

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



مقام معظم رهبری (مدظله العالی):
علم مجرد و به تنهایی کافی نیست، باید علم را به فناوری، فناوری را به صنعت و
صنعت را به توسعه‌ی کشور وصل کنیم.
بیانات مقام معظم رهبری در جمع زائرین و مجاورین حرم مطهر رضوی (۱۳۸۵/۰۱/۰۱)



فصل نامه علمی علوم و فنون سازندگی

سال چهارم / شماره ۱ / بهار ۱۴۰۲ (شماره پیاپی ۱۱)

صاحب‌انبار: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مدیرسول: مهندس عبدالرضا عبد

سرپرست: مهندس ابوالقاسم مظفری

مدیر اجرایی: امیرکوکلی

- دارای پروانه انتشار به شماره ۸۷۴۳۵ مورخ ۱۳۹۹/۱۰/۲۲ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی
- کارشناس: دکتر محمدعلی طهماسبی
- ویراستار و صفحه‌آرا: سعید حمزه‌بی
- چاپخانه: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع) - مرکز چاپ سپاه
- قیمت: ۱۵۰۰,۰۰۰ ریال

این مجله با همکاری معاونت پژوهش دانشگاه جامع امام حسین (ع) و قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)
منتشر می‌شود.

نشانی: تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، معاونت پژوهش و فناوری، موقعیت مرکزی، ساختمان مدیریت تبادل و نشر دانش

فصل‌نامه علمی "علوم و فنون سازندگی"

تلفن و نمابر: ۷۴۱۸۸۲۳۶ صندوق پستی: ۱۹۴ - ۱۶۵۸۵

اعضای هیئت تحریریه

- ۱) مهندس احسان پیرولی (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۲) دکتر صفا پیمان (استادیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۳) مهندس ابراهیم جمشیدی کهساری (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۴) دکتر امیر حصیرچی (استادیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۵) مهندس سیدحسن حسینی‌نیک (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۶) دکتر حمید خدادادی (استادیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۷) دکتر مهدی خرقانی (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۸) دکتر فریدون خسروی (دانشیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۹) مهندس علیرضا صادقیان فر (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۱۰) دکتر حسین قربانی (عضو هیئت علمی پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء^(ص))
- ۱۱) دکتر مجید کیانی (استادیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۱۲) دکتر سیدمحسن محسنی‌شکیب (دانشیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))
- ۱۳) دکتر محمد مردانی شهربابک (دانشیار - دانشگاه جامع امام حسین^(ع))

فهرست مطالب

- بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه و دو لایه در موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق..... ۱
محمد محمدنیا
- فرآیند طراحی بهینه سازه های فولادی به کمک الگوریتم های هوش مصنوعی: نمونه موردی بیمارستان آموزشی-درمانی الزهرا تبریز.... ۱۳
آرش رهگذر، مجید کیانی
- بررسی تأثیر سایش تیغه ها بر عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل (مطالعه موردی، قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه)..... ۲۳
منصور صبری، حسن وحیدی، محمد رستمی، علی ذنوبی
- بررسی آزمایشگاهی مقاومت پسماند خمشی بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک..... ۳۱
علیرضا دوست محمدی
- آنالیز حساسیت پارامترهای اپراتوری حفاری مکانیزه در سنگ گرانیت..... ۳۷
محمدحسین علیکاهی
- شناسایی آسیب در رشته های کابل فلزی پیش تنیده پس کشیده برای پل های بتنی پیش تنیده..... ۴۵
امید رعنائی، سجاد حیدری

..... راهنمای تهیه مقاله

..... فرم اشتراک مجله

✓ مطالب ارائه شده در مقاله ها، لزوماً نظرات هیئت تحریریه را منعکس نمی کند.

✓ ذکر مطالب، تنها با ارجاع به این مجله بلامانع است.

✓ نسخه الکترونیکی این مقالات به صورت رنگی در سایت مجله (stc@ihu.ac.ir) در دسترس می باشد.

راهکارهای افزایش بهره‌وری در صنعت ساخت‌وساز

همان‌طور که در شماره گذشته نشریه علوم و فنون سازندگی عنوان شد علی‌رغم تأکیدات اسناد بالادستی نظام و برنامه‌های ۵ ساله توسعه، وضعیت بهره‌وری در کل اقتصاد ایران شرایط مطلوبی ندارد. به طوری که نه تنها عدد ۳۵ درصد از رشد ارزش افزوده اقتصاد در سه برنامه چهارم، پنجم و ششم حاصل نشده است بلکه در بعضی از سال‌ها شاخص بهره‌وری منفی بوده است. علاوه بر آن در میان بخش‌های مختلف اقتصاد، صنعت ساخت‌وساز (Construction) که متناظر است با «بخش ساختمان»، در نظام حساب‌های ملی از شرایط نامناسب‌تری برخوردار بوده است. مطابق برنامه توسعه ششم انتظار می‌رفت در بخش ساختمان رشد سالانه ارزش افزوده ۷/۵ درصد و رشد بهره‌وری عوامل کل ۲/۸ درصد تحقق یابد. به گفته دیگر ۳۷ درصد رشد ارزش افزوده از محل بهره‌وری حاصل گردد اما در عمل ارزش افزوده بخش ساختمان بدون تغییر باقی ماند و بهره‌وری عوامل کل سالانه ۳/۲ درصد کاهش یافت که عمدتاً در اثر افزایش نیروی کار بوده است بدون آنکه حجم فعالیت‌های پیمانکاری اضافه شده باشد. متأسفانه در این دوره از ارزش خالص موجودی ماشین‌آلات و تجهیزات پیمانکاران کشور نیز کاسته شده است. لازم به ذکر است که در برنامه توسعه هفتم نیز رشد بهره‌وری در حدود یک سوم رشد ارزش افزوده در بخش ساختمان هدف‌گذاری شده است.

