و اندازه، حالت حدی در فرکانس‌های بالا و پایین محدود است؛ از این رو کنترل کننده، دچار ناپایداری نشده است.



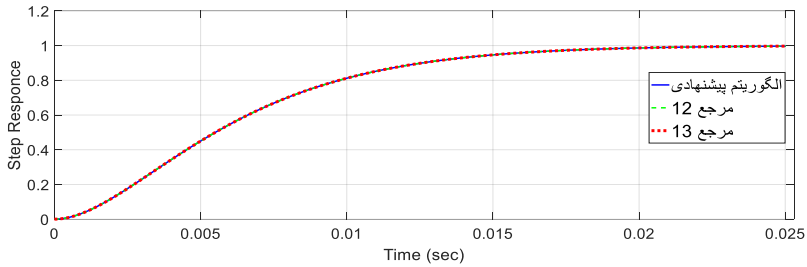
شکل ۶. نمودار Bode برای چهار شاخص خطا

در دیاگرام نایکوئیست شکل ۷ مشاهده می‌شود که در هیچ کدام از شاخص‌های خطا، منحنی نایکوئیست نقطه ۱- را دور نزده است و همه نمودارها در بازه ۰.۹ تا ۱.۱ می‌باشند؛ لذا شرط پایداری نایکوئیست برای کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهادی نیز برقرار است.

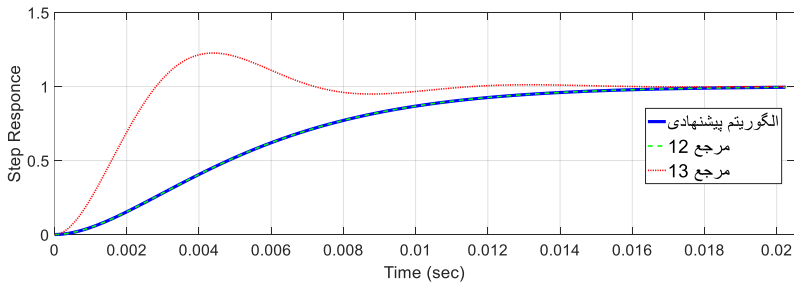


شکل ۷. نمودار نایکوئیست برای چهار شاخص خطا

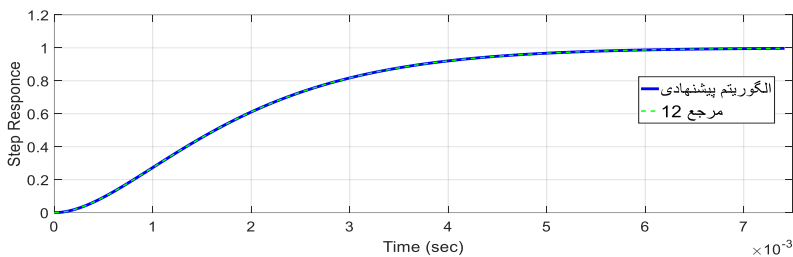
در شکل های ۸-۱۱ نتایج پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۲۰؛ ۲۱] نشان داده است. این نتایج برای چهار معیار خطا ISE, IAE, ITSE و ITAE به تفکیک رسم شده است.



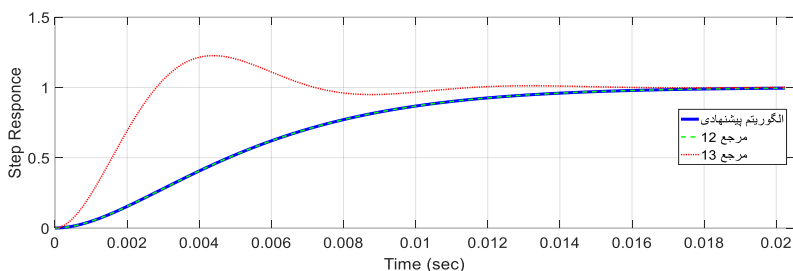
شکل ۸. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۳؛ ۱۰] با معیار ISE



شکل ۹. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۳؛ ۱۰] با معیار IAE

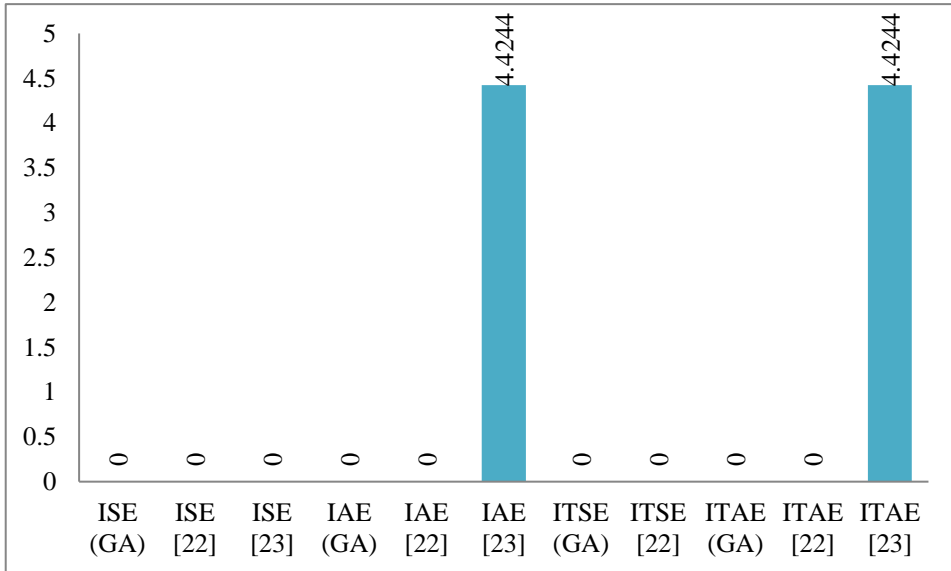


شکل ۱۰. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۳] با معیار ITSE

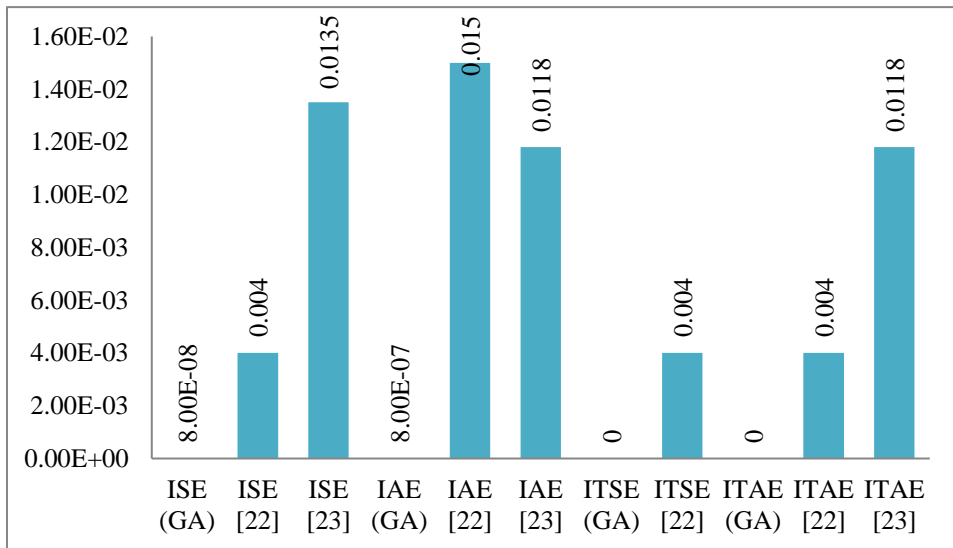


شکل ۱۱. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۰; ۱۳] با معیار ITAE

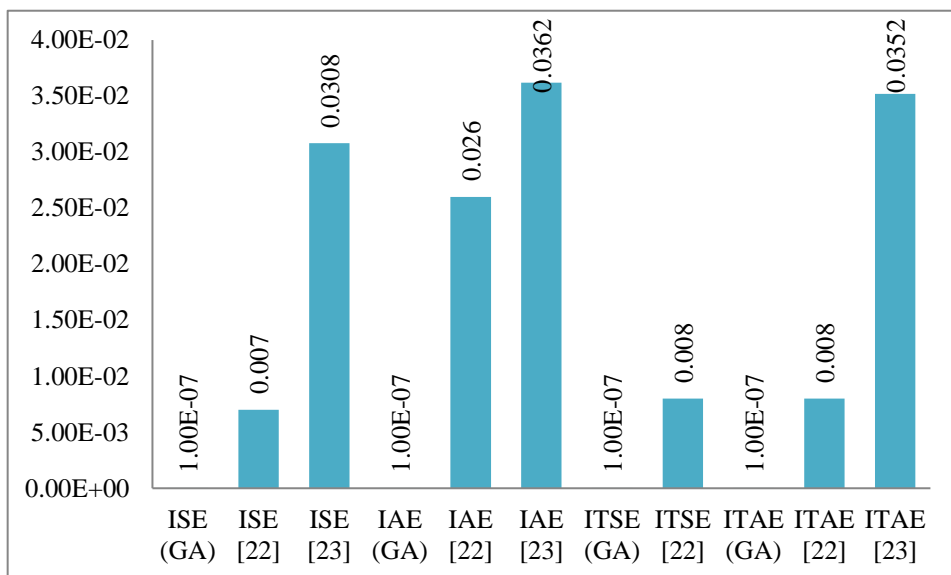
شکل‌های ۱۲-۱۴ عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را با سایر کنترل‌کننده‌ها [۲۰; ۲۱] از لحاظ پارامترهای پاسخ پله مقایسه کرده است. در شکل ۱۲ به‌وضوح مشاهده می‌شود که الگوریتم GA-FOPID دارای فراجهش صفر است در حالی که در مرجع [۲۱] مقدار فراجهش برابر ۴/۴۲۴۴ است. با توجه به شکل ۱۳، با در نظر گرفتن معیار ISE، زمان خیز در الگوریتم پیشنهادی 8×10^{-8} ثانیه، در حالی که در مرجع [۲۰] برابر 0.004 ثانیه و در مرجع [۲۱] برابر 0.135 ثانیه است. با در نظر گرفتن معیار IAE، زمان خیز در الگوریتم پیشنهادی 8×10^{-7} ثانیه، در حالی که در مرجع [۲۰] برابر 0.015 ثانیه و در مرجع [۲۱] برابر 0.118 ثانیه است. در معیار ITSE، در کنترل‌کننده مرتبه کسری زمان خیز برابر صفر ولی در مرجع [۲۰]، 0.004 ثانیه است و در معیار ITAE، روش پیشنهادی دارای زمان خیز صفر ولی در مراجع [۲۰; ۲۱] این زمان به ترتیب 0.004 ثانیه و 0.118 ثانیه است.



شکل ۱۲. مقایسه فراجهش برای معیارهای خطا



شکل ۱۳. مقایسه زمان جهش برای معیارهای خطا



شکل ۱۴. مقایسه زمان نشست برای معیارهای خطا

هم چنین، روش پیشنهادی دارای زمان نشست 1×10^{-7} ثانیه در همه معیارهای می باشد، در حالی که مطابق شکل ۱۴ زمان نشست در مراجع [۲۰؛ ۲۱] با معیار ISE، به ترتیب 0.007 و 0.0308 ثانیه، با معیار IAE، 0.0362 و 0.0352 ثانیه، با معیار ITSE، 0.008 و 0.008 ثانیه و در نهایت با معیار ITAE، برابر 0.008 و 0.0352 ثانیه می باشد. نتایج نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی پارامترهای کنترل FOPID برای موتور BLDC عملکرد خوبی دارد. بنابراین، کنترل کننده پیشنهادی فراجش، زمان خیز و زمان نشست کمتری در مقایسه با سایر روش ها دارد. همچنین روش پیشنهادی از پایداری خوبی نیز برخوردار است.

نتیجه گیری

در این مقاله، به طراحی بهینه کنترل کننده FOPID برای موتور PMBLDC پرداخته شده است. هدف از بهینه سازی کاهش زمان خیز، زمان نشست، فراجش و افزایش پایداری است. با اجرای دو الگوریتم فراابتکاری، ضرایب کنترل FOPID تنظیم می شود و مقدار بهینه تابع هدف به دست می آید. نتایج نشان می دهد پاسخ پله موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش ها، مشخصات بهتری دارد.

References

- [1] Taher, S. A., Shibani, M. R., & Lalehzar, G. (2015). Optimization of BLDC Motor using the Pareto Method Based on SOA. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 6(3), 0-55. https://isee.ui.ac.ir/article_15426.html?lang=en
- [2] Khubalkar, S., Junghare, A., Aware, M., & Das, S. (2017). Modeling and control of a permanent-magnet brushless DC motor drive using a fractional order proportional-integral-derivative controller. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 4223-4241. <https://doi.org/10.3906/elk-1612-277>

- [3] Bhuiyan, M. F., Sakib, N., Uddin, M. R., & Salim, K. M. (2019, May 3-5). Experimental Results of a locally developed BLDC Motor Controller for electric tricycle. 2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT), Dhaka, Bangladesh. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8934491/authors/authors>
- [4] Bhuiyan, M. F., Uddin, M. R., Tasneem, Z., Hasan, M., & Salim, K. M. (2018, July 27-28). Design, Code Generation and Simulation of a BLDC Motor Controller using PIC Microcontroller. 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE), Bhubaneswar, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9008910/authors/authors>
- [5] García, M., Ponce, P., Soriano, L. A., Molina, A., MacCleery, B., & Romero, D. (2019). Lifetime Improved in Power Electronics for BLDC Drives using Fuzzy Logic and PSO. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2372-2377. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.561>
- [6] Singh, A., & Pattnaik, S. (2020). Matrix Converter Operated Hysteretic Current Controlled BLDC Motor Drive for Efficient Speed Control and Improved Power Quality. *Procedia Computer Science*, 167, 541-550. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.314>
- [7] Walekar, V. R., & Murkute, S. V. (2018, August 29-31). Speed Control of BLDC Motor using PI & Fuzzy Approach: A Comparative Study. 2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET), Pune, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533723>
- [8] 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>
- [9] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 33-55. https://karafan.tu.ac.ir/article_100504.html?lang=en
- [10] Farahani, M., & Ganjefar, S. (2012). Intelligent Control of Static Synchronous Series Compensator via an Adaptive Self-Tuning PID Controller for Suppression of Torsional Oscillations. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 10(4), 744-752. <https://doi.org/10.1007/s12555-012-0410-9>
- [11] Memon, F., & Shao, C. (2020). An Optimal Approach to Online Tuning Method for PID Type Iterative Learning Control. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18(5), 1926-1935. <https://doi.org/10.1007/s12555-018-0840-0>
- [12] Merrikh Bayat, F., Mirebrahimi, N., & Khalili, M. R. (2014). Discrete-time fractional-order PID controller: Definition, tuning, digital realization and some applications. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 13(1), 81-90. <https://doi.org/10.1007/s12555-013-0335-y>
- [13] Quwaider, M., & Shatnawi, Y. (2020). Neural network model as Internet of Things congestion control using PID controller and immune-hill-climbing algorithm. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 101, 102022. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102022>
- [14] Taghizadeh, M., & Yarmohammadi, M. J. (2018). Development of a self-tuning PID controller on hydraulically actuated stewart platform stabilizer with base excitation. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16(6), 2990-2999. <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0559-8>

- [15] Vanchinathan, K., & Valluvan, K. R. (2017). A Metaheuristic Optimization Approach for Tuning of Fractional-Order PID Controller for Speed Control of Sensorless BLDC Motor. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 27(8), 1850123. <https://doi.org/10.1142/S0218126618501232>
- [16] Tepļjakov, A., Petlenkov, E., & Belikov, J. (2011). FOMCON: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control. *International Journal of Microelectronics and Computer Science*, 2, 51-62.
- [17] Khubalkar, S. W., Chopade, A. S., Junghare, A. S., & Aware ,M. V. (2016, January 8-10). Design and tuning of fractional order PID controller for speed control of permanent magnet brushless DC motor. 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), Kolkata, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7413764>
- [18] Krohling, R. A., & Rey, J. P. (2001). Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(1), 78-82. <https://doi.org/10.1109/4235.910467>
- [19] Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., & Nanot, F. M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: Characterization and synthesis. *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on*, 47(1), 25-39. <https://doi.org/10.1109/81.817385>
- [20] Momani ,S., El-Khazali, R., & Batiha, I. (2019, November 13). *Tuning PID and PI λ D δ controllers using particle swarm optimization algorithm via El-Khazali's approach* Proceedings of the 45th International Conference on Application of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'19). <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5133522>
- [21] Premkumar, K., & Manikandan, B. V. (2016). Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 818-840. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2015.11.004>



Applying Taguchi Method to Optimize EDM Parameters on Inconel 718 Super Alloy

Karim Aliakbari^{1*} , Mohammad Reza Saberi², Morteza Andalib³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.09.2020

Revised: 07.29.2020

Accepted: 09.02.2020

Keyword:

EDM

Inconel 718 super alloy

Experiment design

Taguchi method

Regression analysis

***Corresponding Author:**

Karim Aliakbari

Email:

karim.aliakbari@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of this study was to optimize the operational parameters of the electrical discharge machining (EDM) process in the Inconel 718 super alloy using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). First, using Taguchi method, the optimal order of experiments was determined, and then by performing experiments and analysis of variance, the effects of the contribution of each input parameter on the process output were determined, and finally the optimal input parameters were determined. Input parameters in this study included pulse duration, work factor, gap voltage and discharge current. Furthermore, process output parameters, electrode wear ratio, material removal rate and topography of the sample surface were taken into consideration. From the surface topography point of view, items such as surface roughness, recast layer thickness and crack density of machined samples were studied in detail. In addition, modeling and regression analysis was performed to predict the behavior and values of process output parameters. The results of optimizing the operational parameters of the process indicated less electrode wear, better surface roughness and homogeneous and crack-free microstructure compared with the behavior of the Ti-6Al-4V alloy.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی ماشین کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش تاگوچی

کریم علی اکبری^{۱*}، محمدرضا صابری^۲، مرتضی عنذلیب^۲

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد، ایران.
- ۲- مدرس، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از انجام این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرایند ماشین کاری با تخلیه الکتریکی در سوپر آلیاژ Inconel 718 با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل واریانس (ANOVA) است. ابتدا با استفاده از روش تاگوچی، چیدمان بهینه آزمایش‌ها تعیین گردید و سپس با انجام آزمایش‌ها و تحلیل واریانس، تأثیرات سهم هر پارامتر ورودی در خروجی فرایند تعیین شدند و در نهایت پارامترهای ورودی بهینه مشخص گردیدند. پارامترهای ورودی در این تحقیق شامل زمان روشنی پالس، فاکتور کار، ولتاژ گپ و جریان تخلیه می‌باشند. همچنین پارامترهای خروجی فرایند، نسبت سایش الکترود، نرخ براده‌برداری ماده و بررسی سطح نمونه (توپوگرافی) در نظر گرفته شدند. توپوگرافی، سطح مواردی از جمله زبری سطح، ضخامت لایه دیو شده و تراکم ترک نمونه‌های ماشین کاری شده با جزئیات را بررسی می‌کند. به‌علاوه مدل‌سازی و تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی رفتار و مقادیر پارامترهای خروجی فرایند انجام گردید. نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرایند شامل میزان سایش الکترود کمتر، زبری سطح بهتر و ریزساختار همگن و عاری از ترک است که با رفتار آلیاژ Ti-6Al-4V مقایسه گردیده است.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلید واژگان:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی
سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸
طراحی آزمایش‌ها
روش تاگوچی
تحلیل رگرسیون

*نویسنده مسئول: کریم علی اکبری

پست الکترونیکی:

karim.aliakbari@gmail.com



مقدمه

کاربرد آلیاژ Inconel 718 با توجه به ویژگی‌هایی مانند مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی در دماهای بالا، خصوصیات مکانیکی عالی در دماهای گرم و سرد، مقاومت در برابر خستگی و خزش، در صنایع خودروسازی، صنایع دفاعی، پتروشیمی و تجهیزات هسته‌ای، رو به افزایش است. از طرفی با توجه به هزینه‌های بالای ماشین‌کاری آلیاژهای اینکونل به روش سنتی و کیفیت سطح نسبتاً پایین آنها موجب شده است که برای شکل‌دهی این آلیاژها روش‌های ماشین‌کاری مدرن بیشتر مورد توجه قرار گیرند. روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یک فرایند ترموالکتریکی است که در آن از انرژی حرارتی یک جرقه، برای براده‌برداری از مواد رسانای الکتریسیته استفاده می‌شود. در این روش بین الکترود و قطعه کار تماس وجود ندارد و انرژی فرسایشی جرقه ایجادشده بین این دو موجب ذوب و تبخیر ماده می‌شود. این روش به طور گسترده‌ای در ماشین‌کاری مواد سخت و مقاوم در برابر حرارت استفاده می‌شود [۱؛ ۲].

هاسکالیک^۱ و همکاران [۳] به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای فرایند (EDM) روی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) از الکترودهای مختلف یعنی گرافیت، مس و آلومینیوم استفاده کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که با افزایش شدت جریان و مدت زمان پالس، میزان حذف مواد، زبری سطح، سایش الکترود افزایش می‌یابد. با این حال، مدت زمان بسیار طولانی پالس مانند ۲۰۰ میلی ثانیه باعث کاهش MRR و زبری سطح می‌شود. علاوه بر این، سختی سطح با توجه به کاربدهای Ti24C15 تشکیل شده در سطح، افزایش می‌یابد. جباری‌پور و همکاران [۴] به بررسی تأثیرات انواع مختلف الکترود بر کیفیت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای آلیاژ آلومینیوم-تیتانیوم پرداختند. آنها با بررسی سه جنس الکترود آلومینیومی، گرافیتی و مسی به این نتیجه رسیدند که تغییر جنس الکترود ابزار تأثیر خاصی بر ترکیب شیمیایی سطح قطعه کار ندارد اما جنس الکترود در نرخ براده‌برداری، سایش ابزار و زبری سطح، تأثیر زیادی دارد. احمد و همکاران [۵] با در نظر گرفتن پیک جریان بالا و مدت پالس دریافتند که بالاترین میزان حذف مواد (MRR) در بالاترین میزان پیک مصرفی (40 A) و کمترین زمان پالس (200µs) به دست می‌آید. این در حالی است که در جریان کم (۲۰ A) و مدت زمان پالس زیاد (400µs)، پایین‌ترین نرخ سایش الکترود (EWR) به دست می‌آید. همچنین کمترین زبری سطح (Ra) نیز در پایین‌ترین جریان پیک و زمان پالس اتفاق می‌افتد. حداد و همکاران [۶] تأثیر زبری سطح اولیه الکترود بر عملکرد فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که طی فرایند نهایی، نیمه‌خشن و خشن، برای افزایش زبری سطح الکترود، نسبت سایش الکترود افزایش می‌یابد و میزان حذف مواد، کاهش می‌یابد. جدام^۲ و همکاران [۷] تأثیر نانولوله کربنی چند جداره پراکنده در نفت سفید به عنوان محیط دی‌الکتریک بر عملکرد فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ Inconel 718 را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از محیط دی‌الکتریک مخلوط (۵/۰ گرم در لیتر) در مقایسه با EDM معمولی به‌طور قابل توجهی عملکرد ماشین‌کاری را بهبود می‌بخشد.

ایستا^۳ و همکاران [۸] از روش طراحی آزمایش‌ها و مبحث آنالیز واریانس به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس) در فرایند شمارزنی آلیاژ C1023 پرداختند. در این تحقیق مشخص شد افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، موجب کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. همچنین جریان و ولتاژ کمتر، نرخ برداشت براده را کاهش می‌دهد. گوپالاکان^۴ و همکاران [۹] با استفاده از روش تاگوچی و تحلیل انحراف معیار، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (ولتاژ، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس) را بر نرخ برداشت براده، نرخ سایش ابزار و کیفیت سطح بررسی کردند. در این مقاله با انجام آزمایش‌های متعدد مشخص شد شدت جریان و روشنی پالس، بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها دارند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش شدت جریان، نرخ

¹ Hascalik

² Rajmohan

³ Ayestaa

⁴ Gopakalannan

برداشت براده، افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش شدت جریان و افزایش زمان روشنی پالس، کیفیت سطح، افزایش می‌یابد. علی‌دوستی و همکاران [۱۰] به بررسی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با طراحی فاکتوریل کامل بر آلیاژ نیکل - تیتانیوم پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل آنها نشان داد که میزان حذف مواد به‌طور قابل توجهی به انرژی تخلیه یعنی جریان و مدت پالس، مرتبط است. به‌طوری که با افزایش جریان تخلیه، نرخ براده‌برداری با مدت پالس ۲۵ میکروثانیه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنها نشان داد که اختلاف معنی‌داری در میزان حذف مواد بین الکترودهای مس (Cu) و تنگستن - مس (W-Cu) وجود ندارد. پایداری کار الکترودهای W-Cu طولانی‌تر بود از طرفی مقدار ناخالصی روی سطح الکترودهای Cu پایین‌تر بود. اولمن^۱ و همکاران [۱۱] با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ پایه نیکل MAR-M247 پرداختند. در این بررسی مشخص شد که جریان و زمان روشنی پالس، تأثیرگذارترین فاکتورها هستند. راجمohan^۲ و همکاران [۱۲] با کمک روش تاگوچی و با در نظر گرفتن پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس به‌عنوان پارامترهای اصلی، به بهینه‌سازی نرخ برداشت براده فولاد ضدزنگ ۳۰۴ پرداختند. لین^۳ و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری EDM با پایه نیروی مغناطیسی به کمک روش تاگوچی پرداختند و نتایج تجربی آنان نشان داد که نیروی مغناطیسی EDM دارای MRR بالاتر، نسبت سایش الکترودهای نسبی پایین (EWR) و SR کوچک‌تر نسبت به EDM استاندارد است. لین و همکاران [۱۴] برای بهینه‌سازی فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی با ویژگی‌های عملکرد چندگانه با استفاده از آرایه متعامد با تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پارامترهای ماشین‌کاری، از جمله: قطبیت قطعه کار، طول پالس، عامل کار، ولتاژ تخلیه باز، جریان تخلیه و سیال دی‌الکتریک با ملاحظات ویژگی‌های عملکرد چندگانه؛ از جمله: نرخ حذف مواد، زبری سطح و نسبت سایش الکترودها، بهینه می‌شوند.

مطالعات زیادی در مورد تأثیر انواع پارامترهای ورودی بر بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند (از جمله میزان سایش کمتر الکترودها، زبری سطح بهتر) در مورد آلیاژهای خواص مکانیکی بالا انجام شده است. همچنین، مطالعات کمتری به‌طور هم‌زمان در مورد انواع پارامتر ورودی بر بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند و مورفولوژی سطوح انجام شده است. با توجه به ادبیات بررسی‌شده و مطالعه نویسندگان، نیاز به تحقیقات هم‌زمان پارامترهای خروجی و مورفولوژی سطوح وجود دارد. به‌طور خلاصه، هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است. ابزار بهینه‌سازی در این مطالعه، روش تاگوچی و تحلیل واریانس (ANOVA) است. همچنین پارامترهای ورودی فرایند شامل مدت‌زمان پالس، فاکتور کار، ولتاژ مدار باز و جریان تخلیه است. به‌طور خلاصه می‌توان موارد جدید و اهداف مطالعه فعلی را به صورت زیر بیان کرد:

- بهینه‌سازی پارامترهای خروجی فرایند، از جمله میزان سایش کمتر الکترودها، زبری سطح بهتر و ریزساختار همگن و عاری از ترک سطحی
- مقایسه رفتار دو آلیاژ Inconel 718 و آلیاژ Ti-6Al-4V در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM)
- تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی پارامترهای خروجی فرایند.

¹ Uhlmann

² Rajmohan

³ Lin

روش شناسی

آزمایش‌های تجربی

ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ Inconel 718 براساس استاندارد ASTM E415-17 [۱۵] و ASTM E1086-14 [۱۶] توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر^۱ مدل SPECTROMAXx ساخت کشور آلمان تعیین گردید. این آزمایش‌ها سه بار در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۳ درصد تکرار شد و میانگین نتایج از نظر درصد وزنی در جدول ۱ نوشته شده است. در جدول ۱ همچنین مقادیر ترکیب شیمیایی آلیاژ Inconel 718 استاندارد [۱۷] و تیتانیوم Ti-6Al-4V [۱۸] لیست گردیده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ماده اینکونل، استاندارد و ماده تیتانیوم

نماد	اینکونل ۷۱۸	اینکونل ۷۱۸ استاندارد [۱۷]	تیتانیوم Ti-6Al-4V [۱۸]
نیکل (Ni)	۵۲/۴	۵۰-۵۵	-
آهن (Fe)	۱۸/۰۵	پایه	۰/۲۲
کروم (Cr)	۱۹/۲۳	۱۷-۲۱	-
مولیبدن (Mo)	۳/۱۲	۲/۸-۳/۳	-
نیوبیوم (Nb)	۴/۹۵	۴/۷۵-۵/۵۰	-
منگنز (Mn)	۰/۱۲	ماکزیمم ۰/۳۵	-
مس (Cu)	۰/۰۹	ماکزیمم ۰/۳۰	-
آلومینیوم (Al)	۰/۳۵	۰/۲-۰/۸	۶/۰۸
تیتانیوم (Ti)	۱/۰۱	۰/۶۵-۱/۱۵	۸۹/۴۶۴
سیلیسیوم (Si)	۰/۰۸	ماکزیمم ۰/۳۵	-
کربن (C)	۰/۰۴	ماکزیمم ۰/۰۸	۰/۰۲
گوگرد (S)	۰/۰۰۶	ماکزیمم ۰/۰۱۵	-
فسفر (P)	۰/۰۰۸	ماکزیمم ۰/۰۱۵	-
برم (Br)	۰/۰۰۵	ماکزیمم ۰/۰۰۶	-
وانادیوم (V)	-	-	۴/۰۲
اکسیژن (O)	-	-	۰/۱۸
نیترژن (N)	-	-	۰/۰۱
هیدروژن (H)	-	-	۰/۰۰۵۳

برای انجام آزمایش از الکتروُد مسی با قطر ۸ و ارتفاع ۴۵ میلی‌متر، نمونه استوانه‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر از جنس آلیاژ Inconel 718، نفت سفید به‌عنوان مایع دی‌الکتریک و قطبیت مثبت استفاده گردید (شکل ۱). برای انجام فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) نمونه‌های آزمایش از دستگاه اسپارک مدل آذرخش 304H ساخت شرکت تهران اکرام استفاده شد.

خروجی‌های فرایند EDM (میزان حذف مواد، میزان سایش الکتروُد، زبری سطح و مورفولوژی سطح قطعه کار) به صورت زیر تجزیه و تحلیل گردید. میزان حذف مواد (MRR) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد [۱۹]:

$$MRR = (M_1 - M_2) / (P_w T_m) \quad (mm^3/min) \quad (1)$$

^۱ Spectrophotometer

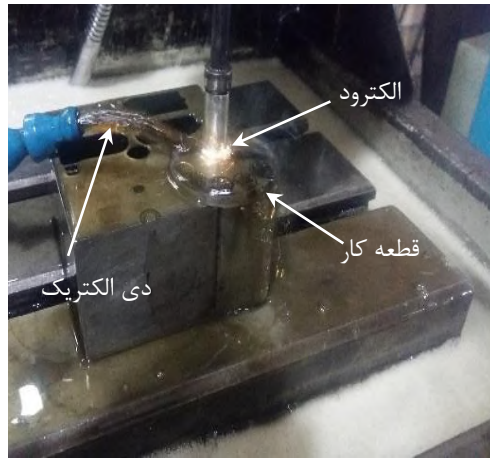
که M_1 و M_2 وزن قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری هستند و P_w و T_m به ترتیب چگالی قطعه کار و زمان دقیق ماشین کاری هستند. سپس، میزان سایش الکتروود (EWR) با توجه به کاهش وزن الکتروود پس از عملیات EDM محاسبه شد. از معادله (۲) برای تعیین مقادیر EWR برای آزمایش‌های EDM استفاده شد [۱۹]:

$$EWR = (E_1 - E_2)/(P_t T_m) \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (2)$$

که E_1 و E_2 وزن الکتروود قبل و بعد از ماشین کاری هستند، و P_t و T_m به ترتیب چگالی الکتروود و زمان دقیق ماشین کاری هستند. وزن ابزار و قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری با استفاده از ترازوی دقت بالا دیجیتال اندازه‌گیری شد. سطوح نهایی نیز با استفاده از زبری‌سنج متحرک مطابق استاندارد ISO 4287:1997 [۲۰] اندازه‌گیری شد. زبری نسبی R_a سطوح قطعه کار با استفاده از زبری‌سنج تیلور هابسون^۱ مدل سارترونیک^۳ مثبت ساخت کشور انگلستان در جهت مختلف و در پنج نقطه مختلف مطابق مرجع [۶] اندازه‌گیری شد و متوسط آنها در محاسبات اعمال گردید. در نهایت، مورفولوژی سطوح قطعه کار با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مدل LEO 1450VP ساخت کشور آلمان با وضوح بالا و بزرگ‌نمایی زیاد انجام گردید.



شکل ۱. (ب) تست زبری‌سنجی



شکل ۱. (الف) مجموعه آزمایش

طراحی آزمایش‌ها

در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، چندین پارامتر ورودی تأثیرگذار وجود دارد که توسط اپراتور با توجه به مدل ماشین تنظیم می‌شوند. پارامترهای ورودی مورد مطالعه در این تحقیق شامل جریان تخلیه، ولتاژ مدار باز، مدت‌زمان پالس و فاکتور کار است. مقادیر هر یک از این پارامترها در سه سطح مختلف در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی کار حاضر

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
W	جریان تخلیه (A)	۵	۱۰	۲۰

^۱ TAYLOR HOBSON Model Surtronic 3+

^۲ Scanning Electron Microscope (SEM)

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
X	ولتاژ گپ (V)	۸۰	۱۵۰	۲۵۰
Y	زمان روشنی پالس (μs)	۱۰۰	۲۰۰	۴۵۰
Z	فاکتور کار (%)	۳۰	۵۰	۷۰

جدول ۳. پارامترهای ورودی آلیاژ تیتانیوم [۱۸]

نماد	پارامتر ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
W	جریان تخلیه (A)	۵	۱۰	۲۰
X	ولتاژ گپ (V)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
Y	زمان روشنی پالس (μs)	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰
Z	فاکتور کار (%)	۳۰	۵۰	۷۰

روش انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق، با در نظر گرفتن چهار پارامتر ورودی در سه سطح مختلف، اجرای کامل آزمایش‌ها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. بنابراین، با استفاده از روش تاگوچی می‌توان با دستیابی به بهترین طرح آزمون و انجام تعداد محدودی آزمایش، به نتایج قابل قبولی دست یافت. با توجه به واقعیت فوق، ماتریس استاندارد L9 برای ترکیب ایده‌آل پارامترهای ورودی و درجه‌های مختلف آن در نظر گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۴. ترکیب بهینه طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			
	Z	Y	X	W
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

آزمایش‌ها پس از تعیین ترکیب ایده‌آل پارامترهای ورودی انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل خروجی‌های فرایند (میزان حذف مواد، میزان سایش الکتروود، زبری سطح و ریزساختار قطعه کار)، هر ردیف آزمایش با توجه به ترکیب تاگوچی سه بار تکرار می‌شود. همچنین از تجزیه و تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای یافتن حالت بهینه پارامترهای خروجی استفاده شد. در میزان سایش الکتروود و زبری سطح، سطوح بالای این پارامترها موجب کاهش راندمان و در میزان حذف مواد سطوح پایین این پارامترها موجب کاهش راندمان می‌شود. از این رو مشخصه «مقادیر پایین‌تر، بهتر است» برای سایش الکتروود و زبری سطح و همچنین «مقادیر بالاتر بهتر است» برای میزان حذف مواد انتخاب گردید. مقادیر نسبت سیگنال به نویز (S/N) با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۱].

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

که y نشان‌دهنده خروجی اندازه‌گیری شده و n نشان‌دهنده تعداد اندازه‌گیری‌ها است.

یافته‌ها

نرخ براده‌برداری (MRR)

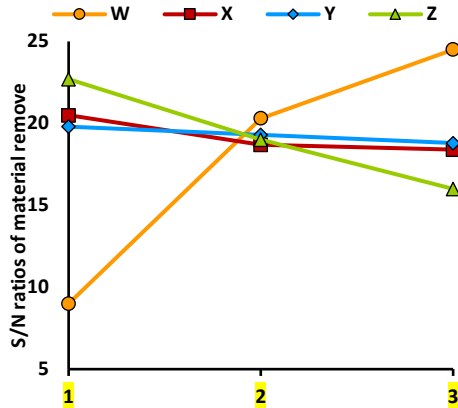
میزان حذف مواد با مقدار ماده برداشت شده در طول زمان تعریف می‌شود و واحد آن بر حسب میلی‌گرم در دقیقه است. به طوری افزایش این پارامتر باعث افزایش راندمان باربرداری و سرعت تولید قطعات می‌گردد. جدول ۵ نشان‌دهنده نتایج میزان حذف مواد است که مقادیر نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۶)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر روی میزان حذف مواد محاسبه گردید. با توجه به جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه و فاکتور کار به ترتیب حدود ۷۱ و ۲۱ درصد در میزان حذف مواد مؤثر هستند.

جدول ۵. نتایج خروجی‌های آزمایش برای نرخ براده‌برداری

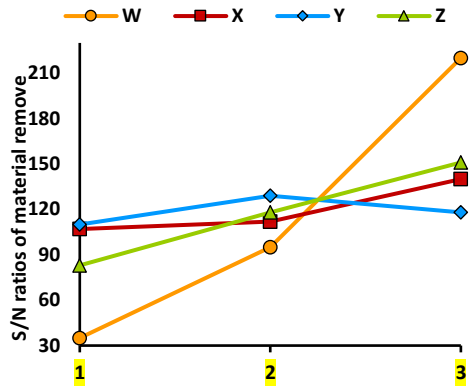
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				نرخ سایش ابزار (mg/min)			سیگنال به نویز (dB)
	W	X	Y	Z	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	
۱	۱	۱	۱	۱	۴۹/۳۵	۴۸/۹۶	۴۹/۲۶	۳۳/۸
۲	۲	۲	۲	۱	۴۲/۳۵	۴۲/۴۱	۴۲/۳۹	۳۲/۵
۳	۳	۳	۳	۱	۲۹/۹۸	۳۰/۳۱	۳۰/۳۹	۲۹/۶
۴	۳	۲	۱	۲	۵۹/۸۵	۵۹/۹۷	۶۰/۰۸	۳۵/۶
۵	۱	۳	۲	۲	۱۲۰/۲	۱۲۰/۱	۱۲۰/۱	۴۱/۶
۶	۲	۱	۳	۲	۱۰۰/۱	۱۰۰/۱	۱۰۰/۰	۴۰/۰
۷	۲	۳	۱	۳	۲۷۹/۵۱	۲۷۹/۸۳	۲۷۹/۹۲	۴۸/۹
۸	۳	۱	۲	۳	۲۱۰/۰۹	۲۱۰/۱۵	۲۱۰/۱۹	۴۶/۶
۹	۱	۲	۳	۳	۱۶۳/۰۵	۱۶۳/۱۲	۱۶۳/۰۹	۴۲/۲

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس برای نرخ براده‌برداری

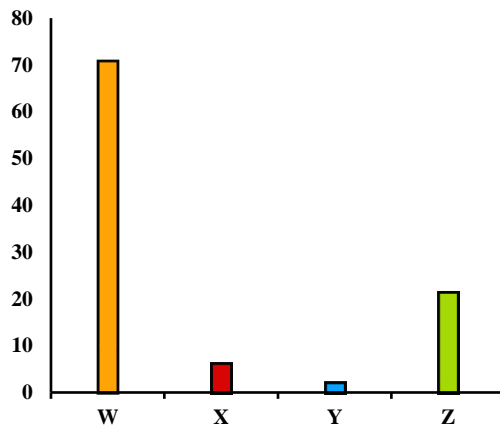
پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	۴۶/۵	۳۹/۱	۳۲	۲	۳۱۸/۱	۹۱	۷۰/۵۴
X	۳۷/۹	۴۰/۲	۳۹/۴	۲	۷/۹۷	۶/۵	۶/۰۸
Y	۴۰	۳۷/۴۴	۴۰/۱	۲	۱۳/۸	۳/۹	۲/۰۴
Z	۳۷/۲	۴۰/۵	۳۹/۹	۲	۱۸/۸	۲۶	۲۱/۳
کل				۸	۳۵۶/۶		۱۰۰



شکل ۲. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (نرخ براده برداری)



شکل ۲. الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده اینکونل (نرخ براده برداری)



شکل ۲. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری

شکل ۲ نشان دهنده پاسخ نرخ براده برداری به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه میزان انرژی وارد بر واحد، سطح، افزایش و راندمان باربرداری نیز افزایش می یابد. همچنین زمان روشنی پالس، تأثیر قابل ملاحظه ای بر میزان و شدت باربرداری دارد؛ به طوری که با افزایش زمان روشنی پالس ها نرخ براده برداری تا نقطه ای افزایش می یابد و پس از آن وارد روند کاهشی می شود. بدین ترتیب میزان زمان روشنی بین پالس ها نیاز به مقدار معین و بهینه ای دارد. ولتاژ گپ و همچنین فاکتور کار نیز بر نرخ براده برداری مؤثرند؛ به طوری که با افزایش این دو فاکتور، میزان توزیع و پخش انرژی جرقه زنی بر واحد سطح افزایش می یابد و بدین ترتیب منجر به افزایش نسبی باربرداری به همراه فاکتورهای مناسبی از سطح خواهد شد.

نرخ سایش الکتروود (EWR)

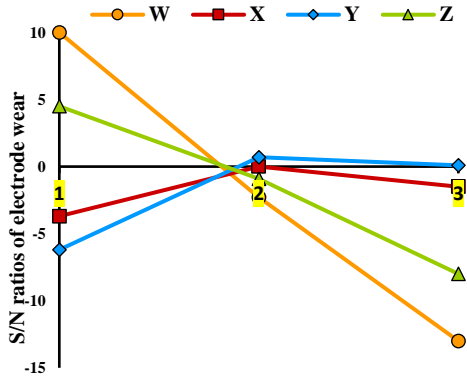
میزان سایش الکتروود با توجه به میزان الکتروود مورد استفاده در واحد زمان تعریف می‌شود و دارای واحد (میلی گرم در دقیقه) است. این پارامتر، تأثیر مستقیمی بر میزان مصرف الکتروود دارد؛ به طوری که افزایش نرخ سایش ابزار منجر به افزایش هزینه‌های تولید و همچنین افزایش زمان تولید قطعات خواهد شد. جدول ۷ نتایج آزمایش‌های مربوط به نسبت سایش الکتروود را نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۸)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر میزان سایش الکتروود محاسبه گردید. با توجه به جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه و فاکتور کار به ترتیب با میزان ۶۸/۲۵ و ۲۰/۷۶ درصد بر میزان سایش الکتروود تأثیر گذار هستند.

جدول ۷. نتایج خروجی‌های آزمایش برای نرخ سایش ابزار

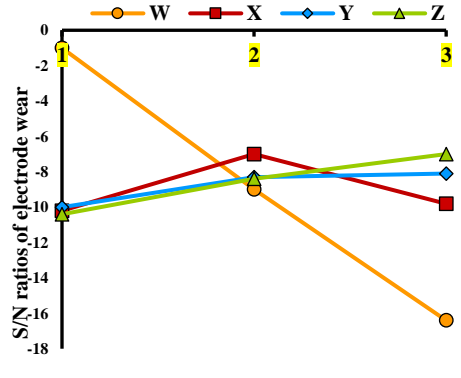
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				نرخ سایش ابزار (mg/min)			سیگنال به نویز (dB)
	W	X	Y	Z	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	
۱	۱	۱	۱	۱	۱/۸۵	۱/۸۱	۱/۷۹	-۵/۱۸
۲	۲	۲	۲	۱	-۰/۸۳	-۰/۸۹	-۰/۸۵	۱/۳۴
۳	۳	۳	۳	۱	-۰/۹۶	-۰/۹۳	-۰/۹۸	۰/۳۸
۴	۳	۲	۱	۲	۲/۵۴	۲/۴۶	۲/۴۹	-۷/۹۴
۵	۱	۳	۲	۲	۲/۸۱	۲/۷۳	۲/۷۹	-۸/۷۱
۶	۲	۱	۳	۲	۳/۳۳	۳/۴۸	۳/۳۹	-۱۰/۶۲
۷	۲	۳	۱	۳	۷/۲۱	۷/۲۷	۷/۳۲	-۱۷/۲۲
۸	۳	۱	۲	۳	۵/۳۶	۵/۳۱	۵/۲۸	-۱۴/۵۱
۹	۱	۲	۳	۳	۹/۲۲	۹/۱۹	۹/۲۳	-۱۹/۲۸

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس برای نرخ سایش ابزار

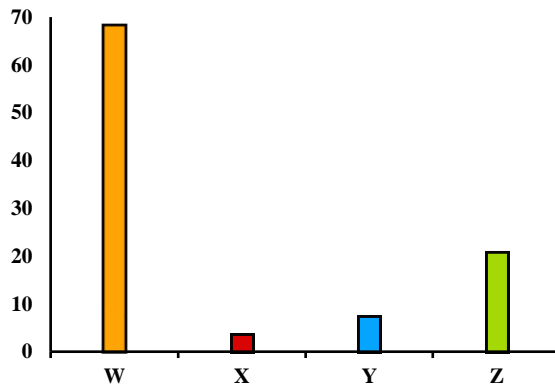
پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	-۱/۱	-۹/۲	-۱۷	۲	۵۸/۵	۳۶۶/۶	۶۸/۳
X	-۱۰/۲	-۷/۳	-۹/۸	۲	۳/۴۱	۲۵/۰	۳/۷
Y	-۱۰/۱	-۸/۶	-۸/۶	۲	۰/۷۷	۳۴/۱	۷/۳
Z	-۱۱/۲	-۸/۷	-۷/۴	۲	۴/۲	۱۱۱/۵	۲۰/۸
کل				۸	۶۶/۹	۱۰۰	



شکل ۳. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (نرخ سایش ابزار)



شکل ۳- الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده اینکونل (نرخ سایش ابزار)



شکل ۳. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر نرخ سایش ابزار

شکل ۳ نشان‌دهنده پاسخ نرخ سایش ابزار به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه میزان انرژی هدایت‌شده توسط الکتروود افزایش می‌یابد و موجب افزایش فرسایش در ابعاد و هندسه الکتروود می‌گردد. همچنین ولتاژ گپ نیز بر نرخ سایش ابزار مؤثر است. به طوری که با افزایش این فاکتور، میزان فرکانس جرقه‌زنی افزایش می‌یابد و موجب توزیع تنش حرارتی و شکل نگرفتن موضعی آن می‌گردد. بدین ترتیب نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد.

میزان زبری سطح (SR)

زبری سطح به میزان پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه کار اشاره دارد و دارای واحد (میکرومتر) است. این پارامتر تأثیر مستقیمی بر کیفیت سطح قطعه ماشین‌کاری شده نهایی دارد؛ به طوری که با اصلاح این پارامتر، شاهد بهبود ریزساختار و مورفولوژی سطح و عدم‌شکل‌گیری عیوب مختلف سطحی از جمله ترک خواهد گردید. تأثیر تغییر پارامترها بر بهبود مورفولوژی سطح برخی از نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده در مرجع [۲۲] نشان داده شده است. جدول ۹ نتایج

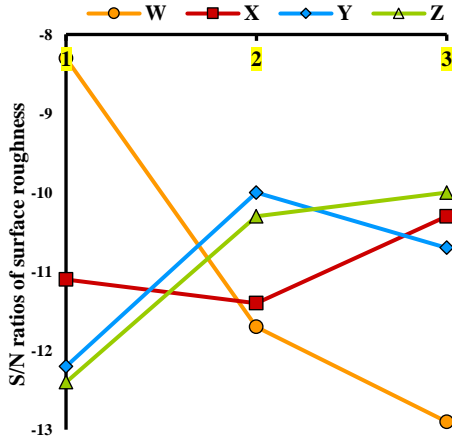
آزمایش‌های مربوط به میزان زبری سطح را نشان می‌دهد که البته نسبت سیگنال به نویز نیز قابل مشاهده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۱۰)، درصد مشارکت هر یک از پارامترهای ورودی بر زبری سطح محاسبه گردید. با توجه به جدول ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که جریان تخلیه، فاکتور کار و زمان روشنی پالس به ترتیب با مقادیر ۶۳، ۲۰ و ۱۴ درصد، بر میزان زبری سطح، تأثیرگذار است.

جدول ۹. نتایج خروجی‌های آزمایش برای میزان زبری سطح

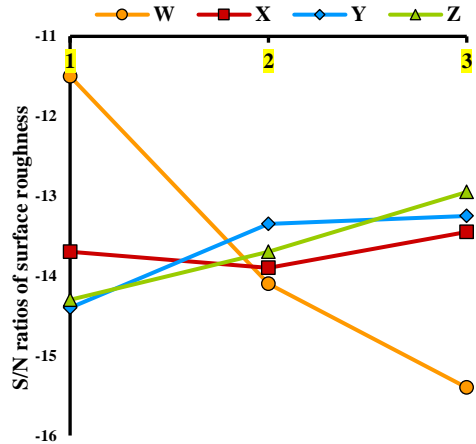
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				نرخ سایش ابزار (mg/min)			سیگنال به نویز (dB)
	W	X	Y	Z	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	
۱	۱	۱	۱	۱	۴/۶۱	۴/۵۴	۴/۵۸	-۱۳/۲
۲	۲	۲	۲	۱	۳/۷۸	۳/۸۳	۳/۸۴	-۱۱/۶
۳	۳	۳	۳	۱	۳/۲۱	۳/۴۲	۳/۲۵	-۱۰/۳
۴	۳	۲	۱	۲	۴/۴۱	۴/۴۸	۴/۵۲	-۱۳/۰
۵	۱	۳	۲	۲	۵/۳۲	۵/۳۱	۵/۳۶	-۱۴/۵
۶	۲	۱	۳	۲	۵/۲۱	۵/۴۲	۵/۳۳	-۱۴/۵
۷	۲	۳	۱	۳	۵/۵۲	۵/۶۸	۵/۶۱	-۱۴/۹
۸	۳	۱	۲	۳	۶/۱	۶/۰۸	۶/۰۳	-۱۵/۶
۹	۱	۲	۳	۳	۵/۸۵	۵/۸۹	۵/۹۱	-۱۵/۴

جدول ۱۰. نتایج تحلیل واریانس برای میزان زبری سطح

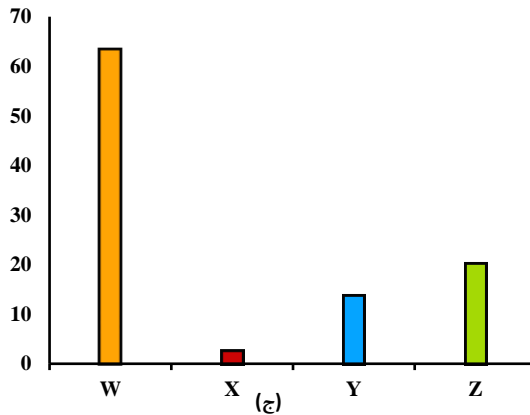
پارامتر ورودی	نرخ سیگنال به نویز (dB)			درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد مشارکت
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳				
W	۱۱/۶	۱۳/۹	۱۵/۳	۲	۲۰/۳۱	۱۶/۴۹	۶۳/۳
X	۱۳/۷	۱۳/۹	۱۳/۳	۲	۰/۶۵	۰/۶۷۴	۲/۶
Y	۱۴/۴	۱۳/۳	۱۳/۲	۲	۳/۰۲	۳/۵۸۲	۱۳/۸
Z	۱۴/۴	۱۳/۶	۱۲/۹	۲	۳/۲۵	۵/۲۸۷	۲۰/۳
کل				۸	۲۷/۲۳		۱۰۰



شکل ۴. ب) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ماده تیتانیوم (میزان زبری سطح)



شکل ۴. الف) نمودار پاسخ سیگنال به نویز ینکونل (میزان زبری سطح)

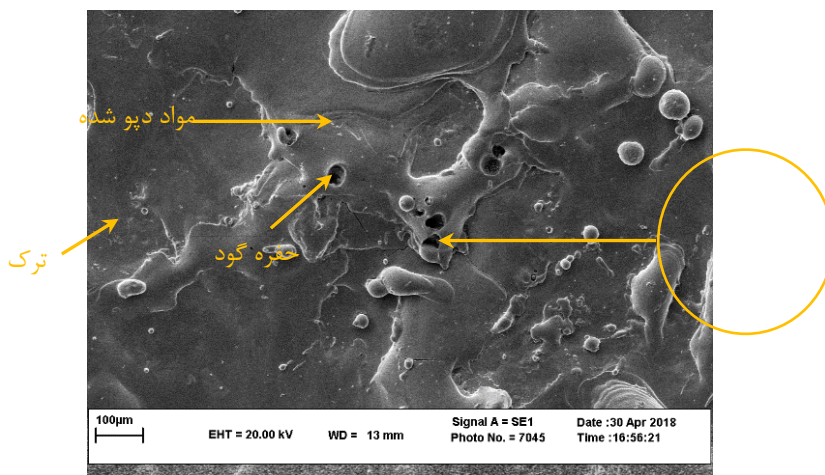


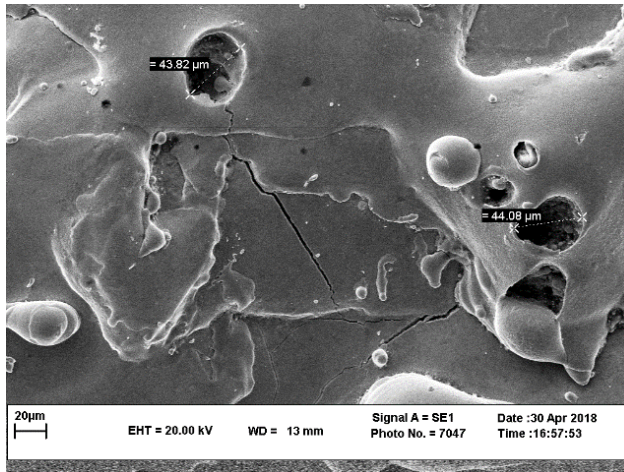
شکل ۴. ج) نمودار درصد مشارکت پارامترهای ورودی بر میزان زبری سطح

شکل ۴ نشان‌دهنده پاسخ میزان زبری سطح به ازای هر یک از پارامترهای ورودی است؛ به طوری که جریان تخلیه بر میزان این پارامتر خروجی تأثیر به‌سزایی دارد. از این رو با افزایش جریان تخلیه، میزان انرژی و تنش حرارتی وارد بر واحد سطح افزایش می‌یابد و موجب تشکیل عیوب سطحی و همچنین شکل‌گیری لایه سفید می‌گردد؛ بدین ترتیب، موفقولوژی سطح قطعه کار نهایی دچار انواع عیوب سطحی و زیرسطحی می‌گردد. همچنین زمان روشنی پالس نیز بر میزان زبری سطح، تأثیر گذار است؛ به طوری که افزایش زمان روشنی پالس‌ها موجب ماندگاری و تشدید تنش‌های حرارتی وارد بر سطح می‌شود و میزان زبری سطح نیز افزایش خواهد یافت.

مورفولوژی سطح

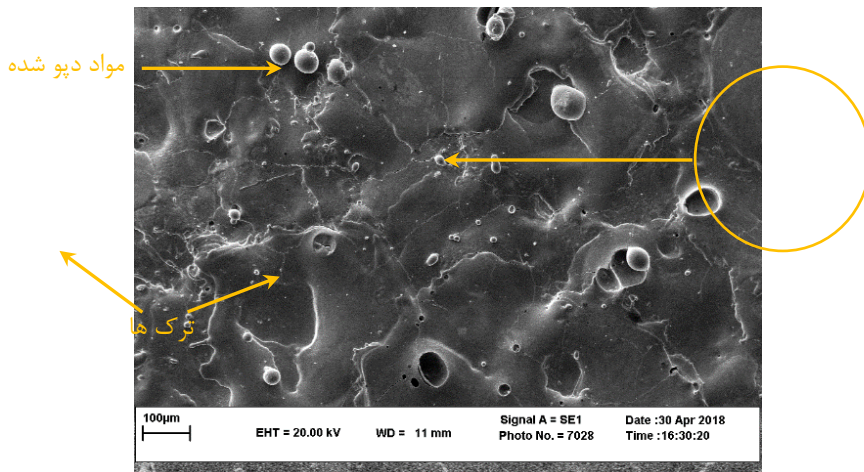
در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، هر یک از پارامترهای ورودی ماشین ابزار، تأثیرات متفاوتی بر کیفیت سطح و ریزساختار سطحی نمونه ماشین کاری شده دارند؛ به طوری که افزایش یا کاهش یک پارامتر تنظیمی، منجر به بروز عیوب مختلف سطحی و زیرسطحی در قطعه می‌شود. از این رو به بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها پرداخته شده است. جریان تخلیه، تأثیر متوسط ۶۰ درصدی را بر کیفیت سطح نهایی قطعه دارد؛ به طوری که افزایش این پارامتر منجر به بروز عیوبی مانند ترک و حفره‌های گازی می‌گردد. از طرفی با کاهش میزان این پارامتر، راندمان براده برداری فرایند کاهش می‌یابد و در نتیجه، مدت زمان ماشین کاری یک قطعه، طولانی‌تر خواهد شد. بدین ترتیب، تعیین یک میزان بهینه از مقادیر پارامترهای ورودی، الزامی است. مورفولوژی سطح برخی از نمونه‌های ماشین کاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطابق مراجع [۲۳-۲۵] در شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است. معیارهای انتخاب این تصاویر، مقادیر پاسخ سیگنال به نویز در قسمت زبری سطح است. از این رو، ریزساختار سه سطح با زبری سطح بالا، متوسط و کم بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است سطح شماره ۸ با مشخصات $(W_3X_2Y_1Z_3)$ دارای عیوب سطحی زیادی از جمله ترک و حفرات گازی است. دلیل ایجاد چنین سطحی، افزایش جریان تخلیه و کاهش ولتاژ است. با اعمال این مقادیر، سطح فوق، بالاترین میزان زبری را دارد.

