



کارافن

فصلنامه علمی - پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دوره هجدهم - شماره یک - شماره پیاپی ۵۲

بهار ۱۴۰۰

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: ۰۲۱-۴۲۳۵۰۴۱۸

پست الکترونیک: karafan@tvu.ac.ir

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

فصلنامه علمی - پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دوره هجدهم - شماره یک - شماره پیاپی ۵۲
بهار ۱۴۰۰

کارافنی



صاحب امتیاز: دانشگاه فنی و حرفه‌ای

مدیر مسئول: دکتر ابراهیم صالحی عمران

سر دبیر: دکتر نعمت‌اله عزیزی

مدیر داخلی: دکتر آذرچهر صحت

طراحی و اجرای جلد:

مهندس محمد مشتاقی - سمیرا داناسرشت

ویرایش و صفحه‌آرایی:

لامعه هاشمی، عاطفه طهماسبی، مهری پوینده کیا

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر ابراهیم صالحی عمران

دکتر نعمت‌اله عزیزی

دکتر محسن جهانشاهی

دکتر سید علی اصغر قریشی

دکتر مسعود شفیعی

دکتر حسن مسلمی نائینی

دکتر محمدرضا مهرنیا

دکتر سید حیدر میرفخرالدینی

دکتر ویدا تقوایی

دکتر احمد رضا حقیقی

دکتر اکبر جعفری

دکتر مهدی چهل امیرانی

دکتر سید محمد حسین سید کاشی

دکتر مهدی ملکان

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

استاد دانشگاه تهران

دانشیار دانشگاه یزد و دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دانشیار دانشگاه ارومیه

دانشیار دانشگاه بیرجند

دانشیار دانشگاه تهران

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

ولی انجیل‌الی، احمد بدران، حسینعلی بگی، مریم بهمنی، محمد مهدی پایدار، آرش تحویلی، مهدی جعفری، مصطفی جعفری - کرمانی‌پور، یعقوب دادگراصل، جمال داورپناه، بهمن رحمتی‌نژاد، سبحان رستمی‌گوهری، محمدرضا زاهدی، پرویز سعیدی‌فر، پدرام سوداگر، سیدحیدر میرفخرالدینی، سیدمحمدحسین سیدکاشی، سیدمحمد سیدکلبادی، محمدحسین صائمیان، رسول صفدریان، سوده عقلی‌مقدم، محسن فضولی، سیدحسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد، هدی قریشی، محمد محمدپورعمران، علیرضا میرعرب‌بایگی.

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) به‌عنوان «نویسنده» ثبت‌نام و پس از تکمیل فرم مربوط به اطلاعات فردی، برای بارگذاری مقاله به قسمت «ارسال مقاله» مراجعه کند. گفتنی است نویسنده باید پیش از بارگذاری فایل‌های مربوط، مقاله را بر اساس راهنمای تدوین مقالات کارافن تنظیم کرده باشد.

۵. آثار ارسالی نباید پیش‌تر در هیچ نشریه‌ای به چاپ رسیده یا هم‌زمان به 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 مآخذ مورد

استفاده بوده و به ترتیب شماره‌گذاری شوند.

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

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

عنوان: غیرتکراری، 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 ۱۵۰ 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: نویسندگان یا نویسندگان. نام خانوادگی به همراه اولین حرف نام. سال انتشار کتاب (در پرانتز).

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

مثال:

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

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

مثال:

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

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

مثال:

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

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

مثال:

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

۱۳. ارجاع داخل متن

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

ارجاع منابع در متن مقاله به 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) و علوم پایه:

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 می شود 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، آن ها 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: عکس ها، تصاویر، نمودارها و جداول با کیفیت مناسب و با اشاره به منبع مورد استفاده (نام خانوادگی نویسنده، سال انتشار، شماره صفحه) تهیه شود.

۱۴. عکس ها، 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 جداگانه ای ضمیمه مقاله شوند.

۱۵. مسئولیت هر مقاله از نظر علمی، ترتیب اسامی نویسنده ها 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 نویسنده های مقاله به همان صورتی که در تعهدنامه ارائه شده است، مورد قبول است. تقاضای حذف یا تغییر در ترتیب اسامی نویسنده ها تنها پیش از داوری نهایی و با درخواست کتبی تمامی نویسنده ها 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، مقاله های تأیید شده را طبق شیوه نامه خود ویرایش می کند.

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

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

۲۱. چاپ مقاله های منتشر شده در کارافن در سایر مجله ها و کتاب ها، با بیان مأخذ بلامانع است.

- ۱۳ بررسی پایداری و آنالیز حساسیت ژنراتور القایی خود تحریک در نیروگاه بادی
جلال صاحبکار، حسن شادمان، محمد زارعین، محمد شادمان
- ۳۵ حل نیمه تحلیلی انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی
مجتبی معصوم نژاد، محمدعلی کاظمی، نعمت‌اله عسکری، محمدحسن طاهری، مهدی قامتی
- ۶۳ بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی جهت تقویت قاب‌های بتن آرمه
علیرضا عزالدین
- ۸۱ تخمین مقاومت فشاری بتن دارای الیاف لاستیک ضایعاتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
سید رضا سلیم بهرامی
- ۹۹ تأثیر اتصال انعطاف‌پذیر بر کاهش آسیب‌های لوله‌های مدفون گاز ناشی از جابه‌جایی زمین
سیدمحمد سیدکلبادی
- ۱۲۱ بررسی تأثیر تغییر چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان بر تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر انفجار سطحی
محسن فضلوی، امیرعباس اسدیان
- ۱۳۹ مقایسه نظام مالکیت حاکم بر قوانین زیست‌محیطی معادن ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین
مرتضی هاشم‌پور، مهدی غضنفری
- ۱۵۳ تفکیک دگرسانی‌های گرمایی مرتبط با کانی‌سازی مس با استفاده از پردازش تصویر استر برگه سرچاه‌شور، شرق ایران
مرتضی حسینی
- ۱۶۹ بررسی تأثیر متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن با استفاده از پرینتر سه‌بعدی به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای (FDM)
علی عسگری اقدم، یعقوب دادگراصل، محمدمراد شیخی
- ۱۸۹ ارائه یک مدل چندهدفه زمان‌بندی تولید با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده، هزینه‌های زودکرد، دیرکرد، WIP و جریمه‌های قطع کار با رویکرد قابلیت اطمینان
علیرضا عزیزی، محمد مهدی موحدی، سید احمد شایان‌نیا
- ۲۰۳ پیش‌بینی ارزش سهام با استفاده از شبکه عصبی فازی پیشنهادی و الگوریتم ترکیبی
وحید صفری دهنوی، مسعود شفيعی
- ۲۲۳ حذف روی از پساب صنعتی به‌وسیله غلاف نخود فرنگی
مریم فخارزاده

سخن سردبیر

با تلاش پیگیر و همکاری بی دریغ معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه، اعضای محترم هیأت تحریریه، مدیریت محترم داخلی و کارشناسان گرامی فصلنامه در سال ۱۳۹۹ کارنامه درخشانی از حوزه مسؤولیت حرفه ای فصلنامه کارافن حاصل گردید. در دوره مذکور، به حمدالله توانستیم علاوه بر انتشار ۴ شماره از دوره هفدهم، یک شماره ویژه نامه علوم انسانی را با میانگین ۱۴ مقاله در هر شماره به زیور چاپ رسانده و تقدیم جامعه دانشگاهی و پژوهشگران کشور نماییم. ارتقای جایگاه علمی فصلنامه و احراز رتبه ب از سوی کمیسیون نشریات کشور در سال ۹۸ و سرعت و کیفیت فرایند ارزیابی آکادمیک مقالات واصل شده به دبیرخانه نشریه از طرفی و کیفیت پاسخگویی همکاران و کارشناسان خدوم در دفتر نشریه سبب افزایش خیره کننده اقبال عمومی دانشگاهیان، پژوهشگران و دانشجویان دوره تحصیلات تکمیلی بویژه دانشجویان دوره دکتری به فصلنامه کارافن گردیده و کارشناسان را با حجم روبه افزونی از مقالات با کیفیت مواجه ساخته است. طوریکه در حال حاضر علاوه بر آماده کردن شماره اول از دوره هجدهم نزدیک به ۴۰ مقاله دیگر نیز در لیست مقالات آماده انتشار در سامانه فصلنامه بارگذاری گردیده است. به همین دلیل و با عنایت به ضرورت ایجاد نشریات تخصصی تر در سال جاری، بنابراین است که مقدمات اداری، علمی و اجرایی لازم برای ایجاد حداقل ۳ نشریه علمی -تخصصی دیگر در دانشگاه فنی و حرفه ای فراهم گردد و با این اقدام جایگاه دانشگاه از نظر تعداد مجلات علمی مصوب در سامانه مجلات علمی کشور ارتقای یابد و انگیزه پژوهشگران برای چاپ آثار علمی خود در نشریاتی کاملاً تخصصی تقویت گردد. در خاتمه وظیفه خود میدانم ضمن سپاس از ریاست محترم دانشگاه و معاونین محترم ایشان، اعضای محترم هیأت تحریریه، از اهتمام گروه کثیری از همکاران دانشگاهی در ارزیابی و داوری علمی، دقیق، منصفانه و مسؤولانه مقالات تشکر کنم و برای همگان سلامتی و توفیق از درگاه خداوند منان آرزومندم.

نعمت الله عزیزی

سردبیر



Stability and Sensitivity Analysis of Wind Turbine Self-Excitation Induction Generator

Jalal Sahebkar¹, Hasan Shademan^{2*}, Mohammad Zareein³, Mohammad Shademan⁴

¹ MSc., Department of Electrical Engineering, Faculty of Shahid Rejaee, KhorasanRazavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Quchan, Iran.

² Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Faculty of Shahid Rejaee, KhorasanRazavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Quchan, Iran.

³ BSc., Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

⁴ BSc., Department of Civil Engineering, Faculty of Darolfonoon, North Khorasan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Bojnord, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.27.2020

Revised: 01.04.2021

Accepted: 02.23.2021

Keyword:

Sensitivity analysis

Eigenvalues

Dynamic model

Self-excitation induction generator

Stability of power systems.

ABSTRACT

Increasing the electrical demand causes the expansion of distributed generation sources and the interconnection of power systems. In the integrated power system, stability is one of the vital issues. The instability of the power system may cause a blackout. Therefore, the analysis of stabilities and sensitivities should be considered in power system studies. In this paper, the sensitivity analysis and eigenvalue of the induction wind generator were investigated by using a proper nonlinear model. First, the dynamic equations of the wind turbine induction generator were presented. For this purpose, the induction generator was connected to an infinite bus through a short transmission line. Sensitivity analysis was performed by changing some important system parameters. In this study, by changing the inductance and resistance of the transmission line, the variations of the induction generator were analyzed separately. Then the ratio r to x of the transmission line was investigated. Finally, the eigenvalues were considered for analysis of the case study's stability. Differential equations of the case study were solved using the Rang-Kutta order-four method with MATLAB software.

*Corresponding Author:

Hasan Shademan

Email: h.shademan@gmail.com





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پهار ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۱، ۳۳-۱۳

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

doi:10.48301/KSSA.2021.131036

20.1001.1.23829796.1400.18.1.1.0



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی پایداری و آنالیز حساسیت ژنراتور القایی خودتحریک در نیروگاه بادی

جلال صاحبکار^۱، حسن شادمان^{۲*}، محمد زارعین^۳، محمد شادمان^۴

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، آموزشکده شهید رجایی - قوچان، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، آموزشکده شهید رجایی - قوچان، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۳- کارشناسی، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۴- کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده دارالفنون - بجنورد، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان شمالی، ایران.

چکیده

امروزه، با توجه به افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، گسترش منابع تولید پراکنده و اتصال شبکه‌های قدرت به یکدیگر پایداری سیستم‌های قدرت، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در صورت بروز هر خطایی در شبکه، امکان قطع سراسری سیستم قدرت وجود دارد. به همین منظور آنالیز حساسیت و بررسی نقاط پایداری سیستم، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ماشین القایی به منظور بررسی پایداری آن به عنوان ژنراتور بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا به معرفی و ارائه معادلات دینامیکی ژنراتور القایی پرداخته شده که برای این منظور ژنراتور القایی از طریق یک خط انتقال کوتاه به باس بی‌نهایت متصل گردیده و سپس با تغییر در مشخصات خط انتقال به بررسی رفتار پارامترهای مختلف ژنراتور القایی پرداخته شده است. در این مطالعه، با تغییر در نسبت اندوکتانس و مقاومت خط انتقال به صورت جداگانه به تحلیل رفتار ژنراتور در اثر این تغییرات پرداخته شده است و سپس نسبت I به X خط انتقال که اهمیت بسزایی در پایداری سیستم دارد مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مقادیر ویژه سیستم مطالعه شده است. مدل سازی سیستم به صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده و معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش رانگ کوتا مرتبه چهار در نرم افزار متلب حل شده است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

کلید واژگان:

آنالیز حساسیت

مقادیر ویژه

مدل دینامیکی

ژنراتور القایی خودتحریک

پایداری سیستم‌های قدرت

*نویسنده مسئول: حسن شادمان

پست الکترونیکی:

h.shademan@gmail.com



© 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

به دلیل برخی مسائل نظیر آلودگی محیط زیست، نگرانی از اتمام منابع فسیلی و کاهش هزینه انرژی، تلاش های قابل توجهی برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر پاک نظیر انرژی باد صورت پذیرفته است [۱؛ ۲]. پیش بینی می شود که در آینده، بیشتر ساختار تولید توان توسط سیستم قدرت به صورت منابع به هم پیوسته از انرژی های تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید می شود [۳]. در حال حاضر، در بین منابع انرژی تجدیدپذیر سیستم های بادی، توجه اقتصادی بیشتری نسبت به دیگر منابع تجدیدپذیر دارند [۴]. توربین های بادی، از جمله فناوری های مطرح در تولید انرژی پاک می باشند که امروزه با سرعت زیادی در حال پیشرفت هستند، علت پیشرفت سریع آن مسائل زیست محیطی، اقتصادی و افزایش تقاضای انرژی الکتریکی می باشد [۵؛ ۶]. در نتیجه مطالعه در مورد اتصال این توربین ها به شبکه، بسیار مهم است [۷]. ماشین های القایی قفس سنجایی به دلیل قیمت پایین، مقاوم بودن و سهولت نگهداری، به وفور در صنعت به کار می روند. همین مزایا این ماشین را به عنوان گزینه ای مناسب برای استفاده در سیستم های بادی سرعت متغیر، مطرح می کند [۸؛ ۹]. توربین های بادی شامل توربین های بادی سرعت ثابت و متغیر می باشند [۱۰]. اکثر توربین های بادی که امروزه نصب می شوند به علت اقتصادی بودن، مقاوم بودن، نصب آسان تر، از نوع قفس سنجایی انتخاب می شوند [۱۱].

تحقیقات روی انرژی باد در مقیاس مختلف در حال پیشرفت است. از این رو استفاده از توربین های باد در مقیاس کوچک، به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده در نقاط دور دست و روستایی به سرعت در حال رشد می باشد [۱۲]. این مدل توربین ها ویژگی ها و مزایای زیادی دارند [۱۳].

از آنجایی که بررسی پایداری یک سیستم، از مهم ترین مطالعات در یک شبکه قدرت می باشد؛ در بسیاری از مطالعات، به آنالیز حساسیت و پایداری در یک سیستم قدرت پرداخته است [۱۴؛ ۱۵]. در [۱۶] به بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر پایداری اغتشاشات کوچک روی سیستم قدرت پرداخته است. در [۱۷] از روش جدیدی برای بررسی پایداری حالت گذرا با استفاده از آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه پرداخته است.

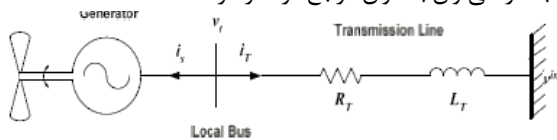
بررسی رفتار و عملکرد ژنراتورهای بادی به دلیل طبیعت نوسانی توان باد ورودی به توربین آن ها و رفتار گذرای ناشی از آن، نیازمند مدل های مناسبی می باشند. رفتار دینامیکی ماشین القایی را می توان توسط معادلات دیفرانسیل مدل کرد. این معادلات دیفرانسیل به دلیل وابستگی به زمان و تغییرات سرعت روتور دارای پیچیدگی زیادی هستند که به منظور کاهش محاسبات و حل معادلات دیفرانسیل، متغیرها را می توان به چارچوب مرجع دلخواه انتقال داد که در سرعت زاویه ای اختیاری می چرخند [۱۸].

در این مقاله، به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ژنراتور القایی خودتحریک، با استفاده از مدل ساده دینامیکی پرداخته شده است. در ادامه، به منظور بررسی رفتار دینامیکی این ژنراتور و اتصال آن به شبکه، از یک خط انتقال کوتاه استفاده شده و با تغییر پارامترهای این خط، تغییرات پارامترهای مختلف ژنراتور القایی مطالعه شده است. در انتها به بررسی نتایج شبیه سازی و مطالعه بر تغییر پارامترها پرداخته شده است. مدل سازی سیستم به صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده است. معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش رانگ کوتا مرتبه چهار، حل شده است.

مدل دینامیکی سیستم

شکل (۱) مدل شبکه مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد. این مدل شامل دو باس می باشد که باس محلی، به ژنراتور القایی متصل می شود و باس بی نهایت، به خط انتقال کوتاه متصل است. به منظور بررسی رفتار دینامیکی ژنراتور باید این ژنراتور را به سیستم قدرت وصل کرد و درواقع سیستم های قدرت شامل ژنراتورهای مختلف و بار می باشند که از طریق شبکه های انتقال با هم در ارتباطند. برای تجزیه و تحلیل ساده، ژنراتورهای دیگر سیستم را می توان با یک واحد تولید بزرگ با ظرفیت بی نهایت نشان داد و خط انتقال را توسط یک مقاومت و یک اندوکتانس

مدل کرد. باس بی‌نهایت، ولتاژ و فرکانس ثابت دارد و هیچ‌یک از آن‌ها تحت تأثیر ژنراتور مورد مطالعه تغییر نمی‌کنند. این بدین معناست که ولتاژ شبکه را می‌توان به‌عنوان مرجع در نظر گرفت.



شکل ۱. ژنراتور بادی اتصال سری متصل به باس بی‌نهایت

حال به‌منظور بررسی دینامیکی این مدل، نیاز به نوشتن معادله دیفرانسیل d-q، برای ژنراتور القایی اتصال سری و خط انتقال می‌باشد.

مدل دینامیکی ژنراتور القایی

به‌طور کلی می‌توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را به‌صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (۱)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (۲)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + p \lambda_{dr} \quad (۳)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + p \lambda_{qr} \quad (۴)$$

که R_s و R_r به‌ترتیب مقاومت‌های روتور و استاتور، i_{ds} و i_{qs} جریان‌های انتقال‌یافته استاتور به محورهای d و q، i_{dr} و i_{qr} جریان‌های انتقال‌یافته رتور به محورهای d و q، V_d و V_q ولتاژهای انتقال‌یافته به محورهای d و q، ω فرکانس زاویه الکتریکی ولتاژ منبع می‌باشند. در معادلات (۱) تا (۴) مقادیر رتور به سمت استاتور ارجاع داده‌شده است. شارهای پیوندی در این معادلات از روابط (۵) به‌دست می‌آید:

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

(۵)

$$\lambda_{dr} = L_{1r} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$

$$\lambda_{qr} = L_{1s} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

که L_s و L_r به ترتیب اندوکتانس‌های ناشی استاتور و رتور، L_m ماکزیمم اندوکتانس متقابل رتور و استاتور می‌باشند.

با تغییر در جهت جریان در سیم‌پیچی استاتور می‌توان از این ماشین به صورت ژنراتور استفاده کرد. معادله گشتاور برای این ماشین در حالت ژنراتوری از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۸].

$$T_L - T_e = JP_w_r + BW_r \quad (6)$$

که T_L گشتاور مکانیکی بار، T_e گشتاور الکترومغناطیسی توسعه‌یافته، W_r سرعت مکانیکی رتور می‌باشند.

به‌طور کلی می‌توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را با توجه به (۷) به صورت زیر نوشت:

$$P[i] = [L]^{-1}([V] - [R][i] - [G][i]) \quad (7)$$

که

$$V = [V_{dt} \quad V_{qt} \quad 0 \quad 0]^T \quad (8)$$

$$i = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (9)$$

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_s & 0 & \omega L_m \\ -\omega L_s & 0 & -\omega L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_m & 0 & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)L_m & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

مدل دینامیکی توربین بادی

توربین بادی، به وسیله مشخصه توان-سرعت آن توصیف می‌شود. توربین‌های بادی، انرژی جنبشی باد را مهار و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۱۹؛ ۲۰]. توان قابل تولید یک توربین بادی مطابق با فرمول‌های مربوطه متناسب با سطح دایره‌ای شکل است که از چرخش پره‌های رتور حاصل می‌شود. به این دلیل با توجه به شرایط باد هر منطقه و میزان توان نامی توربین، پره‌های رتور در اندازه‌های متفاوت ساخته می‌شوند و توان آن توسط رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۱۸].

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (12)$$

که A مساحت سطح گردش روتور، V سرعت باد، ρ چگالی هوا و C_p ضریب قدرت نامیده می شود که طبق تعریف، درصدی از انرژی باد است که به انرژی مکانیکی تبدیل می شود. درواقع C_p تابعی از نسبت سرعت نوک بال است و به صورت زیر معرفی می شود:

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\gamma_i} - 0.04\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\gamma_i}} + 0.0068 \quad (13)$$

که:

$$\gamma_i = \frac{1}{\frac{1}{\gamma + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (14)$$

که v سرعت نوک رتور، γ سرعت نسبت نوک پره به سرعت باد، β زاویه پره می باشند.

مدل دینامیکی خط انتقال

خط انتقال در نظر گرفته شده دارای امپدانس $Z_T = (R_T + jX_T)$ است، جریان را به باس بی نهایت تزریق می کند. معادلات خط انتقال را در چارچوب مرجع سنکرون می توان به صورت (۱۵) بیان کرد.

$$V_{qt} = V_q^{\text{inf}} + R_T i_{qt} - w_s L_t i_{dt} + L_T P i_{qt} \quad (15)$$

$$V_{dt} = V_d^{\text{inf}} + R_T i_{dt} + w_s L_t i_{qt} + L_T P i_{dt}$$

که جریان خط انتقال به جریان ژنراتور القایی وابسته می باشد:

$$i_T = -i_s \quad (16)$$

مدل دینامیکی شبکه

با جایگذاری (۱۵) در روابط (۱) و (۲) می توان از ولتاژهای باس بی نهایت به منظور بیان ولتاژهای باس ژنراتور استفاده کرد. با جایگذاری این روابط در یکدیگر داریم.

$$P \begin{bmatrix} i^{\text{sys}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{\text{sys}} \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} V^{\text{sys}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R^{\text{sys}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^{\text{sys}} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} G^{\text{sys}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^{\text{sys}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

که :

$$V^{\text{sys}} = \begin{bmatrix} V_d^{\text{inf}} & V_q^{\text{inf}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

که V_d^{inf} و V_q^{inf} به ترتیب ولتاژهای انتقال یافته شبکه بی نهایت به محورهای d و q می باشند. جریان های سیستم عبارتند از:

$$i^{sys} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (۱۹)$$

همچنین پارامترهای دیگر رابطه (۱۶) نظیر L^{sys} و G^{sys} برابرند با:

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} L_s + L_t & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s + L_t & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

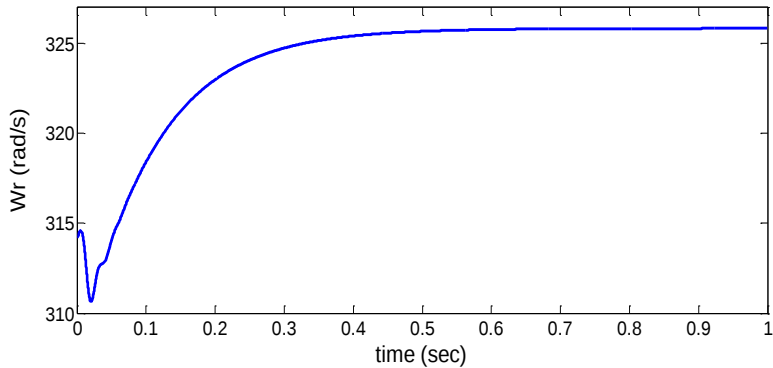
$$G = \begin{bmatrix} 0 & \omega(L_s + L_t) & 0 & \omega L_m \\ -\omega(L_s + L_t) & 0 & -\omega L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_m & 0 & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

از این بحث می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار دینامیکی این ساختار را می‌توان به‌وسیله معادلات دیفرانسیلی با متغیرهای i_{dr} ، i_{qr} ، i_{ds} ، i_{qs} و ω_r بیان کرد. این معادلات را می‌توان به روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم حل نمود.

نتایج شبیه‌سازی

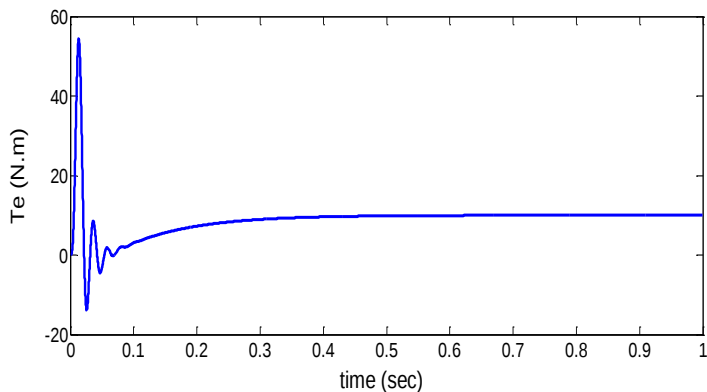
شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه، مطابق شکل (۱) صورت گرفته است. پارامترهای ماشین القایی سه فاز رتور سیم‌پیچی شده در نظر گرفته برای این تحقیق عبارتند از: توان نامی ماشین ۳.۶ KW، فرکانس ۵۰Hz، ۴۱۵ ولت، ۷/۸ آمپر، ۴ قطب، $L_{1r}=L_{1s}=۱۱/۴$ mH، $L_m=۱۸۰$ mH، $R_s=۱/۷$ و $R_r=۲/۷$ اهم می‌باشند [۱۹]. پارامترهای خط انتقال کوتاه $X_l=1\Omega$ و $R_l=0.1\Omega$ مورد استفاده قرار گرفته است.

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل سیستم به شرایط اولیه متغیرهای حالت نیاز است. مقادیر اولیه این متغیرها حالت گذرای شروع حل معادلات را تعیین می‌کنند. برای واقعی‌تر شدن جواب‌ها سرعت اولیه ماشین برابر سرعت سنکرون و جریان‌های اولیه ماشین مساوی صفر قرار داده شده‌اند [۱۸]. البته برای مشاهده اثر شرایط اولیه تحلیل با سرعت‌های اولیه مختلف نیز انجام شده است. شکل (۲) منحنی تغییرات زمانی سرعت ژنراتور القایی را از ابتدای حل با سرعت اولیه برابر سرعت سنکرون نشان می‌دهد. مطابق شکل پس از کمی افت دور اولیه، سرعت ژنراتور به آرامی افزایش می‌یابد و به سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون می‌رسد.



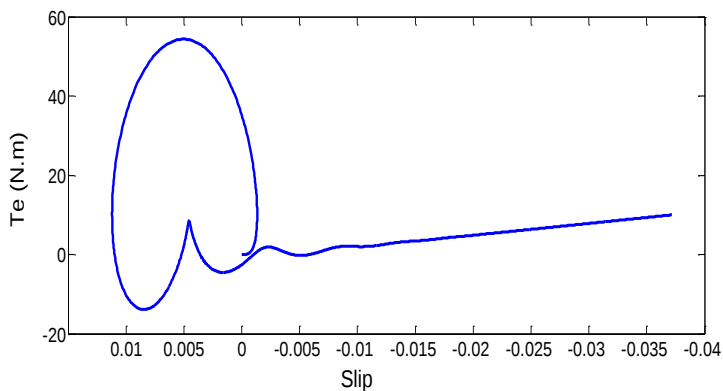
شکل ۲. منحنی مشخصه سرعت-زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۳) منحنی مشخصه گشتاور-زمان را نشان می‌دهد، مقدار این گشتاور پس از حالت گذرای اولیه در حدود ۰/۱ ثانیه به ۱۰ نیوتن متر می‌رسد. مطابق شکل ۳، ژنراتور القایی دارای گشتاور حالت گذرای نسبتاً زیادی می‌باشد.



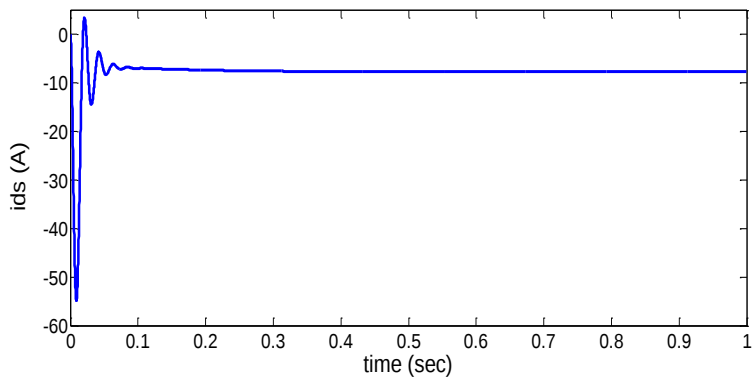
شکل ۳. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۴) منحنی مشخصه گشتاور- لغزش را در ژنراتور القایی متصل به شبکه را نشان می‌دهد که راه‌اندازی ژنراتور در سرعت سنکرون می‌باشد.

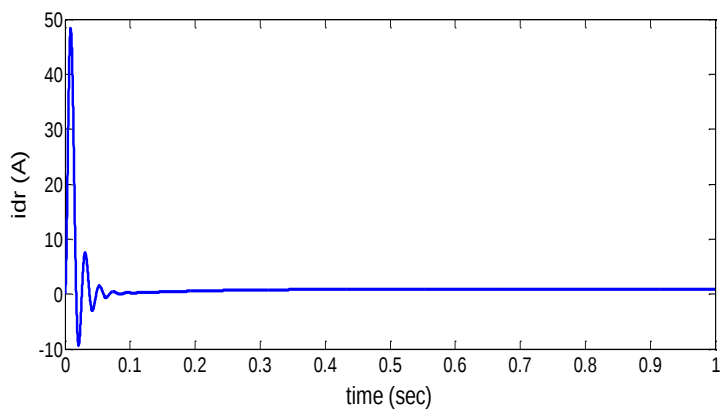


شکل ۴. منحنی مشخصه گشتاور-لغزش ژنراتور القایی متصل به شبکه

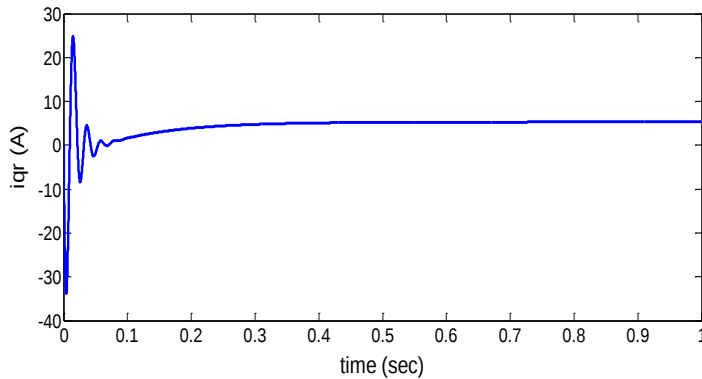
شکل‌های (۵) تا (۸) منحنی مشخصه جریان‌های ژنراتور القایی متصل به شبکه را نشان می‌دهند.



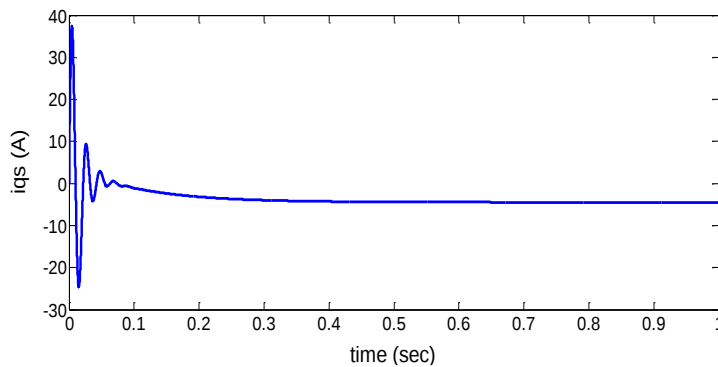
شکل ۵. منحنی مشخصه جریان i_{ds} ژنراتور القایی متصل به شبکه



شکل ۶. منحنی مشخصه جریان i_{dr} ژنراتور القایی متصل به شبکه



شکل ۷. منحنی مشخصه جریان iqr ژنراتور القایی متصل به شبکه



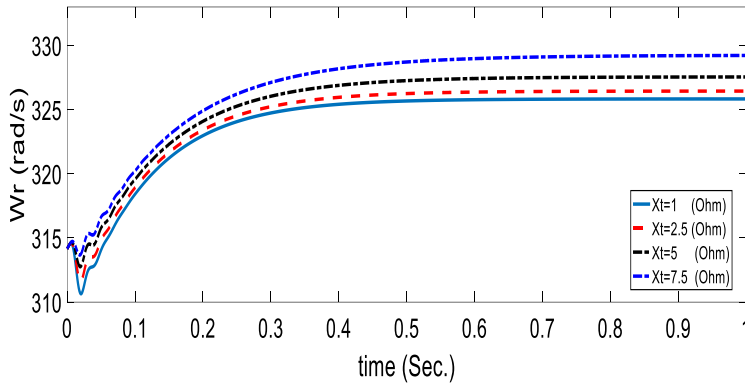
شکل ۸. منحنی مشخصه جریان iqs ژنراتور القایی متصل به شبکه

آنالیز حساسیت

در این قسمت، تحلیل حساسیت عملکرد ماشین با شرایط اولیه مختلف حل و تغییر پارامترهای سیستم و تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های گذرا و ماندگار مورد مطالعه بررسی شده است. در ادامه با استفاده از این آنالیز حساسیت، به بررسی مقادیر ویژه سیستم و پایداری آن در صورت تغییر در پارامترهای مورد مطالعاتی پرداخته شده است.

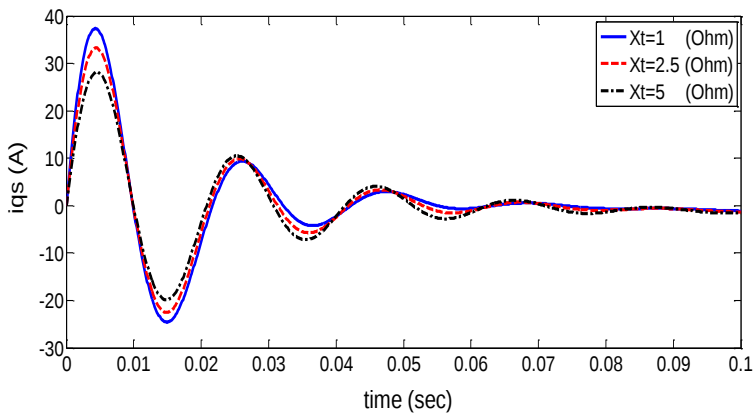
بررسی تغییرات در اندوکتانس خط انتقال

مدل خط انتقال کوتاه، شامل یک مقاومت و یک راکتانس است. خط انتقال، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیستم قدرت می‌باشد [۲۱]. در ادامه با تغییر در اندوکتانس خط و به بررسی تغییرات آن بر پارامترهای مختلف سیستم پرداخته شده است. شکل (۹) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد با افزایش این نسبت، سرعت ژنراتور افزایش پیدا می‌کند.

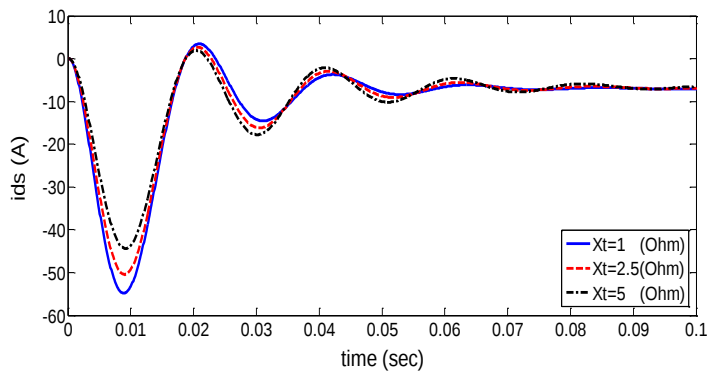


شکل ۹. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

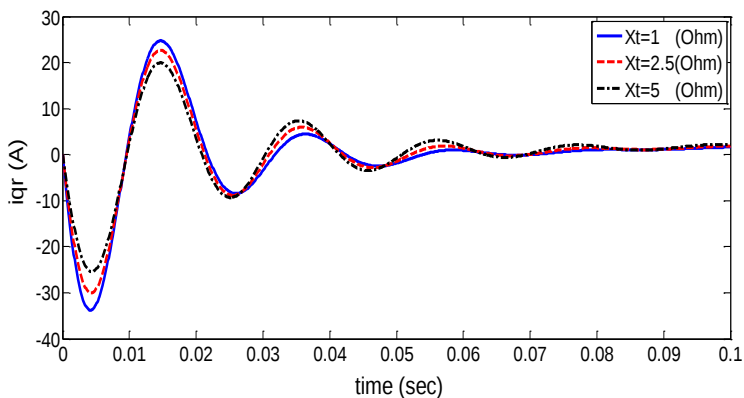
شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) تغییرات جریان محورهای d-q ژنراتور القایی را با تغییرات در نسبت اندوکتانس خط انتقال را نشان می‌دهند که بعد از حالت گذرا، به مقدار حالت پایدار خود می‌رسند.



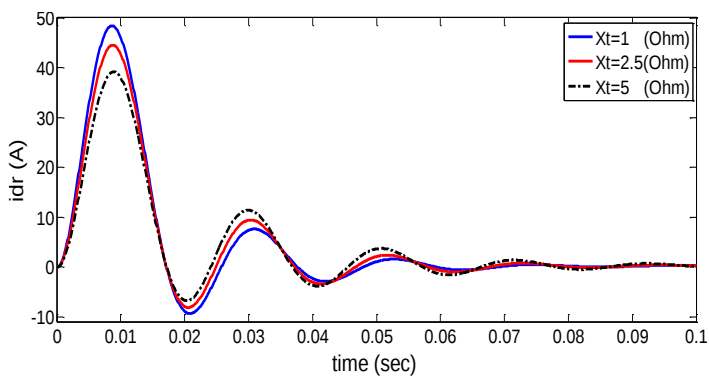
شکل ۱۰. تغییرات جریان i_{qs} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۱. تغییرات جریان i_{ds} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

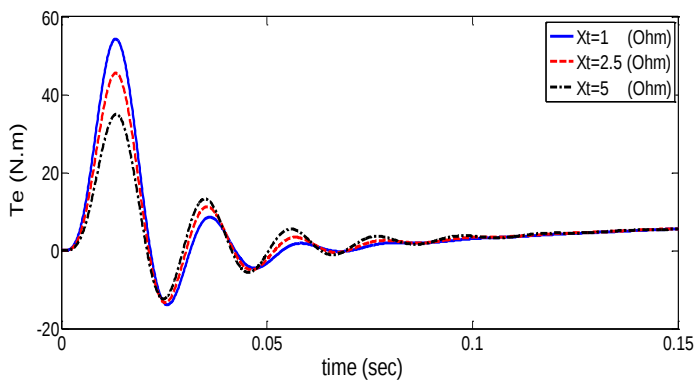


شکل ۱۲. تغییرات جریان i_{qr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۳. تغییرات جریان i_{dr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

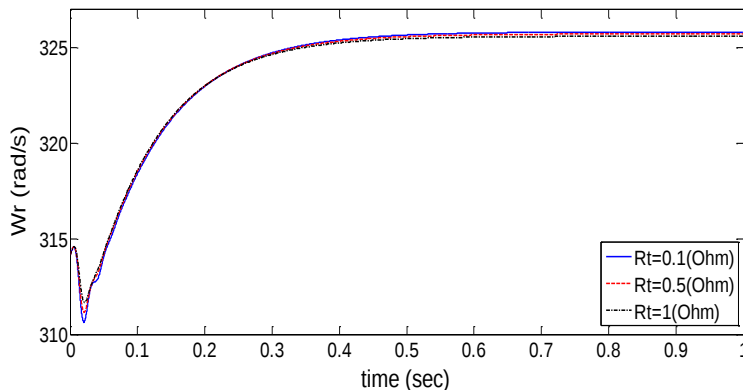
شکل (۱۴) تغییرات گشتاور را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از عبور از حالت گذرای اولیه، ثابت می‌شود و البته با افزایش اندوکتانس خط انتقال، حالت گذرای گشتاور کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

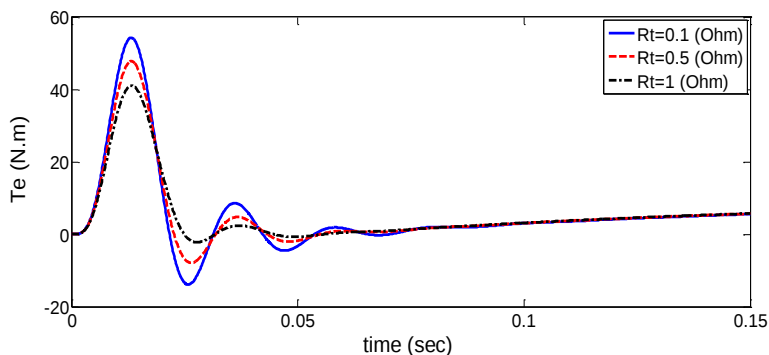
بررسی تغییرات در مقاومت خط انتقال

شکل (۱۵) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییر در مقاومت خط انتقال نشان می‌دهد؛ با افزایش این مقدار سرعت ژنراتور القایی کمی کاهش می‌یابد.



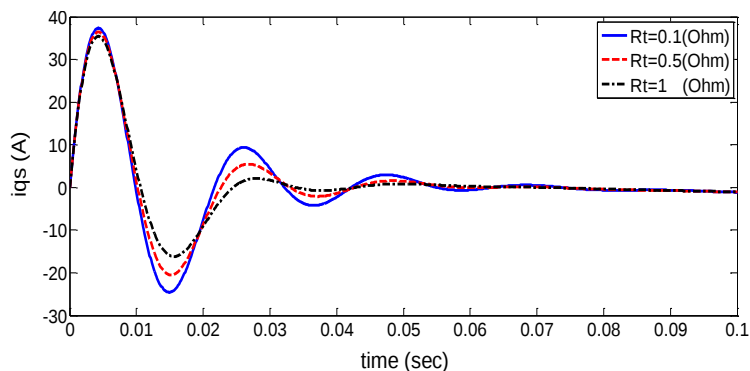
شکل ۱۵. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

شکل (۱۶) تغییرات گشتاور را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از عبور از حالت گذرای اولیه، ثابت می‌شود و البته با افزایش اندوکتانس خط انتقال حالت گذرای گشتاور، کاهش می‌یابد.

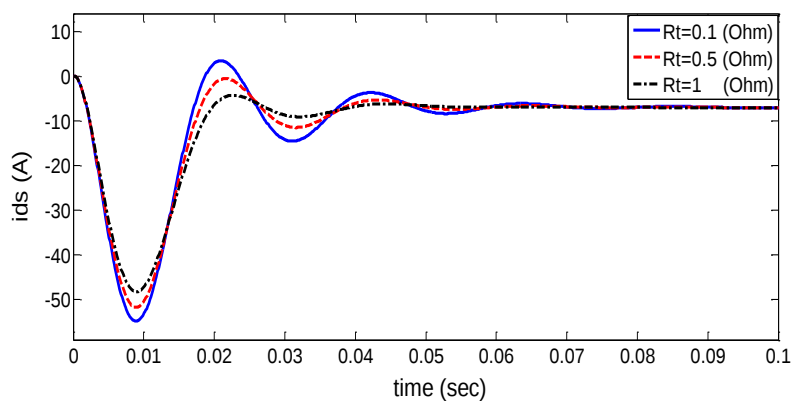


شکل ۱۶. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

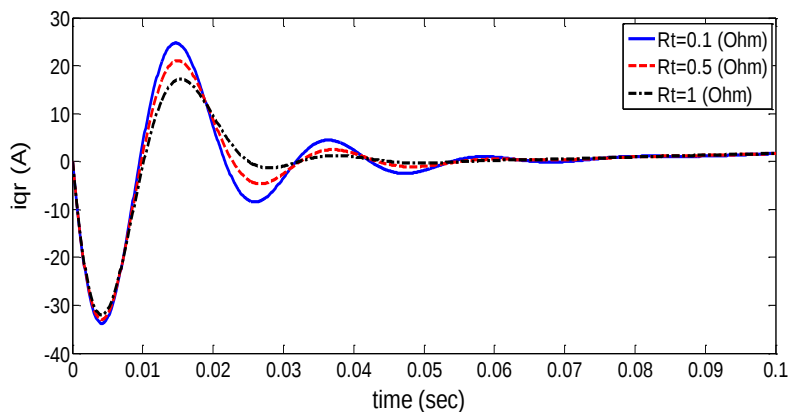
شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) تغییرات جریان محورهای d-q ژنراتور القایی را با تغییرات در نسبت اندوکتانس خط انتقال را نشان می‌دهند که پس از حالت گذرای به مقدار حالت پایدار خود می‌رسند. مطابق شکل‌ها با افزایش مقاومت خط انتقال اندازه حالت گذرا در جریان‌های ژنراتور کاهش می‌یابد.



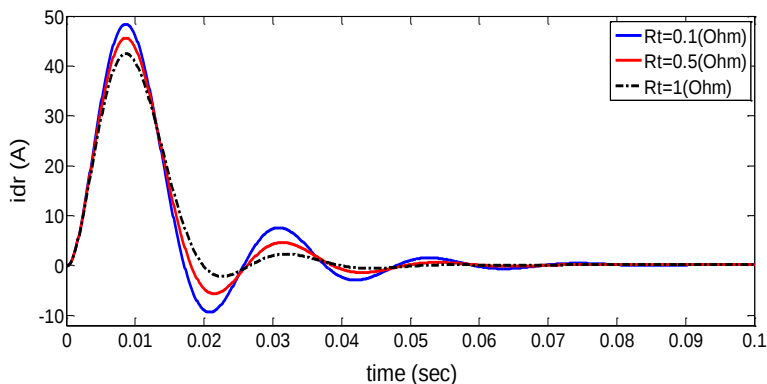
شکل ۱۷. تغییرات جریان i_{qs} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۸. تغییرات جریان i_{ds} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



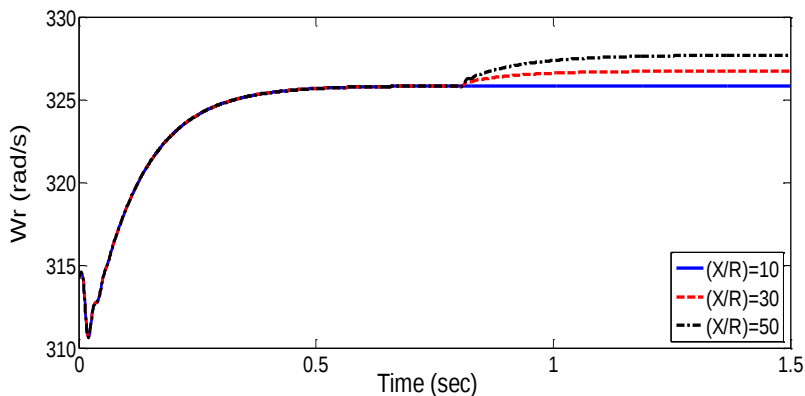
شکل ۱۹. تغییرات جریان i_{qr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۲۰. تغییرات جریان i_{dr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

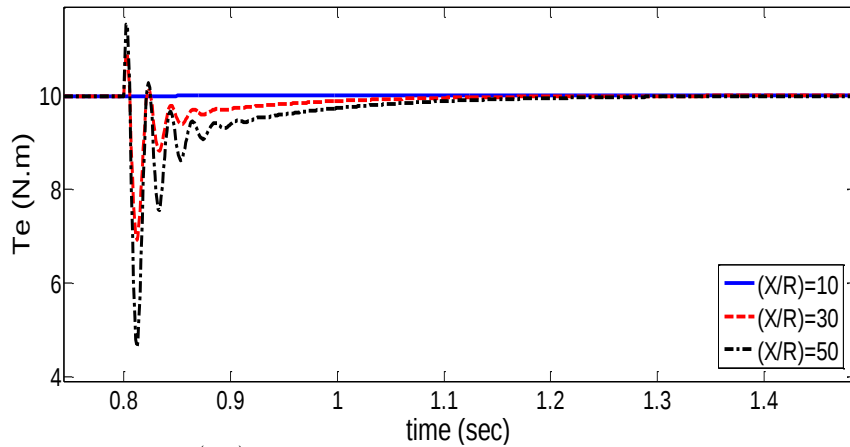
تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

از مشخصاتی که در تحلیل عملکرد ژنراتور به منظور افزایش دقت محاسبات نیاز به بررسی دارد نسبت (X/R) خط انتقال می باشد [۲۱]. شکل (۲۱) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییرات نسبت (X/R) خط انتقال نشان می دهد؛ با افزایش این نسبت، سرعت ژنراتور افزایش پیدا می کند.



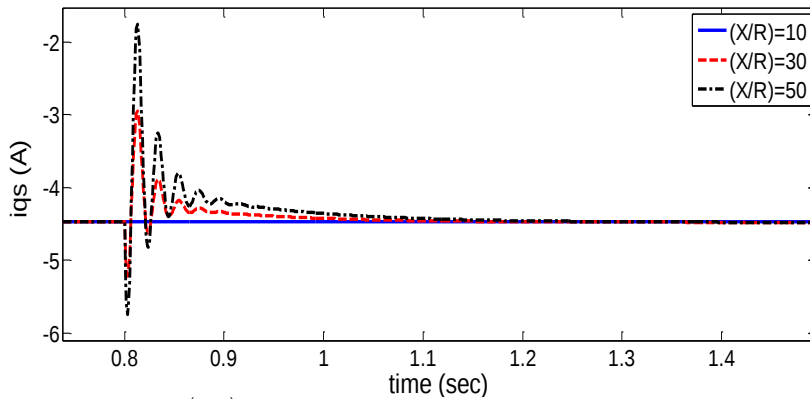
شکل ۲۱. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

شکل (۲۲) تغییرات گشتاور را با نسبت (X/R) خط انتقال نشان می دهد که بعد از نوسان نسبتاً زیادی، ثابت می شود ولی این تغییرات، تأثیری در مقدار حالت پایدار ندارد.

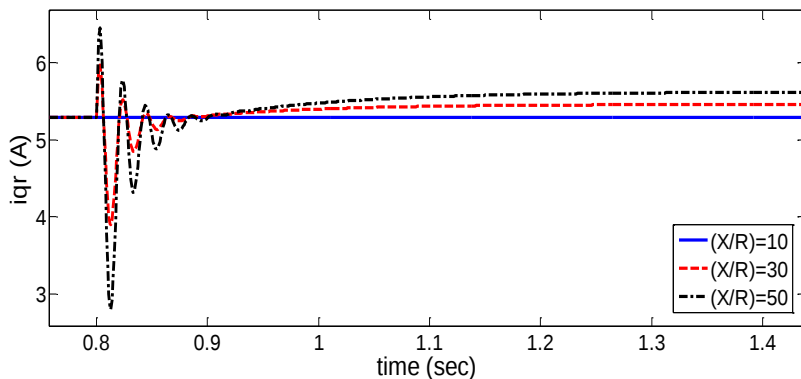


شکل ۲۲. منحنی مشخصه گشتاور-زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

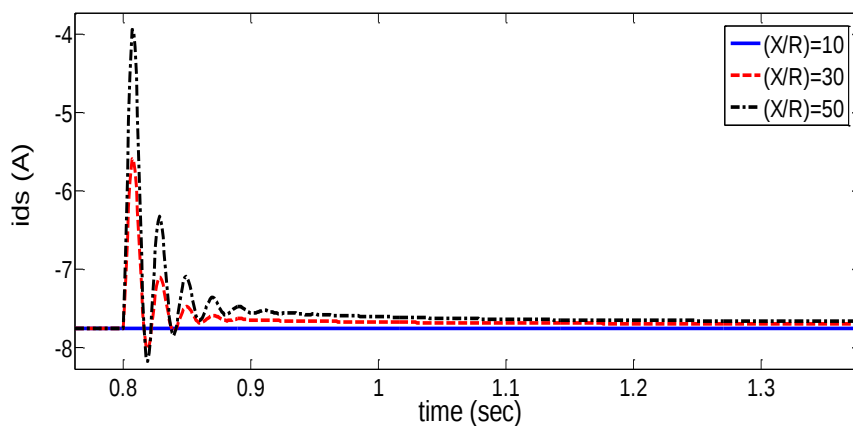
شکل (۲۳) تا (۲۶) تغییرات جریان‌های ژنراتور را با تغییرات (X/R) خط را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر (X/R) جریان ابتدا نوسان می‌کند و سپس به مقدار حالت پایدار خود می‌رسد.



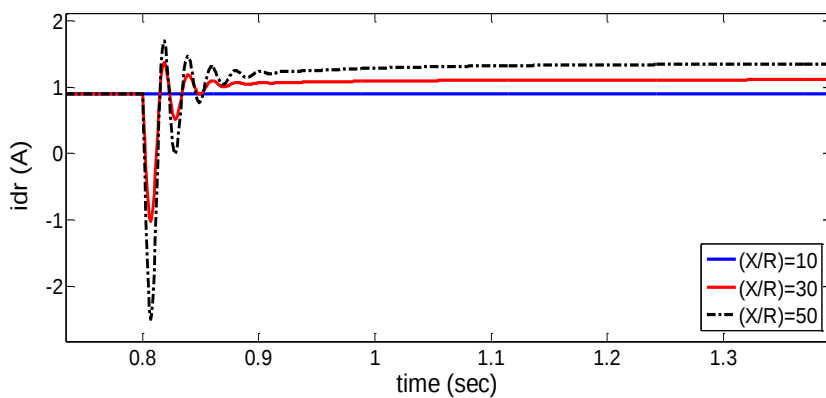
شکل ۲۳. منحنی مشخصه جریان i_{qs} با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۴. منحنی مشخصه جریان iqr با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۵. منحنی جریان ids با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۶. منحنی مشخصه جریان idr با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

بررسی مقادیر ویژه

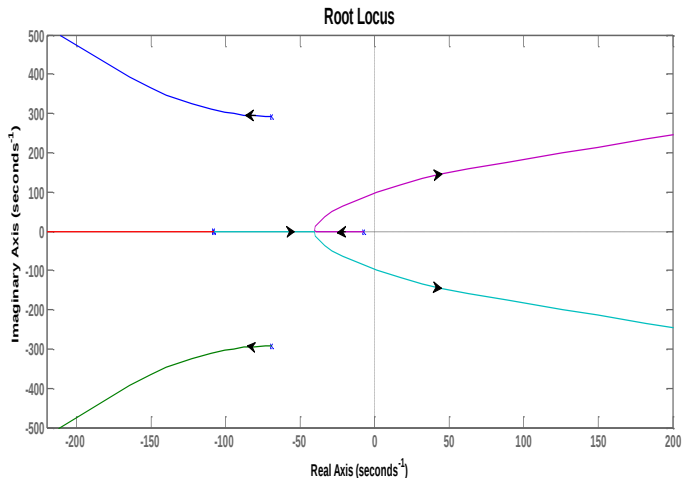
معادلات (۲۱) توصیف‌کننده یک سیستم قدرت، شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی است که به‌طور کلی غیرخطی‌اند.

$$\dot{X} = A\dot{X} + BU \quad (22)$$

پایداری یک نقطه تعادل سیستم دیفرانسیلی- جبری برای یک مقدار معین P ، به مقادیر ویژه ماتریس حالت A بستگی دارد [۱۸]. با استفاده از ماتریس، ژاکوبین کاهش می‌یابد. نقاط تعادل سیستم، مقادیر ویژه سیستم در جدول (۱) نشان داده شده است که همه مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی قرار دارند و پایداری سیستم مورد مطالعه را تأیید می‌کنند. محدوده تغییرات پارامترهای تجهیزات در پایداری سیستم قدرت بسیار ضروری می‌باشد. با توجه مقادیر ویژه در یک سیستم قدرت می‌توان به بررسی پایداری آن سیستم پرداخت. همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود تمامی صفر و قطب‌ها در سمت چپ محور مختصات قرار دارند که نشان‌دهنده پایداری سیستم می‌باشد. در صورت وجود صفر یا قطبی در سمت راست سیستم ناپایدار خواهد بود و با توجه به تغییر در آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف می‌توان آن را پایدار کرد.

جدول ۱. مقادیر ویژه سیستم با تغییرات در نسبت (X/R) خط انتقال در حالت پایدار

λ_1	$-۶۹/۰۹+۲۹۲i$
λ_2	$-۶۹/۰۹-۲۹۲i$
λ_3	$-۷/۴۲۲-$
λ_4	$-۱۰۸/۰۲+۱/۰۵i$
λ_5	$-۱۰۸/۰۲-۱/۰۵i$



شکل ۲۷. مکان هندسی ریشه‌ها

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ژنراتور القایی خودتحریک متصل به شبکه به منظور پایداری آن پرداخته شد. بدین منظور ابتدا از مدل ساده ماشین الکتریکی به منظور بیان روابط دینامیکی ژنراتور القایی استفاده شد. در این راستا از مدل ساده که ژنراتور القایی توسط خط انتقال کوتاهی به باس بی نهایت متصل شده استفاده گردید. ابتدا معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار سیستم را به دست آورده سپس به آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف سیستم پرداخته شده است. منحنی تغییرات سرعت ژنراتور القایی پس از کمی افت دور اولیه، سرعت ژنراتور به آرامی افزایش یافته و به سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون می رسد. منحنی مشخصه گشتاور- لغزش را دارای مقدار لغزش منفی به دلیل عملکرد ماشین در حالت ژنراتوری می باشد. گشتاور ژنراتور القایی دارای حالت گذرای نسبتاً زیادی است که پس از زمان نسبتاً کوتاهی به مقدار دائمی خود می رسد. در ادامه منحنی مشخصه جریان های ژنراتور القایی به صورت d و q نشان داده شد. این جریان ها نیز پس از عبور از حالت گذرای اولیه به مقادیر نامی خود در حالت پایدار رسیدند.

تحلیل حساسیت عملکرد ماشین با شرایط اولیه مختلف حل و تغییر پارامترهای سیستم و تأثیر آن ها بر پاسخ های گذرا و ماندگار مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از این آنالیز حساسیت، به بررسی مقادیر ویژه سیستم و پایداری آن با تغییر در پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شرایط اولیه انتخابی در حل عددی معادلات دیفرانسیل تأثیر بسزایی دارند که دامنه حالت گذرای مشخصه های ژنراتور در اثر آن تغییر می یابد و مقدار حالت گذرای پارامترهای ژنراتور افزایش می یابد البته این تغییرات تأثیری در مقدار حالت پایدار ندارد. تحلیل حساسیت بر روی تمامی پارامترهای مورد مطالعه ژنراتور صورت گرفت و همان طور که مشاهده گردید با افزایش مقادیر پارامترهای مورد مطالعه، میزان حالت گذرا کاهش و پایداری سریع تر می شود.

در ادامه با تغییر در نسبت اندوکتانس و مقاومت خط انتقال به صورت جداگانه به تحلیل رفتار ژنراتور در اثر این تغییرات پرداخته شد و سپس نسبت (X/R) خط انتقال که اهمیت به سزایی در پایداری سیستم دارند مورد بررسی قرار گرفت. البته این تغییرات تأثیری در مقدار نهایی گشتاور ندارد اما مقادیر انتهایی جریان های ژنراتور با توجه به تغییر در امپدانس کل سیستم تغییر کرده است با توجه به نتایج مشاهده شد که مقدار مقاومت و اندوکتانس خط به صورت جداگانه تأثیر به سزایی در جواب سیستم دارد و تغییرات آن باعث تغییرات در پایداری سیستم مورد مطالعه می شود. همان طور که در نتایج نیز مشاهده گردید با افزایش پارامترهای X و R میزان حالت گذار کاهش می یابد ولی تأثیر به سزایی در حالت دائمی منحنی مشخصه سرعت- زمان دارد در صورتی که این تغییرات تأثیر چندانی در حالت پایدار گشتاور ندارد.

در انتها با استفاده از معادلات حالت و مشخص کردن مقادیر ویژه کل سیستم در حالت پایدار به بررسی پایداری سیستم پرداخته شد. همان طور که مشاهده گردید در سیستم پایدار، تمامی صفر و قطب های مقادیر ویژه در سمت چپ مبدأ مختصات قرار گرفته اند که نشان دهنده پایداری سیستم می باشد. در صورت وجود صفر یا قطبی در سمت راست سیستم ناپایدار خواهد بود و با توجه به تغییر در آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف می توان آن را پایدار کرد.

References

- [1] Lamnadi, M., Trihi, M., & Boulezhar, A. (2016, November 14-17). *Study of a hybrid renewable energy system for a rural school in Tagzirt, Morocco*. 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7984079>

- [2] Woo, S., Park, J., Park, J., & Manuel, L. (2020). Wind Field-Based Short-Term Turbine Response Forecasting by Stacked Dilated Convolutional LSTMs. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(4), 2294-2304. <https://doi.org/10.1109/TS TE.2019.2954107>
- [3] Sahebkar Farkhani, J., Zareein, M., Najafi, A., Melicio, R., & Rodrigues, E. M. G. (2020). The Power System and Microgrid Protection—A Review. *Applied Sciences*, 10(22), 8271. <https://doi.org/10.3390/app10228271>
- [4] Hansen, L., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Munk-Nielsen, S., Bindner, H., Sorensen, P., & Bak-Jensen, B. (2001). *Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*. Riso National Laboratory. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7712332/ris_r_1205.pdf
- [5] Farkhani, J. S., Najafi, HR., & Nasrabadi, AA. (2013, April 10-11). *Lab-based Comparison of the Performance of Series Connected Induction Generator with Ordinary Induction Generator at Standalone Operating Mode*. 3rd Iranian conference on Renewable Energies and Distributed Generation, University of Isfahan, Iran. <https://en.civilica.com/doc/202723/>
- [6] Larijani, M., & Razi kordmahaleh, L. (2017). Explaining the green job identification and prioritization of renewable energy domain: wind energy. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 15-32. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100503_32035b6a1a0a13a01eb4349d72f94864.pdf
- [7] Zavadi, R., Miller, N., Ellis, A., & Muljadi, E. (2005). Making connections [wind generation facilities]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(6), 26-37. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2005.1524618>
- [8] Grachev, P. Y., Tabachinskiy, A. S., & Kanagavel, P. (2020). New Stator Construction and Simulation of High-Efficiency Wind Turbine Generators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1389-1396. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2964231>
- [9] Kim, S. K., & Kim, E. S. (2007). PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind Turbine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 421-430. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.858063>
- [10] Ackermann, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470012684>
- [11] Kanabar, M. G., & Khaparde, S. A. (2008, October 12-15). *Evaluation of Rotor Speed Stability Margin of a Constant Speed Wind Turbine Generator*. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4745277>
- [12] Chagas ,C. C. M., Pereira, M. G., Rosa, L. P., da Silva, N. F., Freitas, M. A. V., & Hunt, J. D. (2020). From Megawatts to Kilowatts: A Review of Small Wind Turbine Applications, Lessons From The US to Brazil. *Sustainability*, 12(7), 2760. <https://doi.org/10.3390/su12072760>
- [13] Nazir, M. S., Wang, Y., Bilal, M., Sohail, H. M., Kadhém, A. A., Nazir, H. M. R., Abdalla, A. N., & Ma, Y. (2020). Comparison of Small-Scale Wind Energy Conversion Systems: Economic Indexes. *Clean Technologies*, 2(2), 144-155. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2020010>
- [14] Mercado, J. I. G., Ramos, V. M. R., Hernández, J. H. T., & Ayala, J. Z. (2018, November 14-16). *Voltage Stability Assessment by the Modal Analysis and the Load-Flow Linear Sensitivity Techniques*. 2018 IEEE International Autumn

- Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8661370>
- [15] Tan, H. M., & Zivanovic, R. (2007, December 9-12). *Transient stability sensitivity analysis of a simplified power system*. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, Perth, WA, Australia. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4548058>
- [16] Hasan, K. N., Preece, R., & Milanović, J. V. (2017). Priority Ranking of Critical Uncertainties Affecting Small-Disturbance Stability Using Sensitivity Analysis Techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 2629-2639. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2618347>
- [17] Nam, H. K., Shim, K. S., Kim, Y. K., Song, S. G., & Lee, K. Y. (2000, Jan 23-27). *Contingency ranking for transient stability via eigen-sensitivity analysis of small signal stability model*. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), Singapore <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/850039>
- [18] Vahabi, M., Shademan, H., Rajabi, H., & Sahebkar Farkhani, J (2014, August 19-21). *The Modelling of nonlinear dynamic behaviour of Self-Excited Induction Generator (SEIG) in Wind Turbine*. 6th iranain conference on electrical and electronic engineering Islamic Azad University of Gonabad, Iran. <https://en.civilica.com/doc/384327/>
- [19] Mihet-Popa, L., Blaabjerg, F., & Boldea, I. (2004). Wind turbine Generator modeling and Simulation where rotational speed is the controlled variable. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(1), 3-10. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821810>
- [20] Petru, T., & Thiringer, T. (2002). Modeling of wind turbines for power system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 1132-1139. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.805017>
- [21] Kumkratug, P. (2012). The Effect of R/X Ratio of the Short Transmission Line on Transient Stability. *American Journal of Applied Sciences*, 9(3), 365-367. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2012.365.367>



Semi-Analytical Solution of Unsteady Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer between two Oscillation Plate under the Influence of a Magnetic Field

Mojtaba Masoumnezhad^{1*} , MohammadAli Kazemi², Nematollah Askari³ , MohammadHassan Taheri⁴ , Mehdi Ghamati⁵

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Shahid Chamran, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Guilan, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Shahid Mofateh, Hamedan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Hamedan, Iran.

^{3,5}Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Khomeini, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mazandaran, Iran.

⁴PhD. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Imam Khomeini, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mazandaran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.08.2020

Revised: 01.31.2021

Accepted: 02.23.2021

Keyword:

Heat transfer
Unsteady flow
Magnetic field
Oscillation plate
Semi-analytical collocation method

*Corresponding Author:

Mojtaba Masoumnezhad

Email:

mmasoumnezhad@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, the heat transfer of unsteady fluid flow between two oscillation plates under the influence of a magnetic field was investigated. The bottom plate was considered fixed and the upper plate could move closer or farther down to the bottom plate. The fluid flow was considered Newtonian, incompressible, two-dimensional, laminar, and unsteady. The governing equations including continuity, momentum and energy were in the form of partial differential equations (PDE); hence, they were transformed into ordinary differential equations (ODE) using similarity transformation. As an innovative method, the ODE governing equations were solved using a semi-analytical method named the Collocation Method (CM). For validity, a numerical 4th order Runge-Kutta method was used. The results revealed that by increasing the magnetic parameter, the horizontal velocity component decreased while the dimensionless temperature and heat transfer rate increased. An increase in the compression parameter led to a reduction of horizontal velocity component, dimensionless temperature, and heat transfer rate. Moreover, when Prandtl and Eckert numbers increased, the dimensionless temperature and heat transfer rate on the walls also increased.





حل نیمه تحلیلی انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی تحت تاثیر میدان مغناطیسی

مجتبی معصوم نژاد^{۱*}، محمدعلی کاظمی^۲، نعمتاله عسکری^۳، محمدحسن طاهری^۴، مهدی قامتی^۵

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، آموزشکده شهید چمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان گیلان، ایران.

۲ - استادیار، گروه مهندسی مکانیک، آموزشکده شهید مفتاح، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان همدان، ایران.

۳و۵ - عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، آموزشکده امام خمینی (ره)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

۴ - دکتری، گروه مهندسی مکانیک، آموزشکده امام خمینی (ره)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین یک صفحه نوسانی و یک صفحه ثابت تحت تأثیر میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت. صفحه پایینی، ثابت در نظر گرفته شد و صفحه بالایی می‌تواند به صفحه پایین نزدیک یا دور شود. جریان دوبعدی، آرام و غیردائم بوده و سیال، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر، ابتدا معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی برای سیال نیوتنی ارائه شد و سپس برای جریان هیدرومغناطیس ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی، ساده‌سازی گردید. با توجه به این‌که معادلات حاکم، معادلات دیفرانسیل جزئی هستند با استفاده از تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شدند. به‌عنوان یک نوآوری در این تحقیق معادلات حاکم با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی تلفیقی حل شدند. برای اعتبارسنجی از روش عددی رانج کوتا مرتبه چهار استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر مغناطیس، مؤلفه افقی سرعت در حل تشابهی کاهش، مقدار دمای بی‌بعد در یک نقطه خاص و نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش پارامتر فشردن، مؤلفه افقی سرعت، دمای بی‌بعد و نرخ انتقال حرارت در دیواره بالایی کاهش می‌یابد. با افزایش عدد پرانتل و اکرت، دمای بی‌بعد و نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

کلید واژگان:

انتقال حرارت

جریان ناپایا

میدان مغناطیسی یکنواخت

دو صفحه نوسانی

روش نیمه‌تحلیلی تلفیقی

*نویسنده مسئول: مجتبی معصوم نژاد

پست الکترونیکی:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir



مقدمه

بسیاری از پدیده‌های طبیعی، ذاتاً غیردائم هستند و نمی‌توان اثر تغییرات نسبت به زمان را در آن‌ها نادیده گرفت. در مکانیک سیالات، اگر خواص و شاخص‌های جریان مانند سرعت، فشار، دما و غیره در یک نقطه خاص نسبت به زمان ثابت باشند (در هر نقطه با زمان تغییر نکند)، جریان در آن نقطه دائم، در غیر این صورت جریان غیردائم است. این تغییرات نسبت به زمان می‌تواند در اثر عوامل طبیعی یا موارد برنامه‌ریزی شده باشد.

از جمله موضوعات مورد توجه در تکنولوژی جدید که در انتقال حرارت دارای اهمیت بسیار است، مسئله انتقال حرارت در سیستم مگنتوهیدرودینامیک (MHD) می‌باشد. مگنتوهیدرودینامیک برهم‌کنش سیال و میدان مغناطیسی را توصیف می‌کند. میدان مغناطیسی به‌عنوان ابزاری بسیار قوی در جهت کنترل مشخصه‌های جریان، به‌خدمت گرفته می‌شود. به‌دلیل حضور نیروی حجمی ناشی از میدان الکترومغناطیسی می‌توان پروفیل سرعت و دمای سیال را کنترل کرد. بررسی این‌گونه جریان‌ها در داخل کانال به‌دلیل کاربردهایی که در صنایع مختلف دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از کاربردهای جریان‌های مگنتوهیدرودینامیک در صنایع شیمیایی و مکانیکی انتقال جرم در راکتورهای هسته‌ای، خشک‌کن‌ها، مطالعات پلاسما، خنک‌کاری راکتورهای هسته‌ای، رطوبت‌زدایی صنعتی، عایق‌کاری ساختمان‌ها، کنترل جریان‌های لایه مرزی در آیرودینامیک، ژنراتورها و پمپ‌های مگنتوهیدرودینامیک اشاره می‌گردد. شینگو ایشیزاوا [۱] انتقال حرارت جریان غیردائم آرام سیال تراکم‌ناپذیر بین دو دیسک موازی با فاصله متغیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. او برای حل معادلات حاکم با دو استراتژی مختلف از روش‌های عددی و تحلیلی استفاده کرد و سپس تأثیر پارامترهای فیزیکی و هندسی مختلف را بر توزیع سرعت و توزیع دما به‌دست آورد.

یوچیدا و اوکی [۲] به بررسی جریان غیردائم سیال در لوله انقباضی یا انبساطی پرداختند. معادلات حاکم با استفاده از تبدیل تشابهی به معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل و سپس با روش تحلیلی حل شد. نتایج نشان داد که توزیع سرعت شعاعی دارای ماکزیمم مقدار بین محور و دیواره لوله است. همچنین در لوله انقباضی، فشار در دیواره از فشار در مرکز لوله بیشتر است در صورتی که در لوله انقباضی، نتیجه برعکس است.

مجدالانی و ژو [۳] جریان آرام تراکم‌ناپذیر داخل یک کانال متخلخل با دیواره‌های انبساطی یا انقباضی تراوا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معادلات ناویر-استوکس حاکم را با استفاده از تبدیل تشابهی به معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل و با استفاده از روش عددی حل کردند. نتایج نشان داد که در حالت تزریق جریان به داخل کانال از دیواره‌ها، با افزایش عدد رینولدز نسبت سرعت محوری به عمودی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش انبساط دیواره، تنش برشی در دیواره‌های کانال کاهش می‌یابد.

ابوالدهاب و ال‌عزیز [۴] انتقال حرارت جریان لایه مرزی جابه‌جایی طبیعی روی یک صفحه عمودی دما متغیر تحت تأثیر میدان مغناطیسی با در نظر گرفتن ترم اتلافی ویسکوز، گرمای ژولی و چشمه حرارتی را بررسی کردند. همچنین آن‌ها اثر هال و لغزش یون را در نظر گرفتند. معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم توسط تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل و با استفاده از روش عددی حل شدند. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر مغناطیس، مؤلفه سرعت بی‌بعد در طول صفحه کاهش، در عرض صفحه افزایش و دمای بی‌بعد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد اکرت دمای بی‌بعد افزایش می‌یابد.

محمود و همکاران [۵] جریان و انتقال حرارت غیردائم سیال نیوتنی روی یک صفحه متخلخل داخل یک کانال نوسانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل معادلات حاکم از روش‌های تحلیلی استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش مکش از صفحه، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و ضریب انتقال حرارت افزایش اما با افزایش تزریق به صفحه نتایج عکس حاصل می‌شود. همچنین با افزایش فشار کانال، ضریب انتقال حرارت افزایش اما ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد.

حیات و عباس [۶] به تحلیل انتقال حرارت جریان سیال مرتبه دوم در کانالی با محیط متخلخل در حضور میدان مغناطیسی پرداختند. از روش هموتپی به منظور به دست آوردن میدان سرعت و دما استفاده کردند. نتایج بررسی شان نشان می دهد که با افزایش پارامتر تخلخل و عدد هارتمن، میدان سرعت و دما کاهش می یابد.

شیخ الاسلامی و گنجی [۷] انتقال حرارت جریان نانو سیال آب- مس بین دو دیسک موازی نوسانی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها با استفاده از تبدیل تشابهی معادلات حاکم را به معادلات دیفرانسیل معمولی، تبدیل و سپس با روش تحلیلی حل کردند. نتایج نشان داد که در هنگام دور شدن دو صفحه، عدد ناسلت با کسر حجمی نانوذرات، عدد فشار و عدد اکرت، رابطه مستقیم دارد اما هنگامی که دو صفحه به هم نزدیک می شوند با عدد فشار، رابطه عکس دارد.

حاتمی و همکاران [۸] انتقال حرارت جریان آرام نانو سیال بین دو دیسک دوار و انقباضی نامتقارن را مورد بررسی قرار دادند. سیال پایه آب و نانو ذرات مس، نقره و اکسید آلومینیم به آن اضافه می شود. آن ها برای حل معادلات حاکم از روش های عددی و تحلیلی استفاده کردند سپس تأثیر کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز چرخشی، عدد رینولدز تزریق و نسبت انبساط را روی جریان و انتقال حرارت به دست آوردند. نتایج نشان داد که پروفیل دما در بین دو دیسک با افزایش تزریق تخت تر می شود اما با افزایش نسبت انبساط نتیجه عکس مشاهده می شود.

آدیکاری و سانپال [۹] انتقال حرارت جریان لایه مرزی سه بعدی سیال نیوتنی روی یک صفحه کشسان و تراوا تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت را بررسی کردند. صفحه در جهت محورهای x و y کشسان است و تحت شار حرارتی تعیین شده قرار دارد. معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم توسط تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل و سپس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود ضمنی حل می شوند. آن ها تأثیر پارامترهای فیزیکی مختلف را بر روی توزیع سرعت، توزیع دما، ضریب اصطکاک پوسته ای و دمای دیواره نشان دادند.

اسرینیواس و همکاران [۱۰] انتقال حرارت جریان هیدرومغناطیس سیال نیوتنی در یک لوله با دیواره انبساطی یا انقباضی تراوا را بررسی کردند. به طوری که دیواره لوله به طور یکنواخت نسبت به زمان دچار انبساط یا انقباض می شود. آن ها معادلات حاکم را با روش تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل نمودند و با استفاده از روش تحلیلی هموتپی حل کردند. نتایج نشان داد که به ازای نسبت انبساط ثابت دیواره، با افزایش مکش، سرعت محوری در نزدیک مرکز لوله افزایش می یابد. با افزایش پارامتر مغناطیس، سرعت محوری لوله کاهش می یابد. همچنین با افزایش عدد پراتل، دمای بی بعد کاهش می یابد.

حاتمی و گنجی [۱۱] انتقال حرارت جریان نانو سیال بین دو دیسک موازی تراوای نوسانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها ابتدا معادلات حاکم را با روش تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل کردند و سپس با روش های عددی و تحلیلی حل نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر ترموفرسیس و پارامتر حرکت براونی، عدد ناسلت افزایش می یابد. همچنین با افزایش عدد هارتمن دمای بی بعد کاهش می یابد. علاوه بر این، با افزایش پارامتر مکش یا تزریق، سرعت جریان افزایش می یابد.

حاتمی و همکاران [۱۲] انتقال حرارت جریان نانو سیال در یک کانال متخلخل نامتقارن با دیواره انبساطی یا انقباضی را بررسی کردند. صفحه پایین تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد و صفحه بالایی توسط جریان سیال خنک می شود. سیال پایه آب و نانوذرات مس، نقره و اکسید آلومینیم به آن اضافه می شود. آن ها برای حل معادلات حاکم از روش های تحلیلی استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می یابد. همچنین برای دستیابی به بیشترین مقدار ناسلت، نانوذرات مس باید انتخاب شود.

قاسمی موخر و همکاران [۱۳] حل تحلیلی جریان توسعه یافته سیال غیرنیوتنی مرتبه چهار تحت تأثیر میدان مغناطیسی در کانال با در نظر گرفتن شرط لغزش را ارائه کردند. آن ها از روش کولوکیشن برای حل معادله مومنوم حاکم بر جریان استفاده کردند و نتیجه گرفتند که چنانچه پارامتر سیال غیرنیوتنی را افزایش دهند، پروفیل سرعت

تخت تر می‌شود. همچنین با افزایش پارامتر هارتمن، سرعت جریان افزایش و با کاهش ضریب لغزش، سرعت کاهش می‌یابد.

ویاس و اسریواستاو [۱۴] انتقال حرارت جریان هیدرومغناطیس سیال نیوتنی درون یک کانال را مورد بررسی قرار دادند. دیواره بالایی کانال، متحرک و دیواره پایینی متخلخل است. دیواره‌های بالایی و پایینی تحت انتقال حرارت جابه‌جایی نامتقارن قرار دارند. معادلات حاکم با روش تحلیلی دقیق حل شدند. نتایج نشان داد که پروفیل دما در داخل کانال متقارن نیست و دما با افزایش عدد هارتمن و عدد برینکمن افزایش می‌یابد.

تازا گول و همکاران [۱۵] به بررسی جریان و انتقال حرارت ناپایدار سیال غیرنیوتنی مرتبه سوم بین دو صفحه عمودی با سرعت نوسانی پرداختند. آن‌ها برای حل معادلات حاکم از روش تجزیه آدامین (ADM) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد استاک، سرعت افزایش و با افزایش گرادیان فشار، سرعت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد استاک، عدد پرانتل و عدد اکرت دما افزایش می‌یابد.

حیدری و همکاران [۱۶] به بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جریان جابه‌جایی اجباری نانو سیال در یک کانال پرداختند. آن‌ها از مدل تک‌فازی برای به‌دست آوردن معادلات حاکم استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که حضور میدان مغناطیسی و اضافه کردن نانوذرات مس به سیال خالص می‌تواند تبادل حرارت بین دیواره و جریان سیال را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

دوگنچی و همکاران [۱۷] جریان و انتقال حرارت هیدرومغناطیس نانوسیال بین دو صفحه موازی در حضور تابش حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها معادلات حاکم را با استفاده از روش تحلیلی تقریب دوان-راچ حل کردند. نتایج نشان داد که پروفیل دما و عدد ناسلت با افزایش پارامتر تابش، افزایش می‌یابند.

رئیزی و همکاران [۱۸] انتقال حرارت و انتقال جرم جریان دو بعدی غیردائم سیال نیوتنی بین دو صفحه موازی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل معادلات حاکم از روش عددی رانج کوتا مرتبه چهار استفاده کردند و سپس تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل عدد فشار، عدد پرانتل، عدد اکرت، عدد اشمیت و پارامتر عکس‌العمل شیمیایی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عدد ناسلت با عدد پرانتل و عدد اکرت رابطه مستقیم و با عدد فشار، رابطه عکس دارد.

راچیوت و کومار [۱۹] تأثیر جذب حرارت بر جریان هیدرومغناطیس غیردائم روی یک صفحه تخت عمودی دما متغیر با در نظر گرفتن اثر هال مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش عددی و تحلیلی برای حل معادلات حاکم استفاده کردند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، دما افزایش می‌یابد. همچنین سرعت اولیه و ثانویه جریان با افزایش جذب حرارت و پارامتر زاویه فاز کاهش می‌یابد.

واجراولو و همکاران [۲۰] تأثیرات خواص متغیر سیال بر جریان و انتقال حرارت نانو سیال بین دو دیسک موازی نوسانی تراوا تحت تأثیر میدان مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از شرط مرزی لغزش روی صفحات برای سرعت و دما استفاده کردند. معادلات حاکم با استفاده از روش تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل و سپس با روش تحلیلی هموتپی بهینه حل شدند. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر لزجت سیال، سرعت در نزدیک دیواره‌ها افزایش می‌یابد. همچنین میدان دما و غلظت تابع افزایشی از ضریب هدایت گرمایی متغیر و پارامتر انتشار متغیر است.

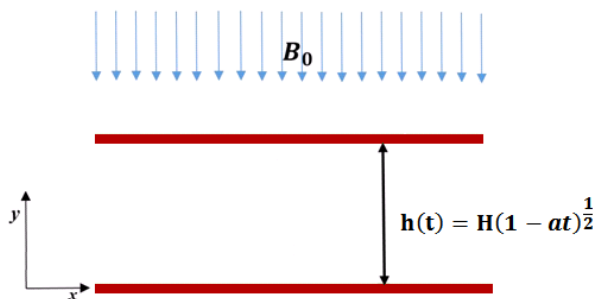
عسکری و طاهری [۲۱] به صورت عددی به بررسی رفتار گرمایی سیال در یک محفظه بسته و دارای هیت‌های دما ثابت مدور پرداخته‌اند. تأثیر میدان مغناطیسی نیز بر توزیع دمای این هیت‌ها در محفظه بسته ارزیابی شد. مشاهده گردید که با افزایش میدان مغناطیسی و عدد هارتمن، نیروی لورنتز افزایش می‌یابد و در نتیجه، نیروی شناوری کاهش می‌یابد، انتقال گرمای هدایتی غالب و توزیع دما متقارن تر خواهد شد.

عبدالستار و همکاران [۲۲] و پورمهران و همکاران [۲۳] در دو تحقیق مجزا به بررسی جریان هیدرودینامیکی (بدون میدان مغناطیسی) بر جریان سیال ناپایا بین دو صفحه، یک صفحه ثابت و دیگری نوسانی پرداخته‌اند. معادلات حاکم بر این دو تحقیق، همان معادلات متداول برای ناویر-استوکس و انرژی هستند، با این تفاوت که سیال در مرجع [۲۳] نانوسیال و در دیگر مرجع [۲۲]، سیال نیوتنی معمول است. هر دو تحقیق از روش‌های نیمه‌تحلیلی برای حل استفاده کرده‌اند، مرجع [۲۲] از روش پرتوربیشن و مرجع [۲۳] از روش‌های نیمه‌تحلیلی تلفیقی و تفاضل مربعات بهره برده است.