به منظور افزایش بهره‌وری در این صنعت راهکارهای متعددی ارائه شده است موسسه جهانی مکنزی در گزارش سال ۲۰۱۷ خود افزایش ۵۰ تا ۶۰ درصدی بهره‌وری در بخش ساختمان با بازنگری و بهبود در هفت زمینه را میسر دانسته است. بازنگری قوانین و مقررات ساخت‌وساز^۱، تغییر و بازنگری در قراردادها^۲، بازنگری فرایندهای طراحی و مهندسی^۳، بهبود مدیریت در تدارکات و زنجیره تأمین^۴، بهبود اجرای پروژه در محل^۵، استفاده از فناوری‌های نوین مواد و مصالح جدید و روش‌های اتوماسیون^۶، ارتقا مهارت و دانش کارکنان^۷ از جمله حوزه‌های پیشنهادی مکنزی می‌باشد.

علاوه بر موارد فوق چنانچه بهره‌وری را حاصل ستانده به نهاده بدانیم ۵ راهبرد برای افزایش این نسبت در فعالیت‌های پیمانکاری قابل ترسیم و تصور است*^۸. این راهبردها عبارت‌اند از:

- افزایش ستانده که با کارپذیری بیشتر و ارتقای برند شرکت حاصل می‌شود.
- افزایش ارزش افزوده که با ظرفیت‌سازی داخلی، کنترل و بهینه‌سازی کالاها و خدمات مصرفی میسر می‌شود.
- بهبود توزیع ارزش افزوده که با افزایش اثربخشی نظام جبران خدمات و ارتقاء برند کارفرمایی به دست می‌آید. ارتقاء برند کارفرمایی به معنی اعتباربخشی به سازمان و جذابیت محیط کار به منظور جذب نیروهای مستعد و کارآمد و ماندگاری آنها هست.
- بهینه‌سازی نیروی کار که با ارتقای کیفیت نیروی انسانی و بهبود نظام مدیریت منابع انسانی حاصل می‌شود.

- بهینه‌سازی سرمایه که با ارتقای اثربخشی نظام نت و فناوری ماشین‌آلات انجام می‌شود.

برای این اهرم‌های راهبردی بهره‌وری، شاخص‌های عملکردی تعیین شده است که با آن‌ها شرکت‌های بزرگ صنعتی و پیمانکاری موردسنجش قرار می‌گیرند و رتبه‌بندی شرکت‌های برتر در سایت سازمان مدیریت صنعتی اعلام می‌شود. از جمله شاخص‌هایی که مورد توجه قرار می‌گیرد بهره‌وری سرمایه و نیروی کار می‌باشد. بر اساس شاخص‌های موجود، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء(ص) به عنوان یک سازمان پیشرو و الگوافرین در صنعت پیمانکاری کشور نیاز به یک تحول ساختاری و بهبود در عملکرد به ویژه بهره‌وری بیشتر از سرمایه‌های ثابت و نیروی کار خود دارد.

امید است در شماره‌های بعدی نشریه با الهام گرفتن از اظهارنظر مخاطبین باز به این موضوع پرداخته شود و به‌طور شفاف برای افزایش بهره‌وری، راهکارهای عملی در رابطه با سازمان مورد اشاره ارائه شود.

ابوالقاسم مظفری

سردبیر فصل‌نامه علوم و فنون سازندگی

بهار ۱۴۰۲

¹ Reshape regulation

² Rewire contracts

³ Rethink design

⁴ Improve procurement and supply chain

⁵ Improve onsite execution

⁶ Infuse technology and innovation

⁷ Reskill worker

بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه و دو لایه در موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق

محمد محمدنیا*

^۱دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

آرمورهای مکعبی شکل به عنوان نخستین ترین نوع آرمورهای بتنی مورد استفاده بشر هستند. در گذشته از بلوک های مکعبی شکل به عنوان لایه آرمور موج شکن، به صورت دو لایه استفاده می شد. مقدار مصرف قابل توجه بتن در آرمورهای مکعبی شکل باعث شد تا ایده تولید آرمورهای با عملکرد قفل شدگی که دارای زائده بوده و حجم بتن کمتری مصرف می کنند مورد توجه قرار گیرد. مدت ها بلوک های با عملکرد قفل شدگی در لایه آرمور مورد استفاده قرار می گرفت، لیکن به دلیل برخی از معایب آن ها نظیر احتمال شکسته شدن در حین جابه جایی، دشواری و پیچیدگی های زمان تولید، مشکلات هنگام نصب و دشواری های مربوط به زمان بهره برداری و تعمیرات سبب گردید توجه مجدد به سمت آرمورهای مکعبی شکل و سایر آرمورهای حجیم صورت گیرد. استفاده از آرمورهای مکعبی شکل به صورت یک لایه چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در مقاله حاضر به بررسی رفتار آرمورهای مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم و مقایسه رفتار آن با آرمورهای دو لایه در موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که آرمورهای تک لایه با چیدمان منظم عملکرد نسبتاً خوبی دارد و می توان به جای آرمورهای دو لایه با چیدمان نامنظم بکار رود. در حالی که آرمورهای تک لایه با چیدمان نامنظم عملکرد بسیار ضعیفی در برابر برخورد موج دارد و گسترش خرابی در لایه آرمور در این حالت به سرعت رخ می دهد.