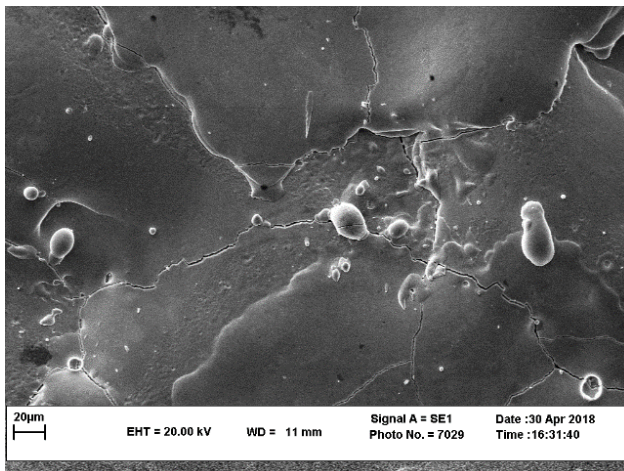




شکل ۵. نمونه میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایش شماره ۸

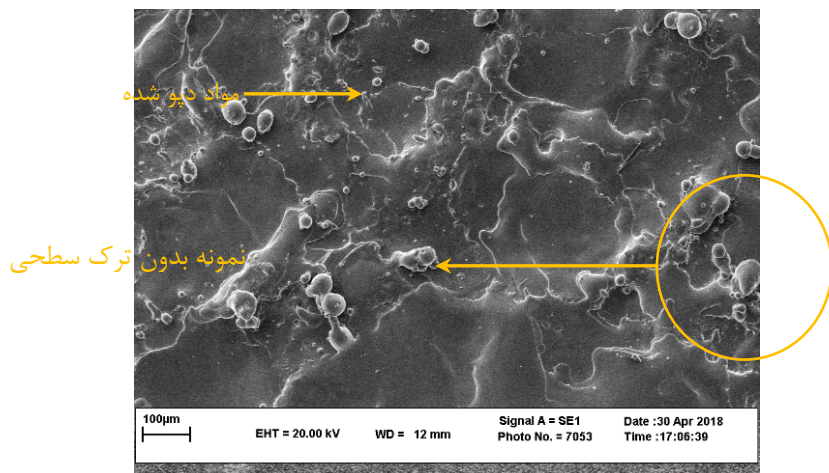
سطح دوم سطح شماره ۶ با مشخصات $(W_2X_3Y_1Z_2)$ است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است این سطح دارای ترک کوچک‌تر است که در مقایسه با سطح شماره ۸ بهبود یافته است. این بهبود به دلیل کاهش جریان تخلیه از ۲۰ به ۱۰ آمپر و افزایش ولتاژ از ۱۵۰ به ۲۵۰ ولت است اما به دلیل جریان تخلیه نسبتاً زیاد، هنوز نقایصی در سطح وجود دارد.

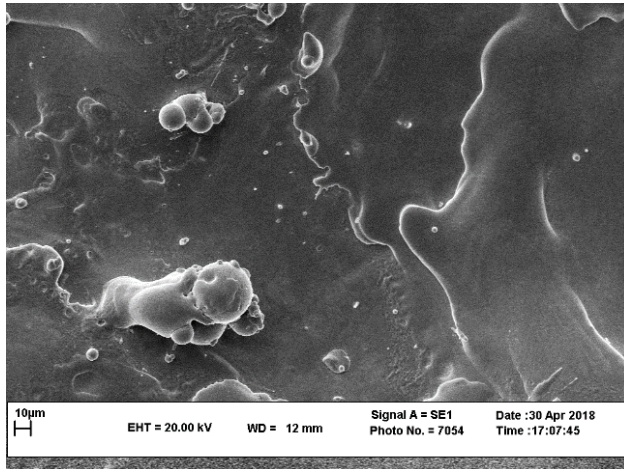




شکل ۶. نمونه میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایش شماره ۶

سطح سوم با مشخصات $(W_1X_3Y_3Z_3)$ سطح شماره ۳ است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است این سطح، فاقد هرگونه عیب سطحی است و در مقایسه با سطح شماره ۶ بهبود یافته است. دلیل این بهبود، کاهش جریان تخلیه از ۱۰ به ۵ آمپر و افزایش طول پالس از ۱۰۰ به ۴۵۰ میکروثانیه است.





شکل ۷. نمونه میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمایش شماره ۳

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جریان تخلیه و کاهش ولتاژ، زبری سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه عیوب سطحی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش جریان تخلیه انرژی حرارتی بیشتری به قطعه کار وارد می‌شود و باعث افزایش تنش‌های حرارتی در سطح قطعه کار می‌شود. از اینرو با افزایش جریان تخلیه میزان عیوب سطحی در قطعات ماشین‌کاری شده افزایش می‌یابد.

تحلیل رگرسیون

در این بخش، با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی و نرم‌افزار MINITAB 17 به محاسبه پارامترهای خروجی فرایند پرداخته شده است. با استفاده از این روابط می‌توان پارامترهای خروجی فرایند؛ شامل نرخ برده‌برداری، میزان سایش الکتروود و زبری سطح را به‌ازای هر میزان از پارامترهای ورودی پیش‌بینی کرد. برخی از پارامترهای ورودی مانند جریان تخلیه، تأثیر زیادی در این محاسبه دارند. معادلات به شرح زیر است:

$$MRR = -40.5 + 88.5 W - 15.9 X + 11.7 Y - 5.4 Z \quad (۴)$$

$$EWR = -1.37 + 3.025 W + 0.318 X + 0.073 Y - 0.837 Z \quad (۵)$$

$$SR = 4.333 + 0.978 W - 0.045 X - 0.312 Y - 0.343 Z \quad (۶)$$

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با انجام آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی، تأثیر چهار پارامتر ورودی بر میزان چهار پارامتر خروجی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بررسی شد. میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی در خروجی‌های فرایند

متفاوت است. جریان تخلیه با میانگین ۶۸ درصد، بیشترین تأثیر را بر مقادیر پارامترهای خروجی فرایند دارد؛ به طوری که با افزایش جریان تخلیه، میزان انرژی حرارتی روی سطح قطعه، افزایش و در نتیجه، میزان سایش الکتروود و زبری سطح، افزایش می‌یابد که منجر به ظهور عیوبی مانند ترک و حفره‌های گازی می‌شود. از طرف دیگر، راندمان براده‌برداری، در حال افزایش است. از این رو، با ارزیابی پاسخ‌های سیگنال به نویز (S/N) و تصاویر مورفولوژی سطوح، آزمایش شماره ۳ با مشخصات $(W_3X_3Y_3Z_1)$ به‌عنوان آزمایش بهینه انتخاب گردید. پارامترهای ورودی در این سطح شامل جریان تخلیه ۵ آمپر، ولتاژ گپ ۲۵۰ ولت، زمان روشنی پالس ۴۵۰ میکروثانیه و فاکتور کار ۷۰ است که نسبت به حالت عادی منجر به افزایش ۴۵ درصدی راندمان براده‌برداری، کاهش ۳۰ درصدی فرسایش الکتروود و بهبود ۶۵ درصدی زبری سطح قطعه می‌شود. همچنین توپوگرافی سطح بهینه عاری از عیوب سطحی مانند ترک و حفره‌های گازی است. در پایان، با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی، مقادیر پارامترهای خروجی فرایند براساس هر میزان از پارامترهای ورودی، پیش‌بینی گردید. همچنین پس از مقایسه رفتار دو ماده اینکونل ۷۱۸ و آلیاژ Ti-6Al-4V در شرایط یکسان، قابل ذکر است که راندمان براده‌برداری در ماده اینکونل ۷۱۸ بیشتر از تیتانیوم است و در مقابل ماده تیتانیوم دارای پتانسیل بهتری از دیدگاه مورفولوژی و توپوگرافی سطح است.

References

- [1] Rahul, Srivastava, A., Kumar Mishra, D., Chatterjee, S., Datta, S., Bhusan Biswal, B., & Sankar Mahapatra, S. (2018). Multi-Response Optimization during Electro-Discharge Machining of Super Alloy Inconel 718: Application of PCA-TOPSIS. *Materials Today :Proceedings*, 5(2, Part 1), 4269-4276. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.691>
- [2] Sahu, B. K., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2018). On Electro-Discharge Machining of Inconel 718 Super Alloys: An Experimental Investigation. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 4861-4869. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.062>
- [3] Hasçalık, A., & Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science*, 253(22), 9007-9016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>
- [4] Jabbaripour, B., Sadeghi, M., Shabgard, M. R., & Faridvand, S. (2011). Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of γ -TiAl Intermetallic. *Modares Mechanical Engineering*, 11(2), 135-146. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-6162-en.html>
- [5] Ahmad, S., & Lajis, M. A. (2013, July 1-4). *Electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration* 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013), Kuantan, Pahang, Malaysia. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/50/1/012062/pdf>
- [6] Hadad, M., Bui, L., & Nguyen, C. (2018). Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 2093-2104. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1399-2>
- [7] Jadam, T., Sahu, S., Datta, S., & Masanta, M. (2019). (EDM performance of Inconel 718 superalloy: application of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) added dielectric media. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(8), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1813-9>

- [8] Ayesta, I., Izquierdo, B., Sanchez, J., Ramos, J. M., Plaza, S., Pombo, I., Ortega, N., Bravo, H., Fradejas, R., & Zamakona, I. (2013). Influence of EDM Parameters on Slot Machining in C1023 Aeronautical Alloy. *Procedia CIRP*, 6, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.059>
- [9] Gopalakannan, S., Senthilvelan, T., & Ranganathan, S. (2012). Modeling and Optimization of EDM Process Parameters on Machining of Al 7075-B4C MMC Using RSM. *Procedia Engineering*, 38, 685-690. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.086>
- [10] Alidoosti, A., Ghafari-Nazari, A., Moztarzadeh, F., Jalali, N., Moztarzadeh, S., & Mozafari, M. (2013). Electrical discharge machining characteristics of nickel-titanium shape memory alloy based on full factorial design. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(13), 1546-1556. <https://doi.org/10.1177/1045389X13476147>
- [11] Uhlmann, E., & Domingos, D. C. (2013). Development and Optimization of the Die-Sinking EDM-Technology for Machining the Nickel-based Alloy MAR-M24 \forall for Turbine Components. *Procedia CIRP*, 6, 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.102>
- [12] Rajmohan, T., Prabhu, R., Rao, G. S., & Palanikumar, K. (2012). Optimization of Machining Parameters in Electrical Discharge Machining (EDM) of 304 Stainless Steel. *Procedia Engineering*, 38, 1030-1036. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.129>
- [13] Lin, Y.-C., Chen, Y.-F., Wang, D.-A., & Lee, H.-S. (2009). Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3374-3383. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.052>
- [14] Lin, J. L., & Lin, C. L. (2002). The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2), 237-244. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00107-9)
- [15] ASTM International. (2017, Jun 22). *ASTM E415-15- Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. ASTM International. <https://www.astm.org/e0415-15.html>
- [16] Document Center Inc. (2014). *ASTM-E1086-14, Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*, Document Center, Inc. Document Center Inc, ASTM International. <https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-E1086>
- [17] ASTM International. (2018, November 15). *ASTM B670-07, Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy (UNS N07718) Plate, Sheet, and Strip for High-Temperature Service*. ASTM International. <https://www.astm.org/b0670-07r18.html>
- [18] Kao, J., Tsao, C., Wang, S., & Hsu, C. (2010). Optimization of the EDM Parameters on Machining Ti-6Al-4V with Multiple Quality Characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(1), 395-402. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2208-3>
- [19] Rahul, Datta, S., Biswal, B., & Mahapatra, S. (2017). A Novel Satisfaction Function and Distance-Based Approach for Machining Performance Optimization During Electro-

- Discharge Machining on Super Alloy Inconel 718. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1999-2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2422-5>
- [20] ISO. (2009, June). ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters. In: ISO.
- [21] Srinivasa Rao, P., Ramji, K., & Satyanarayana, B. (2016). Effect of wire EDM conditions on generation of residual stresses in machining of aluminum 2014 T6 alloy. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1077-1084. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.014>
- [22] Asadi Borojeni, 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>
- [23] Aliakbari, K. (2018). Failure analysis of four-cylinder diesel engine crankshaft. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1536-3>
- [24] Aliakbari, K., & Mamaghani, T. (2020). Analysis of fatigue crack growth in cylinder head bolts of gasoline engine based on experimental data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02326-1>
- [25] Mohammad Khani Haji KhajeLu, B., & Maleki, M. (2020). Experimental Investigation of Dynamic Density of Aluminum Powder under High Speed Loading. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 157-175. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112762>



An Experimental Investigation into the Coupling of Gamma-Type Stirling Engine to Convert Thermal Energy to Cooling Energy in Different Laboratory Conditions

Ezatollah Hassanzadeh¹, Mehdi Aliehyaei^{2*}, Saeed Jafari Mehrabadi³, Arash Mohammadi⁴, Hossein Mazaheri⁵

¹PhD, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Karaj (Shahid Beheshti), Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Alborz, Iran.

²Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran.

^{3,5}Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

⁴Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.05.2020

Revised: 11.01.2020

Accepted: 23.01.2021

Keyword:

Gamma Stirling

Couple

Cooling

Power supply

Biomass

*Corresponding Author:

Mehdi Aliehyaei

Email: aliehyaei@pardisiau.ac.ir

ABSTRACT

The main aim of this research was to experimentally investigate the two coupled identical ST500 gamma-type Stirling engines and convert thermal energy to cooling energy. Using a new structure and two coupled Stirling engines at different temperatures and pressures and use of biomass fuel within the 4 -8 bar average pressure range of the first engine hot source, the 1-4 bar average pressure range of the second engine cold source, and Stirling hot engine temperature range of 480-580 °C, the effective cooling is obtained in the cold engine. In doing tests, attempts were made to reach lower than 9 percent error results in different parts of engine, including insulation, fluid leakage, belt loosening, and measurement devices. According to the obtained results, a 8 bar increase in the average pressure range of the gas in the first engine hot source, a 1 bar reduction in the average pressure range of the gas in the second engine cold source, the increased temperature of the hot source up to 580 °C, and the use of the light operating fluid such as helium will affect the generation of cooling up to -16°C.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تکنولوژی و حرفه‌ای

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۲۱۳-۱۸۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128403

20.1001.1.23829796.1399.17.4.11.9



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی تجربی کوپلینگ موتور استرلینگ گاما برای تبدیل انرژی حرارتی به سرمایشی در شرایط مختلف آزمایشگاهی

عزت‌اله حسن‌زاده^۱، مهدی علی‌احیایی^{۲*}، سعید جعفری مهرآبادی^۳، آرش محمدی^۴، حسین مظاهری^۵

- ۱- دانش‌آموخته دکتری، دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی‌وحرفه‌ای شهید بهشتی کرج، دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۳ و ۵- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

هدف اصلی از این تحقیق، بررسی تجربی اتصال دو موتور استرلینگ مشابه ST500 از نوع گاما و تبدیل انرژی حرارتی به سرمایشی است. در این تحقیق با استفاده از یک ساختار جدید و با استفاده از دو موتور استرلینگ به صورت کوپل در دما و فشارهای مختلف و استفاده از سوخت زیست‌توده در محدوده فشار متوسط منبع گرم موتور اول ۴ تا ۸ بار، محدوده فشار متوسط منبع سرد موتور دوم ۱ تا ۴ بار و محدوده دمایی موتور گرم استرلینگ ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به سرمایش مؤثری در موتور سرد رسید. در انجام آزمایش‌ها سعی شد تا میزان خطاها در قسمت‌های مختلف موتور از قبیل عایق کاری، نشستی سیال، لقی تسمه و دستگاه‌های اندازه‌گیری به کمتر از ۹ درصد برسد. نتایج نشان داد که افزایش فشار متوسط گاز در منبع گرم موتور اول تا ۸ بار و کاهش فشار متوسط گاز در منبع سرد موتور دوم تا ۱ بار، بالا بودن درجه حرارت منبع گرم تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و استفاده از سیال عامل سبک مانند هلیوم در تولید سرمایش تا ۱۶- درجه سانتی‌گراد مؤثر خواهد بود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴

کلید واژگان:

استرلینگ گاما
کوپل
سرمایش
منبع تغذیه
زیست‌توده

*نویسنده مسئول: مهدی علی‌احیایی

پست الکترونیکی:

aliehyaei@pardisiau.ac.ir



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

موتور استرلینگ

موتور استرلینگ، یکی از انواع موتورهای هواگرم است که گاز در اثر گرم شدن، تمایل به افزایش حجم و در اثر سرد شدن، تمایل به کاهش حجم دارد و گرمایش و سرمایش متوالی موتور موجب به حرکت درآمدن پیستون‌ها و مکانیزم لنگ می‌شود. امروزه فناوری‌های مختلفی در زمینه توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این فناوری‌ها که امروزه مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است استفاده از یک موتور حرارتی با نام موتور استرلینگ است. موتور استرلینگ، یک موتور احتراق خارجی است و انعطاف‌پذیری بالایی در استفاده از منابع انرژی مختلف دارد و می‌تواند انرژی حرارتی موجود در منابع تجدیدپذیر را به انرژی مکانیکی و الکتریکی تبدیل کند [۱].

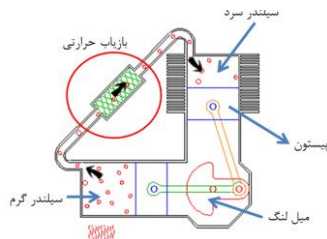
موتور استرلینگ، یکی از انواع موتورهای هوا گرم است که مانند انواع موتورهای حرارتی با استفاده از تبادل حرارت میان دو منبع گرم و سرد می‌تواند کار مکانیکی یا الکتریکی تولید کند. حرارت در دمای بالا به موتور وارد می‌شود، بخشی از آن به کار مکانیکی یا الکتریکی تبدیل می‌گردد و مابقی آن در دمای پایین‌تر، از موتور خارج می‌شود. موتور استرلینگ از نظر عملکرد، ساده و دارای گشتاور مناسب است و چنانچه به‌صورت معکوس به کار گرفته شود می‌تواند جایگزین خوبی برای سیکل‌های تبرید باشد. امروزه مطرح‌شدن آلیاژهای جدید و مواد آب‌بندی و نیز استفاده از نرم‌افزارها و کامپیوترهای پیشرفته که انجام محاسبات دقیق و پیچیده را آسان کرده، تکامل این موتور را سریع خواهد کرد. چنانچه بهینه‌سازی موتورهای فعلی به‌منظور کاهش میزان سوخت و میزان گازهای آلاینده و صدا در حد استانداردهای بین‌المللی سازمان‌های محیط‌زیست میسر نشود، بدون شک باید به سراغ موتورهای استرلینگ رفت [۲].

انواع موتور استرلینگ

موتورهای استرلینگ، طی سالیان متمادی، پیشرفت کرده‌اند و طرح‌های مختلفی از این نوع موتور توسعه داده شده است. انواع مختلف موتور استرلینگ با نام‌های آلفا، بتا، گاما و پیستون آزاد، شناخته شده است. اصول ترمودینامیکی برای همه آن‌ها یکسان می‌باشد و تفاوت اساسی آن‌ها از نظر نحوه قرار گرفتن اجزای مختلف موتور، در کنار یکدیگر است. تمامی موتورهای استرلینگ دارای پنج حجم کنترلی هستند که به ترتیب محفظه تراکم، کولر، بازیاب، گرم‌کن و محفظه انبساط است [۳].

موتور نوع آلفا

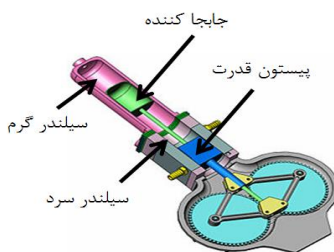
موتور نوع آلفا دارای دو سیلندر مجزا برای فضاهای تراکم و انبساط است و در هر سیلندر، یک پیستون قرار دارد. دو سیلندر مجزا به‌واسطه بازیاب حرارتی و لوله رابط، به هم متصل شده‌اند. سیلندر گرم در کنار منبع گرم و سیلندر سرد در کنار منبع سرد قرار می‌گیرد. این نوع از موتورها، از لحاظ مفهومی، ساده‌ترین ترکیب را در میان انواع موتورهای استرلینگ دارند. در موتور نوع آلفا حجم هریک از محفظه‌های گرم و سرد موتور به ترتیب با استفاده از پیستون‌های گرم و سرد که حرکت آن تحت کنترل است، تعیین می‌شود. در شکل ۱ طرح‌واره موتور استرلینگ با ساختار آلفا به‌همراه منبع ورود حرارت و مدفن حرارتی آن نشان داده شده است که در آن، حرکت پیستون‌ها توسط چرخش میل‌لنگ کنترل می‌شود و چهار فرایند بیان‌شده در هر ۹۰ درجه از چرخش میل‌لنگ ایجاد می‌شوند. در این روش نیاز است تا هر دو پیستون گرم و سرد، درزبندی شده باشد؛ این امر ممکن است برای پیستون سمت سرد، مشکلی ایجاد نکند اما درزبندی کامل پیستون سمت گرم با توجه به ضریب انبساط حرارتی متفاوت پیستون و جداره سیلندر، کار مشکلی خواهد بود که یکی از پیچیدگی‌های طراحی این ساختار محسوب می‌گردد [۳].



شکل ۱. شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا [۳]

موتور نوع بتا

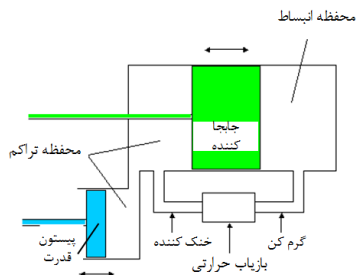
اختراع رابرت استرلینگ به‌عنوان اولین و قدیمی‌ترین موتور استرلینگ دارای ساختار بتا بوده است. در موتور نوع بتا، پیستون سمت گرم، حذف می‌شود و به جای آن، قطعه‌ای استوانه‌ای به نام جابه‌جاکننده در میان دو محفظه گرم و سرد قرار خواهد گرفت. در این حالت با توجه به حذف پیستون گرم، مشکل درزبندی اطراف پیستون از بین می‌رود [۴].



شکل ۲. شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا [۴]

موتور نوع گاما

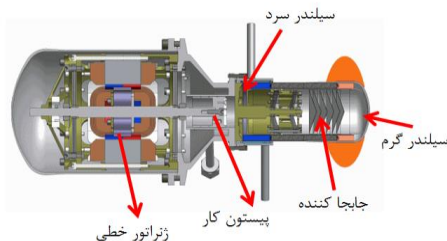
موتور استرلینگ نوع گاما از لحاظ ساختاری شبیه به موتور بتا است؛ با این تفاوت که پیستون در سیلندری جدا نسبت به جابه‌جاکننده قرار دارد. موتور استرلینگ گاما نسبت به نمونه‌های آلفا و بتا، نسبت تراکم کمتری دارد اما به دلیل این‌که تنها پیستون قدرت آن نیاز به آب‌بندی دارد و سیلندرها مجزا هستند، از لحاظ مکانیکی، ساده‌ترین آرایش را در میان سایر انواع موتورهای استرلینگ دارد [۴].



شکل ۳. شماتیک موتور استرلینگ نوع گاما [۴]

موتور نوع پیستون آزاد

این نوع از موتورها از حرکت رفت و برگشتی پیستون، تولید توان می‌کنند و در واقع نیازی به چرخ طیار و میل‌لنگ ندارند؛ به همین دلیل، مشکلات مربوط به بالانس و خرابی بلبرینگ یا پاتاقان را نیز ندارند. علاوه بر این، به دلیل حجم و وزن کمترشان نسبت به انواع دیگر، قابلیت نصب آن‌ها در مکان‌های مختلف مانند دیش خورشیدی، آسان‌تر است. به دلیل نبود چرخ طیار در موتورهای پیستون آزاد، به‌منظور برگشت پیستون، از یک فنر صفحه‌ای یا تیر نوسانی استفاده می‌کنند یا این‌که چند موتور پیستون آزاد را مطابق شکل ۴ به یکدیگر متصل می‌کنند [۵].



شکل ۴. شماتیک موتور استرلینگ نوع پیستون آزاد [۵]

در زمینه تحلیل و مدل‌سازی موتور استرلینگ، اشمیت [۶] اولین تحلیل ترمودینامیکی را انجام داد. در این مدل، دمای محفظه تراکم با سردکن و دمای محفظه انبساط با گرم‌کن برابر و ثابت در نظر گرفته و تحلیل هم‌دما ارائه شده است. اوریلی و برکوویچ [۳] نظریه آدیاباتیکی را کامل‌تر کردند. در این مدل، معادلات دیفرانسیل حاکم بر محفظه‌ها به‌صورت عددی با روش رانج کوتاه حل شده و به‌منظور پیش‌بینی حل عددی، تأثیرات افت فشار اصطکاکی جریان گاز در بازیاب، تأثیر بازیابی غیرآدیاباتیکی در بازیاب و تصحیح دمای گاز داخل گرم‌کن و سردکن‌ها در نظر گرفته و روشی به نام سیمپل ارائه شده است. فینکلشتاین [۷] محفظه‌های تراکم و انبساط را به‌صورت آدیاباتیکی در نظر گرفت. در این تحلیل، دمای گاز طی فرایند تراکم و انبساط، تغییر می‌کند و گرم‌کن و سردکن به‌صورت هم‌دما در نظر گرفته شد. پراکاش و همکاران [۸] تأثیر افزایش راندمان ناشی از استفاده از موتور استرلینگ در سیکل ترکیبی اتو و استرلینگ را بررسی کردند. موتور استرلینگ بار الکتریکی موردنیاز خودرویی موردبررسی را با استفاده از اختلاف دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد بین منابع گرم و سرد را تأمین می‌کند. این اختلاف دما از انرژی هدررفته توسط سیستم خنک‌کاری خودرو تأمین می‌شود و میزان آن ۹۵۰ وات است. در این طرح، موتور استرلینگ به‌جای تسمه موتور، دینام خودرو را به چرخش درمی‌آورد.

ضیاء بشر حق و محمودی [۹] مطالعاتی در زمینه موتور استرلینگ نوع بتا، انجام و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که با تغییر گاز عامل و استفاده از گاز هیدروژن به‌جای گاز هلیوم، میزان حرارت خروجی و توان خروجی موتور کاهش می‌یابد درحالی‌که راندمان موتور، افزایش پیدا می‌کند. در صورتی‌که توان حرارتی وارد شده به موتور زیاد باشد هلیوم، گزینه مناسبی خواهد بود. از دیگر نتایج این تحقیق این‌که جریان انرژی در بازیاب موتور استرلینگ، تقریباً ۵ برابر بیشتر از گرم‌کن و ۶ برابر بیشتر از خنک‌کن شده است. همچنین با افزایش قطر پیستون موتور استرلینگ، توان کاهش‌یافته درحالی‌که راندمان موتور استرلینگ افزایش پیدا کرده است.

والنتی و همکاران [۱۰] یک واحد تولید هم‌زمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ برای تولید توان الکتریکی در فشارهای کاری مختلف موتور به‌صورت آزمایشگاهی و عددی را ارزیابی کردند.

کرمی و صیادی [۱۱] به بهینه‌سازی ظرفیت سیستم تولید هم‌زمان سه‌گانه با موتور استرلینگ برای چهار اقلیم آب‌وهوایی مختلف ایران به کمک سه هدف، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌های کل سالانه پرداخته‌اند.

هوشنگ و همکاران [۱۲؛ ۱۳] در تحقیق خود به بهبود پارامترهای کنترل جابه‌جاکننده گاز در موتور استرلینگ خورشیدی به‌منظور افزایش راندمان و همچنین بهبود پارامترهای کنترل جابه‌جاکننده گاز شامل دامنه، فاز و فرکانس موتور استرلینگ پرداخته‌اند؛ به‌گونه‌ای که بازده حرارتی و توان تولیدی موتور افزایش می‌یابد. به‌منظور حصول اطمینان از محاسبات مدل ریاضی، آزمایشی بر موتور استرلینگ نوع گاما با استفاده از کد تحلیل ترمودینامیکی مرتبه سوم، طراحی و انجام گرفت و طی آن فشار مطلق سیال، زاویه میل‌لنگ و سرعت آن به‌صورت لحظه‌ای خوانش و ثبت گردیده است. همچنین توان تولیدی موتور با استفاده از یک ژنراتور اندازه‌گیری و نتایج مدل ریاضی در همان شرایط آزمایش با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و از عملکرد آن، اطمینان حاصل شد. میانگین خطای مدل‌سازی ریاضی و آزمایشی در حدود ۱۰ درصد نشان داده شد.

آمارلو و همکاران [۱۴] تحلیل ترمودینامیکی پارامترهای عملکردی ساختار جدید سه سیلندر موتور استرلینگ و مدل‌سازی آن را در نرم‌افزار تحلیلی صنعتی جی‌تی‌سوییت انجام دادند. نتایج تحلیل نشان داد که افزایش سرعت دورانی برای افزایش عملکرد موتور مناسب نبوده و بازده موتور را کاهش داده است.

دمیرچی و همکاران [۱۵] از یک موتور استرلینگ نوع گاما برای تولید هم‌زمان گرما و برق در مقیاس کوچک استفاده کرده و در فشارهای کمتر از ۱ مگا پاسکال توان خروجی موتور به روش آزمایشگاهی و با تحلیل اشمیت، مقایسه شده است.

چهارطاقی و شیخی [۱۶] مدل‌سازی هم‌زمان گرمایش و برق با محرک اولیه موتور استرلینگ بتا از دیدگاه مصرف سوخت را با تحلیل آدیباتیک غیرایده‌آل بررسی کردند.

جهانی کلدی و همکاران [۱۷] یک موتور استرلینگ برای تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما در منطقه مسکونی با آب‌وهوای متفاوت طراحی کردند. موتور مورد استفاده از نوع آلفا بوده و شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار جی‌تی‌سوییت انجام شده است. با توجه به نتایج، بازدهی ماکزیمم، بین محدوده ۷۹ تا ۸۸ درصد در شرایط مختلف آب و هوایی بود. سیستم طراحی شده منجر به کاهش آلودگی هوا از طریق کاهش CO_2 ، CO و NO_x شده و نشستی این سیستم در فشارهای پایین، مقدار کمتری را نشان داد. فرانسیسکو کالیس و همکاران [۱۸] استراتژی بهینه‌سازی از یک سیستم خنک‌کننده، حرارت و برق ترکیبی را برای یک موتور به‌صورت تحلیل عددی دقیق انجام دادند و متوجه شدند که ظرفیت بهینه سیستم، کمتر از طراحی واقعی شده است.

اربابی و همکاران [۱۹] عملکرد کلی یخچال را برای موتور حرارتی جفت استرلینگ را بررسی کرده و میزان کار مربوط به خنک‌کننده نهایی را با توجه به تأثیرات ساختمانی و پارامترهایی مثل نسبت دما برای موتور و تراکم آن بررسی کردند.

انصاری‌نصب و همکاران [۲۰] ترکیب موتور استرلینگ با پیل سوختی کربنات مذاب، توربین گاز را به‌منظور تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرما مطالعه و پارامترهای اساسی و تأثیرگذار بر سیستم از نظر اقتصادی-انرژی و همچنین بر هزینه‌های سیستم از طریق آنالیز حساسیت بررسی کرده و در نهایت، سه استراتژی برای حذف هزینه‌های زائد پیشنهاد داده که موجب بهبود عملکرد سیستم شده است.

دی دای و همکاران [۲۱] فرایند موتور استرلینگ را با استفاده از زمان محدود ترمودینامیک و با استفاده از فرضیه توزیع یکنواخت دما، تحلیل و تأثیر پارامترهای مختلف و محدودیت‌های آن را بررسی کردند.

کتولی و همکاران [۲۲] به شیبه‌سازی و ارزیابی تجربی یک واحد یخچال استرلینگ برای تبدیل انرژی الکتریکی-مکانیکی به انرژی سرمایشی را به‌صورت تجربی و تأثیرات فشار سیال و توان دینام برای سرمایش پرداختند.

حسن‌زاده و همکاران [۲۳] به بررسی تجربی موتور استرلینگ تکی نوع گاما برای تولید سرمایش با استفاده از گازهای مختلف پرداخته‌اند. نتایج آن با استفاده از سیال عامل هوا به دمای حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد و با گاز هلیوم به دمای حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسید. نتایج نشان داد که افزایش توان منبع تغذیه، فشار متوسط گاز، زمان روشن شدن منبع تغذیه و استفاده از سیال عامل سبک مانند هوا، هلیوم در تولید سرمایش مؤثر خواهد بود.

این تحقیق در ادامه کار مقاله [۲۳] که از موتور استرلینگ تکی نوع گاما و استفاده از منبع تغذیه به‌منظور تولید سرمایش نگارش شده است که در یک ساختار جدید به‌صورت تجربی و با استفاده از کوپل دو موتور استرلینگ نوع گاما ST500 و تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی برای تولید سرمایش توسط سیال عامل هلیوم در محدوده فشار متوسط منبع گرم موتور اول ۴ تا ۸ بار و محدوده فشار متوسط منبع سرد موتور دوم ۱ تا ۴ بار و محدوده دمایی موتور گرم استرلینگ ۴۸۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به سرمایش مؤثری در موتور سرد رسید. راه‌اندازی موتور استرلینگ اول با استفاده از احتراق منابع زیست‌توده به‌صورت آزمایشگاهی انجام و گرمای ناشی از احتراق مواد و ضایعات کشاورزی به موتور استرلینگ اول منتقل شد و موتور، شروع به کار کرد و موتور استرلینگ دوم را به حرکت درآورد و تولید سرمایش کرد. با افزایش انرژی حرارتی تا ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش فشار تغذیه سیال عامل موتور استرلینگ گرم تا ۸ بار و کاهش فشار تغذیه سیال موتور سرد تا ۱ بار می‌توان به سرمایش زیر صفر درجه سانتی‌گراد دست یافت. تولید سرمایش از منابع تجدیدپذیر علاوه بر تأثیرات زیست‌محیطی، آینده انرژی را نیز امن‌تر می‌سازد. تولید سرمایش با توجه به تحقیقات انجام‌شده روش فوق جدید بود و تابه‌حال انجام نشده و با خطای کمتر و دقت بیشتری، نتایج دقیق‌تری به‌دست آمد و در یک نمونه آزمایشگاهی موتور استرلینگ ST500 نوع گاما، برای کاربرد سرمایشی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی پیشنهاد می‌گردد.

به‌طور خلاصه، اهداف این تحقیق، طراحی و ساخت یک محفظه گرمایی با سوخت زیست‌توده برای منبع دمای بالا و تولید توان مکانیکی توسط موتور استرلینگ اول و در نهایت تولید سرمایش توسط موتور استرلینگ دوم بوده است. در انجام آزمایش‌ها مقادیر دما، بازده، توان، فشار در اثر دماهای مختلف در گرمایش و سرمایش موتور استرلینگ گاما ST500 با استفاده از دستگاه خوانشگر موتور آزما و نرم‌افزار آدام اندازه‌گیری شد و نتایج با تحقیقات قبلی، مقایسه و اعتبارسنجی براساس کد Nlog انجام شد.

کد Nlog

کد Nlog توسط برنامه متلب نوشته‌شده است و برای آنالیز ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می‌شود و یک کد آنالیز سیکل موتور استرلینگ است که از معادلات مرتبه سوم در آن استفاده شده است. این کد، گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می‌کند.

مشخصات هندسی تمام کانال‌های انتقال گاز، لوله‌ها و محفظه‌های انبساط و تراکم هندسه اتصالات بین بخش‌های متحرک موتور فشار اولیه موتور و دماهای اولیه در هر نقطه دمای دیواره مبدل حرارتی که با گذشت زمان، ثابت در نظر گرفته می‌شود. کد Nlog تمامی کانال‌ها و لوله‌های انتقال گاز در موتور را به حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌کند و پارامترهای دینامیکی و ترمودینامیکی برای هر کدام از حجم کنترل‌ها را به‌وسیله حل کردن معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی تعیین می‌کند. با استفاده از این ساختار می‌توان به‌طور مستقیم از گرمای ناشی از منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر، سرمایش تولید کرد. نتایج به‌دست‌آمده برای تولید سرمایش با استفاده از کد Nlog که پیش‌تر توسط نویسندگان در مقالات معتبر اعتبارسنجی‌شده، مقایسه شد [۱۲؛ ۱۳].

مدل‌سازی

در این تحقیق، از یک مدل دینامیکی ترمودینامیکی رده سوم استفاده می‌شود که به‌وسیله آن بتوان با تخمین متغیرهای حالت سیال عملکردی موتور، سرعت لحظه‌ای موتور را برحسب زمان پیش‌بینی کرد و نهایتاً بازده و توان

تولیدی موتور را تخمین زد. در این مدل دینامیکی - ترمودینامیکی، ابتدا محفظه‌های مختلف موتور استرلینگ، شامل گرم‌کن، خنک‌کن، بازیاب و ... به صورت حجم - کنترل‌هایی همراه با تبادل حرارت، کار و جرم با محیط خود و نیز با حجم - کنترل‌های مجاور خود در نظر گرفته می‌شود.

سطح انتقال حرارت، ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایت حرارتی در دو فرایند دریافت و دفع حرارت مؤثر هستند. ضریب هدایت حرارتی نسبت به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، بسیار بزرگ‌تر هستند و در نتیجه از مقاومت حرارتی ناشی از هدایت صرف‌نظر شد و تنها انتقال حرارت جابه‌جایی به‌عنوان عامل محدودکننده برای جذب و دفع حرارت در نظر گرفته شد. در خصوص بازیاب نیز از بررسی محدودیت هدایت حرارتی بازیاب صرف‌نظر می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر افت فشار ناشی از حرکت سیال، فشار سیال در تمامی نقاط هر حجم - کنترل به صورت یکسان و متفاوت از بخش‌های مجاور در نظر گرفته می‌شود. با در اختیار داشتن هندسه، مشخصات دینامیکی و دمای دیواره‌های منابع حرارتی گرم و سرد برای موتور موردنظر، ضریب افت فشار سیال و ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی از طریق روابط تجربی محاسبه می‌شوند.

روابط ترمودینامیکی

اصول ترمودینامیکی برای همه ساختارهای موتور استرلینگ، یکسان است و تفاوت اساسی در نحوه قرارگیری اجزای مختلف آن‌ها در کنار یکدیگر است [۱].

$$q_{in} = RT_h \ln r = P_1 V_1 \ln r$$

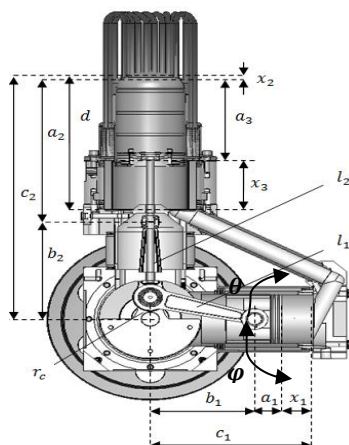
$$w = R(T_h - T_c) \ln r \quad (۱)$$

$$\eta = \frac{w}{q_{in}} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)$$

در روابط بالا q_{in} میزان حرارت دریافتی و w کار تولیدی برحسب ژول (J)، در یک چرخه ایدآل استرلینگ است. R ثابت گاز برحسب ژول بر کیلوگرم درجه کلوین ($J/Kg^\circ K$) است. T_h دمای منبع گرم و T_c دمای منبع سرد برحسب کلوین (K) است. r نسبت تراکم موتور است که عبارت است از نسبت بیشترین حجم سیستم به کمترین حجم آن، P_1 و V_1 به ترتیب فشار و حجم برحسب پاسکال و مترمکعب هستند [۲۴].

روابط دینامیکی حاکم بر مدل

در این تحقیق از یک الگوی دینامیکی ترمودینامیکی که در گذشته برای حالت گرمایش موتور استرلینگ نوشته و اعتبارسنجی شده بود استفاده شد [۱۲]. یکی از مزیت‌های استفاده از موتور استرلینگ، قابلیت معکوس شدن سیکل کاری است؛ بنابراین می‌توان با تغییر الگوی کد، از آن برای تولید سرمایه‌گذاری استفاده کرد. اعتبارسنجی کد سرمایه‌گذاری و تولید سرمایه‌گذاری به صورت آزمایشگاهی با استفاده از دو موتور استرلینگ ST500 از نوع گاما در شرکت تحقیق و توسعه ایران خودرو (شرکت ایپکو) برای اولین بار به صورت تجربی انجام و نتایج تحلیل و بررسی شد. پارامترهای سینماتیک موتور موردنظر در شکل ۵ نشان داده شده است:



شکل ۵. پارامترهای سینماتیک موتور ST500 [۱۲]

پارامترهای φ , c_1 , c_2 , d , l_1 , l_2 , r_c و a_1 تا a_3 پارامترهای ساختاری موتور هستند و مقدار ثابتی دارند. معادلات ۲ و ۳ این پارامترها را به b_1 و b_2 (فاصله عمودی گزن پین در هر لحظه تا راستای میل‌لنگ) مربوط می‌سازند.

$$l_1^2 = r_c^2 + b_1^2 + 2r_c b_1 \cos(\theta) \quad (2)$$

$$l_2^2 = r_c^2 + b_2^2 + 2r_c b_2 \cos(\theta + \varphi) \quad (3)$$

با حل معادلات بالا برای b_1 و b_2 آن‌ها به‌عنوان توابعی از زاویه لنگ بیان می‌شوند که در معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$b_1 = (r_c^2 \cos^2 \theta + l_1^2 - r_c^2)^{\frac{1}{2}} - r_c \cos \theta \quad (4)$$

$$b_2 = \left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} + r_c \cos(\varphi + \theta) \quad (5)$$

به این ترتیب x_1 (طول محفظه تراکم)، x_2 (طول محفظه گرم) و x_3 (طول محفظه سرد) برحسب زاویه میل‌لنگ به‌دست می‌آیند که در معادلات ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

$$x_1 = c_1 - a_1 - b_1 \quad (6)$$

$$x_2 = c_2 - a_2 - b_2 \quad (7)$$

$$x_3 = d - a_3 - x_2 \quad (8)$$

مشتقات x_1 و x_2 نسبت به زاویه میل‌لنگ نیز در روابط ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این روابط در بخش محاسبه روابط دینامیک مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

$$\frac{dx_1}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\theta)}{2(l_1^2 - r_c^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta) \quad (9)$$

$$\frac{dx_2}{d\theta} = \frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2\left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \quad (10)$$

مشتقات زمانی اول x_1 و x_2 نیز که نشان‌دهنده سرعت حرکت اجزای متحرک موتور است با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ و مشتقات دوم آن‌ها که نشان‌دهنده شتاب آن‌ها است از روابط ۱۳ و ۱۴ مطابق قوانین مشتق زنجیری محاسبه می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_1}{d\theta} \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = \dot{\theta} \frac{dx_2}{d\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{d^2x_1}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_1}{d\theta} \quad (13)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{d^2x_2}{dt^2} = \dot{\theta} \frac{d\dot{x}_2}{d\theta} \quad (14)$$

روابط سینتیک مدل

ابتدا باید معادله دیفرانسیلی بیابیم که با حل آن، سرعت و زاویه لحظه‌ای میل‌لنگ به دست آید و به این منظور از روش دینامیک لاگرانژ استفاده می‌شود. فرم کلی معادلات لاگرانژ در معادلات ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است. مجموع انرژی‌های جنبشی تمامی اجزای متحرک موتور در متغیر T_θ و مجموع انرژی‌های پتانسیل اجزا در متغیر V_θ قرار خواهد گرفت. لاگرانژین با تفاضل انرژی جنبشی کل از انرژی پتانسیل کل به دست می‌آید و در نهایت با قرار دادن لاگرانژین در معادله اصلی لاگرانژ (معادله ۱۸) و مشتق‌گیری‌های لازم، معادله دیفرانسیل دینامیکی موتور استرلینگ حاصل می‌شود. متغیر I در معادله لاگرانژ نشان‌دهنده مقدار گشتاور معادل وارد شده به میل‌لنگ موتور خواهد بود درحالی‌که θ نشان‌دهنده زاویه میل‌لنگ است.

$$T_\theta = \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 \quad (15)$$

$$V_{\theta} = \sum_{i=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (16)$$

$$L_{\theta} = T_{\theta} - V_{\theta} = \sum_{i=n_1} \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 + \sum_{i=n_r} \frac{1}{2} J_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=n_s} \frac{1}{2} k_i x_i^2 \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\theta}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \theta} = I_c \quad (18)$$

با توجه به تعداد متغیرهای در نظر گرفته‌شده، لاگرانژین به صورت معادله ۱۹ به دست می‌آید.

$$L_{\theta} = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}^2 \quad (19)$$

با جای‌گذاری روابط ۱۱ و ۱۲ در معادله ۱۹، معادله ۲۰ حاصل می‌شود.

$$L_{\theta} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 (m_1 \left(\frac{dx_1}{d\theta} \right)^2 + m_2 \left(\frac{dx_2}{d\theta} \right)^2 + J_c) \quad (20)$$

مشتقات محاسبه‌شده در معادلات ۹ و ۱۰ در معادله ۲۰ قرار داده شد و لاگرانژین برحسب زاویه میل‌لنگ و سرعت زاویه‌ای میل‌لنگ مطابق معادله ۲۱ حاصل می‌شود.

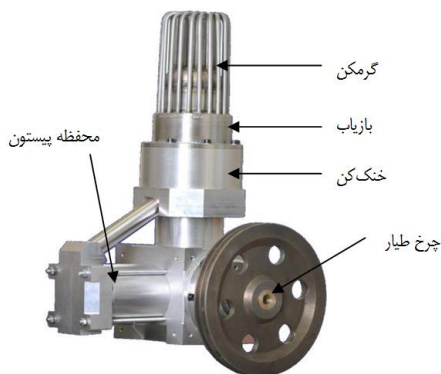
$$L_{\theta} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left(m_1 \left(\frac{r_c^2 \sin(2\theta)}{2(l_1^2 - r_c^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\theta) \right)^2 + m_2 \left(\frac{r_c^2 \sin(2\varphi + 2\theta)}{2 \left(\frac{r_c^2 \cos(2\varphi + 2\theta)}{2} + l_2^2 - \frac{r_c^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} - r_c \sin(\varphi + \theta) \right)^2 + J \right) \quad (21)$$

بنابراین چنانچه مشتقات معادله لاگرانژ روی لاگرانژین اعمال گردد، یک واحد به درجه مشتق در معادلات اضافه‌شده و بخش سمت چپ معادله لاگرانژ به فرم تابعی از زاویه، سرعت و شتاب میل‌لنگ به فرم معادله ۲۲ خواهد شد.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\theta}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{\theta}}{\partial \theta} = f(\dot{\theta}, \theta, \theta) \quad (22)$$

موتور استرلینگ مورد استفاده در این تحقیق

مطالعات انجام شده در این تحقیق، بر موتور ST-500 موجود در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو) انجام شده است که مشخصات فنی این موتور در جدول ۱ بیان شده است. نمای خارجی موتور در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل بخش‌های اصلی موتور شامل گرم‌کن، خنک‌کن، بازیاب، چرخ طیار و محفظه پیستون نام‌گذاری شده‌اند [۱۲].



شکل ۶. نمای خارجی موتور استرلینگ ST500 [۱۲]

جدول ۱. مشخصات موتور استرلینگ ST500

مشخصه فنی	مقادیر (واحد)
توان خروجی	۵۰۰ (وات)
بازده حرارتی	۸.۵ (درصد)
فشار شارژ استاندارد	۸ (بار)
سیال عامل	هوا، هلیوم
فرکانس کاری	۱۴ (هرتز)
ماده خنک کننده	آب
سوخت	گاز طبیعی، بایومس، انرژی خورشیدی
دامنه حرکت پیستون	۰.۷۵ (متر)
دامنه حرکت چاب‌جاکننده گاز	۰.۷۵ (متر)
زاویه فاز	۹۰ (درجه)
نوع گرم کن	لوله‌ای ۲۰* (۶ میلی‌متر)
نوع خنک کن	کانالی ۱۴۴* (۱۳ میلی‌متر مربع)
جنس بازیاب	فولاد ضدزنگ متخلخل ۰.۹۶
دمای جذب حرارت	۳۵۰-۴۲۰ (درجه سانتی‌گراد)
دمای دفع حرارت	۳۰-۵۰ (درجه سانتی‌گراد)
حجم بیشینه	۱۰*۳*۱.۷۹ (مترمکعب)
حجم کمینه	۱۰*۳*۱.۳۷ (مترمکعب)
نسبت تراکم	۱.۳:۱

برخی از قطعات موتور استرلینگ مثل گرم کن، بازیاب و خنک کن را می‌توان در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده کرد.



شکل ۷. گرمکن موتور استرلینگ به همراه بازیاب



شکل ۸. خنک کن موتور استرلینگ و مجرای عبور سیال

پارامترهای تأثیرگذار در آزمایش

- ۱- مشخصات هندسی کانال‌های انتقال گاز، لوله‌ها و محفظه‌های انبساط و تراکم
- ۲- هندسه اتصالات بین بخش‌های متحرک موتور
- ۳- فشار اولیه موتور و دماهای اولیه در هر نقطه از موتور
- ۴- دمای دیواره مبدل حرارتی
- ۵- گاز مورد استفاده در منبع گرم و سرد
- ۶- جنس بازیاب.

جدول ۲. مشخصات بازیاب مورد استفاده در موتور استرلینگ [۲۵]

مشخصات	مس	آهن خالص	کربن استیل	آلومینیوم T6-۲۰۲۴
چگالی (kgm^{-3})	۸۹۲۰	۷۸۷۰	۷۸۵۴	۲۷۷۰
ظرفیت گرمایی ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۳۸۵	۴۴۷	۴۳۴	۸۷۵
ضریب انتقال حرارت هدایتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۳۹۰	۸۰.۲	۶۰.۵	۱۷۷

اندازه‌گیری میزان تلفات تسمه قبل از انجام آزمایش

بهمنظور دقت در آزمایش‌ها باید میزان تلفات موجود در تسمه اندازه‌گیری شود. تسمه برای انتقال توان از موتور گرم به موتور خنک‌کننده استفاده شده است و اگر میزان تلفات آن از یک حدی بیشتر باشد خطای آزمایش زیاد می‌شود و نتایج قابل استناد نیستند. به همین دلیل تلفات موجود در تسمه نباید از حد مشخص بیشتر باشد. مشخصات چرخ طیار موتور گرم، دینام و موتور استرلینگ به همراه دوران آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات دینام و دو موتور استرلینگ

مشخصات دینام		مشخصات موتور خنک‌کننده		مشخصات موتور گرمکن	
۵۰.۵	(d)	۲۵۸	(d ₂)	۲۸۰	(d ₁)
mm		Mm		mm	
۱۳۵۰	rpm(n)	۲۸۶	(n ₂)	۲۵۰	(n ₁)
		rpm		rpm	
۶۸۱۷۵	nd	۷۳۷۸۸	n ₂ d ₂	۷۰۰۰	n ₁ d ₁

همان‌طور که از نتایج تجربی در جدول ۳ مشخص است درصد خطای تسمه کمتر از ۹ درصد می‌باشد و بنابراین می‌توان گفت که تسمه موجود، از انتقال قدرت خوبی برخوردار است [۲۳].

مراحل آزمایش

آزمایش‌ها در سه مرحله زیر صورت گرفت:

- ۱- بررسی نتایج موتور استرلینگ تکی برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه سیال عامل هوا در توان ۵۲۰ وات و فشار کاری ۳ بار و در زمان ۱۰ دقیقه
- ۲- بررسی نتایج موتور استرلینگ تکی برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه با گاز هلیوم در توان ۴۲۰ وات و فشار کاری ۶ بار و در زمان ۱۰ دقیقه و اعتبارسنجی با تحقیقات قبلی
- ۳- بررسی تجربی موتور استرلینگ کوپل برای تولید سرمایش با دریافت انرژی گرمایی از منبع حرارتی برای توان موتور استرلینگ اول و تولید سرمایش با موتور استرلینگ دوم با استفاده از سیال عامل هلیوم و اعتبارسنجی با تحقیقات قبلی.

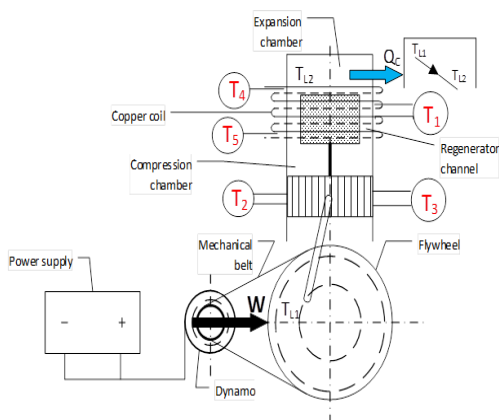
آزمایش برای موتور خنک‌کننده با استفاده از گاز هوا

شکل ۹ طرح‌واره موتور استرلینگ گاما برای تولید سرمایش است. در شکل ۱۰ دینام به یک منبع تغذیه (ژنراتور) متصل شد و برای راه‌اندازی اولیه موتور به کار رفت. دینام نیز با استفاده از یک تسمه به چرخ طیار متصل گردید. وقتی منبع تغذیه روشن می‌شود، دینام به چرخش درمی‌آید و توان به وسیله تسمه به چرخ طیار انتقال می‌یابد. در این حالت با توجه به سیکل استرلینگ، بخش گرم‌کن دستگاه سرد می‌شود و دما به پس از چند دقیقه کوتاه به زیر صفر درجه می‌رسد. برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت بخش سرد، از لوله‌های مسی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت، ابتدا آب در داخل لوله‌های مسی توسط یک پمپ جریان می‌یابد. آب خروجی، سپس در داخل یک محفظه عایق جمع‌آوری شد. با اندازه‌گیری دبی آب خروجی از لوله‌های مسی و همچنین اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی لوله‌های مسی، میزان انتقال حرارت در بخش گرم‌کن دستگاه مطابق فرمول ۲۳ به دست آمد.

$$Q = m_i c_p \Delta T$$

(۲۳)

$$\Delta T = T_{c,in} - T_{c,out} \quad (24)$$



شکل ۹. طرح‌واره موتور استرلینگ نوع گاما ST500



شکل ۱۰. منبع تغذیه برای تولید توان

نمای واقعی موتور استرلینگ گاما با عایق ایجاد شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. موتور استرلینگ گاما نوع ST500 با عایق جهت تولید سرمایش

در ابتدا راه‌اندازی موتور استرلینگ با استفاده از یک منبع تغذیه در شرایط آزمایشگاهی در توان، فشار و دماهای مختلفی انجام شد. برای دقت در آزمایش‌ها دمای محیط، دبی تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی ثابت و برابر در نظر گرفته شد و برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه دینام در هر آزمایش ثابت شد. به‌منظور بررسی و مقایسه دقیق‌تر آزمایش‌ها برای چند بازه زمانی در فشار، توان و گازهای مختلف انجام و در هر مرحله دمای سرمایش تولیدی محاسبه شد.

جدول ۴ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور استرلینگ به‌منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هوا است. در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۳ بار، توان دینام به‌طور ثابت ۵۲۰/۸ وات در نظر گرفته شد. آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ در مدت‌زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفته‌اند. برای هر چهار آزمایش دبی تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شد. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شد. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به‌ترتیب برابر ۳۱ ولت و ۱۷ آمپر بود و دمای محیط در هر چهار آزمایش ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود. دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T_4, T_5) و دمای سرمایش تولیدی (T_1) خوانش‌گر دما اندازه‌گیری شد. در نهایت با افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای T_1 قسمت سرد به حدود ۲۳- درجه سانتی‌گراد رسید. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ تکی گاما از نوع ST500 مشاهده می‌شود.

جدول ۴. شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش [۲۳]

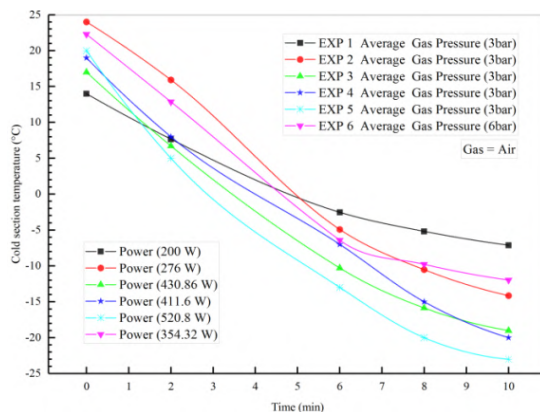
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۶	۸	۱۰
فشار متوسط گاز (بار)	۳	۳	۳	۳
ولتاژ مصرفی (ولت)	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱
جریان مصرفی (آمپر)	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷
توان مصرفی (وات)	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸	۵۲۰.۸
دمای اولیه بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
دمای نهایی بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۵	-۱۳	-۲۰	-۲۳
سیال عامل	هوا	هوا	هوا	هوا



شکل ۱۲. خروجی تولید سرمایش با استفاده از موتور استرلینگ گاما از نوع ST500



شکل ۱۳. نمایش تولید سرمایش در خروجی موتور استرلینگ گاما با عایق



شکل ۱۴. دیاگرام دما- زمان برای آزمایش‌های انجام‌شده با گاز هوا در فشارهای مختلف برای موتور استرلینگ در حالت سرمایش [۲۳]

شکل ۱۴ نشان‌دهنده نمودار دما- زمان برای شش آزمایش انجام‌شده در فشارهای ۳ و ۶ بار و توان‌های ۲۰۰ تا ۵۲۰.۸ وات است. همان‌طور که نشان داده شده است هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود دمای بخش گرم‌کن دستگاه کاهش می‌یابد و در نهایت پس از گذشت مدت‌زمان مشخص و افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به‌صورت شکل ۱۲ خواهد شد و دمای قسمت سرد T_1 به حدود 23°C - درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

آزمایش برای موتور خنک‌کننده با استفاده از گاز هلیوم

جدول ۵ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای چهار آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور استرلینگ به‌صورت تولید سرمایش با استفاده از گاز هلیوم است. در این آزمایش‌ها فشار سیال عامل هوا ۶ بار، توان دینام به‌طور ثابت ۴۲۰ وات در نظر گرفته شد. آزمایش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در مدت‌زمان ۲ تا ۱۰ دقیقه صورت گرفت. برای هر چهار آزمایش دبی، تخلیه آب خروجی از لوله‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شد. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت شد. ولتاژ و جریان منبع تغذیه به‌ترتیب برابر با ۲۰ ولت و ۲۱ آمپر بود و دمای محیط در هر چهار آزمایش، ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود. با توجه به شکل ۹ دمای قسمت‌های ورودی و خروجی لوله‌های مسی در بالا و پایین (T_4 و T_5) و دمای سرمایش تولیدی (T_1) توسط خوانشگر دما اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت، دمای T_1 به حدود 21°C - درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

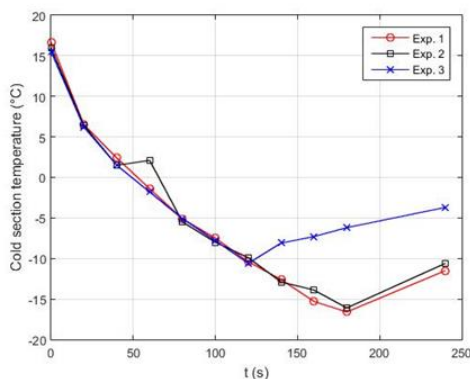
جدول ۵. شرایط مختلف آزمایشگاهی برای تولید سرمایش [۲۳]

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۶	۸	۱۰
فشار متوسط گاز (بار)	۶	۶	۶	۶
ولتاژ مصرفی (ولت)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
جریان مصرفی (آمپر)	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
توان مصرفی (وات)	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰
دمای اولیه بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
دمای نهایی بخش کولر (درجه سانتی‌گراد)	۶.۲۳	-۱۱.۷۴	-۱۷.۳۳	-۲۰.۹۶
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم

در جدول ۶ خصوصیات سیال‌های عامل مورد استفاده در شرایط دمایی صفر درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. گازهایی که لزجت کمتری دارند در شرایط عملکردی مشابه، دارای توان خروجی بیشتری خواهند بود.