با توجه به تحقیقات پیشین انجام شده، حل مسئله جریان سیال بین دو صفحه نوسانی و ثابت بدون در نظر گرفتن میدان مغناطیسی انجام پذیرفته است [۲۲؛ ۲۳]، ولی تاکنون برای انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی و ثابت تحت تأثیر میدان مغناطیسی، با حل معادله انرژی کامل و با روش نیمه‌تحلیلی تلفیقی ارائه نشده است. لذا می‌توان برای میدان سیال مورد بحث توزیع سرعت و توزیع دما را با توجه به شرایط مرزی به‌روش نیمه‌تحلیلی به‌دست آورد. در نتیجه هدف از این مطالعه به‌دست آوردن توزیع سرعت و توزیع دمای سیال با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی و بررسی تأثیر میدان مغناطیسی و نوسان صفحه بر توزیع سرعت، توزیع دما و نرخ انتقال حرارت است.

بیان مسئله

در این تحقیق، انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جریان آرام، تراکم‌ناپذیر و ناپایا است و تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت در جهت عمود بر صفحات قرار دارد. صفحه پایینی ثابت و صفحه بالایی می‌تواند به صفحه پایین نزدیک یا دور شود؛ به‌طوری‌که با توجه در مدت زمان $t = \frac{1}{a}$ دو صفحه به هم می‌رسند و به‌ازای $a < 0$ دو صفحه از هم دور می‌شوند. معادلات حاکم با استفاده از روش نیمه‌تحلیلی تلفیقی حل می‌شوند.



شکل ۱. شماتیکی از هندسه مسئله

معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حل این مسئله شامل پیوستگی، تکانه و انرژی می‌شوند. معادله پیوستگی برای یک جریان دوبعدی به ترتیب زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

با توجه به فرضیات مسئله، معادله تکانه به صورت زیر ساده می شود. با توجه به این که محیط جریان تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد، معادلات تکانه در راستای X دارای ترم اضافی می باشد که نیروی لورنتز نام دارد.

معادله تکانه در راستای X :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma B_0^2 u}{\rho} \quad (۲)$$

و معادله تکانه در راستای Y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (۳)$$

در معادله (۲)، $\sigma B_0^2 u$ نیروی لورنتز است.

به علاوه معادله انرژی با توجه به فرضیات مسئله، به صورت زیر ساده می شود.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\mu}{\rho c_p} \right) \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2 + \frac{\sigma B_0^2 u^2}{\rho c_p} \quad (۴)$$

از طرفی با توجه به معادله پیوستگی می توان معادله (۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\mu}{\rho c_p} \right) \left[4 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{\sigma B_0^2 u^2}{\rho c_p} \quad (۵)$$

معادله (۵)، معادله انرژی حاکم بر جریان است.

شرایط مرزی

با توجه به شماتیک مسئله و فرضیات بیان شده، شرایط مرزی سرعت و دمایی به صورت زیر تعریف می شود:

$$y = 0 \quad : \quad u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_w \quad (۶)$$

$$y = h(t) \quad : \quad u = 0, \quad v = \frac{dh}{dt}, \quad T \rightarrow T_h$$

که T_w دمای صفحه پایین و T_h دمای صفحه نوسانی بالا می باشد.

حل تشابهی

با توجه به اینکه معادلات حاکم بر جریان، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی هستند، می‌توان با استفاده از پارامتر تشابهی η و روش حل تشابهی، معادلات فوق را به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل کرد. پارامترهای تشابهی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta = \frac{y}{h(t)} = \frac{y}{H\sqrt{1-at}}$$

$$f'(\eta) = \frac{u}{\left(\frac{ax}{2(1-at)}\right)} \Rightarrow u = \frac{ax}{2(1-at)} f'(\eta), \quad f(\eta) = \frac{v}{\left(\frac{aH}{2(1-at)}\right)} \Rightarrow v = \frac{aH}{2(1-at)} f(\eta) \quad (۸)$$

$$\theta(\eta) = \frac{T - T_h}{T_w - T_h}$$

با جای گذاری پارامترهای تشابهی در روابط (۴) و (۵) و انجام ساده سازی های جبری، معادله های تکرانه و انرژی حاکم در حل تشابهی به صورت زیر به دست می آیند:

$$f^{iv} - S(\eta f''' + f f'' - f f''' + 3f'') - M f'' = 0 \quad (۸)$$

$$\theta'' + \text{Pr} S(f \theta' - \eta \theta') + \text{Pr} Ec(f''^2 + 4\delta^2 f'^2 + M f'^2) = 0 \quad (۹)$$

که در معادله (۸)، M پارامتر مغناطیس و S پارامتر فشردن و در معادله (۹)، Pr عدد پرانتل، Ec عدد اکرت و δ پارامتر ارتفاع هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M = \frac{\sigma B_0^2 H^2 (1-at)}{\mu}, \quad S = \frac{aH^2}{2\nu},$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k}, \quad Ec = \frac{1}{c_p (T_w - T_h)} \left(\frac{ax}{2(1-at)} \right)^2, \quad (۱۰)$$

$$\delta = \frac{h(t)}{x} = \frac{2H\sqrt{(1-at)}}{x}$$

همچنین، شرایط مرزی نیز به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\eta = 0 : f' = 0, \quad f = 0, \quad \theta = 1$$

$$\eta = 1 : f' = 0, \quad f = 1, \quad \theta = 0 \quad (۱۱)$$

روش حل

کاربرد روش کولوکیشن در حل معادلات

برای حل تقریبی مسائل غیرخطی و خطی با ضرایب متغیر می‌توانیم از قوانین تابع آزمون^۱ استفاده کنیم. برای این کار تابع آزمون را به صورت تابعی از n ضریب نامشخص $c_1, c_2, \dots, c_n$ یعنی $T.F = f(c_1, c_2, \dots, c_n)$ در نظر می‌گیرند [۲۴؛ ۲۵]. شرایط انتخاب تابع آزمون به صورت زیر است:

تابع آزمون را به صورت برخی از توابع پایه مانند چندجمله‌ای‌ها، توابع مثلثاتی و ... می‌نویسند. تابع آزمون را طوری می‌نویسند که شرایط مرزی را برآورده کند. قرار دادن تابع آزمون به جای تابع اصلی، باقیمانده‌ای^۲ تحت عنوان باقیمانده‌ها ایجاد می‌کند که این باقیمانده به صورت تابعی از مقادیر ثابت و مقادیر متغیر خواهد بود و باید به سمت صفر برود. به طریقی باید ثابت‌های c_1 تا c_n را محاسبه کرد. روش‌هایی مثل گالرکین، تلفیقی و حداقل مربعات برای به دست آوردن این ثابت‌ها می‌توانند به کار روند.

روش کولوکیشن (تلفیقی)، روشی است که شامل n ضریب نامشخص است و موقعیت‌های مختلف بر اساس باقیمانده را می‌دهد. این روش بر اساس $0 < t < 1$ (متغیر) که در مساله تعریف شده، حدس زده می‌شود. در این روش هدف این است که c_1 تا c_n را پیدا کنیم تا باقیمانده را پیدا کنیم و از آنجا تابع آزمون را به دست آوریم و محاسبه تابع آزمون در حقیقت، ما را به محاسبه جواب می‌رساند.

حل معادله تکانه

برای حل معادله (۸) با استفاده از روش کولوکیشن، لازم است تابع آزمونی که در شرایط مرزی رابطه را ارضا می‌کند حدس زده شود. البته باید توجه نمود که می‌توان بی‌شمار تابع آزمون حدس زد که شرایط مرزی را ارضا کند ولی ممکن است جواب نهایی هیچ کدام درست نباشد. لذا نیاز است هر تابع آزمونی که حدس زده می‌شود در فرایند حل قرار گیرد و جواب نهایی کنترل گردیده تا اعتبار تابع حدس تصدیق شود. لذا تابع آزمون زیر برای حل معادله (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$f(\eta) = (2\eta - \eta^2)^2 + c_1(\eta - \eta^2)^2 + c_2(\eta - \eta^3)^2 + c_3(\eta - \eta^4)^2 + c_4(\eta - \eta^5)^2 \quad (12)$$

پاسخ تقریبی فوق، شرایط مرزی سرعت (۱۱) را ارضا می‌کند. از جایگذاری معادله (۱۲) در معادله دیفرانسیل (۸)، معادله باقی‌مانده ظاهر می‌شود.

برای یافتن ضرایب ثابت c_1 تا c_4 در فاصله $0 < \eta < 1$ ، این بازه را می‌توان به ۵ قسمت مساوی تقسیم کرد و معادله باقی‌مانده را برای نقاط داخلی بازه نوشت:

$$R_1\left(\frac{1}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{2}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{3}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{4}{5}\right) = 0 \quad (13)$$

¹ Trail Function

² Residual

با استفاده از روابط (۱۳)، ۴ معادله و ۴ مجهول ایجاد می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار میپل ثابت‌های C_1, C_2, C_3, C_4 به‌ازای مقادیر مختلف M و S به‌دست می‌آید. با جای‌گذاری ثابت‌های C_1, C_2, C_3, C_4 در رابطه (۱۲)، $f(\eta)$ به‌دست خواهد آمد.

حل معادله انرژی

برای ساخت یک پاسخ تقریبی معادله (۹)، ابتدا $f(\eta)$ به‌دست آمده از معادله (۸) و مشتقات آن‌را در معادله (۹) جای‌گذاری و سپس تابع آزمون $\theta(\eta)$ را یک چند جمله‌ای برحسب η انتخاب می‌کنیم.

$$\theta(\eta) = (1-\eta) + b_1\eta(1-\eta) + b_2\eta(1-\eta^2) + b_3\eta(1-\eta^3) + b_4\eta(1-\eta^4) + b_5\eta(1-\eta^5) \quad (14)$$

پاسخ تقریبی فوق، شرایط مرزی حرارتی (۱۱) را برآورده کرده است. با جای‌گذاری معادله (۱۴) در معادله دیفرانسیل (۹) و به‌ازای پارامترهای دلخواه، معادله باقی‌مانده ظاهر می‌شود. برای یافتن ضرایب ثابت b_1 تا b_5 در فاصله $0 < \eta < 1$ ، این بازه را به ۶ قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم و معادله باقی‌مانده را برای نقاط داخلی بازه می‌توان نوشت:

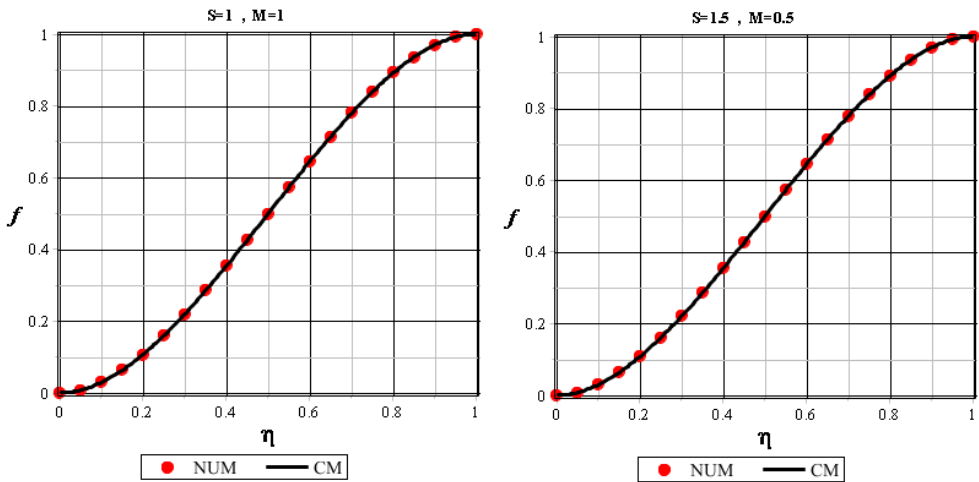
$$R_2\left(\frac{1}{6}\right) = 0, \quad R_2\left(\frac{2}{6}\right) = 0, \quad R_2\left(\frac{3}{6}\right) = 0, \quad R_2\left(\frac{4}{6}\right) = 0, \quad R_2\left(\frac{5}{6}\right) = 0 \quad (15)$$

با استفاده از روابط (۱۵)، پنج معادله و پنج مجهول ایجاد می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار میپل ثابت‌های $b_0, b_1, \dots, b_5$ به‌ازای مقادیر مختلف δ, Pr و Ec به‌دست می‌آید. با جای‌گذاری ثابت‌های $b_0, b_1, \dots, b_5$ در رابطه (۱۴)، توزیع دمای بی‌بعد $\theta(\eta)$ به‌دست می‌آید.

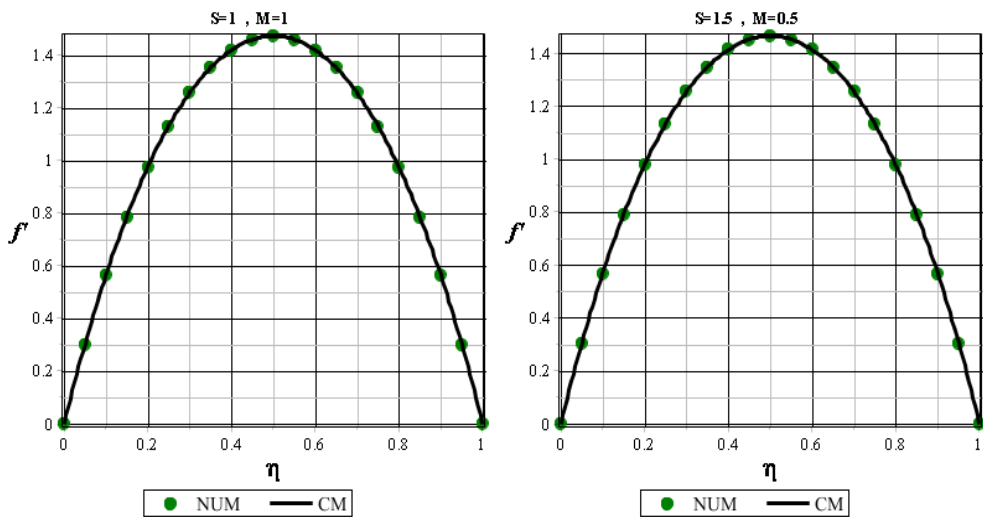
نتایج

اعتبارسنجی پاسخ‌ها

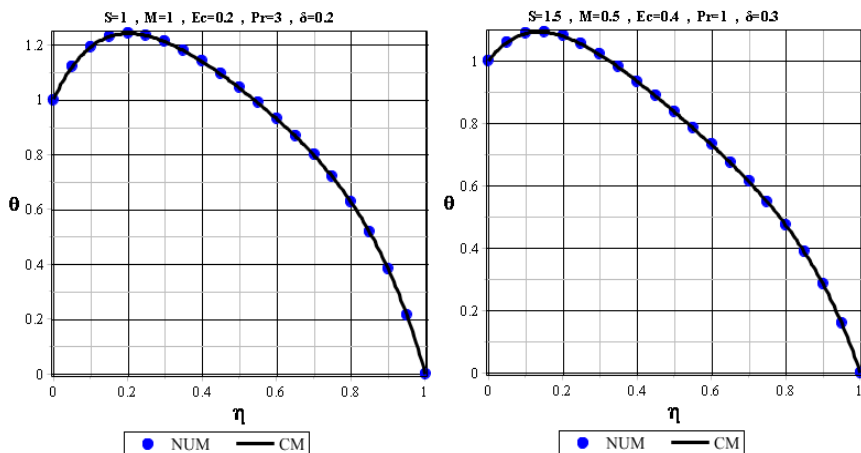
در مسئله حاضر، برای بررسی درستی و دقت پاسخ‌ها، نتایج حاصل از روش کولوکیشن را به‌ازای حالت‌های مختلف با نتایج حاصل از روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار که توسط نرم‌افزار میپل به‌دست می‌آید مقایسه می‌کنیم. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر میدان سیال می‌پردازیم. شکل (۲) نتایج حاصل از روش کولوکیشن را با نتایج حاصل از روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار برای $f(\eta)$ به‌ازای مقادیر مختلف پارامتر مغناطیس M و پارامتر فشردن S نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقایسه روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار روش کولوکیشن برای $f(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف M و S



شکل ۳. مقایسه روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار روش کولوکیشن برای $f'(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف M و S



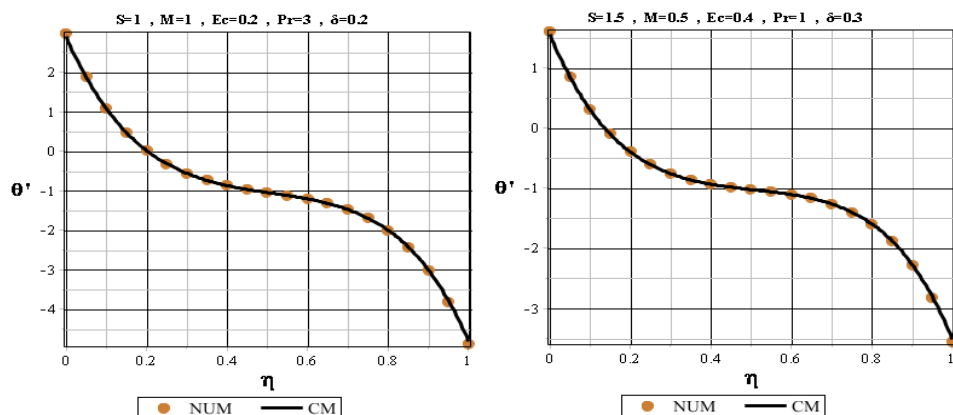
شکل ۴. مقایسه روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار و روش کولوکیشن برای $\theta(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف

Ec و Pr ، δ ، S ، M

شکل (۳) نتایج حاصل از روش کولوکیشن را با نتایج حاصل از روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار برای $f'(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف پارامتر مغناطیس M و پارامتر فشردن S نشان می‌دهد.

شکل (۴) و شکل (۵) نتایج حاصل از روش کولوکیشن را با نتایج حاصل از روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار برای $\theta(\eta)$ و $\theta'(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف Ec ، Pr ، δ ، S ، M نشان می‌دهد.

از شکل‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت که در این مسئله نتایج به دست آمده از روش کولوکیشن برای مقادیر مختلف پارامترهای مغناطیس، فشردن، پراختل، اکرت و ارتفاع تطابق بسیار خوبی با حل عددی دارند. بنابراین با استفاده از روش کولوکیشن پروفیل‌های میدان سیال به ازای مقادیر مختلف پارامترهای مغناطیس، فشردن، پراختل، ارتفاع و اکرت در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند.

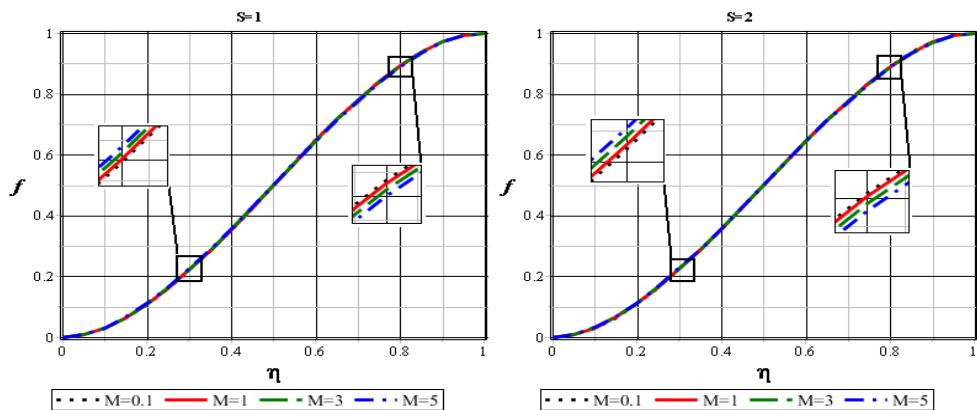


شکل ۵. مقایسه روش عددی رانج کوتاه مرتبه چهار و روش کولوکیشن برای $\theta'(\eta)$ به ازای مقادیر مختلف

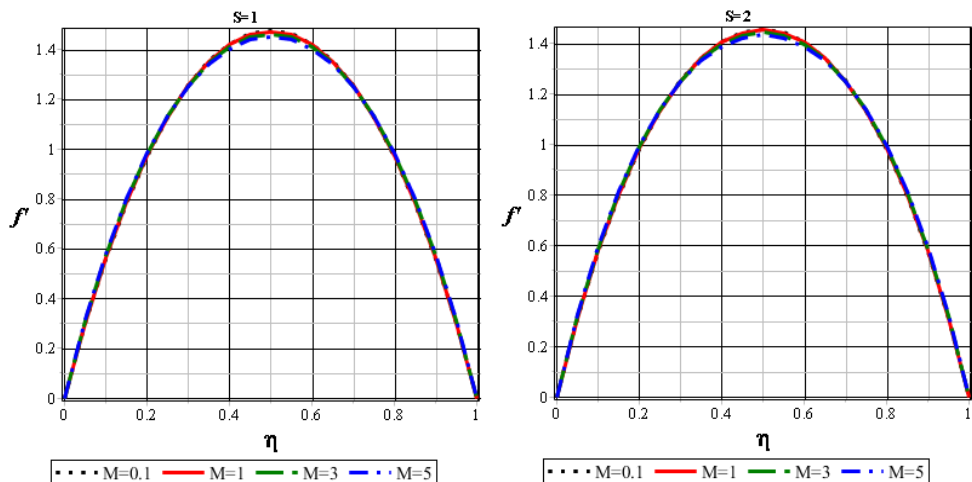
Ec و Pr ، δ ، S ، M

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی مؤثر بر میدان سیال

شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده تأثیر پارامتر مغناطیس M بر روی میدان سیال است. پارامتر مغناطیسی به صورت نسبت نیروی لورنتز به نیروی لرجت تعریف می‌شود. افزایش این پارامتر به منزله افزایش شدت میدان مغناطیسی و نیروی لورنتز است. نیروی لورنتز نیز ذاتی اتلافی دارد، یعنی همواره خلاف جهت جریان سیال اعمال و اثر می‌گذارد. با مقایسه مقدار f در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر مغناطیس و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت لورنتز، مؤلفه عمودی سرعت در حل تشابهی f در نزدیکی صفحه نوسانی بالا کاهش و در نزدیکی صفحه ثابت پایین افزایش می‌یابد. با افزایش این پارامتر مؤلفه افقی سرعت در حل تشابهی f' تخت‌تر می‌شود و در واقع در اثر افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت لورنتز، مؤلفه افقی سرعت سیال کاهش می‌یابد.



شکل ۶. تأثیر پارامتر مغناطیس M بر تغییرات f به‌ازای مقدار ثابت S

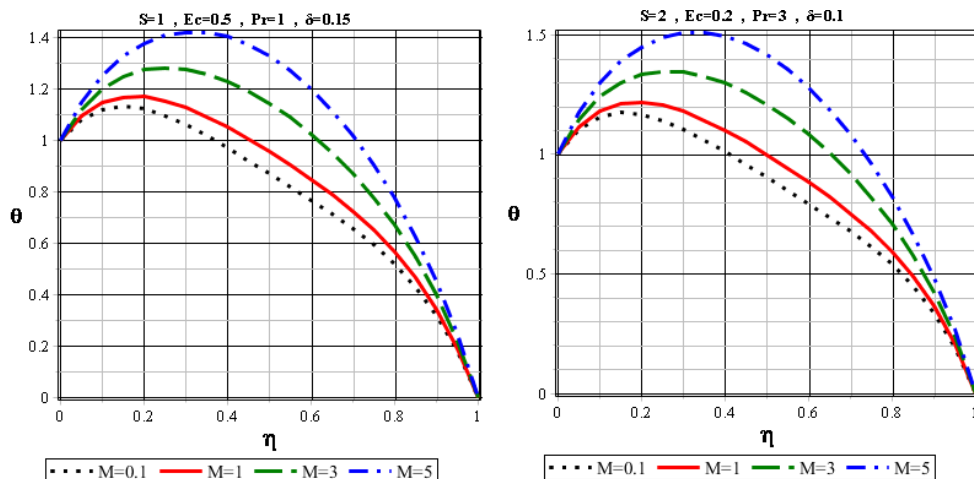


شکل ۷. تأثیر پارامتر مغناطیس M بر تغییرات f' به‌ازای مقدار ثابت S

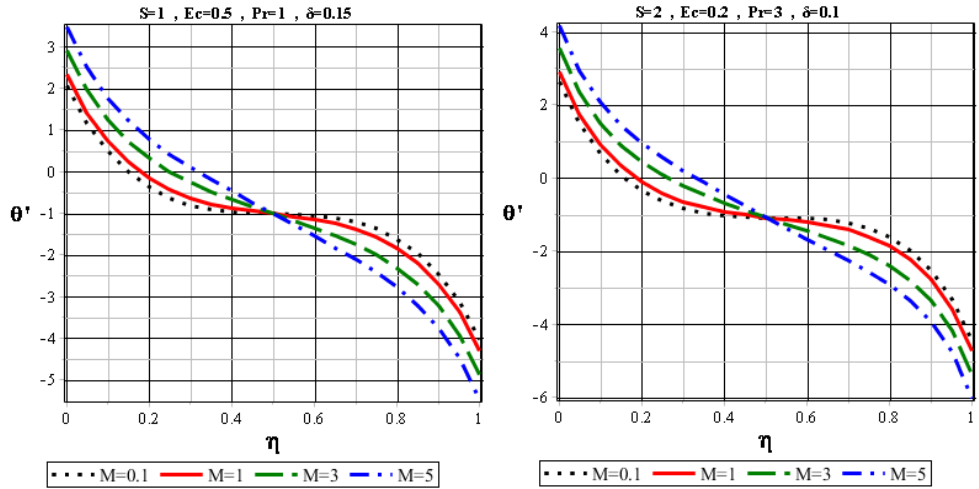
شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده تأثیر پارامتر مغناطیس بر پروفیل دمای بی‌بعد θ و گرادیان دمای بی‌بعد θ' است، با توجه به این شکل‌ها دیده می‌شود که مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص با افزایش پارامتر مغناطیس، افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل به‌وجود آمدن جمله‌ای است که در معادله انرژی ظاهری می‌شود که به آن اتلاف ژولی می‌گویند. این اتلاف در واقع، اتلاف گرمایی است که ناشی از مقاومت در مسیر جریان الکتریکی و مغناطیسی است. با وجود این خاصیت، طبیعتاً دمای بی‌بعد نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش این پارامتر، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها $|\theta'(0)|$ و $|\theta'(1)|$ افزایش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده تأثیر پارامتر فشردن S بر میدان سیال است. افزایش این پارامتر به‌منزله افزایش فاصله دو صفحه و کم شدن تأثیر دیواره (لزجت سیال) بر سیال در حال عبور است. در نتیجه، با افزایش این پارامتر، در اثر افزایش فاصله بین دو صفحه مؤلفه عمودی سرعت در حل تشابهی f در نزدیکی صفحه نوسانی بالا کاهش و در نزدیکی صفحه ثابت پایین افزایش می‌یابد. با افزایش این پارامتر مؤلفه افقی سرعت در حل تشابهی f' تحت‌تر می‌شود و در واقع مؤلفه افقی سرعت سیال کاهش می‌یابد.

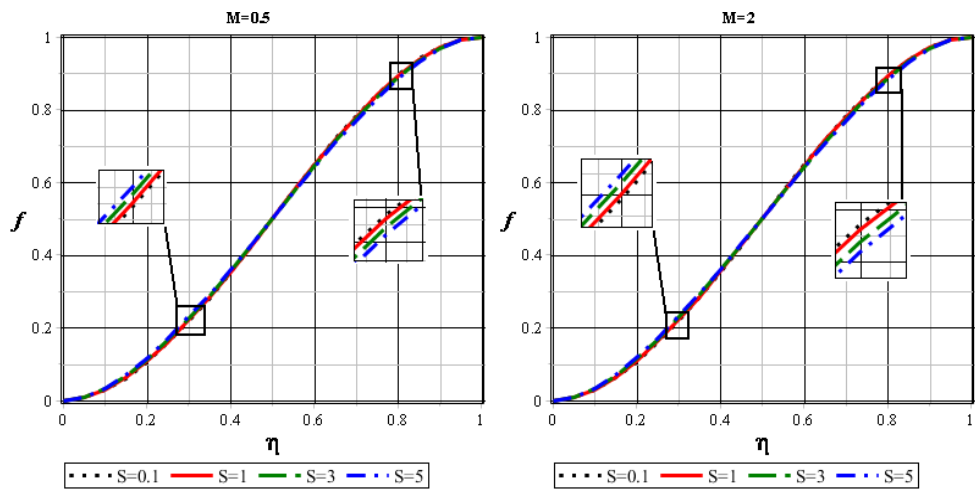
با توجه به شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر فشردن که می‌تواند ناشی از کاهش لزجت سینماتیک سیال یا افزایش فاصله دو صفحه از یکدیگر باشد مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش این پارامتر در اثر کاهش تأثیر لزجت سینماتیک یا افزایش فاصله صفحه بالایی از صفحه ثابت پایینی، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد $|\theta'(1)|$ در دیواره بالایی کاهش یافته و در نتیجه نرخ انتقال حرارت سیال در این دیواره کاهش می‌یابد، اما در دیواره پایینی که ثابت است، گرادیان دمای بی‌بعد $|\theta'(0)|$ تقریباً ثابت باقی می‌ماند.



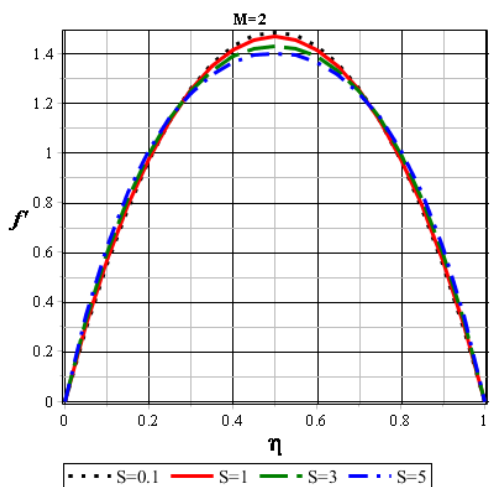
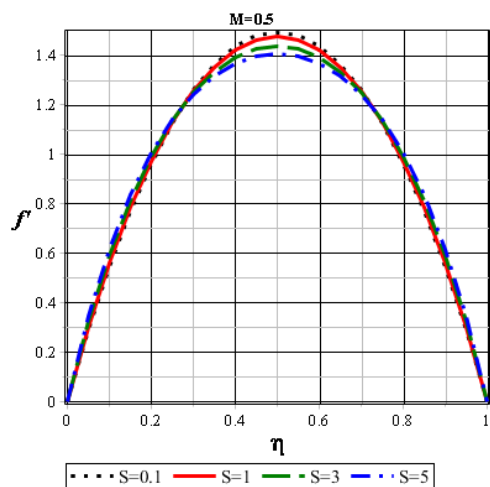
شکل ۸. تأثیر پارامتر مغناطیس M بر تغییرات θ به‌ازای مقدار ثابت S, δ, Pr, Ec



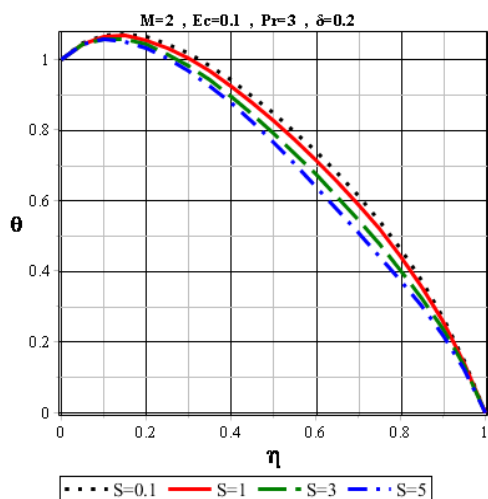
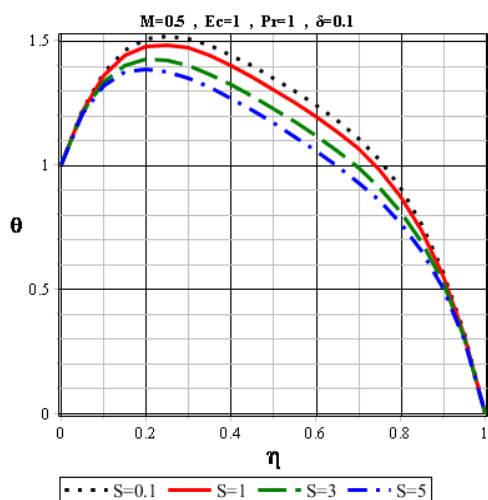
شکل ۹. تأثیر پارامتر مغناطیس M بر تغییرات θ' به ازای مقدار ثابت S, δ, Pr, Ec



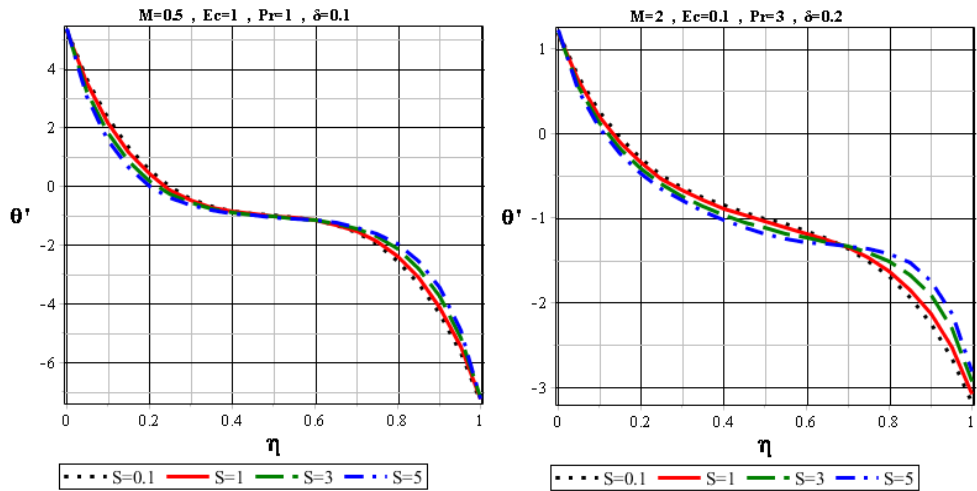
شکل ۱۰. تأثیر پارامتر فشردن S بر تغییرات f به ازای مقدار ثابت M



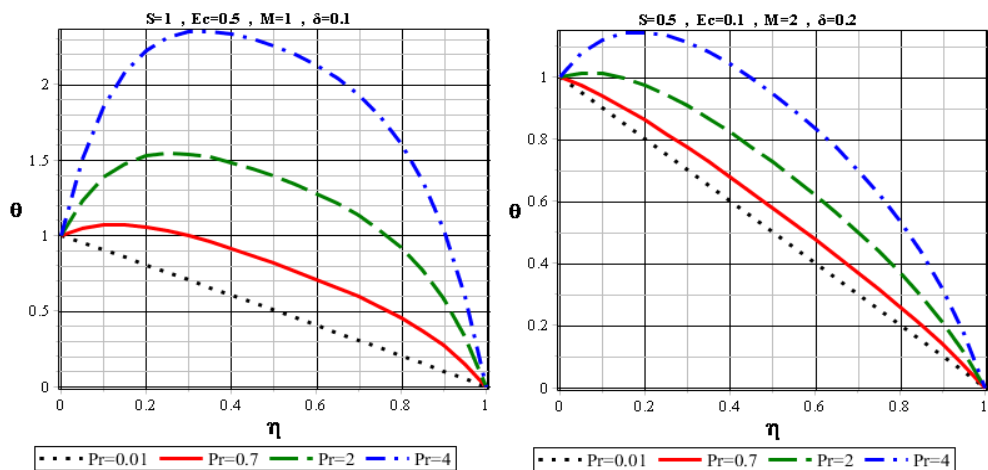
شکل ۱۱. تأثیر پارامتر فشردن S بر تغییرات f' به ازای مقدار ثابت M



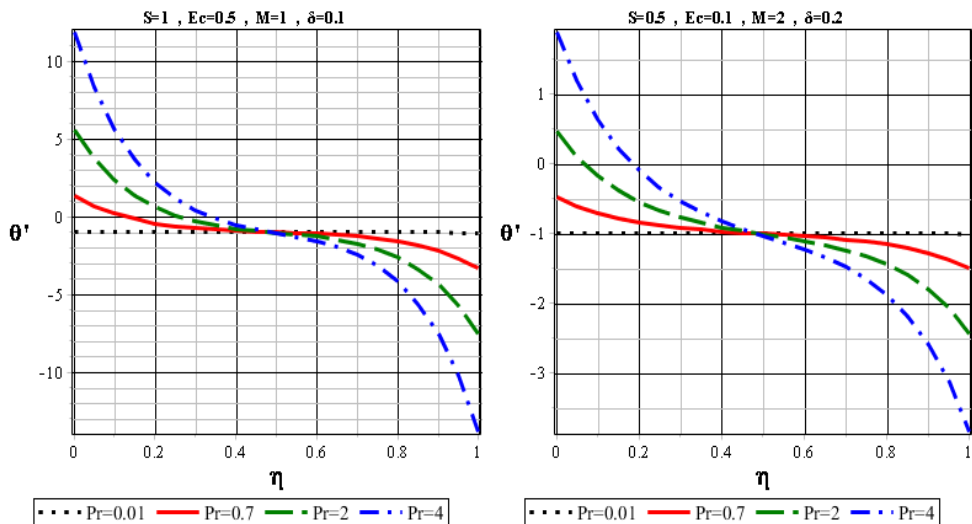
شکل ۱۲. تأثیر پارامتر فشردن S بر تغییرات θ به ازای مقدار ثابت M, δ, Pr, Ec



شکل ۱۳. تأثیر پارامتر فشردن S بر تغییرات θ' به‌ازای مقدار ثابت M, δ, Pr, Ec



شکل ۱۴. تأثیر عدد Pr بر تغییرات θ به‌ازای مقدار ثابت M, δ, S, Ec

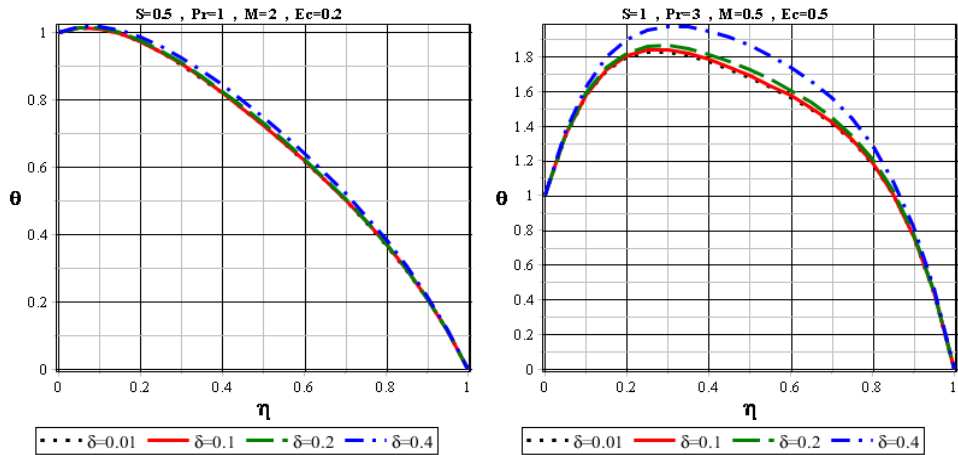


شکل ۱۵. تأثیر عدد Pr بر تغییرات θ' به ازای مقدار ثابت M, δ, S, Ec

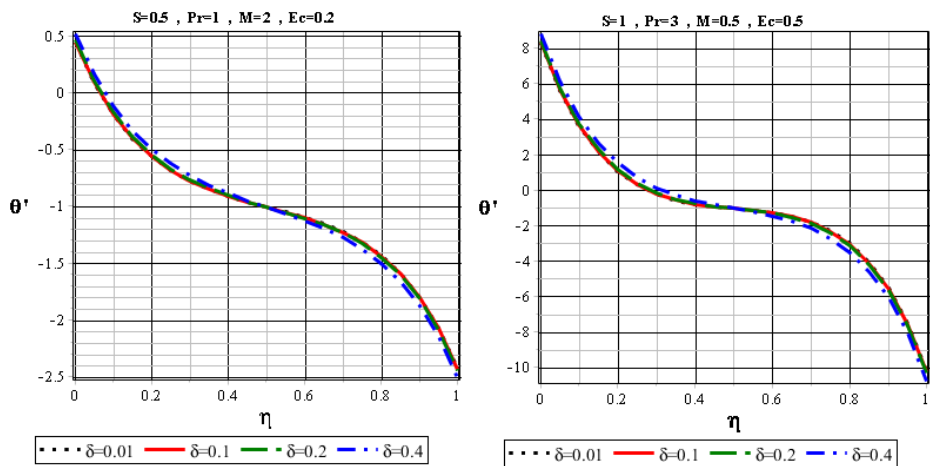
شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان‌دهنده تأثیر عدد پرانتل Pr بر میدان سیال است. عدد پرانتل نسبت پخش مومنتم به پخش گرمایی تعریف می‌شود. با مقایسه مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش عدد پرانتل که به مفهوم نفوذ بیشتر مومنتم و نفوذ کمتر گرماست، پخش حرارت ضعیف‌تر می‌شود و در نتیجه θ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد پرانتل، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها $|\theta'(0)|$ و $|\theta'(1)|$ افزایش و در نتیجه طبق قانون فوریه نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان‌دهنده تأثیر پارامتر ارتفاع δ بر میدان سیال است. با مقایسه مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش δ ، دمای بی‌بعد افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که این افزایش بیشتر در ناحیه میانی کانال مشاهده می‌شود. به همین دلیل تغییرات گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها تقریباً ناچیز است و تأثیری بر نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها ندارد.

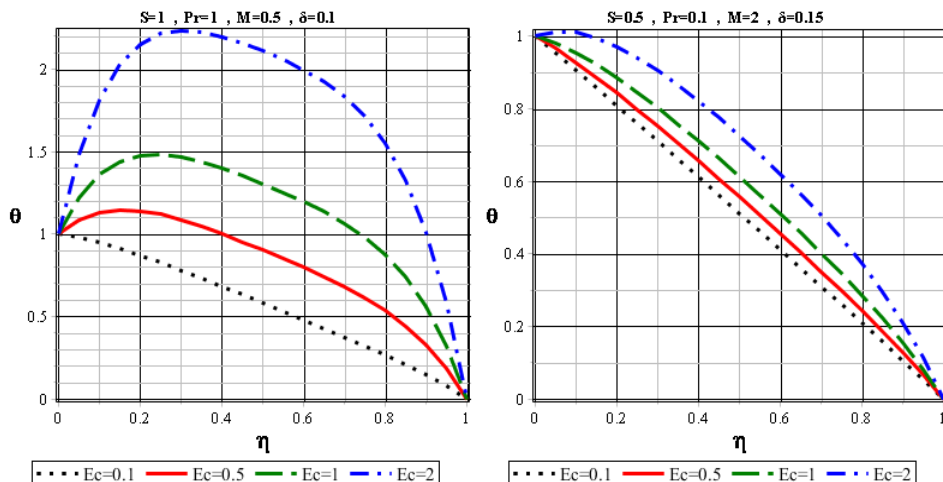
شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان‌دهنده تأثیر عدد اکرت Ec بر میدان سیال است. عدد اکرت به صورت نسبت انرژی جنبشی جریان به آنتالپی لایه مرزی تعریف می‌گردد. این عدد در واقع بیانگر میزان اتلاف انتقال گرما در جریان سیال است.



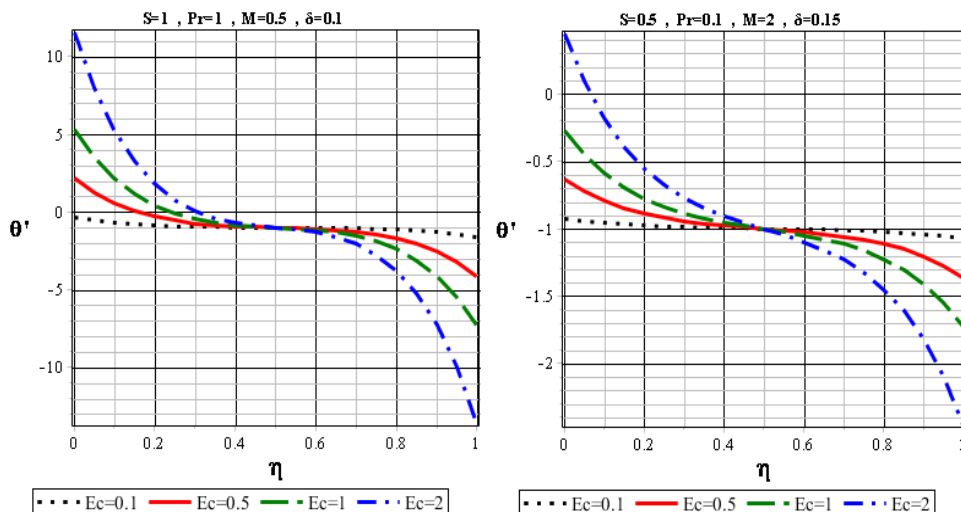
شکل ۱۶. تأثیر پارامتر ارتفاع δ بر تغییرات θ به ازای مقدار ثابت M, Pr, S, Ec



شکل ۱۷. تأثیر پارامتر ارتفاع δ بر تغییرات θ' به ازای مقدار ثابت M, Pr, S, Ec



شکل ۱۸. تأثیر پارامتر ارتفاع Ec بر تغییرات θ به ازای مقدار ثابت M, Pr, S, δ



شکل ۱۹. تأثیر پارامتر ارتفاع Ec بر تغییرات θ' به ازای مقدار ثابت M, Pr, S, δ

با مقایسه مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش عدد اکرت، میزان انرژی جنبشی سیال افزایش یافته که عامل برخورد بیشتر ذرات سیال به یکدیگر می‌شود، در نتیجه θ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش این پارامتر، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها $|\theta'(0)|$ و $|\theta'(1)|$ افزایش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، با به کارگیری روش تحلیلی کولوکیشن انتقال حرارت جریان آرام ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- با افزایش پارامتر مغناطیس و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت لورنتز، مؤلفه عمودی سرعت در حل تشابهی f در نزدیکی صفحه نوسانی بالا کاهش و در نزدیکی صفحه ثابت پایین افزایش می‌یابد. مؤلفه افقی سرعت در حل تشابهی f' کاهش و مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص در اثر افزایش اتلاف ژولی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش این پارامتر، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها $|\theta'(0)|$ و $|\theta'(1)|$ افزایش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش پارامتر فشردن، مؤلفه عمودی سرعت در حل تشابهی در نزدیکی صفحه نوسانی بالا کاهش و در نزدیکی صفحه ثابت پایین افزایش می‌یابد. با افزایش این پارامتر مؤلفه افقی سرعت در حل تشابهی تخت‌تر می‌شود و در واقع مؤلفه افقی سرعت سیال کاهش می‌یابد. با افزایش پارامتر فشردن، مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص کاهش، قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره پایین $|\theta'(0)|$ تقریباً ثابت اما در دیواره بالایی $|\theta'(1)|$ کاهش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت در این دیواره کاهش می‌یابد.
- ۳- با مقایسه مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش عدد پرانتل و عدد اکرت، θ افزایش می‌یابد. همچنین قدر مطلق گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها $|\theta'(0)|$ و $|\theta'(1)|$ افزایش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها افزایش می‌یابد.
- ۴- با مقایسه مقدار دمای بی‌بعد θ در یک نقطه خاص مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر ارتفاع δ ، دمای بی‌بعد افزایش می‌یابد؛ به طوری که این افزایش بیشتر در ناحیه میانی کانال مشاهده می‌شود. به همین دلیل، تغییرات گرادیان دمای بی‌بعد در دیواره‌ها تقریباً ناچیز است و تأثیری بر نرخ انتقال حرارت سیال در دیواره‌ها ندارد.

References

- [1] Ishizawa, S. (1966). The Unsteady Laminar Flow between Two Parallel Discs with Arbitrarily Varying Gap Width. *Bulletin of JSME*, 9(35), 533-550. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.9.533>
- [2] Uchida, S., & Aoki, H. (1977). Unsteady flows in a semi-infinite contracting or expanding pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, 82(2), 371-387. <https://doi.org/10.1017/S0022112077000718>
- [3] Majdalani, J., & Zhou, C. (2003). Moderate-to-large injection and suction driven channel flows with expanding or contracting walls. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 83(3), 181-196. <https://doi.org/10.1002/zamm.200310018>

- [4] Abo-Eldahab, E. M., & El Aziz, M. A. (2005). Viscous dissipation and Joule heating effects on MHD-free convection from a vertical plate with power-law variation in surface temperature in the presence of Hall and ion-slip currents. *Applied Mathematical Modelling*, 29(6), 579-595. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2004.10.005>
- [5] Rusop, M., Asghar, S., & Hossain, A. (2007). Squeezed flow and heat transfer over a porous surface for viscous fluid. *Heat and Mass Transfer*, 44(2), 165-173. <https://doi.org/10.1007/s00231-006-0218-3>
- [6] Hayat, T., & Abbas, Z. (2008). Heat transfer analysis on the MHD flow of a second grade fluid in a channel with porous medium. *Chaos, Solitons & Fractals*, 38(2), 556-567. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.12.004>
- [7] Sheikholeslami, M., & Ganji, D. D. (2013). Heat transfer of Cu-water nanofluid flow between parallel plates. *Powder Technology*, 235, 873-879. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.030>
- [8] Hatami, M., Sheikholeslami, M., & Ganji, D. D. (2014). Retracted: Laminar flow and heat transfer of nanofluid between contracting and rotating disks by least square method. *Powder Technology*, 253, 769-779. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.12.053>
- [9] Adhikari, A., & Sanyal, D. (2013). Heat transfer on MHD viscous flow over a stretching sheet with prescribed heat flux. *Bulletin Of International Mathematical Virtual Institute*, 3, 35-47. http://www.imvibl.org/buletin/bulletin_imvi_3_1_2013/bulletin_imvi_3_1_2013_35_47.pdf
- [10] Srinivas, S., Subramanyam Reddy, A., Ramamohan, T. R., & Shukla, A. K. (2014). Influence of heat transfer on MHD flow in a pipe with expanding or contracting permeable wall. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(3), 817-830. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.01.006>
- [11] Hatami, M., & Ganji, D. D. (2014). Heat transfer and nanofluid flow in suction and blowing process between parallel disks in presence of variable magnetic field. *Journal of Molecular Liquids*, 190, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.005>
- [12] Hatami, M., Sheikholeslami, M., & Ganji, D. D. (2014). Nanofluid flow and heat transfer in an asymmetric porous channel with expanding or contracting wall. *Journal of Molecular Liquids*, 195, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.02.024>
- [13] Moakher, P. G., Abbasi, M., & Khaki, M. (2015). New analytical solution of MHD fluid flow of fourth grade fluid through the channel with slip condition via collocation method. *International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 2(3). <https://www.semanticscholar.org/paper/New-analytical-solution-of-MHD-fluid-flow-of-fourth-Moakher-Abbasi/97d6df4eac4aaf0864a3bf0f675cb6703023bfce>
- [14] Vyas, P., & Srivastava, N. (2015). Entropy analysis of generalized MHD Couette flow inside a composite duct with asymmetric convective cooling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 603-614. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1562-0>
- [15] Gul, T., Rehman, I., Islam, S., Khan, M. A., Ullah, W., & Shah, Z. (2015). Unsteady third order fluid flow with heat transfer between two vertical oscillating plates. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 5(4), 72-79. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44657607/Unsteady_Third_Order_Fluid_Flow_with_Heat_20160412-6164-nbxdb9.pdf?1460467003=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUnsteady_Third_Order_Fluid_Flow_with_Heat.pdf&Expires=1644919265&Signature=Wt0TXw3vtL3BVnpg7JA0bP2Q4b1GdDnJAPwvVTzF80PJ1ADqjxBnm~wumUELbwRZClmdl~x6M2Uc1Fn5uW6c2R~6i-

- [9nzL7r9lA8tb58JrQsybsM5GfS3Lz8ZQh0GoOuILelfpNfAWA4CETHk8JZO8iJ
OdLlIX8wVEoGGDvT8M1ocXSvfR9~IWdYOX2TorFgfYETmvZ5wWPRgJeU
AQnO4MxOVFyeVd~hviPYM8TWqQqa8BPiQvvxfjco6CLVndLxNBudL.SeyDd
xUSHjYJXBTIX9b40aMhtHPPp8L2mnfrvUYfwZW-LxmAZ4qf98Ycjgho7Osol
DV0qknXmomGg-kw &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.001)
- [16] Heidary, H., Hosseini, R., Pirmohammadi, M., & Kermani, M. J. (2015). Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.001>
- [17] Dogonchi, A. S., Divsalar, K., & Ganji, D. D. (2016). Flow and heat transfer of MHD nanofluid between parallel plates in the presence of thermal radiation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 310, 58-76. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.07.003>
- [18] Raissi, P., Shamlooei, M., Ebrahimzadeh Sepasgozar, S. M., & Ayani, M. (2016). Numerical investigation of two-dimensional and axisymmetric unsteady flow between parallel plates. *Propulsion and Power Research*, 5(4), 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2016.11.006>
- [19] Rajput, U., & Kumar, G. (2017). Effect of heat absorption on MHD flow over a plate with variable wall temperature. *Journal of Applied Science and Engineering*, 20(3), 277-282. <https://doi.org/10.6180/jase.2017.20.3.01>
- [20] Vajravelu, K., Prasad, K., Ng, C.-O., & Vaidya, H. (2017). MHD squeeze flow and heat transfer of a nanofluid between parallel disks with variable fluid properties and transpiration. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0076-4>
- [21] 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>
- [22] Al-Saif, A.-S., & Harfash, A. (2019). Perturbation-Iteration Algorithm for Solving Heat and Mass Transfer in the Unsteady Squeezing Flow between Parallel Plates. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(4), 804-815. <https://doi.org/10.22055/jacm.2019.28052.1453>
- [23] Pourmehran, O., Rahimi-Gorji, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). RETRACTED: Analytical investigation of squeezing unsteady nanofluid flow between parallel plates by LSM and CM. *Alexandria Engineering Journal*, 54(1), 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.002>
- [24] Rahimi-Gorji, M., Pourmehran, O., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). An analytical investigation on unsteady motion of vertically falling spherical particles in non-Newtonian fluid by Collocation Method. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 531-540. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.10.016>
- [25] Sahebi, S., Pourziaei, H., Feizi, A., Taheri, M., Rostamiyan, Y., & Ganji, D. (2015). Numerical analysis of natural convection for non-Newtonian fluid conveying nanoparticles between two vertical parallel plates. *The European Physical Journal Plus*, 130(12), 1-12. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2015-15238-6>

پیوست الف. استخراج معادله تکانه

به طور خلاصه معادلات حاکم بر جریان به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{الف-۱})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma B_0^2 u}{\rho} \quad (\text{الف-۲})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{الف-۳})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\mu}{\rho c_p} \right) \left[4 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{\sigma B_0^2 u^2}{\rho c_p} \quad (\text{الف-۴})$$

با توجه به اینکه معادلات حاکم بر جریان معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی هستند، می توان با استفاده از پارامتر تشابهی η و روش حل تشابهی، معادلات فوق را به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل نمود. با استفاده از معادله پیوستگی داریم:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow dv = -\frac{\partial u}{\partial x} dy \Rightarrow \int_0^v dv = \int_0^y -\frac{\partial u}{\partial x} dy$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \quad \text{و} \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{H\sqrt{1-at}} \Rightarrow dy = H\sqrt{1-at} d\eta \quad (\text{الف-۵})$$

$$\Rightarrow v = \int_0^y -\frac{\partial u}{\partial x} dy = -\int_0^\eta \frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) (H\sqrt{1-at}) d\eta \Rightarrow v = -\frac{aH}{2\sqrt{1-at}} f(\eta)$$

برای از بین بردن گرادیان فشار در معادلات تکانه، از معادلات نسبت به y و x مشتق می گیریم و تفاضل این دو معادله را به دست می آوریم.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial y \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^3 u}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \right) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{الف-۶})$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} + \nu \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (\text{الف-۷})$$

تفاضل معادله (الف-۶) از معادله (الف-۷) به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} - u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \\ \nu \left(\frac{\partial^3 u}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} \right) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (\text{الف-۸})$$

همچنین می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{a^2 x}{2(1-at)^2} f'(\eta) + \frac{a^2 x \eta}{4(1-at)^2} f''(\eta) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial u}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial y} = \left(\frac{ax}{2(1-at)} f''(\eta) \right) \frac{1}{H\sqrt{1-at}} = \frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \right) \times \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{ax}{2H^2(1-at)^2} f'''(\eta) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{a^2 H}{4(1-at)^{\frac{3}{2}}} f(\eta) + \frac{ya^2}{4(1-at)^2} f'(\eta) \quad (\text{الف-۹}) \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{a}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{a^2 x}{2(1-at)^2} f'(\eta) + \frac{a^2 x \eta}{4(1-at)^2} f''(\eta) \right) = \frac{3a^2 x}{4H(1-at)^{\frac{5}{2}}} f''(\eta) + \frac{a^2 x \eta}{4H(1-at)^{\frac{5}{2}}} f'''(\eta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{a^2 H}{4(1-at)^{\frac{3}{2}}} f(\eta) + \frac{ya^2}{4(1-at)^2} f'(\eta) \right) = 0 \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{a}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) = 0 \\ \frac{\partial^3 u}{\partial y \partial x^2} &= 0 \\ \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{ax}{2H^2(1-at)^2} f'''(\eta) \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{ax}{2H^2(1-at)^2} f'''(\eta) \right) \times \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{ax}{2H^3(1-at)^{\frac{5}{2}}} f^{iv}(\eta) \\ \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} &= 0 \\ \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{a}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \right) = 0 \end{aligned}$$

با جای گذاری روابط فوق در معادله (الف-۸):

$$\begin{aligned} &\left(\frac{3a^2 x}{4H(1-at)^{\frac{5}{2}}} f''(\eta) + \frac{a^2 x \eta}{4H(1-at)^{\frac{5}{2}}} f'''(\eta) \right) + \left(\frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) - \frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) \right) + \\ &\left(\frac{ax}{2(1-at)} f'(\eta) - \frac{a}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \right) + \left(-\frac{a}{2(1-at)} f'(\eta) - \frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \right) + \\ &\left(-\frac{aH}{2\sqrt{1-at}} f(\eta) - \frac{ax}{2H^2(1-at)^2} f'''(\eta) \right) = v \left(\frac{ax}{2H^3(1-at)^{\frac{5}{2}}} f^{iv}(\eta) \right) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} \frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f''(\eta) \end{aligned} \quad (\text{الف-۱۰})$$

با ساده سازی رابطه فوق و تقسیم طرفین رابطه بر $\frac{2H^3(1-at)^{\frac{5}{2}}}{\nu ax}$ می توان نوشت:

$$f^{iv} - \frac{3aH^2}{2\nu} f'' + \frac{aH^2}{2\nu} (-\eta f''' - ff'' + ff''') - \frac{\sigma B_0^2 H^2 (1-at)}{\mu} f'' = 0 \quad (\text{الف-۱۱})$$

و در نتیجه معادله مومنوم حاکم در حل تشابهی به صورت زیر به دست می آید.

(الف-۱۲)

$$f^{iv} - S(\eta f''' + ff'' - ff''' + 3f'') - Mf'' = 0$$

پیوست ب. استخراج معادله انرژی

دمای بی‌بعد را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

(ب-۱)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{y}{H\sqrt{1-at}}, \quad \theta(\eta) = \frac{T-T_h}{T_w-T_h} \\ \Rightarrow T &= (T_w-T_h)\theta(\eta) + T_h \\ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial [(T_w-T_h)\theta(\eta) + T_h]}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{(T_w-T_h)\eta a}{2(1-at)} \theta' \\ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial [(T_w-T_h)\theta(\eta) + T_h]}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\partial [(T_w-T_h)\theta(\eta) + T_h]}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{(T_w-T_h)}{H\sqrt{1-at}} \theta' \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{(T_w-T_h)}{H\sqrt{1-at}} \theta' \right) \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{(T_w-T_h)}{H^2(1-at)} \theta'' \end{aligned}$$

با جای گذاری روابط فوق در معادله (الف-۱) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{(T_w-T_h)\eta a}{2(1-at)} \theta' - \frac{aH}{2\sqrt{1-at}} f \frac{(T_w-T_h)}{H\sqrt{1-at}} \theta' &= \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{(T_w-T_h)}{H^2(1-at)} \theta'' \right] + \\ \frac{\mu}{\rho c_p} \left[\frac{4a^2}{4(1-at)^2} f'^2 + \left(\frac{ax}{2H(1-at)^{\frac{3}{2}}} f'' \right)^2 \right] &+ \frac{\sigma B_0^2}{\rho c_p} \left(\frac{ax}{2(1-at)} f' \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{ب-۲})$$

با تقسیم طرفین معادله فوق بر $\frac{k}{\rho c_p} \frac{(T_w-T_h)}{H^2(1-at)}$ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{a\rho c_p H^2}{2k} [\eta\theta' - f\theta'] &= \theta'' + \frac{\mu a^2 H^2}{k(T_w-T_h)(1-at)} f'^2 + \frac{\mu a^2 x^2}{4k(T_w-T_h)(1-at)^2} f''^2 + \\ \frac{\sigma B_0^2 H^2 a^2 x^2}{4k(T_w-T_h)(1-at)} f'^2 & \end{aligned} \quad (\text{ب-۳})$$

پارامترهای بی‌بعد زیر را می‌توان تعریف نمود.

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k}, \quad \text{Ec} = \frac{1}{c_p(T_w-T_h)} \left(\frac{ax}{2(1-at)} \right)^2, \quad \delta = \frac{h(t)}{x} = \frac{2H\sqrt{(1-at)}}{x} \quad (\text{ب-۴})$$

که Pr عدد پرانتل، Ec عدد اکرت و δ پارامتر ارتفاع است.

جای گذاری روابط (ب-۴) در معادله (ب-۳):

(ب-۵)

$$\theta'' + Pr S (f \theta' - \eta \theta') + Pr Ec (f''^2 + 4\delta^2 f'^2 + Mf'^2) = 0$$

پیوست ج. حل معادله تکانه با روش کولوکیشن

تابع آزمون زیر برای حل معادله تکانه در نظر گرفته می شود.

(ج-۱)

$$f(\eta) = (2\eta - \eta^2)^2 + c_1(\eta - \eta^2)^2 + c_2(\eta - \eta^3)^2 + c_3(\eta - \eta^4)^2 + c_4(\eta - \eta^5)^2$$

پاسخ تقریبی فوق، شرایط مرزی سرعت را برآورده می کند. از جای گذاری معادله (ج-۱) در معادله دیفرانسیل (الف-۹)، معادله باقی مانده ظاهر می شود.

(ج-۳)

$$\begin{aligned} R_1(\eta) = & 24 - 8Sc_1(c_2 + c_3 + c_4)\eta + 8Sc_1c_2\eta^3 + 144Sc_1c_2\eta^5 - 20Sc_1c_3\eta^4 - 96Sc_1c_4\eta^5 + \dots \\ & + 112Sc_1c_3\eta^6 + 40Sc_1c_3\eta^9 - 8Sc_2c_3\eta - 20Sc_2c_3\eta^4 + 208Sc_2c_3\eta^7 + 16Sc_2c_3\eta^3 - 224Sc_2c_3\eta^6 + \dots \\ & - 450Sc_2\eta^4 + 232Sc_3\eta^3 - 392Sc_3\eta^6 - 232Sc_1\eta^3 + 288Sc_2\eta^5 + 832Sc_3\eta^7 + 180Sc_1\eta^4 - 504Sc_3\eta^8 + \dots \\ & + 16Sc_2^2\eta^3 - 48Sc_2^2\eta^5 + 96Sc_2^2\eta^7 - 60Sc_2^2\eta^9 - 4Sc_3^2\eta - 20Sc_3^2\eta^4 + 48Sc_3^2\eta^7 + 88Sc_3^2\eta^{10} + \dots \\ & + 40Mc_3\eta^3 - 56Mc_3\eta^6 - 240c_3\eta - 24S\eta^5 - 6Sc_3 + 120S\eta^4 - 6Sc_2 - 224S\eta^3 - 6Sc_1 + 132S\eta^2 + \dots \\ & - 12M\eta^2 - 2Mc_1 - 2Mc_2 - 2Mc_3 + 360c_2\eta^2 + 1680c_3\eta^4 - 48c_2 + 24c_1 - 8M - 24S = 0 \end{aligned}$$

برای یافتن ضرایب ثابت c_1 تا c_4 در فاصله $0 < \eta < 1$ ، این بازه را به ۵ قسمت مساوی تقسیم نموده و معادله باقی مانده را برای نقاط داخلی بازه می نویسیم:

(ج-۴)

$$R_1\left(\frac{1}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{2}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{3}{5}\right) = 0, \quad R_1\left(\frac{4}{5}\right) = 0$$

با استفاده از روابط (ج-۵)، ۴ معادله و ۴ مجهول ایجاد می شود که با استفاده از نرم افزار میبل ثابت های

c_1, c_2, c_3, c_4 به ازای مقادیر مختلف M و S به دست می آید. با جای گذاری ثابت های c_1, c_2, c_3, c_4

در رابطه (ج-۱)، $f(\eta)$ به دست خواهد آمد.

برای $\delta=0.3$ و $M=0.5$ ، $S=1.5$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 RI_1 := & -2.249844326 c_2 c_3 - 2.234158940 c_2 c_4 - 2.491063675 c_3 c_4 - 1.136271360 c_1 c_3 \\
 & - 1.083801600 c_1 c_2 - 1.099950981 c_1 c_4 + 1.26848000 - 1.247065021 c_3^2 \\
 & - 1.029242880 c_2^2 - 1.245864960 c_4^2 - 0.2995200000 c_1^2 - 44.42247135 c_4 \\
 & - 59.39751424 c_3 - 42.93468160 c_2 + 22.42496000 c_1 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RI_2 := & 21.45536000 - 4.021855027 c_2 c_3 - 4.207513928 c_2 c_4 - 6.672605677 c_3 c_4 \\
 & - 1.083248640 c_1 c_3 - 0.786124800 c_1 c_2 - 0.9501194650 c_1 c_4 - 3.037321426 c_3^2 \\
 & - 1.388943360 c_2^2 - 3.764505906 c_4^2 - 0.080640000 c_1^2 - 102.1878141 c_4 \\
 & - 54.09925632 c_3 + 14.65771520 c_2 + 29.10272000 c_1 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RI_3 := & 37.07264000 - 4.575087821 c_2 c_3 - 7.061656044 c_2 c_4 - 14.46161818 c_3 c_4 \\
 & - 1.089515520 c_1 c_3 - 0.195379200 c_1 c_2 - 1.884464087 c_1 c_4 - 4.893726936 c_3^2 \\
 & - 0.890634240 c_2^2 - 10.61050966 c_4^2 + 0.080640000 c_1^2 - 1.934242000 c_4 \\
 & + 96.4918016 c_3 + 98.1367808 c_2 + 29.42528000 c_1 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RI_4 := & 44.77952000 + 5.07419197 c_2 c_3 + 3.67299033 c_2 c_4 + 2.75130338 c_3 c_4 \\
 & + 1.928601600 c_1 c_3 + 1.535385600 c_1 c_2 + 1.4545089 c_1 c_4 + 2.948988807 c_3^2 \\
 & + 2.014433280 c_2^2 - 1.694333737 c_4^2 + 0.299520000 c_1^2 + 904.6960590 c_4 \\
 & + 520.1613363 c_3 + 189.8022656 c_2 + 23.62304000 c_1 = 0
 \end{aligned}$$

در نتیجه ضرایب برابر مقادیر زیر خواهد بود:

$$\{c_1 = -0.4710891548, c_2 = -0.3280984128, c_3 = 0.09280371392, c_4 = -0.02209865150\}$$

و تابع آزمون نیز خواهد شد:

$$\begin{aligned}
 f := & (2\eta - \eta^2)^2 - 0.4710891548 (\eta - \eta^2)^2 - 0.3280984128 (\eta - \eta^3)^2 \\
 & + 0.09280371393 (\eta - \eta^4)^2 - 0.02209865151 (\eta - \eta^5)^2
 \end{aligned}$$

پیوست د. حل معادله انرژی با روش کولوکیشن

تابع آزمون $\theta(\eta)$ را یک چند جمله‌ای برحسب η انتخاب می‌کنیم.

$$\theta(\eta) = (1-\eta) + b_1\eta(1-\eta) + b_2\eta(1-\eta^2) + b_3\eta(1-\eta^3) + b_4\eta(1-\eta^4) + b_5\eta(1-\eta^5) \quad (۱-د)$$

پاسخ تقریبی فوق، شرایط مرزی حرارتی را برآورده کرده است. با جای گذاری معادله (۱-د) در معادله دیفرانسیل (الف-۱) و به‌ازای پارامترهای دلخواه $S = M = 1$ معادله باقی‌مانده به‌صورت زیر ظاهر می‌شود.

(۲-د)

$$\begin{aligned}
 R_2(\eta) = & -290.523375 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^2 + 481.086460 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^4 - 437.360409 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^3 + \\
 & 165.3254771 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^2 + 35.1431896 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^6 - 8.6510427 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^8 + \\
 & 15.6928149 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^{10} + 70.1351055 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^7 - 31.2285785 \text{Pr} Ec \delta^2 \eta^9 -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 11.1499947 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{12} + 8.1164101 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{11} + 3.1102521 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{14} - \\
& 0.766286 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{16} + 0.957858 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{13} + 0.112119 \text{Pr } Ec \delta^2 \eta^{18} - \text{Pr } b_2 \eta + \\
& 0.932465 \text{Pr } b_5 \eta^4 - 2.834577 \text{Pr } b_3 \eta^3 - 2.834577 \text{Pr } b_4 \eta^3 - 9.263525 \text{Pr } b_1 \eta^3 + \\
& 0.93246 \text{Pr } b_4 \eta^4 - 13.00092 \text{Pr } b_3 \eta^5 + 3.21447 \text{Pr } b_4 \eta^2 - 8.71095 \text{Pr } b_2 \eta^4 + \dots + \\
& 20.53356 \text{Pr } Ec \eta^9 + 33.51213 \text{Pr } Ec \eta^{12} + 10.64982 \text{Pr } Ec \eta^{11} - 11.29144 \text{Pr } Ec \eta^{14} + \\
& 2.078856 \text{Pr } Ec \eta^{16} + 0.239464 \text{Pr } Ec \eta^{13} + 0.028029 \text{Pr } Ec \eta^{18} - 2b_1 = 0
\end{aligned}$$

برای یافتن ضرایب ثابت b_1 تا b_5 در فاصله $0 < \eta < 1$ ، این بازه را به ۶ قسمت مساوی تقسیم نموده و معادله باقی‌مانده را برای نقاط داخلی بازه می‌نویسیم:

$$R_2\left(\frac{1}{6}\right)=0, \quad R_2\left(\frac{2}{6}\right)=0, \quad R_2\left(\frac{3}{6}\right)=0, \quad R_2\left(\frac{4}{6}\right)=0, \quad R_2\left(\frac{5}{6}\right)=0 \quad (3-د)$$

با استفاده از روابط (۳-د)، پنج معادله و پنج مجهول ایجاد می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار میپل ثابت‌های $b_0, b_1, \dots, b_5$ به‌ازای مقادیر مختلف δ ، Pr و Ec به‌دست می‌آید. با جایگذاری ثابت‌های $b_0, b_1, \dots, b_5$ در رابطه (۱-د)، توزیع دمای بی‌بعد $\theta(\eta)$ به‌دست می‌آید. برای $M=0.5$ ، $S=1.5$ و $\delta=0.3$ ، $\text{Pr}=1$ ، $Ec=0.3$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
R2_1 &:= -0.1566399064 b_5 - 0.2256720210 b_4 - 0.4644541954 b_3 - 1.122461937 b_2 \\
&\quad - 2.089063227 b_1 + 6.335420001 = 0 \\
R2_2 &:= 1.958625683 - 0.4721817242 b_5 - 0.8386858409 b_4 - 1.422257174 b_3 \\
&\quad - 2.069592571 b_2 - 2.034796286 b_1 = 0 \\
R2_3 &:= 0.7384031906 - 1.875212504 b_5 - 2.500179812 b_4 - 3.000130772 b_3 \\
&\quad - 3.000065386 b_2 - 2.000000001 b_1 = 0 \\
R2_4 &:= 1.750067773 - 5.904113412 b_5 - 5.924642838 b_4 - 5.352579671 b_3 - 4.034643404 b_2 \\
&\quad - 2.034643405 b_1 = 0 \\
R2_5 &:= -14.65567404 b_5 - 11.76215553 b_4 - 8.508560673 b_3 - 5.144377454 b_2 \\
&\quad - 2.088847662 b_1 + 6.042156422 = 0
\end{aligned}$$

در نتیجه ضرایب برابر مقادیر زیر خواهد بود:

$$\{b_1 = 8.206126366, b_2 = -14.54497953, b_3 = 15.68816760, b_4 = -10.22800861, b_5 = 3.448860512\}$$

و تابع آزمون نیز خواهد شد:

$$\begin{aligned}
\theta &:= 1 - \eta + 8.206126366 \eta (1 - \eta) - 14.54497953 \eta (-\eta^2 + 1) + 15.68816760 \eta (-\eta^3 \\
&\quad + 1) - 10.22800861 \eta (-\eta^4 + 1) + 3.448860512 \eta (-\eta^5 + 1)
\end{aligned}$$



Investigation of the Behavior of the Linked Column Frame System for Retrofitting of RC Frames

Alireza Ezoddin^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Semnan, Semnan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Semnan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.30.2021

Revised: 03.24.2021

Accepted: 04.19.2021

Keyword:

Linked Column Frame System

Link beam

Retrofitting

Plastic hinges formation

Shear Absorption Percentage

*Corresponding Author:

Alireza Ezoddin

Email: aezoddin@gmail.com

ABSTRACT

One of the newest fields of study in the field of structural and earthquake engineering is the achievement of structural systems that quickly return to their pre-earthquake state and service after an earthquake. One of the newest of these systems is the Linked Column Frame (LCF) system, which protects the vertical load-bearing system during earthquakes by having the replaceable link beam members as a fuse member. The relative low cost and easy repair process in these systems lead to the rapid return to occupancy after an earthquake. In this system, the replaceable link beams used initially provide the initial rigidity of the system and then exhibit soft nonlinear behavior and ductility with energy dissipation resulting from the yield. In this paper, the behavior of the linked column frame system for retrofitting of the RC frames in two structures of 5- and 10-storeys were investigated. Based on the results of the nonlinear static analysis of the two 5- and 10-storey reinforced concrete structures retrofitted with LCF system, the amount of bearing capacity and the energy dissipation capacity of the structure retrofitted increased by an average of 3.1 times compared to the structures without retrofitting. The plastic hinges were first formed in steel frames (LC frames) and the RC structure remained in an elastic state. Furthermore, the maximum and minimum shear absorption of seismic force percentage of the LC frames were approximately 80% and 13% in the lower and upper storeys, respectively.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
کارفان

کارفان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۱، ۷۹-۶۳

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

doi:10.48301/KSSA.2021.129401

20.1001.1.23829796.1400.18.1.3.2



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی جهت تقویت قاب‌های بتن‌آرمه

علیرضا عزالدین^{*۱}

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، آموزشکده فنی سمنان، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان سمنان، ایران.

چکیده

یکی از جدیدترین زمینه‌های مطالعات در حوزه مهندسی سازه و زلزله، دستیابی به سیستم‌های سازه‌ای است که پس از وقوع زلزله، به سرعت به وضعیت پیش از زلزله و خدمت‌رسانی بازگردد. سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی (LCF) یکی از جدیدترین این سیستم‌ها است که با داشتن اعضای تیر پیوند قابل تعویض به عنوان عضو فیوز هنگام زلزله از سیستم باربر قائم محافظت می‌کند. پایین بودن زمان، هزینه و سهولت تعمیر در این سیستم‌ها، سبب بازگشت سریع ساختمان به خدمت‌رسانی خواهد شد. در این سیستم، تیرهای پیوند قابل تعویض به کار رفته، در ابتدا سختی اولیه سیستم را تأمین می‌کنند و سپس با استهلاک انرژی ناشی از تسلیم، رفتار غیرخطی نرم و شکل‌پذیری از خود به نمایش می‌گذارند. در این تحقیق، به بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی برای تقویت قاب‌های بتن‌آرمه در دو ساختمان پنج و ده طبقه پرداخته شده است. براساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی، از دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه تقویت‌شده با سیستم LCF، میزان ظرفیت باربری و قابلیت استهلاک انرژی نسبت به سازه بدون تقویت به طور میانگین در حدود ۳/۱ برابر افزایش می‌یابد؛ به طوری که مفاصل پلاستیک ابتدا در قاب‌های فولادی (LC) تشکیل می‌شوند و سازه بتن‌آرمه در حالت الاستیک باقی می‌ماند. همچنین حداکثر و حداقل مقدار درصد جذب برش برای قاب‌های LC به طور متوسط به ترتیب در طبقات پایین در حدود ۸۰ درصد و در طبقات بالا در حدود ۱۳ درصد از نیروی زلزله را جذب می‌کنند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

کلید واژگان:

سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی
تیر پیوند
مقاوم‌سازی
نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک
درصد جذب برش

^{*}نویسنده مسئول: علیرضا عزالدین

پست الکترونیکی:

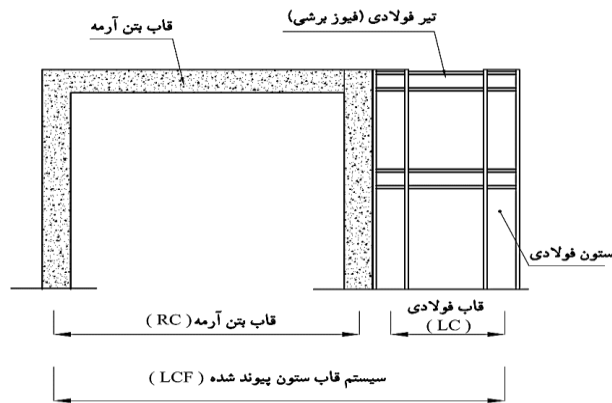
aezoddin@gmail.com



© 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

پس از وقوع زلزله نورتریج و کوبه در سال ۱۹۹۱ و مشاهده آسیب‌های چشمگیر سازه‌ها در این زلزله‌ها، ضوابط طراحی لرزه‌ای سازه‌ها به‌طور اساسی تغییر کرد. از مهم‌ترین دستورالعمل‌های تدوین شده برای بهسازی سازه‌های موجود می‌توان ATC-40 [۱] و FEMA 356 [۲] را نام برد. برای بهسازی سازه‌های بتن‌آرمه موجود، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. از آن جمله می‌توان مقاومت‌سازی به روش ژاکت بتنی و ژاکت فولادی [۳]، مقاومت‌سازی به روش استفاده از الیاف پلیمری [۴-۶]، مقاومت‌سازی به روش افزودن مهاربندی فولادی (داخلی و خارجی) [۷]، مقاومت‌سازی به روش افزودن دیوار برشی بتنی [۸؛ ۹]، مقاومت‌سازی به روش افزودن میراگر [۱۰] و مقاومت‌سازی به روش جدید قاب ستون پیوند شده^۱ (LCF) نام برد. این سیستم سازه‌ای از قاب فولادی (LCF) با اعضای تسلیم‌شونده قابل تعویض که به‌صورت المان فیوز عمل می‌کند به‌منظور افزایش عملکرد در برابر بارهای زلزله تشکیل شده است. در شکل ۱ نمای کلی از قاب بتنی با سیستم ستون پیوند شده فولادی نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای کلی قاب بتنی یا فولادی تقویت شده با سیستم ستون پیوند شده فولادی (LCF) [۱۱]

سیستم سازه‌ای LCF از دو بخش سیستم باربر جانبی اصلی سازه که ستون پیوند شده نامیده می‌شود و سیستم باربر جانبی ثانویه که شامل قاب خمشی مقاوم می‌باشد تشکیل شده است. در سیستم قاب ستون پیوند شده (LCF)، تیرهای پیوند قابل تعویض به کار رفته، در ابتدا سختی اولیه سیستم را تأمین می‌کنند و سپس با استهلاک انرژی ناشی از تسلیم، رفتار غیرخطی نرم و شکل‌پذیری از خود به نمایش می‌گذارند. استهلاک انرژی و شکل‌پذیری این اعضا سبب محدود کردن تغییر شکل‌های غیرالاستیک و در نتیجه، کاهش خرابی در سیستم قاب خمشی مجاور قاب پیوند شده، خواهد شد. رفتار تیرهای پیوند شده در سیستم قاب ستون پیوند شده LCF مشابه رفتار تیرهای پیوند شده در قاب‌های با بادبندهای خارج از مرکز (واگرا) است و براساس طول تیر پیوند این اعضا در تسلیم برشی یا خمشی عمل می‌کنند. در هنگام زلزله‌های متوسط، سهولت در تعویض اعضای تیر پیوند شده، مطابق جزئیات اتصالی که در گزارش دوسیکا و لوپس [۱۲] آمده است می‌باشد و سبب تسریع در بازگشت ساختمان به وضعیت خدمت‌رسانی خود خواهد شد. نادر و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۱۳] ایده اصلی سیستم قاب ستون پیوند شده LCF در پایه‌های عریض مانند پل رودخانه اولکلند در کالیفرنیا را به کار بردند. تیرهای پیوند شده برشی در پایه این پل‌ها به‌گونه‌ای طرح شدند تا

¹ Linked Column Frame

هنگام زلزله دارای رفتار تسلیم برشی باشند و پس از خرابی بتوان به راحتی آن‌ها را تعویض کرد. سیستم قاب ستون پیوند شده LCF را به عنوان یک سیستم فیوز سازه‌ای که نقش استهلاک‌کننده انرژی غیرفعال با مستهلک‌کننده فلزی^۱ (PEDMD) را دارد در نظر گرفت. یعنی عضو پیوند با تغییر شکل غیرخطی، انرژی سازه را مستهلک و نیروهای موجود در اعضای مجاور را محدود می‌کند. اعضای فیوز، پیش از دیگر اعضا وارد رفتار غیرالاستیک می‌شوند و سبب افزایش استهلاک انرژی لرزه‌ای در سازه می‌گردند. در صورتی که فیوزهای سازه‌ای، به طور مناسب طرح شوند، تغییر شکل‌های غیرالاستیک و آسیب در آن‌ها صورت می‌گیرد و اعضای اصلی سازه در حد الاستیک باقی می‌مانند و آسیب‌ها در این اعضا رخ نمی‌دهد یا بسیار محدود خواهد بود. حالت ایده‌آل این فیوزها، فیوزهای سازه‌ای قابل تعویضی^۲ هستند به طوری که بتوان آن‌ها را پس از رخداد زلزله و آسیب، به راحتی با اعضای جدید تعویض کرد. امروزه، استفاده از فیوزهای تعویض‌پذیر سازه‌ای به سبب رفتار غیرالاستیک مناسب، کنترل و کاهش آسیب در اعضای اصلی و قابلیت تعویض سریع و آسان در سیستم‌های سازه‌ها بسیار متداول شده است. در سیستم‌های سازه‌ای ترکیب‌شده با این فیوزها آسیب در اعضای اصلی محدود است و قابلیت تعویض راحت و سریع فیوزهای آسیب‌دیده، سبب کاهش زمان و هزینه‌های تعمیر ساختمان خواهد شد. امروزه، مفهوم فیوز، نسبت به گذشته، متفاوت است. در گذشته، فیوز به اعضای سازه‌ای که به منظور تأمین تغییر شکل‌های غیرالاستیک و استهلاک انرژی لرزه‌ای طرح می‌شدند بیان می‌گردید و این فیوزها لزوماً قابل تعویض نبودند. رواد و پوپوف [۱۴] ایده قاب مهاربند و اگر را معرفی کردند. تیر پیوند در این سیستم، به علت آنکه برای استهلاک انرژی توسط تغییر شکل غیرالاستیک طرح‌شده بود، عضو فیوز شکل‌پذیر نامیده شد. فینتل و قاش [۱۵] عبارت فیوز سازه‌ای را برای تیر قاب‌های خمشی مقاوم طرح‌شده با ستون قوی و تیر ضعیف به کار بردند. عزالدین و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر طول‌های مختلف تیر پیوند در سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی (LCF) با هدف مقاوم‌سازی قاب بتن‌آرمه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد نمونه‌ای با نسبت طول تیر پیوند به طول دهانه قاب بتن‌آرمه برابر ۰/۴۵، نسبت به دیگر طول‌های مختلف تیر پیوند عملکرد بهتری برای مقاوم‌سازی قاب بتن‌آرمه دارد؛ به طوری که برای نمونه‌ای با نسبت طول تیر پیوند به طول دهانه قاب بتن‌آرمه برابر ۰/۴۵، نسبت جابه‌جایی سازه با تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا در آستانه فروریزش به جابه‌جایی سازه با تشکیل اولین مفصل پلاستیک در تیر پیوند، نزدیک به عدد سه است. از آنجایی که سیستم قاب ستون پیوند شده (LCF) از دو سیستم سازه‌ای براساس اندرکنش بین دو سیستم فیوز سازه‌ای و سازه اصلی تشکیل شده است که تیرهای پیوند در آن، نقش فیوز را بر عهده دارند؛ تغییر شکل‌های غیرالاستیک و تسلیم، تنها در تیرهای پیوند تشکیل می‌شود و اعضای سازه اصلی باید در حد الاستیک باقی بمانند. در این مقاله، به بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی به منظور تقویت قاب‌های بتن‌آرمه در دو سازه بتن‌آرمه ۵ و ۱۰ طبقه پرداخته شده است تا بتوان میزان کارایی سیستم LCF برای تقویت و مقاوم‌سازی قاب بتن‌آرمه را تعیین کرد؛ به گونه‌ای که مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرهای پیوند قاب LC تشکیل شوند تا سازه اصلی در حالت الاستیک باقی بماند و قابلیت خدمت‌رسانی سازه، حفظ شود.