کلیدواژه ها: موج شکن تاج کوتاه، موج شکن مستغرق، آرمور مکعبی شکل، آرمور تک لایه، آرمور دو لایه

۱. مقدمه

موج شکن های تاج کوتاه یکی از انواع موج شکن های توده سنگی است. بر اساس تراز تاج موج شکن تاج کوتاه نسبت به تراز آب در پای آن، موج شکن توده سنگی از نوع تاج کوتاه یا مستغرق خواهد بود. موج شکن های تاج کوتاه و مستغرق را از نظر نوع ساخته شدن، می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول موج شکن های متعارف توده سنگی، دسته دوم موج شکن های همگن و دسته سوم موج شکن های مصنوعی می باشند. موج شکن مورد بررسی در پژوهش حاضر از نوع موج شکن های متعارف توده سنگی است که دارای سه بخش کلی مغزه، فیلتر و لایه آرمور می باشد. توجه اصلی پژوهش بر روی رفتار لایه آرمور در موج شکن مذکور می باشد.

به صورت سنتی استفاده از آرمورهای مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم مرسوم بوده است. اجرای لایه آرمور موج شکن با آرمورهای مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم اخیراً مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱]. آرمورهای مکعبی شکل

نسبت به سایر آرمورهای تک لایه نظیر آکروپاد، ایکس بلاک و کورلاک (که عمدتاً آرمورهای با عملکرد قفل شدگی می باشند) در دسترس تر و اقتصادی تر می باشد. بدیهی است که آرمور تک لایه نسبت به آرمور دو لایه (مانند آرمور تتراپاد، مکعب و آنتیفر) بسیار مقرون به صرفه تر است [۲].

آرمورهای مکعبی شکل تک لایه دارای مزایای فنی نسبت به سایر آرمورها، مخصوصاً آرمورهای با عملکرد قفل شدگی هستند. اجرای لایه آرمور مکعبی شکل در زیر تراز آب بسیار راحت تر است [۲]. آرمورهای مکعبی شکل به دلیل شکل ساده قالب، راحت تر تولید می شوند. همچنین امکان انبار کردن آنها پس از تولید بر روی همدیگر وجود دارد لذا فضای کمتری برای تولید آرمور نیاز دارند. مقاومت در برابر شکسته شدن بیشتری هم در مرحله انبار کردن و هم در زمان اجرا در لایه آرمور دارند. تعمیر لایه آرمور در صورت بروز خرابی راحت تر از سایر آرمورهای با رفتار قفل شوندگی است. به دلیل شکل ساده آنها، اجرا و حمل و نقل آنها راحت تر است [۲]. در مجموع می توان گفت

ون دن بوخ و همکاران [۸] به بررسی اثر تراکم چیدمان بر پایداری لایه آرمور موج‌شکن تاج بلند در آرمورهای دو لایه مکعبی شکل و تک لایه سنگی و تتراپاد پرداختند. بررسی آنها نشان داد که با افزایش تراکم چیدمان در لایه آرمور (آرمور سنگی و تتراپاد) پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می‌یابد. این موضوع به صورت کامل برای لایه آرمور مکعبی صادق نیست. در لایه آرمور مکعبی با افزایش تراکم چیدمان لایه آرمور، پایداری هیدرولیکی افزایش می‌یابد لیکن وقتی تراکم چیدمان بیشتر افزایش می‌یابد، رفتار لایه آرمور مکعبی شکل مانند سنگ فرش می‌شود و حالت گسیختگی لایه آرمور به صورت آپلیفت و لغزش غالب می‌شود.

مارتین و مدینا [۹] و [۱۰] به بررسی پایداری لایه آرمور مکعبی شکل و کیوبی پاد با در نظر گرفتن تراکم چیدمان نامنظم در موج‌شکن تاج بلند پرداختند. آنها در طول آزمایش‌ها، تراکم چیدمان لایه آرمور در نزدیکی سطح آب و در تراز بالاتر از سطح آب را کمتر از تراکم چیدمان لایه آرمور در تراز زیر سطح آب در نظر گرفتند. بررسی‌های آنها نشان داد که در یک تیزی موج ثابت، پایداری هیدرولیکی آرمور کیوبی پاد در حالت دو لایه بیشتر از حالت تک لایه است. همچنین پایداری هیدرولیکی آرمور مذکور در دو حالت تک لایه و دو لایه بیشتر از پایداری آرمور مکعبی دو لایه است.

کورد و همکاران [۳] به بررسی و مقایسه آرمور کیوبی پاد به صورت تک لایه و دو لایه پرداختند. مدل‌سازی فیزیکی انجام شده در آزمایشگاه توسط آنها نشان داد که آرمور تک لایه عملکرد بسیار مناسبی در برابر نیروی امواج دارد. آنها اظهار داشتند که آرمور مکعبی شکل با چیدمان نامنظم سازگاری بسیار خوبی در برابر نشست بدنه موج‌شکن دارد.

ون گنت و لويس [۲] به بررسی عملکرد آرمور تک لایه مکعبی شکل پرداختند. آنها آرمور تک لایه مکعبی شکل را به عنوان یک گزینه اقتصادی برای اجرا در لایه آرمور معرفی کردند. آنها به بررسی مزایا و معایب آرمور مکعبی شکل و مقایسه آن با سایر آرمورها پرداختند.