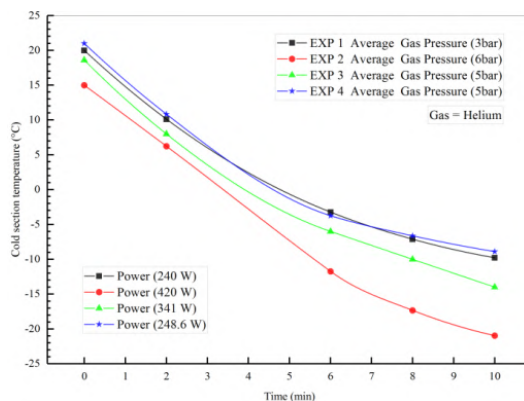
جدول ۶. پارامترهای ویسکوزیته قانون ساترلند برای گازها [۲۶]

نوع گاز	دما (کلوین)	ویسکوزیته (نیوتن ثانیه بر مترمربع)
هوا		1.716×10^{-5}
آرگون		2.125×10^{-5}
نیتروژن	۲۷۳	1.664×10^{-5}
هیدروژن		8.411×10^{-6}
هلیوم		1.864×10^{-6}



شکل ۱۵. دباگرام دما-زمان برای آزمایش‌های انجام شده با گاز هلیوم [۲۲]

شکل ۱۵ آزمایش در فشار ۳ بار و توان ۴۴۱.۱۴ تا ۴۷۶ وات و با استفاده از موتور استرلینگ گاما و سیال عامل هلیوم به سرمایش دست یافته است و در این تحقیق، هدف، بررسی و تکرارپذیری آزمایش‌ها و اعتبارسنجی آنها می‌باشد.



شکل ۱۶. دیاگرام دما- زمان برای آزمایش‌های انجام‌شده با گاز هلیوم در فشارهای مختلف و حالت موتور خنک‌کننده [۲۳]

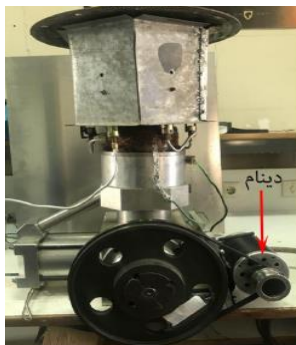
شکل ۱۶ نشان‌دهنده نمودار دما- زمان برای چهار آزمایش انجام‌شده است. همان‌طور که نشان داده شده هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود، دمای بخش گرم کن دستگاه کاهش می‌یابد تا زمانی که موتور منبع تغذیه، خاموش شود. در نهایت، پس از گذشت مدت‌زمان مشخص، افزایش توان دینام و فشار گاز، دمای بخش سرد موتور استرلینگ به صورت شکل ۱۱ خواهد شد و دمای قسمت سرد (T_1) به حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد رسیده است که با مقاله [۲۲] اعتبارسنجی شد و با توجه به آزمایش‌های بیشتر، نتایج و نمودارهای دقیق‌تری نیز به دست آمد.



شکل ۱۷. مخزن هلیوم برای فشار منبع سیال عامل

اندازه‌گیری میزان توان مصرفی موتور گرم به صورت تکی با استفاده از مشعل گرمایی ابتدا موتور گرم به صورت تکی راه‌اندازی شد تا میزان توان مصرفی آن هنگامی که از شعله گرمایی استفاده می‌شود اندازه‌گیری شود. راه‌اندازی این موتور به این صورت است که ابتدا با استفاده از منبع تغذیه موتور، راه‌اندازی اولیه شد و پس از آن، موتور استرلینگ شروع به دوران کرد و با گذشت زمان، دوران آن بیشتر می‌شود. در این حالت، میزان جریان و ولتاژ مصرفی موتور به ترتیب ۴۶ آمپر و ۳۱ ولت بود؛ بنابراین توان مصرفی موتور گرم تکی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$P_{\text{Hot motor}} = VI = 31 \text{ (V)} \times 4.6 \text{ (A)} = 142.6 \text{ W} \quad (25)$$



شکل ۱۸. دینام در موتور استرلینگ و محفظه حرارتی

توان ورودی سیستم هنگام استفاده از مشعل بایوگاز

جدول ۷. اجزای بایوگاز مورد استفاده در این پژوهش

نام ماده تشکیل دهنده	درصد ماده تشکیل دهنده بایوگاز (%)
CH ₄	۹۸.۲
H ₂ S	۰/۲
O ₃	۰/۷
N ₂	۰/۸
سایر گازهای مخلوط	۰/۱

همان طور که از جدول ۷ مشخص است قسمت عمده بایوگاز مورد استفاده از گاز متان تشکیل شده و تا دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد می رسد و در این دما دو گاز CH₄ و H₂S به دمای اشتعال خود می رسند و حرارت موجود در آن ها آزاد می شود. شایان ذکر است که دمای اشتعال ۱ هیدروژن سولفید برابر ۲۳۲ درجه سانتی گراد است [۲۷]. دمای اشتعال سایر گازهای موجود در بایوگاز، بالاتر از دمای عملکردی در این پژوهش است و معادله واکنش سوختن متان به صورت معادله ۲۶ می باشد [۲۸].



ارزش حرارتی سوختن متان برابر ۳۴.۸۳ مگاژول بر مترمکعب است. دبی گاز شهری مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از دبی سنج برابر ۲۵ لیتر بر دقیقه به دست آمده است؛ بنابراین طبق محاسبات می توان توان ورودی به سیستم را با استفاده از کل گرمای حاصل از احتراق گاز شهری به دست آورد.

$$Q = m * C_v = 25 \text{ lit/min} * 34.83 \text{ MJ/m}^3 = 14.5 \text{ KJ/s} = 14.5 \text{ KW} \quad (27)$$



شکل ۱۹. دستگاه (دبی‌سنج) اندازه‌گیری دبی گاز شهری

معادله واکنش سوختن هیدروژن سولفید نیز به صورت رابطه ۲۸ می‌باشد.

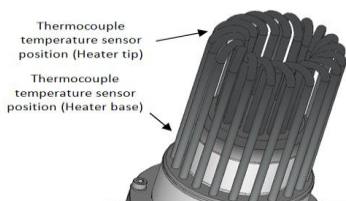


ارزش حرارتی سوختن هیدروژن سولفید برابر $36/503$ مگاژول بر مترمکعب است. با توجه به این که این گاز حدود $0/2$ درصد از بایوگاز را تشکیل می‌دهد؛ می‌توان گفت توان ورودی ناشی از سوختن این گاز به شرح رابطه ۲۹ است.

$$25 \text{ l/min} \times 1 \text{ min } 60 \text{ s} \times 1 \text{ m}^3 1000 \text{ l} \times 36.503 \text{ MJ m}^3 \times 0.002 = 3.04 \times 10^{-5} \text{ KW} = 0.0304 \text{ W} \quad (29)$$

لذا می‌توان گفت که مقدار ورودی ناشی از سوختن گاز هیدروژن سولفید در مقایسه با سوختن گاز متان، بسیار ناچیز است. دلیل آن نیز عمدتاً به دلیل کم بودن مقدار این گاز در بایوگاز است؛ لذا می‌توان با تقریب بسیار خوبی بایوگاز را برابر متان در نظر گرفت.

مشعل گازی، وظیفه حفظ دمای بخش گرم موتور و آب با دمای تثبیت شده وظیفه حفظ دمای بخش سرد موتور را بر عهده دارد. دبی گاز و آب به صورت دستی تنظیم شده تا شرایط لازم برای عملکرد موتور در حالت پایدار فراهم شود. به دلیل ثبات کافی متغیرها در این حالت، استفاده از کنترل کننده خودکار جهت تنظیم دبی گاز و آب لازم به نظر نمی‌رسد. حس گرهای دمای از نوع ترموکوپل به منظور قرائت دمای آب خنک کننده ورودی و خروجی از موتور در شکل ۲۰ و دمای دو نقطه از لوله‌های گرم کن موتور استفاده شده است.



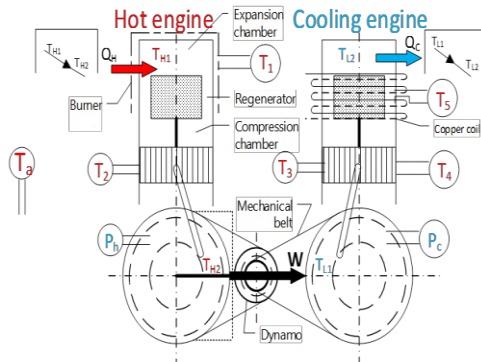
شکل ۲۰. محل نصب حس گرهای دما بر پایه و نوک گرم کن موتور [۱۲]

مرحله سوم شرایط آزمایش کولپینگ موتور استرلینگ برای تولید سرمایش با استفاده از منبع تغذیه و گاز هلیوم

در شکل ۲۱ نمای کولپینگ موتور استرلینگ نشان داده شده است. سمت چپ، موتور گرم نام گذاری شده که با دریافت انرژی گرمایی از منبع حرارتی مثل زیست توده، کار می‌کند، در سمت راست نیز موتور استرلینگ دیگری مشاهده می‌شود که موتور سرد نام گذاری شده است. موتور سرد با استفاده از کار دریافتی موتور گرم، تولید سرمایش می‌کند. این

سیستم از دو موتور استرلینگ تشکیل شده است که موتور اول برای راهاندازی اولیه، از یک منبع تغذیه و دینام استفاده می‌کند و به چرخ طیار موتور اول متصل است و پس از چند ثانیه از راهاندازی سیستم می‌توان منبع تغذیه را قطع کرد تا سیستم، به کار خود ادامه دهد. پس از راهاندازی موتور اول، موتور دوم نیز توسط تسمه به حرکت درمی‌آید. با چرخش موتور دوم، طبق سیکل موتور استرلینگ، تولید سرمایش می‌کند. موتور استرلینگ اول، موتور استرلینگ گرم و موتور استرلینگ دوم، موتور استرلینگ خنک‌کننده نام‌گذاری شده‌اند.

روش انجام کار نیز بدین‌صورت است که دو موتور به یکدیگر کوپل می‌شوند و مطابق شکل از یک عایق مخصوص برای عایق‌کاری و جلوگیری از هدررفت انرژی سرمایشی در قسمت گرم‌کن موتور خنک‌کننده استفاده می‌شود. هرکدام از دو موتور با گاز هلیوم پر می‌شوند. در این مرحله دقت می‌شود که فشار گاز موتور گرم از فشار گاز موتور خنک‌کننده، بیشتر باشد تا راهاندازی سیستم، راحت‌تر صورت بگیرد چون فشار متوسط گاز منبع گرم و منبع سرد، از عوامل مهم آزمایش است. یکی از ویژگی‌های موتور استرلینگ، نیاز به پیش‌گرم کردن آن است؛ لذا در این تحقیق، از گاز شهری برای گرم کردن موتور استفاده می‌شود و با استفاده از یک مشعل آن را گرم می‌کنند تا موتور گرم استرلینگ به مدت حدود ۵ دقیقه پیش‌گرم شود.



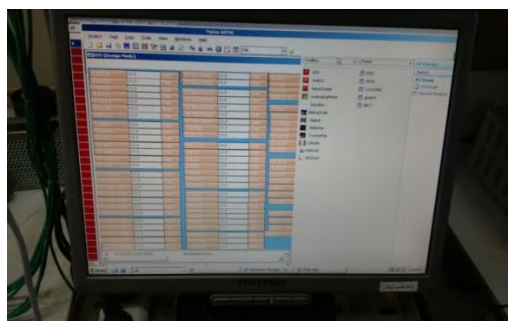
شکل ۲۱. نمای کوپلینگ موتور استرلینگ (گرم و سرد) ST500 برای تولید سرمایش



شکل ۲۲. نمای واقعی کوپلینگ موتور استرلینگ ST500 (گرم و سرد) برای تولید سرمایش



شکل ۲۳. مشعل گرمایی موتور استرلینگ و سنسور اندازه‌گیری دمای موتور گرم



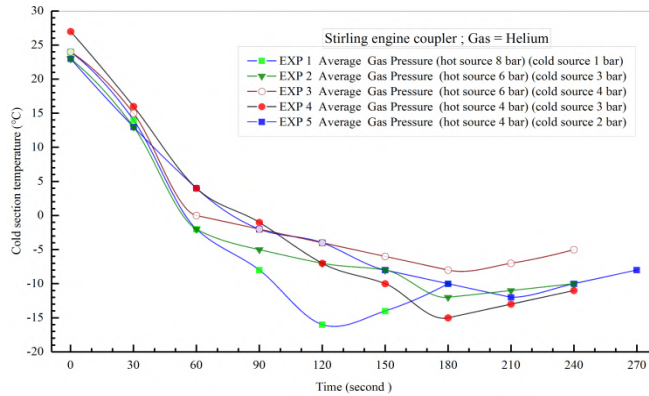
شکل ۲۴. دستگاه خوانش گر خروجی موتور و نرم‌افزار آدام

نتایج مربوط به آزمایش حالت کوپلینگ دو موتور برای تولید سرمایش

جدول ۸ نشان‌دهنده شرایط اولیه برای پنج آزمایش مختلف صورت‌گرفته روی موتور کوپل استرلینگ به‌منظور تولید سرمایش با استفاده از گاز هلیوم است. در این آزمایش‌ها در بهترین حالت، فشار سیال عامل هلیوم منبع گرم ۸ بار و فشار متوسط منبع سرد ۱ بار است. آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در مدت‌زمان ۲ تا ۴ دقیقه صورت گرفته‌اند. برای هر پنج آزمایش دبی، تخلیه آب خروجی از کوپل‌های مسی، ثابت و برابر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، توان ورودی توسط منبع تغذیه ثابت است. دمای محیط در هر پنج آزمایش، ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. دمای سرمایش تولیدی (T_5) توسط خوانش گر دما اندازه‌گیری شده است.

جدول ۸. شرایط مختلف آزمایشگاهی موتور استرلینگ کوپل برای تولید سرمایش

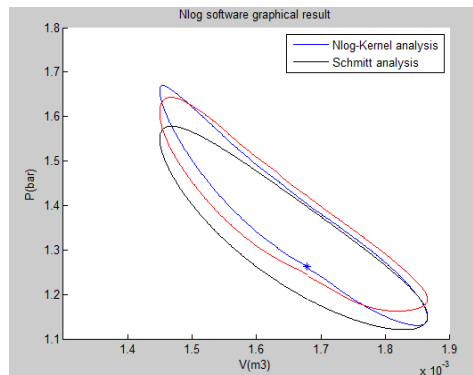
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
زمان روشن بودن منبع تغذیه (دقیقه)	۲	۳	۳	۳	۴
فشار متوسط گاز منبع گرم (بار)	۸	۶	۶	۴	۴
فشار متوسط گاز منبع سرد (بار)	۱	۳	۴	۳	۲
دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	۲۸	۲۶	۲۷	۳۰	۲۵
دمای نهایی موتور گرم (درجه سانتی‌گراد)	۵۸۰	۵۲۰	۴۹۰	۵۱۰	۴۸۰
دمای اولیه موتور سرد (درجه سانتی‌گراد)	۲۴	۲۳	۲۴	۲۷	۲۳
دمای نهایی موتور سرد (درجه سانتی‌گراد)	-۱۶	-۱۲	-۸	-۱۵	-۱۲
سیال عامل	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم	هلیوم



شکل ۲۵. دیاگرام دما- زمان برای پنج آزمایش انجام شده با گاز هلیوم در فشارهای مختلف و حالت کوپل موتور استرلینگ برای تولید سرمایه

شکل ۲۵ نشان دهنده نمودار دما- زمان برای پنج آزمایش انجام شده است. همان طور که نشان داده شده، هنگامی که فشار منبع گرم و سرد تغییر کند؛ دمای بخش گرم کن، افزایش و دمای بخش سرد دستگاه، کاهش می یابد و سرمایه، تولید می شود. در نهایت با استفاده از یک ساختار جدید تجربی و با استفاده از دو موتور استرلینگ در دما و فشارهای مختلف با استفاده از سوخت بایومس در افزایش فشار متوسط منبع گرم تا ۸ بار و کاهش فشار متوسط منبع سرد تا ۱ بار دمای قسمت سرد (T_5) به حدود ۱۶- درجه سانتی گراد رسیده است.

نتایج مربوط به آزمایش حالت کوپلینگ دو موتور برای تولید سرمایه با استفاده از کد Nlog همان طور که بیان شد کد Nlog توسط برنامه متلب نوشته شده است و برای آنالیز ترمودینامیکی موتور استرلینگ استفاده می شود. این کد، یک کد آنالیز سیکل موتور استرلینگ است که از معادلات درجه سوم در آن استفاده شده است. این کد، گرمای خروجی و توان تولیدی موتور استرلینگ را محاسبه می کند. با استفاده از این ساختار می توان به طور مستقیم از گرمای ناشی از منابع تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر، سرمایه تولید کرد. نتایج به دست آمده برای تولید سرمایه با استفاده از کد Nlog که پیش تر توسط نویسندگان در مقالات معتبر اعتبارسنجی شده، مقایسه شده اند [۱۲].



شکل ۲۶. نمودار P-V

همان‌طور که در نمودار P-V مشاهده می‌شود با توجه به خروجی Nlog نمودار مشکی‌رنگ نمودار برای حالت اشمیت و نمودار آبی‌رنگ نمودار کولر (موتور استرلینگ دوم) و نمودار قرمز رنگ نمودار گرم‌کن (موتور استرلینگ اول) است و انطباق بسیار خوبی دارد. استفاده از دو موتور استرلینگ به صورت جفت، بازده بسیار خوبی چه به صورت حرارتی و چه به صورت الکتریکی دارد؛ بنابراین استفاده از موتور استرلینگ برای تولید سرمایه‌های می‌تواند گزینه بسیار مناسبی باشد. برای مثال می‌توان از موتور استرلینگ برای تولید سرما در بخش خانگی و صنعتی استفاده کرد. از مزیت‌های موتورهای استرلینگ در حالت سرمایه‌های می‌توان به بی‌سروصدا بودن، بدون لرزش بودن، توانایی ساخت در مقیاس‌های پایین، قابلیت اطمینان بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری پایین اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو موتور استرلینگ و کوپل بررسی شدند و از یک منبع حرارتی برای منبع دما بالای موتور استرلینگ اول استفاده شد. کار خروجی موتور استرلینگ اول، موتور استرلینگ دوم را به حرکت درآورد تا موتور استرلینگ دوم، سرما را ایجاد کند. بهینه‌سازی و تولید سرمایه با استفاده از سوخت زیست‌توده به صورت آزمایشگاهی با استفاده از دو موتور استرلینگ ST500 از نوع گاما در مرکز تحقیق و توسعه ایران خودرو (شرکت ایپکو) برای اولین بار انجام و نتایج، تحلیل و بررسی شد. از نتایج این تحقیق می‌توان برای توسعه موتورهای استرلینگ در دنیا و توسعه پایدار که از مسائل مهم امروزه بوده استفاده کرد تا با استفاده از روش آزمایشگاهی و کوپلینگ موتور استرلینگ و همچنین استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر پرداخته شده تا در نهایت از موتورهای استرلینگ برای کاربرد سرمایه‌های در فشارها، دماها و دوره‌های مختلف استفاده شود. در این تحقیق با استفاده از یک ساختار جدید کوپلینگ موتور استرلینگ گاما و با طراحی و ساخت یک محفظه گرمایی که با سوخت زیست‌توده کار کرده می‌توان مکانیکی توسط موتور استرلینگ اول را تولید کرد تا در فشار متوسط، گاز موتور گرم ۸ بار، فشار متوسط موتور سرد ۱ بار و دمای نهایی موتور گرم استرلینگ اول در ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد به سرمایه‌های در موتور سرد استرلینگ دوم در دمای ۱۶- درجه سانتی‌گراد رسید. با یک طراحی دقیق، انتخاب و افزایش فشار سیال عامل در موتور استرلینگ گرم و کاهش فشار متوسط گاز در منبع سرد و بالا بودن توان حرارتی موتور استرلینگ گرم، شاهد کاهش دما در موتور استرلینگ سرد بوده و به یک یخچال تبدیل می‌شود. در موتورهای استرلینگ می‌توان گازهای سنگین‌تر را نیز مورد استفاده قرار داد اما این گازها به دلیل مواردی نسبت به گازهای سبک‌تری چون هلیوم و هیدروژن، از راندمان کمتری برخوردارند. در موتورهای مدل کوچک‌تر هم از هوا استفاده می‌شود ولی هیچ نوع گاز دیگری تا این سطح، جز در موارد آزمایشی، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

از لحاظ تئوری، استفاده از یک گاز سبک مانند هیدروژن یا هلیوم به‌عنوان سیال عامل به علت ویسکوزیته کم و ضریب انتقال حرارت بالا توصیه می‌شود. اگرچه وزن مولکولی پایین، به مفهوم بالا رفتن نرخ نشتی سیال از موتور است و در نتیجه افت فشار، کاهش بازده افزایش هزینه‌های (شارژ مجدد سیال) را خواهد داشت؛ دمای بالای مبدل حرارتی می‌تواند موجب اکسید شدن و خوردگی قطعات گردد. به‌طور خلاصه می‌توان گازی را به‌عنوان سیال عامل مطلوب انتخاب کرد که علاوه بر سبک بودن، ضریب انتقال حرارت بالا، ضریب لزجت پایین، امکان نشت کم و نداشتن خواص اکسیدکنندگی است. محققان علاوه بر گازهای یادشده به‌عنوان سیال عامل، از گازهایی همچون دی‌اکسید کربن، بخار آب و مواد مرکب شیمیایی استفاده کرده‌اند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند. همچنین از آقایان مهندس مسعود علیزاده، مهندس سیامک علیزاده‌نیا، مهندس حامد بصیر و مهندس

مهرعلیزاده که در انجام آزمایش‌ها و تجهیزات همکاری کردند و اطلاعات ارزشمندی را در اختیارمان قرار دادند کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- [1] Kongtragool, B., & Wongwises, S. (2003). A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(2), 131-154. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00053-9)
- [2] Wikipedia. (2017, December 31). Application. <https://en.wikipedia.org/wiki/Application>
- [3] Urieli, I., & Berchowitz, D. M. (1984). *Stirling Cycle Engine Analysis*. Taylor & Francis. <https://books.google.com/books?id=d9pSAAAAMAAJ>
- [4] Walker, G. (1973). *Stirling-cycle Machines*. Clarendon Press. <https://books.google.com/books?id=eNpSAAAAMAAJ>
- [5] Thimsen, D. (2002, October). *Stirling engine assessment*. E. I. Electric Power Research Institute, Inc. <https://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>
- [6] Schmidt, G. (1871). The theory of Lehmann's calorimetric machine. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 15(1), 98-112.
- [7] Finkelstein, T. (1994, August 7-12). *Insights into the thermodynamics of Stirling cycle machines* International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), Monterey, CA, USA, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1994-3951>
- [8] Prakash, S., & Guruvayurappan, A. (2011, July 6-8). Using stirling engine to increase the efficiency of an IC engine. The World Congress on Engineering 2011, London, UK,
- [9] Ziabasharhagh, M., & Mahmoodi, M. (2012). Numerical solution of beta-type Stirling engine by optimizing heat regenerator for increasing output power and efficiency. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(2), 1395-1406. [https://www.textroad.com/pdf/JBASR/J.%20Basic.%20Appl.%20Sci.%20Res.,%202\(2\)1395-1406,%202012.pdf](https://www.textroad.com/pdf/JBASR/J.%20Basic.%20Appl.%20Sci.%20Res.,%202(2)1395-1406,%202012.pdf)
- [10] Valenti, G., Silva, P., Fergnani, N., Campanari, S., Ravida, A., Di Marcoberardino, G., & Macchi, E. (2015). Experimental and numerical study of a micro-cogeneration Stirling unit under diverse conditions of the working fluid. *Applied Energy*, 160, 920-929. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.112>
- [11] Karami, R., & Sayyaadi, H. (2015). Optimal sizing of Stirling-CCHP systems for residential buildings at diverse climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*, 89, 377-393. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.022>
- [12] Hooshang, M., Askari Moghadam, R., Alizadeh Nia, S., & Masouleh, M. T. (2015). Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks. *Renewable Energy*, 74, 855-866. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.012>
- [13] Hooshang, M., Askari Moghadam, R., & AlizadehNia, S. (2016). Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine. *Renewable Energy*, 86, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.018>
- [14] Amarloo, A., Keshavarz, A., Batooei, A., & Alizade Nia, S. A. N. (2017). Thermodynamic analysis of performance parameter of a novel 3 cylinder Stirling engine configuration. *Modares Mechanical Engineering*, 16(10), 448-458. <http://me.modares.ac.ir/article-15-3190-en.html>
- [15] Damirchi, H., Najafi, G., Alizadehnia, S., Mamat, R., Nor Azwadi, C. S., Azmi, W. H., & Noor, M. M. (2016). Micro Combined Heat and Power to provide heat and electrical

- power using biomass and Gamma-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1460-1469. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.118>
- [16] Chahartaghi, M., & Sheykhi, M. (2018). Modeling of combined heating and power system driven by Stirling engine from the perspective of the fuel consumption and pollution emission. *Modares Mechanical Engineering*, 17(10), 301-311. <http://mm.e.modares.ac.ir/article-15-3349-en.html>
- [17] Jahani Kaldehi, B. J., Keshavarz, A., Safaei Pirooz, A. A., Batooei, A., & Ebrahimi, M. (2017). Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates. *Journal of Cleaner Production*, 154, 502-516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.006>
- [18] Calise, F., d Accadia, M. D., Libertini, L., Quiriti, E., Vanoli, R., & Vicidomini, M. (2017). Optimal operating strategies of combined cooling, heating and power systems: A case study for an engine manufacturing facility. *Energy Conversion and Management*, 149, 1066-1084. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.06.028>
- [19] Erbay, L. B., Ozturk, M. M., & Doğan, B. (2017). Overall performance of the duplex Stirling refrigerator. *Energy Conversion and Management*, 133, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.003>
- [20] Ansarinasab, H., & Mehrpooya, M. (2018). Investigation of a combined molten carbonate fuel cell, gas turbine and Stirling engine combined cooling heating and power (CCHP) process by exergy cost sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management*, 165, 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.067>
- [21] Dai, D. D., Yuan, F., Long, R., Liu, Z. C., & Liu, W. (2018). Imperfect regeneration analysis of Stirling engine caused by temperature differences in regenerator. *Energy Conversion and Management*, 158, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.032>
- [22] Katooli, M. H., Askari Moghadam, R., & Hajinezhad, A. (2019). Simulation and experimental evaluation of Stirling refrigerator for converting electrical/mechanical energy to cold energy. *Energy Conversion and Management*, 184, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.014>
- [23] Hassanzadeh, E., aliehyaei, M., Jafari Mehrabadi, S., Mohammadi, A., & Mazaheri, H. (2020). Experimental investigation on the gamma model Stirling engine for cooling production using various gases. *The Journal of Engine Research*, 59(59), 17-28. <http://engineerresearch.ir/article-1-734-en.html>
- [24] Boles, M. A., & Cengel, Y. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com/books?id=Ao95NgEACAAJ>
- [25] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=vvyIoXEywMoC>
- [26] White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill. <https://books.google.com/books?id=fl6wPwAACAAJ>
- [27] Wikipedia. (2022, February 19). Hydrogen sulfide. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_sulfide
- [28] Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2014). *Fundamentals of Thermodynamics*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=VGVlrgEACAAJ>



Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Networks

Seyed Reza Salim Bahrami^{1*}, Reza Shakeri², Behzad Habibi Hajikolai³

¹PhD, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam Mohammad Baqer, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

²Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Shahid Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran.

³M. Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Imam Mohammad Baqer, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.09.2020

Revised: 06.23.2020

Accepted: 01.17.2021

Keyword:

Recycled concrete
neural network
urban concrete tables
recycling
green concrete

***Corresponding Author:**

Seyed Reza Salim Bahrami

Email:

salimbahrami@semnan.ac.ir

ABSTRACT

The increasing growth of construction and use of concrete tables in urban and inter-city roads have led to the idea of using recycled concrete in urban concrete tables. Therefore, in this research, an attempt was made to investigate the mechanical and economic parameters of using recycled concrete as concrete of urban concrete tables. For this purpose, three types of mixing schemes of natural concrete as control concrete, recycled concrete and recycled fiber concrete including 100% recycled fine-grained and 50% coarse-grained recycled concrete of 7 and 28 days old were tested. Then, the obtained results were compared with national and international regulations and standards in the field of concrete for use in urban tables. In addition, in this paper, the estimation of 28-day compressive strength with the help of neural networks was investigated. The findings showed that recycled concrete and recycled fiber concrete with higher mixing design have higher compressive strength. Furthermore, an almost equal correlation coefficient was observed in the outputs of the 28-day compressive strength test obtained from the artificial neural network and the results of 124 laboratory samples are in good agreement with the results obtained from the neural network.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

ارائه طرح اختلاط پیشنهادی بتن بازیافتی مورد استفاده در جداول بتنی شهری با استفاده از شبکه عصبی

سیدرضا سلیم بهرامی^{۱*}، رضا شاکری^۲، بهزاد حبیبی حاجیکلائی^۳

- ۱- دکتری، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی شهید منتظری مشهد، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

رشد روزافزون ساخت و استفاده از جداول بتنی در معابر و راه‌های شهری و بین شهری موجب شد تا ایده استفاده از بتن بازیافتی در جداول بتنی شهری پیشنهاد گردد. بنابراین، در این پژوهش تلاش شده است تا پارامترهای مکانیکی و اقتصادی استفاده از بتن بازیافتی به‌عنوان بتن جداول بتنی شهری بررسی شود. برای این منظور سه نوع طرح اختلاط، شامل بتن طبیعی به‌عنوان بتن شاهد و بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی شامل ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی و ۵۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی برای سنین ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار گرفت. در ادامه، نتایج با آیین‌نامه و استانداردهای ملی و بین‌المللی در زمینه بتن برای استفاده در جداول شهری مقایسه شد. همچنین در این مقاله تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه به کمک شبکه‌های عصبی بررسی شده است. نتایج نشان داد که بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی با طرح اختلاط پیشنهادی، مقاومت فشاری بالاتری دارد. همچنین ضریب همبستگی تقریباً برابری در خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از شبکه عصبی مصنوعی مشاهده شده است و نتایج ۱۲۴ نمونه آزمایشگاهی با نتایج شبکه عصبی انطباق مناسب دارند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

کلید واژگان:

بتن بازیافتی
شبکه عصبی
جداول بتنی شهری
بازیافت
بتن سبز

*نویسنده مسئول: سیدرضا سلیم بهرامی

پست الکترونیکی:

salimbahrami@semnan.ac.ir



مقدمه

رشد شهرنشینی و تولید انبوه مسکن و استفاده از بتن در نوسازی و بهسازی بافت‌های فرسوده، منجر به تولید حجم انبوهی از زباله‌های ساختمانی شده است. طبق گزارش‌هایی که میر^۱ سالانه منتشر کرده است بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن در جهان تولید و مصرف می‌شود که برای تهیه این حجم از بتن در سال، به ترتیب در حدود ۰/۹، ۰/۶ و ۵ میلیارد تن سیمان پرتلند، آب آشامیدنی و سنگدانه نیاز است [۱]. از سوی دیگر در کشورهای صنعتی، بیشترین حجم از زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد [۲]. در اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود [۳] اما آمارها در ایران نشان می‌دهد اغلب ساختمان‌هایی که قبل از دهه ۵۰ ساخته شده است، در دست تخریب بودند که بخشی از آن شامل سازه‌های بتنی است [۴].

انباشت روزافزون این حجم از نخاله‌های ساختمانی، در طی زمان مشکلات زیان‌باری در منظر شهری و محیط‌زیست حاشیه شهرها و انتقال و انتشار آلودگی آب و هوا در شهرها به‌وجود آورد. از سوی دیگر، کشور ما معادن مناسب برای تهیه مصالح اولیه ساخت بتن را دارد اما استفاده و تکیه بر آن در هدف‌های دور، خطر آفرین و زیان‌آور خواهد بود. بنابراین، محققان برای حل این موضوع و استفاده بهینه از مصالح بازیافتی و نخاله‌های ساختمانی با عنوان بتن بازیافتی راهکاری ارائه کردند. بازیافت مواد زاید حاصل از تخریب ساختمان به‌عنوان سنگدانه بازیافتی در تولید بتن می‌تواند راه‌حل مناسبی برای حل این مشکل باشد [۵-۸].

نتایج تحقیقات مقیمی [۹] و همکاران در سال ۲۰۱۱ و چوی^۲ [۱۰] و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان داد که سنگدانه بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت مکانیکی و دوام کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارد. همچنین مطالعات عقیلبی لطف و رمضانیان‌پور [۴] در سال ۲۰۱۸ نشان داد که جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی، منجر به افت مقاومت‌های مکانیکی و همچنین افزایش درصد جذب آب بتن می‌شود. در مجموع ماسه بازیافتی بتنی روی رفتار مکانیکی بتن بازیافتی نسبت به بتن بازیافتی بتنی اثر منفی بیشتری دارد.

نتایج وگی^۳ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۳ نشان داد که مقدار کاهش یا افزایش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، بسته به نسبت آب به سیمان، جنس و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها و درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بستگی دارد. آکاش^۴ و همکاران [۱۲] نیز با بررسی مشخصات مکانیکی بتن بازیافتی دریافتند که در نسبت‌های پایین آب به سیمان، مقاومت بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی کاهش می‌یابد. همچنین رادونجانین^۵ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ به این نتیجه رسیدند که استفاده از سنگدانه‌های مرطوب با سطح خشک به علت خلل‌و‌فرج موجود در این گونه از سنگدانه‌ها، باعث نفوذ آب به درون آن‌ها و عمل‌آوری بهتر بتن می‌شود. برای جبران کاهش مقاومت بتن بازیافتی راهکارهای گوناگونی پیشنهاد شده است. از جمله این پیشنهادها، به افزودن خاکستر بادی، میکروسلیس، افزایش مقدار سیمان و استفاده از انواع الیاف می‌توان اشاره کرد [۱۴-۱۶].

ملیسویو^۶ و همکاران [۱۷] یک تحلیل مقایسه‌ای در مورد نتایج تجربی خواص بتن تازه و سخت‌شده با نسبت‌های جایگزینی متفاوت سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های درشت بازیافتی انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که بدون در نظر گرفتن نسبت جایگزینی، بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی، کارایی رضایت‌بخشی دارد.

¹ Meyer

² Choi

³ Wagih

⁴ Rao akash

⁵ Radonjanin

⁶ Malešev

جین و گارج^۱ در سال ۲۰۱۵ با بررسی سنگدانه‌های بازیافتی و استفاده از آن در بلوک‌های سنگ‌فرشی به این نتیجه رسیدند که عملکرد فشاری و خمشی بلوک‌های ساخته‌شده از سنگدانه بازیافتی به نسبت سنگدانه طبیعی، بالاتر است [۱۸].

هدف اصلی این پژوهش، معرفی و دستیابی به بهینه‌ترین شرایط استفاده و به‌کارگیری مصالح بازیافتی و بهینه‌کردن هزینه‌های ساخت بتن در تولید جداول بتنی شهری و حفظ محیط زیست و نگهداشت ذخایر سنگی کشور است. ارزیابی میزان تأثیر هریک از پارامترهای بتن سخت‌شده از قبیل خواص مکانیکی و جذب آب در نتیجه به‌کارگیری مقادیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و ارائه طرح اختلاط مناسب بتن بازیافتی برای ساخت جداول بتنی شهری، هدف دیگری است که در این پژوهش دنبال می‌شود.

در این پژوهش از سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۰ درصد و ۵۰ درصد به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه طبیعی به همراه ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی در نظر گرفته و از مواد دورریز ظروف یک‌بارمصرف به‌عنوان الیاف پلیاستیکی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی با درصد حجمی ۱ درصد استفاده شده است. به منظور بررسی اثر سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن از دانه‌بندی یکسان برای مصالح طبیعی و بازیافتی استفاده و پس از ساخت بتن و عمل‌آوری، نمونه‌های مقاومت فشاری بر نمونه‌ها با سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. در پایان، به بررسی نقش سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف پلیاستیکی بر عملکرد بتن بازیافتی و مقایسه آن با استانداردها و آیین‌نامه‌های موجود برای استفاده در جداول بتنی شهری پرداخته شده است.

هدف دیگری که در این پژوهش دنبال می‌شود آن است که براساس یک پایگاه داده، برگرفته از نتایج آزمایش‌های معتبر در زمینه مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن بازیافتی و طبیعی و به کمک مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارتباطی بین داده‌های ورودی (وزن مصالحی که در طرح اختلاط بتن بازیافتی و طبیعی استفاده شده است) و داده هدف (مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بازیافتی و طبیعی) برقرار و مقاومت فشاری ۲۸ روزه را متناسب با وزن مصالح ورودی پیش‌بینی کرد.

با توجه به دستورالعمل تهیه طرح جامع مدیریت پسماند که توسط سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور تدوین شده است، مسئولیت برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری پروژه‌های بازیافت نخاله‌ها بر عهده شهرداری‌ها، دهیاری‌ها و بخش‌داری‌ها است که از طریق برگزاری مناقصه به شرکت‌های پیمانکار این حوزه واگذار می‌شود. بنابراین، نهادهای مذکور و همچنین سازمان حفاظت محیط زیست و شرکت‌های خصوصی پیمانکار می‌توانند از نتایج این مطالعه، بهره‌برداري کنند. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش می‌تواند برای تدوین اولین آیین‌نامه کاربرد بتن‌های بازیافتی برای کاربردهای غیرسازه‌ای از جمله جداول بتنی شهری در ایران آغاز مناسبی باشد.

مشخصات فنی مصالح مصرفی

مقاومت مشخصه بتن برای ساخت جداول بتنی شهری مطابق با آیین‌نامه مشخصات فنی و مقاطع همسان جداول و انهار بتنی شهری [۱۹] باید شرایط زیر را تأمین کند:

- مقاومت فشاری میانگین نمونه ۲۸ روزه جداول بتنی براساس روش آزمون استاندارد ملی ایران نباید کمتر از ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نظیر نمونه مکعبی مغزه حاصل از جداول بتنی برای نمونه منفرد باید بیش از ۳۰ مگاپاسکال باشد.

همچنین پیشنهاد مشخصات فنی و مقاطع همسان جداول و انهار بتنی شهری [۱۹] برای عیار سیمان در بتن مصرفی حداقل برابر ۴۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و حداکثر نسبت آب به سیمان با احتساب رطوبت سنگدانه‌ها ۵۰ درصد است.

^۱ Neeraj Jain and Mridul Garg

مطابق مواردی که در بالا بیان شد، در این پژوهش دو نمونه بتن شامل بتن طبیعی (شاهد) و بتن بازیافتی در دو سن ۷ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲، تولید کارخانه جوین با توده ویژه ۳/۱ گرم بر سانتی مترمکعب و سطح ویژه ۳۸۴۰ گرم بر سانتی مترمربع است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان نشان داده شده است. عیار سیمان ۴۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

درصد حضور در سیمان	ترکیبات شیمیایی
۲۰/۷۲	% SiO ₂
۶۳/۱	%CaO
۴/۹۲	%Al ₂ O ₃
۳/۶۸	%Fe ₂ O ₃
۳/۴۶	%Mgo
۲/۸۲	%SO ₃

آب مصرفی برای تولید بتن مطابق با الزامات استاندارد ASTM D 1129 [۲۰]، آب آشامیدنی شهر مشهد می‌باشد. همچنین در این پژوهش، سنگدانه مصرفی طبیعی از ماسه طبیعی رودخانه‌ای و شن طبیعی شکسته با بزرگ‌ترین اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است.

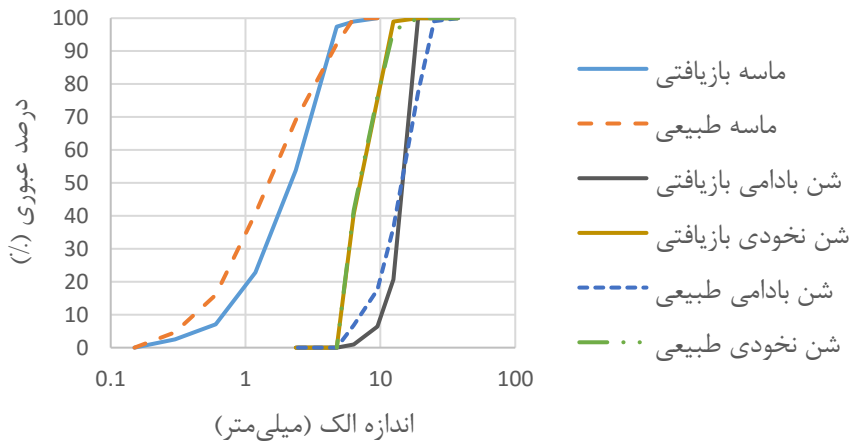
عوامل متعددی بر کیفیت مصالح بازیافتی تولیدی تأثیر دارد که می‌توان به طرح و شیوه ساخت، نوع تخریب، شرایط اقلیمی و نوع کاربری اشاره کرد. یکی از منابع پیشنهادی برای دریافت بتن مستعمل شده مناسب برای تهیه بتن بازیافتی، مراکز آزمایشگاه مقاومت مصالح هستند. در این مراکز آزمایشگاهی بسیاری از بتن‌های آزمایش شده موجود هستند که کاربری مجدد برای صاحبان آزمایشگاه مقاومت مصالح خواهند داشت. بنابراین، در این پژوهش از بتن‌های آزمایش شده با مقاومت‌های متفاوت استفاده شده است. خرد کردن بتن‌های بازیافتی برای تهیه سنگدانه در دو سطح ریزدانه و درشت‌دانه به دو صورت مکانیکی (دستگاه سنگ شکن فکی) و دستی (پتک، چکش، پیستون دستی و قلم) انجام می‌شود.

نکته بااهمیت درمورد میزان کوبش، آن است که با توجه به اینکه کوبش بتن مستعمل باید تا زمانی ادامه یابد که منجر به جدایی کامل یا ۹۰ درصدی سیمان چسبیده به سنگدانه شود اما مشاهده می‌شود که سنگدانه‌های بتن مستعمل، در حین کوبش همراه با سیمان چسبیده، خرد می‌شوند و تبدیل به سنگدانه‌های تیز گوشه می‌گردند. از این‌رو، در حین کوبش باید دقت کرد تا حد تعادل بین سنگدانه تیز گوشه و گرد گوشه در ترکیب دانه‌بندی رعایت شود.

در این پژوهش مطابق شکل ۱، بتن بازیافتی به صورت کوبش دستی خرد شده است و دانه‌بندی آن مطابق با آزمایش‌های مربوط به مصالح ریزدانه (استاندارد ایران با شماره ۴۹۷۷ [۲۱] و ASTM C136/C136M-14 [۲۲]) و درشت‌دانه به دو دسته نخودی و بادامی (استاندارد ایران با شماره ۴۹۷۷ [۲۱] و ASTM C136/C136M-14 [۲۲]) انجام شد. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی ارائه شده است. مطابق شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی با طبیعی انطباق خوبی دارند.



شکل ۱. خرد شدن بتن بازیافتی به عنوان سنگدانه بازیافتی



جدول ۲ مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه گزارش شده است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، درصد جذب آب بیشتری دارند. همچنین وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. مطابق جدول ۲ درصد شکستگی سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه به مراتب بیشتر از سنگدانه‌های درشت‌دانه طبیعی هستند که حاکی از کیفیت و مقاومت مکانیکی پایین این نوع از سنگدانه است.

جدول ۲. مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی

مشخصات فنی	شن بادامی بازیافتی	شن نخودی بازیافتی	ماسه بازیافتی	شن بادامی طبیعی	شن نخودی طبیعی	ماسه طبیعی
درصد جذب آب (%)	۲/۹۹	۳/۵	۷/۴۳	۲/۰۶	۱/۵	۲/۶
وزن مخصوص (kg/m ³)	۲/۴۹	۲/۳۸	۱/۵۹	۲/۵۹	۲/۶۶	۱/۴۸
درصد شکستگی (%)	بیشتر از ۹۰	بیشتر از ۹۰	-	۵۸/۵۲	۵۱/۸۲	-

طرح اختلاط پیشنهادی

برای رسیدن به مقاومت مشخصه مطلوب برای استفاده در جدول‌های بتنی شهری و با توجه به مطالعات گذشته [۲۴-۲۸] و نقش تأثیرگذار درشت‌دانه بازیافتی به نسبت ریزدانه بازیافتی در عملکرد مقاومتی بتن بازیافتی، طرح اختلاط پیشنهادی براساس میزان تغییر در حجم مصالح درشت‌دانه بازیافتی تنظیم می‌شود. بنا بر این، در این پژوهش علاوه بر نمونه بتنی طبیعی (شاهد)، نمونه‌های بتن بازیافتی با حضور ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی (ماسه) و ۵۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی (شن نخودی و شن بادامی) در نظر گرفته شده است. از طرفی با افزایش میزان سنگدانه بازیافتی، مقاومت بتن کاهش می‌یابد [۱۵؛ ۲۹]. از این‌رو، در نمونه دیگر برای افزایش مقاومت بتن بازیافتی، نمونه با ترکیباتی که در بالا بیان شد را به همراه ۱ درصد الیاف پلیاستیکی از مواد دورریز پلیاستیکی مطابق شکل ۳، با طول و عرض به ترتیب ۵۰ و ۵ میلی‌متر تهیه می‌شود. در این مطالعه طرح اختلاط برای نمونه‌های بتن طبیعی، بتن بازیافتی (۱۰۰ درصد ریزدانه+۵۰ درصد درشت‌دانه) و بتن الیافی بازیافتی (۱۰۰ درصد ریزدانه+۵۰ درصد درشت‌دانه+۱ درصد الیاف پلیاستیکی) با دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ به ترتیب با کدهای NC-0.4، RC-0.4، FRC-0.4، NC-0.45، RC-0.45، FRC-0.45 در نظر گرفته خواهد شد. جدول ۳ مشخصات طرح اختلاط نمونه‌های بتن طبیعی، بازیافتی و الیافی بازیافتی نشان داده شده است. آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM C143 [۳۰] مطابق شکل ۴ انجام و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. مواد دورریز پلیاستیکی برای استفاده در بتن بازیافتی

جدول ۳. مشخصات طرح‌های اختلاط بتن طبیعی، بازیافتی و الیافی بازیافتی

ردیف	نام طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	ماسه طبیعی (Kg/m ³)	شن نخودی طبیعی (Kg/m ³)	شن بادامی طبیعی (Kg/m ³)	ماسه بازیافتی (Kg/m ³)	شن نخودی بازیافتی (Kg/m ³)	شن بادامی بازیافتی (Kg/m ³)	اسلامپ (cm)
۱	NC-0.4	۴۰۰	۱۸۴/۷۸	۴۷۰/۸۷	۵۱۳/۴۸	۳۳۳/۰۴	۰	۰	۰	۱۴
۲	NC-0.45	۴۰۰	۲۰۴/۳۴	۴۵۶/۵۲	۴۹۷/۸۳	۳۲۳/۰۴	۰	۰	۰	۱۵/۵
۳	RC-0.4	۴۰۰	۱۸۲	۰	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳۱۶	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۴/۵
۴	RC-0.45	۴۰۰	۲۰۸	۰	۲۴۹	۱۶۱/۵	۴۸۷	۲۴۹	۱۶۱/۵	۱/۵
۵	FRC-0.4	۴۰۰	۱۸۲	۰	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳۱۶	۲۵۶/۶۶	۱۶۶/۶۶	۳/۵
۶	FRC-0.45	۴۰۰	۲۰۸	۰	۲۴۹	۱۶۱/۵	۴۸۷	۲۴۹	۱۶۱/۵	۱



شکل ۴. آزمایش تعیین روانی به روش اسلامپ

ساخت آزمون‌ها و روش اجرا

برای تأمین روانی بتن از یک نوع فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیک اتر استفاده شده است. به دلیل درصد بالای جذب آب در سنگ‌دانه‌های بازیافتی، اختلاط بتن به صورت پیش‌اشباع‌سازی صورت گرفته است. در پژوهشی که بر روی ناحیه انتقال^۱ در بتن‌های بازیافتی انجام شد، حاکی از ضعف عملکرد در ناحیه انتقال در سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی اشباع با سطح خشک است [۳۱]. از سوی دیگر، کاربرد سنگ‌دانه‌های بازیافتی کاملاً خشک نیز به دلیل جذب سریع آب آزاد در بتن، منجر به افت شدید کارایی می‌شود [۳۲]. بنابراین، در این مطالعه سنگ‌دانه‌های بازیافتی با درصد رطوبت ۸۰ الی ۹۰ درصد استفاده شده است. از این‌رو، سنگ‌دانه‌های بازیافتی قبل از اختلاط، به مدت ۵ ساعت اشباع، سپس با همان آب در طرح اختلاط استفاده شدند. جهت ساخت بتن بازیافتی همانند بتن طبیعی، ابتدا مصالح سنگی (ریزدانه و درشت‌دانه) را به مدت یک دقیقه در دستگاه مخلوط‌کن ۱۰۰ لیتری مخلوط، سپس سیمان و آب به طرح اختلاط اضافه می‌شوند. بعد از ۲۴ ساعت، نمونه‌های بتنی از قالب (مکعبی، ۱۰ × ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر) خارج می‌شود و در حوضچه‌های آب-آهک تا رسیدن به سن آزمایش، در حوضچه‌های آب عمل‌آوری می‌گردند. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در هر سن ۳ نمونه مدنظر است.

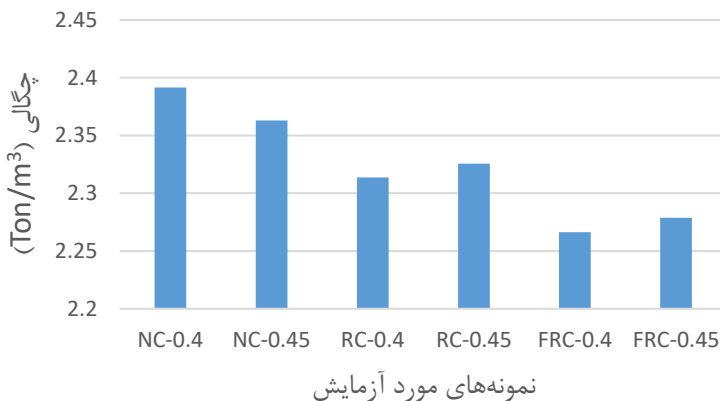
^۱ Interfacial transition zone

نتایج و بررسی

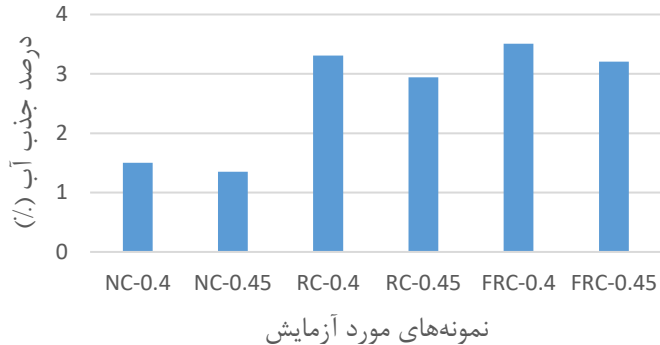
نتایج آزمایش‌های چگالی و جذب آب

آزمایش تعیین چگالی و درصد جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C 642 [۳۳] روی سه نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در سن ۲۸ روزه انجام شد. میانگین نتایج انجام آزمایش‌های چگالی و جذب آب در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. مطابق شکل ۵ نتایج چگالی نمونه‌های مورد آزمایش حاکی از آن است که چگالی بتن بازیافتی نسبت به بتن شاهد کمتر است و در بین بتن‌های بازیافتی نیز نظم خاصی در میزان کاهش یا افزایش دیده نمی‌شود. کمترین چگالی در بین نمونه‌ها مربوط به نمونه بتن الیافی بازیافتی با نسبت آب به سیمان $0.4/0.4$ (FRC-0.4) است. چگالی بتن بازیافتی مورد آزمایش نسبت به بتن طبیعی به‌طور میانگین $2/48$ درصد کاهش یافته است و چگالی بتن الیافی بازیافتی مورد آزمایش نسبت به بتن طبیعی به‌طور میانگین $4/61$ کاهش می‌یابد. علت کاهش چگالی بتن بازیافتی نسبت به بتن طبیعی آن است که تخلخل ملات سیمانی در سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش چگالی سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود و در نتیجه کاهش چگالی بتن بازیافتی را به دنبال خواهد داشت. همچنین حضور الیاف منجر به اضافه‌شدن فضای متخلخل بتن می‌شود و چگالی بتن الیافی بازیافتی را کاهش می‌دهد.

مطابق شکل ۶ نتایج آزمایش جذب آب حاکی از آن است که با توجه به جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی بتنی، درصد جذب آب افزایش می‌یابد. همچنین مقدار جذب آب نمونه بتن بازیافتی نسبت به بتن طبیعی در حدود ۵۴ درصد و این مقدار برای نمونه بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن طبیعی در حدود ۵۷٪ است. بنابر این، کمترین درصد جذب آب در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵. چگالی نمونه‌های مورد آزمایش



شکل ۶. درصد جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش

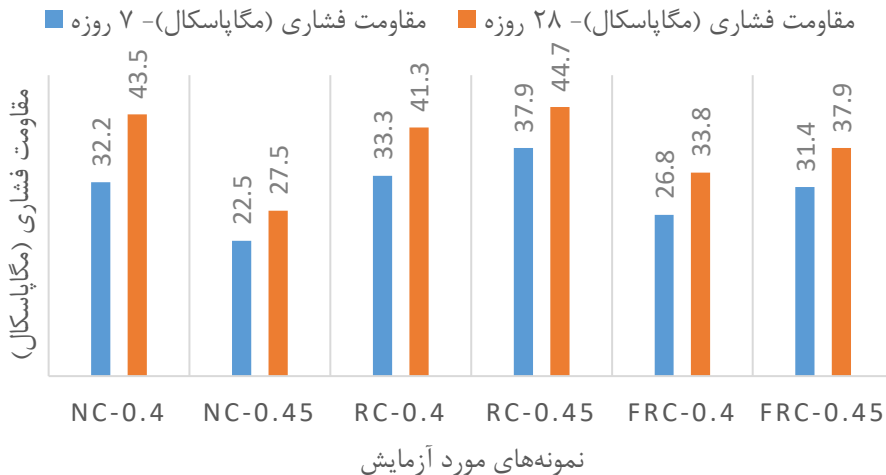
طبق بند ۲-۳-۵ استاندارد ملی ایران به شماره ۱۲۷۲۸ حداکثر میانگین درصد وزنی جذب آب برای نمونه‌های بتنی در سه رده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۷، ۶ و ۶ در نظر گرفته است. با توجه به نمودار شکل ۶، درصد جذب آب بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی در محدوده معین استاندارد ملی ایران قرار دارد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN BS 12390-3 [۳۴] روی سه نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه با سرعت بارگذاری $2/5$ کیلوگرم بر ثانیه مطابق شکل ۷ انجام شد. میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی در نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۴ درصد اختلاف دارد و در نسبت آب به سیمان $0/45$ ، این اختلاف در حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن طبیعی با نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۲۴ درصد کاهش و با نسبت آب به سیمان $0/45$ ، میانگین ۲۸ درصد افزایش دارد. بتن الیافی بازیافتی نسبت به بتن بازیافتی فاقد الیاف با نسبت آب به سیمان $0/4$ ، به‌طور میانگین ۲۳ درصد کاهش و با نسبت آب به سیمان $0/45$ ، میانگین ۱۹ درصد کاهش دارد. همان‌طور که از نتایج نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان بر میزان مقاومت فشاری بتن بازیافتی افزوده خواهد شد. همچنین حضور الیاف پلیاستیکی در بتن بازیافتی به نسبت بتن شاهد با افزایش نسبت آب به سیمان تا حدودی موجب بهبود عملکرد مقاومت فشاری می‌شود.



شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری

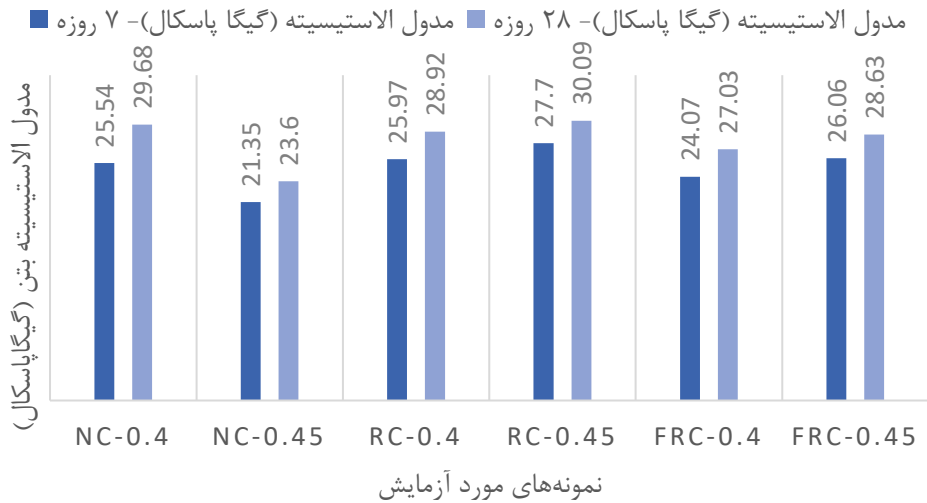


شکل ۸. نمودار تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه

علت اصلی مقاومت فشاری بتن، مقاومت سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و اتصال بین این دو ناحیه است و افزودن الیاف در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند، تأثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری خواهد گذاشت. همچنین کاهش مقاومت فشاری بتن الیافی در نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف به نسبت بتن بازیافتی فاقد الیاف، به دلیل حفره‌های موجود، ناشی از افزودن این مقدار الیاف است.

برای ساخت جداول بتنی شهری مطابق با مشخصات فنی و مقاطع همسان جدول‌ها و انهار بتنی شهری [۳۵] نباید مقاومت فشاری میانگین نمونه ۲۸ روزه جدول‌های بتنی براساس روش آزمون استاندارد ملی ایران کمتر از ۳۵ مگاپاسکال یا مقاومت فشاری ۲۸ روزه نظیر نمونه مکعبی مغزه حاصل از جدول‌های بتنی برای نمونه منفرد باید بیش از ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفت. همچنین در استاندارد اروپایی BSEN 12390 [۳۶]، مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از نمونه مکعبی مغزه در سه رده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته است. همان‌طور که از نتایج آزمایش مقاومت فشاری در نمودار شکل ۸ استخراج می‌شود، مقاومت فشاری نمونه بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی در محدوده معین، آیین‌نامه‌های فوق‌الذکر است و قابلیت بهره‌گیری در جدول‌های بتنی شهری را دارند.

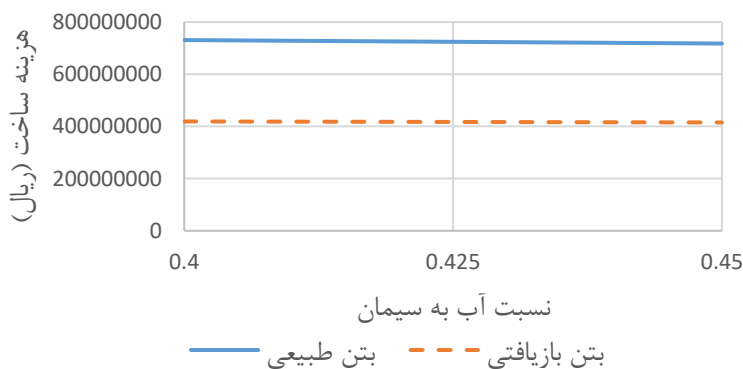
آزمایش مدول الاستیسیته بتن مطابق استاندارد ۵۲۵ [۳۷] نمودار تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج شکل ۹ حاکی از آن است که با افزایش نسبت آب به سیمان و سن آزمایش، نتیجه مدول الاستیسیته در بتن بازیافتی و بتن بازیافتی الیافی افزایش می‌یابد.



شکل ۹. نمودار تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷ و ۲۸ روزه

ارزیابی اقتصادی

برای ارزیابی اقتصادی طرح‌های اختلاط بتن طبیعی و بازیافتی و الیافی بازیافتی که جزئیات آن در جدول ۳ آورده شده است، براساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۹۸ [۳۸]، هزینه‌ها در سال مبدا که تنها شامل هزینه مورد نیاز برای تولید یک مترمکعب بتن با طرح اختلاط مورد نظر است، محاسبه خواهد شد. با توجه به حضور سنگ‌دانه‌های بازیافتی و الیاف پلاستیکی در بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی، هزینه تهیه مواد بازیافتی رایگان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰. نمودار برآورد هزینه ساخت نمونه‌های بتن طبیعی و بازیافتی براساس فهرست بهای سال ۹۸

شکل ۱۰ نمودار هزینه ساخت نمونه‌های بتن طبیعی و بازیافتی به نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ و ۰/۴۵ در واحد مترمکعب ارائه شده است. ارزیابی نتایج شکل ۱۰ حاکی از کاهش هزینه‌های ساخت بتن با حضور مواد بازیافتی تا ۷۴ درصد است که اقتصادی بودن طرح پژوهش را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد ساخت جدول‌های بتنی شهری با حضور مواد بازیافتی علاوه بر حفظ محیط زیست، منجر به کاهش هزینه ساخت هم می‌گردد.

پیش‌بینی طرح اختلاط پیشنهادی

معرفی ساختار شبکه عصبی مصنوعی

یکی از مدل‌های پرکاربرد در محاسبات نرم شبکه عصبی است که الهام‌گرفته از مغز انسان و شامل اتصالات وزن‌دار بین نرون‌های مصنوعی است. به‌طور کلی، در شبکه‌های عصبی سه نوع لایه نورونی وجود دارد: لایه ورودی که وظیفه دریافت اطلاعات خام را بر عهده دارد. لایه‌های پنهان که عملکرد این لایه‌ها به‌وسیله ورودی‌ها و وزن ارتباط بین آن‌ها و لایه‌های پنهان تعیین می‌شود. عملکرد لایه خروجی نیز به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباطی بین واحد پنهان و خروجی وابسته است. اختلاف بین خروجی شبکه عصبی و خروجی مطلوب، تابع خطا تعریف می‌شود. سپس خطا برمی‌گردد و وزن‌ها و بایاس‌ها اصلاح می‌شود تا خطا را کاهش دهد. این پروسه که به گام یادگیری معروف است، آنقدر تکرار می‌شود تا بیشترین دقت در تعیین خروجی‌ها ایجاد شود. صحت‌سنجی نیز در حین یادگیری به‌صورت غیرمستقیم انجام می‌شود تا بیش‌برازش^۱ شبکه عصبی را نشان دهد و نقطه توقف فرایند یادگیری زمانی است که خطای صحت‌سنجی افزایش پیدا می‌کند. آخرین گام مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی، آزمایش است که تنها برای تعیین میزان کارایی شبکه آموزش‌دیده انجام می‌شود [۳۹]. شکل ۱۱ نمای شماتیکی از یک نرون محاسباتی و اجزای آن را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی

برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آزمایش‌هایی با موضوع بتن بازیافتی استفاده شده است. طبق این مطالعات علاوه بر نتایج طرح‌های اختلاط پیشنهادی در این پژوهش، از طرح‌های اختلاط آزمایش توسط اتربریا^۲ و همکاران [۴۰]، ایوانجلیستا و د بریتو^۳ [۴۱]، یانگ^۴ و همکاران [۴۲]، والرینا کورینالدسی^۵ [۴۳]، فونسکا^۶ و همکاران [۴۴]، فریرا^۷ و همکاران [۴۵]، کو و پون^۸ [۴۶]، پون و همکاران [۴۷]، گومز سوپرون^۹ [۴۸]، خطیب [۴۹] و فان^{۱۰} و همکاران [۵۰] استفاده شده است. بنابر این، در این تحقیق ۱۲۴ نمونه آزمایشگاهی شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده است. وزن مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط، شامل سنگدانه درشت‌دانه طبیعی و بازیافتی، سنگدانه ریزدانه طبیعی و بازیافتی، سیمان، آب و مواد افزودنی از نوع فوق روان‌کننده به‌عنوان پارامترهای ورودی به شبکه عصبی و خروجی آن مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن است. در ادامه مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۴ ارائه شده است.

¹ Overfitting

² Etxeberria

³ Evangelista and de Brito

⁴ Yang

⁵ Valeria Corinaldesi

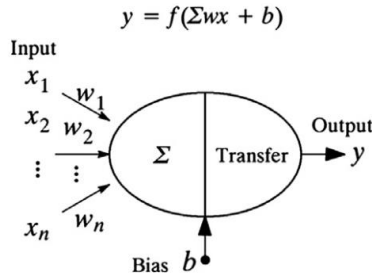
⁶ Fonseca

⁷ Ferreira

⁸ Kou and Poon

⁹ Go´mez-Soberon´n

¹⁰ Fan



شکل ۱۱. نمای شماتیکی از یک نورون محاسباتی شبکه عصبی و اجزای آن [۵۱]

برای کاستن اثرات شاخصه‌های ناخواسته در نتایج آزمایشگاهی، تمامی پارامترهای ورودی و هدف قبل از آموزش در شبکه عصبی مصنوعی نرمال‌سازی و مقیاس‌سازی می‌شوند. مرحله مقیاس‌سازی از آن‌رو مهم است که تابع تبدیل لوگ-سیگموئید^۱ تنها مقادیر بین ۰ تا ۱ را شناسایی می‌کند و برای مقیاس‌سازی داده‌ها از کمترین و بیشترین مقدار مقدار ۰/۱ تا ۰/۹ استفاده می‌شود. توابع مقیاس‌سازی برای داده‌های ورودی و هدف در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مواد افزودنی (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	ماسه باز یافتی (kg)	شن باز یافتی (kg)	ماسه طبیعی (kg)	شن طبیعی (kg)
۴۲/۸۸	۰/۸۶۵	۱۸۶/۳۱	۳۷۴/۵۱	۳۱/۲۹	۳۸۰/۳۰	۵۲۱/۵۴	۷۸۱/۱۵
۶۰	۴/۹	۲۷۱	۴۴۹	۶۶۸	۱۱۲۶/۸	۸۹۸	۱۵۱۴
۱۷/۷۶	۰	۱۴۰	۳۰۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵. توابع مقیاس‌سازی برای داده‌های ورودی و هدف

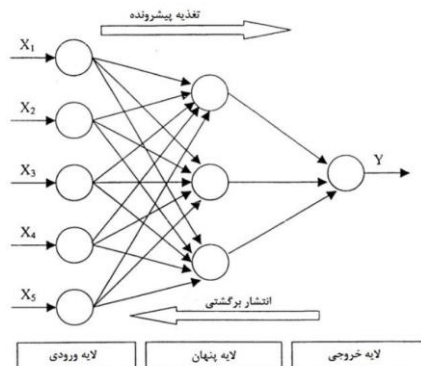
پارامتر	تابع مقیاس‌سازی
شن طبیعی (NCA)	$NCA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(NCA - NCA_{min}) / (NCA_{max} - NCA_{min})] + 0.1$
ماسه طبیعی (NFA)	$NFA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(NFA - NFA_{min}) / (NFA_{max} - NFA_{min})] + 0.1$
شن باز یافتی (RCA)	$RCA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(RCA - RCA_{min}) / (RCA_{max} - RCA_{min})] + 0.1$
ماسه باز یافتی (RFA)	$RFA_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(RFA - RFA_{min}) / (RFA_{max} - RFA_{min})] + 0.1$
سیمان (C)	$C_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(C - C_{min}) / (C_{max} - C_{min})] + 0.1$
آب (W)	$W_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(W - W_{min}) / (W_{max} - W_{min})] + 0.1$
مواد افزودنی (ADD)	$ADD_{scaled} = [(0.9 - 0.1)(ADD - ADD_{min}) / (ADD_{max} - ADD_{min})] + 0.1$
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (f_{cu})	$f_{cu\ scaled} = [(0.9 - 0.1)(f_{cu} - f_{cu\ min}) / (f_{cu\ max} - f_{cu\ min})] + 0.1$

^۱ log-sigmoid

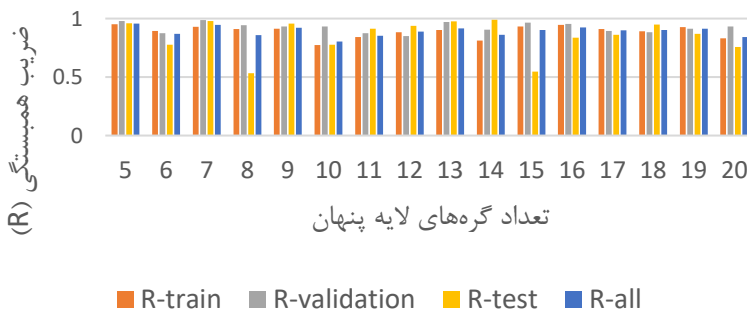
اجرای شبکه عصبی

برای اجرای طرح اختلاط پیشنهادی، از نمونه‌های آزمایشگاهی شبکه پس‌انتشار برگشتی [۵۱] استفاده شده است. شبکه پس‌انتشار برگشتی به‌عنوان آسان‌ترین و مؤثرترین مدل در میان شبکه‌های چندلایه، داده‌های مورد نیاز در شبکه را به دو گروه داده‌های آموزشی که حدود ۷۰ درصد از کل داده‌ها را برای آموزش و وزن‌دهی و داده‌های آزمایشی که حدود ۳۰ درصد از کل داده‌ها که در آموزش نقش ندارند و به‌عنوان راندمان شبکه آموزش‌دیده می‌باشند، تقسیم می‌کند. این شبکه از یک لایه ورودی که تعداد ورودی‌های شبکه، بیانگر تعداد پارامترهای موجود در بخش ورودی شبکه است و از یک یا چند لایه پنهان که هرکدام دارای تعدادی نورون هستند که تعداد این نورون‌ها و نوع تابع رفتاری در رفتار شبکه مورد نظر تأثیرگذار است، مطابق شکل ۱۲ تشکیل شده‌اند. شکل ۱۲ نمونه شماتیک از لایه ورودی و پنهان شبکه عصبی مصنوعی را مشخص کرده است.

یک شبکه با تعداد گره بهینه در لایه پنهان، شبکه‌ای است که قادر باشد با حداقل مقدار خطای ممکن، همبستگی قابل قبولی بین مقادیر خروجی شبکه و مقادیر هدف برقرار کند. در این پژوهش شبکه‌هایی با تعداد ۵ تا ۲۰ گره در لایه پنهان آموزش شدند. مقادیر ضرایب همبستگی و خطای این شبکه‌ها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همچنین تابع انتقال به‌کاررفته در لایه خروجی از نوع خطی ساده و در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموئید است.

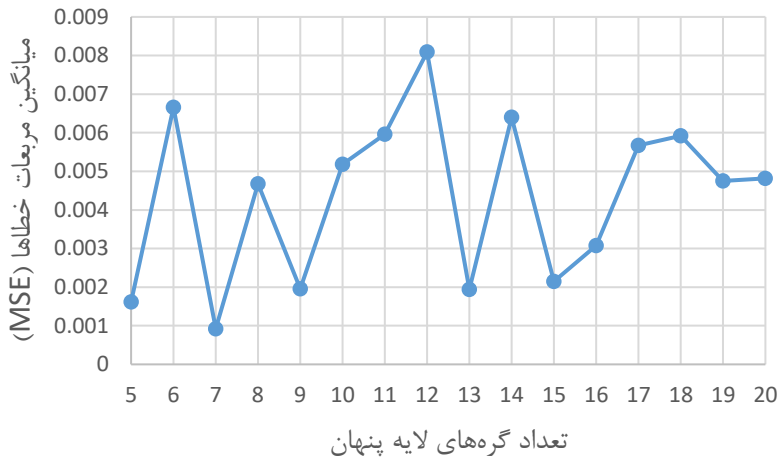


شکل ۱۲. نمونه شماتیک از ساختار شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۱۳. ضرایب همبستگی به ازای تعداد گره‌های لایه پنهان

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اغلب شبکه‌ها دارای ضرایب همبستگی بالایی هستند و از این میان شبکه‌ای با ۷ گره در لایه پنجم، علاوه بر بیشترین مقدار ضرایب همبستگی (R)، کمترین خطا را نیز دارد. بنابر این، شبکه با ۷ گره در لایه پنجم به عنوان شبکه بهینه برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه انتخاب می‌شود.



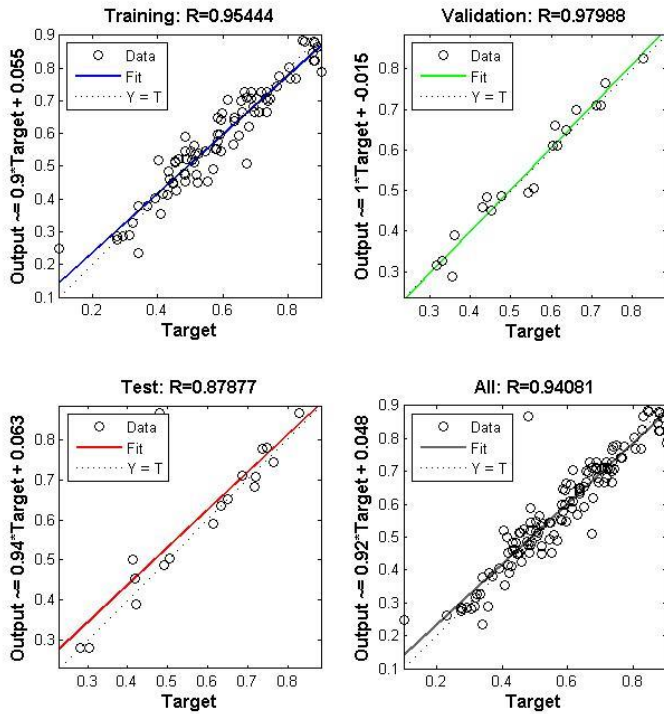
شکل ۱۴. میانگین مربعات خطاها به ازای تعداد گره‌های پنجم

صحت‌سنجی روش شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی

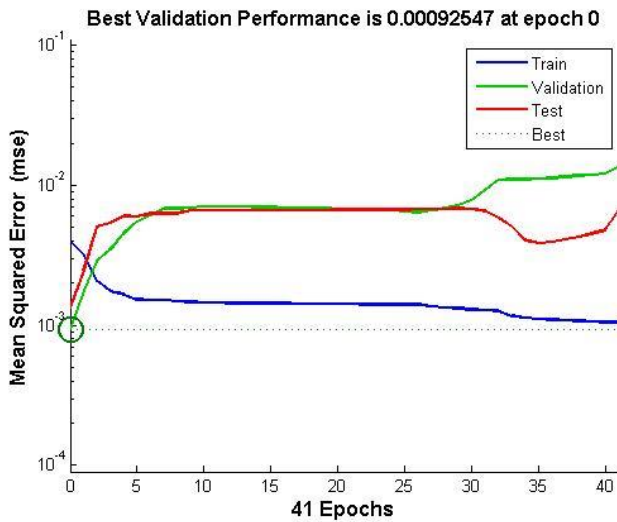
پس از انتخاب هندسه شبکه عصبی مصنوعی، داده‌های مورد استفاده در قسمت صحت‌سنجی نباید در بخش آموزش شبکه استفاده شوند. علت این کار آن است که سنجش صحت شبکه عصبی در ارائه تخمین دقیق از مقاومت فشاری ۲۸ روزه داده‌هایی است که در قسمت آموزش به کار گرفته نشده‌اند.

شکل ۱۵ نمودارهای عملکرد شبکه عصبی طراحی شده، شامل نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۶ نمودار میانگین مربعات خطا در فرآیند آموزش شبکه جهت تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵، ضریب رگرسیون برای گروه آموزشی برابر ۰/۹۵۴، برای گروه ارزیابی برابر ۰/۹۷۹ و برای گروه آزمایشی برابر ۰/۸۷۸ به دست آمده است. مقادیر حاصله در نمودار شکل ۱۵، نزدیک به ۱ و حاکی از یادگیری و عملکرد بسیار خوب شبکه عصبی و ضریب خطی همبستگی بین داده‌های مدل‌سازی و مقادیر پیش‌بینی شده بالا است.

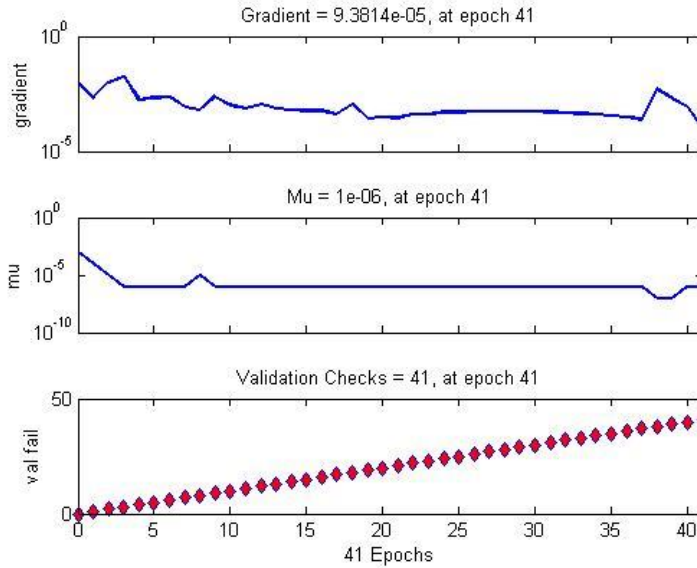
در شکل ۱۶ مقدار رگرسیون شبکه انتخابی در مراحل مختلف مدل‌سازی بررسی شده است. شکل ۱۶ حاکی از افت حداقل مربعات خطاست. شکل ۱۷ روند تغییرات شبکه طی اپوک‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۸ نمودار مقایسه مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی است. همان‌طور که از شکل ۱۸ مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد.



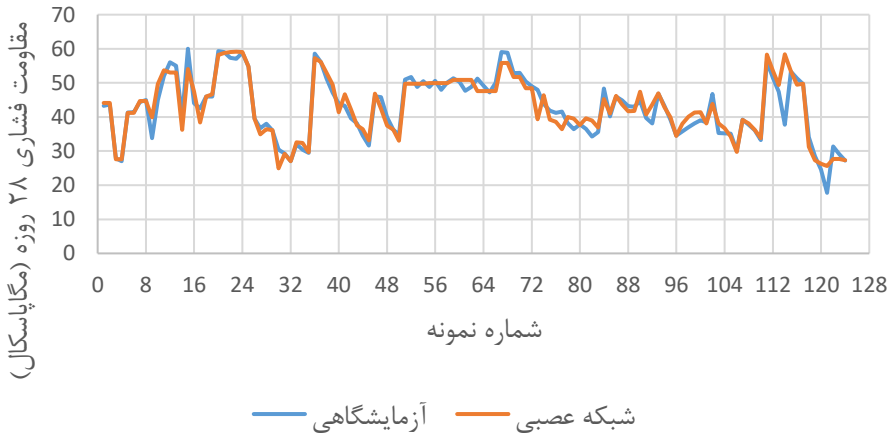
شکل ۱۵. نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها



شکل ۱۶. نمودار میانگین مربعات خطا در فرایند آموزش شبکه



شکل ۱۷. روند تغییرات شبکه در مراحل آموزش شبکه



شکل ۱۸. نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبکه عصبی

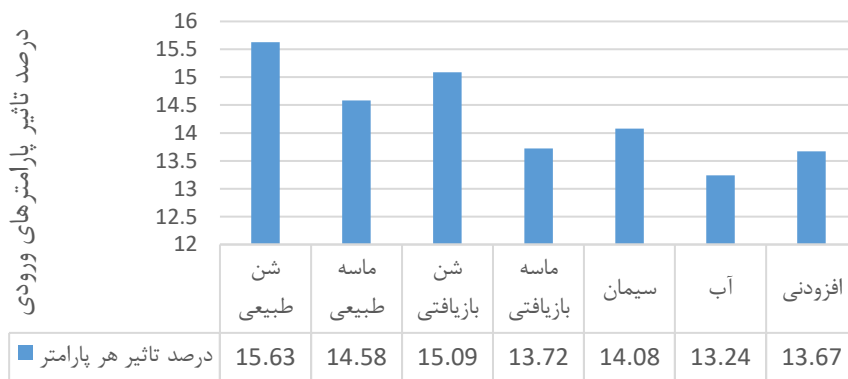
آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

تا پایان سال ۱۹۸۰، برای تفسیر شبکه‌های عصبی مصنوعی که دارای نورون‌های ورودی (N)، نورون‌های پنهان (L) و نورون‌های خروجی (M) هستند، برای تحلیل اثر متغیرهای ورودی بر خروجی این شبکه، روش‌های مختلفی ارائه شده است. آنالیز براساس مقادیر وزن، تنها بر مبنای مقادیر ذخیره در ماتریس استاتیک وزن‌ها برای تعیین تأثیر نسبی هر یک از داده‌های ورودی بر داده‌های خروجی شبکه است. معادلات مختلفی مبتنی بر مقادیر وزن‌ها ارائه شده است که تمامی آن‌ها با محاسبه حاصل ضرب وزن‌ها (W_{ij}) وزن اتصال بین نورون ورودی i و

نورون مخفی j و v_{jk} (وزن اتصال بین نورون مخفی j و نورون خروجی k) برای هریک از نورون‌های مخفی شبکه به صورت مجموع حاصل ضرب‌های محاسبه شده به دست می‌آید. یکی از کاربردی‌ترین معادلات، معادله میلن^۱ [۵۲] است. معادله میلن روش اصلاحی روش گارسون^۲ است که با استفاده از قدر مطلق وزن‌ها، نسبت صحیحی را به دست آورد. رابطه ۱ معادله میلن را نشان می‌دهد.

$$IIF = \frac{\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj}}{\sum_{k=1}^{n_{inputs}} \left(\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj} \right)} \quad (1)$$

مطابق با رابطه ۱، درصد اهمیت پارامترهای ورودی^۳ به شبکه عصبی در شکل ۱۹ محاسبه و ارائه شده است. نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۱۹، حاکی از تأثیر بالای مقدار شن طبیعی و تأثیر کم مقدار وزنی آب بر تابع هدف شبکه عصبی است.



پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

شکل ۱۹. درصد اهمیت پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

نتیجه گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن، نتایج زیر به عنوان یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود:

- ۱- بتن بازیافتی به علت تخلل بالا، چگالی کمتر و در نتیجه جذب آب بیشتری نسبت به بتن طبیعی دارد. همچنین سنگ‌دانه درشت‌دانه بازیافتی در حدود ۲ برابر سنگ‌دانه درشت‌دانه طبیعی و سنگ‌دانه ریزدانه

¹ Milne

² Garson

³ Importance of Input Factors (IIF)

- بازیافتی، ۲/۸۵ برابر سنگدانه ریزدانه طبیعی جذب آب دارد و وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. از طرفی، به علت کیفیت و مقاومت مکانیکی پایین سنگدانه درشت‌دانه بازیافتی، درصد شکستگی این نوع سنگدانه به مراتب بیشتر از سنگدانه‌های درشت‌دانه طبیعی است.
- ۲- مقدار تغییرات مقاومت بتن بازیافتی بسته به نسبت آب به سیمان، درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، جنس و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها است. به طور کلی، با کاهش نسبت آب به سیمان، کاهش مقاومت بتن با سنگدانه بازیافتی محسوس‌تر است. همچنین با حضور سنگدانه بازیافتی در بتن مقاومت فشاری در نمونه‌های مورد آزمایش افزایش یافته است.
- ۳- حضور الیاف پلاستیکی در بتن بازیافتی، اندکی بهبود در مقاومت فشاری به نسبت بتن طبیعی دارد و به نسبت بتن بازیافتی منجر به کاهش مقاومت شده است. علل این کاهش، به کارگیری ۱ درصد الیاف در بتن است که منجر به ایجاد تخلخل در فضای بتن می‌شود و در نتیجه عملکرد مناسبی در مقابل مقاومت فشاری نخواهد داشت.
- ۴- ارزیابی اقتصادی طرح‌های اختلاط بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی براساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۹۸ نشان داد که حضور مصالح بازیافتی منجر به کاهش ۷۴ درصد هزینه‌های ساخت بتن می‌شود که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، محیط زیست و منابع سنگی کشور را حفظ می‌کند.
- ۵- مقایسه نتایج طرح اختلاط پیشنهادی برای بتن بازیافتی و الیافی بازیافتی با استانداردهای مربوط به جدول‌های بتنی شهری، حاکی از قبولی مشخصات مکانیکی بتن بازیافتی برای استفاده در بتن جدول‌های شهری است.
- ۶- با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم و با داشتن تعداد کافی داده‌های آزمایشگاهی، ضمن لحاظ نمودن خطا و عدم قطعیت موجود در داده‌ها، می‌توان بدون صرف زمان و هزینه میزان مقاومت فشاری را برای مصارف مختلف بتن بازیافتی پیش‌بینی کرد.
- ۷- ضریب همبستگی تقریباً برابری در خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل از شبکه عصبی مصنوعی موجود است؛ بنابراین، این روش می‌تواند قابلیت پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه را در حد مطلوب و مناسب داشته باشد.
- ۸- نتایج آنالیز حساسیت، حاکی از تأثیر بالای مقدار شن طبیعی و تأثیر کم مقدار آب بر روی تابع هدف شبکه عصبی است. از این‌رو، برای داشتن یک طرح اختلاط مفید باید بر روی درشت‌دانه طبیعی و بازیافتی حساسیت بیشتری اعمال کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از هیئت محترم داوری به دلیل مطالعه و راهنمایی‌های ارزنده برای بهبود این مقاله و همچنین از مسئولین محترم دانشگاه فنی و حرفه‌ای مازندران تشکر می‌کنند. شایان یادآوری است انجام این طرح از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای تأمین شده است.

References

- [1] Myers, T. (2019). *The Greening of the Concrete Jungle: The Connection between Young Farmers and the Remediating of Food Deserts* [Senior Independent Study Theses,

- Department of Earth Sciences, The College of Wooster]. United States. <https://openworks.wooster.edu/independentstudy/8582/>
- [2] Frondistion, K., & Yannas, S. (1980). Economics of Concrete Recycling in United States. *Advanced Research institute problems in the recycling concrete, France*, 163-168.
- [3] Hansen, T. C. (1992, April 21). *Recycling of demolished concrete and masonry* (1st ed.). CRC Press, Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482267075>
- [4] Aghili Lotf, M., & Ramezaniapour, A. M. (2018). Investigation on the Correlations Between Different Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *MODARES CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 18(3), 153-167. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-25738-en.html>
- [5] de Brito, J., & Saikia, N. (2012). *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer London. <https://books.google.com/books?id=gt5SDopv2hwC>
- [6] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382-3387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>
- [7] Dilbas, H., Çakır, Ö., & Atis, C. (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, 716-726. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007>
- [8] Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. F. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>
- [9] Moghimi, M., Shafiq, P., Baranjian, J., & Nemati, K. (2010). Experimental study of the effect of using microsilica and superplasticizer on some mechanical properties of recycled concrete made of crushed concrete. *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, 21(2), 153-162. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=134394>
- [10] Choi, W.-C., & Yun, H.-D. (2012). Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. *Engineering Structures*, 41, 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.037>
- [11] Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3), 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.007>
- [12] Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- [13] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., & Al Malty, A. E. S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1503-1511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>
- [14] González-Fonteboia, B., & Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43(4), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008>
- [15] Heeralal, M., Pancharathi, R., & Rao, Y. V. (2009). Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC). *Facta Universitatis - series : Architecture and Civil Engineering*, 7(1), 19-33. <https://doi.org/10.2298/FUACE0901019H>

- [16] Umadevi, C., & Gowda, M. (2014). Study on strength characteristics of recycled aggregate concrete using polypropylene fiber. *Journal of Civil Engineering Technology and Research*, 2(1), 259-266.
- [17] Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225. <https://doi.org/10.3390/su2051204>
- [18] Jain, N., & Garg, M. (2015). Development of Green Paving Blocks Using Recycled Aggregates: An Approach towards Sustainability. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 9(1), 52-61. <https://doi.org/10.9790/2402-09125261>
- [19] Ahrari Fard Sarab, H. R., Berggol, I., Manzoori, A., Mesbahpour, M., Nouri Sultan, J., & Motavali, M. (2013, March). *Technical specifications and matching sections of urban concrete tables and streams*. T. T. a. E. C. O. Technical and Civil Deputy of Tehran, Technical and executive system of Tehran Municipality, Technical criteria and standards. https://shaghoor.ir/Files/818089_6-8-61.pdf
- [20] Committee, D. (1960). D 1129 - 60 Standard Definitions of Terms Relating to Industrial Water and Industrial Waste Water. In (pp. 391-397). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP48545S>
- [21] National Standard Organization of Iran. (2015). Granulation test of fine and coarse aggregates - National Standard No. 4977. In: Teknobatar.
- [22] ASTM International. (2017, August 16). *ASTM C136-01- Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0136-01.html>
- [23] ASTM International. (2015, March 09). *ASTM C127-12- Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0127-12.html>
- [24] Awasthi, A., & Goyal, S. (2017). Recycled aggregate from C&D waste modified by dry processing and used as a partial replacement of coarse aggregate in concrete. *J Mater Sci Surf Eng*, 5, 671-678.
- [25] Li, T., Xiao, J., Zhu, C., & Zhong, Z. (2016). Experimental study on mechanical behaviors of concrete with large-size recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 120, 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.110>
- [26] Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>
- [27] Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497-506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.163>
- [28] Salimbahrami, S. R., Shakeri, R., & Rezapour, M. A. (2017). *A review of the mechanical properties of concrete with recycled aggregates* The International Conference on Contemporary Iranian Civil, Architecture and Urban Development, Tehran, Iran,
- [29] Awchat, G., & Kanhe, N. (2013). Experimental studies on polymer modified steel fibre reinforced recycled aggregate concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2(12), 126-134. <https://www.ijaiem.org/volume2issue12/IJAIEM-2013-12-04-005.pdf>
- [30] C143/C143M-15a, A. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *West Conshohocken, PA: ASTM International*.

- [31] Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032>
- [32] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- [33] ASTM International. (2013). *ASTM C642-13- Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. American National Standards Institute (ANSI) Webstore. <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmc64213>
- [34] British Standards Institution (BSI). (2019, October). *BS EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens* Civilnode. <https://civilnode.com/download-standard/10640443541281/bs-en-12390-32019-testing-hardened-concrete-part-3-compressive-strength-of-test-specimens>
- [35] Tehran, T. a. C. D. o. (2014). Technical specifications and matching sections of urban concrete tables and streams. In. Tehran.
- [36] Institution, B. S. (2011). *Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens*. BSi.
- [37] Iran, N. S. O. o. (2015). *Concrete - Determination of elastic modulus and Poisson's coefficient of concrete - Test method*. Tehran
- [38] *Price list of the basic unit of buildings in 2019*. (2019). Tehran: Country Program and Budget Organization.
- [39] Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Amiri, G. G. (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 92(12), 2817-2829. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.04.008>
- [40] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- [41] Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- [42] Yang, K.-H., Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289-296.
- [43] Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616-1620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- [44] Fonseca, N., de Brito, J., & Evangelista, L. (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.002>
- [45] Ferreira, L., de Brito, J., & Barra Bizinotto, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617-627. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>
- [46] Kou, S. C., & Poon, C. S. (2008). Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 57-64. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.00052>

- [47] Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/S008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S008-8846(03)00186-8)
- [48] Gómez-Soberón, J. M. V. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301-1311. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
- [49] Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- [50] Fan, C.-C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S.-J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, 708-715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- [51] Bosscher, P. J., Edil, T. B., & Kuraoka, S. (1997). Design of highway embankments using tire chips. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(4), 295-304. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(295))
- [52] Milne, L. (1995). *Feature selection using neural networks with contribution measures* AI-CONFERENCE- World Scientific Publishing. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.45.9756&rep=rep1&type=pdf>



General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures

Reza Moradi¹, Ebrahim Khalilzadeh Vahidi^{2*}

¹PhD Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.23.2020

Revised: 09.23.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Structural vibration

passive control

Friction damper

*Corresponding Author:

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi

Email:

e_vahidi2000@yahoo.com

ABSTRACT

The Nowadays one of the challenges that engineers and structural designers encounter is reduced vibrations of structures due to lateral forces such as earthquakes and winds. Taking into consideration that the design and construction of tall buildings is one of the most common methods of land-use in highly populated urban areas, the necessity and importance of identifying methods of controlling structural vibrations is felt more keenly than before. One of the methods of structural motion control is passive structural motion control with friction dampers. In this study, the main focus on the application and performance of friction dampers is new ideas for using the friction phenomenon to control structural vibrations and the design challenges of structures with friction dampers. For this purpose, first, we try to point out the important concepts in vibration control. Then, the goals, methods and results of various existing researches are examined to provide a clear view of friction dampers for structural engineers and as a start for future research to develop and improve the performance of friction dampers.





مطالعه اجمالی ایده‌های جدید و کاربردی میراگرهای اصطکاکی جهت کنترل ارتعاش غیرفعال سازه‌ها

رضا مرادی^۱، ابراهیم خلیل زاده وحیدی^{۲*}

- ۱- دانشجوی دکتری سازه، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
- ۲- استادیار، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه یکی از معضلات موجود برای مهندسان و طراحان سازه، کاهش ارتعاشات ناشی از نیروهای جانبی نظیر زلزله و باد به سازه می‌باشد. از طرفی، با توجه به اینکه طراحی و ساخت سازه‌های بلند، یکی از روش‌های متداول استفاده از فضاهای شهری با جمعیت زیاد می‌باشد، ضرورت و اهمیت شناخت روش‌های کنترل ارتعاشات سازه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. یکی از روش‌های کنترل ارتعاش سازه، روش کنترل غیرفعال، با استفاده از میراگرهای اصطکاکی می‌باشد. در این پژوهش، تمرکز اصلی روی کاربرد و عملکرد میراگرهای اصطکاکی، ایده‌های جدید برای استفاده از پدیده اصطکاک به منظور کنترل ارتعاشات سازه و معضلات طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور ابتدا سعی می‌شود که به مفاهیم مهم در کنترل ارتعاشات اشاره شود، سپس اهداف، روش کار و نتایج پژوهش‌های موجود متعدد، بررسی گردد تا دید روشنی از میراگرهای اصطکاکی برای مهندسان سازه فراهم شود و نیز شروعی باشد بر تحقیقات آینده که در آنها به توسعه و بهبود عملکرد میراگرهای اصطکاکی پرداخته می‌شود.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

ارتعاش سازه
کنترل غیرفعال
میراگر اصطکاکی

*نویسنده مسئول: ابراهیم خلیل زاده وحیدی

پست الکترونیکی:

e_vahidi2000@yahoo.com



مقدمه

در حال حاضر، ایران جزو کشورهایی است که وقوع زلزله در آن با خسارات مالی و جانی بالایی همراه است [۱]. نمونه آن، زلزله سرپل ذهاب با ۶۲۰ نفر کشته و ۹۳۸۸ نفر زخمی می‌باشد. این زلزله با بزرگای گشتاوری ۷/۳ شامگاه ۲۱ آبان‌ماه سال ۱۳۹۶ رخ داد [۲]. کانون این زلزله ۵ کیلومتری شهر ازگله و همچنین در عمق ۱۱ کیلومتری رخ داد که به علت عمق کم، در کل منطقه شمال غرب ایران، در جنوب شرق ترکیه و حتی در کویت و شمال عربستان سعودی هم احساس شد [۲]. شتاب بیشینه رکورد ثبت شده در ایستگاه سرپل ذهاب، بیش از دو برابر نسبت شتاب مبنای طرح آیین نامه ۲۸۰۰ برای این منطقه بوده است. با بررسی عملکرد لرزهای تعدادی از سازه‌های فولادی در این زلزله، گسیختگی سیستم باربر جانبی، نبود سیستم مؤثر باربر جانبی، پدیده طبقه نرم و تخریب پیچشی، از جمله عوامل مؤثر در خرابی این سازه‌ها تشخیص داده شد [۳؛ ۴]. همچنین مفصل شدن اتصال تیر به ستون، شکست برشی ستون کوتاه، طبقه نرم، رعایت نکردن فلسفه ستون قوی-تیر ضعیف و ... از جمله مهم‌ترین موارد شکست در سازه‌های بتنی مناطق زلزله زده سرپل ذهاب بود [۵؛ ۶]. بنابراین مهم‌ترین عامل بروز خسارات سازه‌ای در این زلزله، آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌هایی است که با روش سنتی، طراحی و ساخته می‌شوند؛ زیرا در روش طرح لرزهای، سازه زمانی عملکرد مطلوبی حین زلزله خواهد داشت که سیستم باربر جانبی، توانایی جذب و استهلاک انرژی را داشته باشد. به عبارت بهتر، در سازه‌هایی که با این روش طراحی می‌شوند استهلاک انرژی در اعضای رخ می‌دهد که خود جزئی از سیستم باربر لرزهای می‌باشند. بنابراین در این روش، اعضای سازه‌ای دچار خساراتی نظیر تشکیل مفصل پلاستیک می‌شوند.

بهترین راهکار برای کاهش خسارات سازه‌ای در برابر زلزله این است که به جای توجه به افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله، به سمت کاهش در پاسخ تغییر مکان یا شتاب ورودی از زمین به سازه معطوف شود [۷؛ ۸]. روش‌هایی که این هدف را دنبال می‌کنند تحت عنوان کلی روش‌های کنترل ارتعاشات لرزهای، شناخته می‌شوند. انواع روش‌های کنترل ارتعاشات سازه عبارتند از: کنترل فعال، کنترل غیرفعال، کنترل نیمه‌فعال و کنترل ترکیبی می‌باشد [۸-۱۰]. در روش کنترل فعال، پاسخ سازه توسط عملگرهایی که مستقیماً به سازه وصل هستند، کنترل می‌گردد [۸]. در روش کنترل غیرفعال، ارتعاشات سازه توسط وسایل میراکننده انرژی زلزله، کنترل می‌شود. در روش کنترل نیمه فعال، پاسخ سازه توسط عملگرهایی که به میراگرها وصل هستند کنترل می‌شود [۸]. روش کنترل ارتعاشات ترکیبی، ترکیب روش کنترل ارتعاشات فعال و غیرفعال می‌باشد [۸].

کلید ورود به بحث کنترل ارتعاشات سازه، در نظر گرفتن زلزله به‌منزله انرژی (و نه به عنوان نیرو) می‌باشد. رابطه تعادل انرژی در یک سازه تحت زلزله به صورت زیر است:

$$(E_K + E_S) + (E_D + E_H) = E_I \quad (۱)$$

در رابطه بالا E_I بیانگر انرژی ورودی به سازه، E_S انرژی کرنشی سیستم، E_K انرژی جنبشی سیستم، E_D انرژی تلف‌شده توسط میرایی ویسکوز سیستم و E_H انرژی تلف شده توسط رفتار هیستریزس اعضا می‌باشد. رفتار ویسکوز و هیستریزس خود می‌تواند ناشی از مجموع سیستم سازه‌ای و کنترلی باشد. به عبارت بهتر:

$$E_{D-stru} + E_{D-dam} = E_D$$

$$E_{H-stru} + E_{H-dam} = E_H$$

در دو رابطه فوق E_{D-stru} همان انرژی تلف‌شده توسط میرایی ذاتی سیستم است که معمولاً بین ۲ تا ۵ درصد نسبت میرایی بحرانی است. E_{D-dam} انرژی تلف‌شده توسط میرایی‌های وابسته به سرعت (مثل میراگر ویسکوز یا میراگر

ویسکوالاستیک) ضمناً E_{H-stru} انرژی تلف‌شده توسط رفتار غیرخطی اعضای سازه‌ای است که با تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای باربر لرزه‌ای به وقوع می‌پیوندد. همچنین E_{H-dam} انرژی تلف‌شده توسط میراگرهای وابسته به جابه‌جایی (مثل میراگر فلزی تسلیم‌شونده یا میراگر اصطکاکی) که توسط رفتار هیستریزیس یا به عبارتی تسلیم شدن یا لغزش به اتلاف انرژی در سیستم می‌پردازد.

رابطه (۱) نشان می‌دهد که هنگامی که انرژی باد یا زلزله به یک سیستم وارد می‌شود این انرژی به دو صورت مختلف انرژی ذخیره‌شده و انرژی مستهلک‌شده تبدیل می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم مقدار انرژی ورودی به سازه در هنگام زلزله، مقدار ثابتی است. هنگامی که از سیستم‌های میراگر استفاده می‌کنیم مقدار انرژی مستهلک‌شده (E_{DIS}) افزایش می‌یابد. انرژی مستهلک‌شده حاصل انرژی جنبشی (E_K) و انرژی کرنشی (E_S) سیستم است. چون انرژی کرنشی و انرژی جنبشی به ترتیب به جابه‌جایی و سرعت، وابسته هستند، با کاهش مقدار آنها مقدار سرعت و جابه‌جایی سیستم سازه‌ای، کاهش پیدا می‌کند. به عبارت بهتر، میزان خسارات سازه‌ای، کمتر می‌شود. از طرفی با افزایش انرژی مستهلک‌شده، انرژی ذخیره‌شده، کاهش پیدا می‌کند. این بدان معناست که می‌توان با به‌کارگیری وسایل مستهلک‌کننده انرژی، آسیب‌های اعضای سازه‌ای را کاهش داد یا به صفر نزدیک کرد و سازه‌ای با پاسخ لرزه‌ای کمتر و سطح عملکرد بهتر طرح نمود.

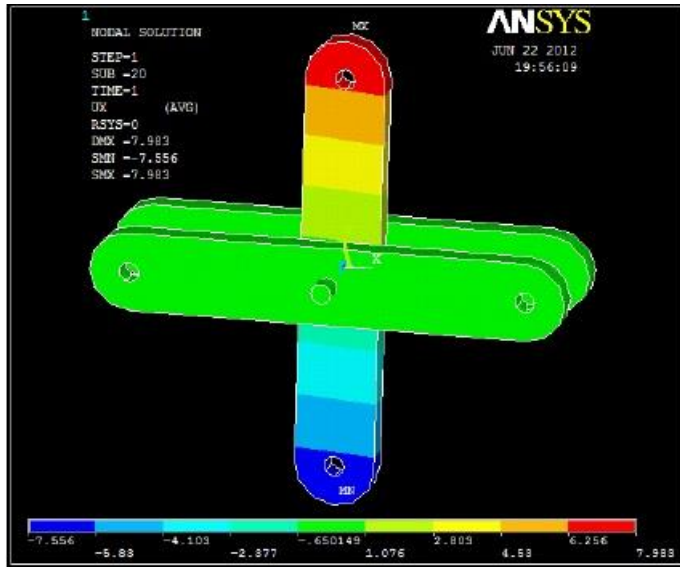
میراگرها بر اساس حساسیت رفتار آنها، شامل میراگرهای وابسته به جابه‌جایی (مثل میراگر اصطکاکی و میراگر فلزی تسلیم‌شونده)، میراگرهای وابسته به سرعت (مثل میراگر ویسکوز) و میراگرهای وابسته به شتاب (مثل میراگر جرم تنظیم‌شونده و میراگر مایع تنظیم‌شونده) تقسیم می‌شوند. دسته‌های دیگر، مثل میراگر ویسکوالاستیک، هم به جابه‌جایی و هم به سرعت حساس هستند [۱۱].

در این تحقیق، تمرکز اصلی بر کاربرد و عملکرد میراگرهای اصطکاکی، ایده‌های جدید برای استفاده از پدیده اصطکاک به‌منظور کنترل ارتعاشات سازه و معضلات طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور، در گام اول، ایده‌های جدید و مطالعات انجام شده در زمینه میراگرهای اصطکاکی با مکانیزم دورانی و در گام دوم تحقیقات انجام شده در زمینه سایر میراگرهای اصطکاکی، مرور و بررسی خواهد شد و در نهایت، پژوهش‌های انجام شده در رابطه با بار لغزش میراگرهای اصطکاکی به عنوان چالشی‌ترین و مهم‌ترین پارامتر طراحی سازه‌های دارای میراگرهای اصطکاکی، بررسی خواهد شد.

میراگرهای اصطکاکی دارای مکانیزم دورانی

انوشه‌یی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] به ارزیابی پدهای اصطکاکی با جنس‌های مختلف در میراگرهای اصطکاکی دورانی شکل پرداختند. برای این منظور، میراگرهای اصطکاکی دورانی با پدهایی از جنس آلومینیوم، گالوانیزه، فولاد ST37 و فولاد ضدزنگ مورد آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار دادند. نتایج آزمایش بر اساس معیارهای پذیرش، میراگرهای حساس به جابه‌جایی موجود در دستورالعمل FEMA356 را ارزیابی کردند. نتایج مطالعات آنها حاکی از آن است که آلومینیوم و فولاد ST37 حلقه‌های هیستریزیس پایدارتری با کمی افت مقاومت دارند. همچنین سایدگی پد اصطکاکی آلومینیومی، گالوانیزه و فولادی ST37 بیشتر است. بر اساس معیارهای پذیرش FEMA356 فقط پد آلومینیومی، قابل قبول است ولی به دلیل سایش زیاد بعد از زلزله شدید باید با پد جدید جایگزین شود [۱۲].

قلی‌زاده و مروج نیکو (۲۰۱۸) [۱۳] به بررسی عددی نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی-دورانی که در قاب‌های فلزی دارای مهاربند ضرب‌دری کاربرد دارند پرداختند. به همین منظور، مطابق شکل ۱ پیکربندی جدیدی از میراگر اصطکاکی-دورانی را پیشنهاد دادند و به‌منظور افزایش انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر پیشنهادی، با استفاده از محاسبات ریاضی به بهینه‌سازی هندسه میراگر پرداختند.



شکل ۱. میراگر اصطکاکی- دورانی قلی زاده و موج نیکو

در گام بعدی، به ارائه روشی مبتنی بر تحلیل استاتیکی معادل برای محاسبه بار لغزش بهینه میراگر اصطکاکی پیشنهادی پرداختند که در آن، لنگر لغزش به طور متغیر و متناسب با برش پایه در ارتفاع توزیع شده است. در نهایت به مقایسه شاخص عملکرد میراگر اصطکاکی (پارامتر SPI) سازه‌های قاب خمشی ۴، ۸، و ۱۲ طبقه دارای میراگر پیشنهادی در دو حالت توزیع یکنواخت بار لغزش به روش Filiatrault & Cherry و توزیع متغیر بار لغزش به روش ارائه شده، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کارایی میراگر پیشنهادی در سازه‌های مورد مطالعه با افزایش شدت زلزله و افزایش تعداد طبقات بیشتر خواهد شد. همچنین عملکرد لرزه‌ای سازه‌هایی که در آن، نیروی لغزش با روش پیشنهادی و به صورت متغیر توزیع شده، نسبت به توزیع یکنواخت نیروی لغزش میراگر اصطکاکی، مناسب‌تر است.

بونچف^۱ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۴] به ارزیابی کارایی نوعی از میراگرهای اصطکاکی- دورانی به عنوان رابط (فیوز سازه‌ای) بین ستون‌ها به عنوان روشی برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی پرداختند. در این پژوهش، قاب خمشی فولادی ۴ دهانه ۳ طبقه، ۶ طبقه و ۹ طبقه را با این روش، مقاوم‌سازی و پاسخ لرزه‌ای آنها ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر اصطکاکی دورانی به عنوان فیوز سازه‌ای و همچنین استهلاک‌کننده انرژی از طریق اصطکاک، سبب بهبود عملکرد سازه‌ای می‌شود؛ به عبارت بهتر، سبب کاهش برش پایه و دررفت سازه خواهد شد. همچنین این نوع میراگر، در طول عمر مفید بهره‌برداری سازه، نیاز به حفظ و نگهداری ندارد و حتی پس از وقوع زلزله، نیاز به تعویض نخواهد داشت.

هادیان‌فر (۲۱۵) [۱۵] به مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پرداخت. در این پژوهش، روشی ساده و عملی برای مدل‌سازی میراگرهای اصطکاکی- دورانی T شکل پیشنهاد شده است. به این صورت که میراگر T شکل را به صورت دو میله صلب تعریف کرد که در محل اتصال آنها از المان لینک^۲ برای استهلاک

^۱ Bonchev

^۲ Link

انرژی استفاده شده است. سپس برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی برای مدل‌سازی میراگر اصطکاکی - دورانی T شکل، قاب یک دهانه - یک طبقه موآلا، مدل‌سازی و تحلیل شده است. در گام بعدی، با استفاده از روش پیشنهادی مدل‌سازی، قاب یک دهانه - یک طبقه ضعیف مقاوم‌سازی و بهسازی کرده است و رفتار قاب موردنظر را با قاب مقاوم‌سازی شده با استفاده از مهاربند، مقایسه کرده است. در نهایت، لنگر و نیروی محوری ستون‌ها، نیروی محوری بادبندها، برش طبقات، تغییر مکان طبقات، شتاب ماگزیمم طبقات و مقدار انرژی مستهلک‌شده هر دو قاب با هم مقایسه شده است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که سازه مقاوم‌سازی شده با استفاده میراگر اصطکاکی - دورانی، نسبت به سازه مقاوم‌سازی شده با مهاربند ضرب‌دری، عملکرد لرزه‌ای بهتری داشته است. همچنین استفاده از میراگر اصطکاکی - دورانی، سبب کاهش نیروی داخلی اعضا، کاهش تغییر مکان جانبی سازه و همچنین بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه می‌گردد.

بارمو^۱ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۶] به بررسی عددی استفاده هم‌زمان جداساز لرزه‌ای و میراگر اصطکاکی دورانی در تراز فونداسیون پرداختند. برای این منظور، ساختمان بتنی ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه در حالت‌های بدون جداساز و در حالت ترکیبی از جداساز لاستیکی هسته سربی^۲، جداساز اصطکاکی لغزنده^۳ و همچنین میراگر اصطکاکی دورانی در نرم‌افزار Sap 2000 تحت زلزله السنترو را ارزیابی کردند. در نهایت، پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها شامل زمان تناوب، جابه‌جایی حداکثر بام و برش پایه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از میراگر اصطکاکی دورانی به همراه جداساز، موجب کاهش تغییر مکان جانبی و برش پایه یا به عبارت بهتر، سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ای می‌شود.

شیرخانی و همکاران (۲۰۱۵) [۱۷] کاربرد روش تحلیل زمان - دوام برای قاب‌های فلزی دارای میراگر اصطکاکی دورانی را بررسی کرده‌اند. برای این منظور، قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه را مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل زمان دوام قرار دادند و با مقایسه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل زمان دوام، به دقت روش تحلیلی زمان دوام پرداختند. نتایج تحقیقات آنها حاکی از آن است که استفاده از میراگرهای اصطکاکی دورانی، موجب کاهش دریافت طبقات و حداکثر جابه‌جایی طبقات می‌شود. همچنین جواب‌های تحلیل زمان - دوام با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، هماهنگ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب روش زمان دوام در پیش‌بینی رفتار سازه می‌باشد. صنعتی و همکاران (۲۰۱۴) [۱۸] به بررسی میراگر ترکیبی اصطکاکی - دورانی T شکل و ویسکوالاستیک پرداختند. در این میراگر برای بهبود رفتار میراگر اصطکاکی دورانی در فرکانس‌های از پدهای ویسکوالاستیک به همراه پدهای اصطکاکی می‌باشد. میراگر موردنظر را در یک قاب یک دهانه - یک طبقه فلزی با مقیاس یک سوم نصب و عملکرد لرزه‌ای آن را بررسی کردند. در نهایت، یک قاب سه دهانه هفت طبقه با استفاده از نرم‌افزار Perform 3D مدل‌سازی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شد و نیز پارامترهایی نظیر انرژی ورودی و انرژی مستهلک‌شده قبل و بعد از نصب میراگر مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از میراگرهای ترکیبی پیشنهادی، سبب بهبود رفتار لرزه‌ای سازه شده است.

میرزاباقری و همکاران (۲۰۱۴) [۱۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگرهای اصطکاکی دورانی یک، دو و سه بخشی در قاب‌های فلزی پرداختند. نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری هارمونیک با فرکانس 10 Hz و بار لغزش 0/8 KN قرار گرفتند. نمودار انرژی ورودی و انرژی مستهلک‌شده برای هر نمونه آزمایشگاهی به دست آمد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و میراگرهای اصطکاکی دورانی تک‌بخشی مشاهده شد که میراگرهای اصطکاکی دورانی چندبخشی، قابلیت استهلاک انرژی زیادی دارند. در ادامه، قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه دارای میراگر اصطکاکی دورانی تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شدند. میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات، حداکثر جابه‌جایی طبقه بام، دریافت

¹ Barmo

² Lead Rubber Bearing

³ Friction Pendulum System

طبقات در حالت با و بدون میراگر، مقایسه شدند. آنها مشاهده کردند که رفتار لرزه‌ای سازه دارای میراگر اصطکاکی دورانی بهتر می‌باشد.

منتظر و همکاران (۲۰۱۴) [۲۰] عملکرد قاب‌های ۳، ۷ و ۱۲ طبقه با و بدون میراگر اصطکاکی - دورانی تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی و تحلیل فزاینده دینامیکی را مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که میراگر اصطکاکی دورانی، سبب کاهش حداکثر دریفت طبقات شده است. همچنین میراگر اصطکاکی - دورانی تا قبل از لغزش، موجب افزایش سختی قاب فولادی می‌گردد.