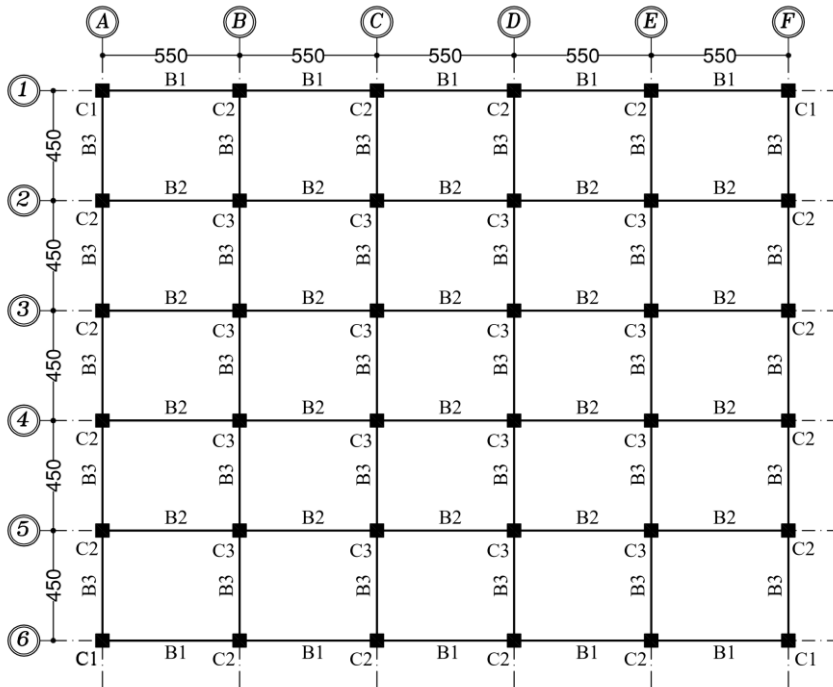
معرفی سازه‌های مورد مطالعه و بررسی

در این تحقیق، دو سازه بتنی در شهر تهران، بر روی خاک نوع II قرار دارد و پلان هر دو سازه به صورت یکسان فرض گردید و از لحاظ ارتفاع، متغیر و شامل سازه پنج و ده طبقه می‌باشد. پلان سازه‌ها به ابعاد $۲۷/۵ \times ۲۲/۵$ متر است که دارای پنج دهانه ۵/۵ متری در جهت X و پنج دهانه ۴/۵ متری در جهت Y می‌باشد. به منظور کاربرد بیشتر طرح، ابعاد و دهانه‌ها، واقعی و کاربری آن، بیمارستان فرض شده است. سقف‌های ساختمان از نوع دال بتن‌آرمه به

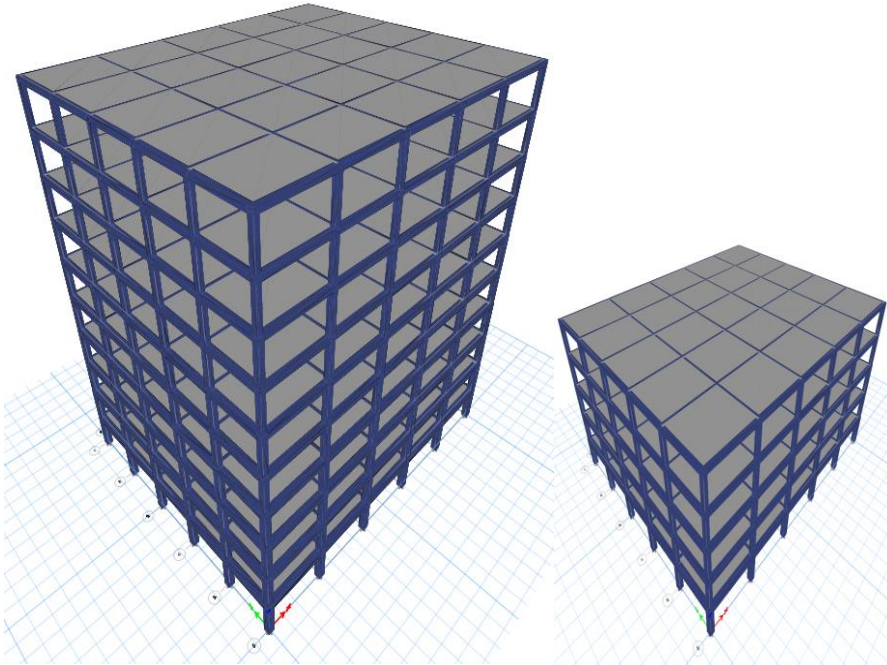
¹ Passive Energy Dissipation Metallic Dampers

² Replaceable

ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی برای تقویت سازه بتن‌آرمه، سیستم باربر جانبی در تمامی سازه‌ها بتن‌آرمه (سازه اصلی) بر اساس آیین‌نامه زلزله ویرایش دوم [۱۷] (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم) بارگذاری شده است. سازه بتنی از لحاظ شکل‌پذیری از نوع سیستم قاب خمشی متوسط در هر دو جهت و بارهای سرویس بر اساس ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و بارهای ناشی از زلزله به سازه بتنی بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران ویرایش دوم اعمال شده است که خلاصه آن در جداول ۱ و ۲ ارائه می‌شود. پلان سازه مورد مطالعه در شکل ۲ و نمای سه‌بعدی سازه پنج و ده طبقه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. پلان دو سازه مورد مطالعه و تیپ‌بندی تیرها و ستون‌ها (واحد بر حسب سانتی‌متر)



شکل ۳. نمای سه بُعدی سازه‌های بتن آرمه پنج و ده طبقه

جدول ۱. مقدار بار اعمال شده بر سازه‌های بتن آرمه پنج و ده طبقه

نوع بار اعمال شده	طبقات	بام
(kN/m ²) بار مرده	۶	۵/۵
(kN /m ²) بار زنده	۳/۵	۲
(kN /m) بار دیوارهای پیرامونی	۷	۲/۵

جدول ۲. مقدار خلاصه پارامترهای لرزه‌ای سازه بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم [۱۷]

سازه بتنی	T ₀	H(m)	T = 0.07 H ^{0.75}	A	B	I	R	C _x , C _y
۵ طبقه	۰/۵	۱۷/۵	۰/۶	۰/۳۵	۲/۲۱	۱/۲	۸	۰/۱۱۶
۱۰ طبقه	۰/۵	۳۵	۱	۰/۳۵	۱/۵۷	۱/۲	۸	۰/۰۸۲۴

پس از ساخت مدل و اعمال بارهای وارده در نرم‌افزار Etabs 2018 [۱۸]، طراحی سازه پنج و ده طبقه بر مبنای ضوابط آیین‌نامه ACI-318-95 [۱۹] انجام شد. مقاطع تیر، ستون و آرماتورهای مصرفی برای دو سازه بتن آرمه پنج و ده طبقه در جداول ۳ تا ۶ ارائه شده است.

جدول ۳. ابعاد و مقدار میل گرد تیرها برای سازه پنج طبقه بتنی

ابعاد مقطع عرض × ارتفاع (cm)	تیب ۱ (B1)		تیب ۲ (B2)		تیب ۳ (B3)	
	مساحت میل گرد (mm ²)	فوقانی	مساحت میل گرد (mm ²)	فوقانی	مساحت میل گرد (mm ²)	تحتانی
۱	۱۲۴۸	۱۴۶۸	۱۵۴۶	۱۳۲۴	۱۲۲۴	۱۱۰۶
۲	۱۳۸۴	۱۵۲۱	۱۶۱۴	۱۴۳۶	۱۲۳۱	۱۱۰۹
۳	۱۱۰۴	۱۲۹۵	۱۳۹۷	۱۲۱۶	۱۱۸۶	۱۰۵۴
۴	۹۸۷	۱۱۲۴	۱۲۱۸	۱۱۰۳	۱۱۰۴	۱۰۱۲
۵	۵۲۶	۸۱۵	۱۰۰۳	۶۲۵	۱۰۸۷	۹۴۲

جدول ۴. ابعاد و مقدار میلگرد تیرها برای سازه ده طبقه بتنی

ابعاد مقطع عرض × ارتفاع (cm)	تیب ۱ (B1)		تیب ۲ (B2)		تیب ۳ (B3)	
	مساحت میل گرد (mm ²)	فوقانی	مساحت میل گرد (mm ²)	فوقانی	مساحت میل گرد (mm ²)	تحتانی
۱	۱۸۰۲	۱۵۹۷	۱۹۷۸	۱۶۳۴	۱۶۵۴	۱۴۲۵
۲	۲۰۱۴	۱۶۷۳	۲۱۲۳	۱۷۴۳	۱۶۷۵	۱۳۵۶
۳	۲۱۰۷	۱۶۶۳	۲۱۸۹	۱۸۰۶	۱۸۳۶	۱۳۲۱
۴	۲۰۸۷	۱۵۴۷	۲۲۱۷	۱۷۰۳	۱۷۲۲	۱۲۶۲
۵	۱۹۳۶	۱۴۷۳	۲۰۷۹	۱۵۹۷	۱۶۳۸	۱۲۲۶
۶	۱۸۴۲	۱۳۴۶	۱۹۵۶	۱۴۹۹	۱۷۲۱	۱۲۶۳
۷	۱۵۹۵	۱۲۴۹	۱۸۴۶	۱۲۵۶	۱۴۶۲	۱۱۷۶
۸	۱۱۶۵	۱۱۳۷	۱۶۷۹	۱۲۸۶	۱۱۰۳	۱۱۰۴
۹	۱۱۱۳	۱۰۰۱	۱۳۱۱	۱۱۲۹	۱۰۰۳	۹۱۱
۱۰	۸۲۶	۵۷۹	۱۱۰۴	۶۰۳	۷۲۱	۴۷۵

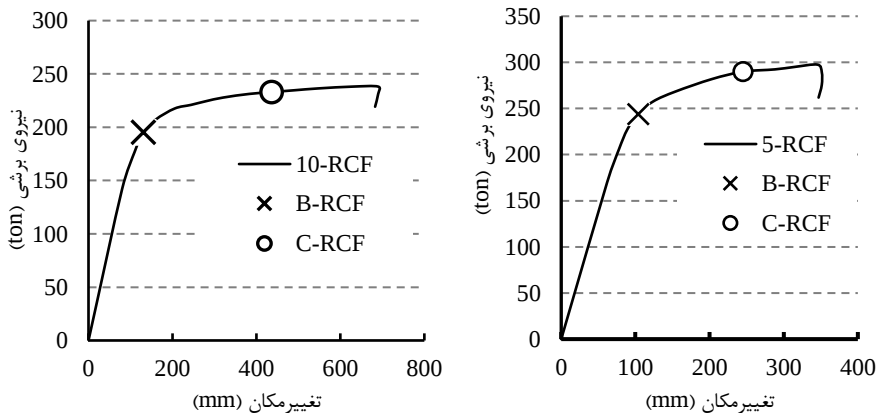
جدول ۵. ابعاد و مقدار میل گرد ستون ها برای سازه پنج طبقه بتنی

ابعاد مقطع (cm)	ستون تیپ (C1)		ستون تیپ (C2)		ستون تیپ (C3)
	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)
۱	۲۳۴۲	۳۹۵۶	۴۵۲۱		
۲	۳۳۵۱	۴۱۹۶	۴۵۹۸		
۳	۲۵۶۲	۳۱۲۶	۳۷۳۵		
۴	۲۰۳۴	۲۱۶۷	۲۶۴۹		
۵	۱۸۶۲	۲۰۳۴	۲۱۸۶		

جدول ۶. ابعاد و مقدار میل گرد ستون ها برای سازه ده طبقه بتنی

ستون تیپ (C3)	ستون تیپ (C2)	ستون تیپ (C1)	ابعاد مقطع (cm)	طبقه
A (mm ²)	A (mm ²)	A (mm ²)		
۵۹۶۲	۵۲۶۲	۴۴۶۳	۶۵ × ۶۵	۱
۶۰۲۳	۵۳۵۸	۴۵۲۳	۶۵ × ۶۵	۲
۴۶۵۲	۴۱۴۱	۳۷۶۹	۶۰ × ۶۰	۳
۴۳۸۶	۳۹۷۶	۳۵۴۶	۶۰ × ۶۰	۴
۳۷۹۵	۳۲۶۸	۲۷۹۴	۵۰ × ۵۰	۵
۳۷۷۹	۳۰۸۹	۲۵۸۷	۵۰ × ۵۰	۶
۳۲۹۷	۲۸۸۶	۲۲۵۲	۴۰ × ۴۰	۷
۳۱۶۲	۲۷۵۶	۲۱۸۹	۴۰ × ۴۰	۸
۲۵۶۵	۲۴۹۸	۱۸۹۹	۳۵ × ۳۵	۹
۲۰۶۴	۱۹۶۷	۱۷۷۵	۳۵ × ۳۵	۱۰

برای طراحی ستون های قاب LC با استفاده از روش کار مجازی برای حداکثر نیروی برشی مربوط به اولین مفصل پلاستیک در اعضای قاب RC با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی محاسبه می شود. نمودار نیرو- تغییر مکان دو سازه بتنی پنج و ده طبقه و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک آن ها در شکل ۴ نشان داده شده است. منظور از B-RCF اولین مفصل پلاستیک در تیر سازه بتن آرمه و C-RCF اولین مفصل پلاستیک در ستون سازه بتن آرمه می باشد.



شکل ۴. منحنی نیرو- تغییر مکان برای دو سازه پنج و ده طبقه

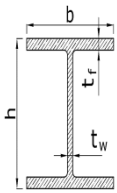
تغییر مکان جانبی ناشی از خمش با استفاده از معادله کار مجازی در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\Delta = \int_0^L \frac{Mm}{EI} dx \quad (1)$$

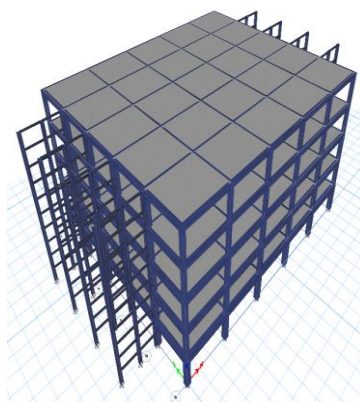
در رابطه (۱)، M ممان داخلی ناشی از بار واقعی، m ممان داخلی ناشی از بار واحد مجازی خارجی، E ضریب ارتجاعی (مدول الاستیسیته) و I ممان اینرسی می‌باشد. برای طراحی اندازه مقطع تیر پیوند، با استفاده از معادله شیب-افت محاسبه شده است. باید متذکر گردید که چرخش پلاستیک تیرهای پیوند یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی سیستم LCF برای تقویت قاب‌های بتن‌آرمه یا قاب‌های فولادی با سیستم قاب خمشی می‌باشد. مطابق با دستورالعمل FEMA-267 [۲۰] و مقررات لرزه‌ای برای ساختمان سازه‌های فولادی AISC [۲۱]، میزان چرخش پلاستیک تابعی از فلسفه تحلیل و طراحی می‌باشد؛ بنابراین میزان چرخش پلاستیک در قاب‌های خمشی مبتنی بر مشاهده نتایج تحلیل قاب‌های خمشی می‌باشد. تا قبل از زلزله نورث‌ریج، بزرگ‌ترین چرخش پلاستیک موردانتظار در گره انتهایی تیرها به میزان ۰/۰۲ رادیان بود. مطالعات انجام شده پس از زلزله نورث‌ریج قابلیت ایجاد دوران پلاستیک برای قاب‌های خمشی مقاوم‌سازی شده ۰/۰۲۵ رادیان را ضروری می‌داند. در این تحقیق، ابعاد مقاطع طراحی شده برای اعضای قاب LC برای تقویت دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. ابعاد مقاطع طراحی شده برای اعضای قاب LC برای دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه

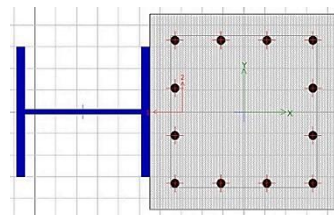
سازه بتنی	مقاطع قاب LC	ابعاد (mm)				مساحت (cm ²)	ممان اینرسی (cm ⁴)
		t_w	t_f	h	b		
۵	ستون	۱۱/۵	۲۰/۵	۳۲۰	۳۰۰	۱۶۱	۳۰۸۲۰
طبقه	تیر پیوند	۷	۱۲	۱۴۰	۱۴۰	۴۳	۱۵۰۹
۱۰	ستون	۳۰	۳۰	۵۵۰	۵۰۰	۴۴۷	۲۳۲۴۳۷
طبقه	تیر پیوند	۷	۱۰	۲۷۰	۱۳۵	۴۶	۵۷۹۵



برای مدل‌سازی و تعریف اندرکنش بین سازه بتنی و سیستم LCF از روش ساخت مقاطع مرکب با استفاده از برنامه Section Designer در نرم‌افزار Etabs 2018 [۱۸] استفاده شده است. در شکل ۵ نحوه مدل‌سازی و تعریف اندرکنش بین سازه بتنی و سیستم LCF برای تقویت سازه بتنی نشان می‌دهد. عزالدین و همکاران برای اتصال قاب فولادی (LC) به قاب بتن‌آرمه (RC) از بست‌های U شکل استفاده کردند که در شکل ۶ نشان داده شده است.

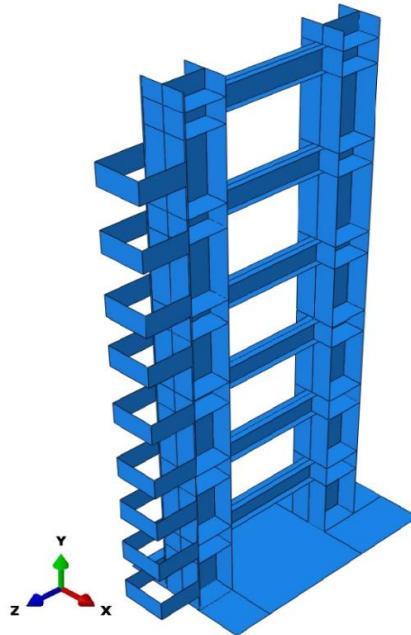


(ب)



(الف)

شکل ۵. الف) نحوه مدل‌سازی و اتصال ستون قاب بتن‌آرمه به قاب LC در نرم‌افزار Etabs 2018 (ب) مدل‌سازی سه‌بعدی قاب LC به‌منظور تقویت سازه بتن‌آرمه



شکل ۶. اتصال قاب ستون پیوند شده فولادی (LC) با بست‌های U شکل به قاب RC [۱۱]

بررسی رفتار سیستم LCF

سطوح عملکرد و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در سیستم LCF

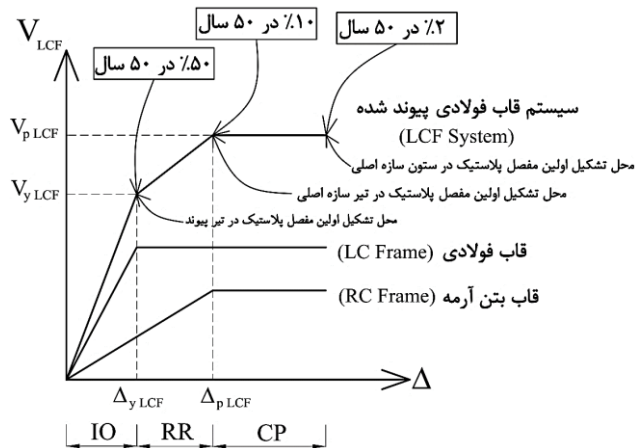
برای طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد در سازه‌های با سیستم فیوز، روش طرح پلاستیک بر اساس عملکرد (PBPD)^۱ می‌باشد که کلید اصلی آن تفکیک دو سیستم سازه‌ای بر اساس اندرکنش بین دو سیستم فیوز سازه‌ای و سازه اصلی است. طرح سیستم فیوز سازه‌ای در ترکیب با سازه اصلی شامل سطح عملکرد اول: خدمت‌رسانی بی‌وقفه^۲ (IO)، سطح عملکرد دوم: بازسازی سریع^۳ (RR) و سطح عملکرد سوم: آستانه فروریزش^۴ (CP) را در برمی‌گیرد [۱۱]. سطوح عملکرد سه‌گانه سیستم سازه LCF در شکل ۷ نشان داده شده است.

^۱ Performance-Based Plastic Design

^۲ Immediate Occupancy

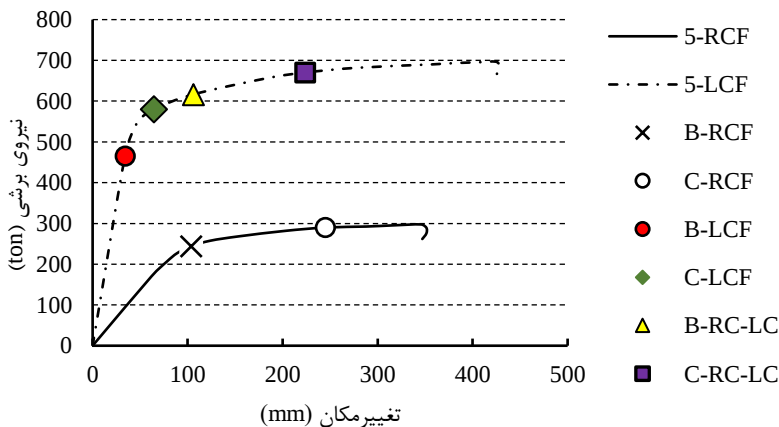
^۳ Rapid Return to occupancy

^۴ Collapse Prevention

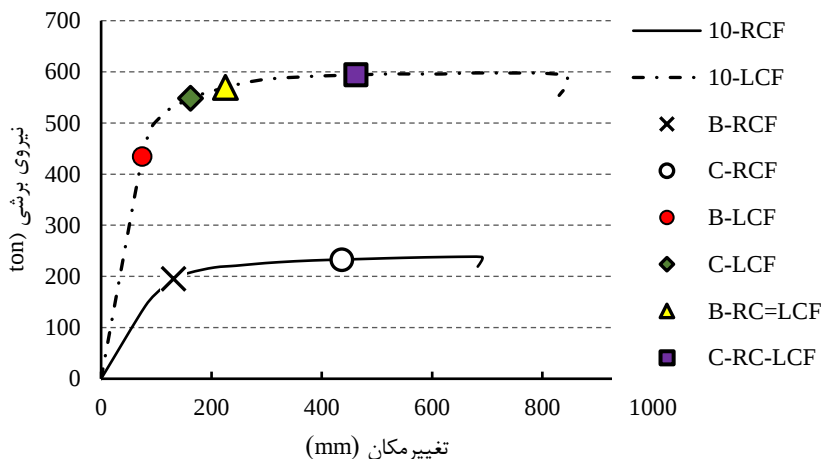


شکل ۷. سطوح عملکرد سازه با سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی (LCF) [۱۱]

از آنجایی که سطح زیر منحنی پوش آور بیانگر مقدار انرژی مستهلک شده توسط سازه است؛ بنابراین هرچه سطح زیر این منحنی، بزرگ تر باشد؛ سازه، توانایی بیشتری در جذب و استهلاک انرژی خواهد داشت. هنگامی که سازه تحت تأثیر نیروهای بزرگ ناشی از زلزله قرار می گیرد، اگر دارای رفتار الاستیک باشد؛ قادر است انرژی ورودی ناشی از زلزله را مستهلک کند. با توجه به این که سازه های ساختمان، میرایی ذاتی دارند؛ این امر، هنگام زلزله به کمک سازه می آید و مقداری از انرژی ورودی ناشی از زمین لرزه را مستهلک می کند؛ از این رو هرچه سازه، شکل پذیر باشد؛ توانایی بیشتری در جذب و استهلاک انرژی را دارد. مقایسه نتایج نمودار نیرو- تغییر مکان برای دو سازه بتن آرمه پنج و ده طبقه (سازه بدون مقاومت سازی) و سازه بتن آرمه پنج و ده طبقه مقاومت سازی شده با سیستم LCF در جهت محور X به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان می دهد. منظور از C-LCF اولین مفصل پلاستیک در تیر قاب LC و C-LCF اولین مفصل پلاستیک در ستون قاب LC می باشد.



شکل ۸. منحنی نیرو- تغییر مکان و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک برای سازه پنج طبقه بتنی تقویت شده با سیستم LCF

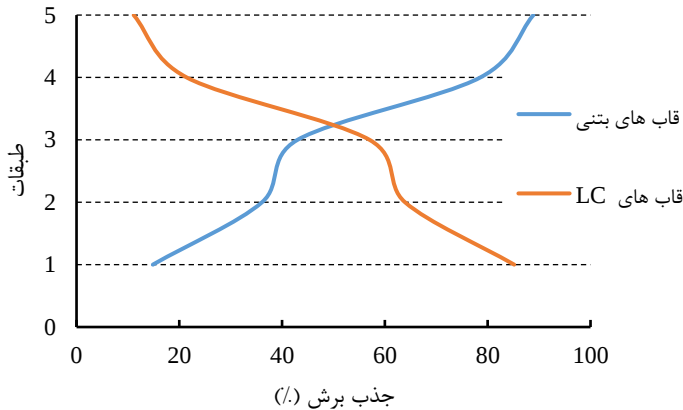


شکل ۹. منحنی نیرو- تغییر مکان و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک برای سازه ده طبقه بتنی تقویت شده با سیستم LCF

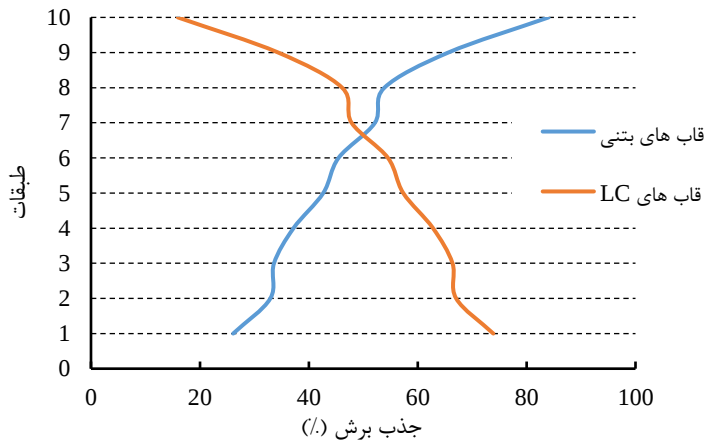
نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در سیستم LCF باید بدین صورت باشد که مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرهای پیوند و ستون‌های قاب LC و سپس در تیرها و ستون‌های سازه بتن‌آرمه (RC) تشکیل شوند. در نتیجه سازه بتن-آرمه در حالت الاستیک باقی می‌ماند و موجب خواهد شد که در اثر زلزله‌های شدید به سازه بتن‌آرمه که وظیفه باربری ثقلی را بر عهده دارد آسیب وارد نشود. همان طوری که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، در هر دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه تقویت شده با سیستم LCF، مفاصل پلاستیک ابتدا در قاب LC و سپس در سازه بتن‌آرمه (RC) تشکیل شده‌اند. مقدار ظرفیت باربری دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه مقاوم‌سازی با سیستم LCF به‌طور میانگین در حدود ۳/۱ برابر نسبت به سازه بتن‌آرمه بدون مقاوم‌سازی افزایش می‌دهد؛ به‌طوری که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

درصد جذب برش و تغییر مکان نسبی طبقات

با استفاده از بررسی درصد جذب برش و تغییر مکان نسبی طبقات می‌توان رفتار اندرکنش سازه بتن‌آرمه و سیستم LCF را برای تقویت سازه بتنی بررسی کرد. منظور از درصد برش جذب شده، نسبت مقدار برشی که توسط ستون‌های قاب یا مهاربند در هر طبقه تحمل می‌شود، به کل برش وارد شده در هر طبقه می‌باشد. درصد جذب برش و اندرکنش سازه بتن‌آرمه و قاب‌های LC برای دو سازه بتن‌آرمه پنج و ده طبقه تقویت شده با سیستم LCF در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



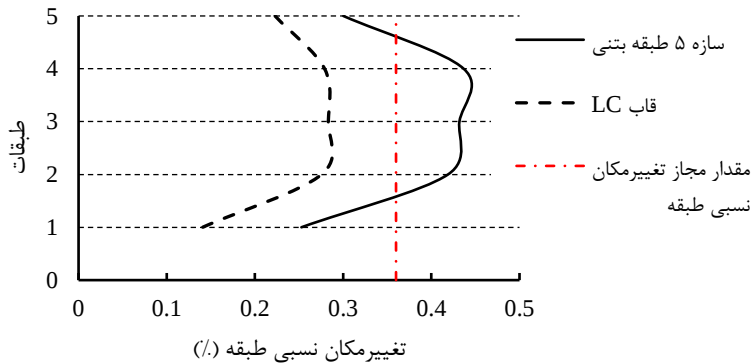
شکل ۱۰. اندرکنش قاب‌های ساز بتنی ۵ طبقه و قاب‌های LC



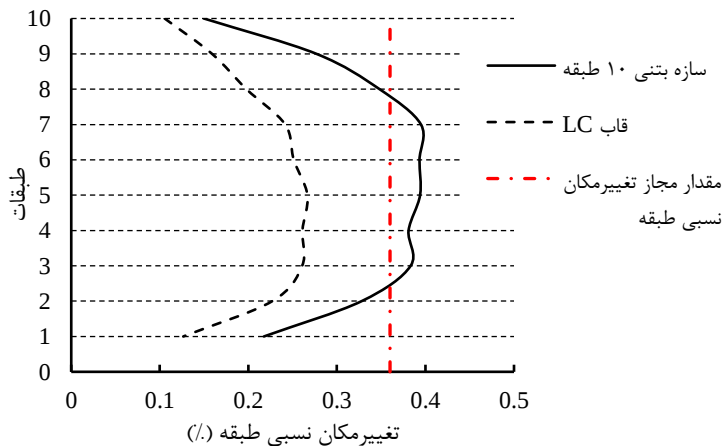
شکل ۱۱. اندرکنش قاب‌های ساز بتنی ۱۰ طبقه و قاب‌های LC

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود حداکثر مقدار برش برای قاب‌های LC در طبقات پایین برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۸۰ درصد و برای سازه بتن‌آرمه در طبقات بالاتر برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۸۷ درصد از نیروی زلزله را جذب می‌کنند. حداقل مقدار برش در قاب‌های LC در طبقات بالا برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۱۳ درصد و برای سیستم سازه بتن‌آرمه (سازه اصلی) در طبقات پایین برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۲۱ درصد از نیروی زلزله را جذب می‌کنند. این نشان می‌دهد که رفتار سازه اصلی (قاب بتن‌آرمه) به‌صورت برشی و قاب LC به صورت تغییر شکل خمشی رفتار می‌کند. جذب نیرو توسط قاب بتن‌آرمه برای سازه ده طبقه بتنی در طبقات دوم تا هفتم، بین ۳۰ تا ۵۲ درصد متغیر می‌باشد. از آنجا که به علت اندرکنش قاب بتن‌آرمه و قاب LC، رفتار قاب LC به‌صورت رفتاری خمشی است که در بالا، سازه بتنی به قاب LC کمک می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌شود جذب

نیروی برشی توسط قاب LC در بالا برای سازه بتنی ده طبقه کمتر از ۱۶ درصد می‌باشد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقایسه مقدار درصد تغییر مکان نسبی طبقات برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه تقویت‌شده با سیستم LCF را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تغییر مکان نسبی طبقات برای سازه بتنی پنج طبقه تقویت‌شده با سیستم LCF



شکل ۱۳. تغییر مکان نسبی طبقات برای سازه بتنی ده طبقه تقویت‌شده با سیستم LCF

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود با استفاده از سیستم LCF برای تقویت دو سازه بتنی پنج و ده طبقه مقدار درصد تغییر مکان نسبی طبقات نسبت به سازه اولیه (بدون مقاوم‌سازی) به ترتیب در حدود ۳۵ و ۳۶ درصد کاهش داده شده است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت اگر در سازه بتن‌آرمه موجود تغییر مکان جانبی از حد مجاز تجاوز کند، با استفاده از روش مقاوم‌سازی با سیستم LCF می‌توان مقدار تغییر مکان جانبی طبقات را در حدود ۳۵ درصد کاهش داد تا ساختمان ضمن مقاومت و پایداری در زلزله‌های شدید، پس از زلزله‌های متوسط با کمترین هزینه و زمان بازسازی به خدمت‌رسانی باز می‌گردد.

نتیجه گیری

- در این تحقیق، به بررسی رفتار سیستم قاب ستون پیوند شده فولادی با هدف تقویت قاب‌های بتن‌آرمه در دو سازه بتن‌آرمه ۵ و ۱۰ طبقه پرداخته شده است تا بتوان میزان کارایی سیستم LCF برای تقویت و مقاوم‌سازی قاب بتن‌آرمه را تعیین کرد. در ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی، موارد زیر مشخص گردید:
- نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه بتنی تقویت‌شده با سیستم LCF به صورتی می‌باشد که مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرها و ستون‌های قاب‌های LC و سپس در تیر و ستون سازه اصلی (RC) تشکیل شده‌اند و در این امر موجب خواهد شد که در زلزله‌های متوسط قاب خمشی (RC) در حالت الاستیک باقی بماند.
 - سازه‌های بتن‌آرمه پنج و ده طبقه تقویت‌شده با استفاده از روش LCF، میزان ظرفیت باربری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی را نسبت به نمونه بدون تقویت برای دو سازه پنج و ده طبقه بتن‌آرمه به‌طور میانگین در حدود ۳/۱ برابر افزایش می‌دهد.
 - حداکثر مقدار برش برای قاب‌های LC در طبقات پایین برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۸۰ درصد و حداقل مقدار برش آن در طبقات بالا برای دو سازه بتنی پنج و ده طبقه به‌طور میانگین در حدود ۱۳ درصد از نیروی زلزله را جذب می‌کنند. این بیانگر آن است که رفتار سازه اصلی (قاب بتن‌آرمه) به‌صورت تغییر شکل برشی و قاب‌های LC که برای تقویت سازه بتنی می‌باشد به صورت تغییر شکل خمشی رفتار می‌کند.
 - با استفاده از سیستم LCF برای تقویت دو سازه بتنی پنج و ده طبقه مقدار درصد تغییر مکان نسبی طبقات نسبت به سازه اولیه (بدون مقاوم‌سازی) به‌ترتیب در حدود ۳۵ و ۳۶ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین در صورتی که تغییر مکان جانبی سازه بتن‌آرمه موجود، از حد مجاز تجاوز کند؛ با استفاده از روش مقاوم‌سازی با سیستم LCF می‌توان مقدار تغییر مکان جانبی طبقات را در حدود ۳۵ درصد کاهش داد تا ساختمان، ضمن مقاومت و پایداری در زلزله‌های شدید، پس از زلزله‌های متوسط، با کمترین هزینه و زمان بازسازی، به خدمت‌رسانی بازگردد.

تشکر و قدردانی

این مقاله، نتایج یک طرح تحقیقاتی است که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه فنی و حرفه‌ای تأمین گردیده است. بدین وسیله از کلیه مسئولان ذی‌ربط، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- [1] Applied technology council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. <http://tanbakoochi.com/File/www.tanbakoochi.com-ATC40.pdf>
- [2] Civil, A. S. O. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
- [3] Thermou, G. E., & Hajirasouliha, I. (2018). Compressive behaviour of concrete columns confined with steel-reinforced grout jackets. *Composites Part B: Engineering*, 138, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.041>
- [4] Anagnostou, E., Rousakis, T. C., & Karabinis, A. I. (2019). Seismic retrofitting of damaged RC columns with lap-spliced bars using FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, 166, 598-612. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.018>

- [5] Binici, B., & Mosalam, K. M. (2007). Analysis of reinforced concrete columns retrofitted with fiber reinforced polymer lamina. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.01.006>
- [6] Di Luccio, G., Michel, L., Ferrier, E., & Martinelli, E. (2017). Seismic retrofitting of RC walls externally strengthened by flax-FRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 127, 133-149. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.017>
- [7] Rad, M., Pampanin, S., & Rodgers, G. (2019, April 4-6). *Displacement-based retrofit of existing reinforced concrete frames using alternative steel brace systems*. 11th Pacific Conference on Earthquake Engineering., Auckland, New Zealand. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/16990>
- [8] Bypour, M., Gholhaki, M., Kioumarsi, M., & Kioumarsi, B. (2019). Nonlinear analysis to investigate effect of connection type on behavior of steel plate shear wall in RC frame. *Engineering Structures*, 179, 611-624. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.010>
- [9] Choi, I.-R., & Park, H.-G. (2011). Cyclic Loading Test for Reinforced Concrete Frame with Thin Steel Infill Plate. *Journal of Structural Engineering*, 137(6), 654-664. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000317](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000317)
- [10] Dong, Y.-R., Xu, Z.-D., Li, Q.-Q., Xu, Y.-S., & Chen, Z.-H. (2019). Seismic behavior and damage evolution for retrofitted RC frames using haunch viscoelastic damping braces. *Engineering Structures*, 199(8), 109583. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109583>
- [11] Ezoddin, A., Kheyroddin, A., & Gholhaki, m. (2021). Determination of Response Modification Factor of the RC frame retrofitted with the linked column frame system. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1). <https://doi.org/10.22065/jsce.2019.183337.1848>
- [12] Dusicka, P., & Lewis, G. (2010, July 25-29). *Investigation of replaceable sacrificial steel links*. Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Ontario, Canada. <https://www.caee.ca/10CCEE/pdf/2010EQConf-001659.pdf>
- [13] Nader, M., & Maroney, B. (2013). Seismic design of the self anchored suspension bridge: San Francisco Oakland Bay Bridge. In *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b15963-55/seismic-design-self-anchored-suspension-bridge-san-francisco-oakland-bay-bridge-nader-maroney>
- [14] Roeder, C. W., & Popov, E. P. (1977). *Inelastic behavior of eccentrically braced steel frames under cyclic loadings*. nehrp. <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/P B275526.pdf>
- [15] Mamoru, I., Takashi, Kato., & Akira, Wada. (2000). Buckling-restrained braces as hysteretic damper. In *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas* <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003211198-6/buckling-restrained-braces-hysteretic-dampers-mamoru-iwata-takashi-kato-akira-wada>
- [16] Ezoddin, A., kheyroddin, A., & Gholhaki, M. (2020). Investigation of the Effects of Link Beam Length on the RC Frame Retrofitted with the Linked Column Frame System. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(1), 137-159. <https://doi.org/10.22059/cej.2019.280596.1580>
- [17] Center, B. a. H. R. (2003). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings* (2800). <https://www.gisoom.com/book/1273158/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-Iranian-code-of-practice-for-seismic-resistant-design-of-buildings-to-eliminate-and-settles-down-any-kind-of-discrepancies/>

- [18] Computers and Structures, I. (2021). *Software Products*. Computers and Structures, Inc. <https://www.csiamerica.com/products>
- [19] Bloem, D. L., & Delevante, O. L. (1970). Building Code Requirements for Reinforced Concrete. *ACI Journal*, 1, 77. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/15231>
- [20] Malley, J. O., Carter, C. J., & Saunders, C. M. (2000). Seismic Design Guidelines and Provisions for Steel-Framed Buildings: FEMA 267/267A and 1997 AISC Seismic Provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1), 179-203. <https://doi.org/10.1193/1.1586090>
- [21] Construction, A. I. o. S. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-16). <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/seismic-provisions-for-structural-steel-buildings-ansi-aisc-341-16.pdf>



Prediction of Compressive Strength of Concrete with Rubber Fibers Using Artificial Neural Networks

Seyed Reza Salim Bahrami^{1*}

¹PhD, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam Mohammad Baqer, Mazandaran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.22.2020

Revised: 02.08.2021

Accepted: 03.07.2021

Keyword:

Artificial Neural Networks
Recycling
Environment
Concrete
Waste Rubber Particles

*Corresponding Author:

Seyed Reza Salim Bahrami

Email:

salimbahrami@semnan.ac.ir

ABSTRACT

A non-recyclable material that enters the environment is used car tires. Research shows that used tires are made of materials that, due to their non-decomposition under normal conditions, cause pollution and damage to the environment. According to research, one method of removing these materials is to use rubber waste in concrete. Therefore, in this study, aggregate composites were replaced by waste rubber particles the compressive strength of concrete was estimated by artificial neural network using the input parameters water to cement ratio, superplasticizer additive and granulation weight composition. The results of this study were compared with other related research studies and confirmed the superiority and high accuracy of the artificial neural network obtained in this study. The a-20 engineering index of the neural network was determined to be one and the error of 99% of the data was less than 15%, indicating the appropriate approximation of the compressive strength of concrete containing waste rubber particles by the artificial neural network. In addition, the results of the sensitivity analysis using the Millen method indicated a 40% effect of the weight of the superplasticizer additive as a sensitive parameter in this type of concrete.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تخمین مقاومت فشاری بتن دارای الیاف لاستیک ضایعاتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

سید رضا سلیم بهرامی^{*۱}

۱- دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده امام محمد باقر (ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان مازندران، ایران.

چکیده

یکی از مواردی که به‌عنوان مواد غیرقابل بازیافت وارد محیط‌زیست می‌شود، لاستیک‌های مستعمل خودرو است. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد لاستیک‌های مستعمل از موادی تشکیل‌شده‌اند که به دلیل تجزیه نشدن آن‌ها در شرایط معمول، سبب ایجاد آلودگی و آسیب به محیط‌زیست شده است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، یکی از راه‌های حذف این مواد، استفاده از ضایعات لاستیکی در بتن است. لذا در این تحقیق، با جایگزینی ذرات لاستیکی ضایعاتی به‌جای سنگ‌دانه‌ها و تخمین مقاومت فشاری بتن توسط شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از پارامترهای ورودی (نسبت آب به سیمان، ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده و ترکیب وزنی دانه‌بندی) پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش‌های مرتبط محققان مورد مقایسه قرار گرفت که حاکی از برتری و دقت بالای شبکه عصبی مصنوعی حاصله در این پژوهش است. شاخص مهندسی $a-20$ برای شبکه عصبی برابر یک به‌دست‌آمده و خطای ۹۹ درصد از داده‌ها، کمتر از ۱۵ درصد به‌دست‌آمده که نشان از تقریب مناسب مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی توسط شبکه عصبی مصنوعی است. همچنین نتایج آنالیز حساسیت با استفاده از روش میلن حاکی از تأثیر ۴۰ درصدی مقدار وزنی ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده به‌عنوان پارامتر حساس در این نوع از بتن است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷

کلید واژگان:

شبکه عصبی مصنوعی

بازیافت

محیط‌زیست

بتن

ذرات لاستیکی ضایعاتی

*نویسنده مسئول: سید رضا سلیم بهرامی

پست الکترونیکی:

salimbahrami@semnan.ac.ir



مقدمه

در بافت‌های بدن، در هر سال فقط در ایالات متحده ۲۵۰ میلیون تایر فرسوده به وزن بیش از ۳ میلیون تن جمع‌آوری می‌شود. همچنین یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی موجود در اطراف کلان‌شهرها در جهان نحوه بازیافت و حذف مواد لاستیکی زائد از چرخه زیست‌محیطی می‌باشد. یکی از راه‌حل‌های که برای حل این مشکل پیشنهاد شده است استفاده از ذرات لاستیک تایر به‌عنوان یک ماده افزودنی در مصالح بر پایه سیمان است [۱]. اگرچه بتن یک ماده محبوب و پرستفاده در مصالح ساختمانی است اما دارای نقطه‌ضعف‌هایی نیز می‌باشد. همانند مقاومت کششی پایین، شکل‌پذیری پایین، جذب انرژی کم، انقباض و جمع‌شدگی بتن و در پی آن ترک‌خوردگی ناشی از آن و در نهایت ترک‌های ناشی از عمل‌آوری نامناسب و سخت‌شدگی بتن است. یافته‌های جدید نشان می‌دهد که استفاده از ذرات تایرهای فرسوده به میزان زیادی می‌تواند این نقاط ضعف بتن را برطرف کند. هرچند استفاده از لاستیک در آسفالت بیشتر از یک دهه است که صورت می‌گیرد اما کاربرد آن در بتن به‌تازگی صورت گرفته است و تحقیقات زیادی بر امکان‌سنجی آن انجام‌شده است [۲-۶].

شبکه‌های عصبی مصنوعی که برآمده از مدل مغز انسان هستند، امروزه توانسته با برقراری رابطه میان متغیرهای ورودی با صرف کمترین زمان و هزینه، مورد اقبال جامعه مهندسی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن برآید. روش‌های مدل‌سازی سنتی به‌منظور تخمین و پیش‌بینی خواص بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی بر پایه‌ی محدودی از اعداد و پارامترها بودند که به‌وسیله رگرسیون‌گیری خطی یا چند متغیره به دست می‌آمد. اگر داده‌های جدید تا اندازه‌ای با داده‌های اولیه متفاوت باشند، نه‌تنها متغیرها، بلکه لازم است شکل روابط نیز تغییر کند [۷]. اما در مقایسه شبکه عصبی مصنوعی لازم نیست که رابطه با شکل و فرم خاص باشد. در عوض لازم است داده‌های ورودی و خروجی کافی در اختیار باشد. توانایی و کارایی شبکه‌های عصبی با رگرسیون‌های خطی و نمایی و حتی چندمتغیره مقایسه شده است [۸]. این مقایسه‌ها ثابت کرد که شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک رهیافت هوشمند در مقابل روش‌های رگرسیونی چندمتغیره است. این در حالی است که روش‌های رگرسیونی کارایی خوبی داشته و در بسیاری از تحقیقات استفاده‌شده یا در حال استفاده است. یکی دیگر از امتیازات رهیافت شبکه‌های عصبی مصنوعی، تخمین کارایی و ارتباط متغیرهای ورودی مختلف با یکدیگر است [۹؛ ۱۰].

نتایج تحقیقات توپچو^۱ و همکاران [۱۱] برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن لاستیکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که نتایج آموزش و آزمون داده‌های ورودی مشابه نتایج آزمایشگاهی است. همچنین آنان به این نتیجه دست یافتند که شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های منطق فازی می‌توانند خواص مکانیکی بتن با الیاف ضایعات لاستیکی را بدون هیچ‌گونه آزمایشی به دست آورد.

گزاوغلو و همکاران [۱۲] برای پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک به‌دست‌آمده از ۷۰ نمونه آزمایشگاهی را پیشنهاد کردند. نتایج آنان حاکی از دقت بالای پیش‌بینی توسط دو الگوریتم (ANN و GEP) به‌کار رفته بوده است. هرچند مدل پیشنهادی الگوریتم ژنتیک کاربرپسندتر نسبت به شبکه عصبی است اما کارایی و دقت شبکه عصبی بیشتر از بقیه سیستم‌های پیش‌بینی منتج شد.

گوپتا^۲ و همکاران [۱۳] به پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیکی در معرض دمای بالا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج آنان حاکی از آن بود که پارامتر دما بیشترین تأثیر را بر روی تمام

¹ Topçu et al.² Gupta et al.

پارامترهای خروجی به دنبال دارد. همچنین ال خوجا^۱ [۱۴] و همکاران و نایارکو^۲ و همکاران [۱۵] با مدل سازی تأثیر لاستیک ضایعاتی بر مقاومت فشاری بتن توسط شبکه های عصبی مصنوعی به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک ضایعاتی عملکرد مناسبی دارد. سهرابی و همکاران [۱۶] به پیش بینی مقاومت فشاری بتن حاوی خرده لاستیک با استفاده از مدل های فازی عصبی و شبکه های عصبی مصنوعی پرداختند که نتایج آنان حاکی از آن بود که سیستم های عصبی و فازی توانسته اند به خوبی مدل مناسبی را به عنوان جایگزین آزمایش های وقت گیر تکنولوژی بتن ارائه دهد. همچنین دقت شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی به نسبت سیستم استنتاج تطبیقی فازی مبتنی بر شبکه عصبی اندکی بهتر می باشد لیکن سرعت آموزش پذیری بسیار کندتر از سیستم فازی- عصبی است.

در پژوهش گیوچن لی و همکاران [۱۷] که با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی بدنبال به دست آوردن مقاومت فشاری بتن دارای الیاف لاستیکی بوده است؛ نتایج آن حاکی از دستیابی به ضریب رگرسیون ۰/۹۶ است که در مقایسه با نتایج پژوهشگران دیگر ضریب رگرسیون بالایی به نظر نمی رسد. جلال و همکاران [۱۸] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، رابطه ای برای تخمین مقاومت فشاری بتن دارای الیاف لاستیکی پیشنهاد دادند. نتایج آنان نشان داد که با وجود رفتار پیچیده این نوع از بتن، رگرسیون به دست آمده از رابطه پیشنهادی ۰/۹۸ بوده که میزان خطای حاصل از این رابطه کم است.

از سوی دیگر، برخی از محققان در مورد تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی خصوصیات مکانیکی مانند مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی تحقیق کرده اند. نتایج نشان می دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان (w/c) مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. اوپگون اوغلو^۳ و همکاران [۱۹] با بررسی تأثیر جایگزینی جزئی سنگ دانه های درشت به همراه لاستیک ضایعاتی در بتن به این نتیجه رسیدند که برای یک مقدار لاستیک ضایعاتی معین و ثابت، با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. لازم به ذکر است که بسیاری از محققان در بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی به منظور کاهش نسبت آب به سیمان از مواد افزودنی فوق روان کننده استفاده می نمایند. از طرفی افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش تخلخل کل شده و خصوصیات مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیکی وابسته به میزان تخلخل و توزیع منافذ آن می گردد [۲۰].

توماس^۴ و همکاران [۲۱] در مطالعه خود مقادیر نسبت آب به سیمان را ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ و مقدار لاستیک ضایعاتی استفاده شده در بتن را از ۰ تا ۲۰٪ با دوره تناوب ۲/۵٪ در نظر گرفتند و تغییرات خواص موجود در مخلوط بتنی را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد لاستیک ضایعاتی خرد شده و نسبت آب به سیمان مقدار تخلخل بتن افزایش می یابد. از طرف دیگر سیستم منافذ موجود در مواد مبتنی بر سیمان به صورت ژله ای است که به طور مستقیم با انقباض و خزش در ارتباط است و از طریق تخلخل آن بر استحکام بتن اثر نمی گذارد.

شبکه عصبی مصنوعی، روشی برای پیش بینی حل مسئله تحت آزمایش های انجام شده قبلی است که با آموزش به آن می توان با صرف زمان و هزینه بسیار کم به دقت قابل قبولی از نتایج دست یافت. شبکه های عصبی مصنوعی به کمک بهره گیری از قابلیت های مغز انسان و با استفاده از تجربیات قبلی می توانند در موقعیت های جدید، پیش بینی انجام دهند. امروزه یکی از مهم ترین کارکردهای این شاخه از محاسبات نرم، شناسایی الگوی بین داده ها است. در سال های اخیر استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی در زمینه مهندسی سازه و زلزله رشد قابل توجهی داشته است.

¹ El-Khoja et al.

² Hadzima-Nyarko et al.

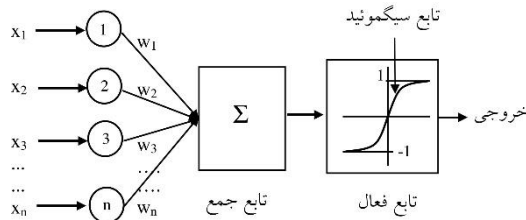
³ Uygunoglu et al.

⁴ Thomas et al.

لذا در این پژوهش به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده و تلاش شده است که با پالایش داده‌های ورودی و انتخاب تعداد بیشتری داده به نسبت کارهای گذشته، مدلی بهینه‌تر و دارای دقت بالاتر که در کمترین زمان، نتیجه‌ای مطلوب با کمترین خطا به نسبت پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته حاصل گردد. همچنین شبکه حاصل از این پژوهش می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های زمان‌بر و پرهزینه آزمایشگاهی باشد و به کمک شبکه عصبی و با یافتن پارامتر تأثیرگذار می‌توان به طرح اختلاط بهینه دست یافت.

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. در حالت 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 به وسیله ورودی‌ها و وزن ارتباطی بین آن‌ها و لایه‌های پنهان تعیین می‌شود. لایه خروجی نیز عملکرد آن بسته به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباطی بین واحد پنهان و خروجی است. اختلاف بین خروجی شبکه عصبی و خروجی مطلوب، تابع خطا تعریف می‌شود. سپس خطا برگشت می‌نماید و وزن‌ها و بایاس‌ها اصلاح می‌گردد 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 به صورت غیرمستقیم انجام شده تا بیش برآزش^۱ شبکه عصبی را نشان دهد و نقطه توقف فرایند یادگیری زمانی است که خطای صحت‌سنجی شروع به افزایش یابد. آخرین گام مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی، گام آزمایش است که صرفاً برای تعیین میزان کارایی شبکه آموزش‌دیده انجام می‌شود [۲۲]. شکل ۱ نمای شماتیکی از یک نرون محاسباتی و اجزای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمای شماتیکی از یک نرون محاسباتی شبکه عصبی و اجزای آن [۲۳]

مطابق شکل ۱، هر کدام از گره‌ها در هر لایه به صورت کامل یا جزئی با گره‌های موجود در لایه‌های دیگر به کمک مقادیر وزنی اتصال می‌یابد. ورودی هر گره که از لایه قبلی به لایه فعلی وارد شده است (X_i)، در یک مقدار وزنی تعدیل پذیر (W_{ij}) ضرب شده و در هر گره مقادیر حاصل ضرب $X_i \times W_{ij}$ با هم جمع می‌شوند. در نهایت، حاصل جمع فوق با یک مقدار آستانه θ_j جمع می‌شود. ورودی مرکب حاصل از این ترکیب (I_j) در یک تابع انتقال غیر خطی (تابع سیگموئیدی) قرار می‌گیرد و خروجی گره (Y_i) حاصل می‌شود. خروجی حاصل از یک گره، ورودی مورد نیاز برای گره‌های دیگر را فراهم می‌کند. این فرایند در رابطه ۱ به‌طور خلاصه نشان داده شده است.

¹ Overfitting

$$I_j = \sum (w_{ij} \times x_i) + \theta_j \quad (۱)$$

$$Y_i = f(I_j)$$

مدل سازی

بانک اطلاعاتی گسترده و قابل اعتماد پیش شرط لازم برای عملکرد موفق هر شبکه عصبی مصنوعی است. لذا برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آزمایشگاهی در حوزه بتن لاستیکی استفاده شده است. در این پژوهش، از بانک اطلاعاتی ۱۰۰ طرح اختلاط گزارش شده توسط مراجع معتبر [۱۲؛ ۲۴-۲۷] مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان، ماده افزودنی فوق روان کننده و دانه بندی بر روی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی مدلی در شبکه عصبی مصنوعی با ۱۰۰ طرح اختلاط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. ترکیب طرح اختلاط استفاده شده شامل سیمان، آب، فوق روان کننده، درشت دانه (شن)، ریزدانه (ماسه)، خرده های لاستیک (۴-۰ میلی متر) و تراشه های تایر (۱۰-۴ میلی متر) است. لذا نسبت آب به سیمان (W/C)، وزن فوق روان کننده (SP) و وزن ترکیبات دانه بندی به عنوان پارامترهای ورودی به شبکه عصبی می باشد و خروجی آن مقاومت فشاری بتن است. در ادامه مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: بانک اطلاعاتی ۱۰۰ طرح اختلاط

ردیف	W/C	SP	CS	آب	ردیف	W/C	SP	CS	آب	ردیف	W/C	SP	CS	آب
۱	0.42	13.5	1743.02	81	35	0.4	13.5	1467.6	26.4	69	0.4	3.15	1595.6	37.9
2	0.44	13.5	1735.97	82.7	36	0.42	13.5	1461.7	29.6	70	0.4	3.6	1567.9	33.75
3	0.47	13.5	1728.92	84	37	0.44	13.5	1455.8	30.5	71	0.4	4.05	1540.3	31
4	0.6	5.25	1773.4	53.8	38	0.47	13.5	1449.8	31.8	72	0.4	4.5	1512.5	25
5	0.63	5.25	1767.9	56.8	39	0.6	5.25	1487.1	16.2	73	0.4	3.15	1625.1	42.2
6	0.67	5.25	1762.4	57.7	40	0.67	5.25	1477.9	20.1	74	0.4	3.6	1571.4	36.13
7	0.71	5.25	1756.9	60.3	41	0.71	5.25	1473.3	21.2	75	0.4	3.55	1518	32.43
8	0.4	13.5	1721.8	70.4	42	0.4	13.5	1185	10.5	76	0.4	4.5	1464.4	26.1
9	0.44	13.5	1707.9	75.4	43	0.42	13.5	1180.2	11.2	77	0.4	5.4	1357.2	17
10	0.47	13.5	1701	78.3	44	0.44	13.5	1175.4	11.6	78	0.47	3.25	1600	52.5
11	0.6	5.25	1744.8	47	45	0.47	13.5	1170.8	11.7	79	0.47	3.25	1600	52.1
12	0.63	5.25	1739.3	50.2	46	0.6	5.25	1200.8	7.1	80	0.47	3.25	1600	51.2
13	0.67	5.25	1734	52.5	47	0.67	5.25	1193.4	8.1	81	0.47	3.25	1600	50.8
14	0.71	5.25	1728.7	55.4	48	0.71	5.25	1189.7	8.4	82	0.47	3.25	1420	28.1
15	0.42	13.5	1686.8	67.8	49	0.5	13.5	1721.88	85.77	83	0.47	3.25	1420	27.7
16	0.44	13.5	1679.9	68.2	50	0.75	5.25	1751.5	59.7	84	0.47	3.25	1420	28.3
17	0.47	13.5	1673.1	68	51	0.5	13.5	1694.1	79.1	85	0.47	3.25	1420	28.6
18	0.6	5.25	1716.1	41.5	52	0.5	13.5	1666.3	69.4	86	0.47	3.25	1335	21.5

ردیف	W/C	SP	GS	f_c	ردیف	W/C	SP	GS	f_c	ردیف	W/C	SP	GS	f_c
19	0.63	5.25	1710.8	43.1	53	0.75	5.25	1694.9	51.3	87	0.47	3.25	1335	19.6
20	0.71	5.25	1700.2	49.3	54	0.5	13.5	1610.7	61.7	88	0.47	3.25	1335	19.1
21	0.4	13.5	1637	50.7	55	0.75	5.25	1638.3	41.2	89	0.5	1.52	1785	32
22	0.42	13.5	1630.5	55.3	56	0.5	13.5	1555.1	47	90	0.5	1.52	1788.4	33
23	0.44	13.5	1659.9	56.3	57	0.75	5.25	1581.8	34.2	91	0.5	1.52	1788.5	30
24	0.47	13.5	1617.3	55.6	58	0.5	13.5	1443.9	31.8	92	0.5	1.52	1790	25
25	0.6	5.25	1658.9	31.8	59	0.75	5.25	1468.7	23.1	93	0.5	1.52	1804	30
26	0.67	5.25	1648.6	37.6	60	0.75	5.25	1186	8.6	94	0.5	1.52	1813	27
27	0.71	5.25	1643.6	41.3	61	0.4	1.8	1678.6	53.5	95	0.5	1.52	1823	20
28	0.4	13.5	1580.6	40.3	62	0.4	2.25	1652.7	49.7	96	0.47	3.03	1839.9	63.7
29	0.42	13.5	1574.3	44.5	63	0.4	2.7	1626.8	44.5	97	0.47	3.29	1743.8	39.5
30	0.44	13.5	1567.7	45.1	64	0.4	3.15	1601	40.7	98	0.47	3.61	1695.7	26.3
31	0.47	13.5	1561.5	46.4	65	0.4	3.6	1575.1	35.3	99	0.47	3.99	1647.7	17.9
32	0.63	5.25	1596.6	28.8	66	0.4	4.05	1549.2	34.34	100	0.4	13.5	1750.02	75.8
33	0.67	5.25	1591.7	31.4	67	0.4	4.5	1523.3	27					
34	0.71	5.25	1586.8	32.8	68	0.4	2.7	1623.2	43.77					

جدول ۲. مشخصات آماری و حدود تغییرات پارامترهای ورودی و خروجی

انحراف از معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	پارامتر ورودی و خروجی
0.114	0.515	0.75	0.4	W/C
4.51	7.029	13.5	1.52	SP (kg/m ³)
171.93	1579.65	1839.9	1166	GS (kg/m ³)
19.587	40.27	85.77	7.1	f_c (MPa)

به‌منظور 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 آن جهت 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 ۰/۱ تا ۰/۹ استفاده می‌شود. تابع مقیاس‌سازی برای داده‌های ورودی و هدف مطابق رابطه ۲ است.

$$x_i = (0.9 - 0.1) \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + 0.1 \quad (2)$$

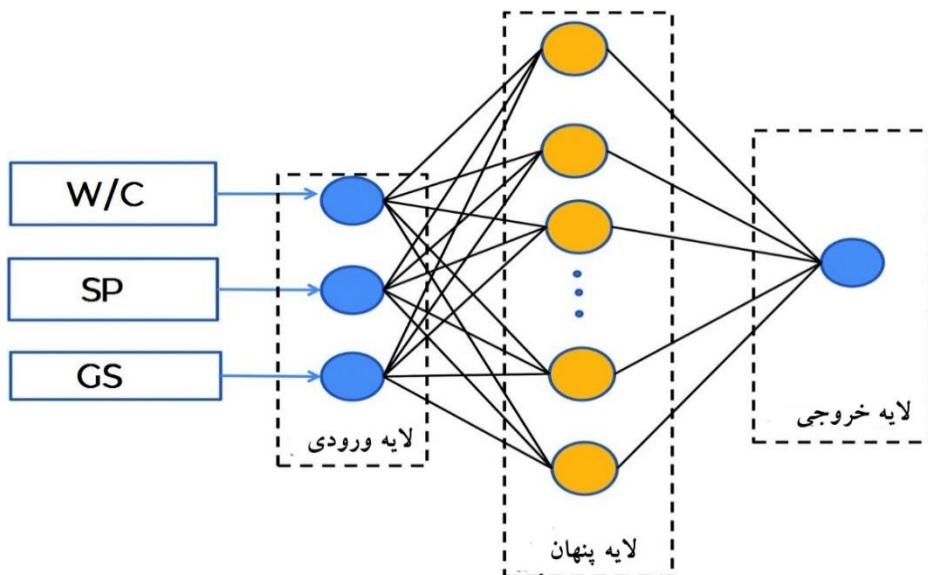
در رابطه ۲، x به‌عنوان داده ورودی و هدف است.

¹ Log-sigmoid

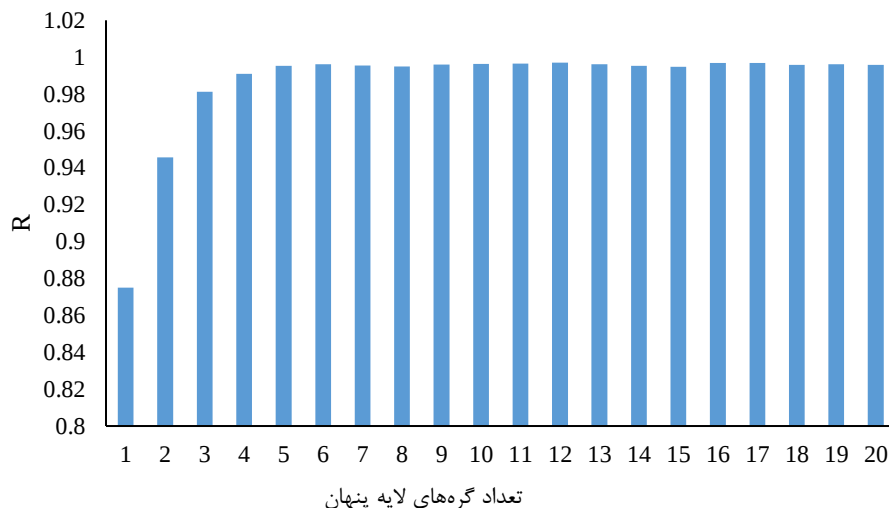
اجرای شبکه عصبی

برای اجرای طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی از شبکه انتشار برگشتی [۲۸] استفاده شده است. شبکه انتشار برگشتی به‌عنوان آسان‌ترین و مؤثرترین مدل در میان شبکه‌های چندلایه، داده‌های موردنیاز در شبکه را به دو گروه داده‌های آموزشی که حدود ۷۰ درصد از کل داده‌ها را جهت آموزش و وزن‌دهی و داده‌های آزمایشی که حدود ۳۰٪ از کل داده‌ها که در آموزش نقش نداشته و به‌عنوان راندمان شبکه آموزش‌دیده می‌باشند، تقسیم می‌نماید. این شبکه از یک‌لایه ورودی که تعداد ورودی‌های شبکه، بیانگر تعداد پارامترهای موجود در بخش ورودی شبکه است و از یک یا چندلایه پنهان که هرکدام دارای تعدادی نورون هستند که تعداد این نورون‌ها و نوع تابع رفتاری در رفتار شبکه موردنظر تأثیرگذار است، مطابق شکل ۲ تشکیل شده است. شکل ۲ نمونه شماتیک از لایه ورودی و پنهان شبکه عصبی مصنوعی را مشخص کرده است.

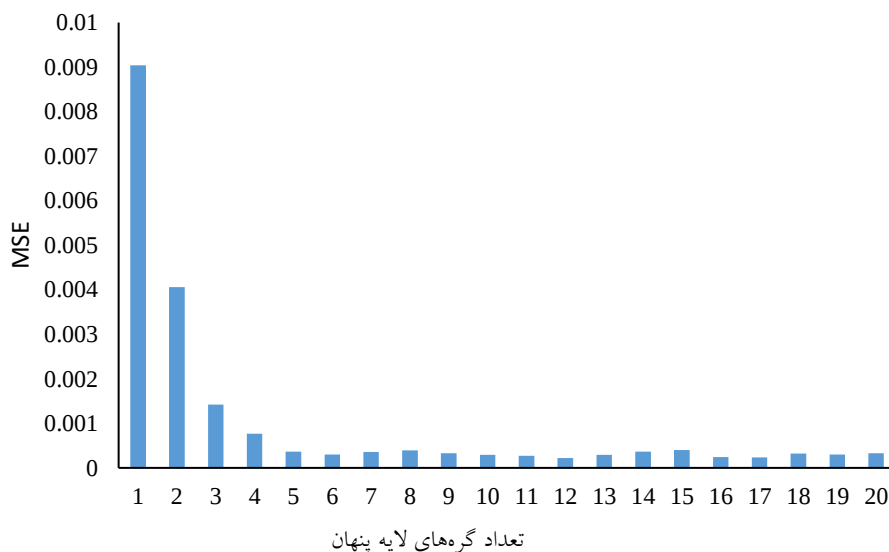
یک شبکه با تعداد گره پنهان، شبکه‌ای است که قادر باشد با حداقل مقدار خطای ممکن، همبستگی قابل‌قبولی بین مقادیر خروجی شبکه و مقادیر هدف برقرار نماید. در این پژوهش شبکه‌هایی با تعداد ۱ تا ۲۰ گره در لایه پنهان مورد آموزش قرار گرفتند. مقادیر ضرایب همبستگی و خطای این شبکه‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمونه شماتیک از ساختار شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۳: ضرایب همبستگی به ازای تعداد گره‌های لایه پنهان



شکل ۴: میانگین مربعات خطاها به ازای تعداد گره‌های پنهان

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ اغلب شبکه‌ها دارای ضرایب همبستگی بالایی بوده و از این میان شبکه‌ای با ۱۲ گره در لایه پنهان علاوه بر دارا بودن بیشترین مقدار ضرایب همبستگی (R)، کمترین خطا را نیز دارد؛ بنابراین شبکه با ۱۲ گره در لایه پنهان به‌عنوان شبکه بهینه جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن انتخاب می‌شود.

معیار ارزیابی مدل

پس از ایجاد مدل‌ها با استفاده از روش‌های مورد بحث، باید کارایی آن‌ها ارزیابی شود. در این پژوهش برای ارزیابی میزان عملکرد مدل‌ها، از معیارهای ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شده است. در مجموع هر چه RMSE به صفر و R به یک نزدیک‌تر باشد، بدان معناست که مدل‌ها بهینه‌تر طراحی شده و عملکرد بهتری دارند. مقدار R همواره بین ۰ و ۱ است. مقادیر این پارامترها به ترتیب از روابط ۳ الی ۵ محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (4)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

در روابط ۳ الی ۵، n تعداد داده‌های ورودی، x_i و y_i به ترتیب داده پیش‌بینی شده و داده هدف و $\bar{x}$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده است.

علاوه بر این، شاخص مهندسی جدید با عنوان a20-Inex، برای ارزیابی قابلیت اطمینان مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته مطابق رابطه ۶ پیشنهاد شده است:

$$a20 - index = \frac{m20}{M} \quad (6)$$

در رابطه ۶، M تعداد کل داده‌های ورودی و m20 تعداد داده‌هایی که نسبت داده خروجی آزمایشگاهی به داده خروجی پیش‌بینی شده بین ۰/۸ تا ۱/۲ باشد. برای داشتن یک مدل مناسب تخمینی بهتر است شاخص a20-index برابر با یک باشد. شاخص a20 از این جهت مورد توجه می‌باشد که نشان می‌دهد چه تعداد داده پیش‌بینی شده با انحراف ۲۰ درصد در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد.

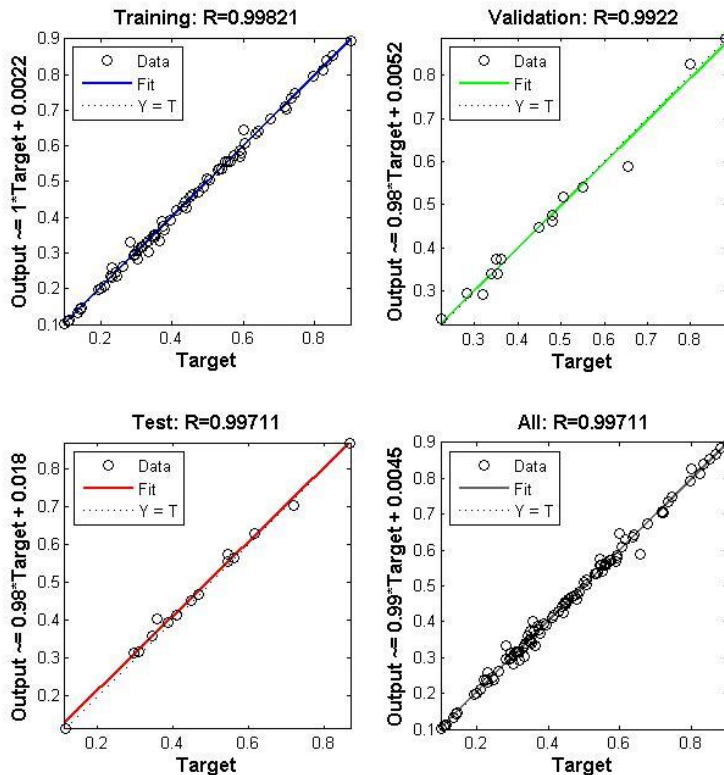
صحت‌سنجی روش شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی

پس از انتخاب هندسه شبکه عصبی مصنوعی، داده‌های مورد استفاده در قسمت صحت سنجی نباید در بخش آموزش شبکه مورد استفاده قرار گیرد. علت این کار از آن جهت 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.

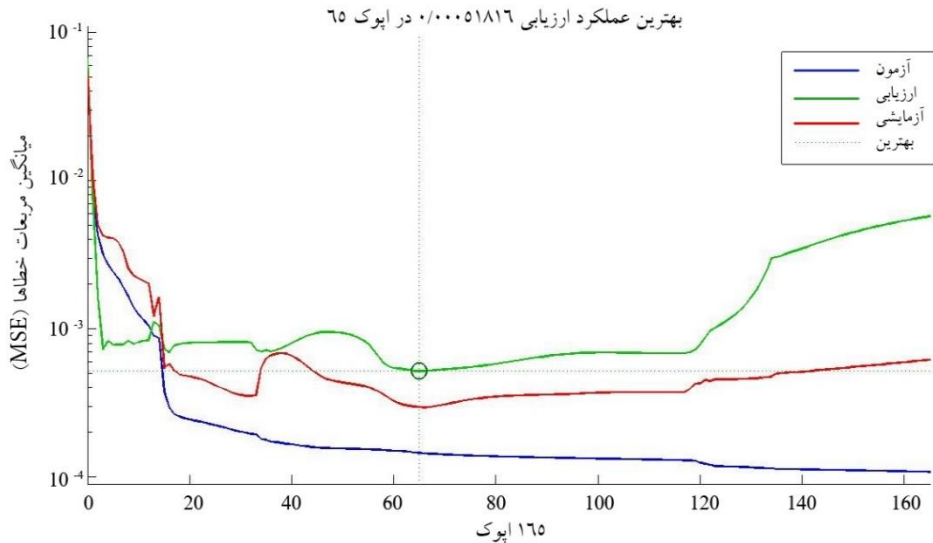
شکل ۵ نمودارهای عملکرد شبکه عصبی طراحی شده، شامل نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۶ نمودار میانگین مربعات خطا در فرایند آموزش شبکه جهت تخمین مقاومت فشاری بتن نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، ضریب رگرسیون برای گروه آموزشی برابر ۰/۹۹۸، برای گروه ارزیابی برابر ۰/۹۹۲ و برای گروه آزمایشی برابر ۰/۹۹۷ به دست آمده است. مقادیر حاصله در نمودار

شکل ۵، نزدیک به ۱ می‌باشد و حاکی از یادگیری و عملکرد بسیار خوب شبکه عصبی بوده و ضریب خطی همبستگی بین داده‌های مدل‌سازی و مقادیر پیش‌بینی‌شده بالا است.

از سوی دیگر، نمودار میزان دقت نتایج ناشی از مدل‌سازی شبکه عصبی در مقایسه با نتایج واقعی آزمایشگاهی مطابق شکل ۵ نشان می‌دهد که هر چه تمرکز این نقاط بر روی نیمساز ربع اول بیشتر باشد، نشانگر دقت بالاتر آن می‌باشد.

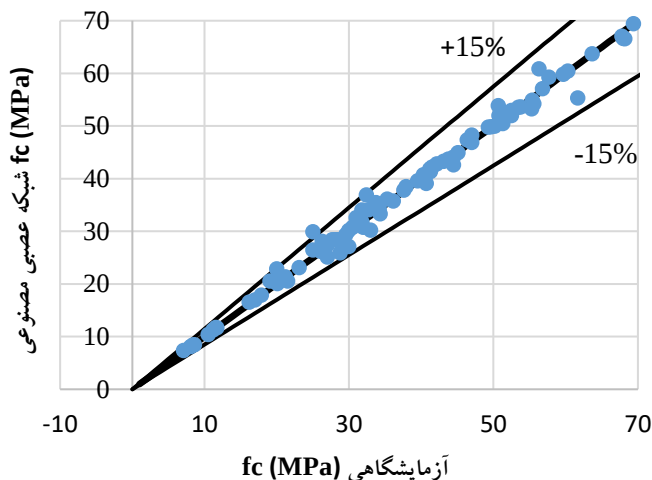


شکل ۵: نمودار رگرسیون (R) داده‌های آموزش، صحت سنجی و آزمون و تمامی داده‌ها



شکل ۶: عملکرد شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده

شکل ۶ عملکرد شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ مقدار رگرسیون شبکه انتخابی در مراحل مختلف مدل‌سازی پس از ۶۵ اپوک مورد بررسی قرار گرفته است و افت حداقل مربعات خطا را نشان می‌دهد. همچنین میانگین مربع خطاها (MSE) در اپوک‌های مختلف یادگیری که با توجه به معیار همگرایی در نظر گرفته شده، نشان می‌دهد که یادگیری در اپوک ۶۵ به خوبی انجام شده است. همچنین شکل ۷ به ترتیب نمودار مقایسه مقادیر مقاومت فشاری بتن حاصله از نمونه‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین حداکثر خطای به دست آمده از مقایسه داده‌های حاصل از شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های آزمایشگاهی در حدود ۲۰ درصد و حداقل صفر درصد می‌باشد و تقریب به ۹۹ درصد از داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی خطایی کمتر از ۱۵ درصد را دارا است.



شکل ۷: نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصله از شبکه عصبی مصنوعی

همچنین مقایسه نتایج رگرسیون (R) شبکه عصبی به‌دست‌آمده در این پژوهش با پژوهش عبدالله‌زاده و همکاران [۲۹]، گسولگو و همکاران [۱۲] و بچیر و همکاران [۳۰] مطابق جدول ۳ نشان داده‌شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج به‌دست‌آمده از شبکه عصبی به‌دست‌آمده در این پژوهش، به نسبت روش‌های رگرسیون خطی و چندگانه و الگوریتم ژنتیک، از برتری بالایی برخوردار است.

جدول ۳: مقایسه نتایج محاسبات نرم به‌دست‌آمده در این پژوهش با پژوهش محققان

رگرسیون (R)			
داده آزمایشی	داده آموزشی	سیستم پیش‌بینی	
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۸۲	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	نتایج این پژوهش
۰/۹۸۲۳	۰/۹۸۸۵	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	عبدالله‌زاده و همکاران [۲۹]
۰/۷۴	۰/۷۴	روش رگرسیون چندگانه	
۰/۹۵	۰/۹۵	روش رگرسیون خطی	گسولگو و همکاران [۱۲]
۰/۹۹۲	۰/۹۹۰	الگوریتم ژنتیک	
۰/۹۷۷۰	۰/۹۹۷۲	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	بچیر و همکاران [۳۰]
۰/۹۵۹۶	۰/۹۸۵۴	الگوریتم جنگل تصادفی	گیوچین لی [۱۷]
۰/۹۸۹	۰/۹۵۶	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	ال خوجا و همکاران [۱۴]
۰/۹۷۷۹	۰/۹۵۸۲	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	نایارکو و همکاران [۱۵]
۰/۹۶۸۸	۰/۹۸۶۰	شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	جلال و همکاران [۱۸]
۰/۹۸۲۲	۰/۹۸۲۲	رابطه‌ی پیشنهادی	

¹ Guichen Li

آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

تا پایان سال ۱۹۸۰ روش‌های مختلفی برای تفسیر شبکه‌های عصبی مصنوعی که دارای نورون‌های ورودی (N)، نورون‌های پنهان (L) و نورون‌های خروجی (M) می‌باشد، برای تحلیل تأثیر متغیرهای ورودی بر خروجی این شبکه ارائه شده‌اند. آنالیز بر اساس مقادیر وزن، منحصرأ بر مبنای مقادیر ذخیره‌شده در ماتریس استاتیک وزن‌ها برای تعیین تأثیر نسبی هر یک از داده‌های ورودی بر داده‌های خروجی شبکه می‌باشد. 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 U_{jk} (وزن اتصال بین نورون مخفی j و نورون خروجی k) برای هر یک از نورون‌های مخفی شبکه به‌صورت مجموع حاصل ضرب‌های محاسبه‌شده به دست می‌آید. یکی از کاربردی‌ترین معادلات، معادله میلن^۱ [۳۱] می‌باشد. معادله میلن روش اصلاح‌شده روش گارسون^۲ بوده که با استفاده از قدر مطلق وزن‌ها، نسبت صحیحی را به دست آورد. رابطه ۷ معادله میلن را نشان می‌دهد.

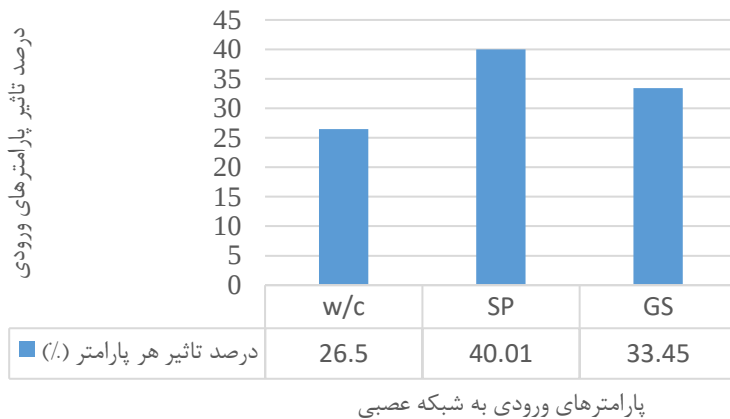
$$IIF = \frac{\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{ji}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj}}{\sum_{k=1}^{n_{inputs}} \left(\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj} \right)} \quad (7)$$

مطابق با رابطه ۷، درصد اهمیت پارامترهای ورودی^۳ به شبکه عصبی در شکل ۸ محاسبه و ارائه شده است. نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۸ حاکی از تأثیر بالای مقدار وزنی مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده و تأثیر کم مقدار نسبت آب به سیمان بر روی تابع هدف شبکه عصبی دارد. لذا برای داشتن یک طرح اختلاط کارا باید بر روی مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده حساسیت بیشتری به خرج داد.

¹ Milne

² Garson

³ Importance of Input Factors (IIF)



شکل ۸: درصد اهمیت پارامترهای ورودی به شبکه عصبی

نتیجه گیری

در این پژوهش، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده گردید. لذا به‌منظور آموزش شبکه عصبی، ۱۰۰ داده آزمایشگاهی در این زمینه جمع‌آوری شد. نسبت آب به سیمان، وزن ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده و وزن ترکیب دانه‌بندی به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار و ورودی انتخاب شدند. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی (f_c) به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و شبکه بهینه با ۱۲ لایه پنهان و ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۱ طراحی گردید. نتایج زیر به‌عنوان یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود:

۱- شاخص مهندسی a-20 برای شبکه عصبی برابر یک به دست آمد که نشان از تقریب مناسب مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی توسط شبکه عصبی مصنوعی است.

۲- ضریب همبستگی تقریباً برابری در خروجی‌های آزمایش مقاومت فشاری بتن حاصل از شبکه عصبی مصنوعی موجود است، بنابراین این روش می‌تواند قابلیت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی (f_c) را در حد مطلوب و مناسب داشته باشد.