مدینا و همکاران [۱۱] و [۱۲] براساس کارهای [۴]، [۶]، [۱۳] و [۱۴] نتیجه گرفتند که تراکم چیدمان لایه آرمور تأثیر قابل توجهی بر عدد پایداری دارد. آنها با طراحی تعدادی آزمایش مدل فیزیکی به بررسی رفتار لایه آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم و تراکم چیدمان‌های مختلف در موج‌شکن تاج بلند پرداختند و نهایتاً یک رابطه طراحی ارائه کردند. آنها تأکید کردند که دو پارامتر تخلخل لایه آرمور و تراکم چیدمان آن

علیرغم اینکه آرمورهای مکعبی شکل میزان بتن بیشتری برای تولید نیاز دارند، ولی تولید آنها مقرون به صرفه‌تر است. آرمورهای تک لایه قابلیت خود ترمیمی دارند و در مواقعی که یک بلوک آرمور از درون لایه بیرون می‌رود، سایر آرمورهای مجاور با جابه‌جا شدن در لایه آرمور، فضای خالی به وجود آمده را پر می‌کنند و مانع از پیشرفت خرابی می‌شوند [۲].

در مقاله حاضر با استفاده از انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی پایداری لایه آرمور موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. بررسی‌ها بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه و دو لایه با چیدمان منظم و نامنظم در اثر برخورد امواج منظم و نامنظم انجام شده است.

۲. مرور ادبیات فنی

ون در میر [۴] به بررسی آرمورهای سنگی، مکعبی، تتراپاد و آکروپاد پرداخت و برای هر یک رابطه طراحی جداگانه‌ای ارائه کرد. سپس یک مقایسه بین پایداری لایه آرمور در هر یک از حالت‌ها انجام داد. بررسی آنها نشان داد که آرمور مکعبی دو لایه نسبت به آرمور سنگی عملکرد بهتری دارد لیکن نسبت به آرمور تتراپاد و آکروپاد عملکرد پایین‌تری دارد.

ون در میر و پیلاچ [۵] به بررسی پایداری هیدرولیکی موج‌شکن‌های تاج کوتاه با لایه آرمور سنگی پرداختند. آنها اظهار داشتند که با کاهش تراز تاج موج‌شکن، پایداری لایه آرمور افزایش می‌یابد. آنها نتیجه گرفتند که اگر تراز تاج موج‌شکن‌های تاج کوتاه به حدی بالا باشد که امکان روگذری موج وجود نداشته باشد، می‌توان از روابط رایج ارائه شده برای موج‌شکن‌های تاج بلند استفاده کرد.

ون در میر [۶] سعی کرد تا با بررسی رفتار آرمورهای بتنی مختلف یک رابطه طراحی برای لایه آرمور بتنی ارائه کند. وی به مقایسه رفتار آرمورهای تک لایه و دو لایه مکعبی شکل نیز پرداخت. بررسی او نشان داد که آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم رفتار نسبتاً خوبی در برابر امواج دارد و قطعات آرمور به راحتی جابه‌جا نمی‌شوند.

ون گنت و همکاران [۷] به بررسی و امکان‌سنجی اجرای آرمور تک لایه خصوصاً آرمور مکعبی شکل پرداختند. بررسی آنها نشان داد که عملکرد آرمور تک لایه مکعبی شکل در مقایسه با آرمور دو لایه مکعبی شکل خوب است. آنها نتیجه گرفتند که علت عملکرد قابل قبول آرمور تک لایه مکعبی شکل به دلیل وزن آرمور، نیروی ناشی از تماس بین دو آرمور و کاهش نیروی ناشی از موج به دلیل سطح صاف آرمورهای مکعبی تک لایه است.

یاکسل و همکاران [۲۱] به بررسی موج‌شکن تاج بلند با برم پرداختند. آنها به بررسی عملکرد آرمور مکعبی دو لایه با چیدمان منظم بر روی محدوده برم و شیب پایین‌تر از برم پرداختند. بررسی آنها نشان داد که نحوه چیدمان لایه آرمور در محل تلاقی برم با شیب پایین دست موج‌شکن تأثیر بسیار زیادی بر پایداری لایه آرمور دارد.

کمپاس و همکاران [۲۲] و [۲۳] به بررسی و مرور روابط موجود در خصوص طراحی لایه آرمور موج‌شکن‌های توده سنگی پرداختند. بررسی‌های آنها بر روی معیارهای خرابی لایه آرمور نشان داد که در حال حاضر یک رویه واحد در جهان برای اندازه‌گیری خرابی لایه آرمور تعریف نشده است. در واقع محققین برای ارائه روابط طراحی لایه آرمور از معیارهای خرابی مختلف تعریف شده توسط [۲۴] و [۲۵] استفاده می‌کنند که می‌تواند سبب ایجاد تفاوت در نتایج روابط مختلف ارائه شده باشد.

ویبرا و همکاران [۱] یک مرور تکنیکال در خصوص استفاده از آرمور مکعبی یک لایه در موج‌شکن‌های توده سنگی انجام دادند. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که استفاده از آرمور مکعبی به صورت یک لایه و چیدمان منظم و تخلخل پایین در موج‌شکن یک راه‌حل ابتکاری جدید است. البته آرمور یک لایه به اندازه آرمور دو لایه انعطاف‌پذیر نیست.

به صورت یک جمع‌بندی می‌توان گفت که بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه در موج‌شکن‌های تاج بلند توسط محققین مختلف نظیر [۲]، [۷]، [۸]، [۱۶]، [۱۷]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵] و [۳۶] مورد ارزیابی قرار گرفته است. لیکن عملکرد آرمور مکعبی شکل تک لایه در موج‌شکن‌های تاج کوتاه تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در مقاله حاضر به بررسی عملکرد آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم پرداخته شده است. همچنین با مدل‌سازی‌های فیزیکی عملکرد آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم نیز با آرمور تک لایه منظم مقایسه شده است. یکی دیگر از وجه تمایزهای مورد توجه که در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت، اجرای آرمور مکعبی شکل با چیدمان نامنظم بود. در مقاله حاضر مقایسه رفتار آرمور مکعبی شکل با چیدمان منظم و نامنظم در دو حالت اجرای تک لایه و دو لایه برای موج‌شکن تاج کوتاه و مستغرق انجام گرفته است.