پاپادوپولوس^۱ و همکاران (۲۰۱۳) [۲۱] با بررسی عددی و آزمایشگاهی، نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی - دورانی را برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دادند. در این پژوهش، ابتدا مکانیزم عملکرد میراگر پیشنهادی، بررسی شد. در مرحله بعدی، میراگر را ساختند و آن را در قاب مربعی شکل نصب کردند و قاب دارای میراگر اصطکاکی را آزمایش کردند. در نهایت، مدل‌سازی نمونه‌های عددی را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 صحت‌سنجی کردند و سازه ۵ طبقه - ۵ دهانه بتنی را با استفاده از میراگر پیشنهادی طراحی و تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی تحت بارگذاری رفت و برگشتی و زلزله‌های شدید استهلاک؛ انرژی مناسبی خواهد داشت. ضمناً قاب بتنی دارای میراگر پیشنهادی جابه‌جایی، بام کمتر و استهلاک انرژی بیشتر و به عبارت بهتر، عملکرد لرزه‌ای مناسبی دارد.

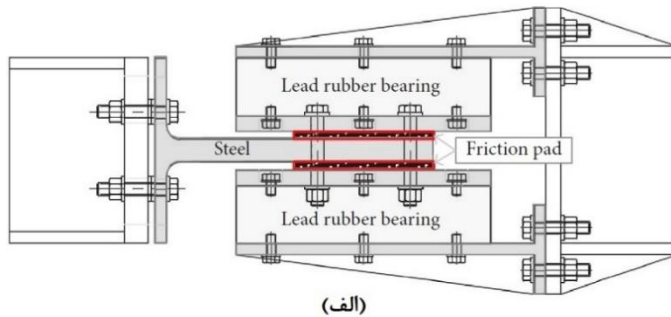
سعید منیر و همکاران (۲۰۱۳) [۲۲] میراگر اصطکاکی دورانی جدیدی را پیشنهاد و بررسی کردند. برای این منظور، آنها ابتدا میراگر پیشنهادی را با ۹ قطعه فولادی و ۹ پیچ و مهره با مقاومت بالا و به صورت مربعی که در دهانه‌های مربعی قابل نصب می‌باشد، ساختند. سپس میراگر پیشنهادی را در آزمایشگاه تحت بارگذاری هارمونیک با فرکانس 0.2 Hz و دامنه‌های $2/5$ ، $3/2$ و 5 سانتی‌متر بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که میراگر موردنظر دارای چرخه‌های هیستریزس پایداری می‌باشد. در گام بعدی، میراگر پیشنهادی را در داخل سازه فلزی یک طبقه نصب کردند و روی میز لرزه تحت چند تحریک زلزله قرار دادند. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تأثیر میراگر پیشنهادی را در قاب فلزی چند طبقه بررسی کردند. برای این منظور، ابتدا مدل آزمایشگاهی قاب فلزی به همراه میراگر پیشنهادی را در SAP2000 مدل‌سازی و تحلیل کردند و نتایج آن را با نتایج نمونه آزمایشگاهی، مقایسه کردند. سپس قاب فلزی چهار طبقه و سه دهانه در دو حالت با و بدون میراگر پیشنهادی را ارزیابی کردند. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که میراگر پیشنهادی، جابه‌جایی جانبی و برش پایه ساختمان را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است.

سایر انواع میراگرهای اصطکاکی

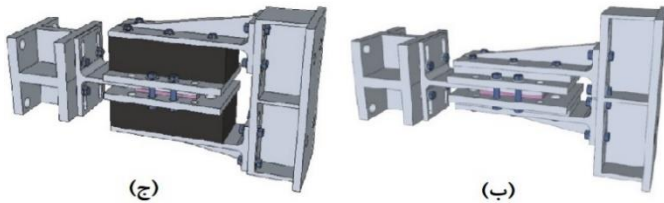
جی یون رو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۳] به بررسی آزمایشگاهی میراگر ترکیبی اصطکاکی - لاستیکی و ارزیابی عددی عملکرد آن در مقابل باد و زلزله پرداختند. برای این منظور، ابتدا میراگر پیشنهادی که در شکل ۲ نشان داده شده است را در آزمایشگاه سنجیدند.

¹ Papadopoulos

² Ji-Eun Roh



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۲. الف) مقطع میراگر پیشنهادی اصطکاکی - لاستیکی جی یون رو و همکاران [۲۳]
 ب) میراگر پیشنهادی اصطکاکی بدون لاستیک ج) میراگر پیشنهادی اصطکاکی با لاستیکی

در گام بعدی، از این میراگر در یک سازه ۲۰ طبقه که در معرض بار باد قرار دارد استفاده و عملکرد لرزه‌ای آن ارزیابی شد. همچنین در این پژوهش، از میراگر پیشنهادی برای کنترل ارتعاشات یک سازه بتنی ۱۵ طبقه بتنی استفاده شده است و عملکرد لرزه‌ای آن در مقابل بار زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی در مقابل بار باد و زلزله عملکرد خوبی و به‌عبارتی استهلاک انرژی بیشتری داشته است.

لاتور^۱ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۴] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دو نوع اتصال اصطکاکی در قاب فلزی پرداختند. برای این منظور ابتدا دو نوع اتصال دارای سطح لغزش افقی و قائم را ساختند و مورد آزمایش قرار دادند. سپس با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی و توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر دو اتصال، استهلاک انرژی خوبی داشته‌اند.

زیمبرو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۵] به بررسی عددی و آزمایشگاهی خصوصیات اصطکاکی و قابلیت استهلاک انرژی اتصالات برشی اصطکاکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد پدهایی که جنس آنها از فلز نرم یا سخت است می‌توانند در ترکیب با فولاد ضدزنگ مورد استفاده قرار گیرند و نتایج رضایت‌بخشی در استهلاک انرژی داشته باشند. همچنین تغییرات نیروی پیچ‌ها در طول لغزش میراگرها قابل توجه است؛ بنابراین طی مراحل تحلیل و طراحی، در نظر گرفتن آنها امری ضروری است و وجود واشرهای فلزی، تأثیر زیادی بر کاهش نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها نخواهد گذاشت. علاوه بر آنها در سرعت‌های بالای لغزش که دمای سطوح افزایش می‌یابد در نظر گرفتن حرارت در مدل‌سازی بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا افزایش دما سبب انبساط و انقباض پیچ‌ها و شل شدن آنها می‌شود.

¹ Latour

² Zimbru

میرزایی فر و همکاران (۲۰۱۷) [۲۶] ضریب رفتار سازه‌های فلزی مجهز به میراگرهای اصطکاکی سیلندری را محاسبه کردند. برای این منظور، آنها در گام اول، قاب‌های فولادی ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ طبقه را با نرم‌افزار SAP2000 طراحی کردند. در گام بعدی، مدل اجزای محدود قاب‌های مذکور را توسط نرم‌افزار Abaqus تحت چهار رکورد زلزله السنتره، کوبه، نرتریج و طبس، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی کردند. همچنین آنها از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده کردند و منحنی‌های پوش‌آور آنها را به دست آوردند. در نهایت برای هر قاب، ضریب رفتار در حالت تنش مجاز و مقاومت نهایی را به دست آوردند. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب رفتار سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری در حالت تنش مجاز، برابر ۱۶ و در حالت مقاومت نهایی برابر ۱۱ می‌باشد.

کیم^۱ و کیم (۲۰۱۷) [۲۷] به توسعه روش طراحی بر اساس عملکرد قاب‌های خرپایی دارای میراگر اصطکاکی و همچنین ارزیابی رفتار لرزه‌ای آنها پرداختند. برای این منظور، سازه خرپایی ۶ و ۱۲ طبقه با و بدون میراگر اصطکاکی تحلیل و براساس عملکرد طراحی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که مفصل پلاستیک در وسط قاب تشکیل می‌شود و استفاده از میراگر اصطکاکی در محلی که مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود موجب کاهش خسارات سازه‌ای و افزایش استهلاک انرژی و به عبارتی سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه می‌شود.

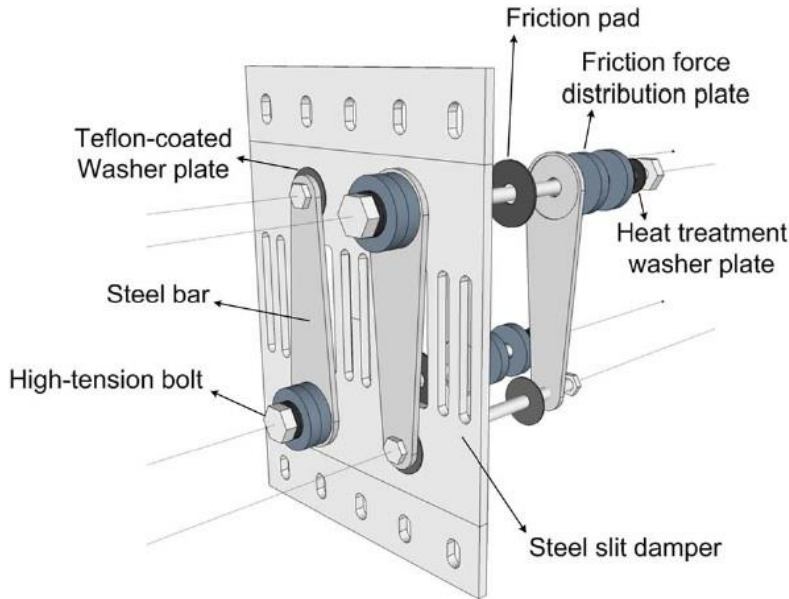
وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۷) [۲۸] به بررسی عددی و آزمایشگاهی نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی با سطح قوسی پرداختند. برای این منظور ابتدا با استفاده از روابط تئوریک رفتار هیستریزیس میراگر پیشنهادی را تخمین و گسترش دادند. سپس شش نمونه آزمایشگاهی را آزمودند. میزان بار لغزش، انرژی مستهلک‌شده، سختی مؤثر و میرایی هر نمونه را بررسی کردند. همچنین نمودار هیستریزیس حاصل از رابطه تئوریک و نمونه‌های آزمایشگاهی را مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که نتایج آزمایشگاهی با روابط تئوریک اختلاف کمی دارد. بنابراین از روابط تئوریک برای تخمین رفتار هیستریزیس میراگرهای پیشنهادی استفاده کرد. مشاهده شد که میراگرهای پیشنهادی دارای نمودار هیستریزیس، زینی‌شکل هستند. در نتیجه، با افزایش جابه‌جایی مقدار نیروی لغزش، زیاد می‌شود. همچنین مقدار نیروی لغزش در هر سیکل با میانگین نیروی لغزش همه سیکل‌ها کمتر از ۱۵ درصد اختلاف دارد.

لی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) [۲۹] به توسعه میراگرهای حساس به جابه‌جایی برای عملکرد مناسب در دو سطح زلزله پرداختند. برای این منظور در این تحقیق از میراگر فلزی تسلیم‌شونده و میراگر اصطکاکی به‌صورت موازی استفاده کردند (شکل ۳). محققان در این پژوهش ابتدا میراگری با مکانیزم اصطکاکی و فلزی تسلیمی را ساختند که برای زلزله‌های متوسط میراگر اصطکاکی فعال شود و برای زلزله‌های شدید میراگر فلزی تسلیمی به همراه میراگر اصطکاکی فعال شود. در گام بعدی، ابتدا میراگر اصطکاکی و سپس میراگر فلزی تسلیم‌شونده را به‌تنهایی و سپس میراگر ترکیبی پیشنهادی را آزمایش کردند. نتایج نمونه آزمایشگاهی نشان داد که میراگر پیشنهادی نسبت به میراگرهای اصطکاکی و میراگر فلزی تسلیم‌شونده، استهلاک انرژی بیشتری خواهد داشت. در مرحله بعدی تحقیق، میراگر پیشنهادی در نرم‌افزار LS-Dyna مدل‌سازی شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مکانیزم انتقال نیرو و همچنین رفتار پس از تسلیم میراگر فلزی بررسی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در گام پایانی بارگذاری میراگر فلزی تسلیمی دچار تسلیم و شکست خواهد شد. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار Perform 3D به مقاومت‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه بتنی دارای میراگر پیشنهادی پرداختند. نتایج نشان داد که میراگر پیشنهادی، سبب کاهش پاسخ و بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم سازه‌ای خواهد شد.

¹ Kim

² Wang

³ Lee



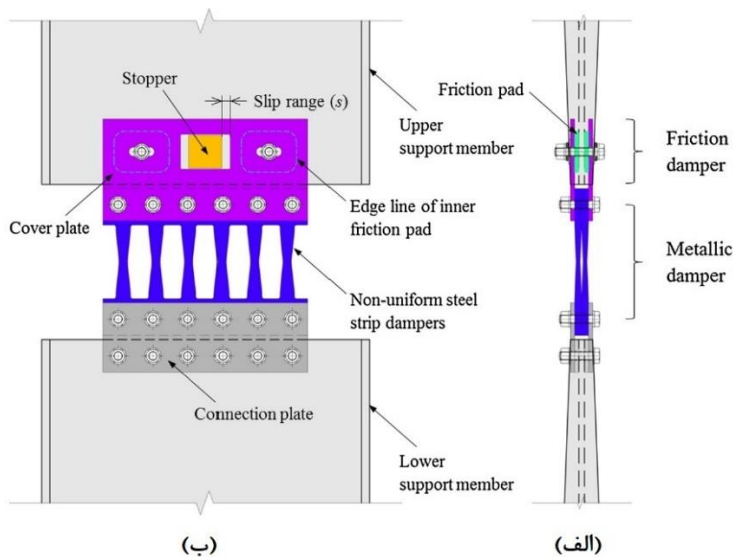
شکل ۳. میراگر اصطکاکی - تسلیمی پیشنهادی Joonho Lee و همکاران [۲۹]

مارتینز و کورادلی^۱ (۲۰۱۷) [۳۰] میراگر اصطکاکی جدید چندگانه قابل نصب روی ستون را به منظور کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ارائه دادند. برای این منظور، میراگر اصطکاکی جدید را روی ستون نصب کردند و ستون موردنظر را تحت چند رکورد زلزله ارزیابی کردند. در نهایت، مدل عددی آن را تهیه و نتایج تحلیل آن را با مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند. در گام آخر مدل wen's برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی میراگر توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی، استهلاک انرژی مناسبی دارد همچنین مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد و می‌توان از مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی لرزه‌ای میراگر پیشنهادی استفاده کرد.

بیات و زهرایی (۲۰۱۶) [۳۱] نقش میراگرها را در بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی با اتصالات صلب و نیمه‌صلب مطالعه کردند. برای این منظور، آنها قاب صلب بدون میراگر، قاب صلب به همراه میراگر اصطکاکی، قاب نیمه‌صلب بدون میراگر و قاب نیمه‌صلب به همراه میراگر اصطکاکی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت رکورد زلزله‌های کوبه، امپریال، نرتیج را تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. در نهایت، تغییر مکان، سرعت، شتاب و برش پایه حداکثر آنها با هم مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از میراگرهای اصطکاکی به همراه قاب با اتصالات نیمه‌صلب، بیشترین استهلاک انرژی یا به عبارتی، بهترین عملکرد لرزه‌ای را خواهد داشت. عزتی و همکاران (۲۰۱۷) [۳۲] به بررسی آزمایشگاهی میراگر جدید ترکیبی اینرسی اصطکاکی و مقایسه آن با میراگر دورانی ویسکوز پرداختند. آنها برای این منظور به مقایسه عملکرد سازه ۴ و ۸ طبقه فولادی تحت زلزله‌های کوبه و طبس یک‌بار به همراه میراگر ترکیبی اینرسی اصطکاکی و یک‌بار دیگر به همراه میراگرهای اینرسی ویسکوز پرداختند. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد میراگرهای اینرسی ویسکوز در مستهلک کردن انرژی، نسبت به میراگرهای اینرسی اصطکاکی، بهتر است.

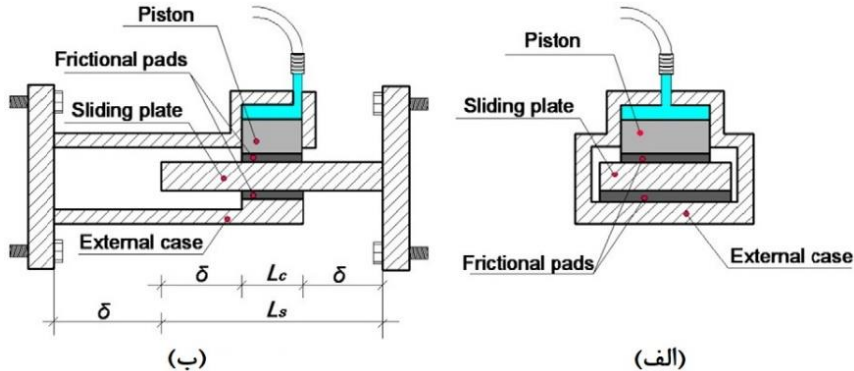
¹ Martínez and Curadelli

لی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) [۳۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی اصطکاکی- تسلیمی پرداختند. در این پژوهش، محققان ابتدا مکانیزم میراگر پیشنهادی که در شکل ۴ نشان داده شده است را توضیح دادند. در مرحله بعدی ۱۰ نمونه آزمایشگاهی ساختند و رفتار اصطکاکی، رفتار کرنشی، رفتار هیستریزس و ظرفیت استهلاک انرژی آنها را ارزیابی کردند. در نهایت، بعد از صحت‌سنجی، چهار نمونه دیگر در نرم‌افزار OpenSees ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی، استهلاک انرژی مناسبی داشته است. سامانی و همکاران (۲۰۱۵) [۳۴] نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال قابل تنظیم را ارائه دادند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است در این میراگر، فشار عمود بر سطح با استفاده از فشار هیدرولیکی تأمین می‌شود. به همین منظور، ابتدا شش نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بررسی شد.



شکل ۴. میراگر اصطکاکی-تسلیمی پیشنهادی Chang-Hwan Lee و همکاران (الف) دید از کنار (ب) دید از روبه‌رو

¹ Lee



شکل ۵. میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال قابل تنظیم پیشنهادی سامانی و همکاران (الف) دید از کنار (ب) دید از روبه‌رو

نمونه‌های آزمایشگاهی دارای فشار هیدرولیکی مختلفی بودند همچنین بارگذاری با فرکانس‌های مختلفی انجام شد. رفتار هیستریزیس، بار لغزش، انرژی مستهلک‌شده، سختی مؤثر، میرایی ویسکوز معادل برای هر نمونه آزمایشگاهی محاسبه شد و از ضوابط مربوط به آیین‌نامه ASCE41-06 قسمت میراگرهای حساس به جابه‌جایی برای کنترل کیفی میراگرها استفاده شد. در نهایت، نمونه آزمایشگاهی مدل‌سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی رفتار هیستریزیس پایدار و جذب انرژی قابل توجهی دارد.

کازمی و حسینی (۲۰۱۵) [۳۵] به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای میراگر اصطکاکی و میراگر ویسکوالاستیک و بادبند پرداختند. برای این منظور، چهار سری قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه، سری اول قاب دارای مهاربند ضرب‌دردی به‌تنهایی، سری دوم قاب دارای میراگر ویسکوالاستیک، سری سوم قاب دارای میراگر اصطکاکی و میراگر ویسکوالاستیک و سری چهارم قاب دارای میراگر اصطکاکی تحت زلزله حوزه دور و نزدیک با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شد. در نهایت، دریافت طبقات و برش پایه نمونه‌ها با هم مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگرها تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دارند. البته میراگر اصطکاکی در مقایسه با میراگر ویسکوالاستیک با افزایش ارتفاع از استهلاک انرژی آن کاسته می‌شود. عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دارای میراگر اصطکاکی دورانی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک تقریباً یکسان است.

باقری و همکاران (۲۰۱۵) [۳۶] به مقایسه میراگر پیشنهادی فلزی تسلیم‌شونده U شکل و میراگر اصطکاکی-دورانی T شکل پرداختند. برای این منظور، ابتدا جزئیات میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل نشان داده شده است. سپس قاب‌های فلزی ۵ و ۱۰ طبقه تحت تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اضافه کردن هر دو میراگر سبب بهبود رفتار لرزه‌ای سازه می‌گردد؛ به‌طوری‌که میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل پیشنهادی سبب کاهش ۶ تا ۴۰ درصدی برش پایه و ۱۳ تا ۵۷ درصدی ماکزیمم جابه‌جایی طبقات می‌شود. در حالی که میراگر اصطکاکی دورانی، سبب کاهش ۱۵ تا ۴۱ درصدی برش پایه و ۹ تا ۵۳ درصدی ماکزیمم جابه‌جایی طبقات می‌شود. به عبارت بهتر، عملکرد میراگر اصطکاکی دورانی در استهلاک انرژی زلزله، بهتر از عملکرد میراگر فلزی تسلیم‌شونده U شکل پیشنهادی می‌باشد.

میرزایی‌فرد و میرطاهری (۲۰۱۶) [۳۷] به ارزیابی لرزه‌ای و انتخاب بهینه‌ترین حالت قرارگیری میراگر اصطکاکی سیلندی در سازه‌های فلزی پرداختند. برای این منظور آنها قاب فولادی ۶ طبقه ۳ دهانه را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت زلزله سنترو تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. در قاب مذکور، از میراگر

سیلندی یک بار به صورت قطری، بار دیگر به صورت زانویی و بار سوم به صورت زانویی استفاده کردند. منحنی هیستریزیس میراگرها، پاسخ لرزهای سازه‌ها با هم و با قاب بدون میراگر اصطکاکی سیلندی مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که قاب‌های دارای میراگر سیلندی نسبت به قاب‌های بدون میراگر، عملکرد لرزهای بهتری در کاهش جابه‌جایی و نیروی برش پایه دارند. همچنین پاسخ لرزهای و انرژی مستهلک‌شده سازه دارای میراگر اصطکاکی در حالت قطری، از همه حالت‌های دیگر بهتر بود.

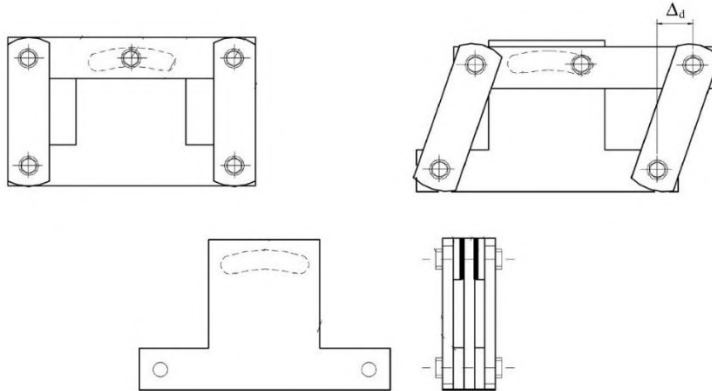
زهرایی و اعلائی (۲۰۱۶) [۳۸] ضریب رفتار سیستم دوگانه قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط و مهاربند هم‌گرا با میراگر اصطکاکی پال را بررسی کردند. برای این منظور، قاب خمشی دوگانه ۳، ۶ و ۹ طبقه در سه حالت ۳، ۵ و ۷ دهانه تحت سه رکورد زلزله چی‌چی، نورتریج و طیس در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل دینامیکی افزایشی و تحلیل استاتیکی غیرخطی شده است. در نهایت، به محاسبه ضریب رفتار پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در قاب هم‌گرا با میراگر اصطکاکی پال نسبت به سایر نمونه‌ها، ضریب رفتار تا ۱۰۰ درصد بهبود یافته است.

محمدی و همکاران (۲۰۱۳) [۳۹] به ارزیابی عملکرد لرزهای و ضریب رفتار قاب‌های خمشی مجهز به میراگر اصطکاکی پال پرداختند. برای این منظور در این پژوهش، سه عدد قاب ۳، ۵ و ۷ طبقه تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میراگرهای اصطکاکی پال سبب بهبود رفتار لرزهای سازه می‌شود. البته عملکرد لرزهای سازه دارای میراگر اصطکاکی پال با تعداد طبقات کمتر در کاهش دررفت طبقات و نیروی برش پایه، نسبت به سازه دارای میراگرهای اصطکاکی با تعداد طبقات بیشتر، بهتر است. همچنین استفاده از میراگر اصطکاکی پال، سبب افزایش ضریب رفتار می‌گردد.

برزویی و سروقدمقدم (۲۰۱۲) [۴۰] به تعیین پارامترهای مؤثر در کنترل پیچش سازه‌های نامتقارن جرمی توسط میراگرهای اصطکاکی پرداختند. برای این منظور آنها یک سازه به ازای خروج از مرکزیت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحت هفت رکورد زلزله تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند و پاسخ لرزهای سازه‌های مذکور را مقایسه و پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزهای را مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چنانچه وضعیت قرارگیری میراگرهای اصطکاکی و بار لغزشی آنها در سازه‌های نامتقارن مورد استفاده قرار بگیرد، میراگرهای اصطکاکی، توانایی کنترل پیچش ضعیف و قوی سازه‌های نامتقارن را دارند.

وو^۱ و همکاران (۲۰۰۵) [۴۱] به بررسی آزمایشگاهی نوعی از میراگرهای اصطکاکی به نام میراگر اصطکاکی پال اصلاح شده پرداختند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است محققان در این پژوهش، از یک هسته T شکل به جای هسته صلیبی شکل در میراگر اصطکاکی پال استفاده کردند. میراگر مورد نظر در یک قاب فلزی، نصب و بارگذاری کردند. مقایسه میراگر پیشنهادی در این تحقیق با میراگر اصطکاکی پال نشان می‌دهد که عملکرد و میزان انرژی جذب شده هر دو میراگر، یکسان است ولی میراگر پال اصلاح‌شده پیکربندی ساده‌تر، مکانیزم حرکتی ساده‌تر و هزینه ساخت پایین‌تری دارد.

¹ Wu



شکل ۶. میراگر اصطکاکی پال اصلاح شده

تحقیقات انجام شده در زمینه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی

نابید^۱ و همکاران (۲۰۱۹) [۴۲] به بررسی تأثیر زلزله حوزه دور و نزدیک بر بار لغزش میراگر اصطکاکی دیواری پرداختند. برای این منظور، پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتنی ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه-دهانه تحت رکورد زلزله مصنوعی، زلزله حوزه دور و زلزله حوزه نزدیک را ارزیابی کردند. آنها از ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور و ۱۰ رکورد زلزله حوزه نزدیک استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده برای محاسبه بار لغزش میراگر اصطکاکی رابطه تجربی که تابع تعداد طبقات، حداکثر شتاب زمین (PGA) و حداکثر سرعت زمین (PGV) می‌باشد را ارائه دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار حداکثر شتاب زمین (PGA) مقدار نیروی لغزش افزایش و مقدار انرژی مستهلک شده کاهش می‌یابد. همچنین در حالت کلی، مقدار نسبت نیروی لغزش بهینه برای زلزله‌های حوزه نزدیک حدود ۱/۵ برابر زلزله‌های حوزه دور بوده است.

شیرای^۲ و همکاران (۲۰۱۹) [۴۳] به بررسی آزمایشگاهی نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی با در نظر گرفتن حرکت گهواره‌ای فونداسیون حین زلزله پرداختند. برای این منظور، نمونه مقیاس شده آزمایشگاهی دارای میراگر اصطکاکی با سطح نیروی لغزش مختلف روی میز لرزان قرار داده‌اند. در پایان، برای هر نمونه آزمایشگاهی، پاسخ سازه شامل دریافت و شتاب طبقات را به دست آوردند و با هم مقایسه کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که نیروی لغزش بهینه میراگر اصطکاکی به انرژی ورودی زلزله به سازه و شرایط حرکت گهواره‌ای فونداسیون حین زلزله بستگی دارد. به علاوه هنگامی که سطح خطر افزایش می‌یابد؛ مقدار نیروی لغزش بهینه میراگر اصطکاکی افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر حرکت گهواره‌ای فونداسیون در هنگام زلزله برای بهینه کردن مقدار نیروی لغزش حتماً باید در نظر گرفته شود.

اونتیروس پروز^۳ و همکاران (۲۰۱۷) [۴۴] با توجه به اینکه رفتار میراگرهای اصطکاکی وابسته به سطح نیروی لغزش است، با استفاده از الگوی بهینه‌سازی استوار^۴ روشی برای بهینه کردن نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی و مکان‌یابی میراگرهای اصطکاکی در سازه را ارائه دادند. سپس با استفاده از این روش، سازه بتنی واقع در شهر

¹ Nabid

² Shirai

³ Ontiveros Pérez

⁴ Robust simultaneous optimization

کلومبین را طراحی و تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، باعث کاهش خرابی سازه در هنگام زلزله خواهد شد.

باقری و همکاران (۲۰۱۵) [۴۵] به تعیین مشخصه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی در طبقات مختلف قاب ساختمانی بر اساس شکل‌پذیری هدف پرداختند. هدف آنها در این تحقیق، ارائه روشی برای توزیع یکنواخت تقاضای شکل‌پذیری در ارتفاع سازه قاب خمشی مجهز به میراگر اصطکاکی بود که با استفاده از آن، بار لغزش میراگرهای طبقات مختلف به دست آید. برای این منظور، آنها سازه قاب خمشی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه را با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت سه رکورد زلزله تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی کردند. برای هر سه سازه فوق، بار لغزش میراگرها را یک بار طبق روش پیشنهادی و بار دیگر طبق روش معمولی Filiatrault & Cherry محاسبه کردند. در نهایت برای تمام سازه‌ها نمودار هیستریزیس میراگر در طبقات مختلف و مقدار شاخص خرابی^۱ را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در زلزله‌های قوی، سازه‌هایی که با روش معمولی بار لغزش آنها محاسبه و توزیع شده‌اند، احتمال خرابی زیاد است. همچنین بعد از اعمال روش پیشنهادی رفتار چرخه‌ای میراگرهای اصطکاکی بهبود یافته و میراگرها در طبقات مختلف مشارکت بیشتری در استهلاک انرژی دارد و خرابی قاب ساختمانی پس از اعمال روش پیشنهادی، کمتر است.

حق‌الهی و کرمی (۲۰۱۴) [۴۶] روشی جدید برای توزیع بار لغزش میراگر اصطکاکی به نام «میراگر اصطکاکی با لنت ترمز^۲» در ارتفاع قاب خمشی فولادی بهسازی، ارائه کرده‌اند. برای این منظور، قاب ۵ طبقه فولادی ضعیف را توسط میراگر اصطکاکی پیشنهادی، مقاوم‌سازی و بهسازی کردند. در قاب مذکور، میراگر اصطکاکی را با دو الگو یکی به صورت یکنواخت که در آن بار لغزش میراگر به صورت یکسان در ارتفاع سازه توزیع شده و دیگری به صورت نسبی که در آن، بار لغزش میراگر در هر طبقه به نسبت نیروی برشی آن طبقه توزیع شده، مورد استفاده قرار دادند. قاب ضعیف بهسازی شده با میراگر اصطکاکی تحت زلزله طیس به‌ازای بار لغزش صفر تا ۴۰ تن را مورد تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی قرار دادند و پاسخ لرزه‌ای آنها را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که قابی که در آن، میراگر اصطکاکی با الگوی نسبی توزیع شده است دارای بیشینه تغییر مکان بام و برش پایه کمتر و انرژی مستهلک شده بیشتر است. همچنین رفتار غیرخطی بهتری دارد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی ایده‌های جدید در زمینه کنترل ارتعاش سازه‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی بوده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر سعی شده است که با مرور پژوهش‌های مرتبط با میراگرهای اصطکاکی، بررسی ایده‌های جدید و همچنین مرور تحقیقات در رابطه با نحوه توزیع بار لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی به عنوان چالشی‌ترین پارامتر در طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی، شناخت بیشتری از روش کنترل ارتعاشات غیرفعال با استفاده از میراگرهای اصطکاکی حاصل گردد. در این پژوهش نتایج زیر قابل ذکر می‌باشد:

- ۱- میراگرهای اصطکاکی باعث کاهش نیاز لرزه‌ای در اعضای سازه‌ای می‌شود؛ لذا در طراحی سازه‌های جدید و بهسازی سازه‌های موجود، سبب کاهش هزینه ساخت می‌شود. همچنین در طول عمر مفید بهره‌برداری سازه، نیاز به حفظ و نگهداری ندارد و حتی پس از وقوع زلزله، نیاز به تعویض ندارد؛ بنابراین در طول عمر بهره‌برداری، هزینه زیادی به سازه اضافه نمی‌کنند.

¹ Damage Index

² Friction Brake Pad

- ۲- رفتار میراگرهای اصطکاکی، وابسته به سطح نیروی لغزش است؛ در صورتی که نیروی لغزش، کمتر از نیروی لغزش بهینه باشد میراگر اصطکاکی فعال نمی‌شود، سازه شبیه به سیستم مهاربندی شده عمل می‌کند و آسیب می‌بیند و در صورتی که نیروی لغزش بسیار بزرگ‌تر از نیروی لغزش بهینه باشد سازه شبیه به قاب مفصلی عمل می‌کند و آسیب می‌بیند؛ بنابراین تعیین دقیق میزان بار لغزش، بسیار مهم است.
- ۳- با توجه به اینکه میزان بار لغزش، تابع حداکثر شتاب ورودی به سازه است، از طرفی میراگرهای موجود اکثراً برای یک بار لغزش طراحی و ساخته می‌شوند، ضروری است میراگرهای اصطکاکی‌ای طراحی و ساخته شوند که توانایی فعال شدن در برابر دو سطح بار لغزش یا بیشتر را داشته باشند.
- ۴- زبری یا نرمی سطوح، دما، فشار وارد بر سطح و سرعت لغزش، از جمله پارامترهای مؤثر بر نیروی اصطکاک و پایداری رفتار میراگر هستند.
- ۵- میراگرهای اصطکاکی، نسبت به سایر انواع میراگرها در تغییر شکل‌های کوچک، مقدار انرژی بیشتری مستهلک می‌کنند؛ بنابراین یکی از کاربردهای این نوع میراگرها می‌تواند استفاده از آنها برای تغییر شکل‌های کوچک در سازه‌های بتنی باشد.

Reference

- [1] Khalilzadehvahidi, E., Khalil Zadeh Vahidi, P., & Moradi, R. (2019). Performance Pathology of Historic Adobe Structures and Their Methods of Retrofitting. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 16(45), 53-66. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100531.html?lang=en
- [2] Zare, M., Kamranzad, F., Parcharidis, I., & Tsironi, V. (2017, November 12). *Preliminary report of Mw7. 3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017*. E. report. https://www.emsc-csem.org/Files/news/Earthquakes_reports/Preliminary_report_M7.3_20171112_v3.pdf
- [3] Hosseini Hashemi, B., & Kiani, B. (2018). Performance of Steel Structures and Associated Lessons to be Learned from November 12, 2017, Sarpol-e Zahab-Ezgeleh Earthquake (MW 7.3). *Journal of JSEE*, 20(3), 33-46. http://www.jsee.ir/article_240778.html
- [4] Miyajima, M., Fallahi, A., Ikemoto, T., Samaei, M., Karimzadeh, S., Setiawan, H., Talebi, F., & Karashi, J. (2018). Site Investigation of the Sarpole-Zahab Earthquake, Mw 7.3 in SW Iran of November 12, 2017. *JSCE Journal of Disaster FactSheets*, 1-11. https://committees.jsce.or.jp/disaster/system/files/FS2018-E0002_0.pdf
- [5] Hosseini Hashemi, B., Kiani, B., & Farshchi, H. (2018). Performance of RC Structures and Associated Lessons to be Learned from November 12, 2017, Sarpol-e Zahab-Ezgeleh Earthquake (MW 7.3). *Journal of JSEE*, 20(3), 19-32. http://www.jsee.ir/article_240777.html
- [6] Vetr, M. G., Saeidian, M., & Naserpour, A. (2018). The Main Reasons for Great Damages of Reinforced Concrete Buildings on 12th November 2017, Sarpol-e Zahab Earthquake. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 20(3), 73-92. http://www.jsee.ir/article_240781_8cde9e1bacb23994ef33acc4a3820c2e.pdf
- [7] Soong, T. T., & Costantinou, M. C. (2014). *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. Springer Vienna. <https://books.google.com/books?id=uFMsBAAAQBAJ>

- [8] Spencer, B., Nathan, M., Newmark, & Nagarajaiah, S. (2003). State of the Art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering-ASCE* 129(7), 845-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))
- [9] Masoumnezhad, M. (2017). Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 57-79. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100505.html?lang=en
- [10] Soong, T. T. (1988). State-of-the-art review: Active structural control in civil engineering. *Engineering Structures*, 10(2), 74-84. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(88\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0141-0296(88)90033-8)
- [11] Chen, Y., Chen, C., Jiang, H., Liu, T., & Wan, Z. (2019). Study of an innovative graded yield metal damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 160, 240-254. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.028>
- [12] Anoushehei, M., Daneshjoo, F., Mahboubi, S., & Hashemi, M. H. (2018). Empirical evaluation of cyclic behavior of rotational friction dampers with different metal pads. *Scientia Iranica*, 25(6), 3021-3029. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4.225>
- [13] Gholizad, A., & Morawej Nekoo, M. (2018). Seismic Performance of a Novel Configuration of Rotational Friction Damper in X Bracings. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), 653-664. <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.8672.4555>
- [14] Bonchev, G., Belev, B., & Mualla, I. (2017). Linked columns with friction dampers as a technique for seismic retrofit of steel moment resisting frames. *ce/papers*, 1, 3092-3099. <https://doi.org/10.1002/cepa.361>
- [15] Hadianfard, m. a. (2015). Rehabilitation of Steel Structures by Using the Rotational Friction Dampers. *Journal Of Ferdowsi Civil Engineering*, 26(2), 152-162. <https://doi.org/10.22067/civil.v26i2.49196>
- [16] Barmo, A., Mualla, I., & Hasan, H. (2015). The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation (Friction, Rubber and with the Addition of Rotational Friction Dampers). *Open Journal of Earthquake Research*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.4236/ojer.2015.41001>
- [17] Shirkhani, A., Mualla, I. H., Shabakhty, N., & Mousavi, S. R. (2015). Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.016>
- [18] Sanati, M., Khadem, S. E., Mirzabagheri, S., Sanati, H., & Khosravieh, M. Y. (2014). Performance evaluation of a novel rotational damper for structural reinforcement steel frames subjected to lateral excitations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 75-84. <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0213-5>
- [19] Mirzabagheri, S., Sanati, M., Aghakouchak, A. A., & Khadem, S. E. (2015). Experimental and numerical investigation of rotational friction dampers with multi units in steel frames subjected to lateral excitation. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2), 479-491. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.05.009>
- [20] Montazer, M., Shirkhani, A., Moghaddam, M., & Rahmani, S. (2014). Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with rotational friction dampers. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2(1), 52-57. https://www.academia.edu/12087987/Incremental_Dynamic_Analysis_of_Steel_Frames_Equipped_With_Rotational_Friction_Dampers
- [21] Papadopoulos, P., Salonikios, T., Dimitrakis, S., & Papadopoulos, A. (2013). Experimental investigation of a new steel friction device with link element for

- seismic strengthening of structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 46(4), 487-504. <https://doi.org/10.12989/sem.2013.46.4.487>
- [22] Monir, H. S., & Zeynali, K. (2013). A modified friction damper for diagonal bracing of structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 87, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.04.004>
- [23] Roh, J.-E., Hur, M.-W., Choi, H.-H., & Lee, S.-H. (2018). Development of a Multiaction Hybrid Damper for Passive Energy Dissipation. *Shock and Vibration*, 2018, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2018/5630746>
- [24] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., & Landolfo, R. (2018). Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.002>
- [25] Zimbru, M., D'Aniello, M., Martino, A., Latour, M., Rizzano, G., & Piluso, V. (2018). Investigation on Friction Features of Dissipative Lap Shear Connections by Means of Experimental and Numerical Tests. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12(1), 154-169. <https://doi.org/10.2174/1874836801812010154>
- [26] Mirzaeefard, H., Mirtaheri, S. M., & Rahmani Samani, H. (2017). Response Modification Factor of Steel Structures Equipped with Cylindrical Frictional Dampers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 453-462. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.689>
- [27] Kim, J., & Kim, S. (2017). Performance-based seismic design of staggered truss frames with friction dampers. *Thin-Walled Structures*, 111, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.001>
- [28] Wang, G., Wang, Y., Yuan, J., Yang, Y., & Wang, D. (2017). Modeling and experimental investigation of a novel arc-surfaced frictional damper. *Journal of Sound and Vibration*, 389, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.11.019>
- [29] Lee, J., Kang, H., & Kim, J. (2017). Seismic performance of steel plate slit-friction hybrid dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.005>
- [30] Martínez, C. A., & Curadelli, O. (2017). Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control. *Journal of Sound and Vibration*, 399, 60-74. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.03.022>
- [31] Bayat, M., & Zahrai, M. (2016). Impact of Friction Dampers on Improving Seismic Performance of Rigid and Semi-Rigid. *Journal of Structure & Steel*, 1395(19), 67-75. <http://journalisss.ir/article-1-63-fa.html>
- [32] Experimental Studies of New Hybrid Inertia Rotational Friction Damper and the Compare of It's Performance with Inertia Rotational Viscous Damper. (2017). *Journal of Structure & Steel*, 1395(20), 23-30. <http://journalisss.ir/article-1-176-fa.html>
- [33] Lee, C.-H., Kim, J., Kim, D., Ryu, J., & Ju, Y. K. (2016). Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection. *Engineering Structures*, 114, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.007>
- [34] Samani, H. R., Mirtaheri, M., & Zandi, A. P. (2015). Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.019>

- [35] Kazemia, M. T., & Hoseini, H. (2015). Performance Evaluation of Viscoelastic and Friction Passive Damping System in Steel Structures. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(2), 1-23. http://www.qjseg.ir/article_749.html
- [36] Bagheri, S., Barghian, M., Saieri, F., & Farzinfar, A. (2015). U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. *Structures*, 3, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.04.003>
- [37] Mirzaei Fard, H., & Mirtaheri, M. (2015). Seismic evaluation and selection of optimal location of cylindrical friction dampers in steel structures. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 2(4), 18-30. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=285749>
- [38] Zahrai, S. M., & Alaei, H. (2016). Response Modification Factor for Dual System of Medium Ductility Steel Moment Concentric Braced with Pall Friction Damper. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31.2(4.2), 91-99. http://sjce.journals.sharif.edu/article_935.html?lang=en
- [39] Mahmoudi, M., Mirzaei, A., & Vosough, S. (2013). Evaluating Equivalent Damping and Response Modification Factors of Frames Equipped by Pall Friction Dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 1(1), 78-92. <https://doi.org/10.22075/jrce.2013.7>
- [40] Borzouie, J., & Moghadam, A. S. (2012). Torsional Control of Mass Eccentric One Story Buildings by Friction Dampers. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 2-28(1), 9-15. http://sjce.journals.sharif.edu/article_639.html?lang=en
- [41] Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., & Ou, J. (2005). Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. *Engineering Structures*, 27(8), 1258-1267. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.03.010>
- [42] Nabid, N., Hajirasouliha, I., & Petkovski, M. (2021). Simplified Method for Optimal Design of Friction Damper Slip Loads by Considering Near-Field and Far-Field Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(9), 1851-1875. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1605316>
- [43] Shirai, K., Nagaoka, A., Fujita, N., & Fujimori, T. (2019). Optimal Damper Slip Force for Vibration Control Structures Incorporating Friction Device with Sway-Rocking Motion Obtained Using Shaking Table Tests. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 6356497. <https://doi.org/10.1155/2019/6356497>
- [44] Ontiveros Pérez, S., Miguel, L., & Miguel, L. (2017). Robust Simultaneous Optimization of Friction Damper for the Passive Vibration Control in a Colombian Building. *Procedia Engineering*, 199, 1743-1748. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.430>
- [45] Bagheri, S., Hadidi, A., & Bastami, N. (2015). Determination of Slip Load of Friction Dampers Based on Target Ductility in Different Stories of Building Frames. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45.2(79), 1-11. https://ceej.tabrizu.ac.ir/article_3836.html?lang=en
- [46] Haghollahi, A., & Karami, S. (2014). Study of Application of Fbp Friction Damper in a Chevron Brace for Steel Frame Rehabilitation. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 30-2(2), 125-132. http://sjce.journals.sharif.edu/article_793.html?lang=en



Investigation the Effect of Lubricant Amount and Annealing of Powders on the Magnetic Properties of Sendust Magnetic Powder Cores

Maryam Amoohadi^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Mohajer, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.11.2020

Revised: 09.07.2020

Accepted: 01.20.2021

Keyword:

Sendust

Mechanical alloying

Effective permeability

Lubricant

Annealing

***Corresponding Author:**

Maryam Amoohadi

Email:

M.Amoohadi@student.pnu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, Sendust alloy ($Fe_{85}Si_{9.6}Al_{5.4}$) was fabricated by the mechanical alloy method. The obtained alloy was annealed for 2h at $1100^{\circ}C$ in the Ar atmosphere. Phase identification and morphology analysis of the milled and annealed powders were performed by X-ray diffractometer and scanning electron microscope, respectively. The results showed that the Sendust nanostructure solid solution obtained after 10h milling and after annealing the grains grew. The resulting alloy was insulated with sodium silicate adhesive and then mixed with various percentages of Zn- stearates from 0.25 to 0.75wt. %. These composites were formed by PM-method at 1600 MPa to obtain magnetic powder cores. The real and imaginary part of effective permeability and quality factor of the cores were measured with an LCR-meter. In addition, the results indicated that the green density of the core with 0.5% Zn-Stearate was higher than that of 0.25% Zn-Stearate and then remained constant. The magnetic properties of the sample were also optimized with 0.5% stearate. A comparison of the real part of permeability for the core with the unannealed and annealed powders showed that annealing of the powders resulted in an increase in the permeability and increased the Q-factor to frequencies below 200 kHz.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی اثر مقدار روان‌ساز و بازپخت پودرها بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های پودری مغناطیسی سنداست

مریم عموهادی*^۱

۱- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲	<p>در این پژوهش، آلیاژ سنداست (Fe₈₅Si_{9.6}Al_{5.4}) به روش آلیاژسازی مکانیکی ساخته شد. آلیاژ به‌دست‌آمده در فضای آرگون و دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۲ ساعت بازپخت شد. فازبندی و بررسی ریخت پودرهای آسیاب‌شده و بازپخت‌شده به‌ترتیب با پراش‌سنج پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که محلول جامد نانو ساختار سنداست پس از ۱۰h آسیاب‌کاری به‌دست آمده است و پس از بازپخت، دانه‌ها رشد کرده‌اند. آلیاژ به‌دست‌آمده، با چسب سیلیکات سدیم، عایق‌بندی و سپس با درصدهای گوناگون استنارات روی از ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد وزنی مخلوط شد. برای به دست آوردن هسته‌های مغناطیسی پودری این کامپوزیت‌ها به روش متالورژی پودر در فشار ۱۶۰۰ MPa شکل داده شدند. بخش‌های حقیقی و انگاری تراوایی مؤثر و سازه‌ی کیفیت هسته‌ها با یک LCR سنج اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که چگالی خام هسته با ۰/۵ درصد استنارات روی از ۰/۲۵ درصد بیشتر است و پس‌از آن ثابت می‌ماند. هم‌چنین ویژگی‌های مغناطیسی هسته با ۵/۵ درصد استنارات بهینه شد. مقایسه‌ی بخش حقیقی تراوایی مؤثر برای هسته با آلیاژ بازپخت نشده و شده نشان داد که بازپخت پودرها به افزایش تراوایی مؤثر می‌انجامد و تا بسامدهای کمتر از ۲۰۰ کیلوهرتز سازه‌ی کیفیت را هم افزایش می‌دهد.</p>
بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱	
<p>کلید واژگان: سنداست آلیاژسازی مکانیکی تراوایی مؤثر روان‌ساز بازپخت</p> <p>*نویسنده مسئول: مریم عموهادی پست الکترونیکی: M.Amoohadi@student.pnu.ac.ir</p>	



مقدمه

مواد مغناطیسی در بخش‌های گوناگون صنعت وارد شده‌اند. این مواد در صنعت الکترونیک، کامپیوتر و مخابرات کاربرد وسیعی دارند. این مواد به دو دسته کلی مواد مغناطیسی نرم و سخت، دسته‌بندی می‌شوند به‌طور کلی مواد مغناطیسی که در یک میدان کاربستی کوچک (کمتر از 50 Oe) [۱]، گشتاورهای مغناطیسی آنها با یکدیگر هم‌راستا می‌شوند و پس از برداشتن میدان، مقدار چشم‌گیری از مغناطش باقیمانده در آنها از میان می‌رود را مواد مغناطیسی نرم و مواد مغناطیسی که پس از برداشتن میدان کاربستی، بیشتر مغناطش ایجادشده در خود را نگه می‌دارند مواد مغناطیسی سخت می‌نامند [۱]. چرخه پسماند برای مواد مغناطیسی نرم باریک و کشیده و برای مواد مغناطیسی سخت پهن است [۲]. آهن‌رباهای همیشگی، منحنی پسماند و میدان وادارنده (میدانی که در آن مغناطش در جهت وارون برابر صفر می‌شود و گشتاورهای مغناطیسی دوباره نظم کاتوره‌ای پیدا می‌کنند) بزرگ دارند تا بتوانند مغناطش باقیمانده را در خود نگه دارند، برای این منظور در ساخت آنها می‌توان ترکیب‌هایی را که دارای کسری از موادی نامغناطیسی هستند، به کاربرد. برای نمونه می‌توان برای آهن با خلوص بالا که در آن غلظت ناخالصی کربن و نیتروژن $10-20 \text{ ppm}$ است میدان وادارنده را از 1 A/m در غلظت ناخالصی کربن و نیتروژن 100 ppm ، به چند صد آمپر بر متر رساند [۳]. مواد مغناطیسی نرم مانند فریت‌های منگنز-روی و نیکل-روی و مواد مغناطیسی فلزی مانند آهن خالص و برخی از آلیاژهای آن مانند آلیاژ آهن-نیکل، آهن-سیلیسیم، آهن-سیلیسیم-آلومینیوم به‌آسانی مغناطیده و وامغناطیده می‌شوند. این مواد مغناطیسی به‌صورت هسته‌های برگه‌برگه‌ای برای موتورهای الکتریکی به‌عنوان آهن‌رباهای موقت، ترانسفورماتورها و مدارهای کلیدزنی و به‌صورت هسته‌های پودری در کاربردهای بسامد بالا برای تغذیه مدارها به کار می‌روند. هسته‌های فریتی تراوایی مغناطیسی بالا و تلفات پایین در گستره بسامدهای بالا دارند ولی القای مغناطیسی اشباعی (B_m) پایین آنها موجب می‌شود که هسته‌های بزرگی از آنها برای یک منبع تغذیه لازم باشد. هسته‌های فولادی ورقه‌ای که هر برگه نسبت به دیگری عایق‌بندی شده است مغناطش اشباعی بالایی دارد اما به دلیل تلفات جریان گردابی بالا نمی‌تواند در بسامدهای بالا به کار رود. هسته‌های پودری مغناطیسی در بخش‌هایی از گستره بسامدی که دو دسته هسته گفته‌شده در بالا کارایی ندارند به کار می‌روند [۴]. هسته‌های پودری به‌دست‌آمده با مواد فرومغناطیسی نرم که در جریان‌های متناوب و مستقیم به کار می‌روند، به روش‌های متالورژی پودر ساخته می‌شوند. در ساخت هسته‌های مناسب برای کاربرد در جریان‌های مستقیم، پودرها به شکل دلخواه فشرده و پس‌از آن پخت می‌شوند. در این هسته‌ها گزینش مناسب آلیاژ و فرایند تفجوشی^۱ بیشترین اثر را روی ویژگی‌های مغناطیسی دارد [۵]. این هسته‌ها برای کاربرد در جریان‌های متناوب مناسب نیستند چون گرمای تولیدشده در آنها در میدان‌های متغیر بر ویژگی‌های مغناطیسی‌شان اثری ویرانگر دارد. این گرما بیشتر برآمده از تلفات هیستریسیس و جریان‌های گردابی است که به ترتیب با بسامد و مجذور بسامد متناسب هستند. هسته‌های پودری مغناطیسی نرم^۲ که با پودر آهن عایق‌بندی الکتریکی شده یا آلیاژهای فرومغناطیسی عایق الکتریکی شده آن ساخته می‌شوند، افق گسترده‌ای در کاربرد برای جریان‌های متناوب در بسامدهای چند ده کیلوهرتز تا یک مگاهرتز باز کرده‌اند [۶] عایق‌بندی مواد مغناطیسی با مواد نالئی مانند فریت‌ها [۷]، اکسیدهای فلزی گوناگون [۸] و ... و مواد آلی مانند چسب‌های رزینی به دست می‌آید. در این هسته‌ها که پودرهای عایق‌بندی شده بدون نیاز به تفجوشی در فشارهای بالا با کاربرد یک‌گونه چسب پایدار در برابر گرما شکل‌دهی می‌شوند، لایه عایقی که روی ذرات فرومغناطیسی نشاندن می‌شود مقاومت الکتریکی را افزایش داده و بدین ترتیب موجب کاهش تلفات جریان گردابی و به دنبال آن کاهش اتلاف کل در بسامدهای چندین کیلوهرتز می‌شود. برای برداشتن تنش‌های به‌وجودآمده به هنگام فشردن سرد، هسته‌های پرس شده در دمای مناسب (بالتر از 200°C) بازپخت می‌شوند. به‌طور کلی گونه ماده

¹ Sintering² Soft Magnetic Powder Core(SMCP)

فرومغناطیسی، گونه و میزان ماده عایق‌ساز، دمای بازیخت، فشار شکل‌دهی، اندازه ذرات فرومغناطیسی، گونه و میزان چسب و ماده روان‌ساز بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های پودری مغناطیسی اثر می‌گذارد [۹]. برخی آلیاژهای آهن که در ساخت هسته‌های پودری به کار می‌روند عبارتند از: آهن ۱۷ درصد - نیکل ۸۵ درصد - مولیبدن ۲ درصد با نام تجاری مولی پرآلوی^۱ و ویژگی بارز مغناطش اشباعی بالا، آلیاژ آهن-۵ درصد سلنیوم یا نام تجاری ایکس-فلاکس^۲ و ویژگی اتلاف توان پایین، آلیاژ آهن درصد و نیکل ۵۰ درصد با نام تجاری های-فلاکس^۳ و ویژگی مغناطش اشباعی بسیار بالا و سنداست^۴ با درصدهای وزنی ۸۵، ۹۱/۶ و ۵/۴ به ترتیب برای آهن، سلنیوم و آلومینیوم که هسته‌های پودری ساخته‌شده با آن به نام تجاری کول‌مو^۵ شناخته می‌شود [۱۰]. هسته‌های ساخته شده با آلیاژ سنداست به دلیل تلفات هسته پایین و مغناطش اشباعی نسبی بالا (کمتر از آهن و بیش از فریت‌ها) برای کاربرد منبع‌های تغذیه‌ی کلید زنی و ترانسفورماتورهای پالسی^۶، فلائی‌بک^۷ و روتاری^۸ مناسب هستند [۱۱]. در این پژوهش این آلیاژ به روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شد [۱۲]. هم‌چنین پژوهش‌هایی بر روی مقدار و نوع روان‌ساز برای ساخت هسته‌های آهنی انجام شده [۱۳؛ ۱۴] ولی این مقدار با توزیع اندازه ذرات تغییر می‌کند. در این مقاله اثر مقدار ماده روان‌ساز استتارات-روی بر روی چگالی و ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های به‌دست‌آمده با آلیاژی که با روش آلیاژسازی مکانیکی با اندازه توزیع ذرات کمتر از ۱۰ میکرون به دست آمده است، پژوهش شد. معمولاً در ساخت هسته‌های مغناطیسی مقدار روان‌ساز کمتر از یک درصد وزنی گزینش می‌شود چون مقادیر بیشتر روی مواد مغناطیسی باقی می‌ماند و افزایش فاز نامغناطیسی به ضعیف شدن ویژگی‌های مغناطیسی کامپوزیت می‌انجامد [۱۷]. در این پژوهش درصدهای وزنی روان‌ساز ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد انتخاب شدند. هم‌چنین اثر بازیخت پودرها بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌ها بررسی شد.