۳- همچنین مقدار خطای شبکه بهینه‌شده در این مقاله با این تعداد نمونه بتن آزمایش‌شده حداکثر ۱۵ درصد است. با توجه به اطلاعات آماری موجود حاصل از نتایج تحقیق، ۸۴ مورد خطای کمتر از ۵ درصد، ۱۱ مورد خطای بین ۵ تا ۱۰ درصد و ۴ مورد خطای بین ۱۰ تا ۱۵ درصد داشتند که در مجموع ۹۹ درصد از نتایج پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی مصنوعی خطایی کمتر از ۱۵ درصد با نمونه‌های آزمایشگاهی داشته‌اند؛ بنابراین می‌توان بیان کرد، استفاده از شبکه بهینه معرفی‌شده در این پژوهش، راهگشای مناسبی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیکی ضایعاتی به شمار می‌رود.

۴- مقایسه ضریب رگرسیون (R) شبکه عصبی حاصله از این پژوهش با پژوهش‌های محققان حاکی از برتری دقت و عملکرد سیستم پیش‌بینی این مقاله در مقایسه با سایر روش‌های به‌دست‌آمده در پژوهش‌های محققان است.

به‌منظور مشخص کردن میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر مقاومت فشاری، آنالیز حساسیت با استفاده از روش میلن با وزن‌های تنظیم‌شده و حاصل از شبکه عصبی بهینه انجام شد که نتایج حاصل، حاکی از تأثیر بالای مقدار

وزنی مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده و تأثیر کم مقدار نسبت آب به سیمان بر روی تابع هدف شبکه عصبی دارد. لذا برای داشتن یک طرح اختلاط کارا باید بر روی مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده حساسیت بیشتری را اعمال کرد.

References

- [1] Sukontasukkul, P., & Chaikaew, C. (2006). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 20(7), 450-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.040>
- [2] Belabdelouahab, F., Trouzine, H., Hellal, H., Rahali, B., Kaci, S. O., & Medine, M. (2018). Comparative analysis of estimated young's modulus of rubberized mortar and concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 16(2), 243-253. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0119-x>
- [3] Elchalakani, M. (2015). High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, 1(1), 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2014.06.001>
- [4] Medine, M., Trouzine, H., & Aguiar, J. (2016). Fresh state properties of concrete incorporating scrap tire rubber. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), 611-617. <https://doi.org/10.3311/PPci.8727>
- [5] Medine, M., Trouzine, H., De Aguiar, J. B., & Asroun, A. (2018). Durability Properties of Five Years Aged Lightweight Concretes Containing Rubber Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(2), 386-397. <https://doi.org/10.3311/PPci.11363>
- [6] Youssf, O., ElGawady, M. A., Mills, J. E., & Ma, X. (2014). An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials*, 53, 522-532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>
- [7] Trtnik, G., Kavčič, F., & Turk, G. (2009). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, 49(1), 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>
- [8] Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2007). Optimizing feedforward artificial neural network architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(3), 365-382. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.06.005>
- [9] Shah, A. A., Ribakov, Y., & Zhang, C. (2013). Efficiency and sensitivity of linear and non-linear ultrasonics to identifying micro and macro-scale defects in concrete. *Materials & Design*, 50, 905-916. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.079>
- [10] Wei, S., Yunsheng, Z., & Jones, M. R. (2014). Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.066>
- [11] Topçu, İ. B., & Sarıdemir, M. (2008). Prediction of rubberized mortar properties using artificial neural network and fuzzy logic. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.042>
- [12] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Ozturan, T., & Özbay, E. (2010). Modeling the mechanical properties of rubberized concretes by neural network and genetic programming. *Materials and Structures*, 43(1), 31-45. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9468-0>
- [13] Gupta, T., Patel, K. A., Siddique, S., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2019). Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated

- temperature using ANN. *Measurement*, 147, 106870. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106870>
- [14] El-Khoja, A., Ashour, A., Abdalhmied, J., Dai, X., & Khan, A. (2018). Prediction of Rubberised Concrete Strength by Using Artificial Neural Networks. *training*, 12(11), 35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2021549>
- [15] Hadzima-Nyarko, M., Nyarko, E. K., Ademović, N., Miličević, I., & Kalman Šipoš, T. (2019). Modelling the Influence of Waste Rubber on Compressive Strength of Concrete by Artificial Neural Networks. *Materials*, 12(4), 561. <https://doi.org/10.3390/ma12040561>
- [16] Saeb, A., Sohrabi, M., Ghasemi, M., & Ahani, G. (2011, April 26-27). *Prediction of compressive strength of concrete containing crumb rubber using fuzzy neural model and artificial neural networks*. 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan, Iran. <https://civilica.com/doc/120359/>
- [17] Sun, Y., Li, G., Zhang, J., & Qian, D. (2019). Prediction of the Strength of Rubberized Concrete by an Evolved Random Forest Model. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2019/5198583>
- [18] Jalal, M., Grasley, Z., Bullard, J., & Gurganus, C. (2020). A new nonlinear formulation-based prediction approach using artificial neural network (ANN) model for rubberized cement composite. *Engineering with Computers*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01054-3>
- [19] Uygunoğlu, T., & Topçu, İ. B. (2010). The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1141-1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027>
- [20] Turatsinze, A., & Garros, M. (2008). On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1209-1215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.012>
- [21] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of cleaner production*, 102, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>
- [22] 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>
- [23] Jariwala, V. H., Patel, P. V., & Purohit, S. P. (2013). Strengthening of RC Beams Subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*, 51(4), 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.038>
- [24] Cuong Ho, A. (2010). *Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés. : application aux éléments de grande surface* [Doctoral, National Institute of Applied Sciences of Toulouse]. Toulouse, France. <https://www.theses.fr/2010ISAT0024>
- [25] Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828-1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- [26] Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., İpek, S., & Asaad, D. S. (2015). Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties

- of concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 1113-1121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.030>
- [27] Nguyen, T. H., Toumi, A., & Turatsinze, A. (2010). Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberised cement-based mortars. *Materials & Design*, 31(1), 641-647. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.006>
- [28] 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))
- [29] Abdollahzadeh, A., Masoudnia, R., & Aghababaei, S. (2011). Predict strength of rubberized concrete using atrificial neural network. *WSEAS Transactions on Computers*, 10(2), 31-40. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2001175.2001176>
- [30] Bachir, R., Sidi Mohammed, A. M., & Habib, T. (2018). Using Artificial Neural Networks Approach to Estimate Compressive Strength for Rubberized Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4), 858-865. <https://doi.org/10.3311/PPci.11928>
- [31] Milne, L. (1995, August 21-33). *Feature selection using neural networks with contribution measures*. Ai-Conference-, Montreal, Quebec. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.45.9756&rep=rep1&type=pdf>



The Effect of Flexible Connection on Reducing the Damage of Buried Gas Pipes Due to Ground Displacement

Seyed Mohammad Seyed Kolbadi^{1*}

¹PhD, Department of Civil and Architecture Engineering, Faculty of Shahid Chamran, Golestan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Gorgan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.21.2020

Revised: 09.05.2020

Accepted: 01.16.2021

Keyword:

Buried gas pipeline
Flexible connection
Fault displacement
Pipe buckling
Ductility capacity

*Corresponding Author:

S.Mohammad S.Kolbadi

Email: mkolbadi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

One of the major challenges for the oil and gas industry is to keep buried metal pipes safe from faulting. This article discusses a solution to keep buried pipes safe. Wave-shaped joints, by their local deformation, create a rotational joint in a limited area so that other parts of the pipe remain intact. Abacus software was used to model the behavior of buried pipes due to slip direction fault displacement. In order to confirm the validity of the results of the numerical model, the pipe performance due to large axial displacement was compared and validated with the experimental results. An examination of the numerical results indicated that the presence of a wave connection can lead to a very good performance of the pipe in eliminating the buckling area and reducing the amount of plastic strain by approximately 80%.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تأثیر اتصال انعطاف‌پذیر بر کاهش آسیب‌های لوله‌های مدفون گاز ناشی از جابه‌جایی زمین

سیدمحمد سیدکلبادی^{۱*}

۱- دکتری، گروه مهندسی عمران و معماری، آموزشکده شهیدچمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان گلستان، ایران.

چکیده

یکی از معضلات مهم صنعت نفت و گاز، ایمن‌نگه‌داشتن لوله‌های مدفون فلزی ناشی از پدیده گسلش می‌باشد. در این مقاله به بررسی یک راهکار برای ایمن‌نگه‌داشتن لوله‌های مدفون پرداخته می‌شود. اتصالات موجی‌شکل با تغییر شکل موضعی خود باعث ایجاد مفصل دورانی در یک ناحیه محدود می‌گردند؛ به‌طوری که سایر قسمت‌های لوله، سالم باقی می‌ماند. برای مدل‌سازی رفتار لوله مدفون ناشی از جابه‌جایی گسل راستا لغز، نرم‌افزار آباکوس به خدمت گرفته شده است. برای تأیید اعتبار نتایج مدل عددی، عملکرد لوله ناشی از جابه‌جایی محوری بزرگ با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقاله‌ای معتبر، مقایسه و صحت‌سنجی شده است. با بررسی نتایج عددی، وجود اتصال موجی می‌تواند موجب عملکرد بسیار مطلوب لوله در از بین بردن ناحیه کمانشی و کاهش مقادیر کرنش پلاستیک حدوداً ۸۰ درصدی شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

کلید واژگان:

لوله مدفون انتقال گاز

اتصال انعطاف‌پذیر

جابه‌جایی گسل

کمانش لوله

ظرفیت شکل‌پذیری

*نویسنده مسئول: سیدمحمد سیدکلبادی

پست الکترونیکی:

mkolbadi@tvu.ac.ir



مقدمه

یکی از معضلات مهم در صنعت نفت و گاز در تمامی کشورها، در نظر گرفتن تمهیداتی است که برای محافظت از سیستم‌های انتقال انرژی از منع به مقصد است. یکی از پرکاربردترین این‌گونه سیستم‌ها، لوله‌های فلزی مدفون انتقال نفت و گاز می‌باشد که به شریان‌های حیاتی یک جامعه معروف هستند. از آنجا که این لوله‌ها در مسیر خود با گسل‌های زیاد در تقاطع هستند یا هر گونه جابه‌جایی زمین آنها را تحت تأثیر قرار خواهد داد؛ لذا آسیب به این مجموعه علاوه بر خسارات اولیه ناشی از تعویض قطعات آسیب‌دیده، می‌تواند خسارات ثانویه‌ای به جامعه وارد کند [۱].

یکی از معضلات صنعت لوله‌های مدفون، حفظ لوله به دلیل وجود مخاطرات ناشی از حرکت‌های ماندگار زمین نظیر جابه‌جایی گسل می‌باشد. در این مقاله به بررسی یک راهکار بسیار جذاب برای کارفرمایان صنعت نفت و گاز برای ایمن نگه داشتن این تأسیسات پرداخته شده است. در این پژوهش که برای نخستین بار به ارزیابی توسعه کاربرد اتصال موجی در لوله‌های گاز می‌پردازد رفتار لوله مدفون ناشی از جابه‌جایی گسل راستا لغز با زاویه برخورد ۹۰ بررسی شده است. نرم‌افزار آباکوس ورژن ۲۰۱۷ برای شبیه‌سازی پدیده گسلش به کار گرفته شده است. پس از صحت‌سنجی بسیار مناسب رفتار اتصال موجی، مدل عددی با طول بهینه‌ای که در این مقاله معرفی شده است، تحلیل شد. المان ۴ گره‌ای شل و المان ۸ گره‌ای سالیید به ترتیب برای مدل‌سازی لوله و خاک استفاده شدند. همچنین از آنجا که فولاد پس از جاری‌شدگی، کرنش‌های زیادی را پیش از گسیختگی تجربه می‌کند؛ کرنش پلاستیک به عنوان خروجی اصلی این مقاله در نواحی بحرانی کشش و فشار ناشی از جابه‌جایی‌های مختلف گسل راستا لغز، ملاک ارزیابی قرار گرفت. نتایج، نشان‌دهنده عملکرد بسیار مطلوب اتصال موجی در از بین بردن ناحیه کم‌انرژی لوله، کاهش مقادیر کرنش، محدود کردن ناحیه تحت تأثیر لوله ناشی از حرکت گسل و همچنین قطع نشدن خدمت‌رسانی لوله گاز بعد از تغییر شکل‌های محدود زمین می‌باشد. همچنین این اتصال به دلیل سادگی در ساخت و پایین بودن هزینه تمام‌شده نصب می‌تواند به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین گزینه‌های پیش روی کارفرمایان صنعت نفت و گاز برای جلوگیری از مخاطرات و آسیب‌های ناشی از حرکت‌های زمین روی لوله‌های مدفون گردد.

هدف اصلی مقاله حاضر، پیدا کردن روشی برای ایمن نگه داشتن ساختار شبکه خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز و نیز نشدن قطع خدمت‌دهی سیستم حتی پس از وارد آمدن آسیب می‌باشد. مخاطرات خطوط لوله مدفون گاز می‌تواند به سه آسیب برشی (پانچینگ)، آسیب کششی و آسیب فشاری (کمانشی) منجر شود. با انتخاب اتصال اعطاف‌پذیر موجی به‌عنوان یک راه‌حل برای کنترل و کاهش خسارات وارده، سعی از تحقق بخشیدن به اهداف می‌شود.

با توجه به اهمیت شریان‌های حیاتی و لزوم شناخت رفتاری آنها در مقابله با حوادث طبیعی زمین نظیر جابه‌جایی‌های ماندگار، به‌دست آوردن راهکارهایی که قابلیت اجرا داشته باشند امری ضروری به نظر می‌رسد. شایان ذکر است یکی از معضلات مهم شرکت‌های کارفرما در صنعت نفت و گاز، تأمین ایمنی خطوط مدفون لوله‌های فلزی می‌باشد. برای مثال، لوله‌های انتقال گاز و نفت به دلیل طویل بودنشان با گسل‌های موجود در تقاطع هستند. هر گونه آسیب به این لوله‌ها علاوه بر هزینه‌های وارده به خود تأسیسات می‌تواند موجب قطع سرویس‌دهی این مواد پراهمیت انرژی شود؛ بنابراین می‌تواند روند زندگی را در محدوده زمانی مشخصی، معیوب سازد. یکی دیگر از مسائل پیش رو، گازرسانی به روستاهای واقع در کوهپایه‌ها می‌باشد. بدیهی‌ست شیب زمین می‌تواند عاملی باشد تا در صورت وقوع بارندگی‌هایی، خاک شیروانی رانش کند و تأسیسات مدفون انتقال گاز را تحت تأثیر قرار دهد که هر ساله در بسیاری از مناطق، هزینه‌های قابل‌توجهی را بر دوش شرکت‌های کارفرمای گاز می‌گذارد. در این راستا پس از شناخت مخاطرات لوله‌های مدفون، با انتخاب روشی مناسب، سعی در کنترل و کاهش آسیب‌های وارده به لوله‌های مدفون گاز می‌گردد.

برای خطوط لوله فولادی جوش شده، متداول‌ترین روش برای تحمل حرکت گسل، حداکثر استفاده از توانایی تغییر شکل لوله در محدوده ناکشسان درکشش به‌منظور هماهنگی با تغییر شکل زمین بدون گسیختگی می‌باشد. هرگاه امکان داشته باشد باید قرارگیری خط لوله در تقاطع خط گسل چنان انتخاب شود که خط لوله تحت تأثیر کشش همراه با قدری خمش قرار گیرد و از قرارگیری خط لوله به‌طوری که آن را در فشار قرار دهد باید اجتناب شود؛ زیرا توانایی خط لوله در تحمل تنش‌های فشاری بدون گسیختگی بیار، کمتر از تنش‌های کششی است. روش‌های متعددی برای تحلیل خطوط لوله مدفون در معرض گسلش وجود دارند. این روش‌ها با اصلاحات لازم در مورد شرایط قیدها می‌توانند برای خطوط لوله مدفون و موارد مشابه به کار می‌روند. این روش‌ها عبارتند از:

- روش نیومارک-هال^۱ [۲]

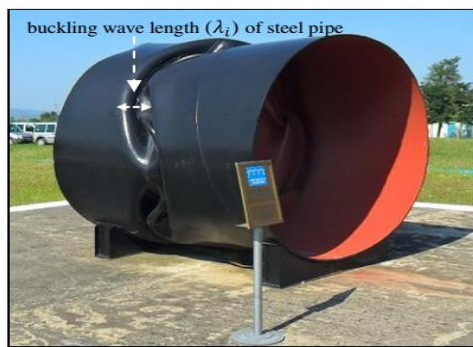
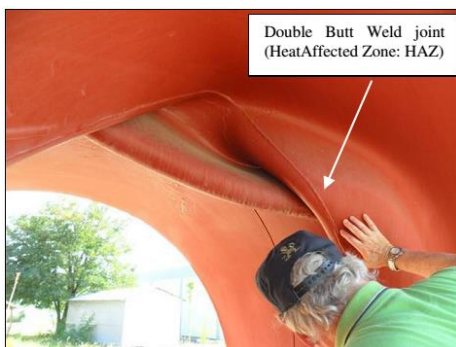
- روش کندی^۲ و همکاران [۳]

- روش اجزا، محدود.

دو روش اول، حرکت گسل را به‌صورتی که در یک صفحه تعریف‌شده منفرد رخ می‌دهد فرض می‌کنند و توده‌های خاک در طرفین گسل را به‌صورت دو جسم صلب متحرک در نظر می‌گیرند.

روش نیومارک-هال [۲] یک برآورد دست پایین^۳ در خط لوله می‌باشد؛ زیرا فرض می‌کند خط، سختی خمشی ندارد و لوله را به‌صورت رفتار یک کابل در نظر می‌گیرد؛ لذا هرگونه قید جانبی را حذف می‌کند. بنابراین خط لوله به‌صورت یک خط مستقیم بین دو نقطه مهارتی تغییر شکل می‌دهد. از سوی دیگر روش کندی [۳] و همکاران منجر به برآورد دست بالا^۴ از تغییر مکان‌های سه‌بعدی ناشی از حرکت گسل شد که بستگی به مؤلفه‌های حرکت گسل امتداد لغز دارند؛ بنابراین جابه‌جایی المان‌های لوله به چگونگی قرارگیری خط راستای لوله نسبت صفحه گسل و نیز زاویه قرارگیری امتداد لوله نسبت به سطح زمین بستگی دارد.

بسته به زاویه برخورد لوله با گسل، مکانیزم خرابی کمانشی (شکل ۲) می‌تواند به مکانیزم کششی تبدیل شود. در این صورت المان‌های لوله، تحت کشش قرار خواهند گرفت [۴]. در سال ۲۰۱۷ کایا^۵ [۵]، مکانیزم برشی روی لوله‌ای که در سال ۱۹۹۹ در کوکائیلی^۶ ترکیه بر اثر حرکت گسل آسیب دیده است را به صورت عددی بررسی کرد (شکل ۱).



شکل ۱. پانچینگ در محل تقاطع لوله با گسل (کایا ۲۰۱۷) - زلزله ۱۹۹۹ کوکائیلی با جابجایی جانبی ۳ متر [۶]

¹ Newmark-Hall

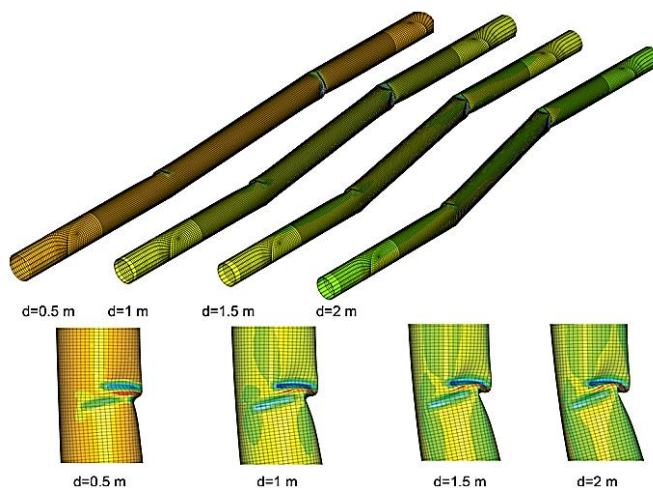
² Kennedy

³ Lower bound

⁴ Upper bound

⁵ kaya

⁶ Kokaelli



شکل ۲. کمناش موضوعی در ناحیه فشاری [۴]

رفتار لوله‌های فولادی تحت فشار و کمناش، بسیار پیچیده است؛ بنابراین مطالعه موردی روی خرابی دیواره لوله برای درک درست از رفتار واقعی خطوط انتقال در مواجهه با جابه‌جایی‌های ناشی از گسلش، بسیار بااهمیت است. رفتار لوله فولادی در مواجهه با بارگذاری فشاری، موردتوجه محققانی بسیاری بوده است. در این بین، تحقیقات و گزارش‌های رید^۱ [۷] و اخیراً توتونسا^۲ [۸] و همچنین بردی^۳ [۹] و کیریکیدس و جو^۴ [۱۰] خرابی کمناشی لوله‌های فولادی را در مواجهه با فشار خالص محوری و رفتار خمشی ارزیابی کرده‌اند. کارامانوس و تاسولاس^۵ [۱۱] نیز به مطالعه رفتار لوله‌های قطر بالا که به صورت مارپیچی جوش خورده‌اند، پرداختند. علاوه بر این، جون^۶ و کیریکیدس [۱۰] تأثیر خاک پیرامونی بر مقاومت کمناشی لوله‌های مدفون را بررسی کرده است.

غالب مطالعات و پژوهش‌های در حوزه لوله‌های مدفون را می‌توان در غالب شناخت وضعیت موجود بیان کرد. در ادامه، دو نوع از راهکارها برای ایمن نگه داشتن لوله‌های مدفون ناشی از پدیده گسلش بیان می‌گردد. چاریس گانتز^۷ [۱۲] (۲۰۱۶) در مطالعه خود تحت عنوان «ارزیابی روشی جهت حفاظت لوله‌های مدفون ناشی از بارهای لرزه‌ای» بیان کرد که باید ناحیه متقاطع با گسل بعد از حفر گسترده، توسط مصالح دانه‌ای مخصوص پر شود تا در هنگام جابه‌جایی گسل، لوله کمتر تحت تأثیر قرار گیرد (شکل ۳). این روش نسبت به روش ارائه شده در این مقاله، پرهزینه‌تر است و نیز نمی‌تواند روشی ثابت برای تمامی انواع الگوهای جابه‌جایی زمین نظیر رانش شیروانی‌های خاکی باشد.

¹ Reid

² Tutunca

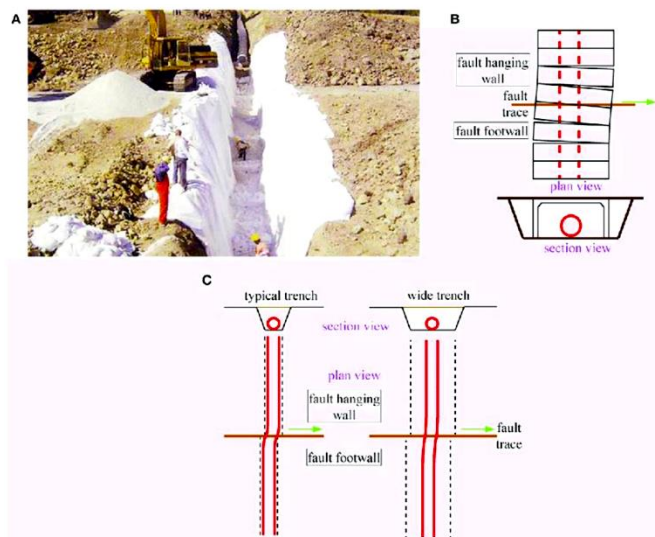
³ Bardi

⁴ Kyriakides and Ju

⁵ Karamanos and Tassoulas

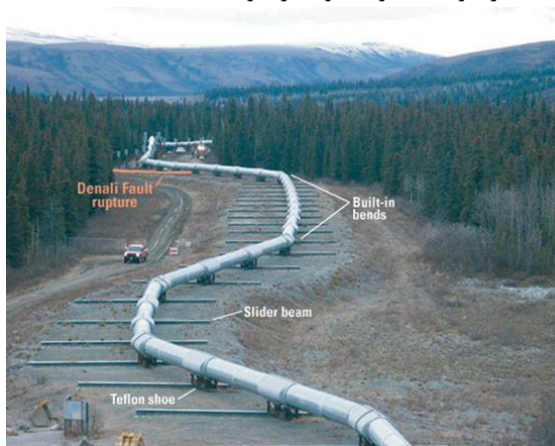
⁶ Yun

⁷ Charis Gantes



شکل ۳. حفر گمانه‌ای عریض جهت نصب لوله [۱۲]

در سال ۲۰۰۳ در آلسکا روشی برای ایمن نگه‌داشتن خط انتقال اجرا شد. بدین ترتیب در ناحیه بحرانی، لوله مدفون به سطح زمین آمده و روی ریل‌های عرضی سوار می‌شود؛ بنابراین می‌تواند آزادانه، روی ریل حرکت کند. این روش که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بسیار پرهزینه می‌باشد. همچنین در این پروژه، بسیاری درختان قطع می‌شود و نیز به نظر می‌رسد قابلیت استفاده در شرایط بسیار محدودی را دارد.



شکل ۴. خط لوله انتقال روغن ترنس-آلسکا در ناحیه متقاطع با گسل دنالی^۱ [۱۳]

^۱ Denali

الگوسازی نظری یا تجربی

مدل کمانشی شامل مشخصات نیرو- جابه‌جایی

تورگارد و نیدلمن [۱۴] قوی‌ترین بحث برای این ادعا که جزئیات غیرخطی نیرو- تغییر شکل خاک، تأثیر به‌سزایی در شروع کمانش لوله مدفون دارد را ارائه کرده‌اند. در حالت شرایط ساده که خاک به‌صورت الاستیک مدل می‌شود و به‌صورت جانبی به لوله، نیرو وارد می‌کند. این نیرو در واحد طول معادل فنری با سختی ثابت k می‌باشد. در این شرایط معادله زیر حاکم است:

$$EIy''' + Py'' + ky = 0 \quad (۱)$$

نشان دادن اینکه بار بحرانی کمانشی از رابطه زیر به‌دست می‌آید ساده است (برای مثال در این مرجع دیده شود. شایان ذکر است که تمامی کمیت‌هایی که در روابط (۲) الی (۷) استفاده شده، با واحدهای SI بیان شده‌اند.

$$P = 2\sqrt{kEI} \quad (۲)$$

کمانش لوله‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که تنش جداره لوله بیش از تنش حد جاری‌شدگی مصالح شود. حرکت گسل راستا لغز، باعث ایجاد لنگر خمشی در لوله مدفون خواهد شد. روابط تخمینی زیادی وجود دارند که مقدار تنش کمانشی و لنگر ایجاد شده در لوله را تحت خمش توضیح می‌دهند اما هیچ کدامشان فشار داخلی را در نظر نگرفته‌اند. برازیر^۱ [۱۵] یکی از پیشگامان این مسیر در تحلیل غیرخطی سازه‌ها می‌باشد. او دریافت زمانی لوله‌ها خراب می‌شوند که شعاع داخلی تغییرشکل‌یافته لوله به $\frac{1}{9}$ قطر لوله برسد. لنگر خمشی M_{cr1} بر اساس این نوع تغییر شکل به صورت زیر محاسبه شود:

$$M_{cr1} = \frac{\sqrt{2}}{9} \frac{E\pi D t^2}{\sqrt{1-\nu^2}} \quad (۳)$$

که D قطر لوله، t ضخامت لوله، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون می‌باشد.

تنش خمشی بیشینه σ_{cr} لوله تحت لنگر کمانشی M_{cr} نیز می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود.

$$\sigma_{cr1} = \frac{4M_{cr}}{\pi D^2 t} \quad (۴)$$

اگر تنش کمانشی بحرانی خط لوله تحت خمش، شبیه تنش کمانشی لوله تحت فشار یکنواخت باشد، تنش کمانشی به صورت زیر بیان می‌شود:

¹ Brazier

$$\sigma_{cr1} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{D} \right) \quad (5)$$

سپس، لنگر کمانشی استخراج شده به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$M_{cr2} = \frac{E\pi Dt^2}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

تیموشینکو و گیر^۱ [۱۶] اظهار داشتند که بیشینه تنش فشاری در لنگر کمانشی بحرانی حدود ۳۰ درصد بیشتر از به دست آمده از معادله (۵) است:

$$M_{cr3} = 0.65 \frac{E\pi Dt^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

در واقع این نظریه‌ها بدون در نظر گرفتن فشار داخلی لوله و مبتنی بر نظریه پلاستیک بیان شدند. حل عددی مؤلفه‌های تنش و کرنش برای لوله با فشار داخلی معمولی را هو و یوان^۲ [۱۷] بررسی کرده‌اند. توزیع تنش و کرنش داخلی لوله می‌تواند با فرمول‌ها به دست آورده شود اما آنها در مورد مسئله کمانش تحقیق نکردند. تغییر شکل خمشی لوله‌های مدفون، یک مسئله غیرخطی است. لنگر خمشی در طول محور لوله، یکنواخت نیست. همچنین اندرکنش خاک-لوله، یک عامل مهم برای رفتار کمانشی است. به علاوه، لوله، یک سازه پوسته‌ای نازک است. وقتی که تغییر شکل بزرگ روی مقطع عرضی لوله ظاهر شود، اصل سوپروپوزیشن نمی‌تواند برای اندرکنش کرنش محوری و کرنش خمشی استفاده بشود. همچنین ممکن است تنش پسماند و تمرکز تنش برای لوله‌ها وجود داشته باشد؛ بنابراین، حل پاسخ لوله به وسیله روش تحلیلی، بسیار سخت و روش اجزای محدود، مناسب‌تر خواهد بود.

از آنجا که کمانش لوله‌ها به دلیل مشخصات هندسی آن می‌تواند به صورت محلی خارج از صفحه روی جداره آن اتفاق بیفتند، بررسی رفتار آن به صورت تحلیلی، کاملاً پیچیده خواهد شد. از این رو برای بررسی دقیق‌تر این موضوع از روش المان محدود استفاده شده است و برای شبیه‌سازی، نرم‌افزار آباکوس به کار گرفته شد.

حرکت گسل به دو زاویه شیب گسل β (زاویه صفحه گسل با افق) و زاویه مقطع عرضی لوله φ (زاویه صفحه گسل با محور لوله) در صفحه عمودی و افقی به ترتیب بستگی دارد [۱۸].

در این مقاله برای تمرکز بیشتر بر گسترش کاربرد اتصال موجی روی عملکرد لوله‌های مدفون گاز تحت تأثیر حرکت گسل راستا لغز، مقادیر φ و β یکسان برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند.

در سال ۲۰۱۷ پارکر وام^۳ [۱۹] ایده شکل‌پذیری اتصالات لوله را با در نظر گرفتن سطح موجی شکل^۴ در لوله تغییر داد. از این رو طی مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی مکانیزم تغییر شکل محوری بزرگ در لوله پرداخت. در این مطالعه، یک لوله بدون فشار داخلی با یک اتصال موجی با اعمال جابه‌جایی محوری بررسی شد. این نوع اتصال به دلیل وجود فقط یک ناحیه موجی، علاوه بر ایجاد ظرفیت شکل‌پذیری لوله می‌تواند از ایجاد پدیده بیضی‌شدگی لوله در

¹ Timoshenko and Gere

² Hu and Yuan

³ Parker Wham

⁴ Waved

فشارهای بالا و نیز با کاهش طول قسمت ناهموار برای انباشته شدن آلاینده‌های گاز، از خوردگی زودهنگام لوله جلوگیری کند. نتایج، حاکی از این است که ظرفیت شکل‌پذیری لوله بدون ایجاد ناحیه کم‌انرژی به‌شدت افزایش خواهد یافت. در تحقیق یاد شده، صرفاً به بررسی ظرفیت شکل‌پذیری محوری لوله با استفاده از اتصال موجی‌شکل، پرداخته شده است. اما تا کنون پژوهشی در خصوص نحوه عملکرد این اتصال در پدیده‌های گسلش با جابه‌جایی‌های عرضی و نیز پدیده ناپایداری شبروانی‌های خاکی صورت نگرفته است.

هدف اصلی این مقاله حاضر، بررسی عملکرد یک نوع اتصال انعطاف‌پذیر موجی بر پدیده تقاطع لوله با گسل می‌باشد. اتصالات انعطاف‌پذیر در لوله‌ها می‌تواند با توجه به پتانسیل جابه‌جایی خود، آسیب‌های برشی، فشاری و کششی را تا حد زیادی برطرف کند. در این مقاله به توسعه کاربرد اتصال موجی در لوله‌های گاز مدفون متقاطع با گسل پرداخته شده است. لوله‌های مدفون به دلیل طول زیاد خود غالباً در طول مسیر خود با گسل‌های فعال برخورد می‌کنند؛ لذا جابه‌جایی گسل، همواره یکی از مخاطرات لوله‌های مدفون گاز به‌شمار می‌آید. در این مقاله به بررسی یکی از راهکارهای کاهش مخاطرات جابه‌جایی گسل بر عملکرد لوله پرداخته شده است. راهکار مورد بررسی، استفاده از اتصال موجی در لوله‌ها می‌باشد. این اتصال را اولین بار در سال ۲۰۱۷ پاکر وام پیشنهاد داد و مدل آزمایشگاهی آن را بر تغییر شکل‌های بزرگ محوری ساخت. در مقاله حاضر، با گسترش کاربرد این اتصال، تأثیر آن بر رفتار لوله مدفون گاز متقاطع با گسل ارزیابی شده است. در این راستا، مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی، صحت‌سنجی شد و در ادامه، مدل عددی تقاطع لوله با گسل راستا لغز با زاویه برخورد ثابت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۲۰۱۷، شبیه‌سازی گردید. از آنجا که لوله‌های فولادی می‌توانند کرنش‌های زیادی را پس از جاری‌شدگی تحمل کنند، کرنش پلاستیک به‌عنوان خروجی اصلی مقاله حاضر در نواحی بحرانی کششی و فشاری در نظر گرفته شد و مقادیر آن در دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی مقایسه گردید.

تجزیه و تحلیل عددی

صحت‌سنجی

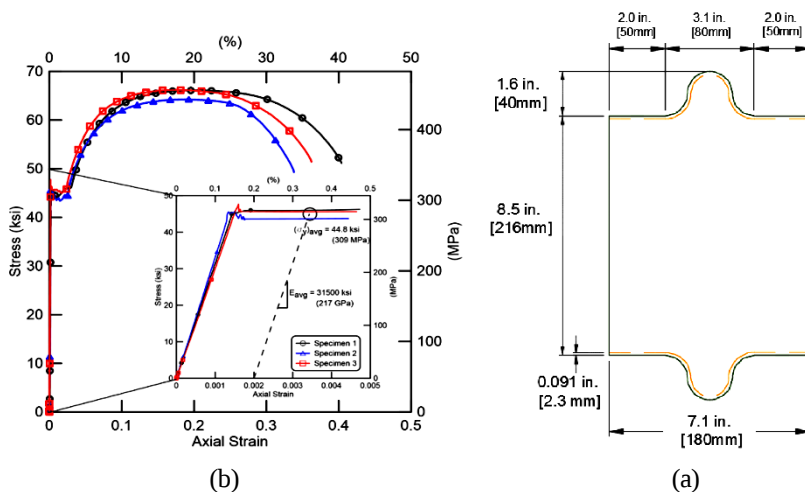
در سال ۲۰۱۷ پاکر وام و همکاران [۱۹] طی مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی عملکرد محوری اتصالات موجی در جابه‌جایی‌های بزرگ پرداختند. در این تحقیق آزمایشگاهی با اعمال جابه‌جایی محوری بزرگ توسط جک^۱ به لوله‌ای فولادی با قطر ۲۰ سانتی‌متر، مدول الاستیسیته ۲۱۷ گیگاپاسکال و تنش جاری‌شدگی ۳۰۹ مگاپاسکال، داده‌های کرنش توسط کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی ثبت شد (شکل ۵).

¹ Actuator



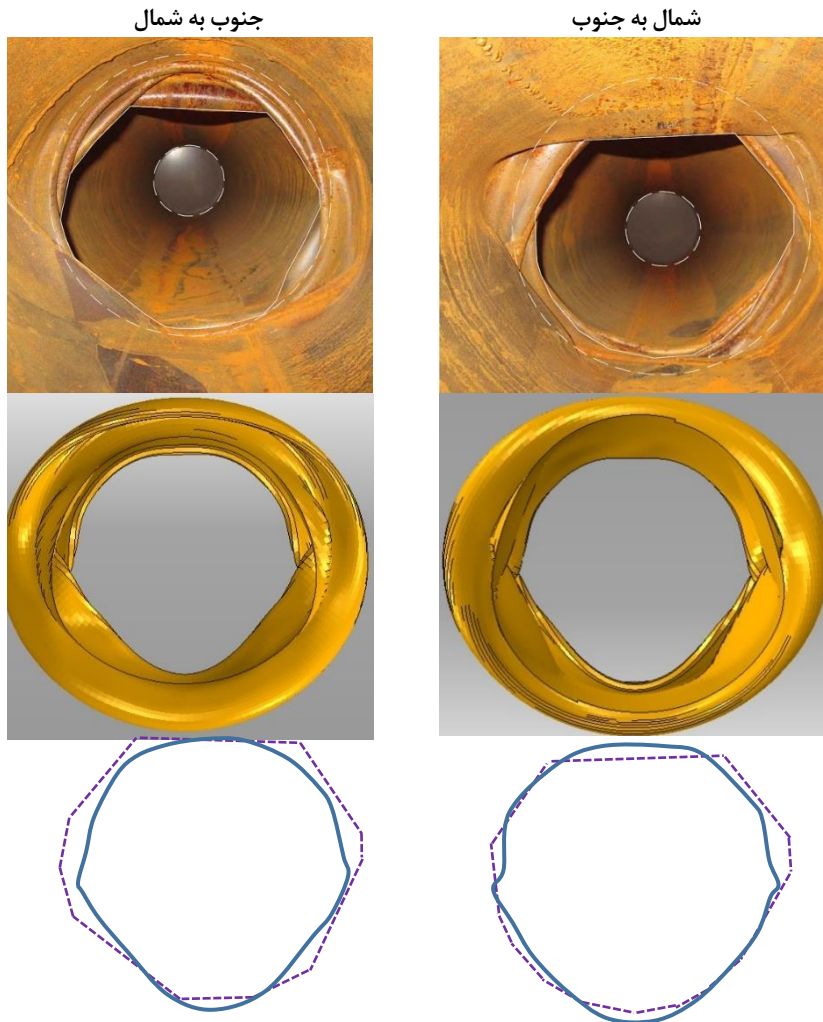
شکل ۵. نمای دو بعدی آزمون آزمایشگاهی فشار محوری لوله با اتصال موجی [۱۹]

مطالعه آزمایشگاهی بیان شده، مبنای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده عددی در مقاله حاضر در نظر گرفته است. در این مدل عددی، با در نظر گرفتن اتصال موجی و شرایط مرزی انتهایی بسته لوله و نیز در نظر گرفتن المان shell برای لوله، جابه‌جایی ۱۶ سانتی‌متری در راستای محوری به لوله اعمال شد. مشخصات هندسی و مکانیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.



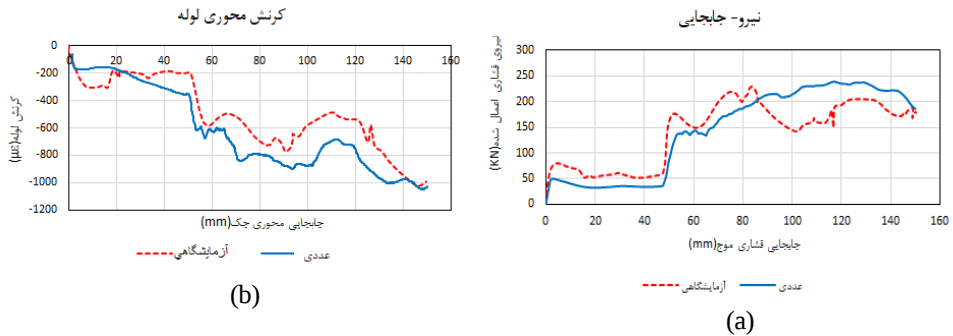
شکل ۶. مشخصات هندسی و مصالح اتصال موجی آزمایش شده (a) نمای هندسی مقطع عرضی اتصال موجی، (b) نمودار تنش-کرنش نمونه کششی [۱۹]

برای صحت‌سنجی کیفی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، نتایج تغییر شکل آنها در شکل (۷) آورده شده است. در هنگام بسته‌شدن دهانه اتصال موجی، اتصال، شروع به مچالگی می‌کند و مقطع آن از حالت دایره‌ای خارج می‌شود.



شکل ۷. مقایسه شکل سطح مقطع تغییر شکل یافته در ناحیه موجی مدل آزمایشگاهی [۱۹] و مدل عددی

انطباق نزدیک بین سطح مقطع تغییر شکل یافته در گام آخر در ناحیه موجی لوله بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مشاهده می شود. این مقایسه در دو نمای شمال به جنوب و جنوب به شمال بررسی شده است. به نظر می رسد مدل عددی از نظر تغییر شکل ظاهری توانسته با الگوی تغییر شکل مدل آزمایشگاهی بسیار منطبق عمل کند. برای مقایسه کمی نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، مقادیر نیروی محوری و کرنش محوری لوله بایکدیگر مقایسه شدند (شکل ۸).



شکل ۸. (a) مقایسه نتایج نیرو- جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نیرو- جابه‌جایی، (b) کرنش محوری- جابه‌جایی

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، از نظر کمی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارند؛ لذا سایر نتایج مدل عددی می‌تواند ملاک ارزیابی قابل قبول با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شده در شکل ۸ می‌توان دریافت مدل عددی به‌خوبی توانسته است روند تغییرات نیروی فشاری در برابر جابه‌جایی و نیز کرنش محوری در برابر جابه‌جایی را شبیه‌سازی کند.

ارزیابی عملکرد اتصال موجی بر عملکرد لوله

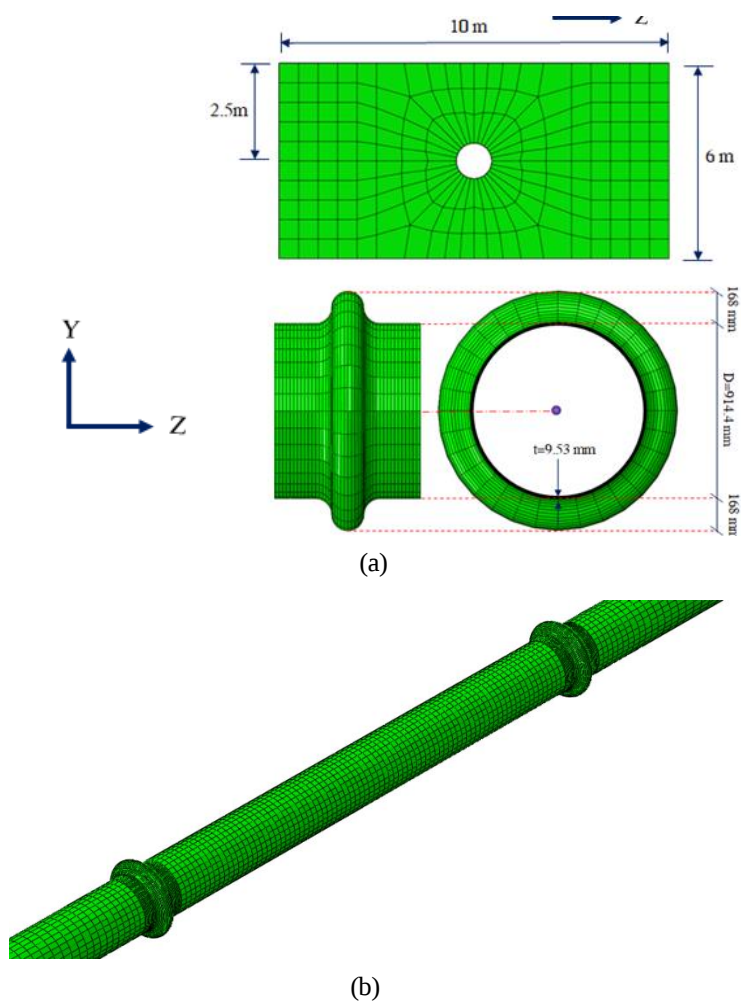
تا به اینجای کار، مدل عددی اتصال موجی بر اساس مدل آزمایشگاهی پاکر وام، به‌صورت کمی و کیفی صحت‌سنجی شده است و می‌توان صحت نتایج آن مورد استناد قرار بگیرد. در این مقاله به گسترش کاربرد این اتصال انعطاف‌پذیر موجی در بهبود عملکرد لوله منقطع با گسل پرداخته می‌شود. در این راستا با تحلیل یک لوله صاف متأثر از پدیده گسلش، نقاط ضعف آن مشخص شد و برای بهبود عملکرد لوله، در آن نواحی از اتصال موجی استفاده گردید. در ادامه با ارائه نمودارهای اندازه کرنش پلاستیک در مقایسه با جابه‌جایی گسل، عملکرد دو لوله صاف و لوله با اتصال انعطاف‌پذیر مقایسه می‌شوند.

شایان ذکر است که برای شبیه‌سازی مدل عددی مقاله حاضر از یک کامپیوتر با پردازنده ۴ هسته‌ای Core i7 با رم ۸ گیگابایت و Cash ۶ مگابایت استفاده شده است، با توجه به تعداد المان‌های مدل عددی و نیز قدرت پردازنده، هر تحلیل عددی حدود ۵ ساعت به طول انجامید. برای شبیه‌سازی مدل تقاطع لوله با گسل راستا لغز، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی لوله به دلیل نازک بودن جداره لوله، از المان ۴ گره‌ای شل انتگرال کاهش‌یافته^۱ (type S4R)، مجموعاً به تعداد ۲۴ المان پیرامون محیط لوله و ۱۸۰۰۰ المان برای کل لوله و همچنین برای مدل‌سازی خاک از المان ۸ گره‌ای حجیم^۲ انتگرال کاهش‌یافته (C3D8R) مجموعاً به تعداد ۵۴۰۸ المان به خدمت گرفته شده است. همچنین از آنجا که در این مقاله برای نخستین بار تأثیر اتصال موجی بررسی می‌شود، تأثیر زاویه برخورد لوله با گسل و سایر پارامترهای هندسی و مکانیکی مصالح مطالعه نشده است. با توجه به $\phi = 90^\circ$ در نظر گرفته شده است. لوله در راستای محور x در خاک مدفون شده است. عمق دفن لوله ۲ برابر قطر آن که مطابق با روش مهندسی خط لوله است [۱] و نیز طول لوله و خاک پیرامون با توجه به نتایج به‌دست آمده در این

¹ Reduce integration

² Solid

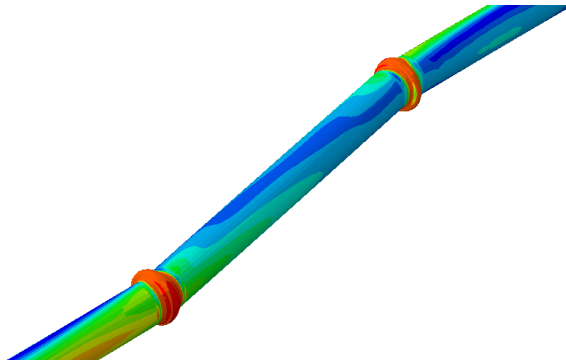
مقاله، ۲۰۰ متر معادل ۲۱۸ برابر قطر لوله به عنوان طول بهینه در راستای x و در راستای‌های y و z با توجه به توصیه وزوراس^۱ [۴] به ترتیب ۶ و ۱۰ برابر قطر لوله (شکل ۹) در نظر گرفته شده است.



شکل ۹. مشخصات هندسی مدل عددی لوله مدفون با اتصال موجی، (a) مقطع و (b) نمای سه بعدی

¹ Vazouras

دو گام تحلیلی استاتیکی به‌صورت ترتیبی اعمال شده است. در ابتدا نیروی گرانش به خاک و فشار داخلی لوله اعمال شده است و سپس جابه‌جایی عرضی به یکی از بلوک‌های گسل اعمال شده است. درجات آزادی مربوط به صفحات مرزی، شامل صفحه زیرین و صفحات جانبی بلوک اول ثابت و بلوک دوم در راستای جانبی به‌صورت یکنواخت جابه‌جا شده است.



شکل ۱۰. کانتور تنش وون میسز مدل عددی لوله با اتصال موجی متقاطع با گسل راستا لغز

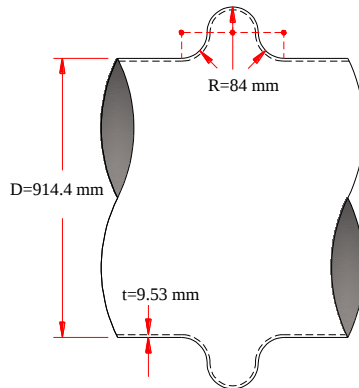
مدل پلاستیسیته کرنش‌های بزرگ^۱ با همگنی سخت‌شونده^۲ برای مصالح فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. خط لوله فولادی، مدفون در خاک نرم رسی از نوع رس نوع I در شرایط زهکشی نشده در نظر گرفته شده است. طبق پیشنهاد وزوراس و همکاران [۴]، مشخصات مکانیکی خاک به‌صورت الاستیک- پلاستیک کامل^۳ با مدل موهر- کلمب در نظر گرفته شده است که مشخصات آن شامل چسبندگی $C = 50kpa$ ، زاویه اصطکاک داخلی $\phi = 0^\circ$ ، مدول الاستیک $E = 25 Mpa$ ، ضریب پواسون $\nu = 0.5$ ژمی باشد. در این مقاله، زاویه اتساع^۴ نیز برابر صفر در نظر گرفته شده است. اندرکنش بین سطوح بیرونی لوله و خاک پیرامونی آن با الگوریتم تماسی شبیه‌سازی شده است که اجازه جداشدگی لوله و خاک را می‌دهد. همچنین ضریب زاویه اصطکاک مناسب در این حالت $\mu = 0.5$ در نظر گرفته شده است. قطر لوله $D = 0.914$ متر و ضخامت $t = 8$ میلی‌متر که اندازه مرسوم خطوط لوله انتقال گاز می‌باشد، در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

¹ large-strain plasticity model

² Isotropic hardening

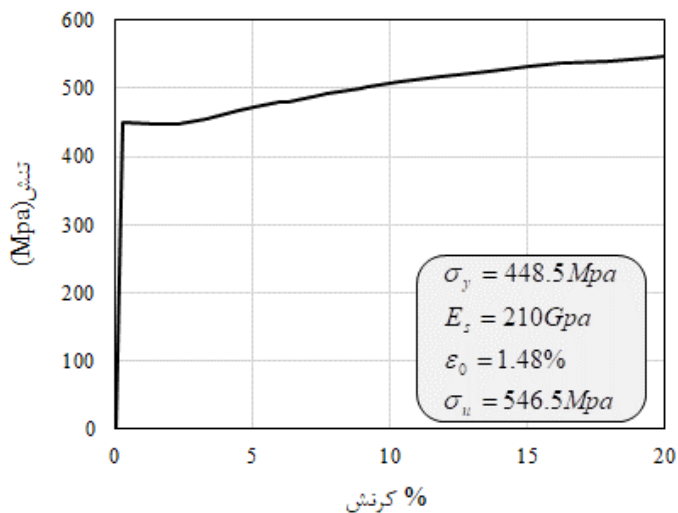
³ Elastic-perfectly plastic

⁴ Dilation angel



شکل ۱۱. مشخصات هندسی اتصال موجی به کار رفته در مدل عددی

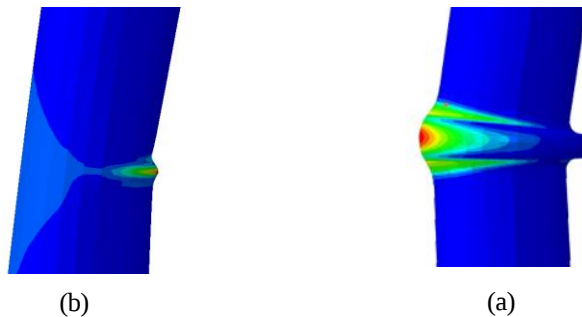
نتایج به دست آمده برای لوله API 5L [۲۰] رتبه X65 از خطوط لوله فولادی می باشد. نمودار تنش - کرنش برای مصالح فولادی لوله های گاز به صورت مرسوم برابر شکل ۱۲ در نظر گرفته شده است. تنش جاری شدگی $\sigma_y = 448.5 \text{ Mpa}$ مدل الاستیسیته 210 Gpa ، ضریب پواسون 0.3 و چگالی برابر 7800 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب اطمینان 0.72 و بیشینه فشار بهره برداری P_{max} این خطوط لوله با توجه به رابطه $P_{max} = 0.72 \times (2\sigma_y t/D)$ به دست آمده است [۲۱؛ ۲۲].



شکل ۱۲. مشخصات مکانیکی فولاد API 5L X65 برای اتصال موجی به کار رفته در مدل عددی

عملکرد اتصال موجی

برای بررسی تأثیر اتصال موجی شکل، ابتدا موقعیت نواحی بحرانی لوله صاف در جابه‌جایی گسل مشخص می‌شود (شکل ۱۳) سپس با جای‌گذاری اتصال موجی در نواحی بحرانی، نتایج دو مدل لوله صاف و لوله با اتصال موجی مقایسه می‌شوند.

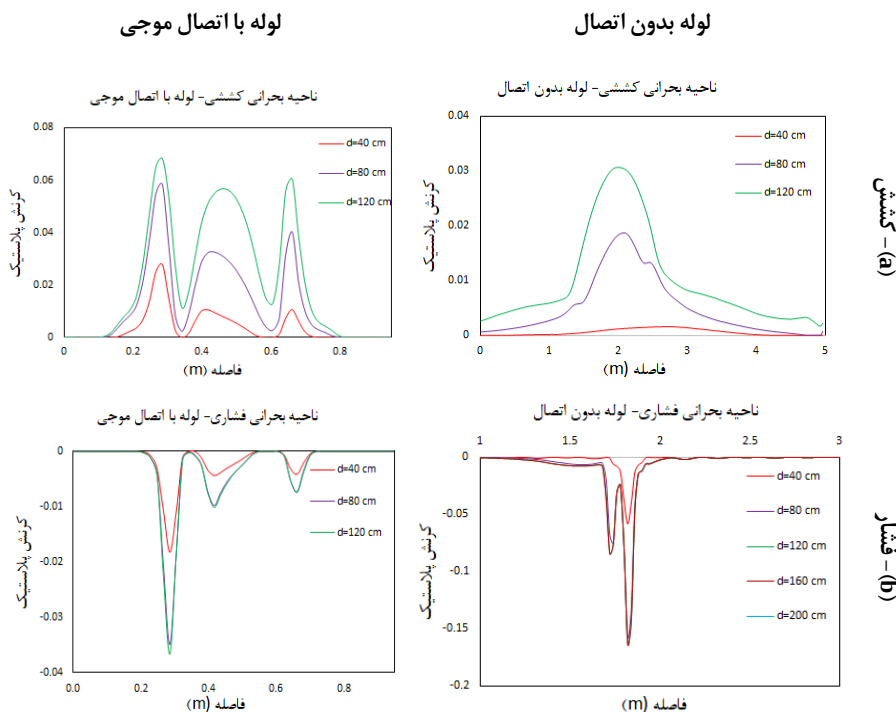


شکل ۱۳. کانتور رنگی کرنش پلاستیک نواحی بحرانی فشاری و کششی، (a) لوله با اتصال موجی و (b) لوله صاف بدون اتصال موجی

همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود مقادیر کیفی شدت کرنش پلاستیک به‌صورت کانتور رنگی، در دو لوله با اتصال موجی و لوله صاف نمایش داده شده است. به‌وضوح مشخص است که در لوله بدون اتصال کمانش در ناحیه فشاری رخ داده است و در ناحیه‌ای کوچک، مقادیر کرنش پلاستیک محدود شده است که این عامل موجب تمرکز تنش خواهد شد، این در صورتی است که لوله با اتصال موجی با تغییر شکل مناسب، توزیع مناسب‌تری از مقادیر کرنش پلاستیک داشته است.

در شرایط یکسان، لوله با اتصال موجی، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده این است که علاوه بر اینکه هیچ‌گونه ناحیه کمانشی در لوله اتفاق نمی‌افتد، مقادیر کرنش به دو ناحیه کوچک در اتصال موجی شکل محدود می‌شوند (شکل ۱۳).

برای مقایسه بهتر عملکرد لوله صاف و لوله با اتصال انعطاف‌پذیر، مقادیر کرنش پلاستیک در دو ناحیه بحرانی کششی و فشاری با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۱۴ بیانگر مقادیر کرنش پلاستیک محوری در نواحی بحرانی فشاری و کششی می‌باشد که این مقادیر در دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقادیر کرنش پلاستیک محوری در جابه‌جایی گسل (d) به طول ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر استخراج شده است.

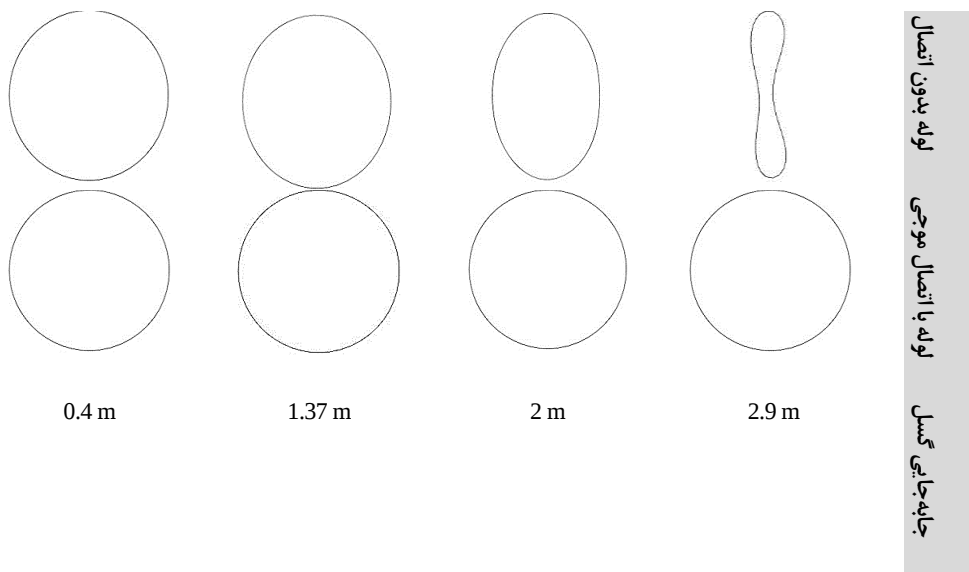


شکل ۱۴. مقایسه نتایج کرنش پلاستیک دو لوله صاف و لوله با اتصال موجی در نواحی بحرانی فشاری و کششی

با توجه به شکل ۱۴ برای مقایسه مناسب بین نمودارها، برای لوله‌های صاف محور افقی که فاصله طولی در ناحیه بحرانی لوله می‌باشد تا ۵ متر و محور قائم تا ۰/۲۵ کرنش پلاستیک برای دو حالت کششی و فشاری در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ناحیه کششی لوله صاف متناظر سطر (a) در جابه‌جایی‌های بالای ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و رشد مقادیر کرنش نسبت به افزایش جابه‌جایی گسل بسیار کند است و در جابه‌جایی بیشینه ۱۲۰ سانتی‌متری گسل، حدود ۰/۰۴ کرنش می‌یابد. این در صورتی است که در ناحیه فشاری متناظر سطر (b) به دلیل به وجود آمدن کمانش موضعی، مقادیر کرنش پلاستیک پس از جابه‌جایی ۴۰ سانتی‌متری به شدت افزایش می‌یابد و به حدود ۰/۲۵ می‌رسد. مقدار کرنش پلاستیک در این حالت، تقریباً معادل کرنش نهایی فولاد می‌باشد؛ لذا جابه‌جایی ۴۰ سانتی‌متری در ناحیه فشاری را می‌توان در این مدل، آستانه کمانش موضعی قلمداد کرد. همچنین برای مقایسه مناسب نمودارهای ناحیه‌های بحرانی در کشش و فشار لوله با اتصال موجی، محور طولی تا فاصله ۵ متری و محور قائم تا کرنش ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است. ناحیه کششی لوله موجی، متناظر با سطر (a) در جابه‌جایی‌های کمتر از ۴۰ سانتی‌متری گسل، وارد ناحیه پلاستیک شده است و در بیشینه جابه‌جایی گسل (۱۲۰ سانتی‌متر) به مقدار ۰/۰۷ رسیده است. هر چند که در این حالت، مقدار کرنش لوله با اتصال موجی حدود دو برابر مقدار لوله صاف است اما تا مقدار کرنش نهایی، فاصله زیادی دارد. ناحیه فشاری متناظر با سطر (b) همچون ناحیه کششی در جابه‌جایی‌های گسل کمتر از ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک شده است که مقدار کرنش پلاستیک در جابه‌جایی بیشینه گسل به ۰/۰۴ می‌رسد. کم بودن مقادیر کرنش در ناحیه فشاری لوله با اتصال موجی نشان داده که اتصال موجی به‌خوبی توانسته است، کمانش محلی را از بین ببرد. همچنین مقادیر کرنش پلاستیک ناحیه فشاری در

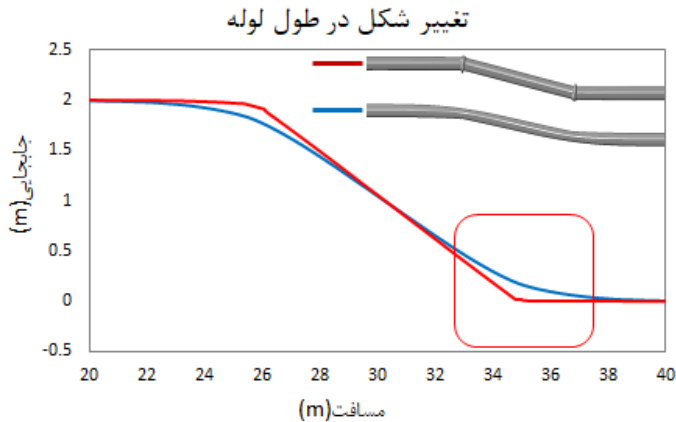
جابه‌جایی‌های بیشینه گسل، کمتر از ناحیه کششی است. دلیل این امر، حرکت جانبی گسل نسبت به امتداد عمودی لوله است. در این حالت، لوله علاوه بر خمش به کشش هم می‌افتد، از این رو بخشی از تغییر شکل لوله در ناحیه فشاری، کاسته می‌شود و به همان نسبت، مقادیر کرنش پلاستیک کمتر خواهد شد. با مشاهده شکل ۱۴، مشخص می‌شود که ناحیه بحرانی در لوله صاف، همان ناحیه فشاری به دلیل وجود کمانش موضعی خواهد بود. این در صورتی است که ناحیه بحرانی در لوله با اتصال موجی، ناحیه کششی خواهد بود. در هر صورت ناحیه فشاری لوله صاف نسبت به بقیه نواحی عملکرد بحرانی‌تری دارد و نیز اتصال موجی توانسته افزایش مقادیر کرنش و محدوده آن را به خوبی کنترل کند.

در جابه‌جایی‌های زیاد گسل راستا لغز، سطح مقطع لوله در ناحیه برخورد با صفحه گسل دچار تغییر شکل می‌شود و به دلیل وجود نیروی برشی در آن ناحیه از حالت دایره‌ای به حالت دنبلی تغییر می‌کند. این نوع تغییر شکل باعث افزایش مقادیر نرخ کرنش و تنش در دیواره لوله خواهد شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات سطح مقطع لوله صاف با لوله موجی شده

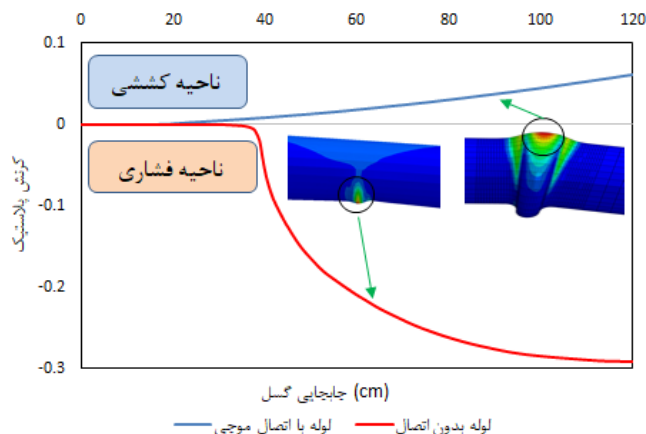
همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، لوله صاف در ناحیه میانی، دچار تغییر شکل سطح مقطع گردیده است؛ به طوری که در جابه‌جایی بیش از ۸۰ سانتی‌متر گسل سطح مقطع دایروی لوله به شکل بیضی و در جابه‌جایی‌های بیش از ۲ متر به شکل دنبلی تغییر شکل می‌یابد اما در لوله با اتصال انعطاف‌پذیر، سطح مقطع لوله، بدون تغییر می‌ماند.



شکل ۱۶. مقایسه تغییر شکل یافته لوله صاف و لوله با اتصال موجی شکل

با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که لوله صاف در طول ۴۰ متر دچار خمیدگی شده است ولی لوله با اتصال موجی با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال موجی، به سه قسمت صاف و بدون انحنای تقسیم شده است. با نصب این اتصال در نواحی بحرانی لوله، انتظار می‌رود علاوه بر کاهش مقادیر تنش و کرنش جداره لوله، موقعیت آسیب احتمالی لوله، قابل پیش‌بینی و محدود گردد.

در لوله‌های انتقال گاز، آسیب یک نقطه از لوله موجب قطع خدمت‌رسانی لوله گاز می‌شود؛ بنابراین با نگاهی ریزبینانه‌تر، علاوه بر نواحی بحرانی در کشش و فشار لوله‌ها، دو نقطه بحرانی در نواحی کششی و فشاری با بیشترین مقدار کرنش پلاستیک نیز انتخاب و با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۱۷. مقایسه تغییر شکل یافته لوله صاف و لوله با اتصال موجی شکل

با توجه به شکل ۱۷ رفتار پلاستیک لوله صاف در ناحیه فشاری تحت جابه‌جایی گسل ۲۵ سانتی‌متری و در ناحیه کششی تحت جابه‌جایی حدود ۴۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. همچنین در جابه‌جایی ۳۸ سانتی‌متری

وارد ناحیه کمانشی می‌شود که در این حالت، مقادیر کرنش پلاستیک، رشد شدیدی پیدا می‌کند. بدین ترتیب مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک ناشی از جابه‌جایی گسل ۱۲۰ سانتی‌متری در ناحیه کششی و فشاری به‌ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۳ می‌باشد. دلیل بیشتر بودن ۱۰ برابری مقادیر کرنش پلاستیک در ناحیه فشاری نسبت به ناحیه کششی، ایجاد کمانش موضعی می‌باشد. از طرفی دیگر، در شکل ۱۷ هر دو نقطه بحرانی در کشش و فشار در جابه‌جایی یکسان گسل ۲۰ سانتی‌متری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و البته با افزایش جابه‌جایی گسل، رشد کمتری نسبت به لوله صاف دارند؛ به‌طوری که با جابه‌جایی ۱۲۰ سانتی‌متری، مقادیر کرنش پلاستیک نقاط بحرانی کشش و فشار به ترتیب به ۰/۰۶ و ۰/۰۴ می‌رسند. بدین ترتیب با مقایسه نتایج فوق اتصال موجی توانسته است، مقادیر کرنش پلاستیک در نقاط بحرانی را نسبت به لوله صاف، در ناحیه فشاری و کششی به ترتیب به اندازه، ۰/۰۳ افزایش و ۰/۲۶ کاهش دهد. با توجه به شکل ۱۷، مشخص است که بیشترین مقادیر کرنش پلاستیک در نقاط بحرانی برای لوله صاف و لوله با اتصال موجی، به‌ترتیب در نواحی فشاری و کششی می‌باشد. با مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک در بحرانی‌ترین نقاط لوله صاف و لوله با اتصال موجی می‌توان گفت اتصال موجی توانسته است مقادیر کرنش را به طور قابل توجهی به اندازه ۸۷ درصد کم کند.

نتیجه‌گیری

- ۱- اتصال موجی توانسته با جذب انرژی و ایجاد مفصل پلاستیک، دوران باید و طول قابل توجه ۵ متر از لوله که متأثر از حرکت گسل وارد ناحیه پلاستیک شده است را به حدود ۸۰ سانتی‌متر محدود کند.
- ۲- با استفاده از اتصال موجی در لوله‌های مدفون متقاطع با گسل، پس از جابه‌جایی گسل سطح مقطع لوله کاملاً سالم و به‌صورت دایره‌ای باقی می‌ماند و بقیه طول لوله بدون افزایش مقادیر کرنش قابل توجه، همچنان در ناحیه الاستیک سالم باقی خواهد ماند.
- ۳- مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک را که در جابه‌جایی ۱۲۰ سانتی‌متری گسل از مقدار کرنش نهایی فولاد به حدود ۸۷ درصد کاهش دهد. این بدان معناست که این اتصال می‌تواند لوله را پس از جابه‌جایی گسل حفظ کند و بدون قطع خدمت‌رسانی لوله گاز، با همان تغییر شکل ماندگار از لوله مدفون استفاده کند.
- ۴- لوله صاف پس از جابه‌جایی گسل، در جابه‌جایی کم حدود ۴۰ سانتی‌متری، وارد ناحیه کمانشی می‌شود و مقادیر کرنش آن به حد نهایی نزدیک شده و موجب خرابی لوله گاز خواهد شد. این خرابی علاوه بر اعمال هزینه تعویض قطعه آسیب‌دیده موجب قطع گاز در بازه زمانی قابل توجه خواهد شد.

References

- [1] O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2012). *Seismic design of buried and offshore pipelines*. MCEER. <https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/12/12-MN04.pdf>
- [2] Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1975, June 18-20). *Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement*. Proceedings of US national conference on earthquake engineering, Ann Arbor Michigan.
- [3] Kennedy, R. P., Williamson, R. A., & Chow, A. M. (1977). Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 103(5), 617-633. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000659>
- [4] Vazouras, P., Karamanos, S. A., & Dakoulas, P. (2012). Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012>

- [5] Kaya, E. S., Uckan, E., O'Rourke, M. J., Karamanos, S. A., Akbas, B., Cakir, F., & Cheng, Y. (2017). Failure analysis of a welded steel pipe at Kullar fault crossing. *Engineering Failure Analysis*, 71, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.10.004>
- [6] Eidinger, J. M., O'Rourke, M., & Bachhuber, J. (2002, July 21-25). *Performance of pipelines at fault crossings*. Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts. <http://www.geengineeringsystem.com/ewExternalFiles/PipeFaultOffset.PDF>
- [7] Reid, S. R. (1993). Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 35(12), 1035-1052. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(93\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(93)90054-X)
- [8] Tutuncu, I. (2001). *Compressive load and buckling response of steel pipelines during earthquakes*. Cornell University. <https://books.google.com/books/about/Compressive Load and Buckling Response o.html?id=oFpUAAAAYAAJ>
- [9] Bardi, F. C., & Kyriakides, S. (2006). Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(8), 830-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.03.005>
- [10] Kyriakides, S., & Ju, G. T. (1992). Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending—I. Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 29(9), 1117-1142. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(92\)90139-K](https://doi.org/10.1016/0020-7683(92)90139-K)
- [11] Karamanos, S. A., & Tassoulas, J. L. (1996). Tubular Members. II: Local Buckling and Experimental Verification. *Journal of Engineering Mechanics*, 122(1), 72-78. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:1\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:1(72))
- [12] Gantes, C. J., & Melissianos, V. E. (2016). Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture. *Frontiers in Built Environment*, 2(34), 12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00034>
- [13] McClymont, A., Ernst, E., Bauman, P., & Payne, N. (2016, September 26–30). *Integrating Geophysical and Geotechnical Engineering Methods for Assessment of Pipeline Geohazards*. 11th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64222>
- [14] Tvergaard, V., & Needleman, A. (1981). On localized thermal track buckling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 23(10), 577-587. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(81\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0020-7403(81)90038-2)
- [15] Brazier, L. G., & Southwell, R. V. (1927). On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 116(773), 104-114. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0125>
- [16] Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (2009). *Theory of Elastic Stability*. Dover Publications. https://books.google.com/books?id=rAk_AwAAQBAJ
- [17] Hu, L., & Yuan, S. (2012). Plastic deformation analysis of thin-walled tube bending under internal pressure. *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, 48(14), 78-83.
- [18] Joshi, S., Prashant, A., Deb, A., & Jain, S. K. (2011). Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 930-940. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.003>
- [19] Wham, B. P., Pariya-Ekkasut, C., Argyrou, C., Stack, M., O'Rourke, T. D., Stewart, H. E., Nakazono, H., & Hasegawa, N. (2017). Large Axial Deformation

- Performance of Steel Pipeline Designed for Fault Crossings. In *Pipelines 2017*. <https://doi.org/10.1061/9780784480878.010>
- [20] American Lifelines Alliance. (2001). *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*. A. S. o. C. E. (ASCE). <https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Update061305.pdf>
- [21] Engineer, T. A. S. O. M. (2013). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems* (ASME B31.8-2012). <https://www.asme.org/getmedia/9d6dc116-b4b3-4dee-9bb2-83fb0055e3c6/33700.pdf>
- [22] Engineers, T. A. S. o. M. (2002). *Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids* (ASME 831.4-2002). [https://www.asme.org/learning-development/find-course/asme-b31-4-pipeline-transportation-systems-liquid-hydrocarbons-liquids-\(1\)/online--mar-21-22nd--2022](https://www.asme.org/learning-development/find-course/asme-b31-4-pipeline-transportation-systems-liquid-hydrocarbons-liquids-(1)/online--mar-21-22nd--2022)



Evaluation of Changing Effects of Density and Thickness of Polyurethane as a Protective Coating on Underground Tunnels under Surface Blast

Mohsen Fazlavi^{1*}, AmirAbbas Asadian²

¹Assistant Professor, Departement of Civil Engineering, Faculty of Enghelab-e Eslami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.04.2021

Revised: 02.17.2021

Accepted: 02.24.2021

Keyword:

Porous material

Surface blast

Polyurethane

Tunnel

Protective coating

*Corresponding Author:

Mohsen Fazlavi

Email: mfazlavi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

The use of polyurethane as a sacrificial coating is an important factor in reducing risks and improving the safety of structures against explosions caused by war and terrorist attacks. The parameters of polyurethane can have a positive effect on reducing damage to tunnels under the impact of surface explosions. In this paper, the effect of density and thickness of the protective cover of polyurethane (as an energy absorber) in reducing the damage caused by surface explosions on underground tunnels was studied by computer simulation with AUTODYN software. Six different foam modules with thicknesses between 60 and 150 cm, and five different types of foams with densities between 90 and 250 kg / m³ and their ability to reduce the maximum pressure caused by an explosion were compared. The results of this study illustrated that by increasing the thickness of the protective cover of polyurethane, a significant decrease occurred in the amount of pressure and vertical displacement in the tunnel crown. Moreover, the findings on the effect of polyurethane density indicated that at a density of 140 kg/m³, the optimum reduction in pressure in the tunnel crown occurred.





شاپای الکترونیکی: ۴۴۳۰-۲۵۳۸

شاپای چاپی: ۹۷۹۶-۲۳۸۲



بررسی تأثیر تغییر چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان بر تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر انفجار سطحی

محسن فضولی^{۱*}، امیرعباس اسدیان^۲

- ۱- استادیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
استفاده از پلی‌یورتان به‌عنوان پوشش فداشونده، موضوعی مهم در حوزه کاهش مخاطرات و افزایش ایمنی سازه‌ها در برابر انفجارهای ناشی از حملات جنگی و تروریستی است. پارامترهای رفتاری پلی‌یورتان می‌تواند تأثیرات مثبتی در راستای کاهش خسارات وارد شده به تونل‌ها تحت تأثیر انفجارهای سطحی داشته باشد. در این مقاله، تأثیر تغییر چگالی ماده و همچنین ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان (به‌عنوان جاذب انرژی) در کاهش خسارت ناشی از انفجار سطحی بر تونل‌های زیرزمینی به کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار AUTODYN بررسی شده است. ضخامت کاور فوم از ۶۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰ سانتی‌متر و همچنین چگالی آن از ۹۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در مدل‌سازی، متغیر در نظر گرفته شد و تأثیر هر یک از آن‌ها در کاهش حداکثر فشار ناشی از انفجار در تاج تونل با هم مقایسه گردید. مشاهده شد که با افزایش ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان، مقدار فشار و تغییر مکان قائم در تاج تونل روند کاهشی خواهد داشت. همچنین در اثر تغییر چگالی پلی‌یورتان در ضخامت ۷۰ سانتی‌متر مشاهده شد که روند کاهشی فشار حاصل از انفجار در تاج تونل، در چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب به حد بهینه خود خواهد رسید.	دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶ کلید واژگان: ماده متخلخل انفجار سطحی پلی‌یورتان تونل پوشش حفاظتی *نویسنده مسئول: محسن فضولی پست الکترونیکی: mfazlavi@tvu.ac.ir



مقدمه

امروزه با گسترش حملات نظامی و تروریستی، افزایش تهدیدات به زیرساخت‌های کشور، محتمل خواهد بود. سازه‌های زیرزمینی؛ از جمله تونل‌ها نیز در برابر انفجارهای رخ داده در سطح زمین و انفجارهای زیرزمینی آسیب‌پذیر هستند. یکی از روش‌های مقابله با اثرات این حملات و کاهش آسیب‌پذیری ناشی از آنها، به‌کارگیری روش‌ها و تمهیدات پیشنهاد شده در دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل است. بدین منظور در طول سالیان متمادی، پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا با بررسی انفجارها و تأثیرات آن‌ها بر سازه‌های زیرزمینی، به شناخت درست و دقیقی از رفتار و پاسخ این سازه‌ها در برابر انفجارها دست یابند. تمهیداتی که برای مقابله با این حوادث و کاهش خرابی‌های ناشی از آن می‌توان در نظر گرفت، به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از این تمهیدات، محاسبه بار دینامیکی ناشی از انفجار و طراحی سازه برای تحمل این بارگذاری است. از دیگر روش‌های ارائه شده می‌توان به طراحی عناصر سازه‌ای برای کاهش مقدار شتاب ناشی از انفجار که به سازه می‌رسد اشاره کرد. همچنین طراحی و در نظرگیری پوشش‌های فداشونده برای جذب انرژی ناشی از انفجار و کاهش میزان انرژی رسیده به سازه، از دیگر روش‌های مقابله با بارهای انفجاری است [۱؛ ۲].

مهندسان ارتش ایالات متحده آمریکا تأثیرات ارتعاشات انفجاری بر سازه‌های زیرزمینی را در سال‌های ۱۹۴۸ الی ۱۹۵۲ با تمرکز بر تأثیر انفجار بر تونل‌ها بررسی کردند که در آن، تعدادی آزمایش در مقیاس انفجار واقعی نزدیک به خطوط تونل غیرپوشیده، بررسی گردید و از نتایج آن در پژوهش‌های محققان دیگر برای صحت‌سنجی مدل‌های نرم‌افزاری استفاده شد [۳]. در سال ۲۰۰۳، ونگ و لی، مدلی سه فازی برای تعریف خاک در نرم‌افزار ارائه کردند که توانایی مدل‌سازی انفجار و انتشار موج انفجاری در خاک را دارد. در ادامه همین پژوهش، یک مدل عددی دوگانه برای مدل‌سازی تونل قرار گرفته در خاک ارائه شد. در این مدل، از روش ترکیبی SPH-FEM استفاده شد که در آن، از روش SPH برای مدل‌سازی انفجار و خاک نزدیک محل انفجار استفاده شد؛ درحالی‌که از روش FEM برای مدل‌سازی خاک دورتر از محل انفجار و مدل‌سازی تونل جهت بررسی پایداری تونل در برابر انفجار استفاده گردید و نتیجه نهایی، همگرایی خوبی بین محاسبات عددی و مدل‌سازی در مقیاس واقعی را نشان داد [۴]. در سال ۲۰۰۶، چیسمن و همکارانش با در نظرگیری آنالیز دوگانه اویلر- لاگرانژ رفتار تونل قرار گرفته در خاک ماسه‌ای اشباع را بررسی کردند. در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی با نتایج مدل‌سازی عددی، مقایسه شده است [۵]. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ یک شبیه‌سازی عددی را برای بررسی پاسخ تونل مترو در شانگهای تحت تأثیر بار انفجاری با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام دادند. آن‌ها از روش ALE استفاده کردند که در آن از مش‌بندی اویلری برای مدل‌سازی هوا، خاک و ماده منفجره و مش‌بندی لاگرانژی برای مدل‌سازی تونل استفاده شده بود. گره‌های ادغام شده برای هر دو بخش، سبب انتقال تنش بین خاک و سازه می‌شود [۶]. ده و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ تحقیقات گسترده خود را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN بر روی لوله‌های مدفون دارای کاور حفاظتی تحت تأثیر انفجار انجام دادند و با مقایسه خروجی نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمایش سانتریفیوژ به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از نرم‌افزار، به واقعیت بسیار نزدیک و قابل قبول است [۷؛ ۸]. تعدادی از محققان از جمله داویه، ویلیامز، ده، کوتر و وایت تاکنون موفق به انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ برای مدل‌سازی و بررسی تأثیرات انفجار بر تونل‌ها شدند. از آنجاکه که دستیابی به اطلاعات قابل اعتماد آزمایش میدانی در مقیاس واقعی، دشوار و سخت است؛ استفاده از آزمایش سانتریفیوژ به‌صورت مقیاس شده در علوم مهندسی مورد توجه است. آن‌ها با بررسی این تأثیرات در تونل‌های دفن شده در خاک خشک و تونل‌های دارای پوشش حفاظتی، نتایج مهم و کاربردی به‌دست آوردند و اطلاعات عددی درباره تأثیرات انفجار بر تونل‌های دفن شده ارائه کردند. البته با توجه به متغیر بودن میدان گرانشی در داخل دستگاه،

¹ Arbitrary Lagrangian Eulerian

مدل سانتریفیوژ به مدل‌های کوچک‌تر محدود می‌شود که ممکن است برای پیش‌بینی رفتار و پاسخ اتصالات پیچی در خطوط تونل دفن شده مناسب نباشد [۸].

با انجام واکنش شیمیایی و ایجاد موج انفجار در ماده منفجره، حجم قابل توجه از گاز با فشار بالا (تا ۳۰۰ کیلو بار) و دمای زیاد (۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه سلسیوس) تولید شده و حجم وسیعی را اشغال می‌کند که با تشکیل لایه هوای فشرده، جبهه موج انفجاری به وجود می‌آید. مقدار این فشار که با فاصله گرفتن از مرکز انفجار تقلیل می‌یابد، از روابط و گراف‌های متعدد ارائه شده در مراجع مختلف قابل محاسبه است. رابطه (۱) برای محاسبه فشار P_s (بر حسب کیلو پاسکال) ناشی از انفجار w کیلوگرم ماده TNT در فاصله R متری از مرکز ماده منفجره است [۹؛ ۱۰].

$$\text{Log}_{10}[\text{Log}_{10}P_s] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.4644 \quad (۱)$$

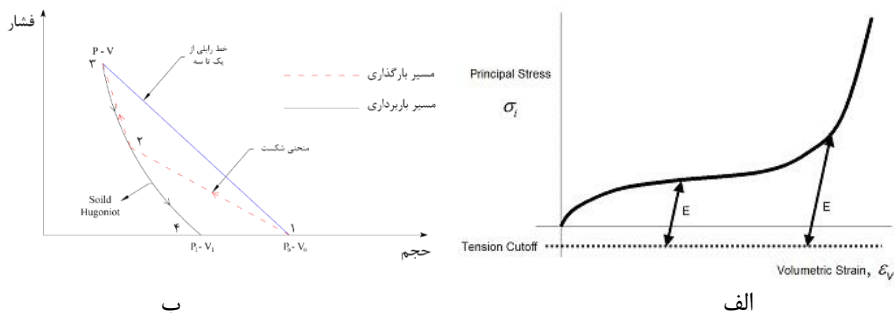
$$X = \text{Log}_{10}(Z)$$

که در آن، Z مطابق رابطه (۲) فاصله مقیاس شده انفجار است.

$$Z = R/W^{1/3} \quad (۲)$$

رفتار دینامیکی مواد متخلخل

در مواد متخلخل، حجم ظاهری اولیه ماده، از حجم اولیه نظیر حالت دانسیته کامل (بدون تخلخل) بیشتر است. چنانچه ماده متخلخل مذکور، تحت فشار و تراکم قرار گیرد، رفتار آن مطابق با نمودار شکل ۱ است. در مسیر تراکم از نقطه یک تا دو، حفرات موجود در ماده متخلخل به‌طور کامل فرو ریخته و بسته می‌شوند. اگر پس از بسته شدن حفرات (نقطه دو)، همچنان بر فشار وارده افزوده گردد، ماده متخلخل شبیه به یک ماده جامد بدون تخلخل رفتار نموده و شاخه بارگذاری از نقطه ۲ به نقطه ۳ ادامه می‌یابد. پس از برداشته شدن بار، مسیر بازگشت منحنی همانند ماده بدون تخلخل است و حجم و فشار ماده از حالت $P-V$ در نقطه ۳ به حالت P_1-V_1 در نقطه ۴ می‌رسد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد ماده متخلخل پس از برداشته شدن بار، حجمی کمتر از حجم اولیه خواهد داشت. در شکل ۱ علاوه بر نمودار رفتار ماده متخلخل که به ترتیب از نقاط ۱ تا ۳ است و در انتها به نقطه ۴ می‌رسد، خط رایلی نیز که نقطه یک را به سه متصل می‌کند رسم شده است. مساحت زیر این خط، نشان‌دهنده انرژی صرف شده برای رساندن ماده متخلخل از وضعیت یک به سه است [۱۱-۱۴].