۳. روش تحقیق

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نیاز از یک فلوم یک بعدی به طول ۲۵٫۲ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۱٫۳ متر که بر روی یک شالوده بتنی به ضخامت ۰٫۵ متر قرار گرفته، استفاده شد. در

از جمله پارامترهای کلیدی هستند که در پروسه طراحی یک موج‌شکن باید مورد توجه قرار بگیرد.

هلینگا [۱۵] به بررسی شیب پشتی موج‌شکن تاج کوتاه با یک لایه آرمور مکعبی شکل پرداخت. بررسی‌های وی نشان داد که شیب پشتی موج‌شکن پایدارتر از شیب جلوی موج‌شکن است و می‌توان از آرمورهای مکعبی کوچک‌تری استفاده کرد.

ون در لیم و همکاران [۱۶] طراحی لایه آرمور موج‌شکن *SAL REI* را مورد بررسی قرار دادند. طراحی اولیه برای لایه آرمور شامل آرمور آکروپاد بوده است. لیکن در حین ساخت موج‌شکن و با بروز طوفان، آرمورهای مذکور دچار شکست سازه‌ای شدند. نهایتاً بررسی‌های آنها منجر به انتخاب آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم گردید.

ون گنت و ون در ورف [۱۷] به بررسی عملکرد آرمور مکعبی تک لایه در موج‌شکن تاج بلند برم دار پرداختند. آنها در قسمت زیر برم و در محدوده برم از آرمورهای مکعبی تک لایه استفاده کردند و سپس در تراز بالاتر از برم از آرمور سنگی استفاده کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که هیچگونه خرابی در بخش آرمور بتنی رخ نداده است؛ یعنی عملکرد لایه آرمور بتنی تک لایه بسیار خوب برآورد گردید. همچنین آنها نتیجه گرفتند که استفاده از آرمور بتنی تک لایه در بخش برم و پایین‌تر از آن، باعث می‌شود تا بتوان از آرمورهای سنگی کوچک‌تری در بالای تراز برم استفاده نمود.

سرفراز و پاک [۱۸] و [۱۹] به بررسی پایداری لایه آرمور موج‌شکن تاج کوتاه با استفاده از ترکیب دو روش عددی لاگرانژی و مستقل از شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار (*SPH*) و اجزای مجزا (*DEM*) به ترتیب برای محاسبه نیروهای وارد بر قطعات آرمور از سوی امواج و بررسی پایداری قطعات، پرداختند. آنها تلاش کردند تا یک رابطه طراحی مناسب برای طراحی لایه آرمور موج‌شکن تاج کوتاه ارائه کنند. بررسی‌های آنها نشان داد که کمترین نیروی ناشی از موج به آرمورهای مکعبی در پنجه موج‌شکن وارد می‌گردد. همچنین بیشترین نیروی ناشی از موج در تراز سطح آب وارد می‌شود.

آرجنت و همکاران [۲۰] به بررسی پایداری لایه آرمور در موج‌شکن‌های با روگذری موج پرداختند. بررسی آنها بر روی موج‌شکن‌های متوسط تا تاج کوتاه انجام گرفت. آنها به بررسی و مقایسه رفتار آرمور مکعبی و سنگی دو لایه و آرمور کیوبی پاد تک لایه پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که آرمور مکعبی دو لایه نسبت به آرمور سنگی دو لایه دارای پایداری هیدرولیکی بیشتری است.

در هر بار آزمایش تعداد ۱۰۰۰ موج به بدنه موج شکن تابانده شد. امواج نامنظم براساس طیف *JONSWAP* تولید گردید.

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در بررسی رفتار بلوک‌های بتنی در لایه آرمور، میزان اصطکاک موجود بین آرمورها است. به منظور کاهش و حذف اثر زبری سطح آرمور بر پایداری لایه آرمور، سطح تمام آرمورها با استفاده از رنگ‌های مقاوم در برابر آب رنگ‌آمیزی گردید.

یکی دیگر از نکات قابل توجه در آزمایشگاه که در بررسی پایداری لایه آرمور مؤثر است، اختلاف وزن مخصوص آب شیرین و شور است. هیوز [۳۸] این موضوع را با در نظر گرفتن تفاوت وزن مخصوص آب شور و شیرین در وزن قطعات آرمور در نظر گرفته است. برای این منظور وزن قطعه آرمور در مدل‌سازی آزمایشگاهی براساس رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w}\right)_m \quad (1)$$

که ρ_w وزن مخصوص آب، ρ_a وزن مخصوص آرمور، ρ_m مربوط به نتایج آزمایشگاه و ρ_p مربوط به نتایج کارهای واقعی است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته از آب شیرین با وزن مخصوص برابر ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد.

پس از انجام آزمایش‌ها و بدست آمدن نتایج، به منظور امکان مقایسه بین نتایج آزمایش‌های مختلف دو پارامتر بی‌بعد N_s و R_c/D_{n50} به شرح معادله (۲) و (۴) در نظر گرفته شد.

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}} \quad (2)$$

که N_s عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور، D_{n50} قطر متوسط آرمورها که برابر ۳۵ میلیمتر، H ارتفاع موج خرابی و Δ برابر با معادله (۳) است.

$$\Delta = \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w} = \frac{2346 - 997}{997} = 1.353 \quad (3)$$

برای محاسبه پارامتر بی‌بعد R_c/D_{n50} از رابطه (۴) استفاده می‌گردد.

$$R_c/D_{n50} = \frac{L - h}{D_{n50}} \quad (4)$$

که L ارتفاع موج شکن و برابر ۳۷۰ میلیمتر، h عمق آب پای موج شکن که برابر پنج مقدار ۳۳۰، ۳۵۰، ۳۷۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در بخش تحلیل‌های مربوط به نتایج آزمایش‌ها از دو پارامتر بی‌بعد مذکور استفاده می‌شود.