روش شناسی

مواد اولیه شامل پودر آهن (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴۵ میکرون) از شرکت آلمانی «تال پاور»، پودر سلنیوم (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴۴ میکرون) از شرکت «آلدریج» و پودر آلومینیوم (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات ۱۰۰-۲۰۰ میکرون) از شرکت «فلوکا» بودند که با درصدهای وزنی به ترتیب ۸۵ و ۹/۶ و ۵/۴ باهم مخلوط شدند. سپس این مواد با شماری گلوله فولادی به قطرهای ۷ و ۱۲ میلی‌متر در یک محفظه از همان جنس ریخته شد، به‌گونه‌ای که نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰ به ۱ شود. آلیاژسازی مکانیکی با یک دستگاه آسیاب سیاره‌ای فریتش (FRITSCH Pulverisette 6) در زمان ۱۰ ساعت و با سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه در اتمسفر آرگون انجام شد. برای تنش‌زدایی از پودرهای آسیاب شده، آنها در یک دستگاه کوره لوله‌ای الکتریکی ساخت شرکت اکسایتون و در فضای آرگون در دمای ۱۱۰۰ °C (دمای بالاتر از رشد سریع دانه برای آلیاژ سنداست [۱۵]) به مدت ۲ ساعت بازیخت شدند. الگوهای XRD در این پژوهش با یک دستگاه XRD مدل Philips X'Pert Pro با لامپ مسی با طول‌موج ۱/۵۴۰۶ آنگستروم، گرفته شده است. پس‌از آن فازبندی با نرم‌افزار X'Pert High Score و تعیین پارامتر شبکه، میانگین اندازه بلورکها با نرم‌افزار MAUD انجام شد. بررسی ریخت پودرها و اندازه ذرات پودر با یک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM, VEGA\TESCA که مجهز به بیناب‌سنج پراکندگی انرژی پرتوایکس EDS, VEGA\TESCAN انجام

¹ Molypermalloy

² X-Flux

³ Hi-Flux

⁴ Sendust

⁵ Kool Mμ

⁶ Pulse

⁷ Fly back

⁸ Rotary

شد. آلیاژ به دست آمده با ۴ درصد ماده عایق ساز سیلیکات سدیم ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$) محلول در ۴۰ درصد وزنی آب [۱۶] و استئارات روی با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد در یک هاون چینی به خوبی مخلوط شدند. سپس کامپوزیت به دست آمده با یک دستگاه پرس هیدرولیکی و با فشار ۱۶۰۰ MPa در یک قالب چنبره‌ای شکل به قطر درونی ۹/۸۵، قطر بیرونی ۱۸/۸۰ و بلندی حدود ۵ میلی‌متر، شکل داده شدند. این نمونه‌ها در دمای اتاق در هوا خشک شد. برای مقایسه یک هسته با پودرهای بازپخت نشده هم ساخته شد. این هسته‌ها با سیم مسی روکش‌دار با قطر (۰/۷ میلی‌متر) ۳۰ دور سیم‌پیچی و کمیت‌های L_S و R_S آنها با یک دستگاه LCR سنج مدل (Fluke, PM6306) در بازه بسامدی ۴ تا ۱۰۰۰ kHz در چگالی شار مغناطیسی پایین اندازه‌گیری شد. سپس بخش حقیقی تراوایی مؤثر اولیه (μ'_r) و بخش انگاری تراوایی مؤثر اولیه (μ''_r) (که معیاری از تلفات کل هسته است) و سازه کیفیت (Q) از رابطه‌های زیر محاسبه شدند [۱۷]:

$$\mu'_r = \frac{L_S I_m}{\mu_0 A_e N^2} \quad (1)$$

$$\mu''_r = \frac{R_S I_m}{\mu_0 A_e N^2 \omega} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S} \quad (3)$$

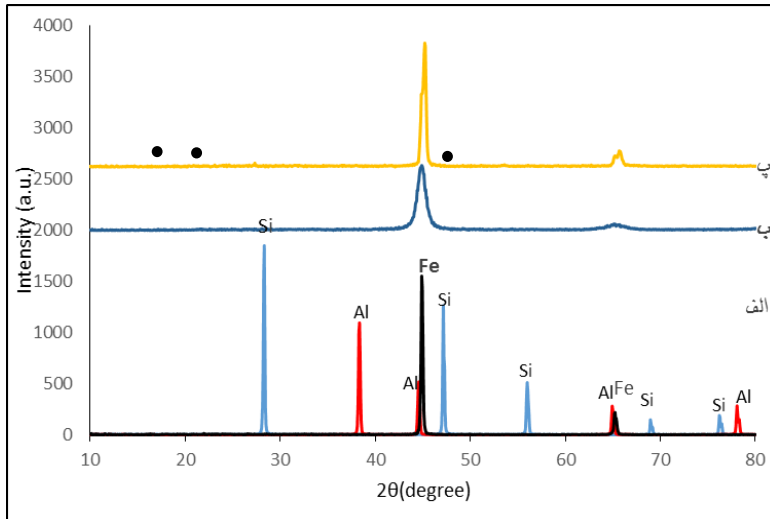
که در آن ω بسامد زاویه‌ای، L_S و R_S خودالقایی و مقاومت DC هسته در حالت سری، A_e سطح مقطع مؤثر، N تعداد دورها و I_m طول میانگین مسیر شار مغناطیسی است [۱۷].

شکل ۱، الگوهای XRD مخلوط مواد اولیه Fe, Si, Al و پودرهای آسیاب کاری شده پس از ۱۰ ساعت و پودرهای بازپخت شده در دمای ۱۱۰۰ °C را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود الگوی XRD مواد خام شامل قله‌های سه عنصر اصلی است، اما پس از ۱۰ ساعت آسیاب کاری تنها قله‌های α -Fe دیده می‌شوند که تشکیل فاز بانظم و/یا بی‌نظم آلیاژ Fe-Si-Al را نشان می‌دهد [۱۲]. با استفاده از نرم‌افزار MAUD و محاسبات بر پایه روش ریتولد [۱۸] میانگین اندازه بلورک‌ها برای پودرهای ۱۰ ساعت آسیاب شده ۱۹/۵ nm و ریزتنش ۰/۰۰۶۸ و برای نمونه‌های بازپخت شده ۱۲۵ nm و ریزتنش ۰/۰۰۰۶ به دست آمد که نشان می‌دهد پس از بازپخت دانه‌ها رشد کرده و ریزتنش‌ها حذف شده‌اند. هم‌چنین قله‌های فاز بانظم این آلیاژ (محل دایره‌های سیاه‌رنگ) در الگوی XRD پدیدار شده که نشان‌دهنده این است که پس از بازپخت آلیاژ به سمت فاز بانظم حرکت کرده است [۱۲].

در جدول ۱، چگالی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای گوناگون روان ساز آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود نخست چگالی افزایش و پس از آن، ثابت است.

جدول ۱. چگالی هسته‌ها بر حسب افزایش درصد روان ساز

درصد روان ساز	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵
چگالی (g/cm^3)	۴/۵۸±۰/۱	۴/۸۰±۰/۱	۴/۸۲±۰/۱

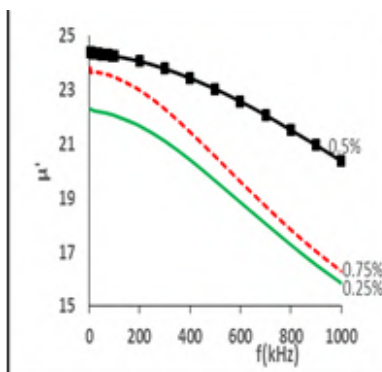


شکل ۱. الگوهای XRD (الف) پودرهای خام (ب) پودرهای ۱۰ ساعت آسیاب شده (پ) پودرهای بازپخت شده پس از آسیاب، دایره‌های سیاه محل قله‌های فاز بانظم آلیاژ است [۹].

نتایج و بحث

روان‌ساز با کاهش اصطکاک بین دیواره قالب و سطح مشترک نمونه با قالب بیرون راندن نمونه از قالب را آسان می‌کند و از خراب شدن دیواره قالب جلوگیری می‌کند. هم‌چنین با کاهش اصطکاک میان ذره با ذره و ذره با دیواره قالب، نیروی لازم برای فشردن کامپوزیت را کاهش می‌دهد و لغزیدن ذرات را روی همدیگر به هنگام فشردن آسان می‌کند [۱۴]. لغزش بهتر ذرات روی همدیگر منجر به پر شدن حفره‌های بین ذرات و افزایش کسر به هم‌پیکدگی و افزایش چگالی می‌شود. اما این افزایش چگالی به صورت خطی نیست و نقطه گذاری وجود دارد که روان‌ساز از چگال‌تر شدن بیشتر نمونه جلوگیری می‌کند [۱۹]. روان‌ساز اضافه‌شده در این پژوهش نخست موجب افزایش و پس‌از آن ثابت ماندن چگالی شده است.

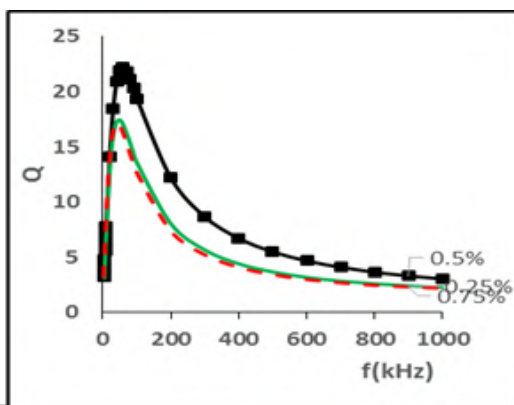
شکل ۲، منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود برای نمونه ۰/۵ درصد بخش حقیقی تراوایی مؤثر از نمونه ۰/۲۵ درصد بیشتر است. چون در هسته‌های مغناطیسی چگالی بیشتر به معنی نزدیک‌تر شدن ذرات فرومغناطیسی به همدیگر و در نتیجه کاهش طول گاف‌های هوایی بین ذرات فرومغناطیسی و افزایش تراوایی مؤثر بر اساس رابطه $\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_g}{l} \mu_r}$ [۱] است (در این رابطه μ_r تراوایی نسبی و l_g طول گاف هوایی و l طول مسیر میانگین شار مغناطیسی است). هم‌چنین تراوایی آن از نمونه ۰/۷۵ درصد بیشتر است. دلیل این رفتار را می‌توان به افزایش فاز نامغناطیسی نسبت به فاز مغناطیسی در کامپوزیت و کاهش تراوایی نسبت داد [۲۰].



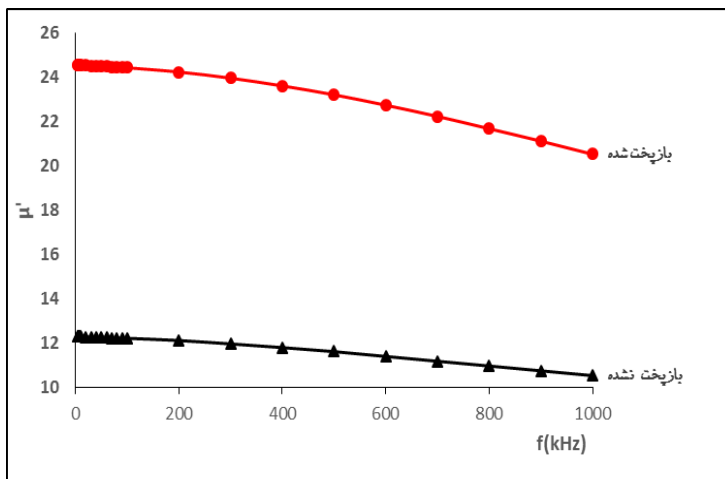
شکل ۲. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد

شکل ۳. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود سازه کیفیت که به تراوایی و تلفات هسته وابسته است برای نمونه با ۰/۵ درصد استئارات روی از همه بیش‌تر است. پس برای اندازه‌گیری بعدی درصد روان‌ساز استئارات روی را ۰/۵ گزینش می‌کنیم.

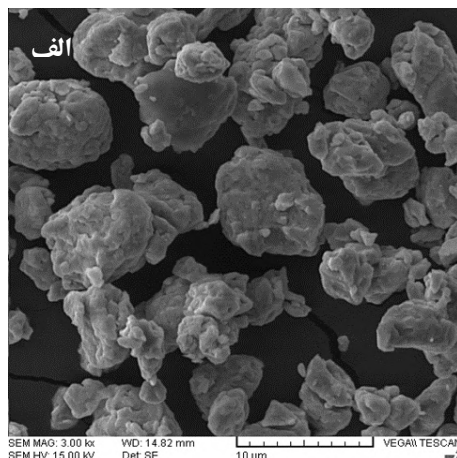
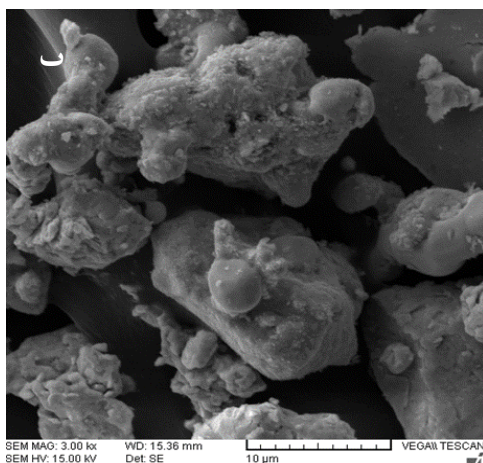
شکل ۴. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با پودرهای بازپخت‌شده و بازپخت نشده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود تراوایی مؤثر برای هسته‌های ساخته‌شده با پودرهای بازپخت شده بیش‌تر از هسته‌ها با پودرهای بازپخت نشده است. با توجه به رشد دانه که در عکس‌های SEM پودرها پیش و پس از بازپخت به‌روشنی دیده می‌شود (شکل ۵). افزایش تراوایی برای هسته‌های ساخته‌شده با پودرهای بازپخت شده را می‌توان به اثر بزرگ‌تر شدن ذرات فرومغناطیسی نسبت داد چون تراوایی نسبی رابطه مستقیم با اندازه دانه دارد [۲۱].



شکل ۳. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد



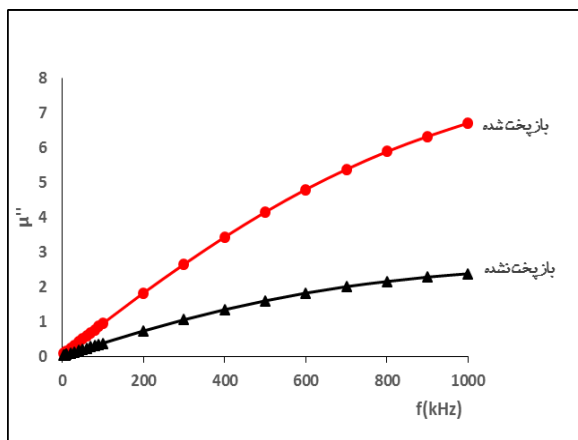
شکل ۴. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی موثر هسته‌ها با پودرهای بازیخت شده و بازیخت نشده بر حسب بسامد



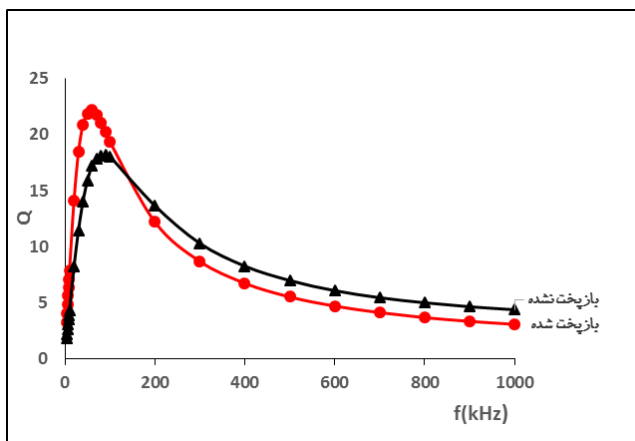
شکل ۵. عکس‌های SEM پودرهای الف) پیش و ب) پس، از بازیخت

در واقع به دلیل افزایش تراوایی تک‌تک دانه‌های مغناطیسی تراوایی مؤثر کل هسته افزایش یافته است. با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها مسیر جریان‌های گردابی بزرگ‌تر شده تلفات جریان‌های گردابی افزایش یافته و در نتیجه تلفات کل هسته که برابر است با $P_c = P_h + P_e + P_r$ (تلفات هیستریسیس، P_e تلفات جریان گردابی و P_r تلفات باقیمانده است) افزایش می‌یابد [۲۲]. بررسی تغییرات بخش موهومی تراوایی مؤثر (شکل ۶) که با تلفات رابطه مستقیم دارد این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند. در شکل ۵ می‌توان توزیع اندازه ذرات زیر ۱۰ میکرون را به‌خوبی دید.

شکل ۷، تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و نشده را نشان می‌دهد. بررسی این تغییرات نشان می‌دهد که در بسامدهای بیش از ۲۰۰ kHz سازه کیفیت برای هسته با پودرهای بازپخت شده کمتر از هسته‌ها با پودرهای بازپخت نشده است چون در بسامدهای بالا تلفات ناشی از جریان گردابی که با مجذور بسامد متناسب است بر سهم مربوط به تلفات هیستریسیس و تلفات باقی‌مانده که با بسامد متناسب است چیره می‌شود. [۲۳] و با افزایش اندازه دانه این تلفات بزرگ‌تر می‌شود. بزرگ‌تر شدن تلفات منجر به کاهش سازه کیفیت می‌شود.



شکل ۶. منحنی‌های تغییرات بخش موهومی تراوایی مؤثر هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و بازپخت نشده بر حسب بسامد



شکل ۷. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و بازپخت نشده بر حسب بسامد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آلیاژ سنداست ($Fe_{85}Si_{9.6}Al_{5.4}$) با ۱۰ ساعت آسیاب مواد خام اولیه به دست آمد. پس از بازیخت در دمای $1100^{\circ}C$ رشد دانه‌ها رخ داده است و ریزتنش‌های وارد شده به ذرات پودر به میزان چشمگیری برداشته شده است. هم‌چنین قله‌های پدیدار شده در الگوی پراش ایکس نشان‌دهنده‌ی انتقال فاز از بی‌نظم به بانظم است. چگالی خام هسته‌های پودری ساخته شده با آلیاژ برای 0.5 درصد وزنی روان‌ساز استنارات روی بیش از 0.25 درصد و پس‌از آن ثابت می‌ماند. هم‌چنین تراوایی مؤثر و سازه کیفیت برای این درصد از روان‌ساز استنارات روی، بهینه است. بازیخت پودرها به افزایش صددرصدی بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها انجامید. ولی بخش موهومی تراوایی هم افزایش یافت. در نهایت بیشینه سازه کیفیت تنها 20 درصد افزایش داشت. هم‌چنین برای بسامدهای بالا (بیش از 200 kHz) به دلیل افزایش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی و افزایش بخش موهومی تراوایی سازه کیفیت این هسته‌ها کاهش یافته و کمتر از پودرهای بازیخت نشده می‌شود. بنابراین در گستره‌ای از بسامدها که افزایش تلفات موجب فرونشانی سازه کیفیت می‌شود کاربرد هسته‌ها با پودرهای بازیخت نشده برتری دارد.

فهرست علائم

بخش حقیقی تراوایی مؤثر اولیه	μ_r'
بخش انگاری تراوایی مؤثر اولیه	μ_r''
سازه‌ی کیفیت	Q
بسامد زاویه‌ای	ω
خودالقایی هسته در حالت سری	L_S
مقاومت DC هسته در حالت سری	R_S
تعداد دورها	N
طول میانگین مسیر شار	l_m
تراوایی نسبی	μ_r
تلفات هیستریسیس	P_h
تلفات جریان گردابی	P_e
تلفات باقیمانده	P_r

تقدیر و تشکر

نویسنده از مرکز تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و سرپرستی آزمایشگاه‌های حالت جامد و ساخت مواد، در گروه فیزیک این دانشگاه جناب آقای دکتر مظفری برای استفاده از تجهیزات ساخت مواد و برخی از اندازه‌گیری‌ها کمال تشکر را دارد.

References

- [1] Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2011). *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley. https://books.google.com/books?id=fh_F0G9KuSgC
- [2] Goldman, A. (2012). *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*. Springer US. <https://books.google.com/books?id=StbgBwAAQBAJ>
- [3] Fiorillo, F., & Mayergoysz, I. D. (2005). *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. ACADEMIC PressINC. <https://books.google.com/books?id=1dwXogEACAAJ>
- [4] Liu, Y., Yi, Y., Shao, W., & Shao, Y. (2013). Microstructure and magnetic properties of soft magnetic powder cores of amorphous and nanocrystalline alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 330, 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.10.043>
- [5] Rutz, H., Hanejko, F., & Ellis, G. (1997). The manufacture of electromagnetic components by the powder metallurgy process. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 1, 1-10.
- [6] Chao, A. W., & Tigner, M. (1999). *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*. World Scientific. <https://books.google.com/books?id=XOAI moE0u2wC>
- [7] 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. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100528.html?lang=en
- [8] Faal Hamedani, N., & Shemshadi, R. (2018). Ultrasound –assisted Green Synthesis of ZnO Nanoparticles with Various Morphologies. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 15(44), 37-48. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100521.html?lang=en
- [9] Iyoda, Y., Kamiya, N., Arita, I., & Maruyama, K. (2004). Soft magnetic green compact, manufacturing method for soft magnetic green compact, and soft magnetic powder material. 1-10.
- [10] Magnetic-Inc. (2013). *Magnetics 2013 Ferrite Catalog*. Magnetic-Inc. <https://www.mag-inc.com/Media/Magnetics/File-Library/Product%20Literature/Ferrite%20Literature/Magnetics2013FerriteCatalog.pdf>
- [11] Wohlfarth, E. P., Buschow, K. H. J., & Brück, E. (1980). *Ferromagnetic Materials: A Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances*. North-Holland Publishing Company. https://books.google.com/books?id=Od_vAAAAMAAJ
- [12] Amoohadi, M., Mozaffari, M., Gharaati, A., & Reza zadeh, M. (2018). Structural and Magnetic Properties of Ordered/Disordered Sendust Powders Prepared by Mechanical Alloying. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 31(8), 2547–2552. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-4473-y>
- [13] Gegel, G. A., & Luk, S. (2002). Test Device and Method for Evaluation of Lubricants for P/M Compaction. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*(3), 3-12.
- [14] Rutz, H., Khanuja, J., & Kassam, S. (1996). Single compaction to achieve high density in ferrous P/M materials in automotive applications. *Metal Powder Industries Federation (USA)*, 13. <https://www.gknpm.com/globalassets/downloads/hoeganae/technical-library/technical-papers/test-papers/43.-single-compaction-to-achieve-high-density-in-ferrous-pm-materials-in-automotive-applications.pdf/>

- [15] Zuo, B., Sriharan, T., Teo, Y., & Damayanti, M. (2005). Effects of ternary alloying on mechano-synthesis and nano-crystal stability of an iron-silicon alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 390(1), 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.08.029>
- [16] Amoohadi, M., Mozaffari, M., Gharaati, A & Rezazadeh, M. (2018). A Comparative Study of Insulators on Magnetic Properties of Sendust Based Nanocomposite Powder Cores. *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, 3(4), 1-14. http://jopn.miau.ac.ir/article_3249.html
- [17] Snelling, E. C., & Giles, A. D. (1983). *Ferrites for Inductors and Transformers*. Research Studies Press. <https://books.google.com/books?id=24CzAAAAIAAJ>
- [18] Lutterotti, L. (2010). Total pattern fitting for the combined size-strain-stress-texture determination in thin film diffraction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(3), 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.053>
- [19] James, W. B. (2015). Powder metallurgy methods and applications. In *ASM Handbook* (Vol. 7, pp. 9-19). <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006022>
- [20] Pittini-Yamada, Y., Périgo, E. A., de Hazan, Y., & Nakahara, S. (2011). Permeability of hybrid soft magnetic composites. *Acta Materialia*, 59(11), 4291-4302. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.053>
- [21] Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2006). The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites. *Materials Science and Engineering: B*, 134(1), 41-43. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.07.015>
- [22] Snelling, E. C. (1988). *Soft Ferrites: Properties and Applications*. Butterworths. <https://books.google.com/books?id=yRNTAAAAIAAJ>
- [23] Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2007). Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>



Design of a Microstrip Bandpass Filter Using Metamaterials

Seyed Ali Hashemi Talkhouncheh^{1*}, Ahmad Basafa²

¹Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Mohajer, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

²M Sc., Department of Electrical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.27.2020

Revised: 08.13.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Microstrip Filter

Metamaterial

Split Ring Resonator (SRR)

Frequency Selection

Genetic Algorithm

***Corresponding Author:**

Seyed Ali Hashemi

Talkhouncheh

Email: ahashemi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Split ring resonators (SRR) are suitable for microwaves due to their unique properties. In this research, using metamaterials and SRR structures, a band-pass filter on the C band was designed. The main filter structure consisted of two SRRs connected with a microstrip line. The initial size of the structure, such as the radius of the rings, was estimated based on the central wavelength of the filter. In order to increase the bandwidth and the efficiency of the passage in the central frequency, genetic algorithm was used and the optimal dimensions of the filter were obtained. The change in the central frequency of the filter due to the change in the dielectric constant was investigated, and the filter stability was depicted in relation to the change in its dimensions. Compared to other existing filters, this filter, with its simplicity of structure and ease of construction, has better characteristics such as a high pass ratio at center frequency and wide bandwidth.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
اصفهان

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۲۸۰-۲۷۱

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128406

20.1001.1.23829796.1399.17.4.15.3



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی فیلتر میان‌گذر میکرواستریپ با استفاده از فرامواد

سیدعلی هاشمی طالخونچه^{*۱}، احمد باصفا^۲

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده

ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکافدار (SRR) به دلیل خواص منحصربه‌فردی که دارند، برای کاربردهای مایکروویو مناسب هستند. در این مقاله با استفاده از متامتریال‌ها و ساختارهای SRR، یک فیلتر میانگذر در باند فرکانسی C طراحی شده است. ساختار اصلی فیلتر از دو عدد SRR که با یک خط مایکرواستریپ به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. ابعاد اولیه ساختار مانند شعاع رینگ‌ها برحسب طول موج مرکزی فیلتر تخمین زده شده‌اند. به منظور افزایش پهنای باند و ضریب عبور در فرکانس مرکزی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد و ابعاد بهینه فیلتر، به دست آمدند. نحوه تغییر فرکانس مرکزی فیلتر با تغییر ثابت دی‌الکتریک بررسی شد و همچنین پایداری فیلتر نسبت به تغییر ابعاد آن به تصویر کشیده شد. این فیلتر در عین سادگی ساختار و سهولت در فرایند ساخت، در مقایسه با سایر فیلترهای موجود، دارای مشخصات خوبی مانند ضریب عبور بالا در فرکانس مرکزی و پهنای باند وسیع می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

فیلتر میکرواستریپ

فرامواد

تشدیدگر حلقوی شکافدار

فرکانس گزینی

الگوریتم ژنتیک

*نویسنده مسئول: سیدعلی هاشمی

طالخونچه

پست الکترونیکی:

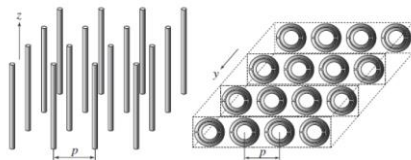
ahashemi@tvu.ac.ir



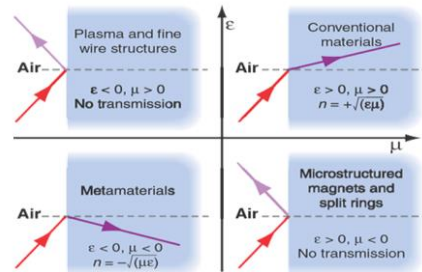
© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

فراماده یا متامتریال^۱، ماده مرکبی است که خواص نامتعارف الکترومغناطیسی می‌باشد. آنچه این مواد را غیرمعمول کرده، منفی بودن ضریب شکست نور در آنها است؛ به این معنا که این مواد، نور را در جهت مخالف مواد عادی، منکسر می‌کنند. این ویژگی، ناشی از منفی بودن گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی این مواد می‌باشد. اولین ساختارهای موفق فراماده‌ای را پندری^۲ در سال ۱۹۹۹ میلادی معرفی کرد [۱]. در شکل ۱ دسته‌بندی مواد از نظر مشخصات الکترومغناطیسی نشان داده شده است [۱]. مواد با ϵ منفی و μ مثبت از میله‌های فلزی نازک و مواد با ϵ مثبت و μ منفی از تشدیدگرهای حلقوی شکاف‌دار ساخته شدند. این ساختارها در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. در سال ۲۰۰۰ میلادی پروفسور اسمیت، این دو ساختار را با هم ترکیب کرد و اولین ساختار فراماده‌ای با ϵ منفی و μ منفی، همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، ساخته شد [۲]. با استفاده از ساختارهای فلز و دی‌الکتریک در فواصل بسیار نزدیک می‌توان به ضریب گذردهی دلخواه و حتی منفی در فرکانس موردنظر دست یافت. فیلترهای متامتریالی که از تکنولوژی میکرواستریپ و موج‌بر هم‌صفحه ایجاد می‌شوند، ابعاد کوچک و پاسخ فرکانسی خوبی دارند. با استفاده از ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار^۳، به دلیل قابلیت انتخاب‌کنندگی فرکانس می‌توان علاوه بر پهنای باند دلخواه، صفر انتقال نیز در فرکانس موردنظر ایجاد کرد.



شکل ۲. اولین ساختارهای نامتعارف معرفی شده توسط پندری



(الف) $\epsilon < 0$ و $\mu > 0$ (ب) $\epsilon > 0$ و $\mu < 0$

شکل ۱. دسته‌بندی مواد براساس مشخصات الکترومغناطیسی آنها



شکل ۳. اولین ساختار فراماده‌ای با ϵ منفی و μ منفی [۲]

¹ Metamaterial

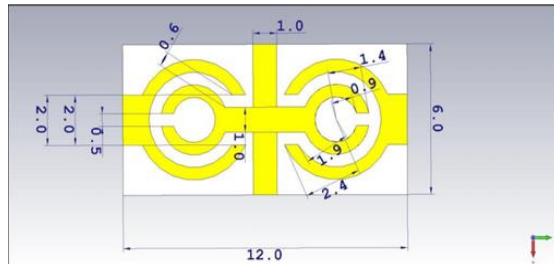
² Pendry

³ Split Ring Resonator (SRR)

در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر متامتریال در باند فرکانسی C با فرکانس مرکزی 5 GHz و پهنای باند 2 GHz طراحی شد. فیلتر پیشنهادی، نسبت به فیلترهای موجود، در عین سادگی ساخت، دارای پهنای باند بیشتری می‌باشد. به‌منظور تنظیم فرکانس مرکزی فیلتر روی 5 GHz و پهنای باند وسیع فیلتر از 4 تا 6 گیگاهرتز، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. شبیه‌سازی‌های تمام‌موج برای ساختارهای ارائه‌شده، با استفاده از نرم‌افزار CST انجام گرفت. پاسخ فرکانسی فیلتر طراحی‌شده با تغییر پارامترهای ابعاد فیلتر و خواص فیزیکی، در نمودارهایی جداگانه آورده شده است. بررسی نتایج ساختار پیشنهادی، برتری فیلتر پیشنهادی را هم از نظر پهنای باند نسبی و هم از نظر ضریب کیفیت، نسبت به فیلترهای دیگر نشان داده شده است. در ادامه، ابتدا فیلتر پیشنهادی در این تحقیق، معرفی و شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی مانند توان عبوری و توان بازگشتی در نمودارهای جداگانه نمایش داده شدند. پایداری این فیلتر، نسبت به تغییرات ابعاد فیلتر بررسی شد و در نهایت، پارامترهای فیلتر پیشنهادی با فیلترهای متامتریال طراحی‌شده در سایر مراجع مقایسه گردید و برتری فیلتر پیشنهادی نسبت به آنها تأیید شد.

روش طراحی

طرح اولیه فیلتر پیشنهادی، با مطالعه ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار (SRR) به وجود آمد [۳؛ ۴]. یک SRR دارای مشخصه فرکانسی مناسبی برای کاربرد در فیلترها را دارد ولی تاکنون تنها از ساختارهای پیچیده SRR برای فیلتر بهره‌برده شده است. در این مقاله، نوآوری اصلی استفاده ساده از دو SRR سری‌شده برای فیلتر متامتریال مایکروویو است. فیلتر پیشنهادی این مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است. در این فیلتر، موج الکترومغناطیس از یک خط میکرواستریپ وارد ساختار فیلتر می‌شود و پس از رزونانس با خازن و سلف ساختار SRR، توسط خط میکرواستریپ دیگری به ساختار رینگ رزوناتور مجزا شده سمت چپ، هدایت می‌گردد و در نهایت، به خروجی فیلتر که یک خط میکرواستریپ است، وارد می‌شود و در این فرایند، فرکانس‌های اطراف فرکانس مرکزی فیلتر حذف می‌شوند [۵-۹].



شکل ۴. ساختار و ابعاد فیلتر طراحی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود از یک خط میکرواستریپ به صورت عمودی استفاده شده است که این خط میکرواستریپ، حالت پایداری فیلتر را بیشتر می‌کند. ایده استفاده از خط میکرواستریپ عمودی از اینجا به ذهن خطور کرد که در مدارات و فیلترهای فرکانس پایین که از عناصر فشرده استفاده می‌شود، معمولاً از یک سلف یا خازن موازی برای بهینه‌کردن مشخصات فیلتر استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه خط میکرواستریپ عمودی، مانند یک خازن با صفحه زمین عمل می‌کند و همچنین با صفحه زمین تشکیل حلقه و در نهایت خاصیت سلفی می‌دهد، در شبیه‌سازی از آن استفاده شد و این نتیجه حاصل گردید که با تنظیم دقیق ابعاد خط میکرواستریپ عمودی بدون افزایش پیچیدگی ساختار، می‌توان خروجی‌های فیلتر را بهبود بخشید. جنس بخش

فلزی ساختار، به علت قابلیت دسترسی آسان، فلز مس انتخاب گردید. البته طلا و نقره، تلفات کمتری دارند ولی به علت قیمت بالا از آنها صرف نظر شد. برای برقراری روابط متامتریال بر ساختار فلز- عایق باید لایه فلزی، ضخامت کمتر از $\lambda/10$ میلی متر داشته باشد. در طراحی فیلتر پیشنهادی، ضخامت پچ فلزی حدود ۳۵ میکرومتر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که ضخامت پچ، رابطه مستقیم با فرکانس مرکزی دارد و برای مثال ۳۵ میکرومتر برای فرکانس مایکروویو مناسب است و در فرکانس‌های تراهرتز و نوری ضخامت باید در حد نانومتر باشد. ابعاد اولیه برای ساختار پیشنهادی فیلتر، از تناسب رابطه (۱) به دست می‌آید. این تناسب از آنجا آمده که برای ایجاد رزونانس در یک قطعه فلزی به طول L ، باید رابطه تقریبی (۱) بین طول قطعه و طول موج رزونانس برقرار باشد.

$$L \approx \frac{\lambda}{2} \Rightarrow L = \frac{C}{2f} \quad (1)$$

از آنجایی که در ساختار، صفحه هادی زمین شده وجود دارد، با استفاده از قضیه تصویر در هادی‌های زمین شده، باید ابعاد اصلی ساختار، نصف شود تا با خود تصویر به اندازه L واقعی دست یافت.

$$L = \frac{C}{2f} \Rightarrow L' = \frac{L}{2} = \frac{C}{4f} \quad (2)$$

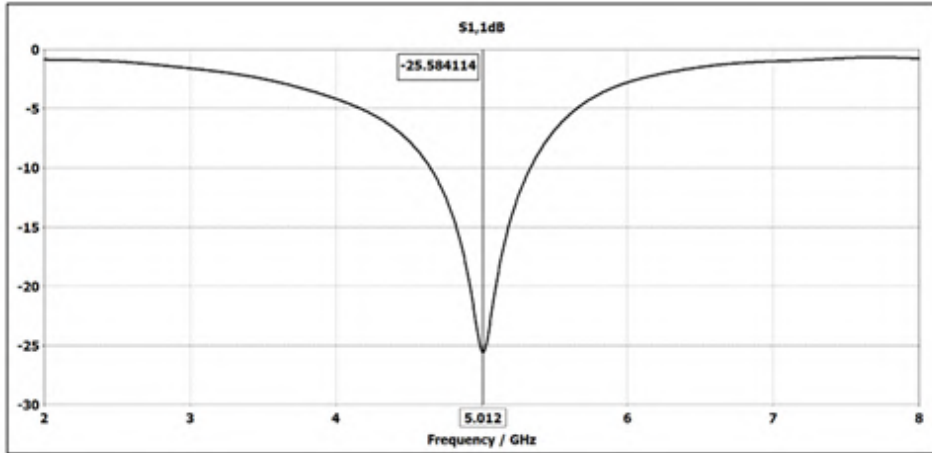
با توجه به اینکه مطلوب است که فیلتر مورد نظر در فرکانس ۵ گیگاهرتز رزونانس کند، می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محیط تقریبی رینگ‌ها و از آنجا حدود شعاع اولیه را به دست آورد.

$$L = \frac{C}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 5 \times 10^9} = 1.5 \times 10^{-2} = 15 \text{ mm} = 2\pi r \Rightarrow r \cong 2.3 \text{ mm} \quad (3)$$

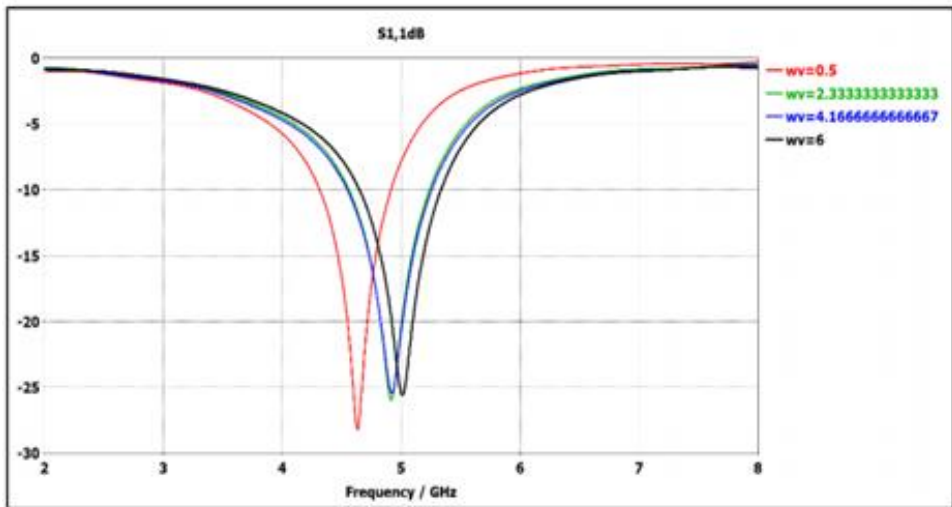
این شعاع تقریبی رینگ‌ها است. در ابتدا، ابعاد، با توجه به عدد به دست آمده تنظیم شد و سپس شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CST انجام گرفت که نتایج به دست آمده بیانگر عدم کارکرد صحیح فیلتر بود. در این مرحله، با استفاده از نرم‌افزار CST و انتخاب الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌ساز و متغیر قرار دادن چند پارامتر مانند ضخامت زیرلایه و جنس زیرلایه، ابعاد نشان داده شده در شکل ۴ که مقادیر بهینه است به دست آمد [۱۰]. این الگوریتم با الگوبرداری از روش تکامل ژنتیکی موجودات زنده عمل می‌کند و پارامترهای مختلف فیلتر (ابعاد) را تغییر می‌دهد و با روش‌های خاصی آنها را در هم آمیخته تا به هدف نهایی نزدیک شود و بهترین نتایج را تحویل دهد.

شبیه‌سازی

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تطبیق فرکانس مرکزی روی ۵ گیگاهرتز، عایق بین صفحه زمین و رزوناتورها از جنس آلومینا با خلوص ۹۶ درصد، ضریب گذردهی الکتریکی ۹.۴ و ضخامت بهینه ۲.۴ میلی‌متر استفاده شد. در ادامه، ساختار رینگ‌های رزوناتوری در باند فرکانس ۴ تا ۶ گیگاهرتز نمایش داده می‌شود. سپس وابستگی فرکانس مرکزی به ضریب شکست نمایش داده می‌شود و در پایان با توجه به اینکه ساختار قابلیت متامتریالی و تغییر ضریب گذردهی الکتریکی را دارد، نتیجه گرفته می‌شود که می‌توان به راحتی با تغییر ضریب گذردهی الکتریکی، فرکانس مرکزی فیلتر را جابه‌جا کرد. نرم‌افزار استفاده شده برای شبیه‌سازی CST می‌باشد که یک شبیه‌ساز تمام‌موج است. در شکل ۵ ضریب انعکاس موج (S_{11}) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در محدوده فرکانسی ۴ تا ۶ گیگاهرتز، این ضریب کمتر از -3 دسی‌بل می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مطلوب سیستم است. در شکل ۶ تغییرات فیلتر بهینه‌سازی شده نسبت به پهنای مایکرواستریپ عمودی ساختار نشان داده شده است.



شکل ۵. ضریب انعکاس فیلتر

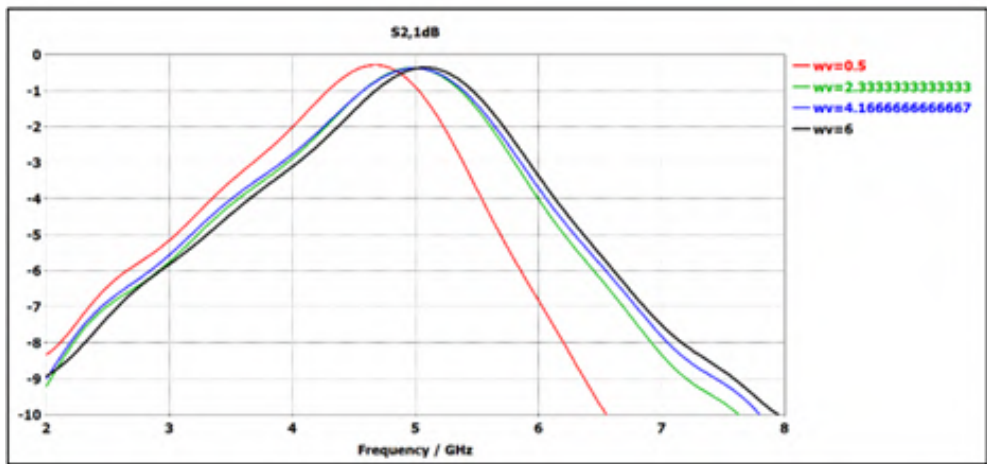


شکل ۶. ضریب انعکاس فیلتر نسبت به تغییرات پهنای میکرواستریپ

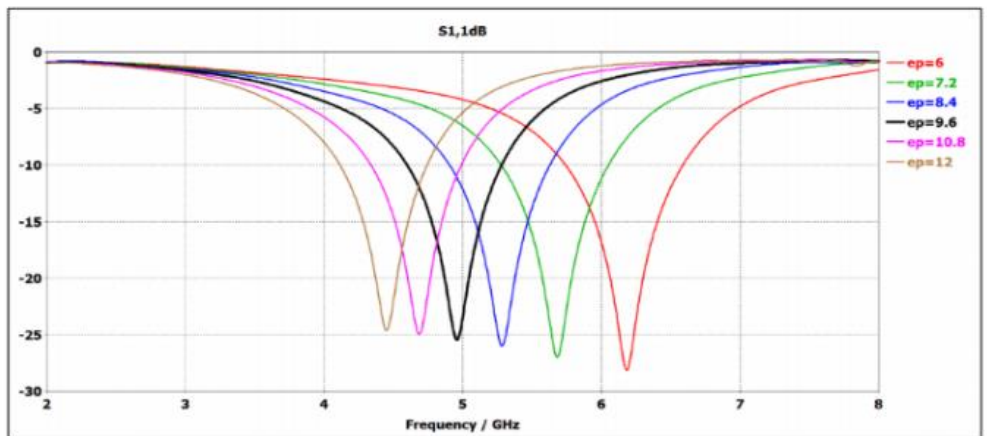
همان‌طور که در شکل ۶ پیداست در پهنای ۶ میلی‌متری ساختار، فرکانس مرکزی دقیقاً روی ۵ GHz قرار می‌گیرد. اهمیت میکرواستریپ عمودی، در پایدار کردن مشخصه یا تابع تبدیل فیلتر طراحی شده می‌باشد و در برخی باندهای فرکانسی می‌تواند حذف شود.

با توجه به شکل ۷ ضریب عبور فیلتر در بازه فرکانسی ۴ تا ۶ گیگاهرتز بالای ۳- دسی بل است که نشان‌دهنده کارایی خوب فیلتر می‌باشد. با تغییر پهنای میکرواستریپ عمودی، فقط فرکانس مرکزی جابه‌جا شده است و تغییر چندانی روی پهنای باند سیستم ندارد.

در شکل ۸ میزان حساسیت فرکانس مرکزی و پهنای باند سیستم، نسبت به تغییر ضریب گذردهی الکتریکی فیلتر نشان داده شده است. با افزایش ضریب گذردهی الکتریکی، مقدار فرکانس مرکزی، کاهش می‌یابد و با کاهش ضریب گذردهی، مقدار فرکانس مرکزی افزایش می‌یابد. از این خصوصیت فیلتر می‌توان در طراحی فیلتر متامتریال با فرکانس مرکزی متغیر، بهره برد؛ زیرا در بسیاری از مواد متامتریال که در ساختارشان از فریت‌ها استفاده شده است، می‌توان با تغییر بایاس الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی زیرلایه را تغییر داد. همان‌گونه که می‌دانیم در ساختارهای عایق و فلز در فرکانس خاص و پهنای عایق موردنظر، ضریب گذردهی الکتریکی می‌تواند متغیر باشد. پس می‌توان با طراحی متامتریال و تغییر مشخصه آن، این ضریب را تحت کنترل درآورد و طبیعتاً فرکانس مرکزی فیلتر را کنترل کرد و به دلخواه تغییر داد.



شکل ۷. ضریب انتقال فیلتر نسبت به تغییرات پهنای میکرواستریپ



شکل ۸. تغییرات فرکانس مرکزی با تغییر ضریب گذردهی الکتریکی

مقایسه

برای مقایسه فیلترها، چون ممکن است فرکانس مرکزی متفاوت باشد، از پهنای باند نسبی یا ضریب کیفیت فیلتر به عنوان پارامتر قیاس استفاده می‌شود. تعاریف پهنای باند نسبی ($BW\%$) و ضریب کیفیت یک فیلتر (Q) عبارتند از:

$$\% BW = \frac{f_{max} - f_{cmin}}{f_0} \times 100 \quad Q = \frac{1}{\% BW} \quad (۴)$$

پهنای باند نسبی، در حقیقت، معکوس ضریب کیفیت است. با استفاده از این پارامتر می‌توان فیلترهایی که اندکی در فرکانس مرکزی متفاوت هستند را با هم مقایسه کرد. این مقایسه در جدول ۱ بین طرح پیشنهادی و مراجع معتبر آورده شده است [۱۵-۱۰]. در برخی از مراجع، ضریب کیفیت فیلتر داده شده که تبدیل به پهنای باند نسبی شده است. فرکانس مرکزی فیلترهای مراجع بین ۱/۵ تا ۵ گیگا هرتز متغیر است. همچنین مرجع [۱۲] یک فیلتر دوباندی است که جمع پهنای باندهای نسبی در دو فرکانس مرکزی در نظر گرفته شده‌اند. منظور از دقت ساخت در جدول ۱، حداقل ابعاد فیزیکی به کاررفته در ساخت تجهیز می‌باشد. برای مثال اگر ضخامت یک پیچ ۱/۰۰۱ میلی‌متر باشد، سختی فرایند ساخت، بیشتر از زمانی است که یک پیچ به ضخامت ۱/۰۱ میلی‌متر ساخته شود؛ زیرا هم به دقت بیشتر و هم به ابزار و تجهیزات دقیق‌تری نیاز است که این باعث افزایش هزینه فرایند ساخت نیز می‌شود. با توجه به مقایسه به عمل آمده در جدول ۱ مشخص است که فیلتر پیشنهادی در این مقاله، بالاترین پهنای باند و کمترین هزینه ساخت را دارد.

جدول ۱. مقایسه فیلترها

نوع فیلتر	پهنای باند نسبی	ضریب کیفیت	دقت ساخت (mm)
پیشنهادی فیلتر	۵۲٪	۱.۹۲۳	۰.۱
فیلتر مرجع [۱۵]	۲۶٪	۲.۷۷۸	۰.۰۰۱
فیلتر مرجع [۱۱]	۲۸٪	۳.۵۷۱	۰.۱
فیلتر مرجع [۱۴]	۳۴٪	۲.۹۴۱	۰.۰۱
فیلتر مرجع (فیلتر دو بانده) [۱۲]	۲۶٪	۳.۸۴۶	۰.۰۰۱
فیلتر مرجع [۱۳]	۱۰٪	۱۰	۰.۱

نتیجه‌گیری

از نتایج شبیه‌سازی و بررسی تغییرات پارامترهای مختلف ساختار پیشنهادی می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که مؤثرترین عامل در کارایی یک فیلتر مایکرواستریپ، زیرلایه آن می‌باشد. با انتخاب مناسب‌ترین ضریب گذردهی الکتریکی و ضخامت زیرلایه می‌توان به بهینه‌ترین فیلتر دست یافت. از خصوصیات مثبت فیلتر طراحی شده، نازکی و سبکی آن می‌باشد. با توجه به سادگی شکل‌های پیچ فلزی، پیچیدگی ساخت آن نیز کم است و می‌توان با کمترین هزینه آن را ساخت. با مقایسه فیلتر پیشنهادی با فیلترهای دیگر تحقیقات، برتری پارامترهای خروجی فیلتر پیشنهادی، واضح است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که با تغییر ضریب گذردهی زیرلایه، فرکانس مرکزی جابه‌جا می‌شود؛ بنابراین با استفاده از ساختارهای ماتریال و به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک می‌توان فیلترهای ماتریال با فرکانس مرکزی دلخواه، طراحی کرد. همچنین با کاربرد مواد مغناطیس فعال یعنی

موادی که با بایاس یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی ساکن می‌توانند دارای ضرایب گذردهی متفاوتی باشند، می‌توان فیلترهای متامتریال فعال که قابلیت تنظیم فرکانس مرکزی را دارند، طراحی کرد. این نوع تجهیزات در ادوات فعال مایکروویو پر کاربرد می‌باشند.

References

- [1] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
- [2] Smith, D. R., Padilla, W., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S., & Schultz, S. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [3] Berka, M., Hebali, M., Baghdad Bey, A., Bennaoum, M., & Mahdjoub, Z. (2019). Miniaturization of the Bandpass Microwave Filter Based on Spiral Metamaterial Resonator. *ICTACT Journal on Microelectronics*, 4(4), 693-696. <https://doi.org/10.21917/ijme.2019.01120>
- [4] Statsenko, L. G., Pugovkina, O. A., Galay, A. R., & Kuzin, D. A. (2019). Designing Microwave Filters Using Metamaterials. *Key Engineering Materials*, 806, 167-172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.806.167>
- [5] Hong, J. S. G., & Lancaster, M. J. (2004). *Microstrip Filters for RF / Microwave Applications*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=vj0hz1KUAXoC>
- [6] Kildishev, A., Prokopenva, L., & Narimanov, E. (2010). Cylinder light concentrator and absorber: Theoretical description. *Optics express*, 18(16), 16646-16662. <https://doi.org/10.1364/OE.18.016646>
- [7] Narimanov, E. E., & Kildishev, A. V. (2009). Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber. *Applied Physics Letters*, 95(4), 041106. <https://doi.org/10.1063/1.3184594>
- [8] Wen, D.-e., Helin, Y., Ye, Q., Li, M., Guo, L., & Zhang, J. (2013). Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure. *Physica Scripta*, 88(1), 015402-015408. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/88/01/015402>
- [9] Yu, Z., Liu, S., Fang, C., Huang, X., & Helin, Y. (2015). Design, simulation, and fabrication of single-/dual-/triple band metamaterial absorber Design, simulation, and fabrication of single-/dual-/triple band metamaterial absorber. *Physica Scripta*, 90(6), 065501-065506. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/6/065501>
- [10] Basafa, A. (207). *Design and Feasibility of Fabrication of Metamaterial Filter in C-Band with a Central Frequency of 5 GHz*. [MSc. Thesis, Islamic Azad University University, Majlesi Branch]. Tehran, Iran.
- [11] BalaSenthilMurugan, L., Raja, S. A. A., Chakravarthy, S. D., & Kanniyappan, N. (2012). Design and Implementation of a Microstrip Band-Stop Filter for Microwave Applications. *International Conference on Modelling Optimization and Computing, Procedia Engineering*, 38(Special Issue), 1346-1351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.166>
- [12] Cheng, Y. H., Peng, H. S., & Chiang, Y. C. (2015, September 7-10). *Design of tunable dual-band filter with multiple types of resonators* 2015 European Microwave Conference (EuMC), Paris, France. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7345788>

- [13] Ishizaki, T., Tamura, M., Allen, C. A., & Itoh, T. (2008, June 15-20). *Left-handed band pass filter realized by coupled negative order resonators* 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, GA, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4633250>
- [14] Liu, Y., Tang, X., Zhang, Z., & Huang, X. (2013). Novel nested split-ring-resonator (SRR) for compact filter application. *Progress In Electromagnetics Research*, 136, 765-773. <https://doi.org/10.2528/PIER12121306>
- [15] Martel, J., Bonache, J., Marques, R., Martin, F., & Medina, F. (2007). Design of Wide-Band Semi-Lumped Bandpass Filters Using Open Split Ring Resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17(1), 28-30. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.887246>



Magnetic Hyperthermia Investigation of Cobalt Ferrite Nanoparticles

Ahmad Reza Yasemian^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Basic Sciences, Faculty of Shahid Rajaei, Kashan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 05.03.2020

Revised: 10.06.2020

Accepted: 16.01.2021

Keyword:

Cobalt ferrite
Co-precipitation
Magnetic properties
Specific Loss Power

***Corresponding Author:**

Ahmad Reza Yasemian

Email:

ar_yasemian2000@yahoo.com

ABSTRACT

The effect of magnetic hyperthermia on dissolution of cobalt ferrite nanoparticles in distilled water was investigated. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles (CoFe_2O_4) was performed by Co-precipitation method at 80°C , with precursor including iron and cobalt salts in the presence of air atmosphere. CTAB was used as a surfactant in this synthesis. The particle structure and morphology as well as the structure and magnetic properties of these nanoparticles were studied by X-ray diffraction (XRD) field emission scanning electron microscopy (FESEM) and vibrational sample magnetometer (VSM), respectively. Sample magnetic hyperthermia was measured after preparation of ferrofluid with a concentration of 3 mg/ml in distilled water and in an ac magnetic field with a frequency of 400 kHz and a field intensity of 400 Oe. The increase in sample temperature over time was determined and its specific heat dissipation power (SLP) was measured. According to the measurement results, the sample SLP was 151 W/g.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر هایپر ترمیای مغناطیسی نانوذرات فریت کبالت

احمدرضا یاسمیان*¹

۱- استادیار، دپارتمان علوم پایه، دانشکده فنی و حرفه‌ای شهید رجایی کاشان، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تأثیر هایپر ترمیای مغناطیسی حاصل از حل شدن نانوذرات فریت کبالت در آب مقطر بررسی شد. ساخت نانوذرات فریت کبالت (CoFe_2O_4) با روش هم رسوبی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، با پیش ماده شامل نمک‌های آهن و کبالت و در حضور اتمسفر هوا انجام شد. در این ساخت، از ستیل تری متیل آمونیوم برومید (CTAB) به عنوان سورفکتانت استفاده شد. ساختار نانوذرات از لحاظ اندازه، ریخت شناسی و نیز ساختار و ویژگی‌های مغناطیسی‌شان، به ترتیب توسط مشخصه یاب‌های پراش اشعه ایکس (XRD) میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FESEM) و دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM) مطالعه شدند. اندازه گیری هایپر ترمیای مغناطیسی نمونه، پس از تهیه فروفلوئید با غلظت

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

کلید واژگان:

فریت کبالت
هم رسوبی
ویژگی‌های مغناطیسی
توان اتلاف ویژه حرارتی

$\left(\frac{3\text{mg}}{\text{ml}}\right)$ در محیط آب مقطر و در میدان مغناطیسی ac با فرکانس ۴۰۰ کیلوهرتز و شدت میدان ۴۰۰ اورستد انجام شد. افزایش دمای نمونه در بازه‌های زمانی مورد نظر مشخص و توان اتلاف ویژه حرارتی (SLP) آن اندازه گیری شد. طبق نتایج حاصل از اندازه گیری، SLP نمونه برابر ۱۵۱ W/g به دست آمد.

*نویسنده مسئول: احمدرضا یاسمیان

پست الکترونیکی:

ar_yasemian2000@yahoo.com



مقدمه

امروزه، روش‌های متعددی برای درمان سرطان وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته روش‌های سنتی نظیر جراحی، شیمی‌درمانی و تابش‌درمانی و روش‌های پیشرفته نظیر هورمون‌درمانی و هایپرترمی‌درمانی (یا گرمادرمانی) دسته‌بندی می‌شوند که دسته اول، درمان‌های تهاجمی محسوب می‌شوند [۱؛ ۲]. در علم پزشکی، گرمادرمانی به روشی از درمان سرطان اطلاق می‌شود که در آن بافت سرطانی در معرض یک افزایش دمایی بیشتر از دمایی فیزیولوژیک بدن ($^{\circ}\text{C}$ ۳۷) تا حدود $^{\circ}\text{C}$ ۸-۶ قرار می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های بارز سلول‌های سرطانی نسبت به سلول‌های سالم بدن، حساسیت و آسیب‌پذیری بیش از حد آن‌ها به گرما می‌باشد؛ به‌طوری که یک افزایش دمایی بیشتر از $^{\circ}\text{C}$ ۶ می‌تواند به‌طور کامل باعث نابودی آن‌ها شود. از این‌رو از میان نانوذرات مختلف، نانوذرات مغناطیسی به دلیل داشتن توانایی تولید گرما می‌توانند گزینه مناسبی در این زمینه باشند [۳؛ ۴].

نانوذرات مغناطیسی هنگامی که در معرض یک میدان مغناطیسی متناوب قرار می‌گیرند، توانایی تبدیل انرژی الکترومغناطیسی جذب شده از میدان به حرارت را دارند و به‌عنوان یک چشمه گرما عمل می‌کنند [۵-۱۰]. بهره‌گرایی نانوذرات مغناطیسی، مبتنی بر انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری کالری‌متری هایپرترمیای مغناطیسی است. بدین ترتیب که پس از آماده‌سازی نمونه به‌صورت فروفلوئید، از دستگاه اندازه‌گیری هایپرترمیای مغناطیسی (با کاربرد یک میدان مغناطیسی متناوب با شدت و فرکانس معین) افزایش دمایی فروفلوئید اندازه‌گیری می‌شود. با رسم منحنی گرما- زمان و محاسبه شیب اولیه، توان اتلاف ویژه^۱ (SLP) با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$SLP = C \frac{m_{\text{sample}} \Delta T}{m_{\text{MNPs}} \Delta t} \quad (\text{W/g}) \quad (1)$$

در معادله (۱)، C ظرفیت گرمایی ویژه حلال، m_{sample} جرم نمونه، m_{MNPs} جرم نانوذرات مغناطیسی و $\frac{\Delta T}{\Delta t}$

شیب اولیه نمودار افزایش دما- زمان (منحنی گرما- زمان) می‌باشد [۱۱-۱۵].

توانایی تبدیل انرژی الکترومغناطیسی جذب‌شده به گرما توسط نانوذرات مغناطیسی با کاربرد میدان مغناطیسی با سازوکارهای متفاوتی انجام می‌شود. این سازوکارها اتلاف حلقه پسماند (لوپ هیستریزیس) و واهلش‌های نیل و براونی را شامل می‌شود.