شکل ۱. الف) رفتار مصالح متخلخل تحت تراکم دینامیکی [۱۱] ب) نمودار تنش-کرنش حجمی مدل رفتاری

Crushable Foam [۱۵]

در همین راستا، معادله حالت تخلخل - فوم شکست پذیر^۱ برای مدل سازی رفتار خردشدگی فوم ها تحت تأثیر بارهای ضربه ای (غیرمتناوب) به کار می رود. نمودار تنش - کرنش حجمی این مدل رفتاری در شکل ۱ نشان داده شده است.

این مدل با الاستیسیته ایزوتروپیک استفاده می شود و حالت الاستیک افزایشده، تابعی از فشار و تنش انحرافی وارده به مدل است و نحوه محاسبه هر کدام از آن ها به ترتیب در روابط (۳) و (۴) ارائه شده است. همچنین برای محاسبه کرنش حجمی، از رابطه (۵) استفاده می شود.

$$P^{n+1} = P^n + K \dot{\epsilon}_v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (۳)$$

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^n + 2G(\epsilon_{ij}^{n+1/2} - \delta_{ij}\epsilon_v^{n+1/2})\Delta t^{n+1/2} \quad (۴)$$

$$\epsilon_v^{n+1/2} = \left(\frac{\dot{V}}{V}\right)^{n+1/2} \quad (۵)$$

در رابطه (۴)، δ_{ij} تابع دلتای کروئکر است. در کرنش حجمی، مقدار تنش های اصلی حاصل شده با مقادیر تنش های مجاز مقایسه می شود. اگر مقدار تنش اصلی، از مقدار تنش مجاز، بیشتر باشد، مقدار تنش اصلی به تنش مجاز کاهش می یابد. منحنی فشردگی این مدل رفتاری می تواند به صورت نمودار چندتکه ای تنش - کرنش حجمی، ارائه شود و کرنش حجمی به صورت نسبت لگاریتم طبیعی نرخ حجمی ماده تعریف شود [۱۵].

مدل سازی انفجار در نرم افزارهای عددی

روش های مختلفی برای مدل سازی انفجار در نرم افزار اتوداین^۲ وجود دارد که در ادامه به معرفی مهم ترین آن ها پرداخته شده است. پس از معرفی هر کدام از این روش ها، یک مدل مبنا که تمام خصوصیات آن یکسان است و تنها روش های مدل سازی انفجار در آن فرق کند مدل شده است تا با استفاده از آن و مقایسه نتایج حاصل از آن بتوان انتخاب درستی از روش مدل سازی انفجار در این مقاله داشت.

۱) مدل سازی انفجار با استفاده از شرط مرزی انفجار سطحی^۳

این شرط مرزی می تواند برای مدل سازی بارهای فشاری ناشی از انفجار بر روی سازه ها اعمال شود. از این روش برای مدل سازی انفجارهای سطحی و اعمال اثر ناشی از انفجار سطحی بر سازه های قرار گرفته روی سطح زمین استفاده می شود و در این گونه از انفجارها، انتقال امواج فشاری از طریق هوا انجام می شود [۱۶].

۲) مدل سازی انفجار با استفاده از تحلیلگر اویلر

مدل سازی انفجار در اتوداین با استفاده از روش تحلیلگر اویلر، طی دو مرحله انجام می شود: گام اول شامل انبساط و گسترش انفجار در حالت یک بعدی دارای تقارن محوری است و تا زمان رسیدن به سطح منعکس کننده موج ادامه می یابد. سپس خروجی تحلیل یک بعدی به مدل دو یا سه بعدی منتقل می شود [۱۶].

¹ Porosity – Crushable Foam

² AUTODYN

³ Analytical Blast

۳) مدل سازی انفجار با استفاده از روش کوپل SPH - FEM

روش مدل سازی کوپل SPH-FEM یک روش بدون مش است و مزیت اصلی این روش نداشتن نیاز به یک شبکه بندی عددی برای محاسبه اجزای موجود در فضا است. این راه حل مفید برای زمانی که از مش بندی لاگرانژ برای شبیه سازی رفتار خاک در مقابل انفجار استفاده می شود کاربرد دارد. در این روش، مصالح و مواد به ذرات جامد متصل هستند. برخلاف روش های بر پایه مش بندی از قبیل لاگرانژ و اوپلر که بین گره های مدل اتصال ایجاد می کند تا مشتقات فضایی شکل بگیرد، روش SPH از تعدادی اجزای دانه ای منفصل تشکیل شده است که براساس یک روش تصادفی توزیع شده اند. در این روش، هیچ فرضی برای ارتباط ذره مورد نظر با ذرات مجاورش در نظر گرفته نمی شود. مواد و مشخصات این ذرات؛ از قبیل جرم، سرعت، موقعیت مواد و سایر مشخصات دیگر را برای معادلات ثابت حمل می کنند [۱۶].

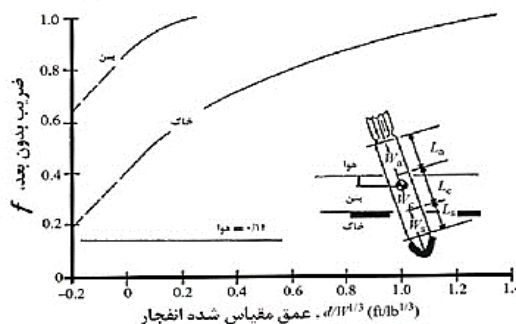
۴) مدل سازی انفجار به صورت اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری

در روش مدل سازی انفجار به صورت اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری، بار فشاری ناشی از انفجار به وسیله رابطه (۶) محاسبه می گردد و مقدار این فشار به صورت مستقیم به دیوار گودال ناشی از انفجار که شعاع آن طبق رابطه (۷) پیشنهاد شده محاسبه می شود، اعمال می گردد [۱۴].

$$P_0 = 0.0488 f_c \rho_s c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (۶)$$

$$R_{vd} = \overline{K_{vd}} \times R_w \quad (۷)$$

در رابطه (۶)، ρ_s چگالی خاک بر حسب (kg/m^3) و c سرعت موج بارگذاری بر حسب (m/s) است که مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است. W وزن ماده منفجره بر حسب (kgf) و R فاصله تا محل انفجار بر حسب (m) است. f_c تأثیر عمق است که تابعی از عمق انفجار از سطح زمین (d) می باشد و از شکل ۲ به دست می آید [۱۷]. n ضریب کاهندگی است و در جدول ۲ مقادیر آن ارائه شده است.



شکل ۲. ضریب f_c نسبت به عمق مقیاس شده انفجار [۱۷]

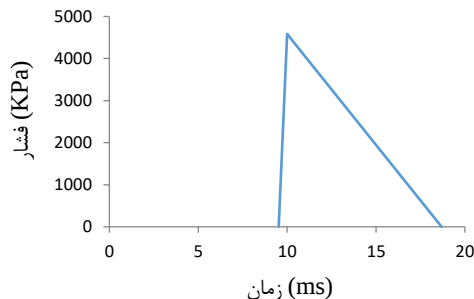
جدول ۱. مقادیر C برای انواع خاک‌ها [۱۷]

انواع خاک	مقدار ضریب C
رس فوق اشباع	$C = C_s$
رس اشباع	$C = 0.6 C_s + \left(\frac{n+1}{n-2}\right) V_0 > C_s$
ماسه	$C = C_s + \left(\frac{n+1}{n-2}\right) V_0$

جدول ۲. مقادیر ضریب کاهندگی n برای انواع خاک‌ها [۱۷]

نوع خاک	ضریب کاهندگی (n)
رس اشباع	1.5
رس نیمه اشباع و سیلت	2.5
ماسه غیرمتراکم (خشک یا مرطوب)	2.5
ماسه متراکم (خشک یا مرطوب)	2.75
ماسه سست (خشک یا مرطوب)	3
ماسه خیلی سست (خشک یا مرطوب)	3.25

در این مقاله، مدل سازی انفجار با استفاده از روش اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده و نمودار تاریخچه زمانی فشار تولید شده ناشی از این انفجار در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین با استفاده از رابطه ۷ مقدار قطر گودال برابر ۶/۰۳ متر به دست آمده است.



شکل ۳. نمودار فشار - زمان ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT

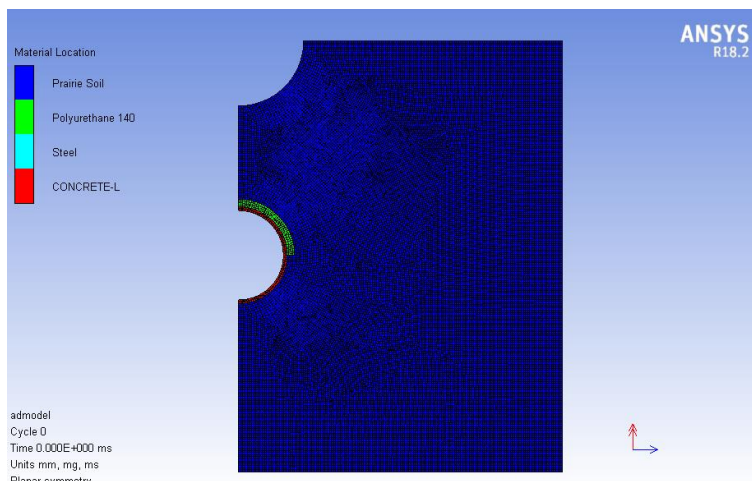
تعریف مدل عددی انفجار و مصالح خاک و تونل در نرم افزار Autodin

به منظور بررسی تأثیرات چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان بر تونل تحت تأثیر انفجار سطحی معادل ۱۰۰ کیلوگرم TNT، ۱۱ مدل به صورت دو بعدی (به دلیل شرایط کرنش مسطح) مدل سازی شده است. یکی از این مدل ها با ضخامت ۷۰ سانتی متر و چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته شده است. برای ۱۰ مدل دیگر، سعی شده که پارامترها ثابت فرض شود و تنها یکی از پارامترهای اصلی که شامل ضخامت و یا چگالی پلی یورتان است تغییر کند، تا تأثیر آن پارامتر بر روی رفتار تونل در برابر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گیرد. در جدول ۳ نام مدل ها و مشخصات دقیق آن ها ارائه شده است.

تونل مورد بررسی دارای قطر داخلی ۱۰ متر و ضخامت پوششی بتنی ۳۵ سانتی متر است که کاربری‌های متفاوت مهندسی همانند تونل‌های راه، راه‌آهن، مترو و آب‌رسان می‌تواند داشته باشد. مطابق شکل ۴ این تونل در عمق ۱۵ متری از سطح زمین قرار دارد و یک لایه پوشش محافظی پلی یورتان به ضخامت مختلف ۰/۶ تا ۱/۵ متر در نیمه بالایی تونل را احاطه کرده است. اطراف و بالای پوشش محافظتی تونل به وسیله خاک آبرفتی احاطه شده و مشخصات دقیق خاک و سایر مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی تأثیرات انفجار روی تونل در حالت‌های مختلف، سنجه‌هایی برای ثبت فشار در قسمت تاج تونل و دیواره کناری تونل و همچنین بررسی صحت انتشار امواج انفجاری در محیط خاک تعبیه شده است. برای مرزهای تماسی خاک با محیط بی‌نهایت، شرط مرزی Transmit و برای محور تقارن عمودی مدل، شرط مرزی Symmetry لحاظ شده است.

جدول ۳. نام مدل‌ها و مشخصات پارامترهای مربوط به آن‌ها

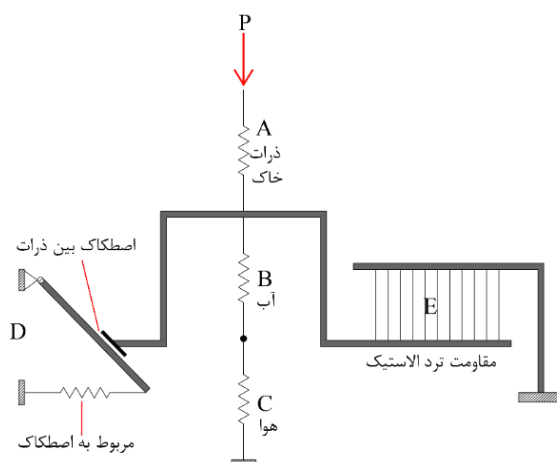
نام مدل	ضخامت پلی یورتان (m)	چگالی پلی یورتان (kgf/cm ³)	توضیحات
A-01	0.7	140	مدل مبنا
A-02	0.6	140	مدل‌های ضخامت متغیر پلی یورتان
A-03	0.8	140	
A-04	0.9	140	
A-05	1.0	140	
A-06	1.5	140	
A-07	0.7	90	مدل‌های چگالی متغیر پلی یورتان
A-08	0.7	175	
A-09	0.7	220	
A-10	0.7	250	



شکل ۴. مدل مبنا با ضخامت پوشش ۰/۷ متر

فضای اطراف تونل به وسیله خاک آبرفتی احاطه شده است و از آنجایی که خاک یک محیط سه فازی شامل دانه‌های خاک، آب و هواست، لازم است که در مدل‌سازی آن در نرم‌افزار، پارامترهای مربوط به سه جز اصلی ذکر شده تعریف

شود. در این پژوهش، روش ارائه شده توسط هنریچ مورد استفاده قرار گرفته است و بر اساس ساختار خاک، یک مدل توسط کنداور ارائه شده که مطابق شکل ۵ است [۱۸]



شکل ۵. مدل ریاضی برای نمایش مدل سه فازی خاک [۱۸]

ذرات خاک به عنوان اسکلت بدنه خاک به صورت بلوک در نظر گرفته می شود. فضای بین ذرات خاک به وسیله آب و هوا پر شده است. مابین گوشه های بلوک ها، مقاومت الاستیک ترد وجود دارد. پس از بارگذاری، تغییر شکل متوسط کلی به همراه کاهش فضای خالی رخ می دهد. همان طور که در شکل ۵ مشخص است المان های A و B و C نشان دهنده تغییر شکل ثانویه در خاک هستند. در حالی که المان های D و E تغییر شکل اولیه در نمونه خاک را نشان می دهند. بر این اساس یک مدل برای خاک به صورت موج شوک تهیه می شود که در جدول ۴ نتایج آن ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای ورودی به نرم افزار جهت تعریف خاک آبرفتی

چگالی خاک ρ	۱/۶۷۴ gr/cm ³
چگالی ویژه دانه های جامد Gs	۲/۶۴۰
معادله حالت EOS	Compaction
مدل مقاومتی Strength Model	MO Granular
معیار خرابی Failure Criteria	Hydro-Tensile Criteria Hydro tensile limit (KPa)=- 1

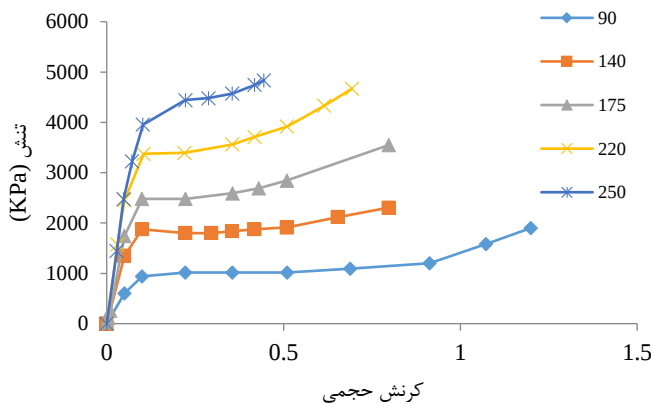
برای مدل سازی ماده فولاد از معادله حالت خطی و معادله مقاومت جانسون- کوک استفاده شده است و برای مدل سازی بتن از معادله حالت P- α و معادله مقاومت و شکست RHT¹ استفاده شده است. پارامترهای معادله حالت پی آلفا و معادله مقاومت و شکست RHT برای بتن ۳۹/۵ مگا پاسکال از کتابخانه مواد نرم افزار اتوداین قابل استخراج

¹ The Riedel-Hiermaier-Thoma

است [۱۵]. برای مدل‌سازی پلی یورتان از نتایج آزمایش توپچی نژاد و اندامی استفاده شده [۱۱؛ ۱۹] و پارامترهای اصلی و نمودارهای مربوط به معرفی این ماده به نرم‌افزار در جدول ۵ و شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر ورودی به نرم‌افزار برای تعریف مدل ماده پلی یورتان [۱۱؛ ۱۹]

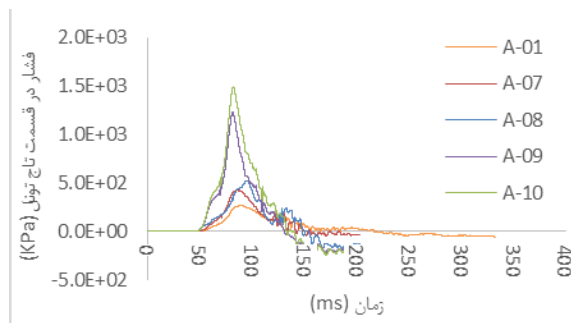
چگالی پلی یورتان ρ	$0.175 - 0.14 - 0.09 \text{ gr/cm}^3$ $0.250 - 0.220 \text{ gr/cm}^3$
معادله حالت EOS	Crushable Foam
معیار Erosion	Geometric Strain Erosion Strain = 0.76



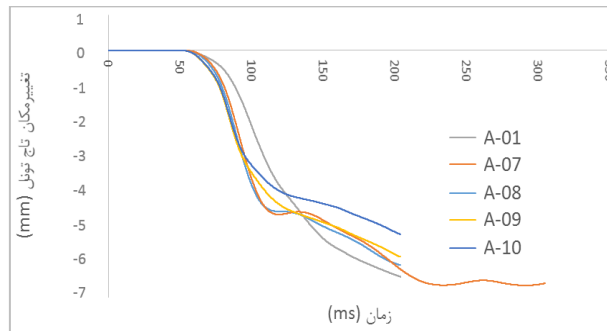
شکل ۶. نمودارهای تنش-کرنش حجمی برای فوم‌های پلی یورتان [۱۱؛ ۱۹]

بررسی تأثیرات تغییر پارامترهای پلی یورتان

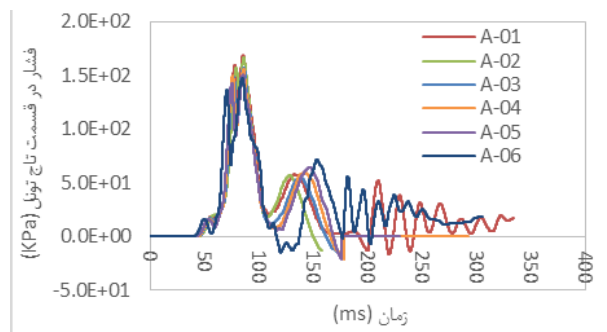
به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت و همچنین تأثیر چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان بر رفتار تونل زیرزمینی تحت تأثیر انفجار سطحی، نمودارهای تاریخچه زمانی فشار و تاریخچه زمانی تغییرمکان قائم تاج تونل از نرم‌افزار استخراج شده و در شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۱ موقعیت قرارگیری سنج‌ها نشان داده شده است.



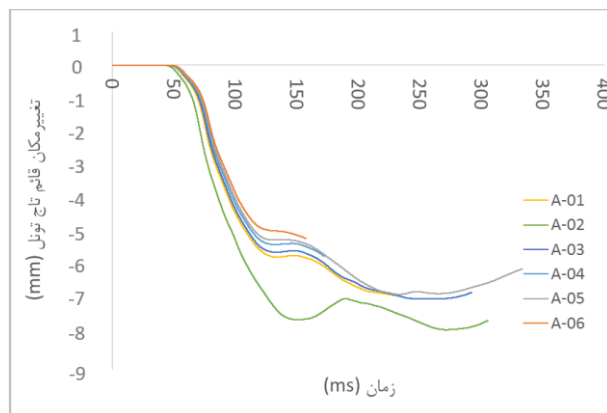
شکل ۷. نمودار فشار-زمان تاج تونل در حالت چگالی متغیر پلی یورتان (نتایج سنج شماره ۴)



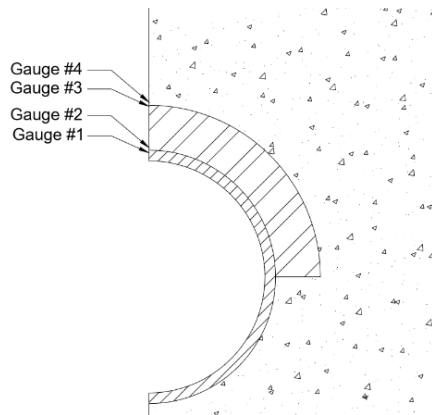
شکل ۸. نمودار تغییر مکان - زمان تاج تونل در حالت چگالی متغیر پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۴)



شکل ۹. نمودار فشار - زمان تاج تونل در حالت تغییر ضخامت پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۱)



شکل ۱۰. نمودار تغییر مکان - زمان تاج تونل در حالت تغییر ضخامت پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۱)

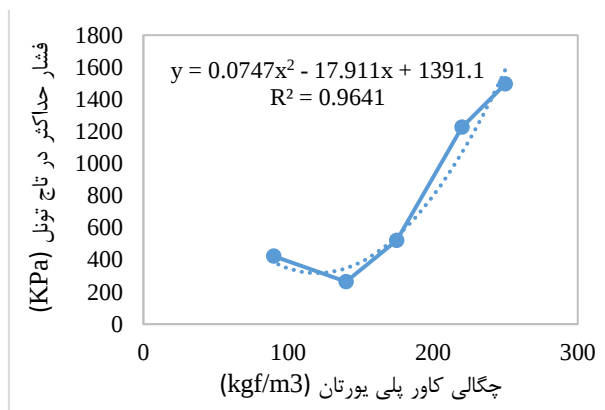


شکل ۱۱. موقعیت قرارگیری سنج‌های تاج تونل

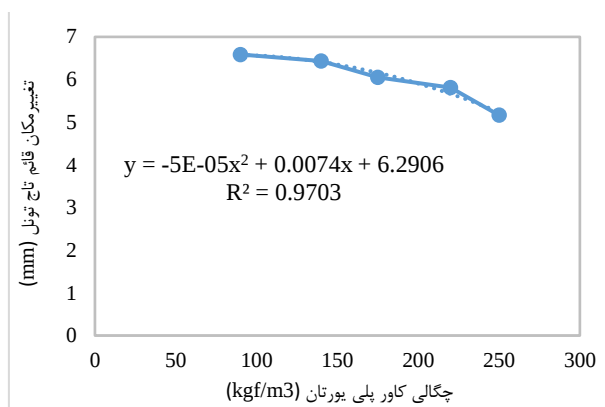
تأثیر تغییر چگالی پلی یورتان در فشار و تغییر شکل تونل

بیشینه فشار حاصل از انفجار در سنج شماره ۱ در مدل‌های مینا و ۷ تا ۱۰ در نمودار شکل ۱۲ ارائه شده است. در بررسی تأثیر چگالی پلی یورتان، شکل ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش چگالی فوم پلی یورتان، میزان تغییر شکل قائم، کرنش و همچنین فشار وارد شده به قسمت تاج تونل کاهش می‌یابد. اما این کاهش تا چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب ادامه دارد و با افزایش چگالی فوم از ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، افزایش تغییر مکان قائم، کرنش و همچنین افزایش فشار در قسمت تاج تونل مشاهده می‌شود. علت این امر، افزایش تعداد حفرات موجود در فوم با کاهش چگالی است. با افزایش تعداد حفرات، انرژی بیشتری در فرو ریختن دیواره حفرات مستهلک کرد. در چگالی‌های کمتر از ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب با وجود افزایش کمی مقدار حفرات به دلیل کاهش چگالی، رفتار فوم و عملکرد آن در کاهش بیشینه فشار، دچار ضعف می‌گردد و کاهش چگالی، تأثیری بر کاهش بیشینه فشار بر تونل ندارد. علت این تغییر رفتار فوم را می‌توان ضعیف شدن مشخصات مکانیکی فوم (مدل الاستیسیسته- تنش فرو ریختگی) در اثر کاهش بیش از حد چگالی دانست.

شکل ۱۳، نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی قائم ایجاد شده در قسمت تاج در برابر تغییر چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان را نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش چگالی پوشش پلی یورتان، کاهش نسبتاً خطی تغییر مکان ایجاد شده در تاج تونل مشاهده می‌شود. علت این موضوع را می‌توان در افزایش صلبیت خمشی و مقاومت در برابر شکست فوم‌های پلی یورتان با افزایش چگالی آن‌ها دانست.



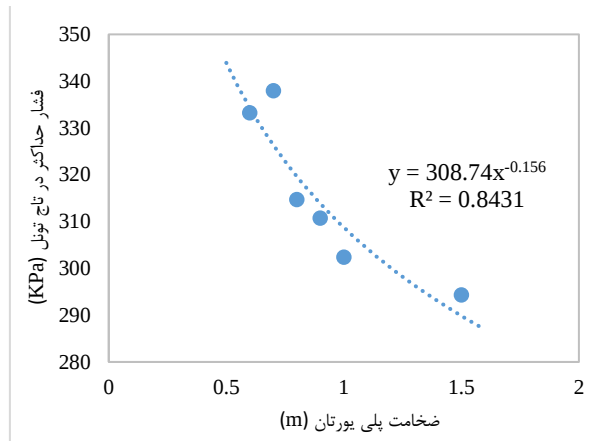
شکل ۱۲. نمودار حداکثر فشار تاج تونل در برابر تغییرات چگالی پوشش پلی یورتان



شکل ۱۳. نمودار حداکثر تغییر مکان قائم تاج تونل در برابر تغییرات چگالی پوشش پلی یورتان

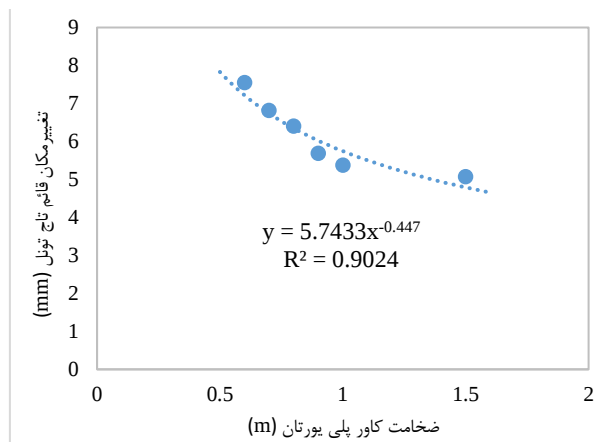
تأثیر تغییر ضخامت پلی یورتان در فشار و تغییر شکل تونل

در شکل ۱۴، نمودار تغییرات حداکثر فشار اندازه‌گیری شده در قسمت تاج تونل در برابر تغییر ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در مدل‌های ۱ تا ۶ که ضخامت پوشش در آن‌ها متغیر است، افزایش ضخامت پوشش حفاظتی، باعث کاهش فشار انفجاری وارد شده به تونل می‌شود اما روند کاهش فشار با ضخامت تابعی خطی نیست. از طرفی با توجه به نمودار شکل ۱۵ که مربوط به حداکثر جابه‌جایی قائم تونل نسبت به ضخامت پوشش است، مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت پوشش پلی یورتان، باعث کاهش تغییر مکان قائم قسمت تاج تونل در برابر بار انفجاری می‌شود. با توجه به اختلاف تراز بالای پوشش حفاظتی در مدل‌های ۱ تا ۶ نسبت به همدیگر، از فشار اندازه‌گیری شده در پشت لایه فوم به‌عنوان معیاری برای سنجش توانایی فوم در جذب انرژی توسط مکانیزم فشاری آن و همچنین مقدار نیروی منتقل‌شده به جداره تونل استفاده شده است.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر فشار تاج تونل در برابر تغییرات ضخامت پوشش پلی یورتان

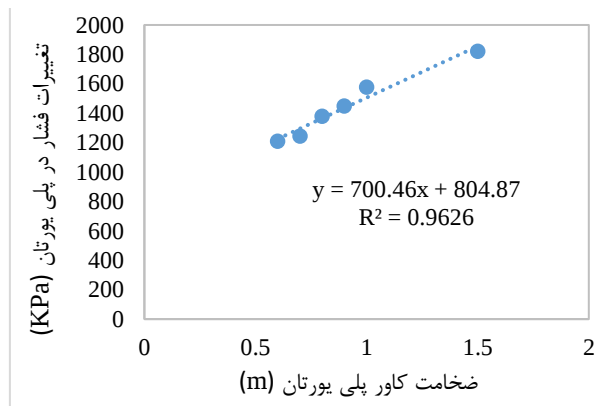
جدول ۶ درصد اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در سنجه‌های ۱ و ۴ (بیرون فوم و روی تونل) را در ضخامت‌های مختلف پلی یورتان نشان می‌دهد. با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که در حالتی که ضخامت پوشش پلی یورتان برابر ۱/۵ متر است، فشار انفجار در بالای تونل کاهش ۸۶/۰۹ درصدی نسبت به خاک بالای پلی یورتان و قبل از ورود پالس انفجاری به محیط پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. با بررسی درصد تغییرات فشار انفجاری در پلی یورتان با ضخامت‌های مختلف، مشاهده شده است که این تغییرات به‌صورت تقریباً خطی به ضخامت مدل وابسته می‌باشد که در شکل ۱۶ و مقادیر آن در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۵. نمودار حداکثر جابه‌جایی قائم تاج تونل در برابر تغییرات ضخامت پوشش پلی یورتان

جدول ۶. فشار در سنجه‌های ۱ و ۴ در حالت ضخامت متغیر پلی یورتان

نام مدل	ضخامت PU m	فشار در گیج #1 KPa	فشار در گیج #4 KPa	درصد اختلاف
A-02	0.6	353.6	1562.9	77.39
A-01	0.7	338.0	1581.9	78.63
A-03	0.8	314.7	1695.3	81.44
A-04	0.9	310.7	1760.2	82.35
A-05	1.0	302.4	1879.7	83.91
A-06	1.5	294.3	2115.4	86.09



شکل ۱۶. نمودار تغییر فشار در سنجه‌های ۱ و ۴ نسبت به ضخامت پلی یورتان

نتیجه‌گیری

- در این مقاله، تأثیرات چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان در تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر انفجار، بررسی شد و نتایج زیر پس از بررسی اطلاعات حاصل از تحلیل نرم‌افزاری به دست آمد:
- افزایش ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان، تأثیر به‌سزایی در کاهش مقدار فشار وارد شده به تاج تونل و کاهش تغییر مکان قائم تاج تونل می‌شود و این مسئله به دلیل افزایش صلبیت خمشی پوشش و افزایش میزان جذب انرژی آن و جلوگیری از وارد شدن فشار اصلی ناشی از انفجار به تاج تونل است؛ به‌گونه‌ای که در حالتی که ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان برابر ۱/۵ متر است، کاهش ۸۶ درصدی مقدار فشار وارد شده به تاج تونل مشاهده شد که رابطه‌ای نسبتاً خطی تغییرات فشار با ضخامت‌های مختلف پلی یورتان برقرار است.
 - چگالی پوشش پلی یورتان، یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار در کاهش مقدار فشار وارده به تاج تونل تحت تأثیر انفجار است. با بررسی مقدار فشار حداکثر در تاج تونل مشاهده شده است که با کاهش چگالی تا ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین کاهش فشار در تاج تونل رخ داده است و کاهش بیشتر چگالی، تأثیری بر کاهش فشار بیشینه بر تونل ندارد. از طرفی باید توجه داشت که تغییر مکان قائم تاج تونل با کاهش چگالی پلی یورتان افزایش یافته است اما در محدوده چگالی‌های ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، این روند افزایشی، ثابت می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار فشار در تاج تونل و مقدار تغییر مکان قائم تاج تونل در محدوده قابل قبولی و بهینه برای

استفاده خواهد بود و می توان این محدوده چگالی را به عنوان حالت بهینه برای چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان در نظر گرفت.

References

- [1] Endo, K., Kitagawa, K., & Yasuhara, M. (2009, June 22-25). *Diffusion Effect of Blast Pressure in Porous Complex Media*. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San antonio, Texas. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-3569>
- [2] Lee, M., Wang, GM., Sung, PH., Chang, WL., Lee, YL., & Lin, K. (1986). The attenuation of shock waves in PU foam and its application. In *Shock Waves in Condensed Matter*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2207-8_101
- [3] Hall, W. J., Newmark, Nathan Mortimore & , & ,Hendron, A. J. (1974). *Classification, Engineering Properties and Field Exploration of Soils, Intact Rock and in Situ Rock Masses*. U.S. Atomic Energy Commission. <https://books.google.com/books?id=ai9IAQAAMAAJ>
- [4] Lee, W. Y. (2006). *Numerical Modeling of Blast-Induced Liquefaction* [Doctor of Philosophy, Brigham Young]. Provo, Utah, United States. https://scholarsarchive.byu.edu/etd?utm_source=scholarsarchive.byu.edu%2Fetd%2F524&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- [5] Cheeseman, B. A., Wolf, S., Yen, C. F., & Skaggs, R. (2006). Blast simulation of explosives buried in saturated sand. *Fragblast*, 10(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1080/013855140500432045>
- [6] Yang, Y., Xie, X., & Wang, R. (2010). Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(4), 373-384. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2.010.00373>
- [7] De, A. (2012). Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 43, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.0.2.007>
- [8] De, A., Morgante, A. N., & Zimmie, T. F. (2016). Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.06.008>
- [9] Lezgi, M., Izadifard, Ramazan Ali., & Lashgari, Mohammad Reza. (2017). Evaluation Of Nonlinear Response Of Reinforced Concrete Frames Designed According To Earthquake Codes And Subjected To Blast Loading. *Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology* 8(3), 201-212. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=572971>
- [10] Izadifard, R. A., & Foroutan, M. (2010). Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34(1), 25-42. <https://doi.org/10.3906/muh-0911-39>
- [11] Andami, M. (2016). *The Performance of high density polyurethane foams in blast damage mitigation* [MSc Thesis, Razi University]. Kermanshah, Iran.
- [12] Boey, C. W. (2009). *Investigation of shock wave attenuation in porous materials* [Masters, Naval Postgraduate School]. Monterey, California. <https://hdl.handle.net/10945/4386>
- [13] Herrmann, W. (1969). Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials. *Journal of Applied Physics*, 40(6) .<https://doi.org/10.1063/1.165.8021>

- [14] Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)
- [15] Hallquist, J. O. (2007). *LS-DYNA keyword user's manual*. L. S. T. Corporation. https://pdfhall.com/ls-dyna-version-970-keyword-users-manual-ftp-directory-listing_5b2e78c0097c4731608b458b.html
- [16] Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., & Chong, K. (2005). A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. *Computers & Structures*, 83(4-5), 339-356. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.014>
- [17] Code, I. N. B. (2008). *Passive defense* (part 21) .
- [18] Henrych, J., & Major, R. (1979). *The dynamics of explosion and its use*. Elsevier Amsterdam. https://books.google.com/books/about/The_Dynamics_of_Explosion_and_Its_Use.html?id=yeRdswEACAAJ
- [19] Andami, M. H., & Toopchi Nezhad, H. (2018) .The Performance Of Rigid Polyurethane Foams In Damage Mitigation Of Structures Due To The Impact Of A Supersonic Projectile. *Mechanical Engineering Sharif (Sharif: Mechanical Engineering)*, 34-3(2), 133-140. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=822650>



Comparison of Environmental Laws of Mines in Iran, Australia, Chile, India, Turkey, Canada, South Africa, and China

Morteza Hashempour¹, Mehdi Ghazanfari^{2*}

¹PhD, Department of Intelligent systems, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

²Professor, Department of Intelligent systems, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.09.2020

Revised: 12.24.2020

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Mining industry
Environmental laws
Governance
Government roles
Conceptual framework

*Corresponding Author:

Mehdi Ghazanfari

Email: mehdi@iust.ac.ir

ABSTRACT

Due to the important environmental effects on human life and the conflict between the mining process and environmental factors, the enactment of protectionist environmental laws in the mining industry has received extensive attention particularly in countries with high mineral potential. In this regard, this study developed a novel conceptual framework to identify the environmental protection laws in Iran by considering the mining environmental laws and regulations in different countries such as Australia, Chile, India, Turkey, Canada, South Africa, and China. This helps to apply the experiences of the abovementioned countries in resolving similar conflicts in Iran's mining industry. The environmental protection laws were selected based on their legislation background in the field of mining, participation in environmental treaties, success in the field of mining trade, and pioneering in the revision of mining laws. The proposed framework demonstrated that Iran's mining environmental laws require revision and more transparency to avoid ambiguity and conflict with mining property laws and governmental rights.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفصیلی‌تر

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۱، ۱۵۱-۱۳۹

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

doi:10.48301/KSSA.2021.131054

20.1001.1.23829796.1400.18.1.7.6



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

مقایسه نظام مالکیت حاکم بر قوانین زیست‌محیطی معادن ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین

مرتضی هاشم‌پور^۱، مهدی غضنفری^{۲*}

۱- دکتری، گروه سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

با توجه به اهمیت محیط‌زیست بر زندگی انسان و تعارض بین فرایند استخراج و عوامل محیطی، تصویب قوانین حمایت از محیط‌زیست در صنعت معدن به‌ویژه در کشورهایی که پتانسیل معدنی بالایی دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، این مطالعه، یک چارچوب مفهومی جدید برای شناسایی قوانین حفاظت از محیط‌زیست در ایران با در نظر گرفتن قوانین و مقررات محیط‌زیستی معدن در کشورهای مختلف مانند استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین نشان می‌دهد. این امر به کاربرد تجربیات این کشورها در حل منازعات مشابه در صنعت معدن ایران کمک می‌کند. قوانین حفاظت از محیط‌زیست براساس پیشینه قانون‌گذاری در زمینه معدن، مشارکت در معاهدات زیست‌محیطی، موفقیت در زمینه تجارت معدن و پیشگام در بازنگری قوانین معدن انتخاب شده است. چارچوب پیشنهادی نشان می‌دهد که قوانین زیست‌محیطی معدن ایران برای جلوگیری از ابهام و بازنگری، نیاز به تجدیدنظر و شفافیت بیشتر دارد تا از بروز ابهام و تعارض با قوانین مالکیت معدنی و حقوق دولتی جلوگیری شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

قوانین معدنی

محیط‌زیست

حکمرانی

نقش‌های دولتی

چارچوب مفهومی

*نویسنده مسئول: مهدی غضنفری

پست الکترونیکی:

mehdi@iust.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

حق زیستن در محیط‌زیست سالم، یکی از حقوق اساسی بشر است [۱]. فعالیت‌های توسعه‌ای انسان، تأثیرات مختلفی بر محیط‌زیست خواهد داشت اما نمی‌توان به‌طور کلی این فعالیت‌ها را محدود کرد. معدن‌کاری، به‌عنوان یکی از حوزه‌های فعالیت انسانی، در ارتباط مستقیم با طبیعت و محیط اطراف معدن است و به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، منجر به مشکلات و فرصت‌هایی می‌شود. این مشکلات، به عوامل گوناگونی نظیر توپوگرافی، خصوصیات خاک، پتانسیل رشد گیاهان، نوع فرایند معدن‌کاری و ... بستگی دارد. هر کشور، قوانین زیست‌محیطی خاص خود را دارد. معمولاً برای شروع فعالیت‌های معدن‌کاری نیاز به تأیید یا مجوز محیط‌زیست است [۲].

شناسایی دقیق تهدیدات زیست‌محیطی ناشی از توسعه معادن، یکی از حوزه‌های زمین‌شناسی زیست‌محیطی است [۳]. حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار معدنی، بدون وجود ضوابط قانونی منسجم و مشخص و قوانین مستدل با پشتوانه اجرایی قوی، ممکن نیست. توجه به اهمیت محیط‌زیست معادن، به‌ویژه مسئله معادن متروک و بازگرداندن محیط معدن به چرخه طبیعی حیات، از موضوعات قانونی موردبحث در بیست سال گذشته است. کشورهایی نظیر استرالیا، شیلی و کانادا ضمن توجه مطلوب به این مسئله، با تغییر قوانین و رویکردهای نظارتی خود، سعی در بهبود محیط‌زیست داشته‌اند. این امر در حالی صورت گرفته است که کشورهایی نظیر چین بدون توجه به مسائل زیست‌محیطی اقدام به بهره‌برداری از معادن می‌کنند. ایران با جنگل‌زدایی گسترده، تخلیه پساب‌های آلوده، فرسایش خاک، آلودگی آب‌های زیرزمینی و نابودی زیستگاه‌های طبیعی، در معرض استفاده نادرست از محیط‌زیست است. بررسی قوانین معدنی مرتبط به محیط‌زیست سایر کشورها و الگوپذیری از آنها برای تغییر سازوکارهای قانونی می‌تواند فرصتی برای شروع حرکت در جهت صحیح و با انگیزه برای همه ذی‌نفعان باشد [۴].

امروزه، مسائل زیست‌محیطی مرتبط با معادن، مسئله‌ای مهم در همه کشورهاست و قوانین حمایت و حفاظت از محیط‌زیست روزبه‌روز سختگیرانه‌تر می‌شوند. معادن علاوه بر اینکه شمای منطقه جغرافیایی مورد بهره‌برداری را بر هم می‌زنند، با آزادسازی گروهی از عناصر مضر و سمی از طریق فراوری ماده معدنی و انباشته‌های مواد باطله آن به سیستم آب‌شناختی منطقه، موجب آلودگی آب و خاک می‌شوند. این آلاینده‌ها تأثیرات نامطلوب زیست‌محیطی بر گیاهان، جانوران و انسان از طریق استفاده از این منابع دارند و باعث ایجاد مسمومیت، بیماری و در مواردی، مرگ می‌شوند. فعالیت‌های معدنی در مراحل مختلف اکتشاف، استخراج، فراوری و در نهایت، باطله‌ها و معادن متروکه محیط‌زیست را متأثر می‌سازد. آلودگی صوتی و مهاجرت حیات وحش، تخریب چشم‌انداز طبیعی و زهاب‌های اسیدی، از جمله مهم‌ترین تأثیرات منفی معدن‌کاری بر محیط‌زیست به صورت عام است [۲]. حکمرانی خوب برای اطمینان از توجه به پیامدهای زیست‌محیطی معدن و حمایت از مشارکت‌های زیست‌محیطی، ضروری است. این امر به سیاست‌های واضحی نیاز دارد. این مقاله تطبیقی سعی دارد تا با بررسی پیشرفت‌های قانونی کشورهای پیشرفته معدنی و توجه به خلأهای موجود در قوانین ملی و معدنی برخی از کشورها، به ارائه پیشنهادهایی برای توسعه قوانین معدنی ایران در حوزه محیط‌زیست بپردازد. حقوق محیط‌زیست به‌وسیله محتوای خود، به سلامت عمومی و حفظ تعادل اکولوژیک کمک می‌کند و نوعی تعهد به دریافت نتیجه در آن‌ها مستتر است. این حقوق با هدف کاهش آلودگی‌ها و اصلاح کیفیت زندگی موجودات زنده، غالباً در تعارض با منافع اقتصادی موجود در حقوق مالکیت، آزادی، تجارت، صنعت و ... هستند [۵]. در این موارد لازم است قانون‌گذار حسب مورد و از طریق ابزارهایی، به شناسایی تهدیدات زیست‌محیطی بپردازد و با وضع قوانین و مقررات صلاحیت‌دار نسبت به شناسایی تهدیدات زیست‌محیطی ناشی از معادن و حل تعارضات اقدام کند [۶].

یکی از ویژگی‌های بنیادین حقوق، ضمانت اجرایی آنهاست. از این‌رو علاوه بر بررسی قوانین و نگرش جهانی به حوزه مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از معدن، لازم است شیوه برخورد با متخلفان و ناقضان حقوق نیز بررسی شود. این مقابله، به دو صورت کیفری، مدنی و اداری صورت می‌پذیرد. در مقابله کیفری، آثار جزایی بر مجرم متحمل می‌شود در

حالی که در مقابله مدنی، خاطی ملزم به جبران خسارت است. در مقابله اداری، نهادهای اداری صالح با اتکا به اختیارات خود، نسبت به صدور، تعلیق یا لغو مجوز زیست‌محیطی اقدام می‌کنند یا تکالیف جدیدی را به فعالان این عرصه تحمیل می‌کنند [۴].

ضوابط زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی ایران، وزارت صنعت، معدن و تجارت را ملزم می‌دارد پیش از صدور و تمدید هرگونه مجوز اکتشاف و بهره‌برداری، نظر سازمان حفاظت محیط‌زیست را استعلام کند. همچنین در مورد برخی از معادن، صدور پروانه و شروع فعالیت، منوط به ارائه گزارش ارزیابی محیط‌زیستی براساس یک الگوی معین توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست است. این قانون، دارنده پروانه بهره‌برداری را مکلف و متعهد به بازسازی و ترمیم محدوده اکتشاف یا بهره‌برداری در پایان عمر پروانه مربوطه می‌کند. همچنین بیان می‌دارد که اگر محدوده عملیات معدنی در منابع ملی و طبیعی واقع شده باشد، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور موظف به تأمین اعتبار از محل درآمد قانون معادن است. در کنار قوانین خاص معادن، با قوانین حفاظت و به‌سازی محیط‌زیست، ماده ۶۸۸ قانون مجازات اسلامی، قانون جلوگیری از آلودگی آب، آیین‌نامه اجرایی جلوگیری از آلودگی آب، قانون جلوگیری از آلودگی هوا، آیین‌نامه اجرایی نحوه جلوگیری از آلودگی هوا، آیین‌نامه اجرایی جلوگیری از آلودگی صوتی، قانون مدیریت پسماندها به مقابله با تهدیدات زیست‌محیطی ناشی از معادن می‌پردازد. استرالیا به‌عنوان یکی از پیشروترین کشورهای معدنی جهان، با اصلاح و بازنگری مداوم قوانین معدنی خود، به ساده‌سازی روند سرمایه‌گذاری و معدن‌کاری در کنار رعایت استانداردهای بالای زیست‌محیطی کمک می‌کند [۷].

از دهه ۱۹۹۰، محیط‌زیست اهمیت بسیاری در سیاست‌گذاری شیلی پیدا کرده است. شیلی، به‌عنوان یک قطب معدنی برجسته، با عضویت در معاهدات زیست‌محیطی سعی در حرکت به سوی تولیدات معدنی سبز و صنایع کم‌آلاینده دارد. امروزه بسیاری از معادن بزرگ‌مقیاس این کشور، گواهی‌نامه‌های استاندارد سیستم مدیریت زیست محیطی ISO 14001 را از نهادهای معتبر تأیید صلاحیت دریافت کرده‌اند که به معنی رعایت سطح بالایی از استانداردهای زیست‌محیطی در این صنایع است. حمایت‌های شایان توجه دولت از دارندگان این گواهی‌ها، سایر معادن را به سمت تغییر رویه و دریافت استانداردهای بین‌المللی محیط‌زیستی سوق می‌دهد [۸؛ ۹].

کانادا بزرگ‌ترین صادرکننده محصولات معدنی جهان و یکی از صادرکنندگان کالای وابسته به محصولات فلزی و معدنی است. پروژه‌های معدنی در این کشور منوط به هم‌پوشانی با قوانین محیط‌زیست فدرال و استانی و تابع قوانین ارزیابی دوره‌ای محیط‌زیست، ممنوعیت تخلیه پساب و پایش مداوم سلامت محیط‌زیست معدن است [۱۰].

آفریقای جنوبی به‌عنوان یک اقتصاد نوظهور و موفق معدنی، تمرکز بسیاری در توسعه معادن و صادرات فراورده‌های معدنی دارد. بر این اساس، مقررات معدنی به دولت این اجازه را می‌دهد که پروژه‌های معدنی‌ای که نیاز به تأمین مالی دارند را از پیگیری‌های زیست‌محیطی اثرات مربوط به معدن معاف کند. البته طبق قانون، شرکت‌های معدن آفریقای جنوبی موظفند توانبخشی معادن متروک را به‌عنوان بخشی از عملیات معدن‌کاری انجام دهند [۱۱؛ ۱۲].

صادرات مواد معدنی هند، یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی این کشور است. قانون توسعه و مقررات معادن و مواد معدنی این کشور به دولت مرکزی اختیار می‌دهد تا دستورالعمل‌هایی را برای پایش محیط‌زیست معادن صادر کند. اصلاحیه قانون معادن، در سال ۲۰۰۶، تمام معادن را صرف‌نظر از اندازه و ماهیت مواد معدنی (عمده و جزئی) ملزم می‌کند که گواهی‌های محیط‌زیستی دریافت کنند [۱۳].

دولت چین به‌عنوان یک قطب معدنی، سیاست‌های نسبتاً سهل‌گیرانه‌ای در قبال محیط‌زیست معدن دنبال می‌کند. قانون حفاظت از محیط‌زیست در چین، فرایندهای معدن‌کاری را در زمره پروژه‌های ساختمانی در نظر می‌گیرد و به لزوم ارزیابی اثرات زیست‌محیطی اشاره می‌کند. شروع و پیشرفت پروژه‌های معدنی، منوط به تأیید ارزیاب

اثرات زیست‌محیطی است. با این حال، این ارزیابی، تابع شرایط و متغیرهای زیادی است که شرایط را برای دریافت پروانه کار دشوار نمی‌سازد [۱۴].

ترکیه به‌عنوان کشوری با ذخایر معدنی قابل‌توجه، با وضع قانون جدید معادن، به‌دنبال افزایش سهم معدن در تولید ناخالص ملی است. با این حال، شتاب در تولید محصولات معدنی، منجر به نادیده گرفتن قوانین و مقررات زیست‌محیطی نشده و تخطی از قوانین ملی محیط‌زیست ترکیه که برگرفته از قوانین اتحادیه اروپا است، منجر به برخوردهای کفیری و اداری می‌شود. مجموعه این برخوردها در کنار حمایت‌های دولت، از اجرای استانداردهای محیط‌زیستی، باعث کنترل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی شده است [۱۵].

نقش معادن در رشد اقتصادی، بسیار جدی و راهبردی است و بهره‌برداری از معادن کشور، یک ضرورت انکارناپذیر در توسعه اقتصادی محسوب می‌شود. شناسایی منابع ذخایر معدنی در مناطق اولویت‌دار و ارتقای سهم معدن و صنایع معدنی در اقتصاد کشور، هدفی است که برای رسیدن به آنها چهار راهبرد: ۱- توسعه سرمایه‌گذاری، زیرساخت و فناوری در حوزه اکتشافات و استخراج معدنی ۲- ارتقای بهره‌وری، برداشت صیانتی از معادن با رعایت الزامات زیست‌محیطی در راستای افزایش رقابت‌پذیری ۳- تکمیل زنجیره ارزش در معدن و صنایع معدنی ۴- بهبود مستمر فضای انجام کسب‌وکار و ۱۵ هدف کمی در نظر گرفته شده است اما برای حصول بیشترین نتیجه در حوزه معدن، نیاز است نگاه‌های حاکم بر آن تغییر یابد و ارتباط معدن، اقتصاد و سیاست به‌درستی تبیین شود. معدن‌کاری، یک کاربری موقت از زمین است. هرگاه استخراج معدن، دیگر اقتصادی نباشد، پایان عمر معدن اعلام می‌شود و فضای معدن به‌صورت متروکه درمی‌آید. با متروکه شدن معدن، جوامع محلی با معضلات مربوط به مناظر تخریب‌شده، کیفیت محیطی پایین‌آمده، آب‌های زیرزمینی آلوده، مواد سمی رهاسازی‌شده و انبوهی از مشکلات اجتماعی و اقتصادی، درگیر می‌شوند. از این رو دولت‌ها در پی وضع قوانین و مقرراتی هستند که کارفرما را نسبت به پایان عمر معدن متعهد کند. سرمایه‌گذاری روی معادن طبیعی، براساس مبنای قانونی‌ای انجام می‌شود که پس از اتمام استخراج منابع و اجازه معدن‌کاری، با واگذاری زمین معدن جهت مصارف دیگر و به‌ویژه کسب درآمد از آن، خطرات ناشی از استفاده از معادن بهتر اداره می‌شود. تغییر کاربری اراضی، فقط یکی از برنامه‌های بسیاری است که باید برای دستیابی به بهترین روش برای بسته شدن معدن در نظر گرفته شود. رویکرد جامع‌تر، در نظر گرفتن نوع و شدت مزاحمت اراضی معدن‌کاری شده است تا مرحله توانبخشی به تناسب نوع مزاحمت معدن انتخاب شود. نمونه‌های موفق زیادی در سراسر جهان وجود دارد که در استفاده از اراضی معدن، ابتکار عمل به‌خرج داده‌اند [۱۶؛ ۱۷].

در این مقاله برای اولین بار در ایران، نظام مالکیت حاکم بر قوانین زیست‌محیطی معادن ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین، مقایسه و راه‌کارهای عملی برای بهبود قوانین زیست‌محیطی معادن ارائه شده است.

پیشینه تحقیق

شای و همکاران (۲۰۲۰) سیاست زیست‌محیطی دولت‌های مرکزی و محلی برای عناصر نادر خاکی در چین را بررسی کردند. تولید عناصر نادر خاکی باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود. از این رو ارائه پیشنهادها قانونی برای کنترل و پایش میزان آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید آنها لازم است. در این مطالعه، پژوهشگران، پیشنهادها قانونی را برای رسیدن به سطح مطلوبی از شاخص‌های محیط‌زیستی ارائه دادند [۱۸].

جیکل (۲۰۲۰)، استراتژی مدیریت محیط‌زیست برای معادن عمیق دریایی را مورد بحث قرار داد. این مطالعه بر اساس برنامه استراتژیک ۵ ساله مدیریت محیط‌زیست سازمان بین‌المللی دریایی که در سال ۲۰۱۸ تصویب شده بود، پایه‌گذاری شد و پوشش قانونی این استراتژی مدیریت محیط‌زیست را بررسی کرد و نشان داد که هرچند این استراتژی توانسته بسیاری از موارد مورد مناقشه و بررسی را تعیین تکلیف کند اما قوانین ارائه شده کامل نبود و نقاط مبهمی وجود دارد [۱۹].

کی‌وین (۲۰۱۷) ویژگی‌های پهنه‌ها و کاربری اراضی پس از استخراج در ۵۱ مکان معدن فلزی در فنلاند را بررسی کرد. این معادن طی دوره زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۴ بسته شدند و بیش از نیمی از آنها بیش از ۱۰ سال فعال بودند. این مطالعه، شاخص‌های مورد استفاده برای بررسی سلامت محیط‌زیست به منظور انتخاب کاربری ثانویه از فضای معدن را پیشنهاد داده است و بیان می‌دارد که استفاده از زمین پس از استخراج معدن، نیاز به ارزیابی دقیق از پتانسیل‌ها و محدودیت‌ها نظیر آلودگی و خطرات دیگر دارد [۱۶].

حمایت از محیط‌زیست اطراف معدن

حمایت از محیط‌زیست به عنوان میراث جهانی غیرقابل بازگشت، یکی از مهم‌ترین موازین قانون معدن هر کشور است. به طور معمول، قانون حمایت از محیط‌زیست، شامل یک الزام برای انجام مطالعات مستمر روی تمام جنبه‌های پروژه معدن، ارائه پیشنهادهای توسعه تفصیلی، تعهداتی برای انطباق با عنوان بومی قابل اجرا و قوانین زیست‌محیطی و ارائه شواهد مربوط به در دسترس بودن منابع مالی و فرصت‌های تجاری برای استخراج مواد معدنی است. با این حال، برخی کشورها ممکن است به دلیل مشارکت در معاهدات زیست‌محیطی ویژه‌ای نظیر پروتکل منابع دریایی قطب جنوب، قوانین و مقررات ویژه‌تری در حمایت از محیط‌زیست اعمال کنند. جدول ۱، خلاصه‌ای از معاهدات محیط‌زیستی حاکم بر کشورهای ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین را نشان می‌دهد.

جدول ۱. معاهدات محیط‌زیستی ملی و بین‌المللی

کشور	معاهدات محیط‌زیستی ملی و بین‌المللی
ایران	- دستورالعمل‌های محیط‌زیست در بخش معدن - پروتکل محیط‌زیست قطب جنوب - پروتکل منابع زنده دریایی قطب جنوب - پروتکل آلودگی هوا - پروتکل تغییر و تنوع زیستی
استرالیا	- موافقت‌نامه تغییر آب‌وهوا - پروتکل آب‌وهوای کیوتو - موافقت‌نامه بیابان‌زدایی - موافقت‌نامه گونه‌های خطرناک موجودات - موافقت‌نامه فضولات خطرناک و حفاظت از لایه ازن
شیلی	- موافقت‌نامه آلاینده هوا - پروتکل زیست‌محیطی قطب جنوب - پروتکل منابع دریایی قطب جنوب - پروتکل تغییر و تنوع زیستی - پروتکل آب‌وهوای کیوتو - موافقت‌نامه بیابان‌زدایی - موافقت‌نامه گونه‌های خطرناک موجودات - موافقت‌نامه فضولات خطرناک و حفاظت از لایه ازن - پروتکل تغییر آب‌وهوا
چین	- پروتکل حفاظت از محیط‌زیست جوی - پروتکل حفاظت از منابع آب شیرین - پروتکل کنترل آلودگی دریایی - موافقت‌نامه تغییر آب‌وهوا - موافقت‌نامه کنترل منابع بین‌المللی بیولوژیکی

کشور	معاهدات محیط‌زیستی ملی و بین‌المللی
کانادا	- پروتکل محیط‌زیست قطب جنوب
	- پروتکل منابع دریایی قطب جنوب
	- پروتکل تغییر و تنوع زیستی
	- موافقت‌نامه تغییر آب و هوا
	- موافقت‌نامه آلاینده هوا
	- پروتکل تغییر و تنوع زیستی
	- پروتکل آب و هوای کیوتو
	- موافقت‌نامه بیابان‌زدایی
هند	- موافقت‌نامه گونه‌های خطرناک
	- موافقت‌نامه فضولات خطرناک و حفاظت از لایه ازن
	- پروتکل محیط‌زیست قطب جنوب
	- پروتکل منابع دریایی قطب جنوب
	- پروتکل آب‌وهوای کیوتو
	- موافقت‌نامه بیابان‌زدایی
	- موافقت‌نامه حفاظت از لایه ازن
ترکیه	- پروتکل محیط‌زیست قطب جنوب
	- موافقت‌نامه تغییر آب‌وهوا
	- موافقت‌نامه بیابان‌زدایی
	- موافقت‌نامه حفاظت از تالاب‌ها
	- موافقت‌نامه فضولات خطرناک و حفاظت از لایه ازن
آفریقای جنوبی	- پروتکل محیط‌زیست قطب جنوب
	- پروتکل منابع دریایی قطب جنوب
	- موافقت‌نامه نظامی قطب جنوب
	- موافقت‌نامه تغییر آب‌وهوا
	- پروتکل آب‌وهوای کیوتو
	- موافقت‌نامه بیابان‌زدایی
	- موافقت‌نامه حفظ منابع طبیعی
	- موافقت‌نامه حفاظت از تالاب‌ها
	- موافقت‌نامه فضولات خطرناک و حفاظت از لایه ازن

معاهدات زیست‌محیطی حاکم بر کشورهای موردبررسی، الزاماتی در مورد ورود پساب‌ها و فاضلاب‌های صنعتی به محیط‌زیست، چگونگی حفر و انفجار در معادن، استفاده از سوخت‌های فسیلی و ... را دنبال می‌کند که دولت را به اعمال تغییراتی در قوانین معدنی خود متقاعد می‌کند. جدول ۲، قوانین معدنی حمایت از محیط‌زیست را در کشورهای ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین نشان می‌دهد. به این مسئله در کشورهای موردبحث با نگاهی سخت‌گیرانه توجه شده است. استرالیا با توجه ویژه به مبحث محیط‌زیست، اقدامات گسترده‌ای برای حفظ محیط‌زیست و کاهش تأثیرات ناخوشایند معدن انجام داده است. اهمیت این موضوع به حدی زیاد است که حتی با فروش معدن و قطع دست دولت از معدن، محیط‌زیست به‌عنوان یک نهاد ناظر، توانایی متوقف کردن فرایندهای معدن‌کاری را دارد. شیلی نیز با عضویت در مجامع زیست‌محیطی مختلف و انجام اقدامات زیست‌محیطی و وضع قوانین سخت‌گیرانه، علاوه بر برخورداری از جوایز تشویقی این سازمان‌ها به کنترل جامع محیط‌زیست اطراف معدن می‌پردازد در حالی که چین به‌تازگی دست به اقدامات ابتدایی در خصوص پایش محیط‌زیست معدن زده است.

جدول ۲. قوانین حمایت از محیط زیست

کشور	قوانین حمایت از محیط زیست
ایران	- درخواست پروانه اکتشاف و بهره برداری و تمدید آن، موکول به استعلام از محیط زیست و منابع طبیعی و کسب موافقت نامه می باشد. با این حال برای بازسازی و احیای محیط معادن پس از اتمام بهره برداری، ضابطه مدون و با قابلیت اجرایی وجود ندارد.
استرالیا	- الزام قبول آیین نامه مدیریت زیست محیطی برای کلیه شرکت های شاغل - الزام کمک به انجمن های فعال زیست محیطی - اجرای برنامه های آموزش حفاظت از زیست محیطی برای تمام کارکنان و پیمانکاران - اعطای غرامت به صاحب زمین در صورت ایجاد آسیب به سطح زمین یا جلوگیری از پیشرفت یا بهبود زمین های اطراف - عدم امکان تصویب طرح معدنی ای که در آن روند حفاظت محیط زیست مشخص نباشد. - تعلیق طرح های معدنی که محیط زیست را آلوده کنند. - الزام ارائه برنامه طول عمر معدن و بندهای حفاظت از محیط زیست - الزام تأیید پروژه در مرحله اول، توسط محیط زیست - الزام ایجاد تغییرات در طرح توسعه ای در صورت بروز مشکلات زیست محیطی - مشارکت عمومی و امکان اعلام نظر همگانی نسبت به جنبه های محیط زیستی پروژه - الزام ارائه گزارش هایی از نحوه اجرای آیین نامه و فعالیت های زیست محیطی
شیلی	- الزام وجود برنامه بهینه سازی مصرف آب و دستیابی به سطوح بالاتر بهره وری منابع آبی - الزام تأسیس واحد آب شیرین کنی در پروژه های معدنی - حمایت بیشتر از طرح های بر پایه انرژی های تجدید پذیر - الزام ۶۰ تا ۱۲۰ روزه برای ارائه برنامه حفاظت از محیط زیست معدن - الزام توجه به مناطق حفاظت شده - امکان اقرار به تعهدات زیست محیطی داوطلبانه - الزام بررسی زیست محیطی برای پروژه هایی که شامل ۴۰ بستر حفاری یا بیشتر، پروژه هایی که شامل ۲۰ بستر حفاری یا بیشتر، پروژه های توسعه معدن که هدف آنها استخراج یا پالایش است و ظرفیت استخراج مواد معدنی یا پالایش بیش از ۵۰۰ تن در ماه را دارند - امکان اظهار نظر و شکایت بومیان نسبت به شرایط زیست محیطی
چین	- الزام پرداخت مالیات بر کاربری اراضی - الزام انجام کاوش طبق طرح های ساختمانی و خودداری از هرگونه استخراج غیرمجاز - الزام پیروی از قوانین و مقررات مربوط به بازیافت زمین و حفاظت از محیط زیست - الزام انجام اقدامات فوری برای مسدود کردن چاه ها و سوراخ های ناشی از اکتشاف و از بین بردن خطرات ایمنی پس از اتمام پروژه - الزام گزارش دهی عمومی و علنی برای پروژه هایی با تأثیر بالقوه عمده بر محیط زیست - الزام ارسال فرم گزارش تأثیرات زیست محیطی برای پروژه هایی با تأثیر بالقوه متوسط و جزئی بر محیط زیست
کانادا	- الزام وجود شواهد و قرائن ممانعت از آلودگی آب، هوا و خاک ناشی از فرسایش خاک در اثر فعالیت های معدنی - الزام وجود مستندات مربوط به عدم امکان نفوذ مواد شیمیایی و پاک کننده های ناشی از فرایندهای معدن کاری یا وجود طرح ها و برنامه هایی که چگونگی کاهش تأثیرات منفی این مواد را نشان دهد. - الزام وجود مبنای برای تخلیه پساب معدنی و ذوب فلزات.
هند	- الزام وجود شواهد و قرائن ممانعت از آلودگی آب در اثر فعالیت های معدنی - الزام وجود مستندات مربوط به قطع نکردن درختان یا بازسای بافت جنگل پس از معدن کاری - الزام وجود مبنای برای بیابان زدایی.
ترکیه	- الزام وجود شواهد و قرائن ممانعت از آلودگی آب، هوا و خاک ناشی از فرسایش خاک در اثر فعالیت های معدنی - الزام وجود مستندات مربوط به عدم امکان نفوذ مواد شیمیایی و پاک کننده های ناشی از فرایندهای معدن کاری یا وجود طرح ها و برنامه هایی که چگونگی کاهش اثرات منفی این مواد را نشان دهد. - الزام وجود مبنای برای تخلیه پساب معدنی و ذوب فلزات.

کشور	قوانین حمایت از محیط‌زیست
آفریقای جنوبی	- الزام وجود شواهد و قرائن ممانعت از آلودگی آب، هوا و خاک ناشی از فرسایش خاک در اثر فعالیت‌های معدنی - الزام وجود مستندات مربوط به عدم امکان نفوذ مواد شیمیایی و پاک‌کننده‌های ناشی از فرایندهای معدنی کاری یا وجود طرح‌ها و برنامه‌هایی که چگونگی کاهش تأثیرات منفی این مواد را نشان دهد. - الزام وجود مبنای برای تخلیه پساب معدنی و ذوب فلزات.

وجود شواهد و الزاماتی مبنی بر جلوگیری از آلودگی آب، هوا و خاک ناشی از فرسایش خاک، نفوذ مواد شیمیایی و پاک‌کننده‌های ناشی از فرایندهای معدنی کاری، تخلیه پساب معدنی و ذوب، از متداول‌ترین قوانین بین‌المللی حوزه صنایع معدنی است. حمایت از طرح‌های بیابان‌زدایی و جنگل‌کاری، الزام کاشت درخت و استفاده از فیلترهای کاهش گرد و غبار و گازهای مضر توسط کشورهای نظیر استرالیا و کانادا صورت می‌پذیرد.

در استرالیا، قانون و مقررات زیست‌محیطی ایالتی، تمام مراحل پروژه‌های معدنی از جمله اکتشاف، توسعه، ساخت‌وساز، بهره‌برداری، تعطیلی و توان بخشی معدن را مورد بررسی قرار می‌دهد. فرایند بررسی محیط‌زیستی، شامل شناسایی تأثیرات زیست‌محیطی و تعیین نحوه مدیریت آن تأثیرات است. الزام وجود پیشنهاد اولیه و برنامه مدیریت محیط‌زیستی که به ارزیابی دولت می‌رسد گام اولیه هر قرارداد معدنی است. نظارت بر فرایندهای محیط‌زیستی معادن، شفاف است. همچنین با اصلاحات سال ۲۰۱۹، شیوه تأمین مالی قانون جدید مواد معدنی و انرژی را به گونه‌ای تغییر داد تا ترتیبات تضمین مالی برای فعالیت‌های معدنی تحت قانون حمایت از محیط‌زیست ۱۹۹۴ با یک طرح تأمین مالی جدید جایگزین شود و نحوه محاسبه هزینه تخمینی توان‌بخشی معادن پس از متروکه شدن را تغییر دهد.

سیستم مدیریت زیست‌محیطی در معدن و عملیات‌های معدنی، سامانه‌های مدیریتی برای کمک به تولید پاک معدنی است. این سیستم، به‌عنوان جزئی از سیستم مدیریت کلی معدن، شامل مراحل سازمانی، مسئولیت‌های زیست‌محیطی و فرایندهای عملی است که یک شرکت معدنی را در پیروی از مقررات زیست‌محیطی، شناسایی مزایای فنی و اقتصادی و نیز اطمینان از اتخاذ و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی یاری می‌کند. تا به امروز، تعداد زیادی از شرکت‌های چندملیتی (معدنی)، سیستم‌های مدیریت زیست‌محیطی جامعی را در سایت‌های معدنی خود اجرا کرده‌اند. سیستم مدیریت زیست‌محیطی، جزو الزامات قانونی هیچ کشوری نیست اما به دلیل بهبود مشارکت کاری با نهادهای اداری و سازمان‌های بین‌المللی، به‌ویژه معاهدات زیست‌محیطی جهانی، مورد توجه دولت‌ها و شرکت‌های معدنی است. کشورهای استرالیا و شیلی با تأمین کمک‌های مالی درصددند تا تعداد بیشتری از سایت‌های معدن را به این سامانه مجهز کنند [۴]. دولت شیلی به‌عنوان یکی از پیشگامان استفاده از این سامانه‌های مدیریت محیط‌زیستی، برنامه‌ریزی دقیق و دارای زمان‌بندی برای ارتقای سلامت محیط‌زیست بخش معدن در سطح جهانی ارائه کرده است و برای به ثمر رسیدن این برنامه‌ها، عزم جدی دارد.

حل مناقشات

وجود نهادها و قوانین متعارض، موجب جلوگیری از ادامه فعالیت معدنی کاری می‌شود، از این رو بسیاری از کشورها، سازوکار مدونی برای حل مناقشات و جلوگیری از توقف کار معدن دارند. یکی از پر تعارض‌ترین بخش‌های قانون معدن، بحث‌های زیست‌محیطی و مناقشات سلامت آبی و خاک محدوده معدن است. در بسیاری از کشورهای جهان، موارد مناقشات این‌چنینی را دادگاه‌های ایالتی و کشوری حل و فصل می‌کنند و رأی دادگاه با توجه به مصالح ملی و براساس اقتضاعات سیاسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ... ارائه می‌شود. در ایران، حل تعارض از طریق شورای عالی معادن صورت می‌پذیرد که در موارد بروز اختلاف در میان سازمان‌های ذی‌ربط وارد عمل می‌شود.

استرالیا با اصلاح قوانین معدنی و زیست‌محیطی خود در سال ۲۰۱۳، سازوکار واحدی برای ارزیابی زیست‌محیطی معادن در سطوح ایالتی و فدرال ارائه داد تا به این ترتیب با حذف تعارضات باقی‌مانده، فرصت سواستفاده متخلفان زیست‌محیطی گرفته شود. از طرف دیگر، این یکپارچگی قوانین باعث شد تصمیمات، سریع‌تر اتخاذ شوند و فرصتی برای بهبود وضعیت سرمایه‌گذاری استرالیا بدون به خطر انداختن استانداردهای زیست‌محیطی فراهم شود.

مسئولیت‌پذیری مدنی معادن

معادن به عنوان بنگاه‌های اقتصادی با قراردادهای طولانی‌مدت، یکی از ارکان اصلی گردش مالی کشورها هستند. بیشتر معادن دنیا در نزدیکی شهرها و محل سکونت انسان‌ها قرار دارند از این رو فعالیت‌های معدنی می‌تواند زندگی افراد نزدیک به معدن را تحت‌الشعاع قرار دهد. وجود معدن در یک بخش جغرافیایی، موجب افزایش رفاه اجتماعی ساکنان آن منطقه می‌شود؛ زیرا بومیان آن منطقه به دلیل ایجاد اشتغال، افزایش داد و ستدهای تجاری با ایجاد راه‌های ارتباطی جدید مواجه می‌شوند و سهمی از وجود آن معدن یا صنایع وابسته خواهند داشت. از طرف دیگر، معدن‌کاری با آزادسازی آلاینده‌های صوتی، هوایی و آبی در منطقه، قطع درختان و ... همراه است. معدن به‌عنوان یک فعالیت مؤثر بر سبک زندگی افراد درگیر، مسئولیت‌ها و وظایف مدنی و اجتماعی‌ای بر عهده دارد. شرکت‌های معدنی در قبال دریافت خدمات دولتی و در راستای کاهش تأثیرات منفی آسیب‌های زیست‌محیطی به جمعیت‌های انسانی نزدیک خود، تعهداتی را متقبل می‌شوند. در بسیاری از موارد، این تعهدات به صورت داوطلبانه و به عنوان هدیه ارائه می‌شود. این مسئولیت‌ها و مطالبات، ارتباط مستقیمی با سطح رفاه اجتماعی و توسعه‌یافتگی آن اجتماع دارد. همچنین در بسیاری از موارد، همیت دولت مرکزی در اجرایی کردن قوانین به دلیل وابستگی درآمد ملی به اقتصاد معدنی نیز مطرح است. در جایی که برخی کشورها، معاهدات زیست‌محیطی را اجرایی نمی‌کنند، در برخی کشورها، الزامات قانونی سفت و سختی در حفاظت از سلامت و محیط‌زیست مطرح است.

اخیراً برخی از کشورها ضوابطی را به‌عنوان وظایف معادن در قبال جوامع انسانی و غیرانسانی درگیر وضع کرده‌اند. تأسیس مراکز درمانی، توجه به سلامت کارگران، توجه به سلامت بومیان، تأسیس واحدهای شیرین‌سازی آب، احداث مراکز تسویه‌پساب و ساخت ایستگاه‌های پایش سلامت محیط‌زیست، از جمله این اقدامات است. قانون معدن ایران، بنگاه‌های معدنی را به صرف ۱۵ درصد از سود حاصل از فرایندهای اقتصادی معدن در راستای توسعه، نوسازی و ارائه خدمات اجتماعی، رفاهی و سلامتی جوامع محلی می‌کند. این در حالی است که سایر کشورها، قوانین جزئی‌تری را برای ادای مسئولیت‌های اجتماعی معدن در نظر گرفته‌اند. برای مثال استرالیا معدن‌کاری را فرایندی می‌داند که باید با جلب رضایت جامعه بومی انجام شود و معدن در کنار امتیازات ویژه‌ای که از دولت دریافت می‌کند ملزم به ارائه خدمات عمومی و مدنی به جامعه محلی و بومی است. الزام پرداخت غرامت در صورت رهاسازی پساب و نخاله‌های معدن در زمین‌های مجاور، حمایت از طرح‌های معدنی که در آنها تأمین هزینه زیرساخت‌های اجتماعی و سلامتی منطقه معدن‌کاری مورد توجه قرار گرفته و پایش رضایت بومیان در بازه ۶ ماهه، از مهم‌ترین این اقدامات هستند که با هدف کاهش تعارضات فرهنگی، مشارکت مردم در امر معدن و اشتغال‌زایی صورت می‌پذیرد.

مسئولیت‌های مدنی بنگاه‌های معدنی شیلی، محدود به الزام جبران خسارت زمین توسط دارندگان مجوز اکتشاف و بهره‌برداری و موافقت جوامع بومی است. دولت شیلی، این حق را به شهروندان و ساکنان مناطق معدنی می‌دهد که شکایات خود را به‌طور مستقیم به دادگاه‌های ایالتی ارائه دهند و نسبت به شرکت‌های معدنی، مطالبه‌گر باشند. بیشتر این مطالبات در حوزه تخریب جنگل‌ها و رهایش گازه‌های گلخانه‌ای است [۲۰]. رویکرد دولت مرکزی در مواجهه با این شکایات، بررسی سریع شکایت و الزام شرکت‌های معدنی به رعایت پروتکل‌های سخت‌گیرانه‌تر زیست‌محیطی است. متناظر با اقدامات قانونی صورت‌گرفته در شیلی و استرالیا، دولت‌های مرکزی ترکیه، هند، چین و آفریقای جنوبی، توجه چندانی به رعایت الزامات سلامت ساکنان زیست‌بوم معدنی ندارند.

معادن متروکه

در بسیاری از کشورهای جهان با پایان یافتن عمر مفید یک معدن، قرارداد منعقد شده بین دولت و شرکت سرمایه‌گذار، باطل می‌شود و معدن، متروکه و در اختیار دولت قرار می‌گیرد. این مسئله در حالی است که در برخی کشورها زمین معدن تا پایان عمر قرارداد یا همیشه، در اختیار خریدار و مجری باقی می‌ماند. این معادن متروکه، نیاز به تعیین تکلیف و ورود مجدد به چرخه اقتصاد و محیط‌زیست دارند. در بسیاری از کشورها قوانینی برای معدنی که به دلیل پایان ماده معدنی، نداشتن صرفه اقتصادی معدن یا هر مانع دیگری به‌عنوان معدن متروکه تلقی می‌شوند در نظر گرفته می‌شود تا به لحاظ قانونی نسبت به عدم‌فعالیت آنها اقدام شود. جدول ۳، قوانین حاکم بر معادن متروکه در ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین را نشان می‌دهد.

جدول ۳. قوانین حاکم بر معادن متروکه

کشور	قوانین حاکم بر معادن متروکه
ایران	- پس از متروکه شدن معدن و غیرفعال شدن و ابطال پروانه بهره‌برداری، محدوده‌ها در ید وزارت صنایع و معادن باقی می‌ماند. وزارت صنعت، معدن و تجارت اختیار دارد که اینها را در هر سال به‌طور متناوب از یک بار تا ۴ بار به مزایده بگذارد و بهره‌برداران واجد صلاحیت در این مزایده شرکت و نسبت به فعال کردن معدن، اقدام کنند. - اطمینان از تخلیه منطقه از پرسنل و کارگران، نوسازی منطقه، اسکان مجدد و رهاسازی منطقه پس از ارائه خدمات مفید در منطقه و سرزمین‌های اطراف - الزامات شدید برای ارائه برنامه توانبخشی زمین معدن پیش از بسته شدن معدن. - اعطای اوراق بهادار دولتی برای حفاظت محیط‌زیست در فرایند توان‌بخشی به زمین معدنی (تا ۲۵ درصد هزینه توانبخشی) - امکان تأمین ۱۰۰ درصد هزینه توانبخشی زمین در صورت امکان بازسازی مناطق معدن کاری - الزام بررسی نهادهای دولتی بر برنامه توانبخشی پیش از شروع فرایند - اختصاص یک منطقه جغرافیای وسیع رایگان برای بازسازی معدن ذغال سنگ - اختصاص یک کمیسر مستقل برای نظارت بر احیای زمین معدن و استعلام هزینه‌ها - اختصاص سپرده‌های امنیتی برای احیای معدن - اختصاص سپرده‌هایی در اداره محیط‌زیست برای احیای معدن - الزام گزارش‌دهی سالانه در مورد پیشرفت توان‌بخشی معدن - عدم امکان نگهداری طولانی‌مدت معدن بسته‌شده و به تعویق انداختن فرایند بازسازی معدن - الزام شرط ورود زمین به فاز توانبخشی در اعلام ختم کاربری مهدن - تعیین سطح عمل در ترمیم معدن توسط کارشناسان علمی دولتی، شرکت‌های معدن و دانشگاه
شیلی	- الزام حفظ محیط‌زیست و تعیین روند بازسازی یا بهبود محیط‌زیست
چین	- الزامی در این مورد وجود ندارد ولی سرمایه‌گذار به‌عنوان یک آیتم تشویقی می‌تواند استراتژی‌های رهاسازی و ایجاد کاربری دوم را انتخاب کند.
کانادا	- نیاز است تا اطلاعات قابل‌توجهی در مورد خسارت‌های زیست‌محیطی پیش‌بینی شده از معدن پیشنهادی و استراتژی تقویت‌کننده ارائه شود. همچنین توصیه می‌شود طرح‌های احیای معدن ارائه شود. - الزامی در مورد تعیین تکلیف معادن متروکه نیست ولی از احیای معدن قدیمی استقبال می‌شود.
هند	- در قوانین معدنی هند، قانون مشخصی مربوط به شیوه بازتوانی معدن، مشاهده نشد.
ترکیه	- در قوانین معدنی ترکیه، قانون مشخصی مربوط به شیوه بازتوانی معدن، مشاهده نشد.
آفریقای جنوبی	- معادن و گروه‌های معدن‌کار، از گروه‌های متخصص برای برنامه‌ریزی ادامه عمر معدن استفاده می‌کنند. همچنین بیشتر مطالعات و گروه‌های قانون‌گذاری در مورد معدن ذغال سنگ و بهره‌برداری از زمین‌های معدن پس از معدن کاری متمرکزند.

مشاهده می‌شود که ارتباط مستقیمی بین رشد صنعت معدن و قوانین حاکم بر معادن متروکه وجود دارد. در بسیاری از کشورها این الزام وجود دارد تا حین و پیش از ارائه پیشنهاد معدن، در مورد شرایط بازگردانی یا احیای معدن صحبت شود.

نتیجه گیری و پیشنهاد

هدف اصلی این پژوهش دستیابی به راهکارهایی برای بهبود قوانین حمایت از محیط‌زیست در حوزه معادن ایران است. به این منظور قوانین محیط‌زیستی کشورهای ایران، استرالیا، شیلی، هند، ترکیه، کانادا، آفریقای جنوبی و چین بررسی شد. در این مقاله، ابتدا به تهدیدات و مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از پدیده معدن‌کاری مطرح و سپس نظام‌های مقابله با این تهدیدات در نظام حقوق معدن پرداخته شد. از بررسی قوانین معدنی سایر کشورها، وجود تناظر یک‌به‌یک بین توسعه‌یافتگی و رشد اقتصادی کشور و توجه به مباحث محیط‌زیستی به‌دست آمد. از دیدگاه مدیریتی با بررسی قوانین محیط‌زیستی حوزه معادن، پیشنهاد می‌شود ضمن حفظ نگاه جامع و کلی‌نگر، به جزئیات قوانین و مقررات توجه شود و قوانین به‌گونه‌ای وضع شوند تا مقابله حقوقی مؤثری با تهدیدات حوزه محیط‌زیست ناشی از فعالیت معادن داشته باشند. همچنین پیشنهاد می‌شود یک آیین‌نامه اجرایی برای اجرایی کردن مواد ۹ قانون حفاظت و بهسازی محیط‌زیست در مورد بهره‌برداری از معادن، تصویب شود. در این آیین‌نامه، بررسی‌های زیست‌محیطی و تهیه طرح زیست‌محیطی، پس از صدور گواهی کشف و قبل از صدور پروانه بهره‌برداری را گنجانند. در این آیین‌نامه باید حق حفاری‌های اکتشافی، برابر حق مشابه برای مقاصد کشاورزی، مرتع‌داری، تغییرات آمایشی سرزمین توسط مردم محلی و ایلات و عشایر و امثال آنها باشد نه کمتر از آنها. به هر حال، تغییرات جزئی سرزمین، به صرف اینکه برای فعالیت‌های اکتشاف معدن است نباید مختل گردد؛ مثلاً اینکه نباید برای نمونه‌گیری و حفر ترانشه‌هایی در ابعاد چندین متر، محدودیت‌هایی در این حد که در حال حاضر سازمان حفاظت محیط‌زیست برای فعالیت‌های معدنی اعمال می‌کند وجود داشته باشد.