لوزادا و همکارانش [۲۴] سه معیار خرابی که به صورت بصری قابل اندازه‌گیری است را ارائه نمودند. معیارهای خرابی آنها به صورت معیار شروع خسارت (Initiation of Damage)، خرابی

یک سوی کانال موج ساز و در انتهای دیگر کانال، دیواره‌ی بتنی قرار گرفته است. مولد موج ساز مورد استفاده در آزمایشگاه، از نوع پیستونی می‌باشد. این موج ساز قادر است امواج منظم و نامنظم را تولید کند. دامنه‌ی جابجایی تخته‌ی مولد موج در این مولد از ۱۲- تا ۱۲+ سانتیمتر پیش بینی شده است. پرپود امواج منظم قابل تولید توسط دستگاه بین ۰.۵ تا ۶ ثانیه و پرپود امواج نامنظم قابل تولید بین ۰.۵ تا ۵ ثانیه است. این دستگاه قابلیت تولید امواج با ارتفاع حداکثر ۲۵ سانتیمتر را دارد. به منظور اندازه‌گیری ارتفاع موج پای سازه از سنسورهای ابزار دقیق نوع Resistance wave gauge استفاده شده است. این سنسورها ولتاژی می‌باشند و با اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ آب بین دو سیم موازی، مقدار تراز آب را در هر لحظه ثبت می‌کنند. خطای اندازه‌گیری سنسورهای مذکور برابر ۰.۱ میلیمتر می‌باشد. همچنین این سنسورها در هر ثانیه ۵۰ داده برداشت می‌کنند.

در فلوم آزمایشگاه به منظور مدل‌سازی شیب بستر دریا در محدوده نزدیک ساحل، یک شیب کلی برابر ۱ به ۱۰ در کف فلوم اجرا گردید. وجود این شیب باعث می‌شود تا امواج با نزدیک شدن به موج شکن دچار شکست شوند. در تمام آزمایش‌ها ارتفاع موج شکن برابر با ۳۷ سانتیمتر در نظر گرفته شد. آرمورهای مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع مکعبی با طول ضلع ۳.۵ سانتیمتر بود. وزن مخصوص بتن ساخته شده برای آرمورها حدود ۲۳۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد، در نتیجه وزن هر آرمور حدود ۱۰۰ گرم با بازه تغییرات ۲ گرم می‌شود. با توجه به اینکه هدف انجام آزمایش‌ها، بررسی پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در موج شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق است، لذا ارتفاع آب در پای موج شکن در تراز ۰.۳۳۰، ۰.۳۵۰، ۰.۳۷۰، ۰.۳۹۰ و ۰.۴۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در این صورت در دو حالت از آزمایش‌ها تراز تاج موج شکن بالاتر از تراز آب و در ۲ حالت دیگر تراز تاج موج شکن پایین‌تر از تراز آب (به صورت مستغرق) است. در یک حالت نیز تراز تاج برابر با تراز آب در نظر گرفته شد. محققین [۲۷] یک محدوده تغییرات برای فرکانس و پرپود امواج ارائه کردند. بر این اساس محدوده تغییرات پرپود موج بین مقادیر ۰.۱ تا ۲۰ ثانیه ارائه شده است. امواج با پرپود کم دارای ارتفاع موج کمتر می‌باشند و در مقابل پرپودهای بالا باعث ایجاد موج با ارتفاع بیشتر می‌گردد. بررسی‌های آماری صورت گرفته بر روی طوفان‌های مختلف مخصوصاً در منطقه خلیج فارس نشان می‌دهد که عمده پرپود امواج در طوفان‌های مهم بین مقدار ۵ تا ۱۵ ثانیه متغیر بوده است. لذا پرپود امواج واقعی برای شبیه‌سازی در آزمایشگاه برابر ۰.۷، ۱.۱ و ۱.۳ ثانیه در نظر گرفته شد.

جهت اندازه‌گیری مشخصات موج تولید شده در فلوم آزمایشگاه، از سه سنسور در پای موج شکن استفاده شد. همچنین

حرکت بعدی موج ساز به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد تا موج تولید شده دارای مشخصات مشابه با موج اول باشد. این روند تا پایان هر آزمایش بارها و بارها تکرار می‌گردد.

به منظور ثبت داده‌های آزمایش‌ها، سه دوربین در سه جهت مختلف از موج‌شکن قرار داده شد. دوربین اول که در جلو و بالای تراز آب است، وظیفه ثبت حرکت آرمورها در شیب جلویی موج‌شکن و تاج آن را بر عهده دارد. دوربین شماره دو در پشت موج‌شکن وظیفه ثبت حرکت آرمورهای موجود در شیب پشتی موج‌شکن و تاج آن را دارد. دوربین سوم که در خارج از فلوم قرار دارد، به‌گونه‌ای تنظیم گردید که حرکت امواج و بدنه موج‌شکن از بیرون فلوم ثبت نماید. دوربین شماره ۳ به منظور ثبت تغییرشکل‌های احتمالی در بدنه موج‌شکن و لایه آرمور در نظر گرفته شد.