سازوکار اتلاف حلقه پسماند، در مواردی که ماده، دارای حلقه پسماند می‌باشد بروز می‌کند و بنابراین مواد فرومغناطیس و فری‌مغناطیس در طبقه‌بندی این سازوکار قرار می‌گیرند. سازوکارهای واهلش نیل و واهلش براونی برای ذرات سوپرپارامغناطیسی هستند. در سازوکار واهلش نیل، چرخش دوقطبی‌های مغناطیسی داخل نانوذرات است که باعث تبدیل انرژی الکترومغناطیسی جذب‌شده به حرارت می‌شود و در سازوکار واهلش براونی چرخش فیزیکی خود ذرات در سیال باعث تبدیل انرژی به حرارت می‌شود [۱۶-۲۱].

روش ساخت (بخش تجربی)

ساخت نانوذرات فریت کبالت، با روش هم‌رسوبی انجام شد. اساس روش هم‌رسوبی بر پایه واکنش کاهش نمک‌های دو و سه ظرفیتی از پیش‌ماده‌های مربوطه در حضور یک احیاکننده قوی مانند NaOH می‌باشد. بدین منظور از ۲ میلی‌مول نمک سه‌ظرفیتی آهن $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ و ۱ میلی‌مول نمک دوظرفیتی کبالت $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ استفاده شد. ساخت نانوذرات در دمایی $^{\circ}\text{C}$ ۸۰ و در حضور اتمسفر هوا و با استفاده از ستیل‌تری‌متیل‌آمونیم‌برومید (CTAB) به‌عنوان سورفکتانت انجام شد. مدت‌زمان واکنش، نیم ساعت بود ($\text{pH}=12$) و نانوذرات فریت کبالت

¹ Specific Loss Power

به دست آمده موجود در محلول نمونه، ابتدا به کمک آهن ربا جمع آوری و سپس چند بار توسط آب مقطر و اتانول شستشو داده شد که به همراه آن، چندین مرتبه از سانتریفیوژ (۶۰۰۰ rpm) و به مدت ۵ دقیقه) استفاده شد. رسوبهای حاصل با قرار گرفتن در کوره با دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت خشک شدند و پودر نانوذرات به دست آمد.

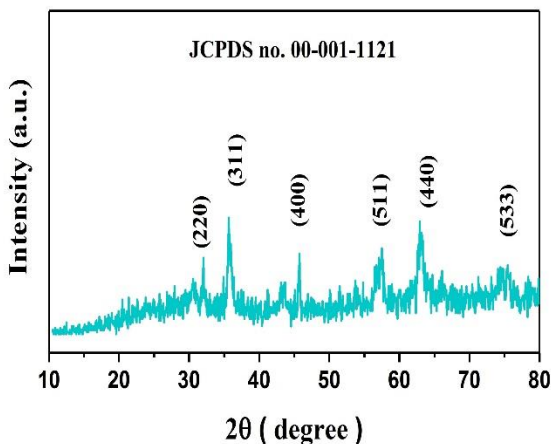
مشخصه یابی ها

پس از ساخت نانوذرات فریت کبالت، ساختار بلوری و اندازه بلورکها توسط مشخصه یاب^۱ XRD مشخص شد. از مشخصه یاب^۲ FESEM برای شناخت ریخت شناسی و اندازه گیری قطر ذرات استفاده شد. از حلقه پسماند با استفاده از مغناطیس سنج نمونه مرتعش^۳ VSM برای ویژگی های مغناطیسی نانوذرات استفاده شد.

نتایج

شکل ۱ الگوی XRD نانوذرات فریت کبالت ساخته شده که قله های آن با کارت داده اطلاعاتی (JCPDS No. 00-001-1121) تطبیق داده شده اند را نشان می دهد. میانگین اندازه بلورکها با استفاده از رابطه شرر که با معادله (۲) بیان می شود محاسبه شد:

$$d_{XRD} = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$



شکل ۱. الگوی XRD نمونه ساخته شده

که در آن λ ، طول موج اشعه x با هدف مس و β (برحسب رادیان) که نشان دهنده پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM) بود و θ زاویه پراش براگ می باشد.

¹ X-Ray Diffraction

² Field-Emission Scanning Electron Microscopy

³ Vibrating Sample Magnetometer

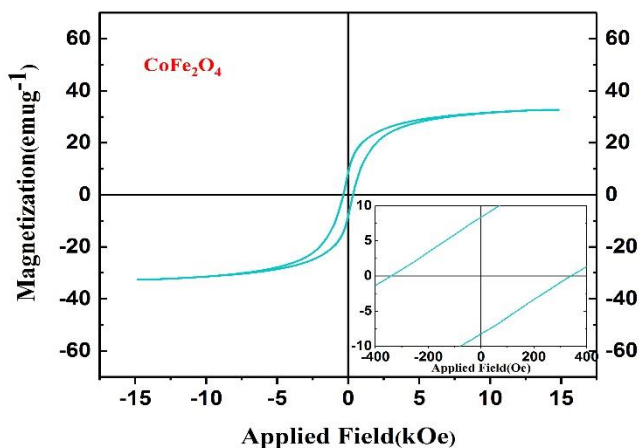
میانگین اندازه بلورکها (حاصل از مشخصه یاب XRD به همراه میانگین قطر ذرات (حاصل از مشخصه یاب FESEM) و نیز ویژگی های مغناطیسی در جدول ۱ آورده شده اند. حلقه پسماند نمونه ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده که مغناطش اشباع و میدان وادارندگی مستخرج از آن در جدول ۱ آورده شده اند. نمودار بزرگ نمایی شده حلقه پسماند جهت وضوح مقدار میدان وادارندگی نیز در داخل شکل آورده شده است.

برای درک جزئیات بیشتر در مورد ویژگی های مغناطیسی نمونه ها، پس از اندازه گیری حلقه پسماند، از مشخصه یابی منحنی بازگشتی مرتبه اول^۱ FORC به عنوان ابزاری قدرتمند و به نوعی تأییدکننده اطلاعات حاصل از حلقه پسماند استفاده شده است. نمودار مربوطه در شکل ۳ آمده است. یکی از خروجی های مهم مشخصه یاب FORC تعیین درصد نانوذرات سوپر پارامغناطیس (SP%) موجود در نمونه است که مقدار محاسبه شده این کمیت برای نمونه ساخته شده ۲۵ درصد بود که در جدول ۱ نیز آورده شده است.

تصویر FESEM به همراه نمودار توزیع سایز نانوذرات در شکل نشان داده شده است که میانگین اندازه ذرات محاسبه شده از روی این تصویر (با استفاده از نرم افزار DigiMizer) در جدول ۱ آمده است.

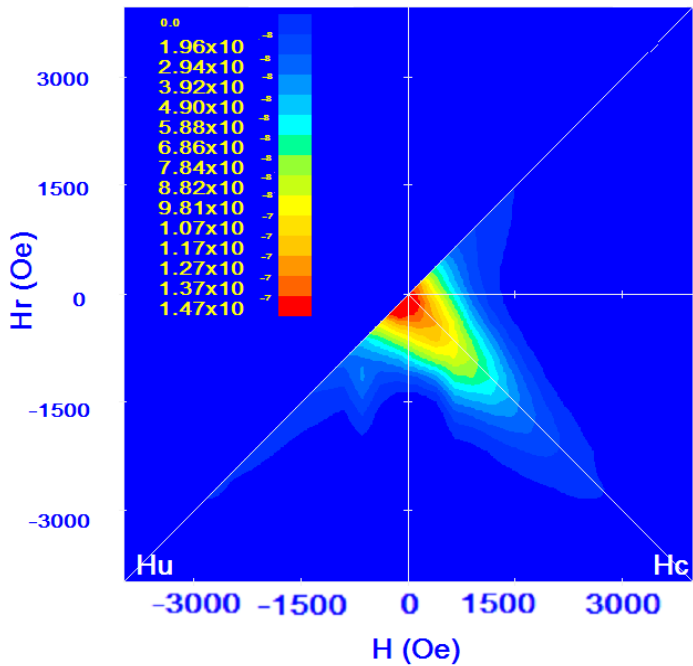
جدول ۱. مشخصه های ساختاری (میانگین اندازه بلورکها و میانگین قطر ذرات نمونه به ترتیب از XRD و FESEM) و مشخصات مغناطیسی حاصل از VSM و FORC

Sample	d_{XRD} (nm)	d_{FESEM} (nm)	M_s (emu/g)	HC (Oe)	SP Fraction (%)
CoFe ₂ O ₄	۱۵/۳	۳۰	۳۲/۷	۳۴۰/۵	۲۵

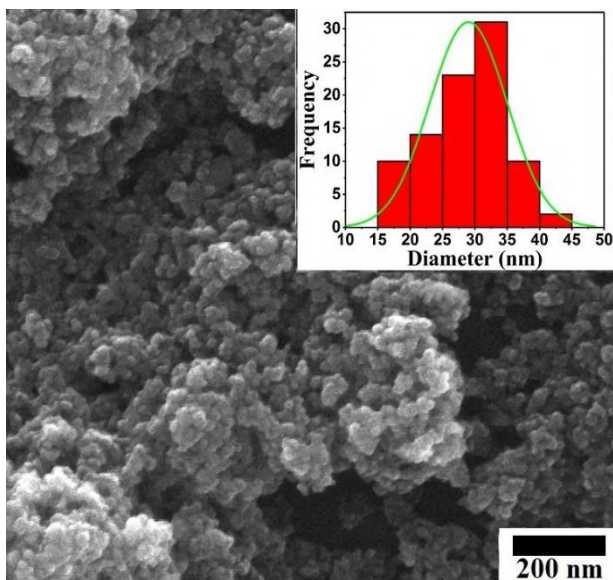


شکل ۲. منحنی مغناطش نانوذرات ساخته شده

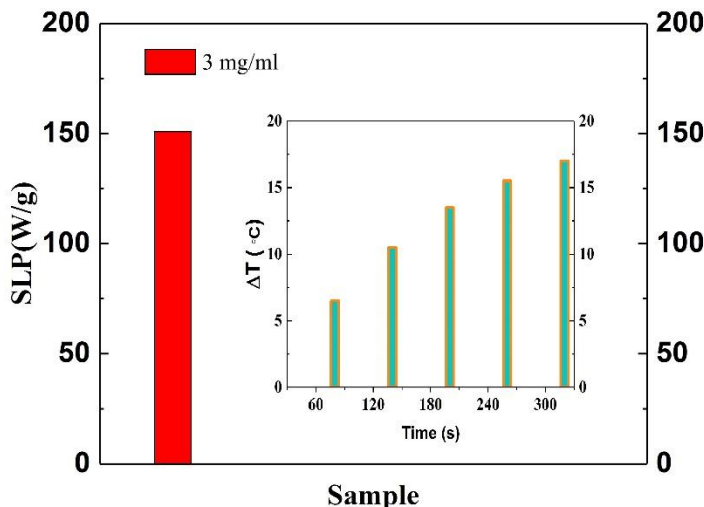
^۱ First-order reversal curve



شکل ۳. نمودار FORC نانوذرات نمونه



شکل ۴. تصویر FESEM نانوذرات فریت کبالت ساخته شده



شکل ۵. مقادیر افزایش دما و مقدار SLP نمونه

شکل ۵ نمودار افزایش دمای نمونه در معرض میدان مغناطیسی متناوب با شدت ۴۰۰ اورستد و فرکانس ۴۰۰ کیلوهرتز در بازه زمانی ۵ دقیقه به همراه مقدار SLP نمونه را نشان می‌دهد.

به‌منظور اندازه‌گیری‌های هایپرترمیای مغناطیسی برای محاسبه SLP، ابتدا فروفلوئید شامل نانوذرات با غلظت $(\frac{3mg}{ml})$ در محیط آب مقطر آماده شد و برای پخش‌شدگی نانوذرات از حمام همگن‌ساز به مدت ۳۰ دقیقه به کار رفت.

حرارت تولیدشده توسط نانوذرات توسط یک دستگاه هایپرترمیای مغناطیسی اندازه‌گیری شد. فروفلوئید مربوطه در دستگاه هایپرترمیای در معرض میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس ۴۰۰ KHZ و شدت میدان ۴۰۰ اورستد قرار گرفت. مقدار SLP با استفاده از معادله (۱) در پایان دقیقه اول محاسبه شد. مقدار SLP برابر ۱۵۱ W/g اندازه‌گیری شد که با توجه به کارهای انجام شده توسط دیگران [۲۲] مقدار مطلوبی به شمار می‌رود.

با توجه به جدول ۱ میدان وادارندگی نمونه، مقدار نسبتاً بالایی است (قابل ملاحظه بودن مساحت داخل حلقه پسماند) که باعث می‌شود در رقابت بین سازوکارهای اتلاف حلقه پسماند و واهلش‌های نیل و براونی، سازوکار اتلاف حلقه پسماند نقش غالب را داشته باشد. به‌طور متناظر مقدار SP% (25%) نیز تأییدکننده این مطلب است که به دلیل پایین بودن درصد نانوذرات سوپرپارامغناطیس موجود در نمونه سهم دو سازوکار دیگر یعنی نیل و براونی، نقش چندانی ندارد.

نتیجه‌گیری

نانوذرات فریت کبالت ($CoFe_2O_4$) با ریخت‌شناسی شبه‌کروی با روش هم‌رسوبی ساخته شدند. میانگین قطر ذرات برابر ۳۰ نانومتر تخمین زده شدند. مشخصه‌یابی‌های مغناطیسی انجام‌شده نشان دادند که نمونه محتوی ۲۵ درصد نانوذرات سوپرپارامغناطیس می‌باشد. در اندازه‌گیری هایپرترمیای مغناطیسی نمونه با غلظت $(\frac{3mg}{ml})$ در محیط آب مقطر مقدار SLP نمونه برابر برابر ۱۵۱ W/g محاسبه شد.

بالا بودن مقدار میدان وادارندگی ذرات نمونه (۳۴۰/۵ Oe) و به موازات آن، پایین بودن مقدار SP% نمونه نشان می‌دهند که از میان سه سازوکار مؤثر در تولید گرما سازوکار اتلاف حلقه پسماند، نقش غالب را دارد و تأثیر دو سازوکار دیگر یعنی واهلش‌های براونی و نیل قابل صرف‌نظر است.

References

- [1] Beik, J., Abed, Z., Ghoreishi, F. S., Hosseini-Nami, S., Mehrzadi, S., Shakeri-Zadeh, A., & Kamrava, S. K. (2016). Nanotechnology in hyperthermia cancer therapy: From fundamental principles to advanced applications. *Journal of Controlled Release*, 235, 205-221. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.05.062>
- [2] Rosensweig, R. E. (2002). Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252, 370-374. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00706-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00706-0)
- [3] Jordan, A., Scholz, R., Wust, P., Fähling, H., & Roland, F. (1999). Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201(1), 413-419. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00088-8)
- [4] Overgaard, J. (1985). *Hyperthermic Oncology, 1984: Review lectures, symposium summaries and workshop summaries*. Taylor & Francis. <https://books.google.com/books?id=r6RrAAAAMAAJ>
- [5] Gordon, R. T., Hines, J. R., & Gordon, D. (1979). Intracellular hyperthermia a biophysical approach to cancer treatment via intracellular temperature and biophysical alterations. *Medical Hypotheses*, 5(1), 83-102. [https://doi.org/10.1016/0306-9877\(79\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0306-9877(79)90063-X)
- [6] Medal, R., Shorey, W., Gilchrist, R., Barker, W., & Hanselman, R. (1959). Controlled radio-frequency generator for production of localized heat in intact animal: Mechanism and construction. *AMA Archives of Surgery*, 79(3), 427-431.
- [7] Nemati, Z., Alonso Masa, J., Rodrigo Arrizabalaga, I., Das, R., Garaio, E., Garcia, J., Orue, I., Phan, M.-H., & Srikanth, H. (2018). Improving the Heating Efficiency of Iron Oxide Nanoparticles by Tuning Their Shape and Size. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(4), 2367-2381. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10528>
- [8] Périgo, E., Hemery, G., Sandre, O., Ortega, D., Garaio, E., Plazaola, F., & Teran, F. (2015). Fundamentals and advances in magnetic hyperthermia. *Applied Physics Reviews*, 2(4), 041302. <https://doi.org/10.1063/1.4935688>
- [9] Pradhan, P., Giri, J., Rieken, F., Koch, C., Mykhaylyk, O., Döblinger, M., Banerjee, R., Bahadur, D., & Plank, C. (2010). Targeted temperature sensitive magnetic liposomes for thermo-chemotherapy. *Journal of Controlled Release*, 142(1), 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2009.10.002>
- [10] Yasemian, A. R., Almasi Kashi, M., & Ramazani, A. (2019). Surfactant-free synthesis and magnetic hyperthermia investigation of iron oxide (Fe₃O₄) nanoparticles at different reaction temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 230, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.032>
- [11] Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2011). *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley. https://books.google.com/books?id=fh_F0G9KuSgC

- [12] Hedayatnasab, Z., Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2017). Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application. *Materials & Design*, 123, 174-196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.036>
- [13] Jagoo, M. Z. (2012, March). *Radio-Frequency Heating of Magnetic Nanoparticles* [MSc Thesis, School of Graduate Studies, Department of Physics, Wright State University]. Dayton, United States. https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1695&context=etd_all
- [14] Lu, A. H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(8), 1222-1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
- [15] Reitz, J. R., Milford, F. J., & Christy, R. W. (2009). *Foundations of Electromagnetic Theory*. Pearson/Addison-Wesley. <https://books.google.com/books?id=vNVDPgAACAAJ>
- [16] Carrey, J., Mehdaoui, B., & Respaud, M. (2011). Simple models for dynamic hysteresis loop calculations of magnetic single-domain nanoparticles: Application to magnetic hyperthermia optimization. *Journal of Applied Physics*, 109, 083921. <https://doi.org/10.1063/1.3551582>
- [17] Hergt, R., Dutz, S., Müller, R., & Zeisberger, M. (2006). Magnetic particle hyperthermia: nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18(38), S2919-S2934. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/38/s26>
- [18] Lukawska, A. B. (2014). *Thermal Properties of Magnetic Nanoparticles in External ac Magnetic Field* [MSc Thesis, Graduate School, Department of Physics, Wright State University]. Dayton, United States. https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2342&context=etd_all
- [19] Mehdaoui, B., Meffre, A., Carrey, J., Lachaize, S., Lacroix, L. M., Gougeon, M., Chaudret, B., & Respaud, M. (2011). Optimal size of nanoparticles for magnetic hyperthermia: a combined theoretical and experimental study. *Advanced Functional Materials*, 21(23), 4573-4581. <https://doi.org/10.1002/adfm.201101243>
- [20] Obaidat, I., Issa, B., & Haik, Y. (2015). Magnetic Properties of Magnetic Nanoparticles for Efficient Hyperthermia. *Nanomaterials*, 5(1), 63-89. <https://doi.org/10.3390/nano5010063>
- [21] Thanh, N. T. K. (2018). *Clinical Applications of Magnetic Nanoparticles: From Fabrication to Clinical Applications*. CRC Press. <https://books.google.com/books?id=p8JKDwAAQBAJ>
- [22] Shahjuee, T., Masoudpanah, S. M., & Mirkazemi, S. M. (2017). Coprecipitation Synthesis of CoFe₂O₄ Nanoparticles for Hyperthermia. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 50(2), 105-110. <https://doi.org/10.22059/jufgns.2017.02.04>



Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061

Peyman Ghasemi Tamami^{1*}, Abootaleb Javadimanesh², Saeid Mardani³

¹PhD Student, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

²Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Mohammad Bagher, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

³B. Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Mohammad Bagher, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.25.2020

Revised: 12.25.2020

Accepted: 01.16.2021

Keyword:

Friction stir welding
Aluminum alloys 5010 and 6061
Finite element simulation
Optimization

*Corresponding Author:

Peyman Ghasemi Tamami

Email:

Engghasemi696@gmail.com

ABSTRACT

The feasibility of joining AA6061 and AA5010 by FSW is one of main purposes of the current research. First, 9 experiments were conducted with aim of optimal pin profile design. These experiments were designed by using various straight cylindrical, square and triangular pin profiles under different frictional conditions. Results of the first stage indicated that the tool with square pin profile leads to the highest tensile strength, hardness and elongation. All process steps were simulated in finite element software and the results were analyzed. Hence, this tool was applied for conducting the second stage of experiments. Experiments of second stage were designed and performed with the aim of investigating the effect of tool rotary speed, welding speed and plunge depth on tensile strength, hardness and elongation and selection of optimal factors combination which result in maximal mechanical properties. In the second stage, the central composite design of experiments was used to conduct experiments and to model mechanical properties accurately and find the optimal solution, the neural network was integrated with particle swarm optimization (PSO). Results demonstrated that the neural network with topography of 3-11-3 yields superior prediction. In addition, tool rotary speed of 800 RPM, welding speed of 60 mm/min and plunge depth of 0.2 mm is the optimal combination that leads to maximal tensile strength, hardness and elongation.





بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلومینیوم ۵۰۱۰ به آلومینیوم ۶۰۶۱

پیمان قاسمی تمامی^{۱*}، ابوطالب جوادی منش^۲، سعید مردانی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، دپارتمان ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.
- ۳- کارشناسی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

هدف این پژوهش، امکان‌سنجی اتصال آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلومینیوم ۵۰۱۰ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. در ابتدا تعداد ۹ آزمایش با هدف طراحی بهینه هندسه بین ابزار انجام می‌شود. این آزمایش‌ها با سه هندسه بین استوانه‌ای، مثلثی و مربعی و تحت شرایط مختلفی از پارامترهای ورودی فرایند انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بین هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی شده است. تمامی مراحل اجرای فرایند در نرم‌افزار امان محدود شبیه‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده بررسی شد. مرحله دوم آزمایش‌ها با هدف بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیش‌روی جوش و عمق غوطه‌وری بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی و انتخاب ترکیب بهینه‌ای از پارامترها که سبب بیشترین مقدار ممکن خواص مکانیکی شوند، طراحی و اجرا شده است. در این مرحله، از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده و جهت ایجاد مدل دقیق از خواص مکانیکی و انتخاب پارامترهای بهینه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم اجتماع ذرات ترکیب شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شبکه عصبی با ساختار ۳-۱۱-۳ کمترین خطا را در پیش‌بینی خواص مکانیکی خواهد داشت. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۲ میلی‌متر، جواب‌های بهینه‌ای است که سبب رسیدن به استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی مطلوب خواهد شد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۱۰ و ۶۰۶۱
شبیه‌سازی امان محدود
بهینه‌سازی

*نویسنده مسئول: پیمان قاسمی تمامی

پست الکترونیکی:

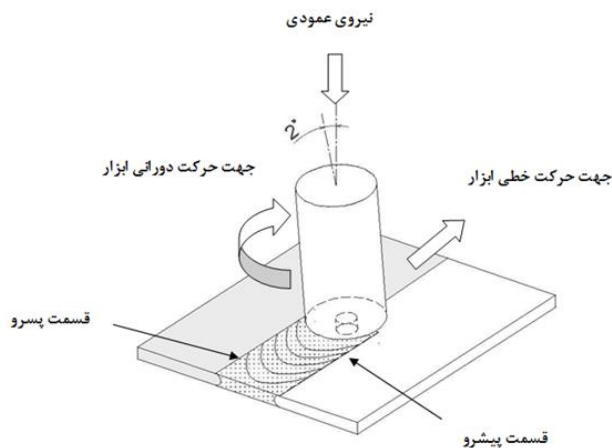
Engghasemi696@gmail.com



مقدمه

امروزه فرایندهای جوشکاری در حوزه اتصالات قطعات صنعتی، از جایگاه خاصی برخوردار هستند؛ به گونه‌ای که صنعت مهندسی به سازه‌ها و قطعات جوشکاری شده وابستگی کامل دارد. جوشکاری، رایج‌ترین فرایند در اتصالات فلزی است و در واقع پرکاربردترین روش ساخت و تولید محصولات صنعتی می‌باشد. به گونه‌ای که جوشکاری، نقش کلیدی در کلیه صنایع و زیرساخت‌ها ایفا می‌کند. جوشکاری حالت جامد، فرایندی است که عمل اتصال، زیر درجه حرارت ذوب فلز پایه شکل می‌گیرد [۱]. در نتیجه عمل اکسیداسیون رخ نخواهد داد و استفاده از گاز محافظ، محیط خنثی و مواد مصرفی ضرورتی ندارد. روش‌هایی مانند جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری فراصوتی^۱ و جوشکاری نفوذی از فرایندهای حالت جامد محسوب می‌شوند. سه عامل مهم زمان، درجه حرارت و فشار، نوع اتصال جوشکاری را تعیین می‌کنند. با توجه به اینکه در این فرایندها ذوب صورت نمی‌گیرد، عیوب کمتری در مقایسه با روش‌های ذوبی در اتصال ایجاد می‌شود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ در مؤسسه جوش انگلستان^۲ ابداع گردید [۲]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نوعی از فرایند جوشکاری حالت جامد است که اولین بار برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم استفاده شد. هدف اصلی، فرایند ایجاد اتصال بین موادی است که جوشکاری آنها با روش‌های ذوبی مشکل بوده یا امکان‌پذیر نمی‌باشد. در شکل ۱ شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و پارامترهای تأثیرگذار بر آن نشان داده شده است [۳].

جوشکاری اصطکاکی، اغتشاشی ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک و سیلان شدید ماده در منطقه جوش است. الگوی سیلان ماده و توزیع دما در منطقه اتصال توسط پارامترهای جوشکاری تعیین می‌شوند و این پارامترها بر ریزساختار این ناحیه تأثیر مستقیم دارند [۴]. سرعت چرخش و پیش‌روی ابزار، زاویه انحراف ابزار، شکل و جنس ابزار از پارامترهای مؤثر در این روش هستند. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل حضور تعداد زیادی پارامتر و تأثیر آنها بر مشخصه‌های خروجی، بسیار پیچیده می‌باشد.



شکل ۱. شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

¹ Ultrasonic

² Training within industry (TWI)

همچنین به دلیل وجود این مشکلات ارائه یک مدل فیزیکی - تحلیلی دقیق که با آن بتوان مشخصه‌های خروجی فرایند را پیش‌بینی و تأثیرات متغیرها را بررسی کرد، بسیار پیچیده می‌باشد [۵]. علاوه بر این، پیدا کردن شرایط دقیقی از فرایند که بتواند به میزان قابل قبولی از استحکام کششی، سختی و استحکام تسلیم برسد، بسیار پیچیده است. از این‌رو، بهترین راه‌حل برای ارائه مدل دقیق از خروجی‌های فرایند و بررسی تأثیرات پارامترها، مطالعات تجربی بر پایه اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش می‌باشد. در این زمینه، پژوهشگران مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند تا بتوانند تأثیر پارامترهایی مانند سرعت چرخش ابزار، سرعت خطی جوشکاری، نیروی محوری، نسبت قطر شانه به قطر پین، زاویه ابزار بر استحکام کششی، استحکام تسلیم کش‌آمدگی، سختی، عرض منطقه متأثر از حرارت را بررسی کنند [۶]. آنها توانستند براساس آزمایش‌ها، رابطه‌ای تجربی بین پارامترهای ورودی فرایند و مشخصه‌های خروجی آن برقرار کنند. همچنین توانستند با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی آماری و روش‌هایی مانند روش تاگوچی، جواب‌های بهینه‌ای پیدا کنند که فرایند، به عملکردی مطلوب دست یابد. جایا رامن و همکارانش آزمایش‌هایی را با استفاده از روش مرکب مرکزی انجام دادند و تأثیر سه فاکتور سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوشکاری و نیروی محوری جوش را بر استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم A356 بررسی کردند [۷]. الانجوان و همکارانش تعداد ۳۰ آزمایش را براساس روش طراحی مرکب مرکزی انجام دادند و تأثیر فاکتورهایی مانند هندسه پین، سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش و نیروی محوری را بر استحکام کششی نهایی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ بررسی کردند [۸]. راجا کومار و همکارانش آزمایش‌های گسترده‌ای را برای بررسی تأثیرات سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش، نیروی محوری جوش، قطر پین، قطر شانه ابزار و سختی ابزار بر استحکام کششی، سختی و نرخ خوردگی قطعه کار با استفاده از روش پاسخ سطح انجام دادند [۹]. الانتاسان و سنتیل کومار با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی^۱ و تئوری تابع مطلوب به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس AA6061-T6 و AA7075-T6 پرداختند [۱۰]. کولیراج و همکاران استحکام کششی و سختی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم غیرهمجنس AA2219 و AA5083 را بررسی کردند [۱۱]. در این پژوهش نیز به بررسی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس پرداخته شد. نوآوری اصلی این پژوهش امکان‌سنجی و ایجاد اتصال بین آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۱۰ است. سپس از روش طراحی مرکب مرکزی، استفاده گردید و برای ایجاد مدل دقیق از خواص مکانیکی و انتخاب پارامترهای بهینه، شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم اجتماع ذرات^۲ ترکیب شد.

آزمایشات تجربی

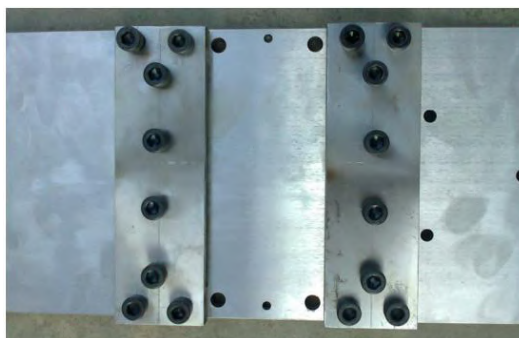
در این پژوهش به‌منظور عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ماشین فرز عمودی مدل ۴۳۰۱ ساخت ماشین‌سازی تبریز با ماکزیمم دور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و توان ۱۵ اسب بخار استفاده شد. این ماشین فرز، اسپیندلی با محور محرک گیربکسی دارد که می‌تواند سرعت چرخشی با محدوده وسیعی را تولید کند. اسپیندل دستگاه با یک کلگی و ابزارگیر تجهیز شده است که می‌تواند ابزارها را با قطرهای مختلفی کلمپ کند. در شکل ۲ نمایی از دستگاه فرز مورد استفاده نشان داده شده است.

¹ Central composite design

² Particle swarm algorithm



شکل ۲. دستگاه فرز



شکل ۳. فیکسچر جوشکاری

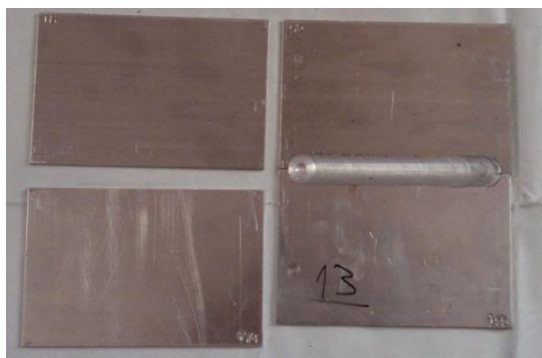
برای گیره‌بندی و موقعیت‌دهی صحیح قطعات از فیکسچر استفاده شده است. در حین انجام فرایند جوشکاری، نیروی زیادی به قطعات وارد که سبب جدا شدن دو قطعه از یکدیگر می‌شود. به همین دلیل برای ثابت نگه‌داشتن آنها از فیکسچر استفاده شده است. برای ثابت نگه داشتن عمق نفوذ در تمامی نقاط جوش، سطح فیکسچر با دستگاه سنگ پرداخت شده است. برای جلوگیری از انحراف ابزار از خط اتصال در دو انتهای صفحه فیکسچر، دو سوراخ به موازات محور افقی دستگاه تعبیه و خطی بین آنها ترسیم شده است و قطعه‌کارها به صورت لب‌به‌لب در راستای این خط قرار داده شده‌اند. به منظور نگهداری قطعات، دو عدد بلوک ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری شده بر روی فیکسچر نصب شده‌اند. در شکل ۳ فیکسچر مورد استفاده برای انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است.

برای انجام فرایند جوشکاری، ورق‌ها در ابعاد $۱۵۰ \times ۱۰۰ \times ۳$ آماده شده‌اند و سطوح جانبی آنها به خوبی پرداخت شده است تا در حین انجام فرایند جوشکاری بر هم منطبق شوند. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق‌ها به صورت لب‌به‌لب در کنار هم قرار می‌گیرد و ابزار با جارو کردن فصل مشترک آنها و انجام عمل اغتشاش، اتصال‌های لب‌به‌لب ایجاد می‌کند. در شکل ۴ نمونه‌های قبل و بعد از جوشکاری با ابزار مربعی نشان داده شده است.

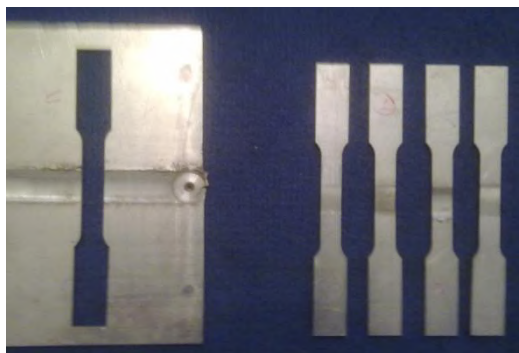
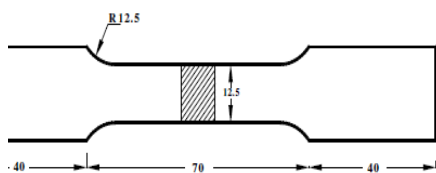
پس از انجام عملیات جوشکاری، به منظور بررسی و تعیین استحکام کششی و کش‌آمدگی، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM با استفاده از دستگاه وایرکات بریده شده و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. مشخصات هندسی نمونه‌ی استاندارد ASTM در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین شکل ۵ نمونه‌های بریده شده با استفاده از

دستگاه وایرکات را نشان می‌دهد که با توجه به استاندارد تست کشش بریده شده‌اند. پس از انجام عملیات برش، تمامی نمونه‌ها در دستگاه کشش سنتام^۱، ساخت کشور تایوان، با تناژ ۳۰ تن قرار گرفت و با سرعت خطی ۵ mm/min کشیده شدند.

به علت نیروی بسیار کم در آزمایش میکروسختی‌سنجی و کوچک بودن اثر آن بر روی سطح جوش، سطح نمونه‌ها باید قبل از انجام آزمایش به خوبی صیقل شوند. برای انجام این کار، نمونه‌ها توسط ورق‌های سنباده کاربیدی تا سری ۱۵۰۰، سنباده‌زده شده‌اند. میکروسختی‌سنج مورد استفاده براساس نیروی ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه تنظیم شده است. در این دستگاه پس از اعمال نیرو، دو قطر هرم ایجاد شده، توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری شده‌اند. مقدار متوسط به نرم‌افزار دستگاه، وارد و مقدار سختی براساس معیار ویکرز محاسبه می‌شود. دستگاه میکروسختی‌سنج ویکرز مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه‌های قبل و بعد از انجام عملیات جوشکاری با ابزار مربعی

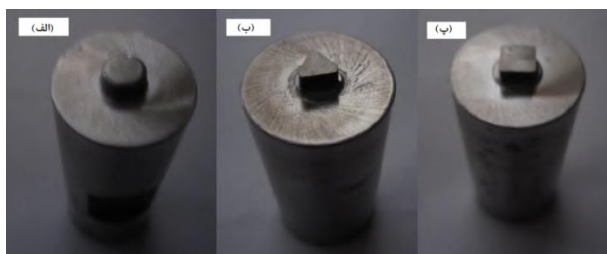


شکل ۵. نمونه‌های استاندارد و برش‌خورده برای آزمون کشش

^۱ Santam



شکل ۶. دستگاه میکروسختی سنج



شکل ۷. تصاویر ابزارهای استفاده شده با هندسه پین های مختلف در آزمایش های مرحله اول (الف) پین استوانه ای ساده (ب) پین مثلثی (پ) پین مربعی

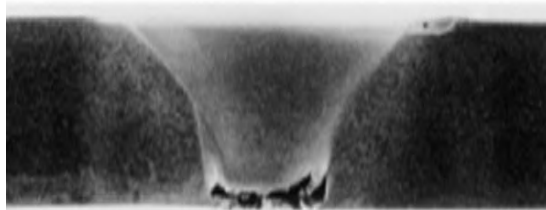
در این پژوهش از ابزار با قطر بدنه ۲۰ میلی متر استفاده شده و ابعاد پین نیز براساس نوع هندسه آن متغیر بوده است. پین ها در عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عمل اغتشاش مواد را انجام می دهند و شکل پین ها در میزان اغتشاش تأثیرگذار می باشد. پروفیل پین می تواند دایره ای، مربعی، شش وجهی و هشت وجهی باشد. در شکل ۷ انواع مختلف شکل پین نشان داده شده است.

برای مطالعه ماکروساختار و میکروساختار نمونه های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق ها در جهت عمود بر راستای جوش بریده و مانت شده است. نمونه های مانت شده در ابتدا توسط ورق های سنباده کاربیدی تا سری ۵۰۰۰ سنباده زده شده و سپس به وسیله پودر Al_2O_3 پولیش شده اند. برای بررسی نحوه پراکندگی ذرات فولاد در ناحیه اغتشاش و همچنین دیدن عیوبی همچون حفره و ترک از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. همچنین با استفاده از این دستگاه می توان اندازه دانه ها را در منطقه جوش مشاهده نمود. در شکل ۸ نمونه های مانت شده نمایش داده شده اند.

باید در نظر داشت که برخی شرایط، به خصوص هنگام تولید حرارت کم در سرعت های دورانی کمتر و توزیع نامناسب مواد در منطقه اتصال، باعث ایجاد عیوب بزرگ تر در منطقه اغتشاش می شود. این عیوب در سرعت های خطی کم بر اثر نیروی ناکافی فورج به وجود می آیند. دلیل اصلی ایجاد این عیوب ورود کم مواد خمیری از جلوی ابزار به منطقه اغتشاش می باشد. تولید حرارت زیاد و چرخش بیش از اندازه ابزار، سبب اغتشاش و جریان ناآرام مواد در منطقه جوشکاری خواهد شد. این پدیده به واسطه ورود گرمای بیش از اندازه به محل جوشکاری سبب نرمی زیاد قطعه کارها و جریان متلاطم می شود که نتیجه آن شکل گیری عیب کانالی یا سوراخ پین است [۱۲].



شکل ۸. نمونه‌های مانته‌شده



شکل ۹. شکل‌گیری عیب ریشه جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۱۰. شکل‌گیری عیب لوله‌ای در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ابعاد منطقه اتصال یکی دیگر از پارامترهایی است که به‌طور مستقیم متأثر از جریان مواد است. نتایج حاصل، نشان می‌دهند که جریان مواد خمیری در پشت ابزار بیشتر از جلوی آن است. علت این مسئله، کشیدگی و فورج مواد از سمت جلو به عقب ابزار است. از طرف دیگر، چون مواد در پشت ابزار اغتشاش یافته‌اند و هنوز به حالت جامد در نیامده‌اند، فورج مواد خمیری از جلو به ناحیه پشت ابزار، سبب بیشتر شدن تغییرات در پشت ابزار خواهد شد. با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال افزایش می‌یابد. این پدیده باعث می‌شود تا این حرارت بیشتر به مناطق جلویی نفوذ کند و گستره بیشتری از جلوی ابزار به حالت خمیری برسد. در این شرایط، موادی که به حالت پلاستیکی درآمده‌اند، بیشتر در معرض نیروی فورج و اغتشاش قرار خواهند گرفت و این مسئله باعث بزرگ‌تر شدن منطقه اغتشاش و خط اتصال می‌شود. در این وضعیت احتمال تشکیل عیوب داخلی اتصال بالا می‌رود. دو نمونه از رایج‌ترین عیوب ایجاد شده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده‌اند [۱۲].

بحث و تحلیل نتایج

در قسمت اول این پژوهش نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مرحله اول با هدف طراحی بهینه هندسه پین ابزار بررسی شده است. پس از انتخاب هندسه بهینه پین ابزار، در قسمت دوم نتایج مرحله دوم آزمایش‌ها بررسی شده است. در این قسمت با توجه به روش طراحی آزمایش‌های مرکب مرکزی و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱، اثرات پارامترهای نامبرده بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی منطقه جوش، تحلیل تجربی و بررسی خواهد شد. در این قسمت تأثیر پارامترها به صورت مستقل و متقابل تحلیل شده است. در ادامه، مدل‌سازی استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی می‌شود و سپس دقت و صحت مدل‌ها با استفاده از انجام آزمایش‌های مجدد تأیید خواهد شد. در انتها استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی توسط الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی هم‌زمان انجام شده است.

به منظور انتخاب ابزار بهینه، به وسیله سه ابزار با هندسه پین‌های مربعی، دایره‌ای و مثلثی تحت سه شرایط مختلف از انرژی اصطکاکی، ۹ آزمایش انجام شد. این شرایط انرژی اصطکاکی شامل اصطکاک کم، اصطکاک متوسط و اصطکاک زیاد می‌باشد. در اینجا منظور از شرایط مختلف انرژی اصطکاکی، شرایطی است که در آن اصطکاک ایجاد شده کم، متوسط و زیاد است. شرایط اصطکاک کم به معنی آن است که سرعت چرخشی ابزار کم، سرعت پیش‌روی زیاد و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها نیز کم می‌باشد. شرایط انرژی اصطکاکی متوسط شرایطی است که در آن سرعت چرخشی ابزار متوسط، سرعت پیش‌روی متوسط و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها نیز متوسط باشد. در نهایت شرایط انرژی اصطکاکی زیاد شرایطی است که در آن سرعت چرخشی ابزار زیاد، سرعت پیش‌روی ابزار کم و عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر ورق‌ها زیاد باشد. نتایج به دست آمده از آزمون مراحل اول تا سوم در جدول ۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که از جدول ۱ نتیجه‌گیری می‌شود، پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی تحت تمامی شرایط اصطکاکی را خواهد شد. به عبارت دیگر، بدون در نظر گرفتن شرایط فرایندی (شرایط مختلفی از سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی جوش و عمق شناوری شانه ابزار) می‌توان ادعا کرد که پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی خواهد شد.

جدول ۱. اثرات هندسه پین تحت شرایط مختلف انرژی بر استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی

شماره	هندسه پین	شرایط انرژی اصطکاکی	استحکام کششی (مگاپاسکال)	سختی (ویکرز)	درصد ازدیاد طول
۱	استوانه‌ای	کم	۱۳۲	۵۷	۶.۴
۲	استوانه‌ای	متوسط	۱۷۳	۹۵	۸.۹
۳	استوانه‌ای	زیاد	۱۵۱	۷۵	۱۲.۱
۴	مثلثی	کم	۱۳۵	۷۲	۸.۶
۵	مثلثی	متوسط	۱۷۵	۱۰۶	۱۴.۱
۶	مثلثی	زیاد	۱۵۷	۸۸	۱۷.۲
۷	مربعی	کم	۱۵۶	۸۴	۱۵.۳
۸	مربعی	متوسط	۱۹۷	۱۲۹	۱۹.۵
۹	مربعی	زیاد	۱۷۶	۱۰۵	۲۴

¹ Design expert

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نسبت بین حجم ساکن مواد و حجم مواد در حال چرخش (زمان انجام فرایند) می‌تواند در تعیین مسیر جریان پلاستیک مؤثر باشد. این نسبت برای پین دایره‌ای برابر ۱، پین مثلثی برابر ۱/۵۶ و پین مربعی برابر ۲/۳ می‌باشد. بنابراین، جریان مواد در پین‌های مثلثی و مربعی به مراتب بهتر صورت می‌گیرد. همچنین پین‌های مربعی و مثلثی سبب به‌وجود آمدن یک جریان اغتشاشی پالی می‌شوند که سبب به‌هم خوردن بهتر مواد در منطقه‌ی جوش می‌شود. علاوه بر این، به دلیل خارج از مرکز بودن حلقه‌های جریان به‌وجود آمده ناشی از هم‌زدن پین‌های مثلثی و مربعی، اکسیدهای فلزی که در ورق‌ها تشکیل شده، از بین می‌رود و سبب بهبود مقاومت کششی و سختی می‌شود. وجود ظاهر چند وجهی در پین‌های مثلثی و مربعی سبب نرم‌تر شدن بهتر مواد می‌شود و توانایی انجام تغییر شکل پلاستیک را راحت‌تر می‌کند. از این‌رو، بدیهی است که در پین‌های مربعی کش‌آمدگی بهتر صورت می‌گیرد. پس از به‌دست آوردن حالت بهینه هندسه پین ابزار، پین مربعی به‌عنوان پین بهینه در تمامی مراحل بعدی استفاده شده است. نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای بررسی تأثیرات متغیرهای یک فرایند بر یک پاسخ مشخص، ابتدا مدل‌های تجربی با دقت بالایی از آن پاسخ را به‌صورت توابع ضمنی چندجمله‌ای استخراج می‌کند و سپس مرحله‌به‌مرحله به بررسی اثرات متغیرها می‌پردازد. در این قسمت برای بررسی تأثیرات متغیرها، بازبینی‌های تجربی مرحله‌به‌مرحله با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شده است.

جدول ۲. نتیجه‌گیری مرحله دوم آزمایش‌ها برای بررسی تأثیرات متغیرهای فرایند

شماره	فاکتورهای فرایند		پاسخ‌ها	
	سرعت دورانی ابزار (RPM)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)
۱	۶۰۰	۴۰	۱۳۶	۲۵.۶۲
۲	۱۰۰۰	۴۰	۱۴۵	۲۹.۴۵
۳	۶۰۰	۸۰	۱۵۶	۱۹.۶۶
۴	۱۰۰۰	۸۰	۱۵۲	۲۱.۳۶
۵	۶۰۰	۴۰	۱۶۲	۳۳.۷
۶	۱۰۰۰	۴۰	۱۵۱	۳۷.۱۱
۷	۶۰۰	۸۰	۱۶۳	۳۱.۱۵
۸	۱۰۰۰	۸۰	۱۵۵	۳۴.۱۳
۹	۴۶۰	۶۰	۱۶۳	۱۹.۶۶
۱۰	۱۱۴۰	۶۰	۱۴۰	۳۴.۱۳
۱۱	۸۰۰	۲۴	۱۶۲	۳۹.۶۶
۱۲	۸۰۰	۹۷	۱۵۳	۲۲.۲۱
۱۳	۸۰۰	۶۰	۱۷۱	۲۰.۰۹
۱۴	۸۰۰	۶۰	۱۶۵	۳۷.۱۱
۱۵	۸۰۰	۶۰	۱۷۸	۳۲.۴۳
۱۶	۸۰۰	۶۰	۱۹۲	۳۲.۴۳
۱۷	۸۰۰	۶۰	۱۸۹	۳۲
۱۸	۸۰۰	۶۰	۱۹۰	۳۲.۵۶
۱۹	۸۰۰	۶۰	۱۸۸	۳۲.۵
۲۰	۸۰۰	۶۰	۱۹۴	۳۲.۴۵

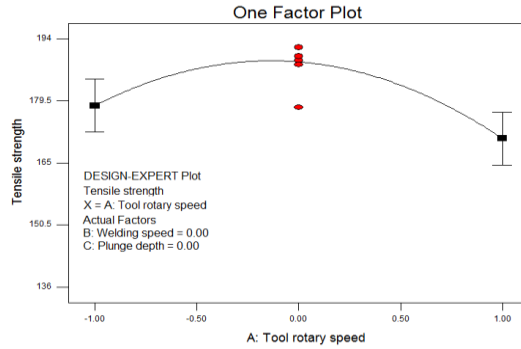
برای بررسی تجربی استحکام کششی و تأثیرات پارامترها بر آن، داده‌های موجود در جدول ۲ به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت وارد شد و با معادله تجربی به‌دست‌آمده، دقت و صحت آن و همچنین تأثیرات متغیرها بر آن، مرحله‌به‌مرحله بررسی شد. نتیجه معادله چندجمله‌ای شماره ۱، مدل تجربی برای ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و استحکام کششی می‌باشد که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده است.

$$TS = 188.65 - 3.86N + 1.23f + 2.34d - 14.08N^2 - 11.95f^2 - 8.24d^2 - 1.25Nf - 3Nd - 2.75fd \quad (1)$$

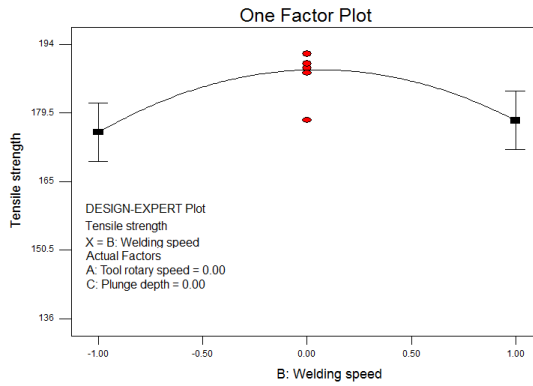
در رابطه ۱، TS استحکام کششی، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیش‌روی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به استحکام کششی در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول ۳ دیده می‌شود که مقدار $\text{Prob}>F$ برای این مدل حدود ۰.۰۰۰۹ می‌باشد. این مقدار بدین معنی است که این مدل اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای در پیش‌بینی استحکام کششی دارد. همچنین مقادیر Lack of Fit ۰.۱۱۲۸ نشان می‌دهد احتمال آنکه این داده‌ها به‌صورت اتفاقی جمع‌آوری شده باشند کم می‌باشد. بنابراین، مدل مرتبط صحت و دقت کافی را در پیش‌بینی استحکام کششی خواهد داشت. از این‌رو، می‌توان این مدل تجربی را برای تحلیل تأثیرات پارامترهای فرایند بر استحکام کششی استفاده کرد. نمودار تأثیرات پارامترهای فرایند بر استحکام کششی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. این شکل‌ها با استفاده از نتایج مدل تجربی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده‌اند.

جدول ۳. آنالیز واریانس مربوط به مدل‌سازی تجربی استحکام کششی

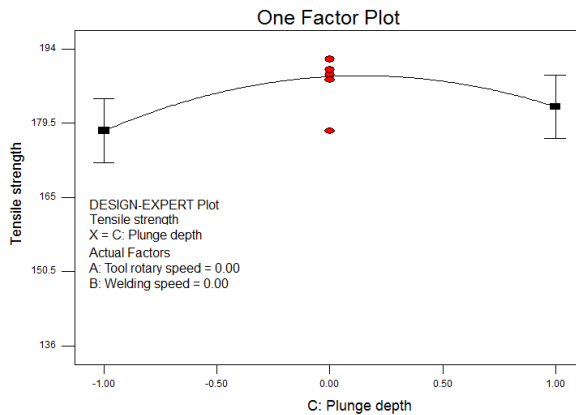
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	Prob>F
مدل	۵۴۲۹.۹۸	۹	۶۰۳.۳۳	۹.۱	۰.۰۰۰۹
N	۲۰۳.۲۲	۱	۲۰۳.۲۲	۳.۲	۰.۱۰۸۸
F	۲۰.۸۲	۱	۲۰.۸۲	۰.۳۱	۰.۵۵۵۸
D	۷۴.۵۶	۱	۷۴.۵۶	۱.۱۴	۰.۳۱۱۴
N^2	۲۸۵۵.۱۶	۱	۲۸۵۵.۱۶	۴۳.۵۴	۰.۰۰۰۱<
f^2	۲۰۵۹.۴۱	۱	۲۰۵۹.۴۱	۳۱.۴	۰.۰۰۰۲
d^2	۹۷۸.۹۴	۱	۹۷۸.۹۴	۱۴.۹۳	۰.۰۰۳۱
Nf	۱۲.۵	۱	۱۲.۵	۰.۱۹	۰.۶۷۱۷
Nd	۷۲	۱	۷۲	۱.۱	۰.۳۱۹۴
Fd	۶۰.۵	۱	۶۰.۵	۰.۹۲	۰.۳۵۹۴
Residual	۶۵۵.۷۷	۱۰	۶۵.۵۷	-	-
Lack of fit	۵۰۰.۲۷	۵	۱۰۰.۰۵	۳.۲۲	۰.۱۱۲۸
Pure error	۱۵۵.۵	۵	۳۱.۱	-	-



شکل ۱۱. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر استحکام کششی

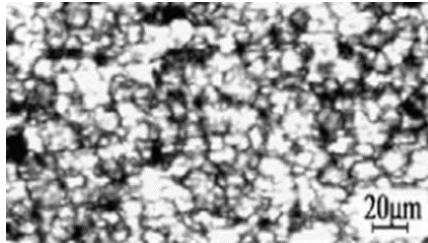


شکل ۱۲. تأثیر سرعت پیش‌روی جوش بر استحکام کششی

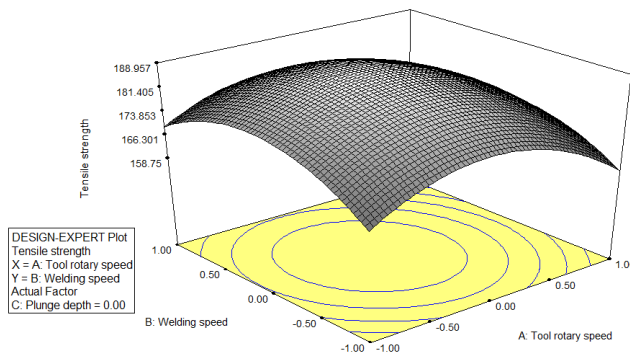


شکل ۱۳. تأثیر عمق غوطه‌وری بر استحکام کششی

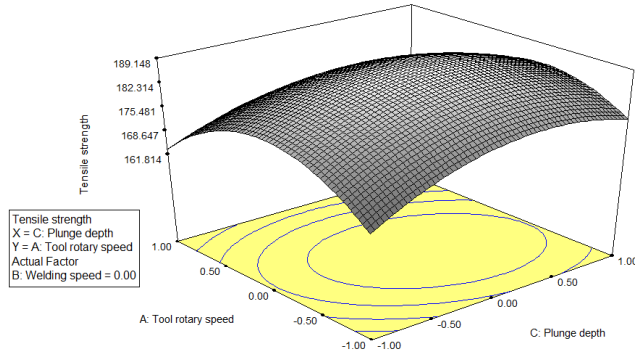
همان گونه که از شکل ۱۱ نتیجه‌گیری می‌شود با افزایش سرعت چرخش ابزار مقدار استحکام کششی به تدریج افزایش می‌یابد و در نقطه‌ای که سرعت چرخشی ابزار به مقدار ۸۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد، مقدار استحکام کششی به نقطه ماکزیمم خود می‌رسد. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش بیشتر سرعت چرخشی ابزار، استحکام کششی رفته‌رفته کاهش پیدا می‌کند. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص استحکامی جوش مانند استحکام برشی، استحکام کششی و محل شکست جوش هنگام تست کشش تا حد زیادی به سرعت چرخشی ابزار وابسته می‌باشد. سرعت چرخشی ابزار، نقش تولید گرما را دارد و در ایجاد حالت پلاستیک و به هم زدن و اغتشاش جوش بسیار مؤثر می‌باشد. در این فرایند هنگامی که سرعت چرخشی ابزار کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه باشد، به دلیل تولید نشدن گرمای مناسب در منطقه جوش، عیوبی مانند سوراخ پین شکل و ترک در منطقه جوش مشاهده می‌شود. بنابراین، عیوب می‌تواند سبب پایین آمدن استحکام کششی گردد. از طرف دیگر، هنگامی که سرعت چرخشی ابزار از ۸۰۰ دور بر دقیقه بیشتر می‌شود، به دلیل توسعه زیاد حرارت در منطقه جوش، سبب تغییر ساختارهای متالورژیکی شده و عیوبی مانند تونل را در منطقه جوش ایجاد می‌کند. همچنین این توسعه زیاد گرما رفته‌رفته سبب رشد دانه‌ها در منطقه جوش می‌شود و استحکام کششی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، افزایش سرعت چرخش ابزار باعث افزایش توربولانس می‌شود و رفتار منظم جریان پلاستیک را بهم می‌زند. این پدیده نیز سبب تحت تأثیر قرار گرفتن استحکام کششی می‌شود. همان گونه که توضیح داده شد و در شکل‌ها دیده می‌شود، انتخاب سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق شناوری ۰.۲ میلی‌متر، سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی می‌شود. در شکل ۱۴ تصویر متالوگرافی از محدوده جوش مربوط به این پارامترها نشان داده شده است.



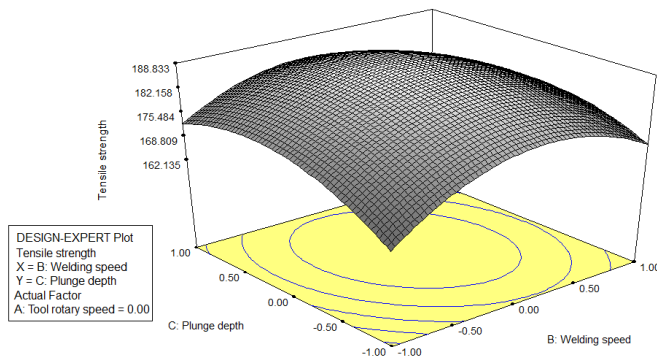
شکل ۱۴. تصویر میکروسکوب نوری از مقطع عرضی



شکل ۱۵. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیش‌روی بر استحکام کششی



شکل ۱۶. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی



شکل ۱۷. نمودار سه بعدی اثرات متقابل سرعت پیش‌روی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی

معادله چند جمله‌ای به‌دست‌آمده شماره ۲، مدل تجربی جهت ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و سختی می‌باشد که نتیجه تحلیل نرم افزار دیزاین اکسپرت است.