References

- [1] Smith, F. (2020). *Environmental sustainability: practical global applications*. CRC Press. https://books.google.com/books/about/Environmental_Sustainability.html?id=cLAP_EAAAQBAJ&source=kp_book_description
- [2] Song, W., Song, W., Gu, H., & Li, F. (2020). Progress in the Remote Sensing Monitoring of the Ecological Environment in Mining Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061846>
- [3] Mohammadi, M. (2020). Investigating the effect of variation of Geology Strength Index (GSI) on the geomechanical parameters of rock mass. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 177-193. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112763>
- [4] Plumlee, G. S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. In *The environmental geochemistry of mineral deposits*. Society of Economic Geologists. Part A. <https://www.researchgate.net/profile/Geoffrey-Plumlee/publication/264046895>
- [5] Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental Governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1), 297-325. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.042605.135621>
- [6] Hilson, G., & Nayeef, V. (2002). Environmental management system implementation in the mining industry: a key to achieving cleaner production. *International Journal of Mineral Processing*, 64(1), 19-41. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(01\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(01)00071-0)

- [7] Devenin, V., & Bianchi, C. (2019). Characterizing a mining space: Analysis from case studies in Chile and Australia. *Resources Policy*, 63, 101402. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101402>
- [8] Newbold, J. (2006). Chile's environmental momentum: ISO 14001 and the large-scale mining industry – Case studies from the state and private sector. *Journal of cleaner production*, 14(3-4), 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.05.010>
- [9] Romero, H., , M. M., & , a. P. S. (2012). Mining Development and Environmental Injustice in the Atacama Desert of Northern Chile. *Environmental Justice*, 5(2), 70-76. <https://doi.org/10.1089/env.2011.0017>
- [10] Stimpson, O. (2020). Canada, the Congo, and Why Mining Is Good for Both Us. *The General Assembly Review*, 1(1), 1-19. <https://doi.org/10.5206/tgar.v1i1.7971>
- [11] Campbell, B. (2009). *Mining in Africa: Regulation and development*. Pluto Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt183p4c4>
- [12] Nalule, V. R. (2019). *Mining and the Law in Africa: Exploring the social and environmental impacts*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33008-8>
- [13] Temper, L., & Martinez-Alier, J. (2013). The god of the mountain and Godavarman: Net Present Value, indigenous territorial rights and sacredness in a bauxite mining conflict in India. *Ecological Economics*, 96, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.09.011>
- [14] Vivoda, V. (2011). Determinants of foreign direct investment in the mining sector in Asia: A comparison between China and India. *Resources Policy*, 36(1), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.08.005>
- [15] Yıldız, T. D. (2020). Effects of the private land acquisition process and costs on mining enterprises before mining operation activities in Turkey. *Land Use Policy*, 97(1), 104784. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104784>
- [16] Kivinen, S. (2017). Sustainable Post-Mining Land Use: Are Closed Metal Mines Abandoned or Re-Used Space? *Sustainability*, 9(10), 1705. <https://doi.org/10.3390/su9101705>
- [17] Strzałkowski, P., & Ścigała, R. (2020). Assessment of post-mining terrain suitability for economic use. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(2), 3143–3152. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02617-8>
- [18] Chai, S., Zhang, Z., & Ge, J. (2020). Evolution of environmental policy for China's rare earths: Comparing central and local government policies. *Resources Policy*, 68(3), 101786. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101786>
- [19] Jaeckel, A. (2020). Strategic environmental planning for deep seabed mining in the area. *Marine Policy*, 114, 103423. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.01.012>
- [20] Loghmanpour zarini, R., & Nabipour Afrouzi, H. (2020). Estimation of Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions in Dairy Farms (Case study: Qazvin Province). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(2), 13-21. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.119204>



Discrimination of Hydrothermal Alterations Associated with Copper Mineralization Using ASTER Image Processing Sheet in Sar-e-Chah-e-Shur, Eastern Iran

Mortaza Hosseini^{1*}

¹Faculty Member, Department of Mining Engineering, Faculty of Tabas, South-Khorasan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tabas, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.27.2020

Revised: 12.21.2020

Accepted: 01.20.2021

Keyword:

Copper
Alteration Zones
Remote Sensing
ASTER
Birjand

*Corresponding Author:

Mortaza Hosseini

Email:

hosseini.mortaza30@yahoo.com

ABSTRACT

Sar-e-Chah-e-Shur area is located in the eastern part of Iran and is adjacent to Lut block. Due to subduction, this area of Iran has a high potential for the formation of various minerals, particularly copper ores. Remote sensing data can be used effectively for the mapping of altered zones related to copper deposits due to the extension of the zones and poor vegetation coverage in the area. Advanced Space-borne Thermal and Emission Reflectance Radiometer (ASTER) sensor, by covering a relatively wide range of electromagnetic spectra and storing ground surface information in three visible and near infrared (VNIR) bands, six shortwave infrared (SWIR) bands and five thermal infrared (TIR) bands (a total of 14 bands), has created favorable conditions for detecting alteration zones. In this research, the data of this sensor was used to separate the algal, cerclitic, propylitic and iron oxide alterations related to copper ores in the 1: 100000 map of Sar-e-Chah-e-Shur, located in the southwest of Birjand, Iran. In the present study, alteration zones associated with porphyry copper were identified using various processing methods including false color combination, band ratio, standard analysis and selective component. The results of the present study field processing and surveys demonstrated the expansion of alteration zones in the study area and the optimal accuracy of the ASTER sensor. In the 13 visited areas, the existence of the desired alterations was confirmed.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تفکیک دگرسانی‌های گرمابی مرتبط با کانی‌سازی مس با استفاده از پردازش تصویر استر برگه سرچاه‌شور، شرق ایران

مرتضی حسینی^{۱*}

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی معدن، آموزشکده فنی امام علی (ع) طبس، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان جنوبی، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

ناحیه سرچاه‌شور در شرق ایران و در مجاورت بلوک لوت واقع شده است. این ناحیه از ایران، به دلیل رخداد فرورانش دارای قابلیت بالا برای تشکیل انواع مواد معدنی به‌ویژه کانه‌های مس می‌باشد. به دلیل گستردگی مناطق دگرسانی مرتبط با مس و نیز پوشش ضعیف گیاهی منطقه، می‌توان از داده‌های دورسنجی برای تفکیک این مناطق به طور مؤثر استفاده کرد. سنجنده استر با پوشش محدوده نسبتاً وسیعی از طیف الکترومغناطیسی و ذخیره اطلاعات سطح زمین در سه محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز موج کوتاه و گرمایی و در مجموع ۱۴ باند، شرایط مطلوبی را برای آشکارسازی زون‌های دگرسانی ایجاد کرده است. در این تحقیق، از داده‌های این سنجنده برای تفکیک دگرسانی‌های آرژلیک، سرسیتیک، پروپلیتیک و اکسید آهن مرتبط با کانه‌زایی مس موجود در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور که در جنوب غربی بیرجند واقع می‌باشد، استفاده شده است. در بررسی حاضر، با استفاده از روش‌های مختلف پردازشی ترکیب رنگی کاذب، نسبت باندی، تحلیل استاندارد و انتخابی مؤلفه اصلی، مناطق دگرسانی مرتبط با مس پرفیری بارزسازی شده است. نتایج حاصل از پردازش و بررسی‌های صحرایی موجود، نشانگر گسترش مناطق دگرسانی در محدوده مورد مطالعه و دقت مطلوب سنجنده استر است؛ به نحوی که در ۱۳ محدوده بازدید شده، وجود دگرسانی‌های مورد نظر تأیید شد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱

کلید واژگان:

مس
دگرسانی
دورسنجی
استر
بیرجند

*نویسنده مسئول: مرتضی حسینی

پست الکترونیکی:

hoseini.mortaza30@yahoo.com



مقدمه

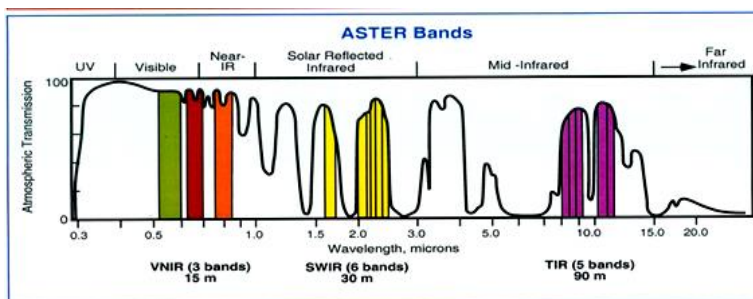
روند فزاینده استفاده از داده‌های دورسنجی، به دلیل مزیت‌های خاص فنی و اقتصادی، همراه با تکامل و پیشرفت چشمگیر ابزار برداشت و روش‌های پردازشی منجر به استفاده از این اطلاعات در زمینه‌های مختلف؛ از جمله اکتشاف کانسارها شده است. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش منطقه‌ای وسیع، چندطیفی و چندزمانه بودن می‌توانند در شناسایی ایالت‌ها، کمریندها و مکان‌های کانه‌زایی به کار گرفته شوند [۱].

نقش سنجش از دور در اکتشاف کانسارها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [۱]:

- نقشه‌برداری واحدهای سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، خطواره‌های بزرگ و روندهای ساختاری در طول نواحی که احتمال کانسارسازی وجود دارد.
- نقشه‌برداری الگوهای ساختاری و شکستگی‌های محلی که ممکن است تشکیل‌دهنده کانسارهای خاص باشند.
- شناسایی نواحی دگرسان‌شده مرتبط با توده‌های کانسار
- تهیه اطلاعات زمین‌شناسی پایه.

بسیاری از کانسارها با سازندها یا واحدهای سنگ‌شناسی خاصی ارتباط دارند. شناسایی این واحدهای سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی با داده‌های سنجش از دور، می‌تواند به اکتشاف کانسارهای موجود در آنها کمک کند. زمین‌شناسان با تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند ارتباط بین کانسارها و ساختارهای خطی ناحیه‌ای را نیز شناسایی کنند. یکی از اهداف اصلی در اکتشاف مواد معدنی، شناسایی مناطق دگرسان شده است که ممکن است در ارتباط با کانه‌زایی در محدوده مورد بررسی باشد.

یکی از مهم‌ترین سنجنده‌های مورد استفاده در اکتشاف از طریق دورسنجی سنجنده ASTER می‌باشد که روی ماهواره ترا^۱ نصب شده است [۲]. سنجنده ASTER^۲ که به آن پرتوسنج حرارتی تابشی و بازتابشی فضا برد پیشرفته نیز گفته می‌شود، تصویرگر چندطیفی است که ناحیه وسیعی از طیف الکترومغناطیس را در برمی‌گیرد. استر در ۱۴ باند و سه محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) با طول موج ۰/۵۲-۰/۸۶ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، ۶ باند مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) در محدوده طول موج ۱/۶-۲/۴۳ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و ۵ باند مادون قرمز حرارتی (TIR) در محدوده طول موج ۸/۱۲۵-۱۱/۶۵ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر اطلاعات سطح زمین را اخذ می‌کند [۳]. در شکل ۱ محدوده باندهای استر در طیف الکترومغناطیس نمایش داده شده است.



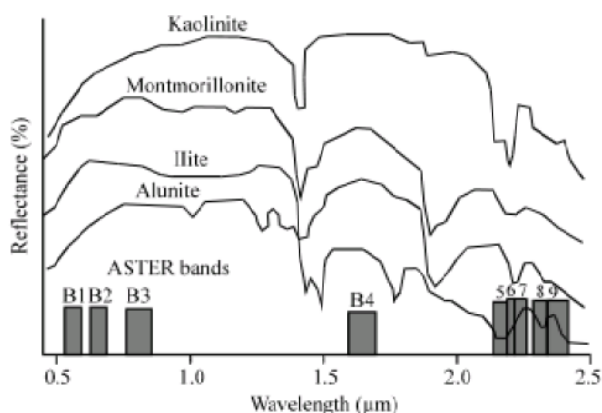
شکل ۱. محدوده باندهای سنجنده استر در طیف الکترومغناطیس [۳]

¹ Terra

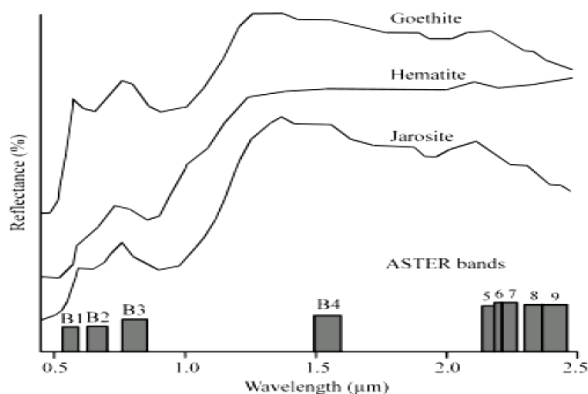
² Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer

همانطور که از شکل ۱ پیداست، استر در محدوده مادون قرمز نزدیک دارای ۶ باند است؛ از آنجایی که طیف اکثر کانی‌های مناطق دگرسانی در این محدوده دارای جذب یا انعکاس بالاست؛ از این رو امکان شناسایی آنها با استفاده از داده‌های استر فراهم است. علاوه بر این، قدرت تفکیک رادیومتری خیلی خوب و کیفیت بسیار بالای تصاویر سنجنده ASTER سبب کاربرد گسترده آن در بررسی‌های اکتشافی و زمین‌شناختی شده است. تصاویر استر اطلاعات اولیه کانی‌شناسی و نقشه‌های دگرسانی زمین‌مرجع را با هزینه پایین و دقت بالا فراهم می‌کند [۴].

تفکیک مناطق دگرسانی، مستلزم شناخت طیف‌های جذب و انعکاس کانی‌های این مناطق که بیشتر در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک، میانی و گرمایی طیف الکترومغناطیس است، می‌باشد. سنجنده استر به‌خوبی می‌تواند کانی‌های شاخص مناطق دگرسانی گرمایی را که ویژگی طیفی آنها در محدوده‌های یادشده است، شناسایی کند. در شکل‌های ۲ و ۳ طیف جذب و انعکاس کانی‌های مربوط به زون‌های مختلف دگرسانی و موقعیت باندهای استر نشان داده شده است. بر اساس این طیف‌ها، کانی‌هایی مانند ایلیت، آلونیت، مونت‌موریلونیت و کائولینیت که در محدوده باند ۴ استر بازتاب بالا دارند، از کانی‌هایی مانند کلریت و اپیدوت قابل تفکیک هستند.



شکل ۲. کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ایلیت، آلونیت و موقعیت باندهای استر [۵]



شکل ۳. اکسیدهای آهن شامل گوتیت، هماتیت و ژاروسیت و موقعیت باندهای استر [۵]

کانسارهای مس پرفیری از سیالات گرمایی مرتبط به ماگماهای غنی از بخار آب، در مناطق فروران منشأ می‌گیرند [۶]. تعدادی از کانی‌های مهم که در اکتشاف ذخایر معدنی مس با استفاده از طیف انعکاسی - جذبی می‌توان آنها را شناسایی کرد به شرح زیر هستند [۷]:

- زون سرسیت: معمولاً کانی‌های مسکویت دانه‌ریز، کوارتز، پیروفلیت و ایلیت در زون آلتراسیون سرسیت یافت می‌شوند.
 - زون آرژلیک: کانی‌های شاخص این زون عبارتند از: کائولینیت، هالوزیت و دیکیت.
 - زون آلونیت و ژاروسیت: این کانی‌ها در زون آلتراسیون یا در فرایند اکسیداسیون می‌توانند تشکیل شوند.
 - زون پروپلیتیک: دو کانی مهم و شاخص زون پروپلیتیک عبارتند از: کلریت و اپیدوت.
 - اکسید و هیدروکسیدهای آهن: هماتیت، گوتیت و لیمونیت که در نتیجه اکسیداسیون سولفیدها تشکیل می‌شوند، می‌توانند راهنمای مفیدی در شناسایی مناطق دارای کانی سازی سولفید باشند.
- وجود هر یک از زون‌ها و کانی‌های یاد شده در هر محدوده را می‌توان به‌عنوان یک نشانه از کانی‌زایی مس مورد توجه قرار داد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از داده‌های سنجنده استر سطح 1B برای تفکیک دگرسانی‌های گرمایی استفاده شده و پردازش داده‌های مربوطه با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصاویر ماهواره‌ای ENVI4 انجام گرفته است. تصویر استر مورد استفاده با ارائه درخواست به سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور خریداری شده است. تصاویر استر با سطح 1B معادل داده‌های رادپانس در سنجنده است که با انجام تصحیحات هندسی و رادیومتری توسط شرکت اخذ داده‌ها، داده‌های تصویری با نمونه‌برداری مجدد^۱ تولید شده است [۲]. هر صحنه اطلاعاتی استر، محدوده‌ای به وسعت ۶۰ کیلومتر در ۶۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد؛ بنابراین پس از تبدیل تصاویر به داده‌های انعکاسی، تفکیک باندها و زمین مرجع کردن آنها توسط شرکت PCI Inc, Richmond Hill کانادا، محدوده‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران از هر صحنه برش داده شده و در اختیار متقاضیان قرار می‌گیرد. در مقاله حاضر، پیش‌پردازش داده‌ها با روش میانگین بازتابش نسبی داخلی انجام شده است. روش یاد شده، یک روش کالیبراسیون نسبی و آماری است که در آن طیف میانگین تصویر محاسبه و به عنوان طیف مرجع به طیف‌های هر پیکسل در تصویر تقسیم می‌شود تا بازتاب‌های واقعی و نرمال به‌دست آید [۸].

هدف اصلی تحقیق پیش‌رو بارزسازی مناطق دگرسانی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری و بررسی امکان به‌کارگیری روش‌های مختلف در محدوده جغرافیایی شرق ایران است. محدوده‌های طیفی به‌کار گرفته شده مادون قرمز موج کوتاه و مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌باشد که با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر نظیر ترکیب رنگی کاذب، نسبت باندی، تحلیل استاندارد و انتخابی مؤلفه اصلی، مناطق دگرسانی مرتبط با مس پرفیری بارزسازی شده است.

در روش ترکیب رنگی کاذب که یکی از ساده‌ترین روش‌های پردازش است، با اختصاص باندهای با انعکاس بالای پدیده‌ها به یکی از رنگ‌های قرمز، سبز و آبی امکان بارزسازی آنها با همان رنگ فراهم می‌شود.

نسبت باندی، یکی از روش‌های رایج در پردازش تصویر است که باعث از بین بردن تأثیرات توپوگرافی و سایه‌ها، کاهش برخی از نویزها و اختلاف بین درجات روشنایی شده و مرزها را مشخص‌تر می‌کند. نسبت‌گیری باندی، یک روش رقومی پردازش تصاویر چندطیفی است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا باند طیفی به پیکسل‌های متناظر

¹ Re-sampled

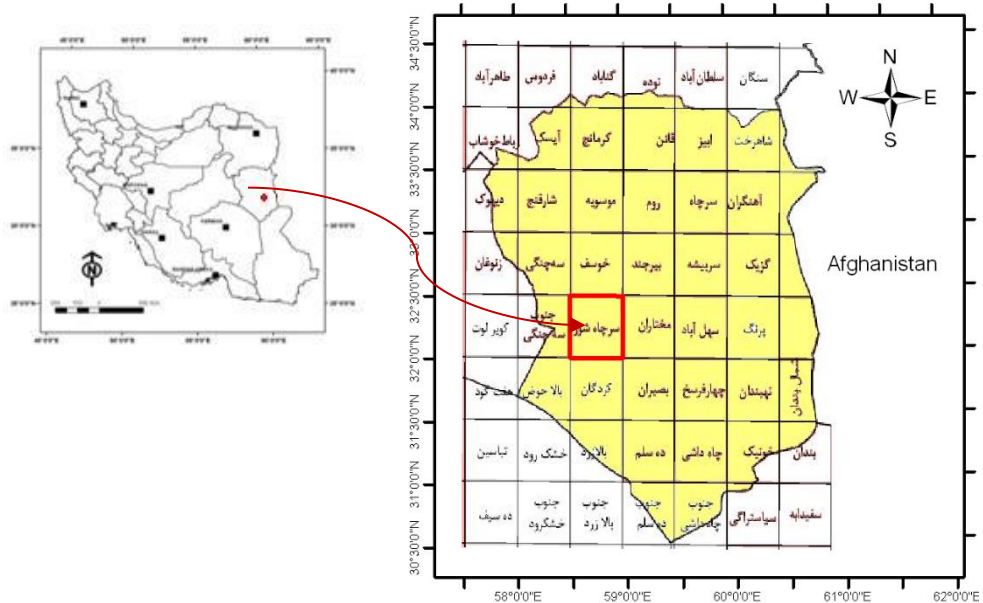
آن در تصویر یا باند دیگر است [۹]. در این روش که ارزش‌های رقومی باند با بیشترین انعکاس به باند بیشترین جذب تقسیم می‌شود می‌توان به‌طور مؤثر برای بارسازی و شناسایی کانی‌ها استفاده کرد؛ البته بسته به منطقه و نوع کاربرد باید باندهای مناسب را بر هم تقسیم کرد تا بهترین نتایج به‌دست آید [۱].

در روش تحلیل مؤلفه اصلی که برای کاهش اثر تداخلی مواد، به‌ویژه پوشش گیاهی استفاده شده، به‌طور گسترده برای نقشه‌برداری دگرسانی‌ها در ایالت‌های فلزایی نیز به کار برده شده است. در این روش، بردارهای ویژه یک ماتریس واریانس-کواریانس یا یک ماتریس همبستگی محاسبه می‌شود [۱۰]. تبدیل مؤلفه‌های اصلی، روشی برای کاهش دادن اطلاعات تکراری است که با فشرده کردن مجموعه داده‌های چندطیفی در یک دستگاه مختصات جدید صورت می‌گیرد. با استفاده از این تبدیل می‌توان محورهایی را یافت که در راستای آنها علاوه بر کاهش داده‌ها اطلاعاتی به دست می‌آید که از لحاظ محتوا غنی‌تر از اطلاعات هر کدام از جهت‌های مربوط به باندهای اولیه می‌باشد. در این روش، هدف دستیابی به مؤلفه‌های جدیدی است که در آنها میزان واریانس داده‌ها بیشتر (و بنابراین میزان اطلاعات بیشتر) و وابستگی بین این مؤلفه‌ها کمتر از حالت اولیه تصاویر می‌باشد. اولین مؤلفه اصلی (PC1) شامل بیشترین درصد واریانس کلی تصویر است و مؤلفه‌های بعدی (PC2، PC3، ...، PCn) هر یک دربرگیرنده درصد کمتری از واریانس تصویر می‌باشد [۱۱].

هر تصویر مؤلفه اصلی، دارای اطلاعاتی از همه باندهای طیفی است و مانند تصاویر نسبی، به عنوان تصویر جداگانه سیاه و سفید می‌توانند تحلیل شوند، یا هر سه تصویر مؤلفه اصلی برای تشکیل یک ترکیب رنگی با یکدیگر ترکیب شوند. در این حالت، بیشترین واریانس n باند طیفی در یک تصویر ترکیب رنگی مشاهده می‌شود. این واریانس، بیشتر از واریانسی است که در ترکیب رنگی باندهای طیفی معمولی ایجاد می‌شود و جزئیات بیشتری از اختلاف طیفی پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی مانند واحدهای سنگی و دگرسانی نمایش می‌دهد؛ لذا به زمین‌شناسان کمک می‌کند تا مرز بین مناطقی که در تصاویر ترکیب رنگی حاصل از باندهای خام قابل تشخیص نیست را مشخص کنند. همچنین کاربر می‌تواند مناطق کوچکی را که از نظر طیفی کاملاً متفاوت از کل صحنه هستند (مانند مناطق دگرسان‌شده)، مشخص کند [۱].

تحلیل مؤلفه اصلی به‌صورت استاندارد و انتخابی قابل‌اجراست. اختلاف بین تحلیل استاندارد و تحلیل انتخابی مؤلفه‌های اصلی در این است که در تحلیل استاندارد همه باندهای یک تصویر به عنوان داده ورودی در محاسبه مؤلفه‌های اصلی به کار می‌روند؛ در حالی که در تحلیل انتخابی، برحسب نوع هدف، از باندهای مناسب (باندهایی که حاوی ویژگی‌های جذب و انعکاس کانی‌های مورد نظر است) با کمترین همبستگی استفاده می‌شود [۱۱]. در این مقاله، از هر دو روش استفاده شده است.

منطقه مورد بررسی که در شکل ۴ موقعیت آن نمایش داده شده است، برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه‌شور می‌باشد که در شرق ایران؛ استان خراسان جنوبی و جنوب‌غربی شهرستان بیرجند در محدوده طول جغرافیایی $58^{\circ}30'$ تا 59° و عرض جغرافیایی 32° تا $32^{\circ}30'$ واقع است.



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه [۱۲]

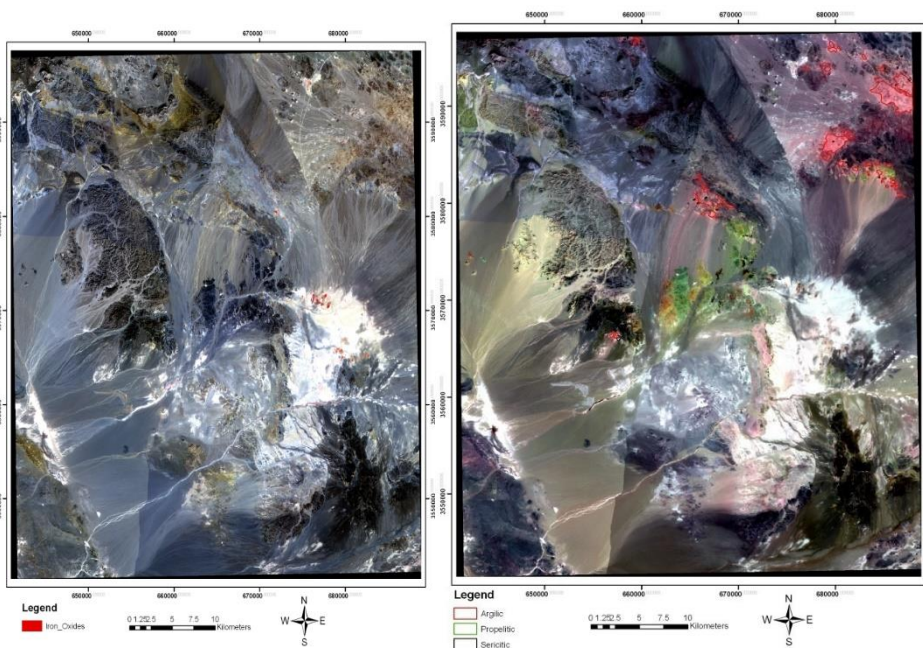
از نظر موقعیت ساختاری، منطقه مذکور به بخشی از شرق کشور تعلق دارد که این بخش در اکثر تقسیم‌بندی‌های زمین‌ساختی- رسوبی تحت عنوان ایالت ساختاری سیستان معرفی شده است. شرق ایران و به‌ویژه بلوک لوت به علت وقوع فرورانش در زمان‌های گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسیم، دارای قابلیت بالا برای تشکیل انواع کانی‌سازی‌ها به خصوص مس می‌باشد [۱۳]. در شکل ۵ نقشه زمین‌شناسی منطقه نمایش داده شده است. واحدهای زمین‌شناسی مهم منطقه را سنگ‌های آتشفشانی ائوسن فوقانی- الیگوسن تشکیل می‌دهد که در برخی نقاط، توده‌هایی با بافت پرفیری نیمه‌عمیق اسیدی- حدواسط کالک آلکالن در آن نفوذ کرده است. سنگ‌های آذرین، بیشتر از نوع داسیت، دیوریت، گرانیت، دایک‌های دولریتی، دیاباز، گابرو و اولیوین بازالت است. سنگ‌های رسوبی نیز از نوع شیل و ماسه سنگ، آهک‌های اوولیتی، آهک و کنگلومرا و رخساره‌های دگرگونی شامل گنایس متاگابرو و متادیاباز، آمفیبولیت شیست، کلریت شیست و فیلیت است. بالاآمدگی توده‌های نفوذی نیز در قسمت‌هایی از محدوده باعث دگرگونی سنگ‌های مجاور از درجات پایین تا بالا شده است.

به لحاظ ساختمانی، غالب لیتولوژی‌های منطقه دارای چین‌خوردگی‌هایی از نوع تاقدیس و ناودیس می‌باشند. عمده‌ترین تراکم گسل‌ها و درزه‌ها و چین‌ها در قسمت شمال و شمال‌شرقی منطقه جای دارند. بیشتر سنگ‌های موجود در شمال‌شرقی نقشه تحت‌تأثیر آلتراسیون متوسط تا شدید قرار گرفته‌اند. از جمله نشانه‌های معدنی مس در محدوده مورد مطالعه می‌توان به اندیس‌های چاه تونی، همیچ و فسون اشاره کرد [۱۲].

بحث و نتیجه‌گیری

روش ترکیب رنگی کاذب

آنالیزهای تجربی نشان داده‌اند که تصویری با ترکیب $RGB=468$ ، مناسب‌ترین ترکیب رنگی برای شناسایی مناطق دگرسانی در کانسارهای مس پرفیری با استفاده از تصاویر استر می‌باشد [۱۴]. در این تصویر، مناطق شمال شرقی ناحیه که در بردارنده دگرسانی آرژلیک، پروپلیتیک و سرستیک است، به ترتیب به رنگ‌های صورتی، سبز تا پسته‌ای و کرم متمایل به سفید بارزسازی می‌شوند (شکل ۵). این مسئله به علت بازتابندگی بالای کانی‌های آلونیت، کائولینیت و مسکوویت در باند ۴ (شکل ۲) نسبت به باندهای ۶ و ۸ و اختصاص باند ۴ به رنگ قرمز می‌باشد. ترکیب رنگی $RGB=321$ ، مناطق دارای دگرسانی اکسید آهن را با رنگ قرمز بارزسازی می‌کند. اکسید آهن (لیمونیت) به صورت حلقه یا هاله در اطراف مناطق دگرسانی ظاهر می‌شود [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، غالب مناطق مذکور، در مسیر آبراهه‌ها واقع می‌باشد که بیانگر ثانویه بودن این نوع دگرسانی است.



شکل ۵. ترکیب رنگی مجازی ۴، ۶ و ۸ برای رنگ‌های قرمز، سبز و آبی

شکل ۶. ترکیب رنگی مجازی ۳، ۲ و ۱ برای رنگ‌های قرمز، سبز و آبی

روش نسبت بانندی

در تصاویر نسبت بانندی، نتیجه تصاویری با مقیاس خاکستری است که با ساخت ترکیب رنگی کاذب از آنها می‌توان تصاویری تولید کرد که تفسیر و نتیجه‌گیری از آنها قابل اعتماد و کاربردی‌تر باشد [۱۴]. بر اساس شکل ۲ با استفاده از نسبت‌های بانندی ۴/۵، ۴/۶ و ۴/۸ به ترتیب کانی‌های ایلیت و مسکوویت (زون سرستیک)، کائولینیت (زون

آرژلیک) و کلریت (زون پروپلیتیک) بارز می‌شوند. اختصاص نسبت ۴/۵ به قرمز، ۴/۶ به سبز و ۴/۸ به آبی مجموعه مناطق دارای دگرسانی‌های یاد شده را با پیکسل‌های روشن (سفید) بارز می‌کند (شکل ۷).

روش تحلیل مؤلفه اصلی

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها تشریح گردید، روش تحلیل مؤلفه اصلی به دو شکل استاندارد و انتخابی قابل اجراست.

۱- PCA استاندارد بر روی ۹ باند استر: همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، بین ۹ باند مرئی و موج کوتاه همبستگی بالایی وجود دارد، با این حال ۹ باند انتخاب شده سنجنده استر، برای دستیابی با بهترین انطباق و در عین حال کمترین خطا با مناطق دگرسانی مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. تحلیل مؤلفه اصلی بر روی این ۹ باند اجرا و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر ضریب همبستگی بین ۹ باند مرئی و مادون قرمز موج کوتاه تصویر استر

باند	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۱								
۲	۰/۹۸	۱							
۳	۰/۹۷	۰/۹۹	۱						
۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱	۱					
۵	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۹۸	۱				
۶	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۸	۰/۹۹	۱			
۷	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۱		
۸	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۱	
۹	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱

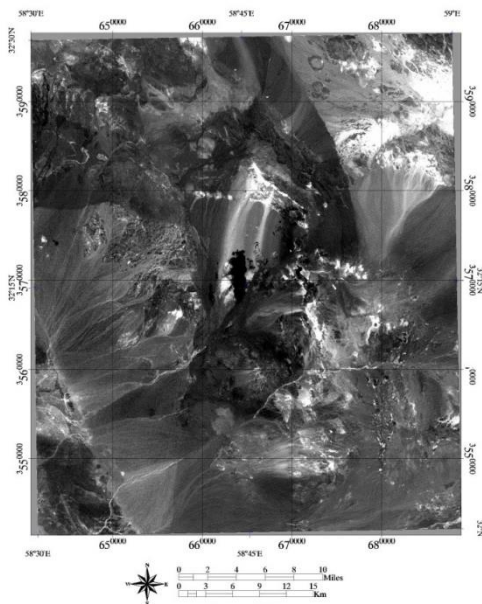
جدول ۲. مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۹ باند محدوده مادون قرمز مرئی و موج کوتاه

باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۰/۲۱	۱/۲۷	۳۴	۳۴	۳۵	۳۷	۳۵	۳۸	۳۶
۲	۰/۳۴	۱/۴۹	۱/۶۳	۱۹	۲۸	۲۷	۱۷	۰۹	۱۵
۳	-۰/۳۳	۱/۰۵	۰۵	۳۹	۳۵	۲۱	۱۵	۶۹	۲۴
۴	-۰/۴۴	۱/۰۷	۱/۲۶	۷۳	۲۷	۲۶	۱۱	۰۲	۲۳
۵	-۰/۵۳	۱/۲۲	۵۴	۲۳	۱۷	۲۷	۲۱	۳۲	۲۹
۶	-۰/۲۰	۱/۰۹	۱۰	۱۸	۱۶	۴۳	۰۲	۲۹	۷۸
۷	۰/۰۸	۰/۱۶	۰۷	۱/۱۶	۴۵	۳۰	۶۹	۴۰	۰۱
۸	۰/۰۱	۱/۲۱	۱۸	۲۱	۵۲	۵۴	۵۳	۱۰	۱۷

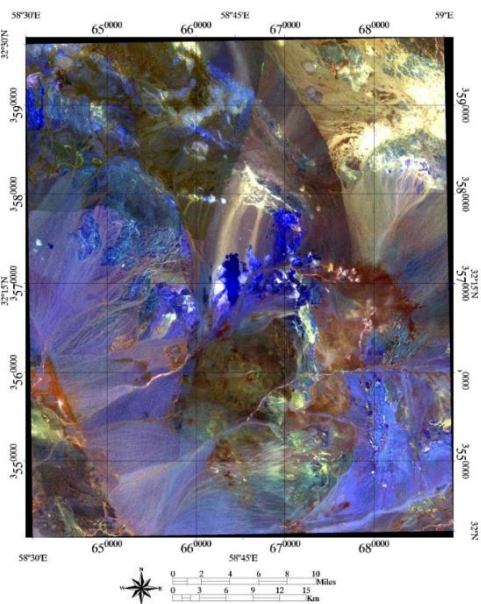
باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۹	۰/۴۷	۰/۷۵	۳۰	۰/۳	۲۸	۱۹	۰/۶	۰/۹	۰/۹
مقدار ویژه	۱/۵۶	۱/۷۹	۹۸	۵۸	۷۳	۳۱	۴۲	۳۶	۵۴
واریانس	۱/۸۲	۱/۹۱	۱/۶۲	۳۰	۱۱	۰/۹	۰/۵	۰/۵	۰/۳

اولین مؤلفه اصلی دارای وزن مثبتی از همه باندهاست و شامل ۹۵/۸۲ درصد از کل واریانس داده‌های خام استر است. این مؤلفه در بردارنده خصوصیات طیفی نمی‌باشد و روشنایی کلی تصویر به دلیل همبستگی شدید بین ۹ باند تصویر اولیه است. به عبارت دیگر، سپیدایی کلی به دلیل آلبدو و توپوگرافی می‌باشد [۱].

PC4 دارای بارگذاری مثبت بالا برای باند ۴ (۰/۷۳) می‌باشد. با توجه به اینکه در باند ۴ کانی‌های مربوط به دگرسانی آرژیلیک بازتاب بالایی دارند؛ لذا کانی‌های یاد شده در مؤلفه مورداشاره به صورت پیکسل‌های روشن ظاهر می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸. تصویر PC4 باند ۴ در روش تحلیل مؤلفه اصلی با ۹ باند



شکل ۷. تصویر نسبت باندی ۴/۵ برای قرمز، ۴/۶ برای سبز و ۴/۸ برای آبی

۲- PCA انتخابی: در استفاده از باندهای طیفی مختلف، گاهی فقط به اطلاعات خاصی از بعضی باندهای طیفی احتیاج است و نیاز به تحلیل تمام باندها نیست. PCA انتخابی در حین کاهش ابعاد داده‌های ورودی، امکان از دست رفتن اطلاعات مفید را به حداقل می‌رساند و برای نقشه‌برداری تفاوت‌های طیفی گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش تحلیل مؤلفه اصلی انتخابی روی ۶ باند استر برای نقشه‌برداری هیدروکسیل: با توجه به همبستگی بالا بین باندهای ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ (SWIR) می‌توان این روش را به کار گرفت [۱۶]. جدول ۳ مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۶

باند گفته شده را نشان می‌دهد. در این جدول، PC1 در بردارنده داده‌های توپوگرافی و سپیدایی کلی منطقه است. مؤلفه اصلی سوم دارای بارگذاری مثبت از باند ۴ و ۹ (۰/۴۲ و ۰/۶۴) می‌باشد؛ بنابراین در تصویر PC3، مناطق دارای کانی‌های آرزلی نسبت به سایر مناطق (پیکسل‌های روشن) به‌صورت پیکسل‌های تیره آشکار می‌شود. ساخت تصویر - PC3 (شکل ۹) منجر به بارسازی این مناطق با رنگ روشن می‌شود.

جدول ۳. مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۶ باند مادون قرمز موج کوتاه محدوده

باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۴	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۴۱
۵	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۲۷	-۰/۱۲	-۰/۷۰	-۰/۲۴
۶	-۰/۷۶	۰/۴۱	۰/۴۰	-۰/۱۵	-۰/۱۴	۰/۲۱
۷	-۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۳۱	۰/۱۰	۰/۳۹	-۰/۸۴
۸	۰/۲۳	-۰/۱۱	۰/۳۰	-۰/۸۶	۰/۳۱	۰/۱۰
۹	-۰/۰۲	-۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۲۳	-۰/۲۳	۰/۵۸
مقدار ویژه	۱/۸۸	۲۸/۲۰	۱۱/۵۹	۴/۳۴	۲/۴۴	۲/۳۶
	۳۳۴۵					
واریانس (درصد)	۹۸/۵۶	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۷

روش تحلیل مؤلفه اصلی روی ۳ باند استر برای نقشه‌برداری هیدروکسیل: تبدیل مؤلفه‌های اصلی باندهای ۴، ۵ و ۷، ۴، ۶ و ۷ و نیز ۲، ۵ و ۸ به ترتیب در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شده است. باندها بر اساس ویژگی طیفی کانی‌های هیدروکسیلی در محدوده‌های SWIR و NVIR انتخاب شده‌اند [۳].

الف- جدول ۴ نشان می‌دهد که آلونیت به دلیل بارگذاری بالا برای باند ۴ (۰/۵۸)، در PC2 بارسازی می‌شود. کانی بیان شده در این PC به صورت پیکسل‌های روشن آشکار می‌شود.

ب- جدول ۵ نشان‌دهنده این است که سرسیت و کانی‌های رسی، به دلیل بارگذاری بالا برای باند ۴ (۰/۶)، در PC2 و به‌صورت پیکسل‌های روشن بارسازی می‌شوند.

ج- محاسبات آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی جدول ۶ مبین این است که زون پروپلیتیک به دلیل بارگذاری بالا در باند ۲ (۰/۶)، در PC2 نمایان می‌شود. مشابه دو حالت اخیر پیکسل‌های روشن نشانگر زون گفته شده است.

جدول ۴. مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۳ باند ۴، ۵ و ۷

باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳
۴	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۵	۰/۸۱	-۰/۴۸	-۰/۳۲
۷	-۰/۰۹	-۰/۶۶	۰/۷۴
مقدار ویژه	۳/۲	۹/۰۷	۷/۴۴
واریانس (درصد)	۹۸/۹۷	۰/۵۷	۰/۴۶

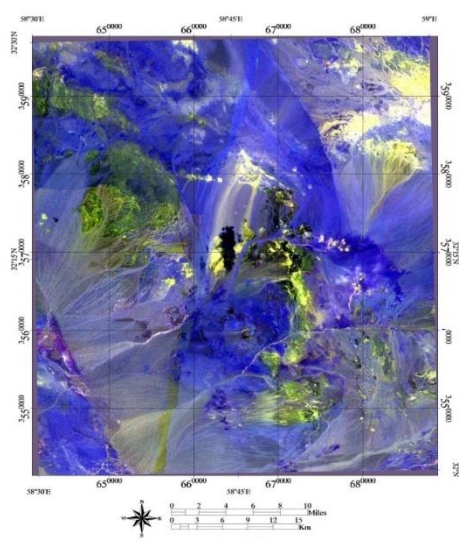
جدول ۵. مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۳ باند ۰.۴ و ۰.۷

باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳
۴	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۵۷
۶	۰/۸۲	۰/۴۷	۰/۳۱
۷	۰/۰۹	۰/۶۴	۰/۷۶
مقدار ویژه	۱/۲۸	۱۰/۰۴	۵/۶۸
واریانس (درصد)	۹۹/۰۶	۰/۶۰	۰/۳۴

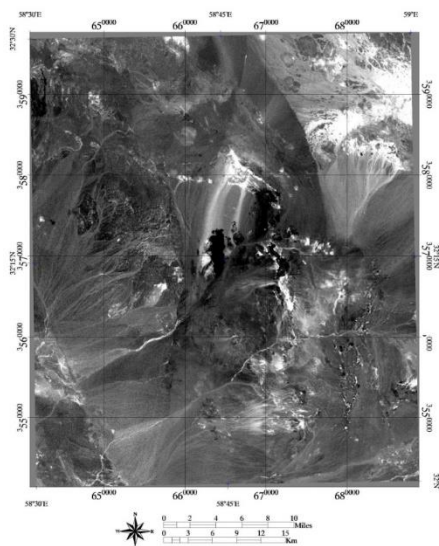
جدول ۶. مقادیر مؤلفه‌های اصلی برای ۳ باند از SWIR+NVIR محدوده

باند / مؤلفه اصلی	۱	۲	۳
۲	۰/۴۶	۰/۶۰	۰/۶۵
۵	۰/۸۵	۰/۵۱	۰/۱۴
۸	۰/۲۵	۰/۶۲	۰/۷۴
مقدار ویژه	۱/۳۵	۴۴/۳۰	۱۷/۲۳
	۱۴۴۰		
واریانس (درصد)	۹۵/۹۰	۲/۹۵	۱/۱۵

در شکل ۱۰ ترکیب رنگی (۴۶۷) PC2، (۴۵۷) PC2 و (۲۵۸) PC2 برای رنگ‌های قرمز، سبز و آبی نمایش داده شده است. مناطق دگرسانی در این تصویر با رنگ زرد متمایل به روشن بارز شده‌اند.



شکل ۱۰. ترکیب رنگی قرمز، آبی و سبز (۴۶۷) PC2، (۴۵۷) PC2 و (۲۵۸) PC2



شکل ۹. تصویر PC3 باند ۴ در روش انتخابی با ۶ باند

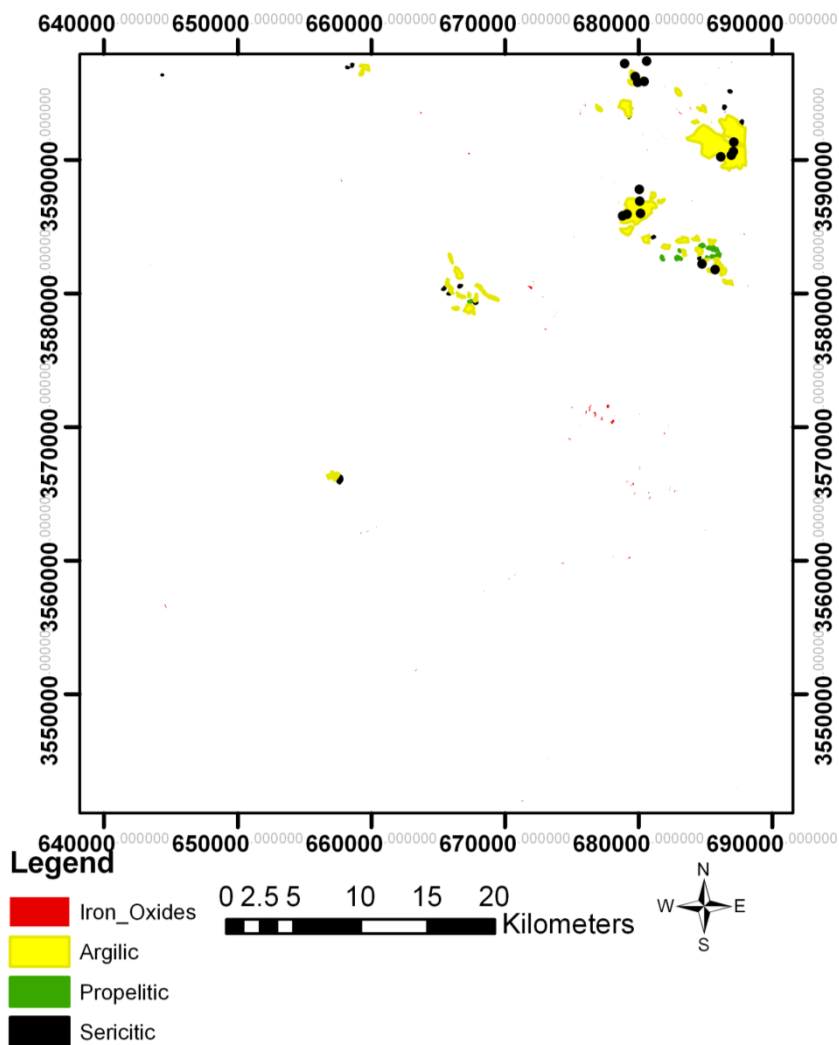
بررسی‌های صحرائی

مطالعات میدانی انجام شده توسط کارشناسان سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، بیانگر وجود ۱۶ محدوده دارای آلتراسیون مرتبط با مس در برگه سرچاه‌شور است. مختصات نقطه بازدید شده از هر محدوده در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. مختصات نقاط دگرسانی در برگه سرچاه‌شور [۱۸]

شماره نقطه	X	Y
۱	۶۷۹,۰۰۰	۳,۵۹۷,۲۰۰
۲	۶۸۰,۶۶۲	۳,۵۹۷,۳۸۰
۳	۶۷۹,۸۰۲	۳,۵۹۶,۲۱۰
۴	۶۸۰,۴۷۳	۳,۵۹۵,۸۵۷
۵	۶۷۹,۹۷۴	۳,۵۹۵,۷۹۵
۶	۶۸۷,۱۶۳	۳,۵۹۱,۲۹۴
۷	۶۸۶,۹۷۹	۳,۵۹۰,۳۳۹
۸	۶۸۷,۱۵۷	۳,۵۹۰,۶۲۰
۹	۶۸۶,۲۰۱	۳,۵۹۰,۲۰۴
۱۰	۶۸۴,۸۱۰	۳,۵۸۲,۲۰۴
۱۱	۶۸۵,۷۸۲	۳,۵۸۱,۷۵۶
۱۲	۶۸۰,۱۰۳	۳,۵۸۷,۷۷۲
۱۳	۶۸۰,۱۳۶	۳,۵۸۶,۸۷۵
۱۴	۶۸۰,۲۰۶	۳,۵۸۵,۹۶۸
۱۵	۶۷۹,۱۹۹	۳,۵۸۵,۹۰۰
۱۶	۶۷۸,۸۴۱	۳,۵۸۵,۷۹۶

در شکل ۱۲ نقشه پراکندگی محدوده‌های دگرسانی به همراه موقعیت نقاط دگرسانی موردبازدید، نمایش داده شده است. همان‌طور که از تصویر مشخص است، ۱۳ نقطه از مجموع ۱۶ نقطه مذکور در محدوده‌های معرفی شده حاصل از مقاله حاضر، واقع است.



شکل ۱۲. نقشه پراکندگی محدوده‌ها و موقعیت نقاط دگرسانی مرتبط با مس در برکه سرچاه‌شور

به‌منظور کنترل نهایی نتایج و مطالعات صحرایی، بازدید از محدوده‌های دگرسانی آرژیلیک، پروپلیتیک، سرسیتیک و اکسیدهای آهن انجام شد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به‌ترتیب دگرسانی پروپلیتیک و اکسیدهای آهن در شمال‌شرق محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. دگرسانی اکسید آهن در محدوده
سرچاه شور (دید به سمت شمال غرب)



شکل ۱۳. دگرسانی پروپلیتیک در محدوده
سرچاه شور (دید به سمت شرق)

نتیجه گیری

محدوده سرچاه شور به دلیل شرایط ویژه زمین شناسی (واقع شدن در مجاورت بلوک لوت و وقوع پدیده فرورائش) دارای قابلیت بالا برای انواع کانه سازی ها به خصوص مس پرفیری می باشد. مطالعات صحرایی و اکتشافات منطقه ای انجام شده روی نشانه های معدنی موجود در محدوده، مؤید دقت مطلوب سنجنده استر و روش های ترکیب رنگی کاذب و مؤلفه اصلی انتخابی با ۹، ۶ و ۳ باند که منجر به بارز سازی اکسید آهن، آرزلیک، سرسیتیک و پروپلیتیک شده است، می باشد. با توجه به انطباق خوب روش های فوق با واقعیت موجود، مناطق جدید بارز شده (واقع در قسمت های مرکزی منطقه)، قابلیت انجام مطالعات تکمیلی را داراست.

References

- [1] Honarmand, M., & Ranjbar, H. (2006). Application of Various ETM+ Image Processing for Exploration of Porphyry and Vein Copper Deposits in Kouh Mamzar-Kouh Pang Region in Kerman Province. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 15(57), 110-127. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=40791>
- [2] Kiani, O., Ansari, A., Mojtahedzadeh, S., & Kouhsari, A. (2020, February 19-20). *Prospecting Cu-porphyry mineralization using remote sensing data: case study from Aliabad and Darehzereshk porphyry copper deposits, SW of Yazd, Iran*. 8th Iranian Mining Engineering Conference, Birjand, Iran.
- [3] Pour, A. B., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>
- [4] Fatima, K., Khan Khattak, M. U., Kausar, A. B., Toqeer, M., Haider, N., & Rehman, A. U. (2017). Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046006. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.046006>

- [5] Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H., Stern, C., & Mazaheri, S. (2009). Hydrothermal Alteration Mapping in SW Birjand, Iran, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Image Processing. *Journal of Applied Sciences*, 9(5), 829-842. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.829.842>
- [6] Salehi, T., & Tangestani, M. H. (2020). Per-pixel analysis of ASTER data for porphyry copper hydrothermal alteration mapping: A case study of NE Isfahan, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100377. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100377>
- [7] Karimpour, M. H., Malekzadeh, Azadeh., & Heydarian, Mohammad Reza. (2013). *Mineral Resource Exploration: Geological, Geochemistry, Satellite And Geophysical Models*. Ferdowsi University Of Mashhad.
- [8] Mohuee, M., Nowrouz, Gholamreza., Moeini, Hamid., & Dehjue, Mohammad. (2020, February 19-20). *Hydrothermal alteration separation using mixture tuned matched filtering (MTMF) and spectral angle mapper (SAM) in the kodakan area*. 8th Iranian Mining Engineering Conference, Birjand, Iran .
- [9] Malekshahi, S., Rassa, I., Rashid Nezhad Omran, N., & Lotfi, M. (2018). Comparison of the results of satellite image processing for extraction of alterations with mineralogy and field studies in Sarkuh Porphyry Copper Deposit. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(4), 1-26. https://gisj.sbu.ac.ir/article_96608_d581ba49f93da0c34190d07c1c088684.pdf
- [10] Mousavi, S. S., Honarmand, M., Shahriari, H., & hosseinjanizadeh, M. (2019). Mineral exploration modeling of metallic deposits using ASTER and OLI images for producing mineral potential map in Esfandaghe region, Kerman province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(113), 45-56. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.121979.1430>
- [11] Fatemi, S.-B., & Rezaei, Y. (2018). *Principles of remote sensing*. Azadeh.
- [12] Eftekharneshad, J., Stocklin, J., & Soheili, M. (2022, February 15). *Sar-e-Chah-e-Shur Geological Survey and Mineral Exploration of Iran*. <https://gsi.ir/fa/map/530/%D8%B3%D8%B1-%DA%86%D8%A7%D9%87-%D8%B4%D9%88%D8%B1>
- [13] Kurzawa, T., Bröcker, M., Fotoohi Rad, G., Berndt, J., & Lisker, F. (2017). Cretaceous high-pressure metamorphism and low pressure overprint in the Sistan Suture Zone, eastern Iran: Additional temperature estimates for eclogites, geological significance of U-Pb zircon ages and Rb-Sr constraints on the timing of exhumation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 147, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.07.051>
- [14] Abbaszadeh, M., & Hezarkhani, A. (2011). Hydrothermal Alteration Mapping Using ASTER Images in the Rabor Area, Kerman. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 20(78), 123-128. <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.54624>
- [15] Scott Elias, D. A. (2020). *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/encyclopedia-of-geology/elias/978-0-08-102908-4>
- [16] Chavez Jr, P. S., & Kwarteng, A. Y. (1989). Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(3), 339-348. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70015931>



Investigation of the Effect of Process Variables on the Mechanical Properties of Printed Parts Made of Polyoxymethylene Using a 3D Printer by Fused Deposition Modeling (FDM)

Ali Asgari Aghdam¹, Yaghoub Dadgar Asl^{2*}, Mohamad Morad Sheikhy³

¹MSc Student, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Enghelab-e Eslami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

³Associate Professor, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.26.2020

Revised: 01.06.2021

Accepted: 01.26.2021

Keyword:

Additive manufacturing
Polyoxymethylene (POM)
Fused deposition modeling (FDM)
Mechanical properties

*Corresponding Author:

Yaghoub Dadgar Asl

Email: ydadgar@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the effect of variable parameters of 3D printing on tensile, compressive and bending strengths and impact resistance of parts made of Polyoxymethylene by Fused Deposition Modeling (FDM) method was investigated. The appropriate solution for printing the first layer and the best level for each variable was provided to achieve the best print quality of parts. In addition, the effect of layer height, nozzle temperature, filling pattern and print filling angle on the mechanical properties (compressive and bending strengths and impact and compressive resistance) of the parts was investigated and the Taguchi method used to design experiments and determine the effects. According to the results of the experiments, the highest tensile and bending strengths were obtained in wiggly and rectilinear print patterns, respectively. For impact testing, the Wiggly Print pattern provided the maximum impact energy. Finally, for pressure testing, the best conditions were observed in the rectilinear pattern. In the impact test, the nozzle temperature and print pattern were the most effective parameters, while in the pressure test, the print pattern was the most effective parameter. In addition, the best print temperature was reported to be 260 °C.





بررسی تأثیر متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن با استفاده از پرینتر سه‌بعدی به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای (FDM)

علی عسگری اقدم^۱، یعقوب دادگراصل^{۲*} , محمدمراد شیخی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای متغیر چاپ سه‌بعدی روی استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار قطعات ساخته‌شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداخته شده است و راه‌حل مناسب برای پرینت لایه اول و بهترین سطح مربوط به هر متغیر برای رسیدن به بهترین کیفیت پرینت قطعات ارائه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای نازل، الگوی پرسوندگی و زاویه پرسوندگی پرینت روی خواص مکانیکی (استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار) قطعات، بررسی شده است و از روش تاقچی برای طراحی آزمایش‌ها و تعیین میزان تأثیر هر کدام از متغیرها استفاده شده است. مطابق با نتایج آزمایش‌ها، بالاترین استحکام کششی و خمشی به ترتیب در الگوهای پرینت ویگل و ریکتیلینر حاصل شد. برای آزمایش ضربه، الگوی پرینت ویگل، بیشترین انرژی ضربه را فراهم آورد. در نهایت برای آزمایش فشار، بهترین شرایط در الگوی ریکتیلینر مشاهده شد. در آزمایش ضربه، دمای نازل و الگوی پرینت به ترتیب به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها و در آزمایش فشار، الگوی پرینت تأثیرگذارترین پارامتر بود. همچنین بهترین دمای پرینت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

کلید واژگان:

ساخت افزایشی
پلی‌اکسی‌متیلن (POM)
پرینت سه‌بعدی FDM
خواص مکانیکی

*نویسنده مسئول: یعقوب دادگراصل

پست الکترونیکی:

ydadgar@tvu.ac.ir



مقدمه

در بافت‌های بدن، از زمان معرفی اولین دستگاه‌های تجاری نمونه‌سازی سریع در سال ۱۹۸۶، طیف گسترده‌ای از اولین ماشین‌ها جنبه تجاری یافته و بسیاری از سیستم‌های جدید در نقاط مختلف جهان، ظهور پیدا کرده‌اند. نمونه‌سازی سریع به‌عنوان یک تکنولوژی کلیدی مطرح شده است که موجب کوتاه‌شدن زمان توسعه محصولات از حیث ساخت نمونه اولیه می‌شود [۱]. روش رسوب‌گذاری لایه‌ای، گسترده‌ترین روش در بخش نمونه‌سازی سریع می‌باشد. دلایل اصلی افزایش استفاده از روش رسوب‌گذاری لایه‌ای و محبوبیت آن را می‌توان در ساده‌بودن فرایند، قابلیت اطمینان و توانایی تولید قطعات پیچیده از مواد ترموپلاستیک بیان کرد. عموماً در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای از پلاستیک‌های گرمانرمی مانند آکریلونیتریل بوتادینس استرین^۱ و پلی‌لاکتیک‌اسید^۲ استفاده می‌شود. این فرایند به‌طور خلاصه به صورت رسوب‌گذاری لایه‌ای مواد اکستروود شده از طریق یک نازل می‌باشد که نازل از رشته‌های پلاستیکی گرمانرم تغذیه می‌شود. قاعده کلی در عملکرد روش رسوب‌گذاری لایه‌ای این پتانسیل بالقوه را برای استفاده از مواد با قابلیت‌های متنوع و نو استفاده در صنایع گوناگون نشان می‌دهد. برای این کار لازم است مواد اولیه به رشته‌های مناسب با قطر و استحکام کافی تبدیل شوند. [۲] با استفاده از مواد جدید در ساخت رشته‌ها می‌توان کاربرد قطعات تولید شده در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای را گسترش داد. طی سال‌های اخیر، تحقیقات محدودی در زمینه توسعه مواد جدید برای فرایند رسوب‌گذاری لایه‌ای انجام شده است. پژوهشگران در دانشگاه راتگرز، جزو اولین افرادی بودند که در زمینه توسعه استفاده از مواد فلزی و سرامیکی برای فرایند رسوب‌گذاری لایه‌ای در راستای بهبود خواص قطعات تولید شده تلاش کردند [۳؛ ۴]. با استفاده از مواد جدید در ساخت رشته‌ها می‌توان کاربرد قطعات تولید شده در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای را گسترش داد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خواص قطعات تولید شده با روش رسوب‌گذاری لایه‌ای تابعی از متغیرهای فرایند است که می‌توان با تنظیم صحیح آنها به بهبود خواص قطعه تولیدی کمک کرد. از آنجا که خواص مکانیکی قطعات تولیدشده، از اهمیت زیادی برخوردار هستند؛ مطالعه تأثیر متغیرهای فرایند روی خواص مکانیکی قطعات تولیدشده، بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین بهبود خواص با انتخاب تنظیمات و متغیرهای مناسب امکان‌پذیر است [۵]. مسعود و همکاران (۲۰۰۳) [۲] جزو نخستین افرادی بودند که موفق به تولید قطعات کامپوزیتی پلیمری- فلزی با استفاده از چاپ‌گر سه‌بعدی رسوب‌گذاری لایه‌ای شدند. قطعات ساخته‌شده از جنس آهن/ نایلون بودند و برای تولید اینسرت قالب‌های تزریق پلاستیک استفاده شدند. نیکزاد و همکاران (۲۰۱۱) [۶] به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری- فلزی پرداختند که در این پژوهش از فلز مس و پلیمر آکریلونیتریل بوتادینس استرین استفاده شد. لی و همکاران (۲۰۰۴) [۷] به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات ساخته‌شده از جنس آکریلونیتریل بوتادینس استرین با چاپ‌گر سه‌بعدی رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند. در این پژوهش، متغیرهای هم‌پوشانی بین رشته‌ها، زاویه رشته‌ها، عرض رشته‌ها و ضخامت لایه‌ها بررسی شد و از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی عملکرد الاستیک قطعات استفاده شد. کومار و همکاران (۲۰۰۹) [۵] به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات تولیدشده با روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند. در این پژوهش، متغیرهای ارتفاع لایه‌ها، جهت‌گیری قطعه روی میز، عرض رشته‌ها، زاویه رشته‌ها و هم‌پوشانی بین رشته‌ها روی پلاستیک آکریلونیتریل بوتادینس استرین بررسی شده و از الگوریتم جستجوی غذای باکتری‌ها در راستای بهینه‌سازی استحکام کششی نمونه‌ها استفاده گردیده است. رایگانی و همکاران (۲۰۱۴) [۸] نیز با

¹ Acrylonitrile Butadiene Styrene² Polyactic Acid

بررسی متغیرهای جهت‌گیری قطعات، زاویه و عرض رشته‌ها و هم‌پوشانی بین آن‌ها و استفاده از الگوریتم‌های روش گروهی برای داده‌های دسته‌بندی‌شده و تکامل تفاضلی، استحکام کششی قطعات آکریلونیتریل بوتادینس استرین تولیدشده با روش رسوب‌گذاری لایه‌ای را بهینه‌سازی کردند. ژائو و همکاران (۲۰۱۵) [۹] به بررسی تأثیر ارتفاع لایه و زاویه پرشوندگی بر قطعات تولیدشده از جنس پلی‌اترکتون^۱ و مقایسه آن با فیلامنت آکریلونیتریل بوتادینس استرین پرداختند. نبی‌پور و همکاران (۲۰۱۶) [۱۰] بر خواص مکانیکی قطعات کامپوزیتی تشکیل‌یافته از ۲۵ درصد پودر فلز مس و گرانول آکریلونیتریل بوتادینس استرین کار کردند. در این تحقیق، چهار متغیر قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پرشدن و دمای نازل در سه سطح برای بررسی انتخاب شد و به‌منظور تعیین میزان تأثیر هر متغیر و یافتن سطوح بهینه هر کدام، از روش تاگوچی استفاده گردید. ملتم ایریلدیز و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱] به بررسی استحکام کششی و کیفیت یا زبری سطح قطعات پرینت‌شده از جنس PLA پرداختند. در این تحقیق، تأثیر متغیرهای فن خنک‌کننده، دمای نازل، ارتفاع لایه و سرعت رسوب ماده بررسی شد. در این تحقیق، فن خنک‌کننده و دمای نازل در دو سطح و ارتفاع لایه و سرعت رسوب ماده در چهار سطح انتخاب شدند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، در آزمایش کشش از بین متغیرهای انتخاب‌شده، ارتفاع لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌های چاپ‌شده دارند و پس از آن، سرعت رسوب ماده، بیشترین تأثیرگذاری را دارد. در این متغیر، ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر بهترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. برای زبری سطح نیز نتایج دقیقاً مشابه با نتایج مربوط به استحکام کششی به‌دست آمده است. فیلیپو برتو و همکاران (۲۰۲۰) [۱۲] به بررسی رفتار خستگی قطعات چاپ‌شده از جنس پلیمر و کامپوزیت‌های پلیمری چاپ‌شده با استفاده از پرینتر سه‌بعدی به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند.

با گسترش روزافزون مواد مصرفی در حوزه پرینترهای سه‌بعدی، بسیار ضروری است که رفتار این مواد با توجه به تفاوت در جنس و ماهیت بیشتر این مواد، بررسی شود. از جمله مواد اولیه‌ای که به‌تازگی وارد حوزه چاپ‌گر سه‌بعدی نوع رسوب‌گذاری لایه‌ای شده است، فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن می‌باشد که با توجه به رفتار این ماده به هنگام پرینت و اصطکاک بسیار پایین و از طرفی، استحکام بالای آن، ضروری بود که متغیرهای تأثیرگذار در فرایند پرینت نمونه‌ها با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن بررسی شود. از طرفی، با توجه به این که فرایند چاپ سه‌بعدی نسبتاً گران‌قیمت است، فیلامنت گران‌قیمت نیز باعث می‌شود که فرایند پرینت و متغیرهای مربوطه برای مواد مصرفی در این نوع چاپ سه‌بعدی، از اهمیت بالاتری برخوردار شود. در این تحقیق، چهار متغیر پرینت سه‌بعدی با فرض تأثیرگذاری روی نتایج بررسی شدند. بر اساس بررسی به‌عمل‌آمده تا زمان نگارش تحقیق حاضر، تحقیق و مطالعه‌ای در مراجع علمی در مورد فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن منتشر نشده است. همچنین یادآوری این نکته بسیار بااهمیت است که به هنگام پرینت با این نوع فیلامنت، داشتن یک تهویه مناسب در محیط پرینت، بسیار ضروری است.

بیان مسئله، نوآوری و اهداف

برای دستیابی به یک پرینت با کیفیت بالا، شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت نهایی، از اهمیت بالایی برخوردار است. این مهم به خصوص در پرینت سه‌بعدی که هزینه نسبتاً بالایی دارد نمود بیشتری پیدا می‌کند. در این تحقیق، از فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن که در رشته‌های با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر خریداری شده بود، استفاده شده است. این فیلامنت به دلیل اصطکاک بسیار پایینی که دارد نیازمند به‌دست‌آوردن سطوح مناسب پارامترهای پرینت، برای بالا بردن کیفیت چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه بالا بردن استحکام پرینت می‌باشد. بنابراین هدف از این تحقیق، یافتن

¹ Polyether ether ketone

بهترین سطح متغیرها برای رسیدن به بالاترین کیفیت خواص مکانیکی قطعات می‌باشد. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای دمای نازل^۱، ارتفاع لایه‌ها^۲، زاویه پرشدن^۳ و الگوی پرینت^۴ بر کیفیت قطعات پرینت‌شده با فیلامنت پلی‌اکسی‌تیلن بررسی شده است. یکی از موضوعات بسیار مهمی که در مبحث پرینت سه‌بعدی باید به آن توجه داشت، پرینت لایه اول می‌باشد؛ چون اگر پرینت لایه اول با خطا روبه‌رو شود لایه‌های بعدی، هر چند به‌درستی پرینت شوند با مشکل روبه‌رو خواهند شد و مدل به‌دست‌آمده، چه به لحاظ ساختار فیزیکی و چه استحکام، با مشکل مواجه خواهد بود. فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن به دلیل اصطکاک بسیار پایین، در پرینت لایه اول، به دقت و تنظیمات بسیار دقیقی نیازمند است. در این تحقیق، به مشکلاتی که در لایه اول پرینت در منابع مختلف به آن اشاره شده بود پرداخته شده است و روش قابل اطمینانی برای حل آن، ارائه گردیده است.

مواد و روش تحقیق

دیدگاه تاگوچی

روش تاگوچی، تکنیکی شناخته‌شده، سیستماتیک و مؤثر برای طراحی بهینه فراهم می‌آورد. این روش به دلیل ساده‌سازی برنامه آزمایش و امکان‌سنجی مطالعه برهم‌کنش بین متغیرهای فرایند، به‌طور گسترده برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرایندها استفاده می‌شود. در نتیجه کاهش تعداد آزمایش‌ها، در زمان و هزینه، صرفه‌جویی خواهد شد. این موضوع، به‌خصوص در فرایندهای نمونه‌سازی سریع که هزینه نسبتاً بالایی دارد، نمود بیشتری پیدا می‌کند. تاگوچی برای آزمایش‌ها یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آنها ارائه می‌دهد. طبق روش تاگوچی، فقط حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌گیرد [۱۳].

انتخاب متغیرهای فرایند

در این آزمایش، چهار متغیر ارتفاع لایه، زاویه پرشوندگی، الگوی پرشوندگی و دمای نازل مطابق جدول ۱ در سه سطح بررسی شد.

جدول ۱. متغیرها و سطوح

پارامتر	مقدار
پرشوندگی نمونه‌ها	۱۰۰ درصد
دمای میز پرینت	100°C
قطر نازل	0.4mm

در کنار بررسی متغیرهای تعیین‌شده بر ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های پرینت‌شده، پارامترهای ثابت مطابق با جدول ۲ تنظیم شدند.

¹ Nozzle temperature

² Layer thickness

³ Raster angle

⁴ Infill pattern

جدول ۲. پارامترهای ثابت در چاپ نمونه‌ها

Level 3	Level 2	Level 1	Parameter
wiggle	grid	rectilinear	A: Infill pattern
0.3	0.2	0.1	B: Layer thickness (mm)
260	240	220	C: Nozzle temperature (°C)
0/90	-45/45	-30/60	D: Raster angle (°)

برای انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای آزمایش باید تمامی درجات آزادی محاسبه شوند. تعداد درجات آزادی، یک کمیت بارزش است؛ زیرا کمینه تعداد شرایط رفتاری را تعیین می‌کند و برای هر متغیر، برابر با یک واحد کمتر از تعداد سطوح می‌باشد [۱۴]. در این تحقیق، چهار متغیر در سه سطح بررسی شده‌اند. پس در مجموع ۸ درجه آزادی وجود دارد که با توجه به کمینه کردن آزمایش‌ها گزینه پیشنهادی روش تاگوجی آرایه متعامد L9 می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. آرایه متعامد استفاده شده برای آزمایش‌ها

Raster angl	Nozzle temperature	Layer thickness	Infill Pattern	NO
1	1	1	1	1
2	2	2	1	2
3	3	3	1	3
3	2	1	2	4
1	3	2	2	5
2	1	3	2	6
2	3	1	3	7
3	1	2	3	8
1	2	3	3	9

ارتفاع لایه‌ها

قطر نازل پرینتر در این تحقیق ۰.۴ میلی‌متر می‌باشد؛ بنابراین ارتفاع لایه‌ها باید مقداری کمتر از ۰.۴ میلی‌متر انتخاب می‌شد. معمول‌ترین ارتفاع لایه‌هایی که در این نوع روش پرینت سه‌بعدی استفاده می‌شود، اعدادی بین ۰.۳-۰.۱ میلی‌متر است. بنابراین در این تحقیق، ارتفاع لایه‌های ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ انتخاب شد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای هر ارتفاع لایه، نتایج به‌دست‌آمده را برای ارتفاع لایه‌های بین این لایه‌ها نیز می‌توان تعمیم داد.

دمای نازل

ماده اولیه پرینتر سه‌بعدی به داخل نازل هدایت می‌شود تا در نازل، دمای لازم برای ذوب ماده اولیه فراهم شود. اگر دمای ذوب، پایین‌تر از حد استاندارد باشد، چسبندگی و استحکام لایه‌ها پایین‌تر خواهد بود و اگر بالاتر از حد استاندارد باشد، سبب ریزش ماده و دوباره باعث کاهش چسبندگی لایه‌ها خواهد شد. بنابراین در مواد مختلف اولیه که در پرینترهای سه‌بعدی استفاده می‌شوند، یافتن دمای مناسب برای ذوب لایه‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد. در اکثر مواد اولیه مورد استفاده در پرینترهای سه‌بعدی، دمای ذوب از طرف سازنده در قالب یک بازه، مشخص می‌شود که در این تحقیق، محدوده دمایی مشخص شده که بین ۲۲۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بود را در سه سطح بررسی کردیم و تأثیر هر کدام روی نمونه‌ها گزارش شد.

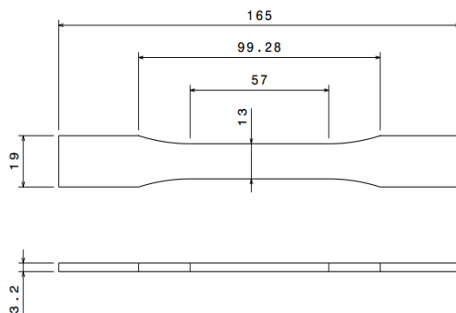
زاویه پرینت الگوها یا زاویه پرشوندگی

زاویه پرینت رشته‌ها، جهت چاپ‌شدن لایه‌ها نسبت به جهت‌گیری قطعه و نسبت به یکدیگر را مشخص می‌کند. جهت‌گیری لایه‌ها به این دلیل اهمیت دارد که استحکام نمونه‌ها در مقابل نیروهای اعمال شده به قطعه کار را تعیین

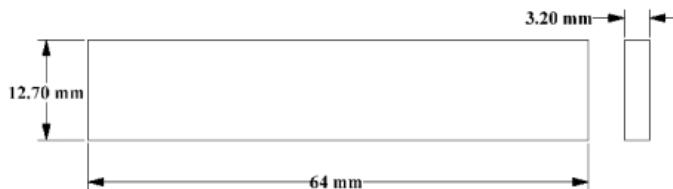
می‌کند؛ زیرا نحوه اعمال نیروها در مقایسه با یکدیگر، متفاوت است؛ از این رو تأثیر زاویه‌های پرینت مختلف در برابر نیروهای مختلف اعمالی، بررسی شده است.

طراحی نمونه‌ها

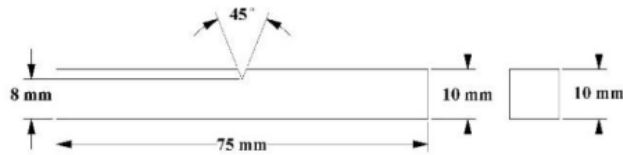
چهار آزمون مکانیکی متفاوت (کشش، خمش، فشار و ضربه) در این تحقیق انجام گرفت. برای تست کشش، نمونه‌های آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D638 برای نمونه‌های پلاستیکی طراحی گردید (شکل ۱). نمونه‌های تست خمش مطابق با استاندارد ASTM D790 برای تست خمش قطعات پلاستیکی تقویت‌شده و تقویت‌نشده و مواد نارسانای الکتریکی طراحی شدند (شکل ۲). نمونه‌های آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D611 برای محاسبه مقاومت به ضربه شاری برای قطعات پلاستیکی طراحی شدند (شکل ۳). نمونه‌های آزمون فشار مطابق با استاندارد ASTM D695 برای تست فشار نمونه‌های پلاستیکی صلب، طراحی گردیدند (شکل ۴). طراحی نمونه‌ها در نرم‌افزار Catia انجام شد و توسط نرم‌افزار اسلایسر Simplify 3D جی‌کد نمونه‌ها برای پرینت تهیه گردید. میزان پرشوندگی (infill) نمونه‌ها ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و پرینت با نازل ۰/۴ میلی‌متر انجام گرفت.



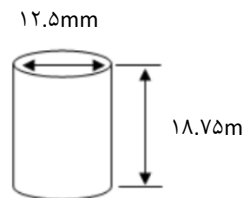
شکل ۱. ابعاد هندسی نمونه کشش



شکل ۲. ابعاد هندسی نمونه خمش



شکل ۳. ابعاد هندسی نمونه ضربه



شکل ۴. ابعاد هندسی نمونه فشار

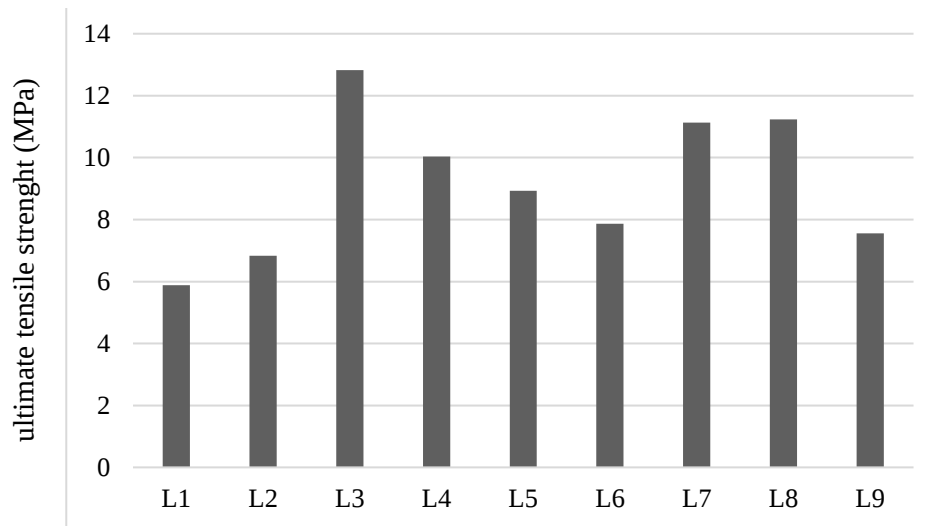
ارائه نتایج و بحث

آزمون کشش

نمونه‌های کشش براساس پارامترهای مختلف و براساس استاندارد ASTM D638 با سرعت 5mm/s با دستگاه آزمون کشش Zwick/Roell مدل Z100 با ظرفیت ۱۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند.

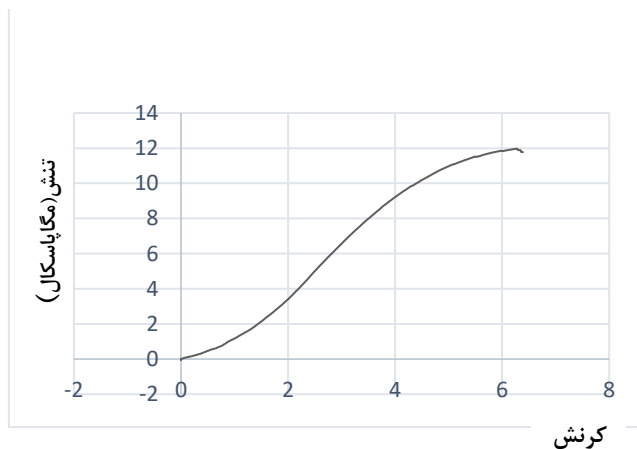


شکل ۵. دستگاه آزمون کشش و فشار



شکل ۶. نتایج حاصل از آزمون کشش

از بررسی نتایج به دست آمده در شکل ۶ مشخص می شود که نمونه های L3 و L8 بیشترین استحکام کششی را داشته اند. حال، برای یافتن سطوح بهینه متغیرها و بررسی تأثیر آنها بر استحکام کششی نمونه ها براساس روش تاگوچی، در دو مرحله تأثیر اصلی^۱ و تحلیل واریانس^۲ بررسی شدند. در نمودار شکل ۷ رفتار یکی از نمونه های پرینت شده با فیلامنت پلی اکسی متیلن تحت آزمایش کشش نشان داده می شود. جدا از ماکزیمم تنش های متفاوت به دست آمده برای هر نمونه، رفتار تمامی نمونه ها در قسمت پلاستیک نمودار، یکسان به دست آمد.



شکل ۷. رفتار نمونه های پرینت شده در آزمایش کشش

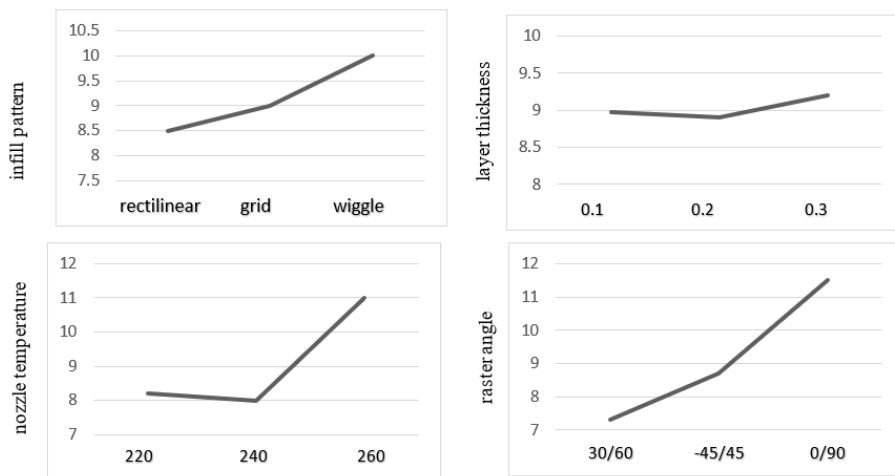
¹ Main effect

² Analysis of variance

در آزمایش کشش نمونه‌ها، در منطقه مربوط به رفتار پلاستیک، نمونه‌ها در مقابل تغییر شکل پلاستیک، تغییر طول بسیار کمی از خود نشان می‌دهند و به سرعت شکسته می‌شوند. در نتیجه، از رفتار نمونه‌ها این طور به دست می‌آید که قطعات ساخته شده از جنس فیلامنت پلی‌اکسی متیلن در مقابل کشش، رفتار بسیار تردی از خود نشان می‌دهند.

تأثیر اصلی

این تحلیل به منظور بررسی تأثیر متغیرها بر مقادیر خروجی انجام شد. به این صورت که تأثیر هر یک از سطح‌های متغیرها نسبت به نتایج خروجی آزمایش‌ها مطالعه و بررسی قرار گردید. برای مثال، متغیر ارتفاع لایه‌ها، شامل سه سطح مختلف می‌باشد. در این مطالعه، تأثیر هر کدام از سطوح به صورت مستقل از سایر متغیرها روی نتایج، بررسی شد و تأثیر هر یک از سطوح را روی نتایج آزمایش‌ها گزارش گردید. این تحلیل در شکل ۸ برای آزمایش کشش نشان داده شده است.