۴. نتایج و بحث

عملکرد آرمور مکعبی شکل در موج‌شکن‌های تاج بلند به صورت دو لایه و تک لایه توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تنها برای حالت استفاده از آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم توسط [۲۰] انجام شده است. استفاده از آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برای موج‌شکن تاج کوتاه مورد بررسی قرار نگرفته است [۱]. به صورت یک جمع‌بندی می‌توان گفت که بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم در موج‌شکن‌های تاج بلند و تاج کوتاه انجام شده است. بررسی رفتار آرمور مکعبی تک لایه با چیدمان منظم تنها در موج‌شکن تاج بلند انجام شده است. بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم و همچنین آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق پرداخته شده است. تعداد آزمایش‌های انجام شده بر روی حالت‌های مختلف ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده است. تمام آزمایش‌ها بر روی موج‌شکن با شیب بدنه 1.0V-1.5H، عرض تاج برابر $5D_{n50}$ و تراکم چیدمان ۰.۷ انجام گرفت.

جدول (۱). تعداد آزمایش مدل‌سازی شده در آزمایشگاه

ردیف	چیدمان	تعداد لایه	تعداد آزمایش
۱	چیدمان نامنظم	۲	۴۲
۲	چیدمان منظم	۱	۶۰

ایری برن (Iribarren's damage) و تخریب کامل (Destruction) در نظر گرفته شد. معیار خرابی در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر معیار شروع خسارت است. این سطح خرابی شرایطی که تعداد مشخصی از قطعات آرمور از موقعیت اولیه خود حرکت کرده و به اندازه حداقل قطر آرمور جابه‌جا شده است را بیان می‌کند.

با توجه به اینکه سنسورها از نوع ولتاژی می‌باشد، قبل از انجام آزمایش‌ها بایستی سنسورها کالیبره گردد. برای اندازه‌گیری ارتفاع موج تعداد سه سنسور مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۱) موقعیت شماتیک قرارگیری سنسورها قبل از موج‌شکن نشان داده شده است. موقعیت قرارگیری سنسورها نسبت به موج‌شکن براساس روابط منسارد [۳۹] انجام گرفت. رابطه پیشنهادی به شرح رابطه ۵ و ۶ می‌باشد.

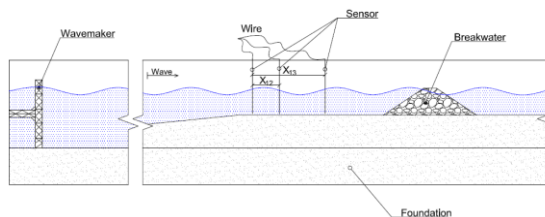
$$X_{12} = L_P/10 \quad (5)$$

$$L_P/6 < X_{13} < L_P/3, X_{13} \neq L_P/5, X_{13} \neq 3L_P/10 \quad (6)$$

X_{12} فاصله بین سنسور شماره ۱ و ۲، X_{13} فاصله بین سنسور ۱ و ۳ و L_P طول موج است. براساس عمق آب در پای موج‌شکن، طول موج در پریودهای مختلف متفاوت است و براساس رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$L_P = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(2\pi d/L_P) \quad (7)$$

d عمق آب در محل محاسبه طول موج و T پریود موج است. رابطه فوق بایستی به صورت سعی و خطا محاسبه گردد تا طول موج برای هر پریود موج و ارتفاع آب مشخص در پای موج‌شکن تعیین گردد.

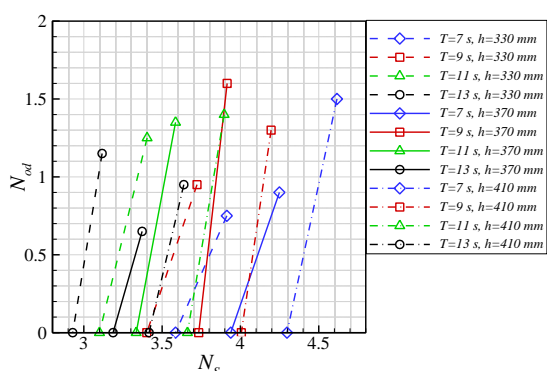


شکل (۱). نمایش مقطع شماتیک موج‌شکن و محل نصب سنسورها در فلوم موج ساز

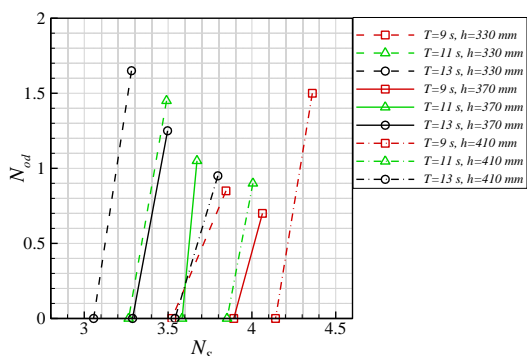
یکی دیگر از نکات حائز اهمیت در مدل‌سازی موج‌شکن‌ها در فلوم، موضوع امواج برگشتی از موج‌شکن در اثر برخورد موج اولیه می‌باشد. سیستم دستگاه موج ساز بکار رفته در آزمایش‌های صورت گرفته دارای یک سیستم اکتیو برای جذب امواج بازتاب شده از بدنه موج‌شکن است. روش کلی کارکرد آن بدین صورت است که پس از بازتاب اولین موج برخوردی به بدنه موج‌شکن، ارتفاع موج در محل دستگاه موج ساز توسط یک سنسور قرائت می‌گردد. سپس با انجام برخی محاسبات درون برنامه‌ای، نهایتاً

۳	چیدمان نامنظم	۱	۴۴
---	---------------	---	----

تعریف شده N_{od} در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج ارائه شده برای آزمایش‌های با موج نامنظم و منظم ارائه شده است. آزمایش‌های با مقدار N_{od} بیشتر از صفر و کمتر از ۲ به عنوان آزمایش‌های با خرابی سطح "شروع خرابی" در نظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲٫۹۳ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<2$ برابر ۳٫۱۲ شده است.