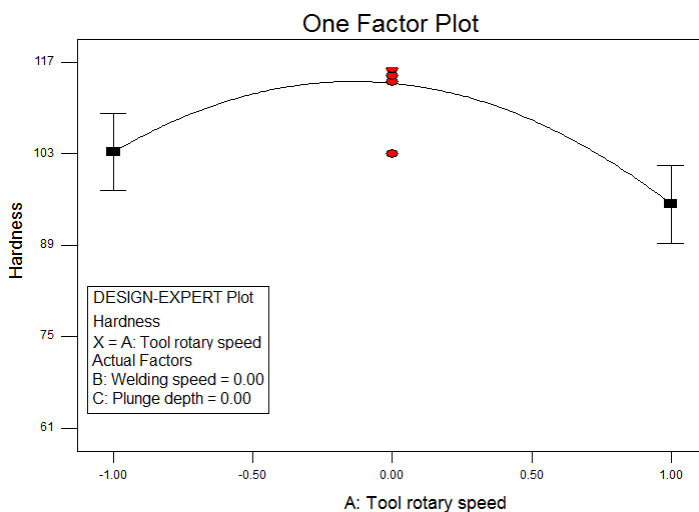
$$HV = 113.82 - 4N + 1.09f + 1.9d - 14.53N^2 - 12.4f^2 - 8.69d^2 - 1.5Nf - 2.75Nd - 2.5fd \quad (2)$$

در رابطه ۲، HV استحکام سختی ویکرز، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیش‌روی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به سختی در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌دست آمده است، دیده می‌شود که برای مدل مرتبط، مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰.۰۵ (برابر با ۰.۰۰۵) می‌باشد که بدان معنی است این مدل در پیش‌بینی سختی بااهمیت است. همچنین مقدار $Lack\ of\ fit$ در جدول ۴ برابر ۰.۱۱۲۴ است که نشان می‌دهد احتمال اینکه داده‌ها به‌طور اتفاقی جمع‌آوری شده باشند کم است. بنابراین، مدل تجربی به‌دست‌آمده از سختی، صحت و دقت کافی را در پیش‌بینی سختی خواهد داشت. از این رو، می‌توان این مدل را برای تحلیل اثرات متغیرهای فرایند بر سختی

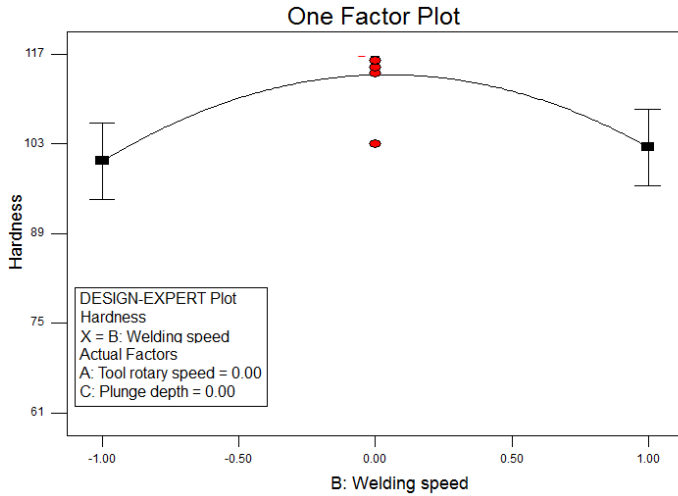
استفاده نمود. شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نمودارهای سه بعدی اثرات متغیرهای فرایند را بر سختی منطقه جوش نشان می‌دهند. این نمودارها نیز با توجه به تأثیرات متقابل فاکتورها ترسیم شده‌اند.

جدول ۴. آنالیز واریانس مربوط به مدل سازی تجربی سختی

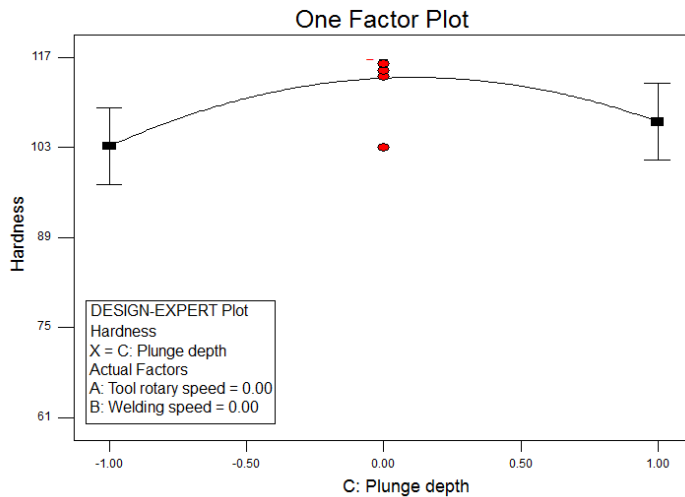
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Prob>F
مدل	۵۷۷۷.۵۸	۹	۶۴۱.۹۵	۱۰.۶	۰.۰۰۰۵
<i>N</i>	۲۱۸.۹۴	۱	۲۱۸.۹۴	۳.۶۲	۰.۰۸۶۴
<i>F</i>	۱۶.۱۸	۱	۱۶.۱۸	۰.۲۷	۰.۶۱۶۴
<i>D</i>	۴۹.۱۵	۱	۴۹.۱۵	۰.۸۱	۰.۳۸۸۷
<i>N</i> ²	۳۰۴۰.۷۷	۱	۳۰۴۰.۷۷	۵۰.۲۳	۰.۰۰۰۱
<i>f</i> ^۲	۲۲۱۷.۴۹	۱	۲۲۱۷.۴۹	۳۶.۶۳	۰.۰۰۰۱
<i>d</i> ^۲	۱۰۸۸.۸۳	۱	۱۰۸۸.۸۳	۱۷.۹۸	۰.۰۰۱۷
<i>Nf</i>	۱۸	۱	۱۸	۰.۳	۰.۵۹۷۵
<i>Nd</i>	۶۰.۵	۱	۶۰.۵	۱.۰	۰.۳۴۱۱
<i>Fd</i>	۵۰	۱	۵۰	۰.۸۳	۰.۳۸۴۸
Residual	۶۰۵.۴۲	۱۰	۶۰.۵	-	-
Lack of fit	۴۶۲.۰۹	۵	۹۲.۴۲	۳.۲۲	۰.۱۱۲۴
Pure error	۱۴۳.۳	۵	۳۱.۱	-	-



شکل ۱۸. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر سختی منطقه جوش



شکل ۱۹. تأثیر سرعت پیش‌روی بر سختی منطقه جوش



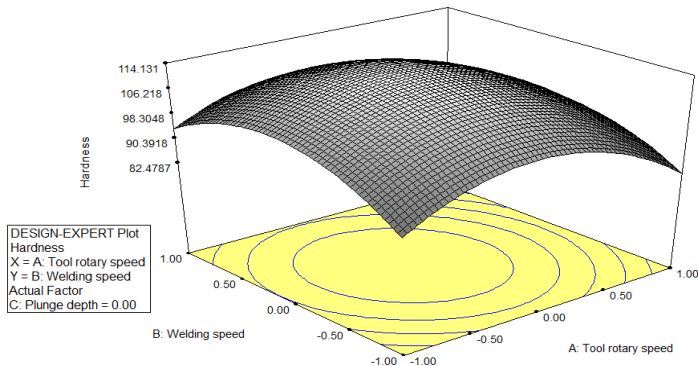
شکل ۲۰. تأثیر عمق شناوری بر سختی منطقه جوش

اثر سرعت چرخشی ابزار بر سختی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سختی منطقه جوش داده‌شده از سختی فلزات پایه بیشتر می‌باشد. این پدیده دو دلیل دارد: اولین دلیل آن است که در این فرایند، اندازه دانه‌ها در منطقه جوش، به‌مراتب کوچک‌تر از اندازه دانه‌های فلزات پایه می‌باشد. بنابر رابطه هال-پیچ، اندازه دانه‌ها با سختی، رابطه عکس دارد؛ یعنی هرچه اندازه دانه‌ها کوچک‌تر باشد، سختی بیشتر خواهد شد. دلیل دیگری که سبب افزایش سختی در منطقه جوش داده‌شده می‌شود، این است که در اثر حرارت زیاد ایجاد شده در این فرایند ساختارهایی بین فلزی ایجاد می‌شود که در سختی منطقه جوش بسیار تأثیرگذار

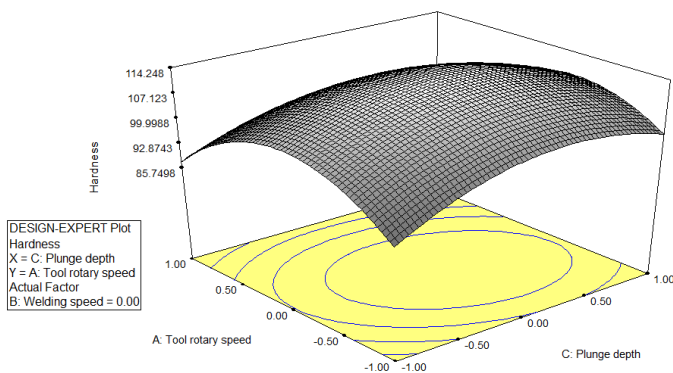
می‌باشد و سبب افزایش آن می‌گردد. در این فرایند (این پژوهش) هنگامی که سرعت کم می‌باشد (کمتر از ۸۰۰ دور بر دقیقه) گرمای موضعی و غیریکنواخت در اثر اصطکاک کمتر ایجاد می‌شود. به همین دلیل، مواد به خوبی هم نخوردند و سختی پایین می‌باشد. هنگامی که سرعت رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند، گرمای ایجاد شده به مراتب بالاتر می‌رود و این گرما سبب بهبود اغتشاش می‌شود و مواد در حالت ویسکوپلاستیک بهتر هم زده می‌شوند. این گرما و اغتشاش مناسب، سبب ایجاد یک سری ترکیبات بین فلزی می‌شود و سختی منطقه جوش را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در سرعت چرخشی مناسب (۸۰۰ دور بر دقیقه) به دلیل انجام کار مکانیکی مناسب دانه‌ها ریز می‌شوند و افزایش سختی را در بر خواهد داشت. از طرف دیگر هنگامی که سرعت چرخشی ابزار از ۸۰۰ دور بر دقیقه بیشتر می‌شود مقدار سختی رفته‌رفته کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و ورق‌ها، گرمای زیادی ایجاد می‌شود و این حرارت سبب رشد دانه‌ها می‌گردد. همچنین این گرما سبب کاهش دانسیته نابه‌جایی‌ها در منطقه جوش می‌شود و سبب کاهش سختی خواهد شد.

تأثیرات سرعت خطی جوش بر سختی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حین فرایند جوشکاری اصطکاک اغتشاشی، سرعت چرخشی ابزار و سرعت پیش‌روی جوش، عکس یکدیگر عمل می‌کنند؛ یعنی هرچه سرعت پیش‌روی جوش کمتر باشد یا سرعت چرخشی ابزار بیشتر باشد، گرمای تولید شده بیشتر خواهد بود و برعکس. با توجه به شکل مربوطه و بدون در نظر گرفتن سرعت، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سرعت پیش‌روی جوش مقدار سختی افزایش پیدا می‌کند و در ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش سرعت پیش‌روی، رفته‌رفته حرارت ایجاد شده در منطقه جوش کاهش می‌یابد و کاهش این گرما از رشد دانه‌ها جلوگیری خواهد کرد و سبب ریزتر شدن آن می‌گردد که افزایش سختی را در بر خواهد داشت. اما هنگامی که سرعت پیش‌روی از ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر شود، به دلیل کاهش کار مکانیکی نابه‌جایی‌ها به‌طور مناسب تشکیل نخواهد شد و سبب کاهش سختی می‌شود. همچنین به دلیل کاهش بیش از حد گرما (در سرعت‌های پیش‌روی بالا) ترکیبات بین فلزی ایجاد نمی‌شود و سبب کاهش سختی خواهد شد.

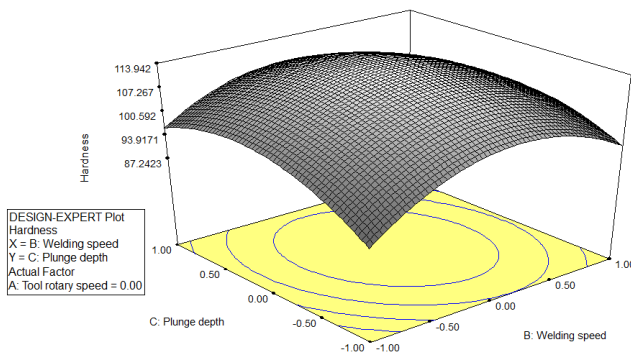
تأثیر عمق شناوری بر سختی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، عمق شناوری را می‌توان با نیروی محوری جوش و اصطکاک تولید شده هم‌ارز دانست. هرچه عمق شناوری بیشتر شود، مقدار نیروی محوری افزایش می‌یابد، اصطکاک بین ورق‌ها و ابزار بیشتر می‌شود و همچنین مقدار کار مکانیکی انجام شده نیز افزایش خواهد یافت. در این شکل، با افزایش عمق شناوری شانه ابزار بر ورق‌ها، مقدار سختی رفته‌رفته بیشتر می‌شود و هنگامی که این مقدار به ۰/۲ میلی‌متر برسد، مقدار سختی به بالاترین حد خود خواهد رسید و پس از آن با افزایش بیشتر مقدار عمق شناوری، مقدار سختی کم‌کم کاهش پیدا می‌کند. با افزایش عمق شناوری تا ۲ میلی‌متر، مقدار نیروی محوری افزایش پیدا می‌کند و سبب افزایش کار مکانیکی می‌شود. این افزایش در کار مکانیکی سبب ریزتر شدن دانه‌ها و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها در منطقه جوش خواهد شد. از این‌رو، سختی منطقه جوش افزایش می‌یابد. هنگامی که عمق شناوری از مقدار ۰/۲ میلی‌متر بیشتر شود، اگرچه نیروی محوری و کار مکانیکی افزایش پیدا می‌کند ولی حرارت زیادی ناشی از اصطکاک بین ابزار و ورق‌ها ایجاد خواهد شد و این حرارت زیاد سبب رشد دانه‌ها و کاهش چگالی نابه‌جایی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بیش از حد عمق شناوری (بیشتر از ۰/۲ میلی‌متر) مقدار سختی منطقه جوش رفته‌رفته کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی بر سختی



شکل ۲۲. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری بر سختی



شکل ۲۳. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت پیشروی جوش و عمق شناوری بر سختی

با توجه به شکل‌های ۲۱ تا ۲۳ می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به بیشترین مقدار سختی، باید پارامترهای فرایند در مقادیر میانی خود قرار گیرند. به عبارت دیگر، هنگامی می‌توان بیشترین سختی را به دست آورد که سرعت چرخشی ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق شناوری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه باشد.

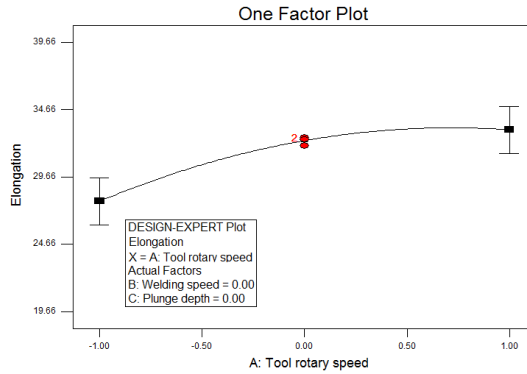
برای بررسی تجربی کش‌آمدگی و تأثیرات پارامترها بر آن، داده‌های موجود در جدول ۲ به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت داده خواهد شد و معادله تجربی به دست می‌آید، دقت و صحت آن و همچنین تأثیرات متغیرها بر آن مرحله به مرحله بررسی شد. معادله چندجمله‌ای به دست آمده شماره ۳، مدل تجربی برای ارائه رابطه بین متغیرهای فرایند و کش‌آمدگی می‌باشد که نتیجه تحلیل نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است.

$$El = 32.37 + 2.65N - 3.58f + 5.02d - 1.85N^2 - 0.42f^2 - 1.25d^2 - 0.32Nf + 0.11Nd + 1.06fd \quad (3)$$

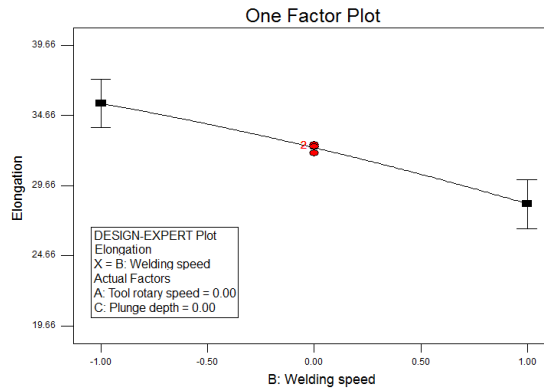
در رابطه ۳، El کش‌آمدگی، N سرعت چرخش ابزار، f سرعت پیش‌روی جوش و d عمق شناوری شانه ابزار می‌باشد. برای بررسی صحت این مدل، آنالیز واریانس مربوط به کش‌آمدگی در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵ که از تحلیل در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به دست آمده است، دیده می‌شود که برای مدل مرتبط مقدار $Prob > F$ کمتر از ۰.۰۵ می‌باشد که بدان معنی است این مدل در پیش‌بینی سختی با اهمیت است. همچنین مقدار $Lack of Fit$ در این جدول برابر ۰.۳۳۴۶ است که نشان می‌دهد داده‌ها به صورت اتفاقی جمع‌آوری نشده‌اند. از این‌رو، مدل به دست آمده از کش‌آمدگی صحت و دقت کافی را در پیش‌بینی سختی خواهد داشت. بنابراین، می‌توان از این مدل جهت تحلیل تأثیرات متغیرهای فرایند بر کش‌آمدگی استفاده نمود.

جدول ۵. آنالیز واریانس مربوط به مدل‌سازی تجربی کش‌آمدگی

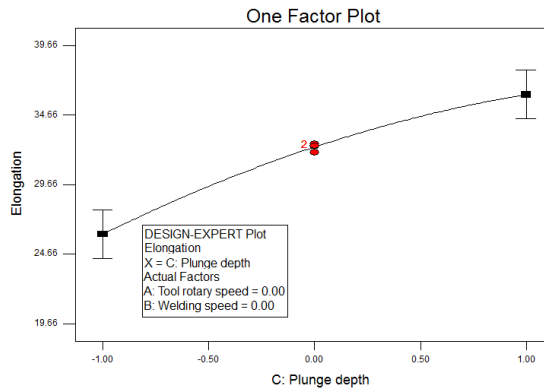
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Prob>F
مدل	۶۹۲.۵۱	۹	۷۶.۹۵	۱۴.۷۳	۰.۰۰۰۱
N	۹۶.۲۵	۱	۹۶.۲۵	۱۸.۴۲	۰.۰۰۱۶
f	۱۷۵.۲۹	۱	۱۷۵.۲۹	۰.۲۷	۰.۰۰۰۲
d	۳۴۴.۸۳	۱	۳۴۴.۸۳	۳۳.۵۵	۰.۰۰۰۱
N^2	۴۹.۳۷	۱	۴۹.۳۷	۶۶.۰۱	۰.۰۱۱۸
f^2	۲.۵۷	۱	۲.۵۷	۹.۴۵	۰.۴۹۸۷
d^2	۲۲.۴۵	۱	۲۲.۴۵	۰.۴۹۰	۰.۰۶۴۹
Nf	۰.۸۲	۱	۰.۸۲	۴.۳	۰.۷۰۰۴
Nd	۰.۰۹۲	۱	۰.۰۹۲	۰.۱۶	۰.۸۹۶۸
fd	۹.۰۷	۱	۹.۰۷	۰.۰۱۸	۰.۲۱۶۹
Residual	۵۲.۲۴	۱۰	۵.۲۲	-	-
Lack of fit	۵۲.۰۵	۵	۱۰.۴۱	۲.۱۱	۰.۳۳۴۵
Pure error	۰.۱۹	۵	۰.۰۳۸	-	-



شکل ۲۴. تأثیر سرعت چرخش ابزار بر کش آمدگی



شکل ۲۵. تأثیر سرعت پیشروی بر کش آمدگی

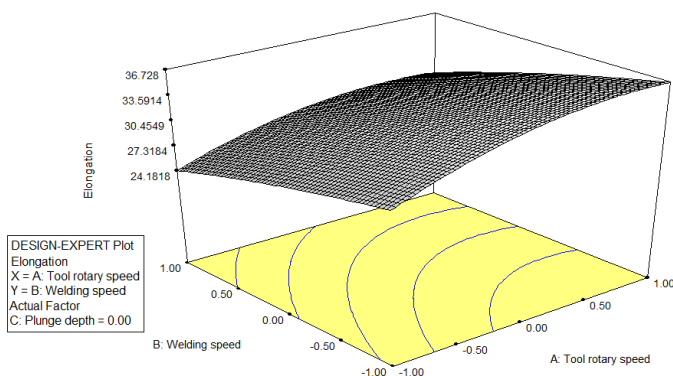


شکل ۲۶. تأثیر عمق غوطه‌وری شانه ابزار بر کش آمدگی

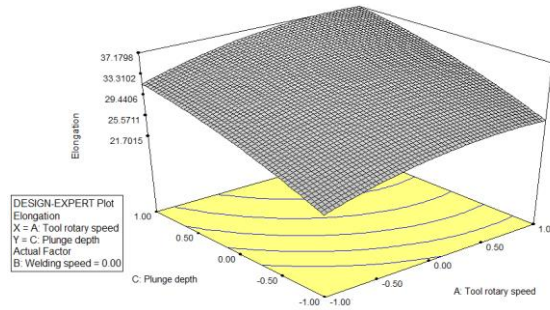
تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر کش آمدگی در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود با افزایش سرعت چرخشی ابزار میزان کش آمدگی افزایش می یابد. دلیل این پدیده را می توان این گونه توجیه کرد که افزایش سرعت چرخش ابزار سبب افزایش حرارت ایجاد شده در منطقه جوش می گردد. این حرارت، سبب رشد دانه ها می شود و تغییر شکل پلاستیک را در منطقه جوش راحت تر می کند. بنابراین، ماده، نرم تر می شود و هنگام آزمون کشش، تغییر طول بیشتری می دهد. علاوه بر این، حرارت سبب کاهش دانسیته ناهنجاری ها می شود و تغییر شکل پلاستیک را راحت تر می کند. پس می توان این گونه بیان کرد که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، مقدار کش آمدگی نیز افزایش می یابد.

تأثیر سرعت پیش روی بر کش آمدگی در شکل ۲۵ نشان داده شده است. در این شکل دیده می شود که با افزایش سرعت پیش روی، مقدار کش آمدگی کاهش پیدا می کند. دلیل این پدیده را می توان در حالت معکوس تأثیر سرعت چرخش ابزار توجیه کرد. هنگامی که سرعت پیش رو افزایش پیدا می کند، حرارت ایجاد شده در منطقه جوش کاهش می یابد و از رشد دانه ها جلوگیری می کند. بنابراین، تغییر شکل پلاستیک در هنگام تست کشش کم خواهد شد. علاوه بر این، حرارت کمتر سبب افزایش چگالی ناهنجاری ها می شود و قابلیت تغییر شکل پلاستیک را کاهش خواهد داد. بنابراین می توان این گونه توجیه کرد: هر عاملی که سبب افزایش حرارت شود و تأثیری بر رشد دانه ها و کاهش چگالی ناهنجاری ها داشته باشد، سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می شود و کش آمدگی را افزایش می دهد.

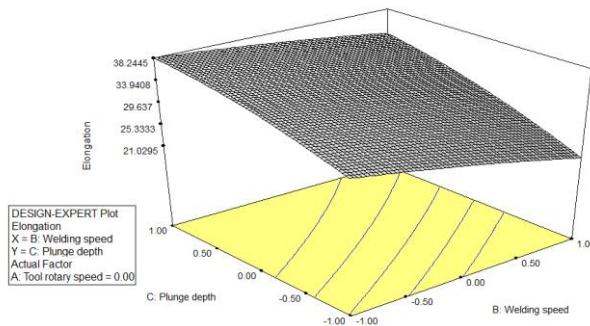
اثر عمق شناوری شانه ابزار بر کش آمدگی در شکل ۲۶ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش عمق شناوری مقدار کش آمدگی افزایش پیدا خواهد کرد. این پدیده به دلیل آن است که افزایش عمق شناوری سبب افزایش اصطکاک بین ابزار و ورق ها می شود. این افزایش اصطکاک، توسعه حرارت را در منطقه جوش به همراه خواهد داشت. در اثر افزایش حرارت، دانه ها در منطقه جوش رشد می کنند و سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می شوند و کش آمدگی را افزایش می دهند. دلیل دیگری که تأثیر به سزایی بر کش آمدگی دارد این است که افزایش حرارت سبب کاهش چگالی ناهنجاری ها می شود و کش آمدگی را افزایش می دهد.



شکل ۲۷. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیش روی بر کش آمدگی



شکل ۲۸. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت چرخش ابزار و عمق شناوری شانه ابزار بر کش آمدگی



شکل ۲۹. نمودار سه بعدی تأثیرات متقابل سرعت پیش‌روی جوش و عمق شناوری بر کش آمدگی

اثرات متقابل پارامترهای فرایند بر کش آمدگی در شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ نشان داده شده‌اند. از این شکل‌ها که دوبه‌دو برای متغیرها رسم شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین سرعت چرخشی و عمق غوطه‌وری شانه ابزار و کمترین سرعت پیش‌روی سبب رسیدن به بیشترین مقدار کش آمدگی می‌شود. به عبارت دیگر، انتخاب سرعت چرخشی ۱۱۴۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی ۲۴ دور بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۳۷ میلی‌متر، سبب رسیدن به بیشترین مقدار کش آمدگی می‌شود. دلیل این امر همان‌گونه که بیان شد می‌توان در توسعه‌ی حرارت زیاد ناشی از انتخاب این پارامترها دانست. این حرارت سبب رشد دانه‌ها می‌شود و چگالی نابه‌جایی را در منطقه جوش کاهش می‌دهد. بنابراین، سبب بهبود تغییر شکل پلاستیک می‌شود و کش آمدگی را افزایش می‌دهد.

بهینه‌سازی

پس از ادغام توابع مدل‌سازی شده (مدل‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی) و الگوریتم اجتماع ذرات، در نرم‌افزار متلب^۱، این الگوریتم ۵ بار تکرار و نتایج جواب‌های در جدول ۶ فهرست شده است [۱۳].

^۱ Matlab

در جدول ۶ دیده می‌شود که سرعت چرخشی ابزار حدود ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی جوش حدود ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق شناوری حدود ۰/۲ میلی‌متر، سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش‌آمدگی می‌شود. با توجه به تحلیل‌هایی که انجام شد، به نظر می‌رسد جواب‌های به‌دست‌آمده منطقی می‌باشد. هنگام بهینه‌سازی، وزن‌های بیشتری به استحکام کششی و سختی تعلق گرفته است؛ از این رو بدیهی است جواب‌هایی که سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام کششی و سختی می‌شوند در اولویت قرار خواهند گرفت. علاوه بر این، در جواب‌های بهینه مقدار کش‌آمدگی با توجه به وزن، اهمیت آن مطلوب می‌باشد، اما نیاز است که این جواب‌ها تأیید شوند. از این‌رو، یک آزمایش برای تأیید این جواب‌ها انجام شده است. نتیجه این آزمون‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد که مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش با نتایج مقادیر بهینه‌سازی، بسیار به هم نزدیک هستند. این تطابق نشان می‌دهد که الگوریتم به‌کاررفته و شبکه عصبی مرتبط در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرایند بسیار موفق است و می‌توان از این روش در مدل‌سازی و بهینه‌سازی دیگر فرایندهای تولید استفاده کرد.

مراحل شبیه‌سازی

روش اجزا محدود یا روش المان‌های محدود که به اختصار FEM^1 نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشد که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند.

جدول ۶. نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی فرایند

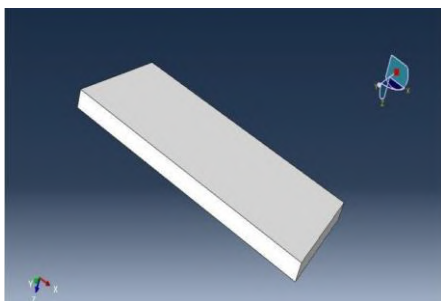
مرحله	ترکیب فاکتورهای بهینه					پاسخ‌های پیشینه
	سرعت دورانی ابزار (RPM)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	عمق نفوذ (mm)	استحکام کششی (MPa)	سختی (HV)	
۱	۷۴۰.۳	۵۷.۲۵	۰.۲۱	۱۸۶.۵۷	۱۱۳.۷	ازدیاد طول (%) ۳۲.۱۳
۲	۷۷۴	۵۹.۲	۰.۲۵۵	۱۸۶.۱	۱۱۴.۵	۳۴.۴
۳	۷۸۵.۶	۵۷.۲۵	۰.۱۹	۱۸۷.۳	۱۱۳.۱	۳۲.۲۱
۴	۷۹۸.۲	۵۹.۳	۰.۲۰۷	۱۸۸.۱۷	۱۱۳.۹۳	۳۲.۸۱
۵	۸۰۲.۳	۵۷.۶۶	۰.۲۲۱	۱۸۷.۱۶	۱۱۳.۹۶	۳۳.۷

جدول ۷. نتایج آزمایش برای تأیید جواب بهینه

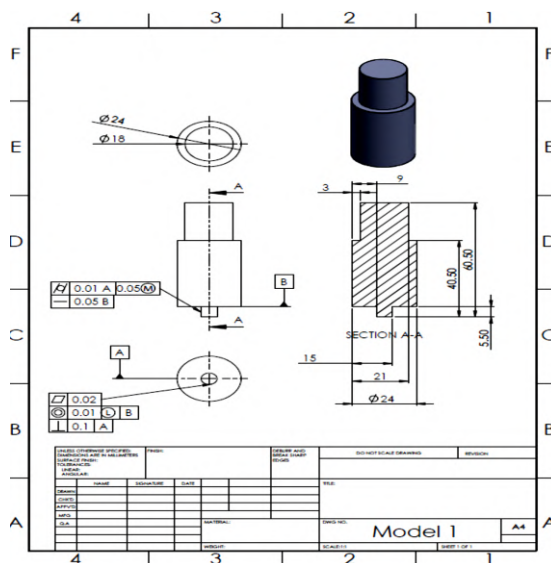
پاسخ‌های پیشینه						ترکیب فاکتورهای بهینه		
ازدیاد طول (%)						استحکام کششی (Mpa)	سختی (HV)	ازدیاد طول (%)
سرعت دورانی ابزار (RPM)	سرعت پیش‌روی ابزار (mm/min)	عمق نفوذ (mm)	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده
۸۰۰	۶۰	۰.۲	۱۹۴	۱۸۹.۹	۱۱۶	۱۱۴.۳	۳۲.۴۵	۳۳.۷

¹ finite element method

آباکوس^۱ قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. در این پژوهش به منظور بررسی فرایند در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی و استخراج پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند جوشکاری، کلیه مراحل جوشکاری در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده است. در این مدل‌سازی با هدف رسیدن به جواب دقیق‌تر و خروجی‌های نزدیک‌تر به جواب حقیقی، کلیه قطعات با دقت بسیار بالا در نرم‌افزار رسم شده‌اند. مدل‌های رسم‌شده قطعه‌کار و ابزار در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نشان داده شده است. از جمله عملیات مهمی که در این مرحله انجام شده است پارتیشن‌بندی قطعات یا بخش‌بندی قطعات می‌باشد که این کار با هدف دسترسی به بهترین حالت مش‌بندی و رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر صورت گرفته است.

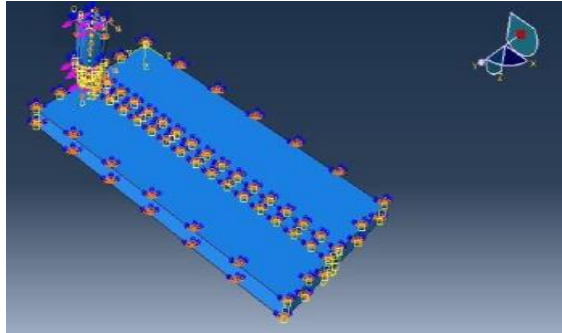


شکل ۳۰. مدل هندسی قطعه‌کارها



شکل ۳۱. ابزار استوانه‌ای مدل شده در نرم‌افزار

^۱ Abaqus



شکل ۳۲. مدل مونتاژ شده با اعمال شرایط بار

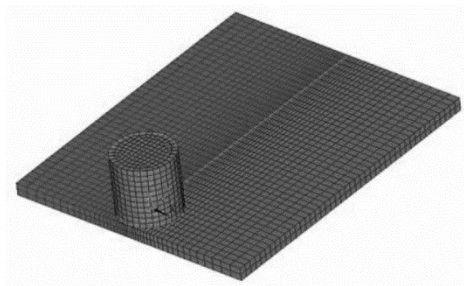
به دلیل آنکه هدف ما از تحلیل در آباکوس مباحث حرارتی و مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی می‌باشد، پارامترهای ورودی نیز از نوع خواص حرارتی و مکانیکی ماده هستند. باید توجه داشت به دلیل اینکه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، قطعه کار وارد ناحیه پلاستیک می‌شود باید خواص مربوط به ناحیه پلاستیک ماده نیز وارد نرم‌افزار شود. نمودار تنش- کرنشی که به نرم‌افزار معرفی می‌شود، باید نمودار تنش-کرنش حقیقی باشد و همچنین ناحیه الاستیک آن حذف شده باشد. در تحلیل مورد نیاز برای این تحقیق، حالت **Coupled Thermal/displacement** انتخاب شده است. در تحلیل‌های غیرخطی که از روش نیوتن رافسون حل می‌شوند، نکته بسیار مهم تعیین مقادیر مربوط به مقدار اولیه و نهایی و سایر مقادیر مرتبط با حل می‌باشد. شایان یادآوری است که تحلیل از نوع **Transient** و **Nonlinear** در حالت روشن است و کل تحلیل در **Time Period** ۱۰۰ ثانیه صورت می‌گیرد. برای تحلیل دقیق‌تر مسئله و به علت پیچیده بودن روش حل آن، تعداد مراحل حل یا تعداد اینکریمنت بر ۱۰۰۰ تنظیم شده است که زمان حل را تا ۱۵ الی ۲۰ ساعت افزایش خواهد داد. حداکثر تغییرات دمایی مجاز در هر اینکریمنت نیز بر روی ۵ درجه تنظیم شده است. نوع تماس مکانیکی به صورت **Tangential Behavior** و مقدار ضریب اصطکاک یا **Friction Coefficient** ۰.۳ و نوع تماس حرارتی به صورت **Heat Generation** تعریف شده است. نکته مهم در این مرحله تعریف **Thermal conductivity** می‌باشد که بیانگر گذردهی حرارتی بین سطوح تماسی دو قطعه می‌باشد. این مقدار نیز براساس استاندارد تعریف شده است. در بخش بارگذاری شرایط مرزی حاکم بر مسئله و نیروهای خارجی، اعمالی تعریف می‌گردد. برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار دارای حرکت دورانی و خطی و قطعه کار ثابت می‌باشد. برای تعریف حرکت دورانی آباکوس در ماژول، بارگذاری گزینه **Velocity/Angular velocity** انتخاب و سرعت دورانی موردنظر وارد می‌شود. برای تعریف حرکت خطی مطابق گزینه **Displacement/Rotation** انتخاب و سرعت خطی موردنظر وارد خواهد شد. سایر شرایط مرزی موردنیاز نیز در همین مرحله به قطعات داده و قطعات طبق شرایط اعمال شده مقید می‌شوند. در شکل ۳۲ مدل مونتاژ شده ابزار و قطعه کار با اعمال شرایط مرزی نشان داده شده است.

نوع و سائز مش در دقت نتایج تحلیل، تأثیر بسیاری دارد و چنانچه مش خوب برای قطعات در نظر گرفته نشود، احتمال دقت پایین نتایج تحلیل و حتی واگرایی جواب تحلیل وجود خواهد داشت. در این پژوهش سعی شده است تا از طریق پارتیشن‌بندی و استفاده از مش‌های لبه‌ای، بهترین نوع مش برای قطعات استفاده شود تا جواب تحلیل، دقت کافی را داشته باشد. مطابق شکل ۳۳ برای قطعه کار شکل هندسی مش **Hex/Structured** می‌باشد و براساس نوع تحلیل که **Coupled Temperature-displacement** است، نوع مش **C3D8RT** می‌باشد. نکته بسیار مهم آن است که با توجه به تغییر شکل شدید قطعه در این مدل‌سازی، به صورت ساده مش‌ها له

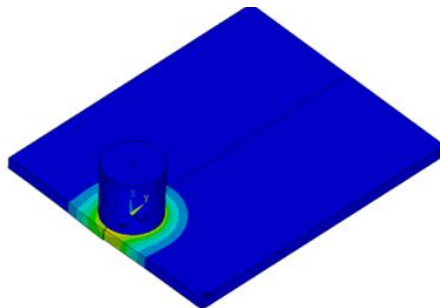
می‌شوند و جواب تحلیل‌ها اشتباه درمی‌آیند و تحلیل واگرا می‌شود. در این مرحله باید از Adaptive meshing استفاده کرد که مربوط به مش‌بندی اویلر و لاگرانژ می‌باشد.

در شکل ۳۴ شبیه‌سازی مدل مونتاژ شده ابزار و قطعه کار در حین انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است. در انتها شرایط بهینه جوشکاری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و خروجی‌های مورد نیاز از نرم‌افزار استخراج شده است.

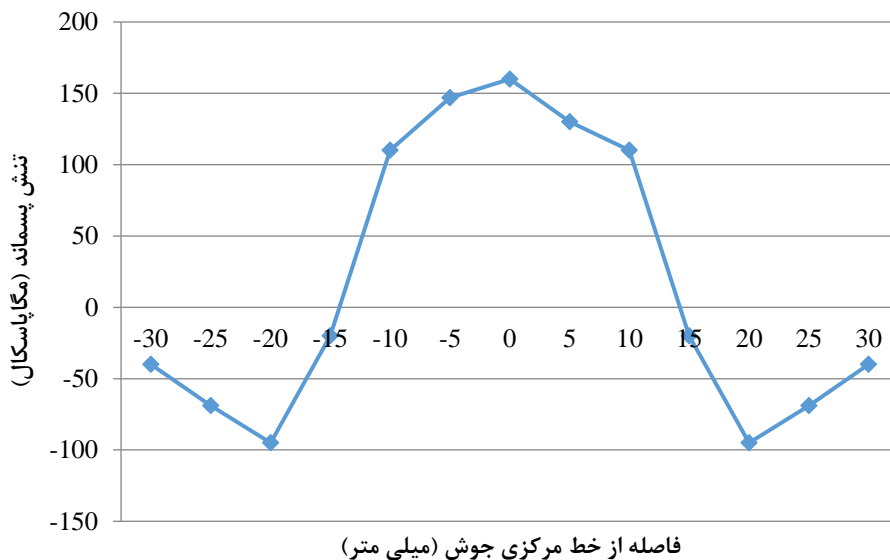
در شکل ۳۵ تنش‌های پسماند ناشی از عملیات جوشکاری نشان داده شده است و مشاهده می‌شود در نواحی که عمل اغتشاش بیشتر صورت گرفته است و متحمل شار حرارتی بیشتری شده، تنش پسماند باقی مانده نیز بیشتر است. با توجه به شکل ۳۵ مشاهده می‌شود که در ناحیه STIR تنش پسماند مثبت و از نوع کششی می‌باشد و در نواحی اطراف و مناطق HAZ مقدار تنش پسماند منفی و از نوع فشاری است. در عملیات جوشکاری، بعد از مرحله سرد شدن جسم، تنش‌هایی در آن باقی می‌ماند که به این تنش‌ها، تنش‌های پسماند می‌گویند. این تنش‌ها و همچنین تغییر شکل‌های ناخواسته ناشی از جوشکاری، مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ضعیف شدن اتصالات جوشی و ناکارایی آن‌ها در تحمل طولانی‌مدت بارها می‌شوند. تنش پسماند اطراف جوش یکپارچگی قطعه جوش شده را از بین می‌برد و کششی بزرگ در نزدیکی خط جوش ایجاد می‌کند که باعث ترد شدن قطعه کار و کاهش طول عمر سازه می‌شود. علاوه بر این، تنش‌های پسماند فشاری نیز در نقاطی دورتر از خط جوش به وجود می‌آیند که اثرات سویی بر کماتش اعضای فشاری دارند.



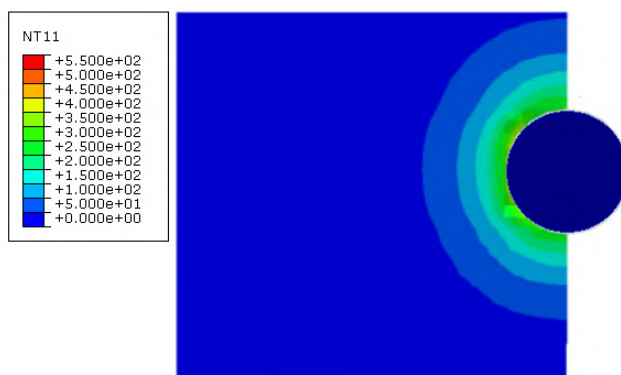
شکل ۳۳. مدل مش‌زده شده قطعه کار و ابزار



شکل ۳۴. شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

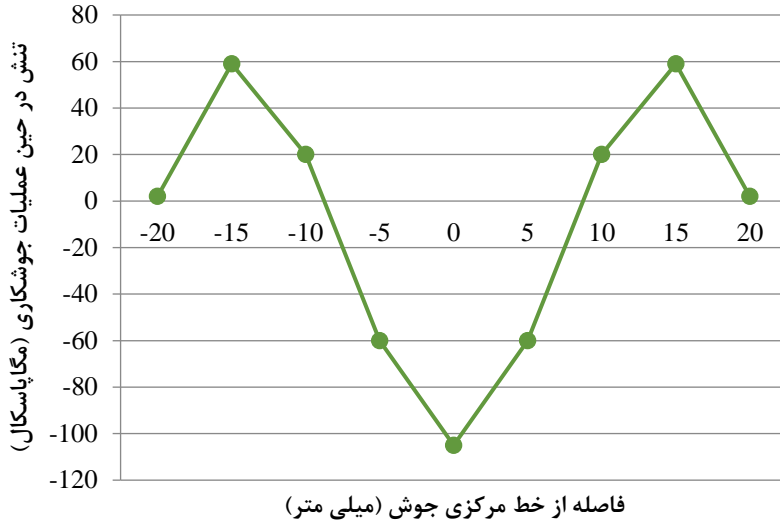


شکل ۳۵. تنش پسماند ایجادشده در نمونه، بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش

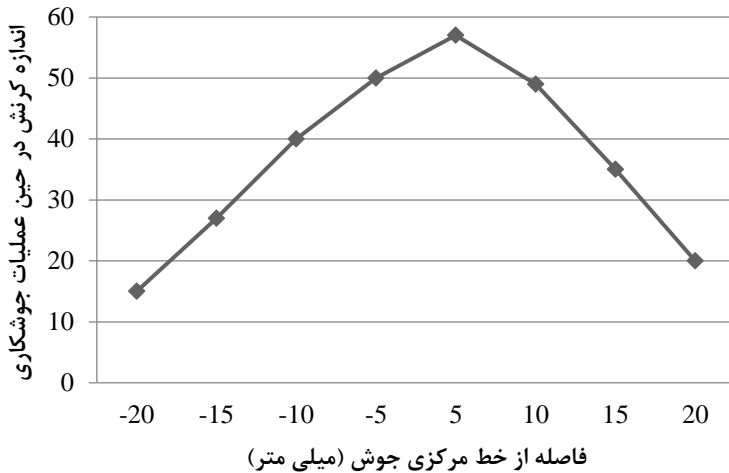


شکل ۳۶. کانتور حرارتی ایجادشده روی قطعه کار در حین فرایند

به طور کلی، می توان بیان کرد که تنش ایجادشده در قطعه حین عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رابطه عکس با دمای ایجادشده و توزیع حرارتی در ساختار قطعه دارد. کانتور حرارتی به وجود آمده بر قطعه کار در حین انجام فرایند در شکل ۳۶ نشان داده شده است. در هر مرحله که دمای بیشتری در قطعه ایجاد شده باشد و به تبع آن توزیع حرارتی بیشتری به وجود آمده باشد، تنش کمتری به قطعه وارد می شود و عمل اغتشاش مورد نیاز با مقادیر کمتری از تنش اعمال شده به قطعه صورت خواهد گرفت که نتایج حاصل از تنش وارد شده بر قطعه تحت عملیات جوشکاری در شکل ۳۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳۷. تنش ایجادشده در قطعه حین عملیات، بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش



شکل ۳۸. کرنش ایجادشده در قطعه حین عملیات بر حسب فاصله از خط مرکزی جوش

به‌طور کلی، در شرایط جوشکاری در هر ناحیه‌ای که تنش دارای مقادیر بالاتری باشد، به تبع آن کرنش نیز در آن ناحیه بیشتر خواهد شد. این موضوع را می‌توان در جوشکاری براساس تنش پسماند و میزان کرنش در قطعات بیان کرد. شکل ۳۸ نشان‌دهنده اندازه کرنش ایجادشده در قطعه حین عملیات جوشکاری می‌باشد.

نتیجه گیری

این پژوهش شامل مطالعه آزمایشگاهی، مدل سازی تجربی و پیش بینی دقیق و بهینه سازی استحکام کششی، سختی و کش آمدگی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلومینیوم ۵۰۱۰ می باشد. هدف اصلی در این پژوهش بررسی تأثیرات پارامترهایی نظیر هندسه پین ابزار، سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی پیشروی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر ورق ها بوده است. از این رو، آزمایش های انجام شده به دو قسمت تقسیم بندی شد. آزمایش های مرحله اول به طراحی بهینه هندسه ابزار اختصاص داده شد. در این مرحله تعداد ۹ آزمایش تحت شرایط مختلف اصطکاک بین ابزار و ورق با هندسه های مختلفی مانند پین استوانه ای ساده، پین مربعی و پین مثلثی انجام شد. پس از انجام آزمایش ها، نتایج، بررسی شد و ابزاری که سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش آمدگی شد، انتخاب گردید. در ادامه کار، آزمایش های مرحله دوم با ابزاری انجام شد که در مرحله اول آزمایش ها انتخاب گردید. در مرحله دوم آزمایش ها، هدف بررسی تأثیرات پارامترهای فرایندی مانند سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی پیشروی جوش و عمق شناوری شانه ابزار بر استحکام کششی، سختی و کش آمدگی بود. همچنین انتخاب شرایط بهینه ای که فرایند به بیشترین مقدار استحکام کششی، سختی و کش آمدگی برسد، از اهداف این مرحله بود. از این رو، تعداد ۲۰ آزمایش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. جهت بررسی تجربی تأثیرات پارامترها بر استحکام کششی، سختی و کش آمدگی از روش پاسخ سطح استفاده گردید. با استفاده از این روش، گراف ها و نمودارهایی در نرم افزار دیزاین اکسپرت رسم شد که اثرات متغیرها را به درستی نمایش می دهد. پس از بررسی تجربی و تحلیل نتایج، برای پیش بینی دقیق خواص مکانیکی بیان شده، از شبکه های عصبی مصنوعی استفاده شد. با استفاده از این شبکه، یک رابطه دقیق بین پارامترها و خواص مکانیکی ایجاد شد تا بتوان بدون انجام آزمایش، خواص مکانیکی را پیش بینی کرد. در ادامه کار، این مدل دقیق با الگوریتم اجتماع ذرات ترکیب شد تا بتوان پارامترهای فرایند را طوری به دست آورد تا تحت آن شرایط پارامترهای استحکام کششی، سختی و کش آمدگی به بیشترین مقدار خود برسند.

با توجه به توضیحات داده شده، خلاصه نتایج به شرح زیر می باشد:

- در بین پین ها با هندسه های استوانه ای، مثلثی و مربعی، پین با هندسه مربعی سبب رسیدن به بیشترین استحکام کششی، سختی و کش آمدگی شده است. بعد از پین مربعی، پین مثلثی بالاترین خواص مکانیکی را دارد. دلیل این پدیده وجود حالت های چند لبه در این پین ها است که سبب بهتر هم زدن منطقه جوش می شود و خواص مکانیکی جوش را بهبود می بخشد.
- با افزایش سرعت چرخش ابزار، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی، افزایش پیدا می کند و به حد ماکزیمم در ۸۰۰ دور بر دقیقه می رسد. سپس با افزایش بیشتر سرعت چرخش ابزار، مقدار استحکام کششی و سختی رفته رفته کاهش می یابد. اما با افزایش سرعت چرخشی ابزار مقدار کش آمدگی به دلیل توسعه حرارت و درشت تر شدن دانه ها افزایش پیدا خواهد کرد.
- با افزایش سرعت پیشروی جوش، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی، افزایش می یابد و به حد ماکزیمم در ۶۰ میلی متر بر دقیقه می رسد. سپس با افزایش سرعت پیشروی، مقدار استحکام کششی و سختی رفته رفته کاهش خواهد یافت؛ اما با افزایش سرعت پیشروی، به دلیل کم شدن حرارت، مقدار کش آمدگی دچار کاهش می شود.
- عمق غوطه وری ابزار، رفتاری مشابه با سرعت چرخشی ابزار دارد؛ یعنی با افزایش عمق غوطه وری، ابتدا مقدار استحکام کششی و سختی افزایش می یابد و به حد ماکزیمم در ۰/۲ میلی متر می رسد، سپس با افزایش بیشتر

عمق غوطه‌وری مقدار استحکام کششی و سختی رفته‌رفته کاهش پیدا می‌کند. اما با افزایش عمق غوطه‌وری مقدار کش آمدگی به دلیل توسعه حرارت و درشت‌تر شدن دانه‌ها افزایش خواهد یافت.

- در مدل‌سازی و پیش‌بینی استحکام، سختی و کش آمدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی، یک شبکه پس از انتشار با ساختار ۳-۱۱-۳ سبب رسیدن به بالاترین دقت خواهد شد. این شبکه در داده‌هایی که در آموزش آن حضور نداشتند نیز آزمایش شد و نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی آن به دست آمد.
 - هنگام بهینه‌سازی به دلیل اهمیت بیشتر استحکام کششی و سختی، به آنها در مقایسه با کش آمدگی، وزن‌های بیشتری داده شد. پس از بهینه‌سازی، نتایج نشان داد که سرعت چرخش ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق غوطه‌وری ۰/۲ میلی‌متر سبب رسیدن به بیشترین مقدار استحکام، سختی و کش آمدگی می‌شود.
 - با توجه به مدل‌های شبیه‌سازی شده مشخص شد در نواحی که عمل اغتشاش و شار حرارتی بیشتری صورت گرفت، تنش پسماند باقی‌مانده نیز بیشتر شد. در ناحیه STIR، تنش پسماند مثبت و از نوع کششی و در نواحی اطراف و مناطق HAZ مقدار تنش پسماند منفی و از نوع فشاری می‌باشد.
 - با توجه به مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که تنش ایجاد شده در قطعه حین عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رابطه معکوس با دمای ایجاد شده و توزیع حرارتی در ساختار قطعه دارد؛ هرچه در قطعه ایجاد شده دما بیشتر و به تبع آن توزیع حرارتی بیشتری باشد، تنش کمتری به قطعه وارد می‌شود و عمل اغتشاش مورد نیاز با مقادیر کمتری از تنش اعمال شده به قطعه صورت می‌گیرد. تنش و کرنش در نواحی مرکزی جوش، دارای بیشترین مقدار و در اطراف منطقه جوش دارای کمترین مقدار می‌باشند.
- نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با انجام آزمایش‌های دوباره تأیید شد. این تأیید نشان‌دهنده آن است که هم مدل شبکه عصبی و هم الگوریتم اجتماع ذرات، کارایی و دقت لازم را در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرایند داشته‌اند.

References

- [1] Thomas, W. M. (1991). Friction stir butt welding. *Int. Patent No. PCT/GB92/02203*.
- [2] 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>
- [3] Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1), 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.124>
- [4] Taban, E., Gould, J. E., & Lippold, J. C. (2010). Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials & Design (1980-2015)*, 31(5), 2305-2311. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.010>
- [5] Zhou, C., Yang, X., & Luan, G. (2006). Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 418(1), 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.042>
- [6] Jayaraman, M., Sivasubramanian, R., & Balasubramanian, V. (2010). Establishing relationship between the base metal properties and friction stir welding process parameters of cast aluminium alloys. *Materials & Design*, 31(9), 4567-4576. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.040>

- [7] Jayaraman, M., Sivasubramanian, R., Balasubramanian, V., & Lakshminarayanan, A. (2008). Prediction of Tensile Strength of Friction Stir Welded A356 Cast Aluminium Alloy Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 9(1-2), 45-60. <https://doi.org/10.1515/IJMSP.2008.9.1-2.45>
- [8] Elangovan, K., Balasubramanian, V., & Babu, S. (2008). Developing an Empirical Relationship to Predict Tensile Strength of Friction Stir Welded AA2219 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), 820-830. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9240-6>
- [9] Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.025>
- [10] Ghosh, M., Kumar, K., Kailas, S. V., & Ray, A. K. (2010). Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys. *Materials & Design*, 31(6), 3033-3037. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.028>
- [11] Koilraj, M., Sundareswaran, V., Vijayan, S., & Koteswara Rao, S. R. (2012). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – Optimization of process parameters using Taguchi technique. *Materials & Design*, 42, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.016>
- [12] Murr, L. E., Flores, R. D., Flores, O. V., McClure, J. C., Liu, G., & Brown, D. (1998). Friction-stir welding: microstructural characterization. *Materials Research Innovations*, 1(4), 211-223. <https://doi.org/10.1007/s100190050043>
- [13] Mohammad Khani Haji KhajeLu, B., & Maleki, M. (2020). Experimental Investigation of Dynamic Density of Aluminum Powder under High Speed Loading. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 157-175. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112762>

Table of contents

Detection of Network Penetration by Data Mining and Using Machine Learning Via SVM Algorithm	13
Amir Abbas Namjooye Rad, Mahdi Dadgarpour	
Investigating the Metric Dimension of an Intersection Graph in a Commutative Ring	35
Reza Nikandish	
Electric Power Subsystem Modeling of a Remote Sensing Satellite Based on Multi-Input and Output Fuzzy Systems	45
Morteza Ramezani	
State Estimation of an Aviator Using Fuzzy Mixed Kalman/ H-infinity Filter	61
Mohammad Ali Kazemi, Mojtaba Masoumnezhad, Nematollah Askari	
Optimization of Nuclear Reactor Power with Control Rods Driven by Switched Reluctance Motor (SRM) with Differential Evolution and Firefly Algorithms	81
Farzaneh Mohammadi, Mohammad Molaei, Omid Afra	
Redesign of Engine Radiator Based on Number of Optimal Fans Using a Genetic Algorithm	99
Bahman Rahmatinejad, Mahdi Abbasgholipour, Behzad Mohammadi Alasti	
The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine	119
Sayad Nasiri, Hossein Rahimi Asiabarak, Ehsan Razaghi	
Evaluation of Fuel and Spark System Variables of a Gasoline Engine Due to Lack of Timely Replacement of Fuel Filter	135
Mani Ghanbari, Lotfali Mozafari Vanani	
Designing of PIADδ Controller for PMLDC Motor Using Metaheuristic Algorithms	149
Morteza Abdolhosseini, Rohollah Abdollahi, Meraj Rajaei	
Applying Taguchi Method to Optimize EDM Parameters on Inconel 718 Super Alloy	167
Karim Aliakbari, Mohammad Reza Saberi, Morteza Andalib	
An Experimental Investigation into the Coupling of Gamma-Type Stirling Engine to Convert Thermal Energy to Cooling Energy in Different Laboratory Conditions	187
Ezatollah Hassanzadeh, Mehdi Aliehyaei, Saeed Jafari Mehrabadi, Arash Mohammadi, Hossein Mazaheri	
Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Networks	215
Seyed Reza Salim Bahrami, Reza Shakeri, Behzad Habibi Hajikolai	
General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures	239
Reza Moradi, Ebrahim Khalilzadeh Vahidi	
Investigation the Effect of Lubricant Amount and Annealing of Powders on the Magnetic Properties of Sendust Magnetic Powder Cores	259
Maryam Amoohadi	

Design of a Microstrip Bandpass Filter Using Metamaterials	271
Seyed Ali Hashemi Talkhouncheh, Ahmad Basafa	
Magnetic Hyperthermia Investigation of Cobalt Ferrite Nanoparticles	281
Ahmad Reza Yasemian	
Investigation and optimization of friction stir welding process of aluminum 5010 to 6061	291
Peyman Ghasemi Tamami, Abootaleb Javadimanesh, Saeid Mardani	

Karafan

Quarterly Research Journal of
Technical and Vocational University
Winter, 2021
Vol. 17, No. 4, Serial Number 50



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 - F. Rasti, M.
Pouyandekia

Editorial Board:

Dr. Ebrahim Salehi Omran:

Professor of Mazandaran University and Technical and Vocational University

Dr. Nematollah Azizi:

Professor of Kurdistan University

Dr. Mohsen Jahanshahi:

Professor of Babol Noshirvani University of Technology

Dr. Seyyed Ali Asghar Ghoreishi:

Professor of Babol Noshirvani University of Technology

Dr. Masoud Shafiee:

Professor of Amir Kabir University of Technology

Dr. Hasan Moslemi Naieni:

Professor of Tarbiat Modares University

Dr. Seyyed Heydar Mirfakhreddini:

Associate Professor of Yazd University and Technical and Vocational University

Dr. Vida Taghvaei:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dr. Alireza Fathi:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dr. Akbar Jafari:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dear Reviewers of the articles in this issue:

Mahdi Ahmadi, Maryam Amohadi, Azam Anbarki, Behrouz Asadi, Farzin Azimpour, Moharam Bakhtiyari, Vahid Bohlouri, Yaghoub Dadgar, Masoud Dehghani, Vali Enjil, Mani Ghanbari, Elyas Haddadi, Mohsen Kamyar, MohammadAli Kazemi, Amir Khaledian, Farkhondeh Kiaei, Maryam Majidzadeh, MohammadReza Modaberniya, Amin MotamediNasab, SeyedHasan Nabavi, Valiolah PanahiZadeh, Hadi Qasemi, Parviz Qoddousi, Alireza Raeesi, MohammadHossein Saemiyani, Farzad Shaveysi, Pedram Sodagar, Mohammad Yousefian.

In the Name of God

Karafan

Quarterly Research Journal of
Technical and Vocational University

Winter, 2021

Vol. 17, No. 4, Serial Number 50

Due to certificate No. 3/18/60837 from the scientific
dated 21/07/2013
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) 42350416

Email: karafan@tvu.ac.ir
Website: <http://karafan.tvu.ac.ir>