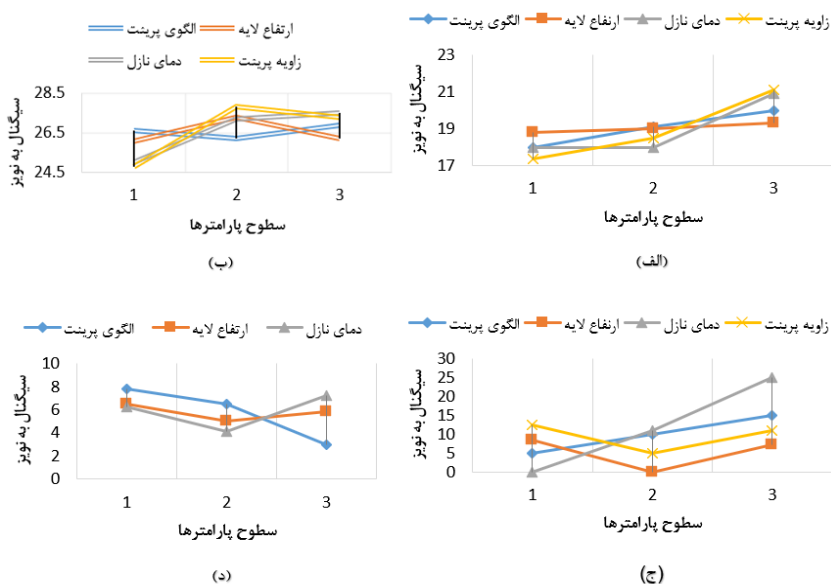
شکل ۸. نتایج تحلیل تأثیر اصلی

از بررسی نتایج شکل ۸ برای آزمایش کشش به این نتایج می‌رسیم که در پارامتر الگوی پرینت، الگوی ویگل، بیشترین تأثیر را دارد. در مورد متغیر ارتفاع لایه‌ها، نتایج نشان می‌دهند که تفاوت چندانی بین ارتفاع لایه‌ها وجود ندارد. از این رو این پارامتر، تأثیر کمتری در مقایسه با سایر پارامترها دارد. برای متغیر دمای نازل برای ذوب کردن فیلامنت، کاملاً مشخص است که دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد، بیشترین تأثیر را در چسبندگی بهتر لایه‌ها و در نتیجه، افزایش استحکام نمونه‌ها دارد. در مورد دو سطح دیگر انتخاب‌شده؛ یعنی ۲۴۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق با نتایج به دست آمده، تأثیر یکسانی گزارش شده است. از نتایج به دست آمده در مورد دمای نازل این طور برداشت می‌شود که از یک دمای مشخص به بعد، قدرت پیوند لایه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های به دست آمده، می‌توان گفت که این دما را می‌توان ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفت. تأثیر دماهای بالاتر در بررسی بعدی، نتایج کامل‌تری را گزارش خواهد کرد. به این دلیل باطمینان نمی‌توان گفت که دماهای بالاتری استفاده شود که باید تأثیر دماهای بالاتر بر ریزش لایه‌ها به دلیل ذوب در دماهای بالاتر بررسی شود. زاویه پرینت لایه‌ها به صورت ۰/۹۰ تأثیر بیشتری در افزایش

استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. طبق پیش‌بینی انجام گرفته، هم‌جهت‌بودن لایه‌ها با نیروی کششی اعمال شده، سبب داشتن بالاترین استحکام در این زاویه پرینت لایه‌ها شده است. اما در مورد دو زاویه پرینت دیگر، اهمیت جهت‌گیری لایه‌ها بیشتر معرفی می‌شود. در زاویه $45/45$ - درجه، تأثیر بیشتری نسبت به $30/60$ - گزارش شده است. در حالت 45 درجه با این که لایه‌ها در قرینه نسبت به یکدیگر پرینت می‌شوند ولی نیروی اعمال شده به لایه‌ها که در قرینه یکدیگر هستند یکسان پخش می‌شود و هم‌زمان نیروی اعمال شده را تحمل می‌کنند. ولی در مورد زاویه $30/60$ - به دلیل این که یکی از لایه‌ها بیشتر در معرض نیروی اعمالی قرار می‌گیرد، شکست لایه مذکور، سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

نسبت سیگنال به نویز

این نسبت، میزان حساسیت خروجی موردبررسی را به متغیرهای غیرقابل کنترل در آزمایش نشان می‌دهد. هرچه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد مطلوب‌تر است؛ زیرا مقادیر بیشتر سیگنال به نویز، مقادیر کوچک‌تر واریانس نتایج را حول مقدار هدف نشان می‌دهد. شکل ۹ مقادیر سیگنال به نویز را برای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است این نسبت، مقادیر بزرگ و نزدیک به هم را نشان می‌دهد که بیان‌کننده تأثیر بالای عوامل قابل کنترل بر عوامل غیرقابل کنترل می‌باشد و هرچه این نسبت بیشتر باشد یعنی تنظیمات عوامل سیگنال، موجب کمینه شدن تأثیر عوامل نویز می‌شود. برای مثال در بخش (الف) که نمایان‌گر سیگنال به نویز تست کشش می‌باشد، اگر زاویه پرینت را بررسی کنیم متوجه می‌شویم که سطح ۳ که معرف زاویه $0/90$ می‌باشد بالاترین نسبت سیگنال به نویز را دارد. یعنی در رسیدن به هدف آزمایش که پیدا کردن بالاترین میزان استحکام کششی می‌باشد، این سطح در زاویه پرینت، مؤثرترین گزینه است ولی برای مثال در مورد ارتفاع لایه سیگنال به نویز، تفاوت چندانی بین سطح‌ها وجود ندارد؛ یعنی این متغیر بر استحکام کششی، تأثیر چندانی ندارد. در مورد تمامی نمودارها در بخش مربوط به هر آزمایش، بحث شده است.



شکل ۹. نسبت سیگنال به نویز متغیرها و سطوح برای (الف) تست کشش، (ب) تست خمشی، (ج) تست ضربه، (د) تست فشار

تحلیل واریانس

این تحلیل، به منظور مشخص شدن سهم هر متغیر بر خروجی موردبررسی، انجام می‌شود. به این منظور، روابط (۱) و (۲) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - C.F) \quad (1)$$

$$C.F = \frac{T^2}{n} \quad (2)$$

در این روابط SS_T مجموع مربع انحرافات، $C.F$ فاکتور تصحیح و T میانگین مجموع خروجی آزمایش‌ها می‌باشند. برای نشان دادن میزان تأثیر هر متغیر بر خروجی، از مشخصه F استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = \frac{MS_\alpha}{MS_e} \quad (3)$$

در این رابطه MS_α میانگین مربعات برای هر متغیر و MSe میانگین مربعات خطا می‌باشند. جدول ۴ تحلیل واریانس برای آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴. آنالیز واریانس برای آزمایش کشش

Percentage of contribution (%)	P	F	MS	SS	DF	Factors
16.84	0.785	0.25	1.65	3.3	2	Infill pattern
4.94	0.976	0.02	0.17	0.3	2	Layer thickness
32.82	0.047	1.62	7.49	15	2	Nozzle Temperature
45.4	0.083	3.88	12.03	24.1	2	Raster angle

در محاسبات آنالیز واریانس ضریب $\alpha=0.5$ در نظر گرفته شده بود. از این رو بعد از محاسبه آنالیز واریانس برای آزمون کشش، مقدار p -value برای دمای نازل و زاویه پرینت، مقادیر معنی‌داری داشت ولی فرض تأثیرگذاری برای الگوی پرینت و ارتفاع لایه با توجه به مقدار p -value در سطح 5 درصد معنی‌دار نبودند. بنابراین به این نتیجه می‌توان رسید که در آزمایش کشش، از بین متغیرهای انتخاب‌شده، دو متغیر الگوی پرینت و ارتفاع لایه دو متغیر تأثیرگذار بر استحکام کششی نمونه‌ها هستند و از تأثیرگذاری دو متغیر ارتفاع لایه و الگوی پرینت در این آزمایش، چشم‌پوشی شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، زاویه پرینت رشته‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشت. از بین سطوح انتخاب‌شده برای متغیر زاویه پرینت نیز زاویه $0/90$ بیشترین تأثیرگذاری را داشت. بنابراین می‌توان گفت که از بین متغیرها و سطوح انتخاب‌شده، زاویه پرینت $0/90$ بالاترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. بعد از زاویه پرینت رشته‌ها، دمای نازل با 33 درصد و دمای 260 درجه سانتی‌گراد، از لحاظ تأثیرگذاری در رتبه بعدی قرار دارد.

آزمایش خمش

نمونه‌های آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D790 و با استفاده از دستگاه کشش SANTAM-STM150 با LOADCELL 20KN انجام گرفت. شکل ۱۰ دستگاه آزمون خمش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. دستگاه آزمون خمش

خمش سه نقطه‌ای برای قطعات به منظور بررسی مقاومت خمشی در نمونه‌ها انجام گرفت. برای آزمایش خمش، تنش مطابق با رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$\sigma = \frac{2bt^2}{3PL} \quad (۴)$$

Where:

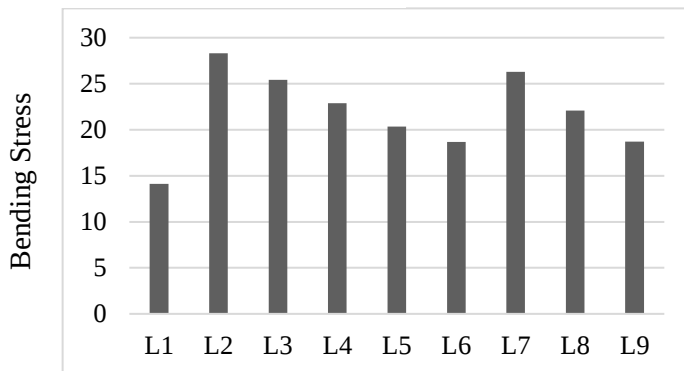
σ = Flexural Stress (MPa)

P = Load (N)

L = Support span (50 mm)

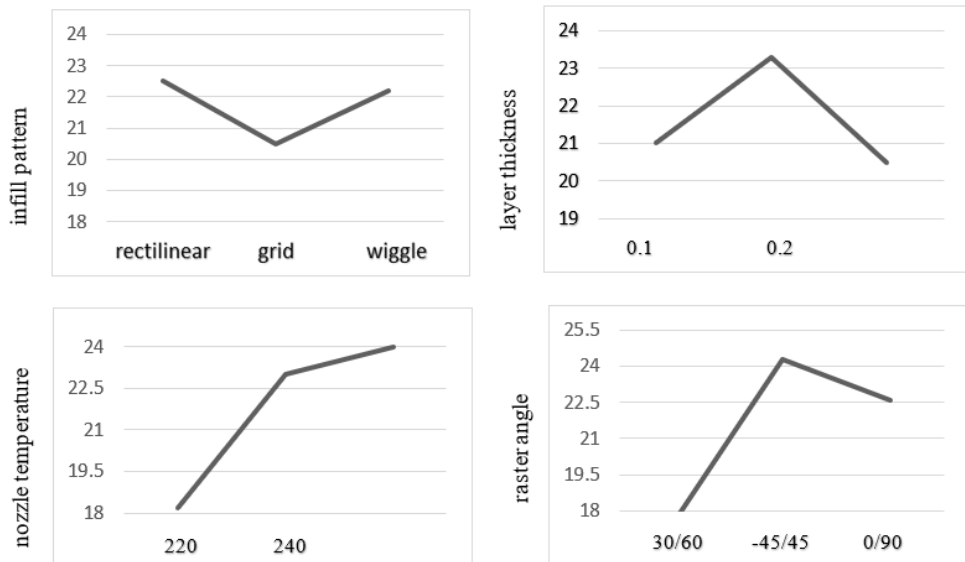
b = width of specimen (mm)

t = thickness of beam (mm)



شکل ۱۱. نتایج حاصل از آزمون خمش

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۱ نمونه‌های چاپ‌شده مطابق با تنظیمات متغیرهای L2 و L7 به‌ترتیب بالاترین استحکام خمشی را به خود اختصاص داده‌اند. در آزمایش L2 سطح انتخاب‌شده برای متغیر الگوی پرینت ریکتیلینیر، ارتفاع لایه 0.2 میلی‌متر، دمای نازل ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- انتخاب شده بودند. در آزمایش L7 وقتی سطوح مختلف بررسی گردید این نتیجه حاصل شد که همانند آزمایش L2، زاویه پرینت ۴۵/۴۵- درجه در زاویه پرینت تأثیرگذار بوده است ولی سایر سطوح، تفاوت‌هایی با هم دارند که برای بررسی دقیق‌تر آن‌ها نیاز است که از نتایج بررسی تأثیر اصلی کمک گرفته شود.



شکل ۱۲. تأثیر اصلی سطوح متغیرها در آزمایش خمش

بر اساس نتایج شکل ۱۲ در الگوی پرینت، ریکتیلینیر، بیشترین تأثیر را دارد و بعد از آن، به‌ترتیب ویگل و گرید قرار می‌گیرند. در توضیح دلیل این اتفاق باید به ساختار الگوها مراجعه کرد. آن‌گونه که نتایج گزارش می‌کنند هر چقدر که رشته‌ها در راستای طولی بیشتر پرینت شوند، استحکام بیشتری در مقابل خمش خواهند داشت که این موضوع در الگوی گرید که تأثیر کمتری داشته است صدق می‌کند. برای ارتفاع لایه‌ها، ارتفاع لایه ۰/۲ میلی‌متر تأثیرگذاری بیشتری دارد. بنابراین از دو آزمایش انجام‌گرفته تا این مرحله می‌توان این‌گونه برداشت کرد که ارتفاع لایه‌های بالاتر، اثرگذاری بالاتری را در مورد فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن داشته‌اند. در مورد دمای نازل مثال آزمایش کشش، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین تأثیر را دارد و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد از نظر تأثیرگذاری در رتبه بعدی قرار دارد. پس در مورد دمای نازل، با اطمینان بالاتری می‌توان گفت که این دما بهترین دمای پرینت با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن است. برای متغیر زاویه پرینت رشته‌ها مطابق با دو نمونه طراحی‌شده L2 و L7 که به‌ترتیب بالاترین استحکام خمشی را داشتند و زاویه پرینت هر دو ۴۵ درجه بود، تحلیل تأثیر اصلی هم بر این مورد تأکید دارد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- را به‌عنوان تأثیرگذارترین سطح، معرفی می‌کند.

جدول ۵. آنالیز واریانس آزمایش خمش

Factors	DF	SS	MS	F	P	Percentage contribution (%)
Infill pattern	2	6.9	3.5	0.1	0.87	11.59
Layer thickness	2	13.3	6.6	0.3	0.11	15.57
Nozzle temperature	2	58.4	29.2	1.7	0.025	33.55
Raster angle	2	79	39.5	3	0.012	39.28

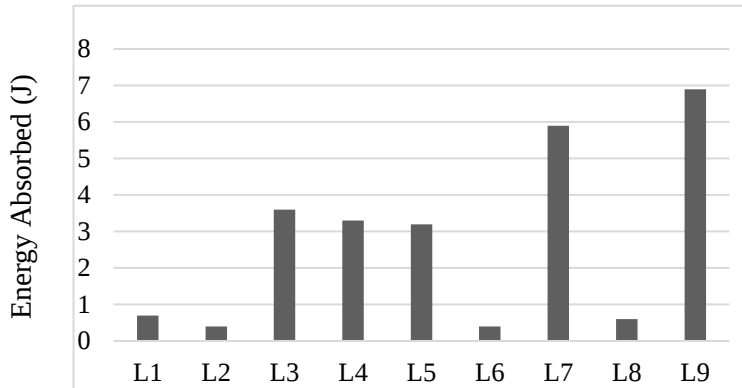
در محاسبات آنالیز واریانس، ضریب $\alpha=0.5$ در نظر گرفته شده بود. از این رو بعد از محاسبه آنالیز واریانس برای تست خمش، p-value برای دمای نازل و زاویه پرینت، مقادیر معنی‌داری داشت ولی برای دو متغیر الگوی پرینت و ارتفاع لایه‌ها با توجه به ضریب α در نظر گرفته، ارتباط معنی‌داری را نمی‌توان متصور شد. پس می‌توان به این نتیجه رسید که در آزمایش خمش نیز از بین متغیرهای انتخاب‌شده، دو متغیر دما و زاویه پرینت بر خروجی نتایج آزمایش که همان نیروی خمش است، تأثیرگذار هستند. مطابق جدول ۵ همانند آزمایش کشش، در آزمایش خمش نیز زاویه پرینت، بالاترین تأثیرگذاری را دارد. جهت‌گیری رشته‌ها از آن جا که نحوه شکل‌گیری و استخوان‌بندی داخل قطعه در برابر نیروهای اعمال شده را تعیین می‌کند، چنین تأثیرگذاری از خود در نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد. بنابراین جهت‌گیری رشته‌ها در برابر نیروهای اعمال شده، بیشترین تأثیر را دارد. دمای نازل از نظر تأثیرگذاری، در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ماهیت فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن این طور ایجاب می‌کند که دماهای بالاتر، به چسبندگی بهتر لایه‌ها کمک زیادی می‌کند. باید به این نکته نیز توجه کرد که افزایش دمای نازل، باعث افزایش بیش‌ازاندازه لغزش لایه‌ها روی همدیگر نشود که مطابق نتایج حاصل‌شده از پرینت نمونه‌ها، چنین مشکلی ایجاد نشد.

تست ضربه

نمونه‌های آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D6110 با استفاده از دستگاه آزمون ضربه -SANTAM SIT- 200B موردآزمایش قرار گرفتند.



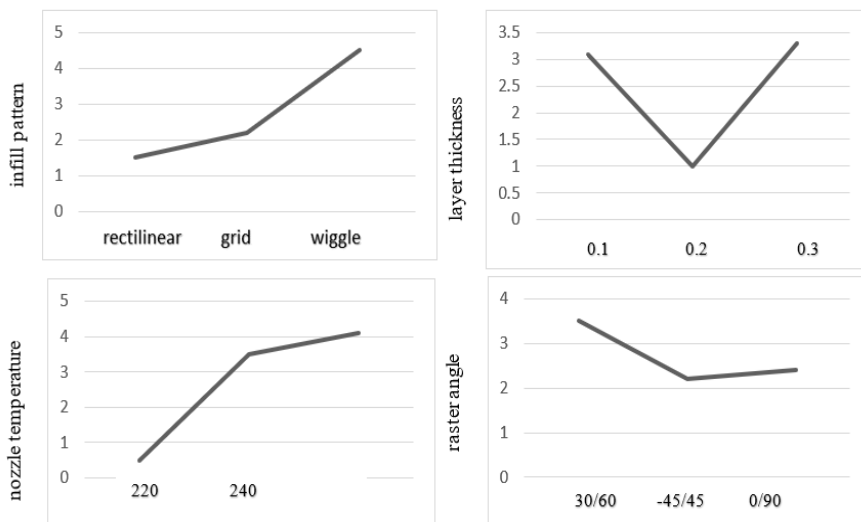
شکل ۱۳. دستگاه آزمون ضربه



شکل ۱۴. نتایج آزمایش ضربه

بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه‌های L۷ و L۹ دارای بالاترین انرژی جذب شده در طول آزمایش‌های ضربه هستند.

در آزمایش مربوط به نمونه L۹، الگوی پرینت ویگل، ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر، دمای نازل ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت رشته‌ها ۳۰/۶۰ تعریف شده بودند. ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر دوباره به این نکته اشاره می‌کند که ارتفاع لایه‌های بالاتر برای فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن، نتایج بهتری را در آزمایش‌ها گزارش می‌دهد. در نمونه چاپ شده L۷ نیز الگو پرینت مشابه با L۹ است. ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- درجه نیز برای سطوح متغیرها معرفی می‌شوند. حالا برای بررسی دقیق‌تر سطوح باید به تحلیل تأثیر اصلی مراجعه شود.



شکل ۱۵. تأثیر اصلی سطوح متغیرها در آزمایش ضربه

همان‌طور که در توضیح نمونه L9 اشاره شد الگوی پرینت ویگل در این آزمایش که بیشترین انرژی ضربه را جذب کرده بود، استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۱۵ تأثیر اصلی نیز گواه همین موضوع است. یعنی الگوی پرینت ویگل، بیشترین تأثیرگذاری را در آزمایش ضربه به خود اختصاص داده است و الگوهای گرید و ریکتیلینیر در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

در مورد ارتفاع لایه‌ها، $\frac{1}{3}$ میلی‌متر دارای بیشترین میزان اثرگذاری بود. برای دمای پرینت فیلامنت، همانند دو آزمایش قبلی، دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین اثرگذاری را داشت. برای الگوی زاویه پرینت هم، زاویه 90° به‌عنوان تأثیرگذارترین سطح معرفی شده است. بررسی میزان اثرگذاری هر یک از متغیرها با استفاده از آنالیز واریانس انجام شد.

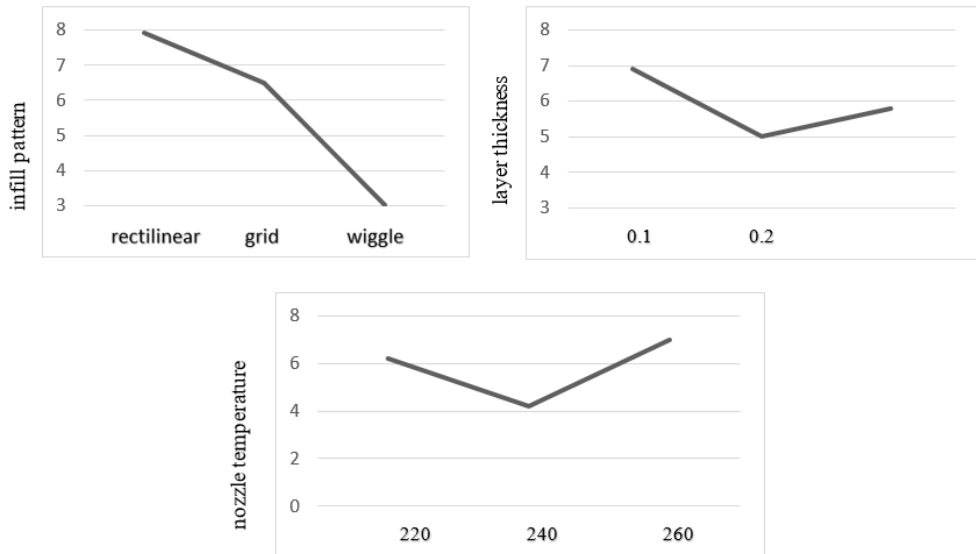
جدول ۶. آنالیز واریانس آزمایش ضربه

Percentage of contribution (%)	P	F	MS	SS	DF	Factors
16.84	0.785	0.25	1.65	3.3	2	Infill pattern
4.94	0.976	0.02	0.17	0.3	2	Layer thickness
32.82	0.047	1.62	7.49	15	2	Nozzle Temperature
45.4	0.083	3.88	12.03	24.1	2	Raster angle

در آزمایش ضربه مقدار p-value برای الگوی پرینت، دمای نازل و ارتفاع لایه در سطح 5 درصد، مقدار معنی‌داری بود. پس در آزمایش ضربه برای مقدار $\alpha=0.5$ فرض تأثیرگذاری برای زاویه پرینت بر استحکام ضربه نمونه‌ها رد شد ولی برای متغیرهای الگوی پرینت، دمای نازل و ارتفاع لایه، فرض تأثیرگذار بودن تأیید شد. پس برای رسیدن به نمونه‌های با بالاترین استحکام ضربه باید این سه متغیر، تأثیرگذار در نظر گرفته شوند و سطوح بهینه آن‌ها در نظر گرفته شود. آنالیز واریانس متغیرها برای آزمایش ضربه نشان داد که دمای نازل، اثرگذاری بیشتری در مقایسه با سایر متغیرها دارد. وقتی این نتیجه با نتایج به‌دست‌آمده در دو آزمایش قبلی مقایسه می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که دمای نازل، یکی از متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر کیفیت نمونه‌های پرینت‌شده با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن در بین متغیرهای انتخاب‌شده در این تحقیق می‌باشد. از آن جایی که نحوه اعمال نیرو در این آزمایش با دو آزمایش، از نظر نحوه و سرعت اعمال نیرو، متفاوت است؛ نتایج تأثیرگذاری متغیرها هم با دو آزمایش قبلی، تفاوت‌هایی دارد. در آزمایش ضربه، متغیر الگوی پرینت، تأثیرگذاری بیشتری در مقایسه با دو آزمایش قبلی در نتایج داشته است.

تست فشار

تست فشار برای نمونه‌های طراحی‌شده براساس استاندارد ASTM D695 و با استفاده از دستگاه آزمون Zwick/Roell مدل Z100 با ظرفیت ۱۰ تن انجام گرفت. سرعت اعمال نیروی فشار نمونه‌ها 1.3mm/min در نظر گرفته شد. در این آزمایش تأثیر ۳ پارامتر ارتفاع لایه، الگوی پرینت و دمای نازل، بررسی شد. چون طراحی نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای بود؛ در این حالت، متغیر زاویه پرینت، تأثیری بر آزمون فشار نمونه‌ها نخواهد داشت. چون نحوه پرینت رشته‌های داخلی نمونه‌ها به شکلی بود که هر دو رشته متوالی پرینت‌شده نسبت به هم زاویه 90° درجه تشکیل می‌دادند و سطح مقطع نمونه‌ها هم در این آزمون به‌صورت دایره‌ای بودند؛ از تأثیرگذاری این متغیر در این آزمایش، چشم‌پوشی شد.



شکل ۱۶. آنالیز تأثیر پارامترها در تست فشار

جدول ۷. آنالیز واریانس برای آزمایش فشار

Factors	DF	SS	MS	F	P	Percentage contribution (%)
Infill pattern	2	6.9	3.5	0.1	0.87	11.59
Layer thickness	2	13.3	6.6	0.3	0.11	15.57
Nozzle temperature	2	58.4	29.2	1.7	0.025	33.55
Raster angle	2	79	39.5	3	0.012	39.28

مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۷، مقدار p-value با فرض $\alpha=0.5$ برای تأثیرگذار بودن تمامی متغیرها بر نتایج آزمایش فشار، برای دو متغیر الگوی پرینت و دمای نازل، مقدار معنی داری به دست آمد ولی برای متغیر ارتفاع لایه با توجه به مقدار p-value فرض تأثیرگذاری این پارامتر بر نتایج، رد شد. پس برای پرینت نمونه‌ها و قطعات در آزمایش فشار، دو متغیر دمای نازل و الگو، از تأثیرگذاری بالاتری برخوردار هستند. بیشترین تأثیرگذاری را الگوی پرینت در حالت ریکتلینیر داشت و دمای نازل هم بر روی مقدار ۲۶۰ درجه سانتی گراد گزارش شد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای نازل، الگوی پرشوندگی و زاویه پرشوندگی بر خواص مکانیکی (استحکام کششی (Tensile strength)، استحکام خمشی (Flexural strength) و مقاومت به ضربه (Impact resistance) قطعات ساخته شده از جنس پلی اکسی متیلن با چاپ گر سه بعدی به روش رسوب گذاری لایه ای، بررسی و تحلیل شد. برای آزمایش فشار (Compress) نیز تأثیر سه پارامتر ارتفاع لایه، دمای نازل و الگوی پرینت، بررسی گردید. مطابق با نمودار شکل ۷ نمونه‌ها در مقابل کشش، رفتار تردی از خود نشان دادند. در آزمایش کشش و خمش، زاویه پرشوندگی پرینت و دمای نازل، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام نمونه‌ها به خود اختصاص دادند. مطابق با

نتایج آزمایش‌ها، بالاترین استحکام کششی در الگوی پرینت wiggle، ارتفاع لایه 0.3mm، دمای ۲۶۰ برای نازل و زاویه پرشوندگی ۰/۹۰ حاصل شد. این ویژگی برای نمونه خمش در الگوی rectilinear، ارتفاع لایه 0.2 میلی‌متر، دمای نازل ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرشوندگی ۴۵/۴۵- گزارش شد. در آزمایش ضربه، دمای نازل و الگوی پرینت، به ترتیب به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها معرفی شدند و در آزمایش فشار، الگوی پرینت، تأثیرگذارترین پارامتر بود. برای آزمایش ضربه، الگوی پرینت wiggle، ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرشوندگی ۳۰/۶۰- بیشترین انرژی ضربه را فراهم آورد. و در نهایت، برای آزمایش فشار، بهترین شرایط در الگوی rectilinear، ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر و دمای ۲۶۰ درجه برای نازل گزارش شد.

یادآوری و توجه به این نکته بسیار مهم است که هر یک از پارامترها در آزمایش‌ها تأثیر منحصر به فرد خود را داشتند که لازم بود برای پرینت قطعات در بالاترین کیفیت با توجه به نوع کاربرد آن‌ها به نمودارها و جداول مربوط به هر آزمایش مراجعه شود ولی در مورد دمای نازل برای ذوب فیلامنت، برای تمامی آزمایش‌ها بهترین وضعیت در دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

References

- [1] Jacobs, P. F. (1995). *Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. Society of Manufacturing Engineers. https://books.google.com/books/about/Stereolithography_and_Other_RP_M_Technol.html?id=dvOwAAAAACAAJ
- [2] Masood, S. H., & Song, W. Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. *Materials & Design*, 25(7), 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009>
- [3] Allahverdi, M., Danforth, S. C., Jafari, M., & Safari, A. (2001). Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(10), 1485-1490. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00047-4)
- [4] Wu, G., A. Langrana, N., Sadanji, R & ,Danforth, S. (2002). Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals. *Materials & Design*, 23(1), 97-105. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00079-6)
- [5] Panda, S. K., Padhee, S., Sood, A. K., & Mahapatra, S. S. (2009). Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process Parameters Using Bacterial Foraging Technique. *Intelligent Information Management*, 1(2), 9. <https://doi.org/10.4236/iim.2009.12014>
- [6] Nikzad, M., Masood, S. H., & Sbarski, I. (2011). Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*, 32(6), 3448-3456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.056>
- [7] Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>
- [8] Rayegani, F., & Onwubolu, G. (2014). Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4), 509-519. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5835-2>
- [9] Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>

- [10] Nabipour, M., Behraves, A. H., & Akhoundi, B. (2017). Effect of printing parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal composites Printed via FDM 3D printer. *Modares Mechanical Engineering*, 17(1), 145-150. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-8030-en.html>
- [11] Altan, M., Eryildiz, M., Gumus, B., & Kahraman, Y. (2018). Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength. *Materials Testing*, 60(5), 471-477. <https://doi.org/10.3139/120.111178>
- [12] Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D. J., Neisiany, R. E., Hedenqvist, M. S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, 143, 106007. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106007>
- [13] Roy, R. K. (1990). *A Primer on the Taguchi Method VNR competitive manufacturing series*. Society of Manufacturing Engineers. https://books.google.com/books/about/A_Primer_on_the_Taguchi_Method.html?id=OUI54mrYdqIC
- [14] Taguchi, G., Chowdhury, Subir., & Wu, Yui. (2004). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/9780470258354>



Providing a Multi-Objective Production Scheduling Model Taking into Account Preemptive Work, Early Costs, Late Payment, WIP and Downtime Penalties with a Reliability Approach

Alireza Azizi¹, Mohammad Mehdi Movahedi^{2*} , Seyed Ahmad Shayannia³

¹PhD student, Department of Industrial Management, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran.

²Associate Professor, Department of Industrial Management, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran.

³Assistant Professor, Department of Industrial Management, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.13.2020

Revised: 02.17.2021

Accepted: 03.01.2021

Keyword:

Preemptive Work
Production Schedule
Reliability
Work stoppage penalty

*Corresponding Author:

Mohammad Mehdi Movahedi

Email:

mmmovahedi@gmail.com

ABSTRACT

The subject of the present study is production scheduling taking into consideration the payment of penalties. The purpose of production scheduling is to allocate limited resources over time to perform a group of activities. Therefore, the aim of the research was to develop an appropriate schedule in a production system that deals with issues such as various interruptions in production, lack of forecasting of raw materials required and time required for production, inability to decide on the composition of production which will lead to damages caused by delay and work stoppage. If the work is completed after the delivery date, there will be a penalty for late payment due to customer dissatisfaction, a contractual penalty or loss of credit. Reliability engineering must ensure that components and subsystems meet the defined requirements over a period of time. The research design was based on solving standard sample problems. In this regard, this research provided a mathematical model for multiple purpose scheduling. The scheduling problem was solved in the form of a reliability problem. Findings showed that solving the problem of production scheduling in the form of reliability performed well in terms of finding optimal solutions. The reliability of the system was also confirmed in 14 sample problems.





ارائه یک مدل چندهدفه زمان‌بندی تولید با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده، هزینه‌های زودکرد، دیرکرد، WIP و جریمه‌های قطع کار با رویکرد قابلیت اطمینان

علیرضا عزیزی^۱، محمد مهدی موحدی^{۲*}، سید احمد شایان‌نیا^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران.

۲- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران.

۳- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

زمینه تحقیق حاضر، زمان‌بندی تولید با در نظر گرفتن جریمه‌ها می‌باشد. هدف زمان‌بندی تولید، تخصیص منابع محدود در طول زمان برای انجام گروهی از فعالیت‌ها است؛ بنابراین هدف تحقیق، تدوین برنامه زمان‌بندی مناسب در یک سیستم تولیدی که با مسائلی مانند وقفه‌های مختلف در تولید، نبود پیش‌بینی درخصوص مواد اولیه موردنیاز و مدت‌زمان لازم برای تولید، ناتوانایی در تصمیم‌گیری در خصوص ترکیب تولید و حتی خسارات دیرکرد و قطع کار مواجه هستند؛ زیرا اگر کار بعد از موعد تحویل تمام شود، جریمه دیرکرد ناشی از نارضایتی مشتری، جریمه قراردادی یا از دست دادن اعتبار ایجاد می‌شود. مهندسی قابلیت اطمینان، باید از این مطمئن شود که قطعات و زیرسیستم‌ها برابر با نیازمندی‌های تعریف شده در بازه زمانی معین عمل خواهند کرد. طرح تحقیق بر مبنای حل مسائل نمونه استاندارد می‌باشد. در همین راستا این تحقیق یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی با هدف چندگانه ارائه می‌کند که مسئله زمان‌بندی در قالب یک مسئله قابلیت اطمینان قرار گرفته و حل شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که حل مسئله زمان‌بندی، تولید در قالب قابلیت اطمینان دارای عملکرد مناسبی از جهت یافتن جواب‌های بهینه است. همچنین در ۱۴ مسئله نمونه حل شده قابلیت اطمینان سیستم مورد تأیید بوده است.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

کلید واژگان:

جریمه قطع کار

زمان‌بندی تولید

قابلیت اطمینان

کارهای پیش‌دستی‌کننده

*نویسنده مسئول: محمد مهدی موحدی

پست الکترونیکی:

mmmovahedi@gmail.com



مقدمه

موضوع موردبررسی در این تحقیق، زمانبندی تولید با در نظر گرفتن جریمه‌ها و زودکردها می‌باشد. مسئله موردنظر، زمانبندی تولید کارگاهی می‌باشد. اهمیت این مسئله در آن است که واحدهای تولیدی اغلب با تأخیرات زیادی، محصولات را تولید می‌کنند و لزوم یک برنامه مناسب که باعث شود این تأخیرات کمتر شود بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در دیدگاه سنتی و مرسوم، دو فعالیت برنامه‌ریزی توالی عملیات و زمانبندی تولید به‌طور جداگانه انجام می‌گردد و ارتباط و همکاری این دو فعالیت، بسیار کم و محدود به رابطه طولی می‌شود؛ بنابراین محققان، روش‌های ابتکاری فراوانی ارائه کرده‌اند و این پژوهش نیز با این رویکرد، درصدد ارائه یک روش ابتکاری بر مبنای اصول قابلیت اطمینان می‌باشد.

ضرورت در نظرگرفتن جریمه‌ها به دلیل قطع کار و دیرکردها تا بدان جاست که کاهش قطع کارها در تحقق زمانبندی مطابق برنامه، تأثیر به‌سزایی دارد و درنظرگرفتن دیرکردها در ایستگاه‌های کاری باعث جلوگیری از هدررفت منابع می‌شود.

ضرورت موضوع زمانبندی چندهدفه در سیستم‌های تولیدی، در نظر گرفتن تقدم و تأخر فرایندها برای جلوگیری از تأخیر می‌باشد و توجه به زمان‌های شروع و پایان فرایندها می‌تواند در بهبود عملکرد سیستم تولیدی، تأثیرگذار باشد.

در این مقاله، بحث بهینه‌سازی چندهدفه زمانبندی تولید تک‌ماشینه با کارهای پیش‌دستی‌کننده و هزینه دیرکرد برحسب زمان و تعداد، هزینه زودکرد برحسب زمان و تعداد، هزینه قطع کار و هزینه کالای در جریان ساخت را در نظر می‌گیریم و در واقع، معیارهای بیان شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و مدلی برای آن پیشنهاد می‌کنیم که این مدل نخست می‌تواند معیارهای ذکر شده بالا را به‌طور هم‌زمان در زمانبندی نشان دهد و نکته بعد اینکه یک تولیدکننده که دارای شرایط مشابه باشد می‌تواند برای اجرای زمانبندی تولید خود از این مدل استفاده کند.

بنابراین هدف این تحقیق، ارائه یک زمانبندی تولید مناسب برای کاهش تأخیرها و جریمه‌های خط تولید است و این سؤال مطرح می‌شود که آیا روش پیشنهادی برای ارائه یک زمانبندی مناسب تولید، کارایی لازم را دارد؟

پیشینه تحقیق

طی مراحل ساخت و استفاده، عدم قطعیت در همه جا وجود دارد و تخریب عملکرد، اجتناب‌ناپذیر است و بر قابلیت اطمینان مکانیسم، تأثیر می‌گذارد [۱]. در این مقاله، بر اساس اصول علم قابلیت اطمینان، یک تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر حاشیه عملکرد با توجه به تخریب عملکرد ناشی از سایدگی و عدم اطمینان چند منبع تهیه شده است.

براساس روش تحلیل فرایند تئوری سیستم^۱ (STPA) و تحلیل خطر و نقطه کنترل بحرانی^۲ (HACCP)، این مقاله، مفهوم ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم را بیان می‌کند [۲].

در کارخانه صنایع تولید مواد شیمیایی برای تعیین برنامه زمانبندی، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را با تابع هدف حداکثرسازی سود پیشنهاد داده‌اند. این مدل، ضمن در نظر گرفتن مواد اولیه در دسترس، تقاضای محصول، ظرفیت ماشین‌آلات، بالانس مواد و توالی، با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS/OSL Solver حل شد [۳].

¹ System theory process analysis

² Hazard analysis and critical control point

جریمه دیرکرد در صنایع مختلف، کاربرد مناسبی دارد و برای کارهای با تأخیر استفاده می‌شود. در حقیقت، تأخیر، صفت مهمی در کیفیت سرویس است که در این تحقیق در نظر گرفته شده است [۴]. برای حل مسائل توالی عملیات و زمان‌بندی نیز همواره خلأ یک روشی که بتواند از نظر پارامترهایی نظیر کیفیت جواب، زمان رسیدن در مورد یک مسئله خاص نسبت به روش‌های دیگر برتری داشته باشد، احساس می‌شود [۵].

یک مدل زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده و غیرپیش‌دستی ارائه کردند در این مدل، زمان زودکرد و دیرکرد با در نظر گرفتن زمان تکمیل محصول، بررسی شد [۶]. یک مدل برنامه‌ریزی، عدد صحیح مختلط را برای زمان‌بندی فرایند تولید دسته‌ای چندمحصولی در صنعت مواد شیمیایی ارائه کرده و با یک الگوریتم ابتکاری به جوابی نزدیک به بهینه دست یافتند. هدف این مدل، حداقل کردن بازه ساخت^۱ می‌باشد [۷].

زمان‌بندی و تعیین اندازه بهینه دسته تولیدی خط تولید چند محصولی ماست را در یک کارخانه تولید لبنیات واقع در یونان ارائه دادند که به‌وسیله مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با زمان پیوسته و بر پایه خانواده محصول انجام شد. آنها ۹۳ قلم محصول را در قالب ۲۳ خانواده محصول و بر مبنای شرایط زیر، طبقه‌بندی کردند:

- روش تخمیر مشترک
- نبود زمان وابسته به توالی مابین
- نرخ بسته‌بندی مشابه [۸].

مدل ارائه شده، از نوع مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه دسته تولیدی دو مرحله‌ای می‌باشد و هدف آن، کمینه ساختن مجموع هزینه‌های تولید، راه‌اندازی و نگهداری موجودی بود. همگام‌سازی دو مرحله (آماده‌سازی شربت و پر شدن بطری) در این مدل با تلفیق دو رویکرد $GLSP^2$ و $GSLP^3$ با استفاده از متغیرهای پیوسته به جای متغیر صفر و یک است [۹].

مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده را با در نظر گرفتن زمان پیوسته فرموله کردند مدل پیشنهادی آنها چند خصوصیت از جمله زمان دیرکرد و زودکرد و جریمه قطع کار را در برمی‌گیرد [۱۰].

یک مدل برای مسئله زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده و زمان‌های بیکاری در سیستم JIT به طور هم‌زمان در سیستم JIT ارائه دادند و در این مدل، زمان دیرکرد و زودکرد را با هم در نظر گرفتند. در این مدل سعی بر این شد که هزینه دیرکرد و زودکرد را به حداقل برسانیم و آنها یک راه‌حل با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل این مدل ارائه دادند [۱۱].

یک مسئله JIT زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده در حالت زمانی گسسته که از چند پرپود زمانی تشکیل شده است، در این مدل، هزینه زودکرد، دیرکرد، هزینه جریمه قطع کار و هزینه WIP را با هم فرموله کردند و در ادامه، این مسئله را به‌صورت خطی تبدیل کردند و به اثبات این مدل پرداختند.

مدل ریاضی برنامه‌ریزی، عدد صحیح مختلط زمان‌بندی را برای بسته‌بندی ۱۷ محصول در ۵ خط بسته‌بندی موازی با منابع مشترک تهیه کردند. هدف این مدل، حداقل‌سازی موجودی و هزینه راه‌اندازی ماشین‌آلات بود و

¹ Make span

² General Lot-Sizing Problem (GLSP)

³ Continuous Setup Lot-Sizing Problem (CSLP)

هزینه و زمان وابسته به توالی تولید در آن لحاظ نشد. این مدل در دستیابی به جواب بهینه، شکست خورد و برای آن با یک الگوریتم دو مرحله‌ای هیورستیک، جوابی نزدیک به جواب بهینه پیدا شد. یک الگوریتم تقریباً ساده‌تری برای بهبود زمان دیرکرد و زودکرد ارائه شد و با توجه به اینکه جواب دقیقی ندارد این الگوریتم کارا نمی‌باشد.

یک مدل برنامه‌ریزی، عدد صحیح مختلط برای زمان‌بندی کوتاه‌مدت کارخانجات چند محصولی را ارائه کرد. آنها سه تابع هدف متفاوت را در نظر گرفتند که عبارتند از: حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداقل‌سازی زودکرد و حداقل‌سازی بازه ساخت حل این مدل نیز بر اساس الگوریتم ابتکاری گراسمن و ماراولیاس^۱ صورت گرفت [۱۲].

جدول ۱. خلاصه پیشینه تحقیق

ردیف	محقق	سال	عنوان مقاله	نتایج
۱	یانگ لی	۲۰۲۱	عملکرد قابلیت اطمینان با توجه به حالت عدم اطمینان چند منبع	طی مراحل ساخت و تولید، عدم قطعیت وجود دارد و تخریب عملکرد، اجتناب‌ناپذیر است و بر قابلیت اطمینان مکانیسم، تأثیر می‌گذارد.
۲	شنگ و لیو	۲۰۲۱	کاربرد سیستم‌های قابلیت اطمینان در مدیریت باز یافت	بر اساس روش تجزیه و تحلیل فرایند تئوری سیستم (STPA) و تئوری تجزیه و تحلیل خطر و نقطه کنترل بحرانی (HACCP)، این مقاله، مفهوم ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم را بیان می‌کند. در این روش، از طریق روش تجزیه و تحلیل، یک روش تأیید برای ایمنی سیستم و یک سیستم ارزیابی قابلیت اطمینان برای سیستم باز یافت پیشنهاد شده است.
۳	لطیف و کاپان	۲۰۲۰	تعیین برنامه زمان‌بندی، مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط با تابع هدف حداکثر سازی سود	ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های استوکیومتری، مواد اولیه در دسترس، تقاضای محصول، ظرفیت ماشین‌آلات، بالانس مواد و توالی، با استفاده از GAMS/OSL Solver حل شد.
۴	هاتاچری و چلیان	۲۰۱۹	مدل زمان‌بندی تک‌ماشینه با در نظر گرفتن کارهای پیش‌دستی‌کننده و غیرپیش‌دستی	در این مدل، زمان زودکرد و دیرکرد با در نظر گرفتن تکمیل محصول مورد ارزیابی قرار گرفت.
۵	بلومر و گانتز	۲۰۱۸	یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای زمان‌بندی فرایند تولید دسته‌ای چند محصولی در صنعت مواد شیمیایی	با یک الگوریتم ابتکاری به جوابی نزدیک به بهینه دست یافتند. هدف این مدل، حداقل کردن بازه ساخت بود و محدودیت‌های ظرفیت دستگاه‌ها، تمیزکاری پس از هر بچ تولیدی و بالانس موجودی در نظر گرفته شد
۶	کوالین پینگ	۲۰۱۷	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با زمان پیوسته و بر پایه خانواده محصول	زمان‌بندی و تعیین اندازه بهینه دسته تولیدی خط تولید چند محصولی ماست را در یک کارخانه تولید لبنیات واقع در یونان با ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با زمان پیوسته و بر پایه خانواده محصول انجام دادند. آنها ۹۳ قلم محصول را در قالب ۲۳ خانواده محصول طبقه‌بندی کردند.

¹ Grossmann & Maravelias

با توجه به مطالعات فوق نتیجه می شود که شکاف مطالعاتی در حوزه زمان بندی تولید استفاده از سیستم قابلیت اطمینان در مدل می باشد که این تحقیق، پیوندی میان زمان بندی تولید و قابلیت اطمینان برقرار کرده؛ بدین صورت که زمان های تولید در نظر گرفته شده با شبکه ای از زیرمسئله های قابلیت اطمینان مدل شده است.

تعریف مدل و اهداف تحقیق

در این بخش، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی زمان بندی تک ماشین به قطع کار با هدف حداقل سازی جریمه زودکرد و دیرکرد، هزینه قطع کار و هزینه حمل ارائه شده است. زمانی که مدل مجاز به استفاده از کارهای پیش دستی کننده باشد ما در تابع هدف هزینه، قطع کار را اضافه می کنیم. به طور حتم، اگر کار قطع شود و قطعه نیمه ساخت در کنار ماشین، زمانی را صرف کند، هزینه WIP^1 افزایش می یابد فرض ما در این مسئله بر این است که زمان پردازش، زمان شروع و موعد تحویل عدد صحیح می باشد.

روش شناسی

روش تحقیق حاضر از جنبه هدف، کاربردی و از جنبه روش، توصیفی-تحلیلی بوده است که محقق در صد آن است که یک مسئله زمان بندی تولید را در قالب مسئله قابلیت اطمینان حل کند. اعتبارسنجی مدل از طریق حل مسئله استاندارد، از طریق یک مسئله برنامه ریزی پیشگیرانه تک ماشین تأیید شد و قابلیت تعمیم پذیری مدل نیز با استفاده از حل چند مسئله با ابعاد مختلف بررسی و تأیید شد.

مبنای ریاضی و منطقی مدل ارائه شده در این تحقیق، رویکرد در نظر گرفتن جریمه برای دیرکرد و قطع کار می باشد که براساس میانی زمان بندی تولید ارائه شده است. یک مسئله برنامه ریزی پیشگیرانه تک ماشین را با رویکرد تولید به هنگام در نظر بگیرید که در آن برای هر کار i که در آن $i = 1, 2, \dots, N$ باشد دارای چندین پارامتر: P_i زمان پردازش برای کار i ، D_i ، زمان موعد مقرر تکمیل کار i ، A_i (زمان ایده آل)، β_i جریمه دیرکرد برای کار i اگر پردازش بعد از i تکمیل شد، θ_i هزینه زودکرد برای هر بار زودکرد، π_i هزینه دیرکرد برای هر بار دیرکرد، γ_i هزینه نگهداری WIP برای هر واحد زمان پیوسته η_i ، جریمه قطع کار برای کار i در واحد پیرو می باشد و ما فرض می کنیم زمان پردازش، زمان شروع و موعد مقرر عدد صحیح می باشد.

پیش فرض های مسئله

- ۱- قطعی کار، مجاز می باشد.
- ۲- در یک زمان فقط یک کار می تواند بر روی ماشین انجام شود.
- ۳- زمان پردازش هر کار، قطعی و مشخص می باشد.
- ۴- زمان پردازش هر کار، قطعی و مشخص می باشد.
- ۵- فاصله بین پریودها مشخص و قطعی می باشد.
- ۶- WIP مجاز است و هزینه آن در نظر گرفته می شود.
- ۷- تعداد کارها ثابت است.

¹ Work in process

- ۸- تعداد کارها ثابت است.
- ۹- هزینه آماده‌سازی به‌عنوان قطع کار بر حسب پریود در نظر گرفته می‌شود.
- ۱۰- زمان خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.
- ۱۱- بی‌کاری ماشین در بین پریودها مجاز می‌باشد.

اجزای مدل

ارائه مدل چندهدفه

اندیس‌ها

- N : تعداد کارها
 J : تعداد موقعیت‌ها
 i : اندیس کار
 j : اندیس موقعیت

متغیرهای ورودی

- M : عدد بسیار بزرگ
 p_i : زمان پردازش برای کار i ام
 α_i : جریمه زودکرد برای کار i ام اگر پردازش قبل از D_i تکمیل شود.
 β_i : جریمه دیرکرد برای کار i ام اگر پردازش بعد از i تکمیل شود.
 γ_i : هزینه نگهداری WIP برای هر واحد زمان پیوسته
 n_i : جریمه قطع کار برای کار i ام در واحد پریود
 D_i : زمان موعد مقرر تکمیل کار i ام (زمان ایده‌آل)

متغیرهای تصمیم

- C_i : زمان تکمیل کار i ام (زمان آخرین دوره‌ای که کار i ام در آن پردازش می‌شود).
 X_{ij} : اگر کار i ام در موقعیت j ام پردازش شود ۱ می‌شود و در غیر این صورت ۰
 δ_{ij} : اگر $X_{ij}=1$ باشد برابر ۱ می‌شود و در غیر این صورت M
 Y_i : اگر در پریود i ام زودکرد داشته باشیم ۱ و در غیر این صورت صفر می‌باشد.
 K_i : اگر در پریود i ام دیرکرد داشته باشیم ۱ و در غیر این صورت صفر می‌باشد.

E_i : زمان زودکرد برای کار i ام

T_i : زمان دیرکرد برای کار i ام

S_i : زمان شروع کار برای کار i ام.

توابع هدف

Objective function:

$$\text{MIN } Z_1 = C_{\max} \quad (۱)$$

$$\text{MIN } Z_2 = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i \quad (۲.۱)$$

$$+ \sum_{i=1}^N \beta_i T_i \quad (۲.۲)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \eta_i \left[\left(\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij}| \right) + x_{iJ} + x_{i1} - 2 \right] \quad (۲.۳)$$

$$+ \sum_{i=1}^N (C_i - p_i - S_i) \gamma_i \quad (۲.۴)$$

$$\text{MIN } Z_3 = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (۳.۱)$$

$$+ \sum_{i=1}^N K_i \quad (۳.۲)$$

محدودیت‌های مدل

Constraint

$$E_i = \max(0, D_i - C_i) \quad \forall i \quad (۴)$$

$$T_i = \max(0, C_i - D_i) \quad \forall i \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = p_i \quad \forall i \quad (۷)$$

$$C_{\max} = \max(C_i) \quad \forall i \quad (۸)$$

$$D_i - C_i \leq M \cdot Y_i \quad \forall i \quad (9)$$

$$C_i - D_i \leq M \cdot K_i \quad \forall i \quad (10)$$

$$C_i = \max_j (j \cdot x_{ij}) \quad \forall j, i \quad (11)$$

$$S'_i = \min_j ((j-1)\delta_{ij}) \quad i, \quad \forall j=1 \quad (12)$$

$$S''_i = \min_j (j\delta_{ij}) - 1 \quad i, \quad \forall j=2,3,\dots,J \quad (13)$$

$$S_i = \min(S'_i, S''_i) \quad \forall i \quad (14)$$

$$\delta_{ij} = M(1 - x_{ij}) + 1 \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$Y_i, K_i, x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$E_i, T_i, \delta_{ij}, S_i, S'_i, S''_i, C_i \geq 0 \quad \forall i \quad (17)$$

تابع هدف، از سه بخش با مقیاس مختلف تشکیل شده است: قسمت اول با مقیاس زمان، که در آن زمان تکمیل آخرین کار محاسبه، بخش دوم با مقیاس هزینه، که در آن هزینه زودکرد، دیرکرد، قطع کار و هزینه WIP برای همه کارها محاسبه و در آخرین بخش تابع هدف با مقیاس تعداد، که در آن تعداد دیرکرد و زودکرد محاسبه می شود و به علت دارا بودن سه مقیاس مختلف، مسئله از نوع مسائل چندهدفه می باشد.

معادله های ۴ و ۵ به ترتیب، زمان زودکرد و دیرکرد را محاسبه می کنند:

$$E_i = \max(0, D_i - C_i) \quad \forall i \quad (4)$$

$$T_i = \max(0, C_i - D_i) \quad \forall i \quad (5)$$

نامعادله ۶ تضمین می کند که در هر پریود، حداکثر یک کار، قابل انجام می باشد.

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \quad (6)$$

نامعادله ۷ تضمین می کند که زمان پردازش کار i توسط ماشین برابر زمان پردازش کار i می باشد.

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = p_i \quad \forall i \quad (7)$$

معادله ۸ زمان تکمیل آخرین کار توسط ماشین را محاسبه می کند.

$$C_{\max} = \max(C_i) \quad \forall i \quad (8)$$

نامعادله ۹ و ۱۰ به ترتیب تعداد دفعات زودکرد و دیرکرد را محاسبه می کنند و نامعادله ۱۱ تضمین می کند که در حداکثر یک از نامعادله های ۹ و ۱۰ مؤثر می باشد.

$$D_i - C_i \leq M \cdot Y_i \quad \forall i \quad (9)$$

$$C_i - D_i \leq M \cdot K_i \quad \forall i \quad (10)$$

معادله ۱۲ زمان تکمیل برای هر کار را محاسبه می کند.

$$C_i = \max_j (j \cdot x_{ij}) \quad \forall i, j \quad (11)$$

معادله ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ زمان شروع هر کار را محاسبه می کند، محدودیت ۱۰ زمان تمامی کارهایی که از پریود دوم به بعد انجام می شود را محاسبه و معادله ۱۱ اگر در اولین پریود کاری انجام شود فعال می شود و مقدار می گیرد و در غیر این صورت، بی نهایت می شود.

$$S'_i = \min_j ((j-1)\delta_{ij}) \quad i, \forall j = 2, 3, \dots, J \quad (12)$$

$$S''_i = \min_j (j\delta_{ij}) - 1 \quad i, \forall j = 1 \quad (13)$$

$$S_i = \min(S'_i, S''_i) \quad \forall i \quad (14)$$

$$\delta_{ij} = M(1 - x_{ij}) + 1 \quad \forall i, j \quad (15)$$

تعداد قطع کار

در بخش دوم تابع هدف برای محاسبه تعداد دفعات قطع کار بر روی ماشین از رابطه استفاده کردیم که با در نظر گرفتن x_{ij} به عنوان یک متغیر باینری، شرایطی که برای اتفاق $|x_{ij} - x_{ij}|$ می افتد را محاسبه می کنیم.

۱. اگر $x_{ij} = 1$ و $x_{ij+1} = 1$ باشد جواب قدرمطلق، صفر می شود و از آن این نتیجه برآورد می شود که کار i در موقعیت های j و $j+1$ پردازش می شود و قطع کار i بین دو موقعیت $j+1$ و j رخ نمی دهد.

۲. اگر $x_{ij} = 1$ و $x_{ij+1} = 1$ باشد جواب قدرمطلق، صفر می شود و از آن این نتیجه برآورد می شود که کار i در موقعیت های j پردازش می شود و موقعیت $j+1$ پردازش نمی شود و قطع کار بین دو موقعیت $j+1$ و j رخ می دهد.

۳. اگر $x_{ij} = 0$ و $x_{ij+1} = 1$ باشد جواب قدرمطلق ۱ می شود و از آن این نتیجه، برآورد می شود که کار در موقعیت های j پردازش نمی شود و در موقعیت $j+1$ پردازش می شود و قطع کار i بین دو موقعیت $j+1$ و j رخ می دهد.

۴. اگر $x_{ij} = 0$ و $x_{ij+1} = 0$ باشد جواب قدرمطلق صفر می شود و از آن این نتیجه برآورد می شود که کار i در موقعیت های j و $j+1$ پردازش نمی شود و قطع کار i بین دو موقعیت $j+1$ و j رخ نمی دهد.

اگر موقعیت شروع پردازش کار i هر کدام از موقعیت‌ها به جز موقعیت شروع ۱ باشد. تعداد $\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij+1}|$ قطع کار محاسبه می‌شود که این، طبق واقعیت نیست. به‌طور مشابه، اگر کار i در هر کدام از موقعیت‌ها به جز موقعیت J تکمیل شود باشد تعداد $\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij+1}|$ قطع کار محاسبه می‌شود که این، طبق واقعیت نیست. برای رفع خطا در محاسبه، تعداد قطع کار ۲ واحد از $\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij+1}|$ کم می‌کنیم، زمانی که متغیرهای x_{i1} و x_{iJ} برابر با ۱ باشد به این مفهوم که در موقعیت ابتدا و پایانی کار i ام پردازش می‌شود که باید ۲ واحد از $\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij+1}|$ کم کنیم و x_{i1} یا x_{iJ} باید برای از بین بردن این تأثیر به آن اضافه شوند.

مقدار $\sum_{i=1}^N \left[\left(\sum_{j=1}^{J-1} |x_{ij} - x_{ij+1}| \right) + x_{iJ} + x_{i1} - 2 \right]$ که تعداد قطع کار را محاسبه می‌کند ۲ برابر مقدار واقعی محاسبه می‌شود پس باید آن را بر ۲ تقسیم کنیم.

یافته‌های تحقیق

مقادیر اولیه که برای هر یک از زیرسیستم‌ها و اجزای آن تعریف شده در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲. مقادیر اولیه

اجزای زیرسیستم	زیرسیستم								
	۱			۲			۳		
	R	C	W	R	C	W	R	C	W
۱	۰.۹۴	۹	۹	۰.۹۷	۱۲	۵	۰.۹۶	۱۰	۶
۲	۰.۹۱	۶	۶	۰.۸۶	۳	۷	۰.۸۹	۶	۸
۳	۰.۸۹	۶	۴	۰.۷	۲	۳	۰.۷۲	۴	۲
۴	۰.۷۵	۳	۸	۰.۶۶	۲	۴	۰.۷۱	۳	۴
۵	۰.۷۲	۲	۷	-	-	-	۰.۶۷	۲	۴

مدل مورد بررسی، یک مسئله زمان‌بندی تولید با سه زیرسیستم به‌صورت سری و پنج نوع جز برای هر زیرسیستم به صورت موازی می‌باشد که در قالب یک مسئله قابلیت اطمینان قابل حل هستند. جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده در جبهه پارتو اول به صورت زیر می‌باشد که تصمیم‌گیرنده براساس شرایط موجود می‌تواند یک یا چند جواب را برای اجرا انتخاب کند.

جدول ۳. جواب‌های بهینه NSGA II

Sol	Sub-System	Quantity of Each Component					Reliability	Cost	Weight
		Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5			
۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۰.۹۹۵	۱۷۸	۱۸۴
	۲	۱	۱	۲	۱	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱	۱			
۲	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۰.۹۹۷	۱۸۵	۱۹۲
	۲	۱	۲	۱	۱	۱			

Sol	Sub-System	Quantity of Each Component					Reliability	Cost	Weight
		Comp1	Comp2	Copm3	Comp4	Comp5			
۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۶	۱۸۴	۱۸۸
	۱	۱	۱	۳	۱	۱			
	۲	۱	۱	۲	۱	۱			
۴	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۶	۱۸۰	۱۸۷
	۱	۱	۱	۲	۱	۱			
	۲	۱	۱	۳	۱	۱			
۵	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۶	۱۸۲	۱۸۵
	۱	۱	۱	۳	۱	۱			
	۲	۱	۱	۱	۱	۱			
۶	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۳	۱۷۴	۱۸۳
	۱	۱	۱	۱	۱	۱			
	۲	۱	۱	۳	۱	۱			

جدول ۴. جواب‌های بهینه NSGA II

Sub-System	Quantity of Each Component					Reliability	Cost	Weight
	Comp1	Comp2	Copm3	Comp4	Comp5			
۷	۱	۱	۲	۱	۱	۰.۹۹۷	۱۸۳	۱۹۴
	۲	۱	۲	۳	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۵	۱۷۷	۱۹۰
	۲	۱	۲	۳	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۹	۱	۱	۱	۳	۱	۰.۹۹۶	۱۸۴	۱۸۸
	۲	۱	۱	۲	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۱۰	۱	۱	۱	۲	۱	۰.۹۹۳	۱۷۶	۱۸۱
	۲	۱	۱	۱	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۱۱	۱	۱	۱	۳	۱	۰.۹۹۶	۱۸۲	۱۸۵
	۲	۱	۱	۱	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۱۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۳	۱۷۴	۱۸۳
	۲	۱	۱	۳	۱			
	۳	۱	۱	۱	۱			
۱۳	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹۵	۱۸۰	۱۹۱

Sub-System	Quantity of Each Component					Reliability	Cost	Weight
	Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5			
۲	۱	۱	۳	۱	۱			
۳	۱	۲	۱	۱	۱			
۱	۱	۱	۳	۱	۱			
۱۴	۲	۱	۲	۱	۱	۰.۹۹۷	۱۸۵	۱۹۲
۳	۱	۱	۱	۱	۱			

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، یک مسئله زمانبندی تولید با زیرسیستم‌های سری و موازی در قالب یک مسئله قابلیت اطمینان حل شد. در این مدل، فرض بر آن است که از تمام اجزا حداقل یکبار در هر زیرسیستم استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن ۸ عدد اجزا به عنوان بیشترین تعداد اجزای مورد استفاده در هر زیرسیستم؛ لذا از هر جزء بیشتر از ۳ بار نمی‌توان در هر زیرسیستم استفاده کرد. برای درک بیشتر جدول، یکی از جواب‌ها به طور مثال جواب اول، تحلیل شده است. در زیرسیستم ۱، از هر یک از اجزای ۱، ۲، ۴ و ۵ فقط یکبار استفاده شد ولی از جزء ۳ به تعداد دو عدد که به صورت موازی بسته شده‌اند استفاده کرد. زیرسیستم ۲ برای بهینه شدن سه تابع هدف این زیرسیستم، از اجزای ۱، ۴ و ۵ یکبار استفاده کرد، جزء ۲ به تعداد دو عدد و از نوع جزء ۳ سه تعداد به صورت موازی قرار گرفتند.

زیرسیستم ۳، بهترین حالت برای این زیرسیستم در این جواب استفاده از هر جزء تنها یکبار در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هر زیرسیستم بین پنج تا هشت جز را می‌تواند به صورت موازی داشته باشد، در زیرسیستم ۱ به طور کلی شش عدد اجزا برای بهینه کردن این حالت استفاده شده است. در زیر سیستم ۲ بیشترین مقدار ممکن یعنی هشت جزء مورد استفاده قرار گرفته است و زیرسیستم ۳، با کمترین مقدار موردپذیرش یعنی پنج جزء مقادیر توابع هدف را بهینه کرده‌اند.

نتیجه حاصل از این تحقیق این است که زمان تکمیل کارها، و هزینه‌ها شامل هزینه زودکرد، دیرکرد، قطع کار و هزینه WIP برای همه کارها و همچنین تعداد دیرکرد و زودکرد در مسائل منتخب محاسبه شد و نتایج حاکی از آن بود که در تمام مسائل مورد بررسی روش پیشنهادی از کارایی مناسبی برخوردار بوده است. در مسئله موردبررسی در این تحقیق، شرایط در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در عملکرد بهتر سیستم تولیدی، بررسی شد و نتایج، حاکی از آن بود که قابلیت اطمینان می‌تواند در زمان‌بندی چندهدفه سیستم‌های تولیدی، نقش مؤثری ایفا کند.

نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق هاتاچری و چلیان در مورد دیرکردها در سیستم زمان‌بندی، مطابقت دارد. محدودیت‌های تحقیق حاضر، محدود بودن به سه زیرسیستم می‌باشد و پیشنهاد تحقیقات آتی شامل ارائه مدل زمان‌بندی تولید انعطاف‌پذیر در قالب مسئله قابلیت اطمینان می‌باشد. قابلیت تصمیم‌پذیری مدل در شرایط قطعی در مدل‌های کمینه‌سازی زمان‌بندی تولید با رویکرد سیستم‌های پویا قابل بررسی است. پیشنهاد می‌شود در مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی تولید از زنجیره مارکوف استفاده شود و همچنین پیشنهاد می‌شود در رویه حل مسئله از سیستم‌های پویا بهره گرفته شود. از محدودیت‌های تحقیق نیز می‌توان به لحاظ نکردن شرایط احتمالی در مدل اشاره کرد. نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیق هاتاچری و چلیان نشان می‌دهد که در مدل موردبررسی آنها زمان زودکرد و دیرکرد با در نظر گرفتن زمان تکمیل محصول، ارزیابی گردید؛ در حالی که در این تحقیق، زمان زودکرد و دیرکرد بدون لحاظ کردن زمان تکمیل، بررسی شد.

References

- [1] Li, X.-Y., Chen, W.-B., & Kang, R. (2021). Performance margin-based reliability analysis for aircraft lock mechanism considering multi-source uncertainties and wear. *Reliability Engineering & System Safety*, 205(9), 107234. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107234>
- [2] Zhang, Q.-y., Liu, L.-s., & Liu, Z.-j. (2021). Application of safety and reliability analysis in wastewater reclamation system. *Process Safety and Environmental Protection*, 146(1-2), 338-349. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.010>
- [3] Görkemli, L., & Kapan Ulusoy, S. (2010). Fuzzy bayesian reliability and availability analysis of production systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 690-696. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.07.020>
- [4] Kim, T., Kim, Y.-W., & Cho, H. (2021). A simulation-based dynamic scheduling model for curtain wall production considering construction planning reliability. *Journal of cleaner production*, 286(4), 124922. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124922>
- [5] Sotoudeh, F., Nehring, Micah., Kizil, Mehmet., Knights, Peter., Mousavi, Amin. (2020). Production scheduling optimisation for sublevel stoping mines using mathematical programming: A review of literature and future directions. *Resources Policy*, 68(5), 101809. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101809>
- [6] Bhattacharyya, S. K., & Chelilyan, A. S. (2019). Optimization of a subsea production system for cost and reliability using its fault tree model. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.030>
- [7] Blömer, F., & Günther, H. O. (1998). Scheduling of a multi-product batch process in the chemical industry. *Computers in Industry*, 36(3), 245-259. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00075-X)
- [8] Lin, Y.-K., Chang, P.-C., Yeng, L. C.-L & ,Shih, P.-S. (2017). Reliability evaluation for an intermittent production system with stochastic number of normal machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.10.002>
- [9] Doganis, P., & Sarimveis, H. (2007). Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.062>
- [10] Tavakoli moghadam, R., Khodadadegan, Yasaman., & Hagh nevis, Moayed. (2005, July 14). *a hybrid model for selecting parallel machines and scheduling tasks considering preparation times*. 4th national conference on industrial engineering, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/17505/>
- [11] Ranjbar, M., & Naghizadeh, Mustafa. (2011). Integration of production planning and scheduling in multi-product process industries with continuous production system. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management* 22(2), 114-126. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=136390>
- [12] Castro, P. M., & Grossmann, I. E. (2005). New continuous-time MILP model for the short-term scheduling of multistage batch plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(24), 9175-9190. <https://doi.org/10.1021/ie050730I>



The Prediction of Stock Value by Using the Proposed Fuzzy Neural Network and Hybrid Algorithm

Vahid Safari Dehnavi^{1*}, Masoud Shafiee²

¹PhD Student, Department of Control, Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

²Professor, Department of Control, Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 08.02.2020

Revised: 11.02.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Stock value
Fuzzy sink neural network
Improved grasshopper algorithm
Predicting Modeling

*Corresponding Author:

Vahid Safari Dehnavi

Email: v.safari@aut.ac.ir

ABSTRACT

The prediction of stocks on the stock market and how the symbols are changed are one of the most applied and popular researches. By predicting the symbols with the least error, a person can succeed in the stock market. In this paper, a new network including a neural-fuzzy sink function and an improved grasshopper optimization algorithm was used to predict the value of symbols. In this regard, to predict and model the stock symbols, black-box modeling and AR (Autoregressive) model were used. Model order was determined by using the gray wolf algorithm. To optimize the network's linear parameters, a hybrid algorithm comprising of least square algorithm for initialization, recursive least square for online training, and a grasshopper optimization algorithm was used to optimize nonlinear parameters. The simulation illustrated that by providing a new structure, the gray wolf algorithm can determine the order of the model and the terms with the most impact on the steel symbol, effectively. In addition, the proposed network and algorithm had less error than other methods such as neural networks for predicting stock value, and the grasshopper optimization algorithm converged with the adaptive learning rate more rapidly.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



پیش‌بینی ارزش سهام با استفاده از شبکه عصبی فازی پیشنهادی و الگوریتم ترکیبی

وحید صفری دهنوی^{۱*}، مسعود شفیعی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

پیش‌بینی بازار بورس و نحوه تغییر نمادها، همواره در زمره پژوهش‌های کاربردی و پرتعداد قرار می‌گیرد؛ بنابراین با پیش‌بینی نمادها با حداقل خطا می‌توان در بورس موفق شد. در این مقاله برای پیش‌بینی ارزش نمادها از یک شبکه جدید شامل شبکه عصبی فازی، تابع سینک و الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبودیافته، استفاده شده است. در این خصوص، برای پیش‌بینی و مدل‌سازی شاخص نمادهای بورس از مدل‌سازی جعبه سیاه و مدل AR(Auto regressive) استفاده شده که مرتبه مدل با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری تعیین گردیده است. برای بهینه‌سازی پارامترهای خطی شبکه، از الگوریتم ترکیبی؛ شامل حداقل مربعات برای مقداردهی اولیه و حداقل مربعات بازگشتی برای آموزش برخط استفاده شد و برای بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ به‌کار رفت. در شبیه‌سازی نشان داده شد که با ارائه ساختار جدید، الگوریتم گرگ خاکستری می‌تواند به طور مؤثر مرتبه مدل و جملات با بیشترین تأثیر را در نماد فولاد مشخص کند؛ به علاوه در این قسمت بیان شده که شبکه و الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها مانند شبکه عصبی برای پیش‌بینی ارزش سهام، خطای کمتری داشتند و الگوریتم ملخ ارائه‌شده با نرخ یادگیری تطبیقی با سرعت بیشتری و به صورت تطبیقی، هم‌گرا شده است.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

ارزش سهام
شبکه عصبی سینک فازی
الگوریتم ملخ بهبودیافته
پیش‌بینی
مدل‌سازی

*نویسنده مسئول: وحید صفری دهنوی

پست الکترونیکی:

v.safari@aut.ac.ir



مقدمه

سرمایه‌گذاری فعالان اقتصادی و مردم در بورس، نقش بسیار مهمی در تحول اقتصادی کشورها دارد و می‌تواند موجب رشد صنعتی و ایجاد اشتغال پایدار در کشورها شود. میزان نقدینگی که در اثر سیاست‌های اقتصادی ایجاد می‌شود، می‌تواند موجب آشفته‌گی اقتصاد و ایجاد تورم شود؛ حال اگر این حجم پول که معمولاً به‌وسیله سرمایه‌های کوچک ایجاد می‌شود، به سمت بورس هدایت شود، می‌تواند موجب رشد شرکت‌ها و همچنین رشد دارایی سرمایه‌گذار شود، در این خصوص برای دستیابی به حداکثر سود، نیاز است که سهم به قیمت مناسب خریداری شود که این موضوع، لازمه پیش‌بینی سهام را آشکار می‌کند. به‌وسیله پیش‌بینی سهام می‌توان اطلاعات حدودی از قیمت به‌دست آورد و در بهترین حالت، سهام را خریداری کرد.

از زمان به‌وجودآمدن بازار بورس، روش‌های مختلفی برای تحلیل و پیش‌بینی قیمت سهام استفاده شده است. متخصصان بازار بورس برای سال‌های متمادی بازار را مشاهده کرده‌اند و بر اساس تجربه و مدل‌سازی ذهنی، به الگوهایی برای پیش‌بینی شاخص سهام رسیده‌اند. این افراد به‌وسیله استخراج ویژگی و مشاهدات عینی می‌توانند وضعیت بازار را پیش‌بینی کنند. این افراد، تجربه و تشخیص الگو را با روابط علت و معلولی تلفیق کرده و نتایجی را به دست آورده‌اند. در این خصوص، روش‌های متفاوتی مانند رگرسیون خطی، میانگین متحرک و ... نیز برای پیش‌بینی استفاده شده است. در برخی از مواقع، به علت شرایط خاص بازارهای مالی، حالتی غیرخطی به وجود می‌آید و به‌وسیله روش‌های مذکور مانند روش‌های کلاسیک نمی‌توان پیش‌بینی صحیحی داشت؛ بدین منظور در این مسائل از روش‌های محاسبات نرم، استفاده شده است [۱].

در پژوهش‌های متعددی اشاره شده که روش‌های محاسبات نرم، نتایج مناسب‌تری نسبت به روش‌های ریاضی و آماری مانند رگرسیون دارند [۲؛ ۳]. در برخی از پژوهش‌ها از شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک معجزه برای پیش‌بینی یاد شده است و مزایای این شبکه‌ها نسبت به روش‌های استراتژی خرید و فروش یا فرضیه گام تصادفی، مشخص گردیده است [۲]؛ به علاوه روش‌های محاسبات نرم، کاربرد بسیار گسترده‌ای در پیش‌بینی سری‌های زمانی دارند. اگرچه این روش‌ها دارای محاسبات پیچیده و وقت‌گیر هستند؛ ولی نتایج مناسبی دارند. دلیل عمده‌ای که از محاسبات نرم در پژوهش‌ها استفاده شده، وجود روابط غیرخطی بین متغیرهاست و این موضوع به‌راحتی قابل تشخیص نمی‌باشد [۴؛ ۵]. در [۴] بیان شده که می‌توان از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی داده‌های مالی استفاده کرد. در [۴] این نتیجه به‌دست آمده که به وسیله داده‌های یک سال می‌توان نرخ رشد اقتصادی آمریکا را پیش‌بینی کرد ولی این موضوع برای داده‌های کمتر از یک سال، نتایج مناسبی نداشته است. در [۴] نشان داده شده که مدل غیرخطی برای پیش‌بینی رشد اقتصادی، کمک شایانی می‌کند. در [۶] نتایج برای بازارهای کانادا نشان داده شده که شبکه عصبی، نتایج مناسبی در مقایسه با روش‌های رگرسیون برای داده‌های ۱۸ سال دارد. در [۶] برای تحلیل و پیش‌بینی چهار بورس، از شبکه عصبی و قیمت روز گذشته استفاده شده و چنین به‌دست آمده که شبکه عصبی، نتایج بسیار خوبی داشته است. در [۷] تأثیرات هموارسازی سود بر کاهش ریسک سقوط قیمت سهام در بورس اوراق بهادار تهران، بررسی شده است.

یکی دیگر از روش‌های خطی، روش تخمینگر حداقل درجه بر اساس دو روش پیشرو و پسرو است. این روش، دقت بالایی دارد ولی اندازه گام‌ها و محاسبات، به تعداد متغیرهای مستقل وابسته است که می‌تواند زمان‌بر باشد [۸]. روش‌های محاسبات نرم، یکی از بهترین روش‌ها برای پیش‌بینی بازار سهام هستند؛ زیرا براساس تجربه و داده، روابط را یاد می‌گیرند. روش‌های محاسبات نرم بر اساس داده‌هایی که می‌گیرند، می‌توانند الگوها و روندها را بدون فرمول یاد بگیرند. این روش با استفاده از عملکرد مغز انسان به‌دست آمده است و توانایی‌هایی نظیر تشخیص الگو، برقراری رابطه و توانایی تعمیم نتایج را دارد. روش‌های محاسبات نرم؛ مانند منطق فازی، شبکه‌های عصبی و شبکه‌های عصبی فازی، در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۹-۱۴]. در میان آن‌ها شبکه عصبی فازی، به‌طور گسترده، در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده شده است. این شبکه‌ها از ترکیب قوانین فازی و توابع چندجمله‌ای در قسمت نتیجه

به‌وجود آمده است. قدرت این شبکه‌ها در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است. در [۱۵] نشان داده شده که شبکه عصبی فازی برای تقریب توابع غیرخطی، بررسی شده است. در [۱۶] از شبکه عصبی فازی برای شناسایی و کنترل استفاده شده است.

به علاوه، الگوریتم‌های مختلفی برای یادگیری شبکه‌ها استفاده شده است ولی الگوریتم گرادیان نزولی، احتمالاً متداول‌ترین تکنیک برای یادگیری شبکه است. همان‌طور که در مراجع مختلف اشاره شده، روش گرادیان نزولی، محدودیت‌های بسیاری دارد [۱۶]. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها این است که در برخی موارد، استفاده از این الگوریتم، منجر به رسیدن به نقطه بهینه سراسری نمی‌شود؛ به علاوه این الگوریتم بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است. در این خصوص، برای غلبه بر این محدودیت‌ها یک الگوریتم ترکیبی معرفی شده است که بر مبنای روش‌های حداقل مربعات و الگوریتم‌های فراابتکاری است.

پیش‌بینی و تخمین، در بسیاری از مسائل کاربردی، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. در این مقاله، از روش‌های محاسبات نرم برای پیش‌بینی شاخص سهام استفاده شده است و نتایج نشان می‌دهد که قدرت پیش‌بینی توسط شبکه عصبی سینک فازی، بسیار کامل‌تر از روش‌های ریاضی است. در این خصوص، ابتدا نحوه جمع‌آوری داده، بررسی شده و پس از آن، نحوه طراحی شبکه موردبحث قرار گرفته است، سپس الگوریتم آموزش تطبیقی معرفی شده است و در نهایت، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده و نتیجه‌گیری بیان شده است.

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام‌شده به ترتیب تاریخ به صورت زیر هستند:

منجمی [۱۸] از شبکه عصبی فازی و ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک استفاده کرده و نشان داده است که روش مذکور، نتایج بهتری نسبت به شبکه عصبی فازی دارد. پورزمانی [۱۹] از الگوریتم ژنتیک خطی، الگوریتم ژنتیک غیرخطی و شبکه عصبی استفاده کرده و نشان داده که شبکه عصبی، نتایج مناسبی دارد. اعتمادی [۲۰] با استفاده از شبکه عصبی، به موضوع سودآوری شرکت‌ها پرداخته و با استفاده از شبکه عصبی در ۸۶ درصد موارد، سودآوری شرکت‌ها درست به دست آمده است. پورزمانی [۲۱] از روش الگوریتم ژنتیک خطی و غیرخطی استفاده کرده و نشان داده که دقت پیش‌بینی الگوریتم ژنتیک غیرخطی طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۱ نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک خطی داشته است. عالیان [۲۲] و صغریهروانی در [۲۳] پیش‌بینی شاخص با استفاده از شبکه عصبی را انجام داده و پورزمانی در [۲۴] پیش‌بینی سهام را با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم‌های فراابتکاری انجام داده است. صمدی پور در [۲۵] پیش‌بینی شاخص را با استفاده از روش کلاس‌بندی انجام داده است که به بررسی رشد یا افت سهام پرداخته است.

پرسش‌های پژوهش و اهداف

به طور کلی این پژوهش برای پاسخ به پرسش‌های زیر ارائه شده است:

- الگوی نمادهای بورس تهران به چه صورتی تغییر می‌کند؟
 - شبکه‌های عصبی کاربرد مناسب‌تری دارند، روش‌های ریاضی یا شبکه پیشنهادی جدید؟
 - آیا می‌توان با استفاده از اطلاعات قبل یک نماد از آینده این نماد اطلاعاتی به دست آورد؟
 - آیا بدون استفاده از شاخص‌های نفت، طلا، دلار و ... می‌توان شاخص نمادهای بورس را پیش‌بینی کرد؟
- هدف این پژوهش پیش‌بینی شاخص نمادهای بورس با استفاده از یک شبکه پیشنهادی و یک الگوریتم ترکیبی است که از الگوریتم‌های فراابتکاری برای پیش‌بینی شاخص نمادهای بورس استفاده کرده است. در این شبکه، هدف این است که با استفاده از کمترین تعداد ورودی، یک پیش‌بینی از وضعیت آینده نمادهای بورس داشته باشیم.

روش‌شناسی

در این مقاله، روش‌شناسی پژوهش در چهار مرحله ارائه شده است:

مرحله اول: رویکرد روش‌شناسی

در این مقاله، یک شبکه و الگوریتم جدید برای تشخیص الگوی نمادهای بورس ارائه شده است که با دریافت داده‌های کمی شامل قیمت گذشته سهام، به پیش‌بینی ارزش سهام می‌پردازد. شبکه و الگوریتم پیشنهادی برای انجام یک مسئله کاربردی در بورس تهران ارائه شده است. در این مقاله با استفاده از داده‌های کمی مربوط به گذشته نمادهای بورس، الگوی نمادها تعیین شده است و پس از آن با دریافت داده‌های فعلی می‌توان ارزش سهام را پیش‌بینی کرد. در سایر مقالات پیشین نیز از روش‌های محاسبات نرم استفاده شده است؛ منتها روش ارائه‌شده دارای نتایج بهتری نسبت به مقالات پیشین است.

مرحله دوم: توصیف روش جمع‌آوری داده‌ها

برای آموزش شبکه، بهینه‌سازی پارامترهای خطی و غیرخطی و ... نیاز به تعدادی داده است. هر چه مدل و نحوه تغییرات بورس، پیچیده‌تر باشد، برای جلوگیری از بیش‌برازش، نیاز به تعداد داده بیشتری است. در این حالت، از داده‌های نمادهای بورس برای آموزش، اعتبارسنجی و تست استفاده شده است. برای حصول داده از شرکت مدیریت فناوری بورس تهران استفاده شد و داده‌های شاخص سهام نماد فولاد که مختص فولاد مبارکه است طی سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در قالب نرم‌افزار اکسل جمع‌آوری گردید و سپس این داده‌ها به نرم‌افزار متلب منتقل شد و از آن‌ها در تشخیص الگو و پیش‌بینی ارزش سهام استفاده گردید. در این خصوص، قیمت پایان روز سهام این نماد در نظر گرفته شد و بدین صورت به تعداد روزهایی که بورس فعال بود، داده موجود است که در این مقاله از این داده‌ها استفاده گردید.

مرحله سوم: توصیف روش‌های تحلیل

در این پژوهش، در ابتدا به جمع‌آوری داده پرداخته شد که برای آموزش شبکه و تعیین مدل، بسیار حیاتی و مهم است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، این داده‌ها به نرم‌افزار متلب منتقل شدند و پس از تهیه کد الگوریتم و شبکه، به معرفی مدل برای شناسایی الگوی نمادهای بورس پرداخته شد، مرتبه مدل تعیین گردید و پس از آن به طراحی شبکه پرداخته شد، سپس الگوریتم آموزش شبکه، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، با استفاده از شبکه و الگوریتم طراحی‌شده به پیش‌بینی ارزش نماد فولاد پرداخته شد.

مرحله چهارم: ارزیابی روش

در نهایت، به‌وسیله شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و شاخص MSE (Mean squared error)، به ارزیابی مدل به‌وسیله شبیه‌سازی پرداخته شد که با توجه به استفاده از تابع سینک در قسمت نتیجه، قوانین فازی و ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی بهبودیافته، نتایج پیش‌بینی شاخص نمادهای بورس مناسب بود؛ به علاوه تعیین مرتبه مدل با استفاده از الگوریتم‌های معرفی‌شده، باعث کاهش تعداد ورودی شبکه شد که کاهش هزینه طراحی و آموزش شبکه را در پی داشت.

انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی

برای پیش‌بینی در مدل جعبه سیاه، ابتدا باید یک مدل مناسب برای پیش‌بینی، کنترل و ... انتخاب کرد. در حالت کلی، مدل گسسته برای سیستم‌های یک بعدی به صورت (۱) نشان داده شده است.

$$A(z^{-1})y(k) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}e(k) \quad (۱)$$

در مدل AR رابطه (۲) برقرار است.

$$F(z^{-1}) = D(z^{-1}) = c(z^{-1}) = 1, B(z^{-1}) = 0 \quad (۲)$$

در روابط فوق y خروجی و u ورودی است؛ به علاوه در سیستم‌های یک‌بعدی (۳) برقرار است.

$$\sum_{i=0}^{n_2} a(i)y(k-i) = e(k) \quad (۳)$$

هدف این مقاله، تخمین ارزش سهام با استفاده از ارزش سهام در روزهای گذشته بدون در نظر گرفتن سایر متغیرها مانند قیمت نفت، طلا و ... است که این موضوع، باعث کاهش حجم اطلاعات ورودی به‌منظور پیش‌بینی ارزش سهام شده است. با تطبیق این موارد با مدل‌های موجود، مدل AR بهترین مدل برای تخمین ارزش سهام است؛ زیرا از داده‌های گذشته استفاده شده است و برای کاهش هزینه، ورودی مجزا در نظر گرفته نشده است. در این حالت، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، مرتبه مدل، تعیین شده است؛ به گونه‌ای که ضرایب با استفاده از الگوریتم فراابتکاری به‌نحوی به دست آورده شد که (۴) برقرار باشد.

Find $a_1, a_2, \dots, a_{n_1}$ where:

(۴)

$$\min e = \sum_{t=1}^n |e(t)|^2/n$$

در رابطه فوق، ضرایبی که بیشترین مقدار را دارند، به‌عنوان مؤثرترین عناصر در نظر گرفته شده‌اند و عبارات مربوط به این ضرایب را حفظ می‌کنند و سایر عبارات، حذف می‌شوند.

شبکه پیشنهادی برای پیش‌بینی

در این مقاله، شبکه عصبی سینک فازی براساس ادغام تابع سینک، منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است. هدف از ادغام منطق فازی و شبکه‌های عصبی سینک در شبکه عصبی سینک فازی، بهبود توانایی مدل و دقت سیستم برای پیش‌بینی یا تقریب توابع با استفاده از پارامترهای گسترش و انتقال تابع سینک، بدون افزایش تعداد تابع است. در شبکه عصبی سینک فازی در مقایسه با شبکه عصبی، صحت مدل‌سازی و توانایی شبکه با استفاده از آموزش پارامترهای سینک و تنظیم پارامترهای مجموعه‌های فازی بهبود یافته است؛ به علاوه تغییر در قسمت نتیجه قوانین فازی و استفاده از توابع سینک موجب شده که خاصیت غیرخطی سیستم بهبود داده شود. شیوه رفتاری سری‌های زمانی، مشابه توابع سینک هستند؛ بنابراین تقریب و پیش‌بینی سری زمانی به‌وسیله این شبکه‌ها بسیار مناسب است.

ساختار شبکه‌های عصبی سینک فازی

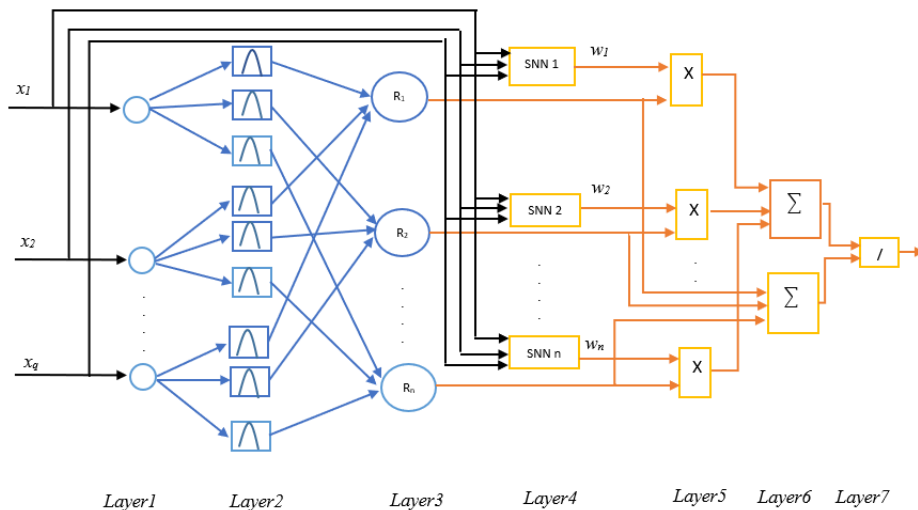
در این پژوهش، شبکه عصبی سینک فازی بر اساس ادغام ساختار شبکه عصبی مصنوعی، تابع سینک و منطق فازی مدل تاکاگی-سوگنو معرفی شده است. در مدل تاکاگی-سوگنو هر قانون فازی، به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \dots \text{ and } x_q \text{ is } A_q^i \text{ THEN } y_i \quad i = 1, \dots, n$$

که در آن A_q^i مجموعه فازی است که معمولاً این مجموعه‌ها توسط تابع عضویت گاوسی، زنگوله‌ای و ... پوشش داده می‌شوند. q تعداد متغیر ورودی و x_j j امین ورودی از بردار ورودی $\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_q]$ است. y_i متغیر خروجی مدل مربوط به قانون i ام و b_i بیانگر بایاس است. ساختار کلی شبکه عصبی سینک فازی در شکل ۱ نشان داده شده است. قوانین شبکه ترکیبی جدید را می‌توان به صورت زیر در قالب قوانین فازی نوشت:

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \dots \text{ and } x_q \text{ is } A_q^i \text{ THEN } y_i = \omega_i \sum_{j=1}^q S_{ij}(x_j)$$

که در آن x_j ورودی j ام و y_i خروجی قانون i ام شبکه می‌باشد. در رابطه فوق ω_i ضریب وزن میان ورودی و خروجی و S_{ij} تابع سینک است.



شکل ۱. شبکه عصبی سینک فازی

همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است شبکه عصبی سینک فازی از هفت لایه تشکیل شده است. در لایه اول، به اندازه تعداد ورودی‌ها، گره وجود دارد. در لایه دوم هر گره (مستطیل) بیان‌کننده یک متغیر زبانی (تابع عضویت) است. در این لایه با توجه به سیستم، از انواع تابع عضویت برای این لایه استفاده می‌شود؛ منتها در شبکه‌های عصبی فازی معمولاً از توابع عضویت گاوسی (۵) و زنگوله‌ای (۶) استفاده شده است.

$$A_j^i(x_j) = \exp\left[-\left(\frac{x_j - c_j^i}{\sigma_j^i}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$A_j^i(x_j) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x_j - r_j^i}{w_j}\right|^{2g}} \quad (6)$$

لایه سوم بیانگر ماهیت قوانین فازی است. در این لایه، تعداد قوانین فازی، تعیین‌کننده تعداد گره‌ها است که خروجی این لایه از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\mu_i(x) = \prod_{j=1}^q A_j^i(x_j) \quad (7)$$

لایه بعد، توابع سینک را در بر دارد که از (۸) به‌دست می‌آید و همچنین تابع سینک نیز از (۹) به‌دست می‌آید.

$$S_{ij}(x_j) = S\left(\frac{x_j - b_{ij}}{a_{ij}}\right), a_{ij} \neq 0 \quad (8)$$

$$S = \text{sinc}(x_j) = \frac{\sin(a(x_j - b))}{ax_j} \quad (9)$$

در لایه پنجم، خروجی لایه سوم و توابع سینک در یکدیگر ضرب می‌شوند و نتیجه از (۱۰) به دست می‌آید.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \mu_i S_i \quad (12)$$

سرانجام در دو لایه آخر، مقادیر فازی به غیرفازی تبدیل می‌شوند و خروجی شبکه پیشنهادی از (۱۱) به دست می‌آید.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i \omega_i}{\sum_{i=1}^c \mu_i} \quad (11)$$

در نهایت، خروجی شبکه سینک فازی با استفاده از (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$y_i = \omega_i \sum_{j=1}^q S_{ij}(x_j) \quad (12)$$

پارامترها

پس از اینکه ساختار کلی شبکه طراحی شد لازم است که پارامترها به‌صورتی انتخاب شوند که مجموع مربعات اختلاف خروجی مطلوب و خروجی شبکه، کمینه گردد. در این حالت، پارامترهای انتقال و گسترش در توابع سینک و پارامترهای تابع گوسی به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که خطا، کمینه شود.

مراحل ساخت شبکه

مراحل ساخت شبکه عصبی سینک فازی، به‌ترتیب به‌صورت زیر طراحی شده است:

- ۱- ابتدا توابع عضویت مناسب تعیین، سپس ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه، معین می‌شود.
- ۲- در این مرحله، تعداد قوانین فازی تعیین می‌گردد که این موضوع با تطبیق خطا و شبکه تعیین می‌شود.
- ۳- مقادیر اولیه پارامترهای خطی تعیین می‌گردد.
- ۴- پارامترها به‌وسیله ورودی-خروجی آموزشی بهینه‌سازی می‌شود.

الگوریتم آموزش

در میان روش‌های ارائه‌شده برای آموزش شبکه‌ها، الگوریتم انتشار به عقب خطا بیشترین کاربرد را داشته است؛ هرچند که محدودیت‌هایی دارد. در این مقاله، برای غلبه بر مشکلات الگوریتم انتشار به عقب، الگوریتم جدیدی پیشنهاد شده است.

به طور کلی، مراحل الگوریتم، به‌ترتیب زیر طراحی شده است:

- تعیین مقادیر اولیه پارامترهای خطی شبکه عصبی سینک فازی نوع-۱

- بهینه‌سازی پارامترهای خطی
- تعیین پارامترهای غیرخطی.

در بسیاری از پژوهش‌ها از الگوریتم گرادیان نزولی برای بهینه‌سازی پارامترها استفاده شده است. از آنجا که خروجی شبکه عصبی سینک فازی، نسبت به پارامترها خطی است و الگوریتم حداقل مربعات، مقادیر پارامترهای خطی را به صورت هم‌زمان انتخاب می‌کند و سرعت بالایی دارد، در این مقاله، از الگوریتم حداقل مربعات برای تعیین مقادیر پارامترهای خطی استفاده شده است. در این حالت، الگوریتم حداقل مربعات، در زمره الگوریتم‌های تک‌مرحله‌ای قرار می‌گیرد و یک بار در ابتدا یا انتهای الگوریتم استفاده می‌شود؛ بنابراین این الگوریتم، برون خط است و در مقابل تغییر پارامترها مقاوم نیست. در این حالت، از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی برای بهینه‌سازی برخط پارامترهای خطی استفاده شده است. در مرحله بعد، بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبود یافته، انجام شده است.

بهینه‌سازی پارامترهای خطی

روش حداقل مربعات: در مسائلی که خروجی، نسبت به پارامترها خطی باشد می‌توان از الگوریتم سریع و کاربردی حداقل مربعات استفاده کرد. در این حالت، پارامترها از (۱۳) به دست می‌آیند.

$$y = \theta_1 h_1(u) + \theta_2 h_2(u) + \dots + \theta_n h_n(u) \quad (13)$$

که در آن u ورودی، h_i توابعی بر حسب ورودی و θ_i پارامترهای مجهول هستند که باید تخمین زده شود. برای تعیین و تخمین پارامترها از داده‌های ورودی- خروجی آموزشی استفاده شده است. در این حالت، فرض شده که m داده در دسترس است؛ چنانچه داده‌های آموزشی در (۱۳) قرار گیرد، m معادله خطی به صورت (۱۴) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} h_1(u_1)\theta_1 + h_2(u_1)\theta_2 + \dots + h_n(u_1)\theta_n &= y_1 \\ h_1(u_2)\theta_1 + h_2(u_2)\theta_2 + \dots + h_n(u_2)\theta_n &= y_2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (14)$$

$$h_1(u_m)\theta_1 + h_2(u_m)\theta_2 + \dots + h_n(u_m)\theta_n = y_m$$

روابط بالا را به صورت خلاصه می‌توان به صورت معادله ماتریسی زیر نوشت.

$$A\theta = Y$$

که در آن A یک ماتریس $m \times n$ به صورت (۱۵) است.

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad (15)$$

θ برداری پارامترهای مجهول است (رابطه ۱۶).

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

برای اینکه بردار θ به صورت یکتا یافت شود، لازم است که تعداد داده‌ها لزوماً بزرگ‌تر یا مساوی تعداد مجهولات باشد؛ یعنی $m \geq n$. چنانچه تعداد داده‌ها برابر با تعداد مجهولات باشد؛ یعنی A ماتریس مربعی و دارای دترمینان غیرصفر باشد، θ را می‌توان از (۱۷) به‌دست آورد.

$$\theta = A^{-1}Y \quad (17)$$

در سیستم‌ها همواره عوامل مزاحم مانند نویز سفید، اغتشاش و ... وجود دارد؛ بنابراین در این حالت بهتر است برای تعیین بهتر پارامترهای خطی، از تعداد بیشتری داده استفاده کرد و پارامترها را به‌گونه‌ای تغییر داد که خطا کمینه شود. در این شرایط، به علت اینکه ماتریس A مستطیلی است، یعنی تعداد داده‌ها بیشتر از تعداد مجهولات است، این ماتریس، معکوس ندارد و پارامترها از (۱۷) به دست نمی‌آیند؛ بنابراین با در نظر گرفتن خطا می‌توان پارامترها را به‌صورت بهینه یافت. خطای مدل‌سازی از (۱۸) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} A\theta + e = Y \\ e = Y - \hat{Y} = Y - A\theta \end{cases} \quad (18)$$

حال برای یافتن حل تقریبی به گونه‌ای که $\theta = \hat{\theta}$ و مجموع مربعات خطا کمینه شود، از (۱۹) استفاده می‌شود.

$$E(\theta) = e^T e = (Y - A\theta)^T (Y - A\theta) \quad (19)$$

برای یافتن مقدار کمینه خطای (۱۹) نیاز است که از این رابطه نسبت به پارامترها مشتق گرفته شود و مساوی صفر قرار داد. در این صورت، رابطه به صورت (۲۰) به دست می‌آید.

$$E(\theta) = (Y^T - \theta^T A^T)(Y - A\theta) = \theta^T A^T A\theta - 2Y^T A\theta + Y^T Y \rightarrow \frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 2A^T A\theta - 2A^T Y \quad (20)$$

با قرار دادن $\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} = 0$ (۲۱) به دست می‌آید.

$$A^T A\hat{\theta} = A^T Y \quad (21)$$

چنانچه دترمینان $A^T A$ غیرصفر باشد، $\hat{\theta}$ به صورت (۲۲) به دست می‌آید.

$$\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (22)$$

تخمینگر حداقل مربعات بازگشتی

در این الگوریتم که یک الگوریتم برخط است، برای بهینه‌سازی پارامترهای خطی، از داده‌های جدید استفاده شده است. در این حالت با ورود داده جدید، نیازی به استفاده از داده‌های گذشته نیست و صرفاً می‌توان از داده جدید استفاده کرد. در این حالت، فرض می‌شود k داده موجود است و هدف، بهینه‌سازی پارامترها به صورت برخط است. فرض کنید یک داده جدید برای آموزش شبکه به صورت $(a^T; y)$ ، به‌عنوان سطر $m + 1$ ام به الگوریتم برای آموزش شبکه داده شده است. در این حالت، نیازی به استفاده از همه $k + 1$ داده‌های آموزشی برای محاسبه θ_{k+1} نیست. می‌توان با کمترین محاسبات یعنی استفاده از مقادیر، پارامترهای θ_k ، θ_{k+1} را به دست آورد. به عبارت دیگر باید با استفاده از زوج جدید $(a^T; y)$ ، θ_k را به‌روز کرد که از (۲۳) به دست می‌آید.

$$\theta_{k+1} = \left(\begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^{-1} \right) \begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y \\ y \end{bmatrix} \quad (23)$$

در این حالت P_k و P_{k+1} به صورت (۲۴) به دست می‌آید.

$$P_k = (A^T A)^{-1}, \quad P_{k+1} = \left(\begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^{-1} \right) = \left(\begin{bmatrix} A^T & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ a^T \end{bmatrix}^{-1} \right) = (A^T A + a a^T)^{-1} \quad (24)$$

نحوه به دست آوردن P_{k+1} از P_k به صورت (۲۵) است.

$$P_k^{-1} = P_{k+1}^{-1} - a a^T \quad (25)$$

با استفاده از ماتریس‌های P_k و P_{k+1} ، θ_k و θ_{k+1} از (۲۶) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \theta_k = P_k A^T Y \\ \theta_{k+1} = P_{k+1} (A^T Y + a y) \end{cases} \quad (26)$$

با قرار دادن رابطه اول (۲۶) در دومی، رابطه (۲۷) به دست می‌آید.

$$\theta_{k+1} = P_{k+1} (P_k^{-1} \theta_k + a y) = P_{k+1} [(P_{k+1}^{-1} - a a^T) \theta_k + a y] = \theta_k + P_{k+1} a (y - a^T \theta_k) \quad (27)$$

چنانچه از این رابطه برای محاسبه P_{k+1} استفاده شود، رابطه (۲۸) برای P_{k+1} به دست می‌آید.

$$P_{k+1} = (P_k^{-1} + a a^T)^{-1} = P_k - P_k a (I + a^T P_k a)^{-1} a^T P_k = P_k - \frac{P_k a_{k+1} a_{k+1}^T P_k}{1 + a_{k+1}^T P_k a_{k+1}} \quad (28)$$

در نهایت، رابطه حداقل مربعات بازگشتی به صورت (۲۹) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} P_{k+1} = P_k - \frac{P_k a_{k+1} a_{k+1}^T P_k}{1 + a_{k+1}^T P_k a_{k+1}} \\ \theta_{k+1} = \theta_k + P_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1}^T \theta_k) \end{cases} \quad (29)$$

در این حالت، نیاز به مقداردهی اولیه به پارامترهای θ_0 و P_0 است. این پارامتر به صورت تطبیقی انتخاب شده است؛ بدین صورت که در گام‌های ابتدایی که خطا بزرگ است، پارامتر α بزرگ و در گام‌های نهایی پارامتر α کوچک انتخاب شده است.

در شرایطی که پارامترها در گذر زمان تغییر می‌کند می‌توان از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی استفاده کرد. این موضوع به خصوص در بورس که در هر مرحله دارای تغییراتی است، کارایی بسیار زیادی دارد. در این حالت، از فاکتور فراموشی تطبیقی استفاده شده است. در این حالت، هنگامی که مقادیر در تکرارهای k و $k+1$ نزدیک به یکدیگر هستند، مقدار فاکتور فراموشی یک است و در حالتی که مقادیر در تکرارهای متوالی، تغییرات زیادی داشتند، مقدار فاکتور فراموشی، کوچک می‌شود و پارامترهای قبلی، سریع تر فراموش می‌شوند. در این حالت، پارامترها از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_{k+1} = P_k - \frac{P_k a_{k+1} a_{k+1}^T P_k}{\lambda + a_{k+1}^T P_k a_{k+1}} \quad (30)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \frac{1}{\lambda} P_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1}^T \theta_k) \quad (31)$$

$$\hat{v}_t = y_t - u_t^T \hat{\theta}_{t-1} \quad (32)$$

$$f_t = f_{t-1} + \left| \frac{\nabla J}{\nabla \theta} \right| \cdot |\hat{v}_t| \quad (33)$$

$$\lambda_t = \frac{1}{e^{\left| \frac{f_{t-1}}{f_t} - 1 \right|}} \quad (34)$$

الگوریتم بهینه سازی ملخ بهبود یافته

برای بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی، الگوریتم حداقل مربعات و حداقل مربعات بازگشتی کارایی ندارد و باید از الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیرخطی مانند الگوریتم ژنتیک و انتشار به عقب خطا استفاده کرد. در الگوریتم‌های فراابتکاری، فرایند جستجو در دو گام بیان می‌شود: در گام اول، عامل‌ها به صورت سراسری جستجو می‌کنند و در گام دوم، عامل‌ها به صورت محلی به جستجو می‌پردازند. در این حالت، عامل‌های قوی‌تر معمولاً تأثیر بیشتری در الگوریتم و هم‌گرایی دارند. در این حالت، رفتار ریاضی ملخ‌ها به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{l1} & \dots & p_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & s_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{l1} & \dots & s_{lk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{l1} & \dots & G_{lk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{l1} & \dots & A_{lk} \end{bmatrix} \quad (35)$$

در این حالت l نشان‌دهنده تعداد عامل‌ها، $[p_{i1} \dots p_{ik}]$ موقعیت عامل‌ها، $[s_{i1} \dots s_{ik}]$ بیانگر تعامل اجتماعی بین عمل‌ها، $[G_{i1} \dots G_{ik}]$ بیانگر نیروی جاذبه و $[A_{i1} \dots A_{ik}]$ بیانگر اثر باد است. در این حالت، نحوه رفتار عامل‌ها به صورت تصادفی می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$p_{ik} = r_1 s_{ik} + r_2 G_{ik} + r_3 A_{ik} \quad (36)$$

که در آن:

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^l \sum_{j \neq i}^k s(d_{ij}) \hat{d}_{ij} \quad (37)$$

$$s(r) = f_l e^{-\frac{r}{l}} - e^{-r} \quad (38)$$

$$G_{ij} = - \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k g \hat{e}_g \quad (39)$$

با جای‌گذاری روابط فوق در رابطه اولیه، رابطه زیر به دست آمده است:

$$p_{ij} = c \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j \neq i}^k \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_{jq} - x_{iq}|) \frac{x_{jq} - x_{iq}}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (40)$$

که در آن ub_d حد بالا، lb_d حد پایین، $\hat{T}_d$ بهترین نتیجه تا الان و c نرخ یادگیری است.

$$c = g \frac{\left| \frac{\partial e(k)}{\partial \theta} \right|}{\left| \frac{\partial e(k)}{\partial \theta} \right| + 1} \quad (41)$$

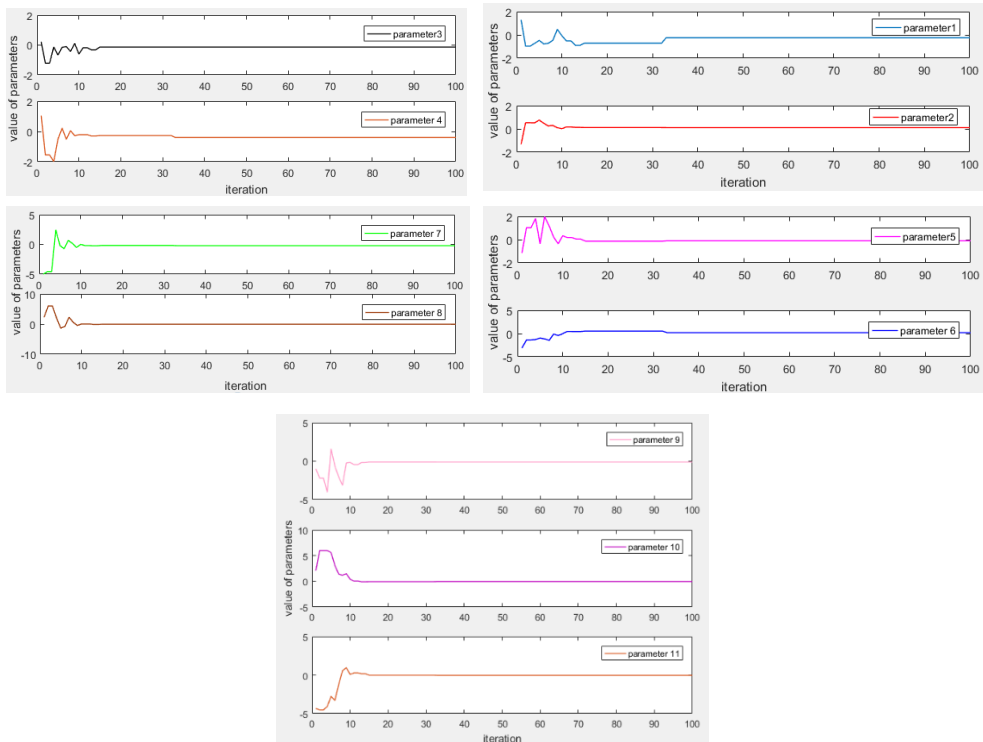
همچنین در این مقاله، تابع هزینه به صورت زیر تعریف شده است:

$$J = \sum_{k=0}^{k_1} \sum_{p=0}^{p_1} e^2(k, p) = \sum_{k=0}^{k_1} \sum_{p=0}^{p_1} (\hat{y}(k, p) - y(k, p))^2 \quad (42)$$

شبیه سازی

- پیش بینی نماد فولاد مربوط به فولاد مبارکه:

برای پیش بینی این نماد، از داده های سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ استفاده شد که مجموعاً ۴۳۵ داده می شود که برای آموزش از ۷۰ درصد داده ها، برای اعتبارسنجی و تست از ۱۵ درصد داده ها استفاده گردید. در گام اول، مرتبه مدل، تعیین شد؛ در این خصوص، از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری استفاده شد و نتایج، در شکل ۲ مشاهده می شود.



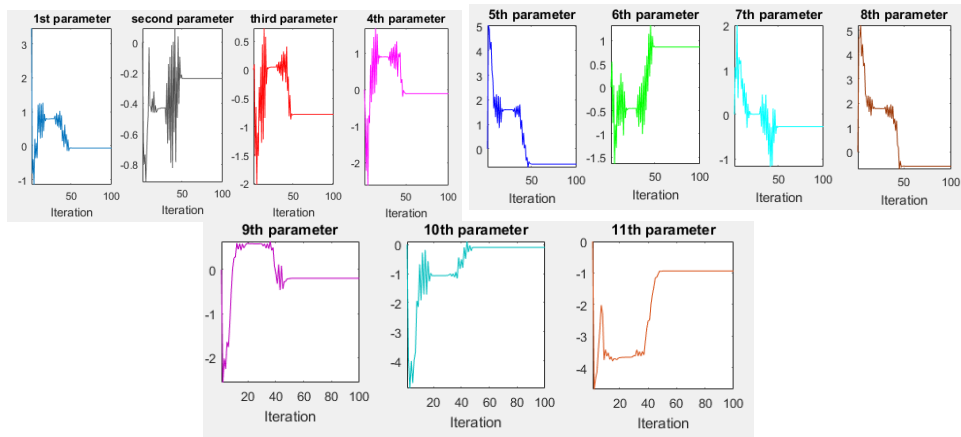
شکل ۲. الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری برای تعیین مرتبه مدل

همان طور که در اشکال و داده ها مشاهده می شود، ضرایب جملات ۱، ۷، ۱۰ و ۱۱ بیشترین ضریب و بیشترین تأثیر را دارد؛ لذا این مدل با استفاده از این جملات تشکیل شده است و بدین وسیله می توان با کمترین تعداد ورودی، یک پیش بینی از سری زمانی داشت. بنابراین خروجی در لحظه فعلی، به جملاتی از خروجی در گذشته، بستگی دارد:

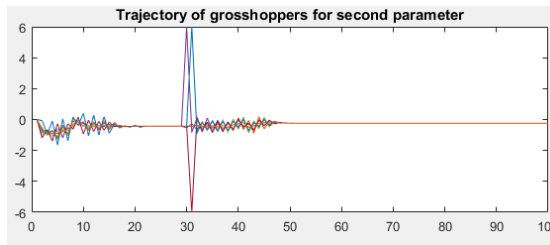
$$y(i, j) = f(y(i-1, j), y(i-7, j), y(i-10, j), y(i-11, j)) \quad (43)$$

پس از تعیین مرتبه به‌وسیله الگوریتم گرگ خاکستری، به تعیین مرتبه به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبودیافته پرداخته شد:

نحوه تعیین پارامترها به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبودیافته در شکل ۳ و نحوه تغییر پارامتر دوم در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. نحوه تغییر پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

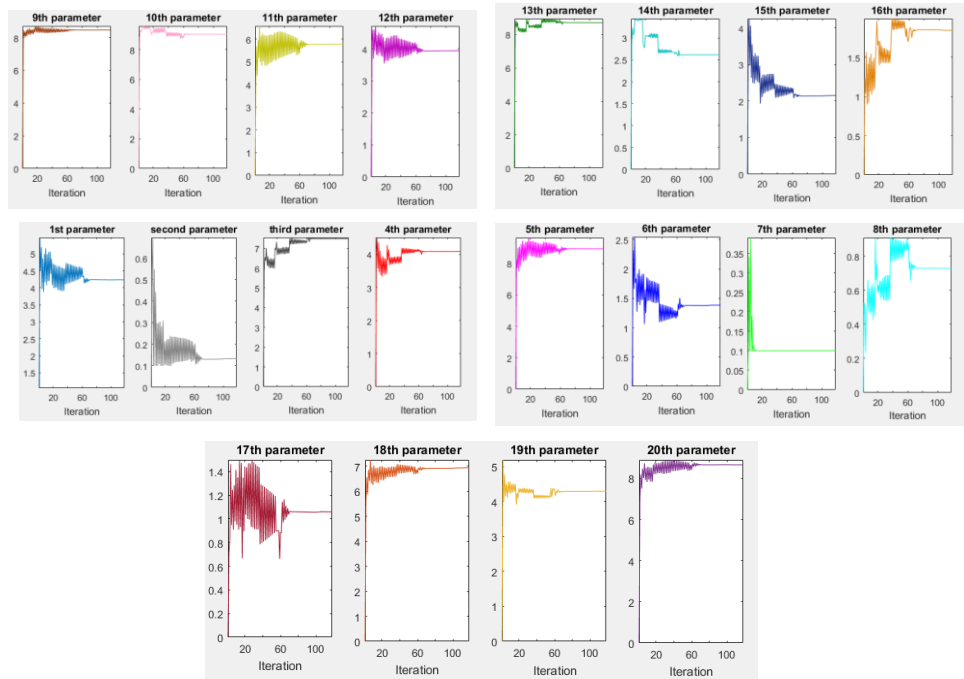


شکل ۴. نحوه حرکت ملخ‌ها برای تعیین پارامتر دوم

پس از اینکه مرتبه مدل تعیین شد، از الگوریتم آموزش ترکیبی برای آموزش شبکه پیشنهادی عصبی سینک فازی استفاده شد. در این حالت، از شاخص MSE مطابق زیر استفاده گردید:

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n [y_t - \hat{y}_t]^2}{n} \quad (44)$$

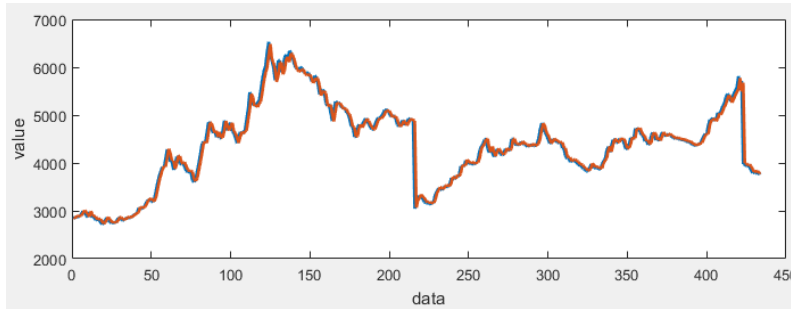
در این حالت، نتایج مطابق شکل ۵ و ۶ و جدول ۱ به دست آمد.



شکل ۵. نحوه تغییر پارامترهای غیر خطی با الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبود یافته

جدول ۱. نتایج برای شبیه‌سازی برای شبکه و الگوریتم پیشنهادی

ردیف	الگوریتم / روش	MSE train	MSE/MAX	MSE validation	MSE test
۱	آزمون شبکه [۲۴]	۲۵۵۰۵۵.۷	۳۶.۴۳	-	-
۲	رگرسیون [۲۴]	۵۷۹۵۴۵.۹	۸۲.۷۹	-	-
۳	شبکه عصبی [۲۴]	۱۲۰۲۸.۶	۱.۷۱	۱۳۲۳۲۱	۱۳۰۱۴۵
۴	شبکه عصبی [۲۵]	۲۲۶.۱۶	۰.۰۳۲	۲۴۲.۵۸۷	۲۴۵.۳۵۶
۵	شبکه عصبی - لونبرگ	۲۵۳.۲۴۶۵	۰.۰۳۶۱۷	۲۷۸.۳۲۵	۲۷۶.۳۲۵
۶	شبکه عصبی - بیزین	۲۳۷.۲۶	۰.۰۳۳۸	-	۲۴۶.۰۳۲
۷	شبکه عصبی - گرادیان	۳۳۶.۵۶	۰.۰۴۸	۳۳۴.۲۶۸	۳۴۷.۲۳۰
۸	شبکه و الگوریتم پیشنهادی	۲۱۵.۷	۰.۰۳۰۸	۲۲۱.۸۹	۲۲۰.۲۷۵



شکل ۶. نتایج پیش‌بینی نماد فولاد پس از آموزش برای کلیه داده‌ها

بحث و نتایج

در این مقاله، پیش‌بینی ارزش سهام بررسی شد؛ بدین منظور، در ابتدا یک روش جدید و مؤثر مبتنی بر مدل AR و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ارائه گردید. در این روش، مدل کلی به‌صورت AR در نظر گرفته شد و برای بررسی اینکه کدام جملات، بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی دارند از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری استفاده شد که یکی از نوآوری‌های این مقاله است و مزیتی که نسبت به مقالات قبل دارد این است که در این مقاله، صرفاً از شاخص قیمت نماد استفاده شده و از شاخص‌های نفت، طلا و ... استفاده نشده که این موضوع موجب کاهش هزینه و کاهش تعداد داده ورودی و حجم شبکه شده است. در این روش، جملاتی که بیشترین ضریب را دارند، دارای بیشترین تأثیر در پیش‌بینی خروجی هستند. بنابراین در این حالت مشخص گردید که خروجی به کدام جملات قبلی بستگی دارد. سپس یک شبکه جدید که ترکیبی از شبکه عصبی، توابع سینک و منطق فازی بود، ارائه شد؛ به علاوه برای آموزش شبکه از یک الگوریتم جدید شامل روش حداقل مربعات برای مقداردهی اولیه پارامترهای خطی، الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی برای آموزش برخط شبکه و الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبودیافته استفاده شده است. با توجه به تغییراتی که در الگوریتم ملخ بهبودیافته اعمال شده، باعث شد که این الگوریتم به یک الگوریتم تطبیقی تبدیل شود؛ بدین صورت که دیگر نیازی به تعیین تعداد پیشینه تکرار برای این الگوریتم نیست و حساسیت خطا، تعداد تکرار را مشخص می‌کند؛ همچنین استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی موجب شده که الگوریتم در مقابل تغییرات داده‌ها مقاوم‌تر شود و با سرعت بیشتر آموزش داده شود. یکی از مواردی که می‌تواند در پژوهش‌های بعدی مورد توجه قرار بگیرد، استفاده از سیستم‌های دو بعدی برای پیش‌بینی شاخص است؛ بدین صورت که شماره ماه و شماره روز در ماه به‌عنوان دو متغیر در نظر گرفته شود و پس از می‌توان با تعداد متغیر کمتر به پیش‌بینی ارزش بورس پرداخت؛ به علاوه در صورت استفاده از سیستم‌های چندمتغیره و استفاده از ورودی‌های مختلف می‌توان به نتایج مناسب‌تری دست یافت.

نتیجه‌گیری

در نهایت، یک شبیه‌سازی برای اعتبارسنجی مدل و شبکه ارائه شد و یکی از نمادهای پرطرفدار بورس یعنی فولاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در مقایسه با مقالات قبلی که بیشتر مربوط به شبکه عصبی بودند، نتیجه بهتری داشت؛ در نتیجه با استفاده از شبکه و الگوریتم پیشنهادی که در این مقاله برای اولین بار در مدل‌سازی نمادهای بورس ارائه شده، می‌توان یک پیش‌بینی خوب از نحوه تغییر نمادهای بورس داشت؛ به علاوه نشان داده شد که الگوریتم ترکیبی به خصوص الگوریتم بهینه‌سازی ملخ که برای بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی ارائه شده است، نتیجه مناسبی داشت؛

زیرا این شبکه‌ها می‌توانند روابط خطی و غیرخطی پیچیده را یاد بگیرند؛ البته در ابتدا باید مدل‌سازی انجام شود که خروجی به کدامیک از جملات گذشته یا سایر متغیرها وابسته است. نتایج این مقاله به صورت زیر ارائه شده است:

- تعیین مرتبه مدل به‌طور مؤثر توسط یک روش جدید بر اساس الگوریتم گرگ خاکستری
- با استفاده از تعیین مرتبه مدل با استفاده از روش معرفی‌شده، تعداد عبارات‌ها و جملات مؤثر در یادگیری کاهش یافت که منجر به کاهش تعداد ورودی شبکه و کاهش ساختار شد.
- ارائه یک شبکه جدید که با استفاده از تابع سینک در قیمت نتیجه قوانین فازی و خاصیت این تابع، نتایج مناسب‌تری نسبت به روش‌های پیشین داشت.
- بهبود نرخ یادگیری الگوریتم بهینه‌سازی ملخ که باعث تسریع هم‌گرایی گردیده است.
- الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبودیافته در این مقاله بر اساس دو معیار پایان می‌پذیرد: اول، تعداد تکرار و دوم، خطا و حساسیت به آن باعث تسریع در پایان الگوریتم شده است.
- با شبکه و الگوریتم پیشنهادی، نماد فولاد به صورت مؤثر پیش‌بینی شد.

References

- [1] Safai Naeini, J., & Farahmand, Mohammad Reza. (2018, July 12). *investigating the application of neuro-fuzzy model in stock price forecasting of tehran stock exchange companies*. 2nd national conference on computer and information technology, Fars, Iran. <https://civilica.com/doc/813581>
- [2] Dehnavi, V. S., & Shafiee, M. (2020, August 4-6). *LQR for Generalized Systems Using Metaheuristic Algorithms Based on Disturbance Observer*. 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9260723>
- [3] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 33-55. https://karafan.ty.ac.ir/article_100504_13ffdcdd667a867abcbf8d00c439c081.pdf
- [4] Wei, H., Kin Keung, Lai., Yoshiteru, Nakamori., Shouyang, Wang., & Lean, Y. (2007). Neural networks in finance and economics forecasting. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 06(01), 113-140. <https://doi.org/10.1142/s021962200700237x>
- [5] Pourdadashi Komachali, F., & Shafiee, Masoud. (2020). Sensor fault diagnosis in fractional-order singular systems using unknown input observer. *International Journal of Systems Science*, 51(1), 116-132. <https://doi.org/10.1080/00207721.2019.1701135>
- [6] Olson, D., & Mossman, C. (2003). Neural network forecasts of Canadian stock returns using accounting ratios. *International Journal of Forecasting*, 19(3), 453-465. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(02\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(02)00058-4)
- [7] Bahmani, m., & NezamTaheri, S. S. (2020). Evaluating the Effect of Earning Smoothing Using Maximization and Minimization of Earnings Approaches to Reduce Stock Price Crash Risk in Companies Accepted in Tehran Stock Exchange. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 16(46), 253-274. https://karafan.ty.ac.ir/article_105729_379d82d24a52acf40d3e0743bd38c076.pdf
- [8] Kelly, L. J. (2011). The current stock of money: an aggregation theoretic measure of narrowly defined money. *Applied Economics Letters*, 18(7), 659-664. <https://doi.org/10.1080/13504851003800778>

- [9] Çakıt, E., Olak, Andrzej Jan., Karwowski, Waldemar., Marek, Tadeusz., Hejduk, Irena., & Taiar, Redha. (2020). Assessing safety at work using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) approach aided by partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 76(3), 102925. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102925>
- [10] Choo, K., Carleo, G., Regnault, N., & Neupert, T. (2018). Symmetries and Many-Body Excitations with Neural-Network Quantum States. *Physical Review Letters*, 121(16), 167204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.167204>
- [11] Dai, A. M., & Le, Q. V. (2020). *Training a document classification neural network* (U.S. Patent No. 10,528,866.7). <https://patents.google.com/patent/US10528866B1/en>
- [12] Moayedi, H., Raftari, M., Sharifi, A., Jusoh, W. A. W., & Rashid, A. S. A. (2020). Optimization of ANFIS with GA and PSO estimating α ratio in driven piles. *Engineering with Computers*, 36(1), 227-238. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-00694-w>
- [13] Noushabadi, A. S., Dashti, A., Raji, M., Zarei, A., & Mohammadi, A. H. (2020). Estimation of cetane numbers of biodiesel and diesel oils using regression and PSO-ANFIS models. *Renewable Energy*, 158, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.146>
- [14] Shqair, M., Al-Smadi, M., Momani, S., & El-Zahar, E. (2020). Adaptation of Conformable Residual Power Series Scheme in Solving Nonlinear Fractional Quantum Mechanics Problems. *Applied Sciences*, 10(3), 890. <https://doi.org/10.3390/app10030890>
- [15] Cuevas, E., Gálvez, J., & Avalos, O. (2020). Gravitational search algorithm for non-linear system identification using ANFIS-Hammerstein approach. In *Recent Metaheuristics Algorithms for Parameter Identification*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28917-1_5
- [16] Bobyr, M. V., & Emelyanov, S. G. (2020). A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 88, 106030. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>
- [17] Heydarinejad, H., & Shafiee, M. (2019, April 30-May 2). *Super Twisting Sliding Mode Control for LTI Descriptor System Based on Disturbance Observer*. 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Yazd, Iran. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8786610>
- [18] Monajemi, S., Abzari, M., & Rayati, A. (2010). The prediction of prices in the stock market using fuzzy neural network and genetic algorithm and comparing it with artificial neural network. *Quantitative Economics Quarterly*, 6(3), 1-26. <https://doi.org/10.22055/JQE.2009.10697>
- [19] Pourzamani, Z., Kipour, Reza., & Nouredin, Mostafa. (2010). Investigating the Capability of Financial Crisis Prediction Patterns (Study Patterns: Patterns Based on Traditional Methods, Genetic Algorithms and Neural Networks). *Financial Engineering And Securities Management (Portfolio Management)*, 1(4), 1-28. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=134248>
- [20] Etemadi, H., Azar, Adel., & Baqaei, Vahid. (2012). Using Neural Networks in Predicting Profitability of Companies (Tehran Stock Exchange Member Companies). *Accounting knowledge*, 3(10), 51-70. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=176000>

- [21] Pourzamani, Z. (2015). Application of Linear and Nonlinear Genetic Algorithms in Improving the Profitability Prediction of Companies. *Financial Engineering And Securities Management (Portfolio Management)*, 6(22), 81-94. <https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=238474>
- [22] Alian, H. R. H., . (2016, May 4). A survey of stock price index forecasting using computational methods (artificial neural network) in tehran stock exchange. The 1st conference on accounting, economics and innovation in management, Bandar Abbas, Iran. <https://civilica.com/doc/561065/>
- [23] Soghriharavani, e. m., masoud. (2017, May 3). the use of neural networks to predict prices in the stock market. 10th international conference of iranian operations research association, Babolsar, Iran. <https://civilica.com/doc/767006/>
- [24] Miralavi, S. H &., Pourzamani, Z. (2019). Proposing a model for stock price forecasting using meta-heuristic methods and neural networks. *financial engineering and securities management* 10(40), 57-83. <https://civilica.com/doc/958480/>
- [25] Samadipour, S., Matinfard, R. Torkashvand, Ahmad. (2020, May 20). investigation and prediction of stock loss or growth in stock exchange companies in a given period using classification data mining technique. 3rd international conference on new solutions in engineering, information science and technology in the century ahead, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1017557/certificate/print/>



Removal of Zinc from Wastewater Using Green Pea Pods as Bio-Adsorbent

Maryam Fakharzadeh^{1*}

¹Faculty Member, Department of Chemical Industry, Faculty of Najafabad-Somayeh, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.20.2020

Revised: 02.03.2021

Accepted: 03.07.2021

Keyword:

Heavy metal

Wastewater

Zinc

Pea Pods

Adsorption

Isotherm model

***Corresponding Author:**

Maryam Fakharzadeh

Email: mfakharzadeh@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the removal of Zn (II) ions from wastewater using an agro-waste, green pea (*Pisum sativum*) pod as low-cost adsorbent material was investigated. Green pea pod (*Pisum sativum*) is as an organic solid waste material that has high adsorbing capacity in removal of heavy metal ions from wastewater and can be very effective in treating industrial aqueous solutions that are important sources of water and soil pollution. The removal studies were done as a function of pH, contact time, adsorbent amount and initial metal ion concentration in the batch system. With increasing pH of the solutions, the adsorption of zinc by green pea pods also increased and adsorption capacity attained a maximum value at pH=8. By increasing the contact time, the amount of zinc adsorbed increased and reached equilibrium after 60 min. However, by increasing the amount of adsorbent to the solution, the adsorption of zinc decreased. By increasing initial concentration of zinc ions, the percentages of adsorption decreased but the metal uptake increased. Langmuir and Freundlich adsorption isotherm models were applied to determine the efficiency of pea pods used as an adsorbent. The linear regression analysis showed that the experimental data perfectly fit both models.





حذف روی از پساب صنعتی به وسیله غلاف نخود فرنگی

مریم فخارزاده^{۱*}

۱- عضو هیئت علمی، گروه صنایع شیمیایی، آموزشکده فنی دختران نجف آباد-سمیه، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷ کلید واژگان: فلز سنگین پساب روی غلاف نخود فرنگی جذب مدل ایزوترمی *نویسنده مسئول: مریم فخارزاده پست الکترونیکی: mfakharzadeh@tvu.ac.ir	در این مطالعه، حذف روی در محیط‌های آبی با استفاده از غلاف نخود فرنگی به عنوان ماده جاذب ارزان قیمت بررسی شد. غلاف نخود فرنگی، یک ماده زائد جامد آلی است که قابلیت بالایی در حذف یون فلزات سنگین از پساب دارد و می‌تواند در تصفیه پساب‌های صنعتی که از مهم‌ترین منابع آلاینده آب و خاک هستند، بسیار مفید و کارآمد باشد. مطالعات جذب به صورت تابعی از PH، زمان تماس، مقدار جاذب و غلظت اولیه یون فلزی در سیستم ناپیوسته انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها مشخص ساخت که با افزایش PH محلول، جذب روی توسط غلاف نخود سبز، افزایش یافت و ظرفیت جذب به مقدار حداکثر در $PH=8$ رسید. علاوه بر این با افزایش زمان تماس، مقدار جذب شده یون روی، افزایش یافت و پس از ۶۰ دقیقه به تعادل رسید. در حالی که با افزایش مقدار جاذب به محلول، در مقدار جذب روی کاهش مشاهده گردید. همچنین با افزایش غلظت اولیه یون روی، درصد جذب کاهش در صورتی که برای ظرفیت جذب فلز افزایش مشاهده شد. مدل‌های ایزوترم جذب لانگمویر و فرنلدیچ برای تعیین کارایی غلاف نخود فرنگی به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی نشان داد که داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فرنلدیچ تطابق خوبی دارند.

مقدمه

آب شیرین، یک نیاز اساسی برای انسان است و در دسترس بودن آب آشامیدنی تمیز برای حفظ زندگی سالم، ضروری می‌باشد. با این حال، در حالی که تقاضای جهانی آب سالانه افزایش می‌یابد، اشکال مختلف آلودگی منابع آب را به خطر می‌اندازند [۱].

در کشورهای در حال توسعه، تأثیر افزایش آلودگی آب، مشکل‌ساز است؛ زیرا منابع کافی برای تصفیه مؤثر آب آلوده یا دسترسی به سیستم‌های آب آشامیدنی تمیز ندارند [۲].

ناتوانی مردم در کشورهای در حال توسعه برای دسترسی مداوم به منبع آب آشامیدنی مناسب، احتمال بیماری‌های مرتبط با آب را افزایش می‌دهد و طبق آمار سازمان جهانی بهداشت، سالانه حدود ۳۰۰ میلیون نفر در جهان از بیماری‌های مرتبط با آب می‌میرند که ۹۰ درصد این تعداد، کودکان زیر ۵ سال هستند [۳].

در جهان در حال توسعه، آلودگی آب به دلیل عوامل میکروبی مانند باکتری‌ها و ویروس‌ها، بزرگ‌ترین تهدید برای سلامت انسان است. با این حال، ازدیاد فلزات سنگین در منابع آب آشامیدنی نیز یک مشکل عمده می‌باشد. در سال‌های اخیر، فعالیت‌های صنعتی در سراسر جهان در حال توسعه، افزایش یافته که متعاقباً منجر به افزایش آلودگی با فلزات سنگین شده است و براساس آمار سازمان ملل، حدود ۸۰ درصد از کل پساب‌های صنعتی و شهری در جهان بدون تصفیه وارد محیط‌زیست می‌گردند [۲].

فلزات سنگین معمولاً از طریق فعالیت‌های مختلف صنعتی و دفع نامناسب ضایعات، وارد محیط زیست می‌شوند؛ بنابراین یکی از عمده‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست فلزات سنگینی مانند سرب، روی، کادمیوم، مس و کروم در پساب‌های صنعتی است. این فلزات، زیست تخریب‌پذیر هستند و در صورت مصرف آب و غذای آلوده با فلزات سنگین توسط ارگانیسم‌های زنده، جذب می‌شوند [۲].

با توجه به تأثیر فلزات سنگین بر سلامتی انسان، پژوهشگران بسیاری به بررسی تأثیر فلزات سنگین در منابع آب آشامیدنی و خطرات ناشی از آلودگی در کشورهای در حال توسعه پرداخته‌اند [۴؛ ۵].

علاوه بر این، به دلیل تأثیرات شناخته‌شده فلزات سنگین بر سلامت انسان، تحقیقات زیادی روی روش‌های حذف فلزات سنگین از منابع آب شرب، فاضلاب شهری و دیگر منابع آبی صورت گرفته و در حال حاضر، روش‌های تصفیه و فناوری‌های دستیابی به حذف فلزات سنگین با راندمان بالا در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته مانند فرایند تصفیه غشایی، تصفیه میکروبی، جذب توسط کربن فعال و جاذب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۶]. اما این تکنولوژی‌ها در جهان در حال توسعه، امکان‌پذیر یا مقرون‌به‌صرفه نیستند. برای تصفیه آب در کشورهای در حال توسعه باید فناوری‌های پیشنهادی، آسان باشند و هزینه‌های عملیات و نگهداری پایینی داشته باشند.

در سال‌های اخیر، جذب سطحی به‌عنوان یک فناوری مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه پساب در نظر گرفته شده که از مواد ارزان‌قیمت و قابل‌دسترس مانند پسماندهای کشاورزی برای حذف فلزات از پساب‌های صنعتی استفاده می‌گردد. محققان، به‌کارگیری ضایعات کشاورزی برای حذف فلزات سنگین را به‌طور گسترده در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه بررسی کرده‌اند [۲].

غلاف نخودفرنگی، یک پسماند کشاورزی و قابل تجزیه شدن است و به دلیل هزینه پایین آن، برای حذف یون‌های روی از محیط آبی به عنوان یک جاذب مناسب انتخاب گردید. این ماده زیستی در سراسر جهان به‌عنوان ماده زائد ناخواسته، دور ریخته می‌شود.

روی یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین است که اغلب در فرآوری فلزات، صنایع آب‌کاری، تولید آلیاژ برنج و آلیاژهای دیگر وجود دارد. این فلز سنگین زیست تخریب‌پذیر نمی‌باشد و از طریق غذا به بافت‌ها می‌رسد و در بافت‌های زنده انباشته می‌گردد [۲]. سمیت با فلز روی در شکل‌های حاد یا مزمن دیده شده است و دریافت بالای این عنصر می‌تواند

منجر به مسمومیت حاد با غلایم اصلی شامل مزه فلزی، استفراغ، تهوع، سرگیجه، خستگی، ناهماهنگی در عضلات و تب گردد [۱۰].

در این پژوهش، کارایی غلاف نخود فرنگی به عنوان جاذب در حذف یون روی از پساب ساختگی و یک نمونه از پساب صنعت آبکاری مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهای تجربی مؤثر بر ظرفیت جذب مانند PH، زمان تماس، مقدار جاذب و غلظت فلز ارزیابی شد. داده‌های جذب با مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ، تطابق داشتند.

بخش تجربی

در این مطالعه، مقدار جذب یون $Zn(II)$ از پساب ساختگی و یک نمونه از پساب واقعی، توسط غلاف نخود فرنگی به عنوان جاذب بررسی شده است. غلاف نخود فرنگی، از شرکت صنایع غذایی اصالت اصفهان که تولیدکننده کنسرو نخود فرنگی است تهیه گردید. ابتدا غلاف نخود فرنگی، چندین مرتبه با آب مقطر شسته شد، سپس درون آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید و پس از آسیاب کردن، از الک ۱۰۰۰ میکرونی عبور داده شد.

محلول استوک روی ($100 \cdot \frac{mg}{lit}$) با استفاده از حل کردن $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ از شرکت مرک، در آب مقطر تهیه شد که به عنوان پساب ساختگی مورد استفاده قرار گرفت.

تمامی آزمایش‌های بررسی جذب در ارلن‌مایر حاوی ۵۰ میلی‌لیتر از محلول Zn^{2+} انجام و محلول با مقدار مورد نظر از جاذب با PH معین در یک همزن مغناطیسی با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه هم‌زده شد و برای صاف کردن مخلوط پساب ساختگی (محلول Zn^{2+}) و جاذب (غلاف نخود فرنگی) از کاغذ واتمن شماره ۴۰ استفاده گردید و سپس توسط دستگاه جذب اتمی Perkin-Elmer مدل ۲۳۸۰، غلظت نهایی یون روی موجود اندازه‌گیری شد. تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند.

یکی از فاکتورهای مهم و تعیین‌کننده در افزایش کارایی فرایند جذب سطحی کنترل pH محیط و تعیین pH_{ZPC} (نقطه‌ای از pH که طی آن بارهای سطحی جاذب برابر صفر می‌شوند) می‌باشد. اهمیت مشخص کردن pH_{ZPC} به دلیل تعیین خصوصیات سطح جاذب است؛ بدین طریق که در pH بالاتر از نقطه مذکور، سطح جاذب دارای بار منفی است و در نتیجه، یون‌های با بار مخالف (یون‌های مثبت) به آسانی، جذب سطح جاذب می‌گردند. همچنین در pH پایین‌تر از pH_{ZPC} سطح جاذب با بار مثبت، یون‌های با بار منفی را سریع‌تر جذب می‌کند [۱۱]. برای تعیین pH_{ZPC} از محلول سدیم کلرید ۰/۰۱ مولار به عنوان الکترولیت و از محلول‌های کلریدریک اسید و سود ۰/۱ مولار برای تنظیم pH استفاده گردید [۱۲]. مقدار ۵۰ میلی‌لیتر از محلول تهیه شده را در ۹ ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته، پس از تنظیم pH از ۲ تا ۱۰ به هر ارلن ۰/۱ گرم جاذب اضافه و به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق هم زده و پس از آن، pH نهایی محلول‌ها تعیین شد.

در مرحله بررسی تأثیر PH بر جذب، پساب‌های ساختگی با PHهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ با غلظت $50 \cdot \frac{mg}{lit}$ و مقدار جاذب ۰/۱ گرم ساخته شد و برای تنظیم PH از محلول سود و کلریدریک اسید با غلظت ۰/۱ مولار استفاده گردید و برای اندازه‌گیری PH، دستگاه PH متر Jenway مدل ۳۵۱۰، مورد استفاده قرار گرفت.

تعیین تأثیر مدت تماس جاذب بر مقدار جذب یون روی در پساب ساختگی، با زمان‌های تماس ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ دقیقه در $pH=8$ ، با غلظت $50 \cdot \frac{mg}{lit}$ و مقدار جاذب ۰/۱ گرم انجام شد.

همچنین به منظور بررسی تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب یون روی، از مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱/۰ و ۱/۰ گرم غلاف نخود فرنگی در مدت زمان و غلظت ثابت از یون روی در $pH=8$ ، آزمایش انجام و در نهایت، تأثیر غلظت اولیه فلز بر میزان جذب با محلول‌هایی به غلظت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان پساب ساختگی با حجم

ثابت، مقدار جاذب مشخص و مدت تماس ۶۰ دقیقه در $\text{pH} = ۸$ مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت جذب جاذب، با استفاده از معادله زیر به دست آمد:

$$q = (C_i - C_e) \times \frac{V}{M} \quad (۱)$$

درصد جذب یون روی نیز از معادله (۲) محاسبه شد:

$$\text{درصد جذب} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (۲)$$

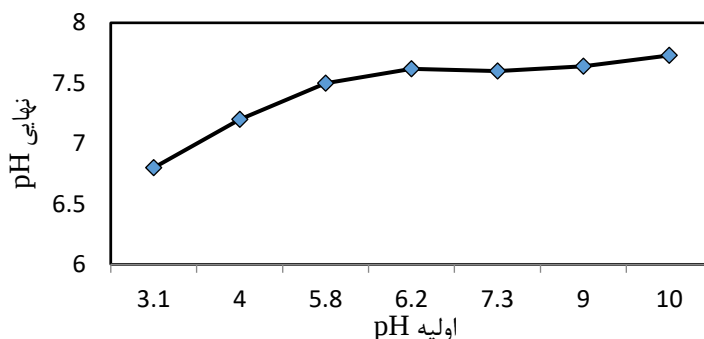
که در آن q ، مقدار فلز جذب شده در واحد جرم جاذب، C_i و C_e به ترتیب غلظت اولیه یون فلزی و غلظت نهایی آن در محلول برحسب $\left(\frac{\text{mg}}{\text{lit}}\right)$ و V حجم محلول برحسب (lit) و m مقدار جاذب برحسب (g) است.

نتایج و بحث

تعیین pH_{ZPC}

pH_{ZPC} با ترسیم pH نهایی محلول در برابر pH اولیه تعیین شد [۱۳؛ ۱۴].

نتایج حاصل، مطابق نمودار شکل ۱ به دست آمد:

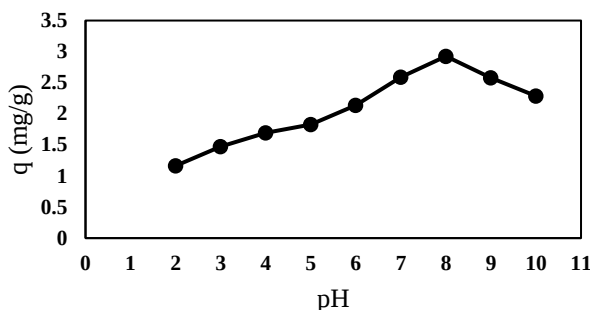


شکل ۱. نمودار تعیین pH_{ZPC} غلاف نخودفرنگی

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود در $\text{pH}_{\text{ZPC}} = 7/6 \pm 0/1$ ، بارهای الکتریکی مثبت و منفی موجود در سطح جاذب با یکدیگر در تعادل هستند و pH اولیه برابر با pH نهایی است.

تأثیر pH محلول بر میزان جذب

pH یکی از فاکتورهای مهمی است که از طریق تأثیر بر میزان و نوع بار سطحی جاذب و شیمی محلول فلزی بر میزان جذب تأثیر می گذارد [۱۵]. آزمایش های تأثیر pH بر جذب یون روی توسط جاذب، بررسی شد. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.

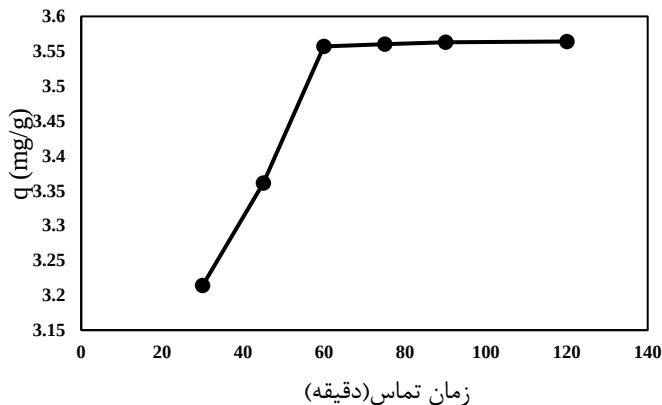


شکل ۲. تأثیر تغییر PH بر میزان جذب یون روی توسط غلاف نخود فرنگی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، در زمان تماس ۶۰ دقیقه، غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر از یون روی به حجم ۵۰ میلی لیتر از پساب و مقدار جاذب ۰/۱ گرم، جذب روی توسط جاذب با افزایش PH از ۲ به ۸ افزایش یافته است و مقدار فلز جذب شده به حداکثر ($2.925 \frac{mg}{g}$) در $pH=8$ رسید. ظرفیت جذب روی در مقادیر PH بالاتر از ۸ کاهش نشان داد. مشاهدات مشابهی نیز برای انواع دیگر جاذب [۱۰؛ ۱۶] گزارش شده است. در PH اسیدی، نرخ جذب فلز روی کاهش می‌یابد؛ زیرا در PH پایین، تراکم بار مثبت، زیاد است و پروتون‌ها با یون‌های روی رقابت می‌کنند و از اتصال یون‌های روی به جایگاه‌های فعال جلوگیری می‌کنند و به این ترتیب، منجر به یک رانش الکتروستاتیکی می‌گردند که در نهایت باعث جذب سطحی کمتر می‌شود [۱۱؛ ۱۷]. بنابراین پروتون‌ها ترجیحاً بیش از یون روی، جذب جایگاه‌های فعال خواهند شد. با افزایش PH رانش الکتروستاتیکی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تراکم بارهای مثبت بر روی مکان‌های فعال جاذب می‌شود و در نهایت، باعث افزایش نرخ جذب روی می‌شود [۱۸]. همچنین در یک محلول با خاصیت قلیایی قوی، سایت‌های اتصال ممکن است غیرفعال شوند و کمپلکس‌های هیدروکسیل روی مانند $ZnOH^+$ و $Zn(OH)_2$ تشکیل گردد. این گونه‌های هیدروکسیل می‌تواند در جذب، مشارکت داشته باشند و شروع به رسوب‌گذاری بر روی سطح جاذب کنند [۱۰] به همین علت است که در PH بیش از ۸ ظرفیت جذب روی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بیان شده، $pH=8$ برای آزمایش‌های دیگر انتخاب شد. بر اساس pH_{ZPC} جاذب، می‌توان تأثیر PH بر روند جذب را توضیح داد. در pH برابر pH_{ZPC} ، سطح جاذب بدون بار است و جاذبه الکترواستاتیک بین سطح جاذب و کاتیون‌های فلزی در محلول، ناچیز است و انتظار می‌رود در این pH حداکثر جذب، به دست آید. هنگامی که pH محلول پایین‌تر از pH_{ZPC} است، بار سطحی جاذب مثبت است و به دلیل دافعه الکترواستاتیک، جذب اتفاق نمی‌افتد [۱۹] و در pH بیشتر از pH_{ZPC} ، بار سطحی جاذب، منفی است؛ بنابراین، به دلیل جاذبه الکتروستاتیک بین بارهای ناهمنام، جذب، رخ نمی‌دهد [۲۰؛ ۲۱].

تأثیر زمان تماس بر میزان جذب

یکی دیگر از عواملی که می‌تواند بر جذب یون روی توسط ذرات غلاف نخود فرنگی تأثیرگذار باشد، زمان تماس است. زمان مورد نیاز برای رسیدن سیستم به حالت تعادل، به ماهیت جاذب و تعداد سایت‌های جذب موجود بستگی دارد [۲۰]. تغییر در میزان جذب فلز در هر واحد جرم جاذب با زمان در مقدار PH بهینه در شکل ۳ نشان داده شده است.

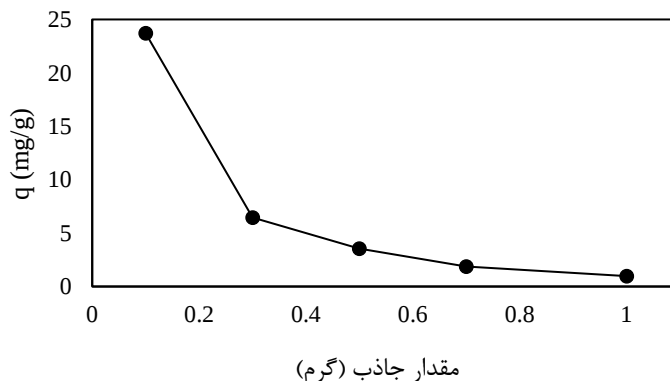


شکل ۳. تأثیر زمان تماس بر میزان جذب یون روی توسط غلاف نخود فرنگی

همان‌طور که مشاهده می‌شود در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون روی، حجم ۵۰ میلی‌لیتر با مقدار جاذب ۰/۱ گرم در $\text{PH} = ۸$ ، با گذشت زمان مقدار جذب افزایش می‌یابد و بعد از ۶۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. افزایش بیشتر زمان تماس، سبب تغییر معنی‌داری در جذب روی نمی‌گردد. نرخ جذب یون روی در زمان‌های تماس اولیه، سریع است؛ زیرا در آغاز، فرایند جذب یون‌های روی به راحتی جایگاه‌های فعال موجود بر روی جاذب را اشغال می‌کنند و پس از مدتی، به تدریج، از تعداد سایت‌های موجود، کاسته می‌شود و محل‌های اتصال، به سختی توسط یون روی اشغال می‌شوند که به دلیل تشکیل نیروهای دافعه بین یون‌های روی جذب‌شده بر سطح جاذب و یون‌های روی موجود در فاز مایع است [۲۲].

تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب

تأثیر مقدار جاذب بر ظرفیت جذب یون فلزی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر در $\text{PH} = ۸$ ، حاوی مقادیر جاذب مختلف ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ گرم (مطالعه شد).

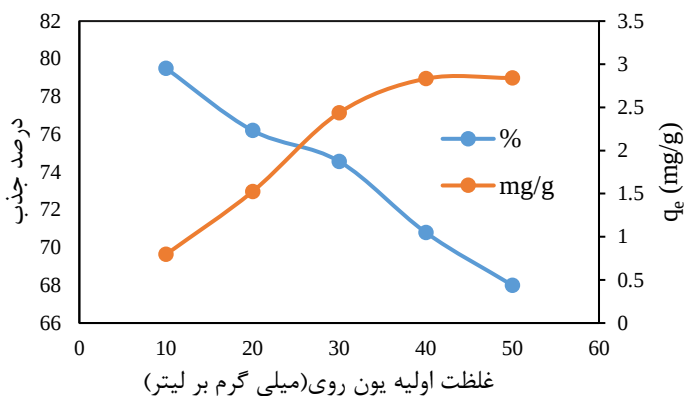


شکل ۴. تأثیر مقدار جاذب بر مقدار جذب یون روی توسط غلاف نخود فرنگی

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده با افزایش مقدار جاذب، ظرفیت جذب کاهش می‌یابد که عمدتاً به دلیل هم‌پوشانی مکان‌های جذب در نتیجه افزایش فعل و انفعالات بین ذرات مواد یا تجمع ذرات جاذب است. رقابت بین یون‌های روی برای جذب در سطح جاذب نیز ممکن است منجر به کاهش سطح مؤثر مورد نیاز برای جذب گردد [۱۷]؛ [۱۹] که این پدیده منجر به کاهش سطح مؤثر مورد نیاز برای جذب می‌شود. نتایج مشابهی برای حذف روی با استفاده از کاج اسکاتلندی [۱۷] و کیتین [۲۳] مشاهده شد.

تأثیر غلظت اولیه فلز بر میزان جذب

غلظت اولیه یون فلزی موجود در پساب، یکی دیگر از عوامل مؤثر بر مقدار جذب توسط جاذب است که در غلظت‌های مختلف از ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر با مقدار جاذب ۰/۱ گرم در لیتر، $\text{PH}=8$ و مدت تماس ۶۰ دقیقه بررسی شد. داده‌ها نشان می‌دهند که جذب فلز افزایش می‌یابد؛ در حالی که درصد جذب با افزایش غلظت اولیه یون روی کاهش می‌یابد (شکل ۵).



شکل ۵. تأثیر تغییر غلظت اولیه یون روی بر میزان جذب توسط غلاف نخود فرنگی

افزایش ظرفیت جذب (q_e) با زیاد شدن غلظت یون روی، به علت احتمال زیاد برخورد بین یون‌های روی و مکان‌های فعال جاذب نسبت داده می‌شود [۱۱؛ ۱۹؛ ۲۴؛ ۲۵] و کاهش درصد جذب در غلظت بالاتر به دلیل کاهش مکان‌های فعال موجود بر سطح جاذب و اشباع شدن آنها می‌باشد [۱۱؛ ۱۵؛ ۱۷؛ ۲۵].

در غلظت‌های پایین، تمام یون‌های روی موجود در محلول می‌توانند با جایگاه‌های فعال برهم‌کنش دارند و بنابراین درصد جذب، بیشتر خواهد بود در صورتی که در غلظت‌های بالاتر، جایگاه‌های فعال، به سرعت اشباع می‌شود و چون مقدار غلظت جاذب، ثابت باقی می‌ماند؛ در نتیجه با رقیق کردن پساب حاوی غلظت‌های بالای یون فلزی می‌توان عملکرد تصفیه را افزایش داد [۱۱؛ ۱۳؛ ۲۵].

ایزوترم جذب

برای توصیف فرایند جذب یون روی بر روی غلاف نخود سبز، دو مدل تجربی از لانگمویر و فروندلیچ برای داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. این مدل‌ها رابطه بین میزان فلز جذب‌شده در واحد جرم جاذب (q_e) و غلظت باقی‌مانده آن در محلول (C_e) را نشان می‌دهد. ایزوترم‌های جذب با استفاده از غلظت‌های مختلف یون فلزی اولیه (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) مقدار جاذب ۰/۱ گرم در $\text{PH}=8$ و زمان تماس ۶۰ دقیقه ترسیم شده است.

ایزوترم جذب لانگمیر

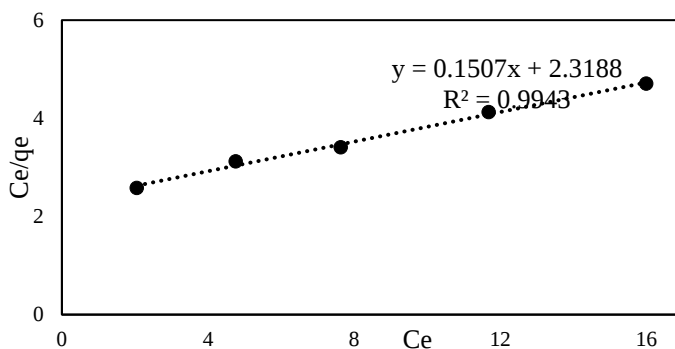
شناخته شده ترین مدل دو پارامتری خطی برای جذب تک لایه حاوی تعداد محدودی مکان های فعال یکسان، ایزوترم جذب لانگمیر است [۲۶] که به صورت معادله ۳ نشان داده می شود:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

و می توان به صورت خطی به صورت زیر نشان داد:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4)$$

به طوری که q_m میزان جذب یون های روی از محلول بر روی جرم واحد جاذب است تا یک لایه کامل بر روی سطح بر حسب میلی گرم در گرم ایجاد کند. K_L ثابت تعادل لانگمیر است که مربوط به انرژی آزاد جذب می باشد [۲۰]. ثابت های q_m و K_L از شاخص های معادله لانگمیر است و می توان آنها را از فرم خطی معادله لانگمیر تعیین کرد (جدول ۱).



شکل ۶. ایزوترم جذب لانگمیر یون های روی بر روی غلاف نخود سبز

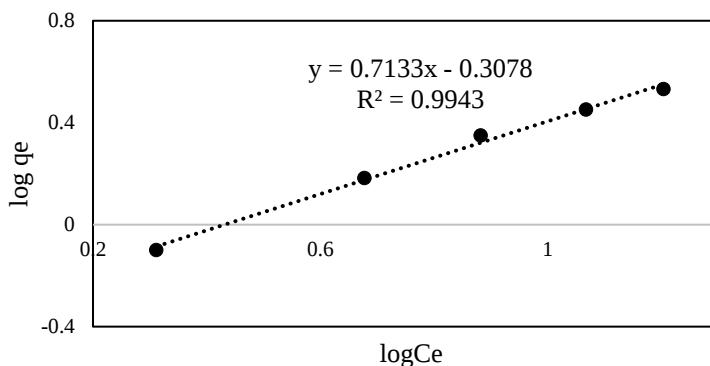
شکل ۶ نشان دهنده نمودار $\frac{C_e}{q}$ در برابر C_e است که برای جذب یون $Zn(II)$ بر روی غلاف های نخود سبز به عنوان جاذب ارائه شده است.

ایزوترم جذب فروندلیچ

در ایزوترم فروندلیچ، فرض بر این است که فرایند جذب، در یک سطح ناهمگن رخ می دهد و ظرفیت جذب به غلظت جاذب، مربوط می شود [۱۰]. مدل فروندلیچ خطی شده به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

که در آن، K_f و n ثابت های فروندلیچ هستند که به ترتیب ظرفیت جذب و شدت واکنش را نشان می دهند [۱۱]. نمودار $\log q_e$ در برابر $\log C_e$ در شکل ۷ برای جذب یون $Zn(II)$ بر روی غلاف نخود سبز به عنوان جاذب ارائه شده است. جدول ۱ ثابت های این مدل را نشان می دهد.



شکل ۷. ایزوترم جذب سطحی یون روی بر روی غلاف نخود سبز

داده‌های تعادل با استفاده از فرم‌های خطی معادلات فروندلیچ و لانگمویر تجزیه و تحلیل شدند. داده‌های آزمایشی به ترتیب با ترسیم $\log(q_e)$ در مقابل $\log(C_e)$ و $\frac{C_e}{q}$ در مقابل C_e تنظیم شد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود ایزوترم‌های فروندلیچ و لانگمویر، مقادیر ضریب همبستگی (R_2) یکسانی را نشان می‌دهند و نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل، به خوبی با داده‌های تجربی، متناسب هستند.

جدول ۱. داده‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ

معادله ایزوترم لانگمویر ($y=0.1507x+2.3188$)				
شیب خط	عرض از مبدا	q_m	K_L	R_2
0.1507	2.3188	6.6357	0.065	0.994
معادله ایزوترم فروندلیچ ($y = 0.7133x - 0.3078$)				
شیب خط	عرض از مبدا	K_f	n	R_2
0.7133	-0.3078	0.492	1.40	0.994

کاربرد این روش برای تصفیه پساب صنایع آب‌کاری

با توجه به نتایج بیان شده، روش جذب سطحی برای حذف $Zn(II)$ از پساب صنایع آب‌کاری استفاده شد. نمونه‌ای از پساب شرکت شفق نجف‌آباد اصفهان تحت شرایط بهینه برای حذف $Zn(II)$ ، در $PH=8$ ، زمان تماس ۶۰ دقیقه و مقدار جاذب ۰/۱ گرم مورد آزمایش قرار گرفت. درصد جذب (٪) براساس نتایج حاصل از طیف‌سنجی جذب اتمی، با استفاده از معادله ۲ به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\frac{(42.3 - 6.86)}{42.3} \times 100 = 84\%$$

درصد حذف به دست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند برای تصفیه پساب آب‌کاری به کار گرفته شود.

نتیجه گیری

امروزه، توسعه روش کارآمد برای تصفیه فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی، به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک جاذب زیستی جدید تهیه شده توسط غلاف نخودفرنگی برای حذف یون روی از پساب، مورد استفاده قرار گرفت که در دسترس بود و می‌توان آن را به‌سادگی تهیه کرد. تأثیر عوامل مختلف بر روند جذب با استفاده از آزمایش‌های انجام شده، بررسی گردید. ظرفیت جذب جاذب زیستی استفاده شده با سایر گزارش‌های قبلی، قابل مقایسه است. از همه مهم‌تر، جاذب پیشنهادی، خصوصیات جذب رضایت‌بخشی را برای جذب یون روی از پساب آب‌کاری نشان داد. در این مطالعه، از داده‌های تجربی جذب یون روی بر سطح پودر غلاف نخود فرنگی، نتایج زیر حاصل شده است. ظرفیت جذب یون‌های روی به pH، زمان تماس، غلظت یون فلزی و مقدار جاذب، بستگی دارد. با افزایش PH از ۲ به ۸، جذب یون روی بر روی غلاف نخود افزایش و سپس با افزایش pH بیش از ۸ ظرفیت جذب روی کاهش می‌یابد. حداکثر جذب در $\text{pH} = 8$ رخ داد. همچنین مشخص شد که زمان تماس ۶۰ دقیقه برای رسیدن به میزان تعادل جذب کافی است. میزان حذف روی با افزایش مقدار جاذب، کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از هم‌پوشانی مکان‌های جذب باشد و با افزایش غلظت یون روی اولیه، درصد جذب فلز، کاهش می‌یابد. حداکثر ظرفیت جذب غلاف نخود سبز برای حذف یون روی از نمونه واقعی فاضلاب ۸۴ درصد با ۰/۱ گرم پودر غلاف نخود فرنگی به‌عنوان جاذب در $\text{pH} = 8$ و زمان تماس ۶۰ دقیقه بود. همچنین نتایج آزمایشگاهی برای این یون فلزی، به‌خوبی با معادلات لانگمویر و فروندلیچ مطابقت داشت و این دو مدل ایزوترم، جذب یون روی را به‌خوبی توصیف کردند. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد که غلاف نخود فرنگی به‌عنوان یک پسماند کشاورزی، گزینه مناسبی برای حذف روی از پساب می‌باشد.

References

- [1] Water, U. (2018). 2018 UN World Water Development Report, Nature-based Solutions for Water. UNESCO. <http://repo.floodalliance.net/jspui/handle/44111/2726>
- [2] Joseph, L., Jun, B.-M., Flora, J. R. V., Park, C. M., & Yoon, Y. (2019). Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229(1-2), 142-159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>
- [3] Pandit, A. B., & Kumar, J. K. (2015). Clean Water for Developing Countries. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 6(1), 217-246. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061114-123432>
- [4] Amadi, C. N., Igweze, Z. N., & Orisakwe, O. E. (2017). Heavy metals in miscarriages and stillbirths in developing nations. *Middle East Fertility Society Journal*, 22(2), 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.mefs.2017.03.003>
- [5] Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O., & Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of The Total Environment*, 569-570, 476-488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>
- [6] Agarwal, M., & Singh, K. (2017). Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(4), 387-419. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.104>
- [7] Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process—a systematic review. *Journal of environmental health science and engineering*, 13(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0233-8>

- [8] Kim, S., Chu, K. H., Al-Hamadani, Y. A. J., Park, C. M., Jang, M., Kim, D.-H., Yu, M., Heo, J., & Yoon, Y. (2018). Removal of contaminants of emerging concern by membranes in water and wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal*, 335, 896-914. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.044>
- [9] Zare, E. N., Motahari, A., & Sillanpää, M. (2018). Nanoadsorbents based on conducting polymer nanocomposites with main focus on polyaniline and its derivatives for removal of heavy metal ions/dyes: A review. *Environmental Research*, 162, 173-195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.025>
- [10] Veli, S., & Alyüz, B. (2007). Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay. *Journal of Hazardous Materials*, 149(1), 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.109>
- [11] King, P., Rakesh, N., Lahari, S. B., Kumar, Y. P., & Prasad, V. S. R. K. (2008). Biosorption of zinc onto *Syzygium cumini* L.: Equilibrium and kinetic studies. *Chemical Engineering Journal*, 144(2), 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.01.019>
- [12] Rivera-Utrilla, J., Bautista-Toledo, I., Ferro-García, M. A., & Moreno-Castilla, C. (2001). Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 76(12), 1209-1215. <https://doi.org/10.1002/jctb.506>
- [13] Khormaei, M., Nasernejad, B., Edrisi, M., & Eslamzadeh, T. (2007). Copper biosorption from aqueous solutions by sour orange residue. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2), 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.074>
- [14] Mohan, D., & Singh, K. P. (2002). Single- and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse—an agricultural waste. *Water Research*, 36(9), 2304-2318. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00447-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00447-X)
- [15] Taşar, Ş., Kaya, F., & Özer, A. (2014). Biosorption of lead(II) ions from aqueous solution by peanut shells: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2), 1018-1026. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.015>
- [16] Chen, X. C., Wang, Y. P., Lin, Q., Shi, J. Y., Wu, W. X., & Chen, Y. X. (2005). Biosorption of copper(II) and zinc(II) from aqueous solution by *Pseudomonas putida* CZ1. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 46(2), 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2005.10.003>
- [17] Ucun, H., Aksakal, O., & Yildiz, E. (2009). Copper(II) and zinc(II) biosorption on *Pinus sylvestris* L. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2), 1040-1045. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.050>
- [18] Bhattacharya, A. K., Mandal, S. N., & Das, S. K. (2006). Adsorption of Zn(II) from aqueous solution by using different adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 123(1), 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.06.012>
- [19] Sanchooli Moghaddam, M., Rahdar, S., & Taghavi, M. (2016). Cadmium removal from aqueous solutions using saxaul tree ash. *Iranian journal of chemistry and chemical engineering (IJCCE)*, 35(3), 45-52. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2016.22058>
- [20] Adhiambo, O. R., Lusweti, K. J., & Morang'a, G. Z. (2015). Biosorption of Pb²⁺ and Cr²⁺ using *Moringa Oleifera* and their adsorption isotherms. *Science Journal of Analytical Chemistry*, 3(6), 100-108. <http://hdl.handle.net/190/262>

- [21] Zhang, L., Zeng, Y., & Cheng, Z. (2016). Removal of heavy metal ions using chitosan and modified chitosan: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 214, 175-191. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.013>
- [22] Hossain, M., Ngo, H. H., Guo, W., & Nguyen, T. (2012). Removal of copper from water by adsorption onto banana peel as bioadsorbent. *International Journal of Geomate*, 2(2), 227-234. <https://doi.org/10.21660/2012.4.3c>
- [23] Jaafarzadeh, N., Mengelizadeh, N., Takdastan, A., Farsani, M. H., Niknam, N., Aalipour, M., Hadei, M., & Bahrami, P. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto chitin. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.4103/2277-9183.153992>
- [24] HAQ, N. B., Rubina, K., & MUHAMMAD, A. H. (2011). Biosorption of Pb (II) and Co (II) on red rose waste biomass. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)* 30(4), 81-88. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2011.6093>
- [25] Yang, C., Wang, J., Lei, M., Xie, G., Zeng, G., & Luo, S. (2010). Biosorption of zinc(II) from aqueous solution by dried activated sludge. *Journal of Environmental Sciences*, 22(5), 675-680. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60162-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60162-5)
- [26] Katal, R., Zare, H., Rahmati, H. T., & Darzi, G. N. (2012). Biosorption of zinc from aqueous solutions using dried activated sludge. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(4), 857-865. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.109>

Table of contents

Stability and sensitivity analysis of wind turbine self-excitation induction generator	13
Jalal Sahebkar, Hasan Shademan, Mohammad Zareein, Mohammad Shademan	
Semi-Analytical Solution of Unsteady Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer between two Oscillation Plate under the Influence of a Magnetic Field	35
Mojtaba Masoumnezhad, MohammadAli Kazemi, Nematollah Askari, MohammadHassan Taheri, Mehdi Ghamati	
Investigation of the Behavior of the Linked Column Frame System for Retrofitting of RC Frames	63
Alireza Ezoddin	
Prediction of compressive strength of concrete with rubber fibers using artificial neural networks	81
Seyed Reza Salim Bahrami	
The Effect of Flexible Connection on Reducing the Damage of Buried Gas Pipes Due to Ground Displacement	99
Seyed Mohammad Seyed Kolbadi	
Evaluation of Changing Effects of Density and Thickness of Polyurethane as a Protective Coating on Underground Tunnels under Surface Blast	121
Mohsen Fazlavi, AmirAbbas Asadian	
Comparison of Environmental Laws of Mines in Iran, Australia, Chile, India, Turkey, Canada, South Africa, and China	139
Morteza Hashempour, Mehdi Ghazanfari	
Discrimination of Hydrothermal Alterations Associated with Copper Mineralization Using ASTER Image Processing Sheet in Sar-e-Chah-e-Shur, Eastern Iran	153
Mortaza Hosseini	
Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM)	169
Ali Asgari Aghdam, Yaghoub Dadgar Asl, Mohamad Morad Sheikhhy	
Providing a multi-objective production scheduling model taking into account preemptive work, early costs, late payment, WIP and downtime penalties with a reliability approach	189
Alireza Azizi, Mohammad Mehdi Movahedi, Seyed Ahmad Shayannia	
The prediction of stock value by using the proposed fuzzy neural network and hybrid algorithm	203
Vahid Safari Dehnavi, Masoud Shafiee	
Removal of Zinc from Wastewater Using Green Pea Pods as Bio-adsorbent	223
Maryam Fakharzadeh	



License Holder: Technical and Vocational University
Director- in-Charge: Ebrahim Salehi Omran (Ph.D)
Editor-in- Chief: Nematollah Azizi (Ph.D)
Journal Internal Manager: Azarchehr Sehat (Ph.D)

Cover designer & implementation:

M. Moshtaghi - S. Danaseresht

Language Editors & Content designer:

L.. Hashemi, A. Tahmasbi- M.

Pouyandehkia

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. MohammadReza Mehrnia:

Professor of University of Tehran

Dr. SeyedHeydar Mirfakhreddini:

Associate Professor of Yazd University and Technical and Vocational University

Dr. Vida Taghvaei:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dr. AhmadReza Haghighi:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dr. Akbar Jafari:

Associate Professor of Technical and Vocational University

Dr. Mahdi Chehel Amirani:

Associate Professor of Urmia University

Dr. Seyed Mohammad Hossein

Associate Professor of Birjand University

SeyedKashi

Dr. Mahdi Malekan:

Associate Professor of University of Tehran

Dear Reviewers of the articles in this issue:

Sodeh AghliMoghadam, HosseinAli Bagi, Maryam Bahmani, Ahmad Bedram, Yaghoub DadgarAsl, Jamal Davarpanah, Vali EnjilAli, Mohsen Fazlavi, SeyedHossein GhasemZadehMousaviNezhad, Hoda Goreishi, Mahdi Jafari, Mostafa JafariKermaniPour, Alireza MirarabBayegi, SeyedHeydar Mirfakhredini, Mohammad MohammadPourOmran, MohammadMahdi Paydar, Bahman RahmatiNezhad, Sobhan RostamiGohari, Parviz SaeidiFar, MohammadHossein Saemian, Rasoul Safdarian, SeyedMohammadHossein SeyedKashi, SeyedMohammad SeyedKolbadi, Pedram Sodagar, Arash Tahvili, MohammadReza Zahedi.

In the Name of God

Karafan

Quarterly Research Journal of
Technical and Vocational University

Spring, 2021

Vol. 18, No. 1, Serial Number 52

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) 42350418

Email: karafan@tvu.ac.ir
Website: <http://karafan.tvu.ac.ir>