الف) موج نامنظم



ب) موج منظم

شکل (۲). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم

در شکل (۳) نیز نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل دو لایه در ارتفاع آب‌های مختلف در پای موج‌شکن (۳۳۰، ۳۷۰، ۴۱۰ میلی‌متر) و پیوند امواج برابر ۱٫۲۷۸، ۱٫۶۴۳، ۲٫۰۰۸ و ۲٫۳۷۳ در آزمایشگاه ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۳) مشخص می‌گردد، با افزایش ارتفاع آب در پای موج‌شکن در تمام پیوندهای موج، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی در لایه آرمور افزایش می‌یابد؛ یعنی با مستغرق شدن هر چه بیشتر موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور با افزایش پیوند موج کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که پیوندهای بالاتر امواج دریا به دلیل وارد کردن نیروی موج در زمان

در [۴۰] عنوان شده است که استفاده از معیار خرابی برای انواع آرمور بتنی می‌تواند نامناسب باشد؛ زیرا تعریف یک سطح واحد کار دشواری است. برای آرمورهای بتنی معیار خرابی با پارامتر بی‌بعد N_{od} تعریف می‌شود. پارامتر N_{od} به معنای تعداد آرمور حذف‌شده از لایه آرمور بر عرض آرمور تعریف می‌شود که تعریف دقیق آن برابر است با:

$$N_{od} = \frac{N_o}{B/D_{n50}} \quad (۸)$$

N_o بیانگر تعداد آرمور جابه‌جا شده در لایه آرمور به اندازه حداقل قطر آرمور و B عرض فلوم دو بعدی است. در [۴۰] مقدار N_{od} برای سطح خرابی‌های مختلف لایه آرمور مکعبی شکل مقادیری پیشنهاد شده است. برای سطح "شروع خرابی" مقدار $N_{od}=0.2-0.5$ برای سطح "خرابی متوسط" مقدار $N_{od}=1$ و برای سطح "خرابی کامل لایه" مقدار $N_{od}=2$ ارائه شده است. البته [۴۱] و [۲۹] برای آرمور مکعبی شکل تک لایه در سطح "شروع خرابی" مقدار $N_{od}=0$ و برای سطح "خرابی کامل لایه" مقدار $N_{od}=0.2$ پیشنهاد کردند. به نظر می‌رسد که مقدار $N_{od}=0$ بسیار سختگیرانه است. در [۴۰] بیان شده است که سطح خرابی قابل قبول برای آرمور مکعبی شکل در حالت تک لایه و دو لایه با یکدیگر متفاوت است. لذا مقدار $N_{od}=2$ در آرمور دو لایه مکعبی شکل را معادل با $N_{od}=0.2$ در آرمور تک لایه مکعبی شکل در نظر گرفته است.

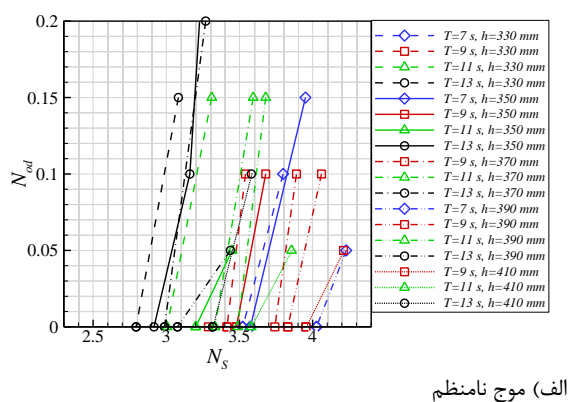
در مقاله حاضر معیار خرابی سطح "شروع خرابی" در نظر گرفته شده است، لذا در تمام آزمایش‌ها، مقدار $N_{od}<0.2$ برای آرمور مکعبی شکل تک لایه و مقدار $N_{od}<2$ برای آرمور مکعبی شکل دو لایه ملاک مقایسه قرار گرفته است.

عرض فلوم آزمایشگاه برابر یک متر است. با توجه به اینکه تمام آزمایش‌ها در تراکم چیدمان برابر ۰٫۷ انجام گرفت، لذا در هر ردیف چیدمان آرمور، تعداد ۲۰ عدد آرمور در نظر گرفته شد؛ بنابراین در حالت آرمور تک لایه با جابه‌جا شدن یک تا چهار آرمور و در حالت آرمور دو لایه با جابه‌جا شدن حداکثر ۴۰ آرمور در هر آزمایش، بیانگر معیار خرابی "شروع خرابی" است.

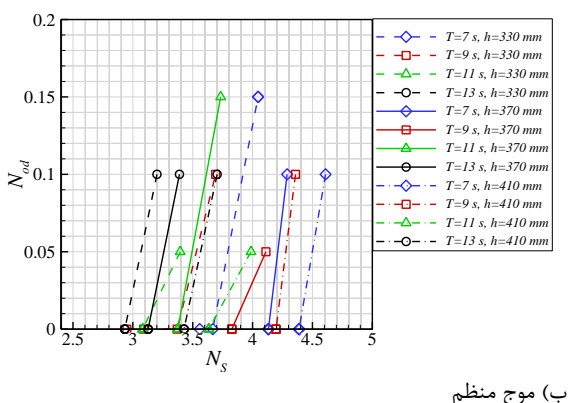
۴-۱. آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم

به منظور بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان دو لایه نامنظم در موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تعداد ۴۲ آزمایش در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. آزمایش‌ها در دو حالت موج منظم و نامنظم انجام گرفت. بررسی خرابی‌های رخ داده در آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم براساس معیار

نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲,۷۹ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<0.2$ برابر ۳,۰۸ شده است.



الف) موج نامنظم



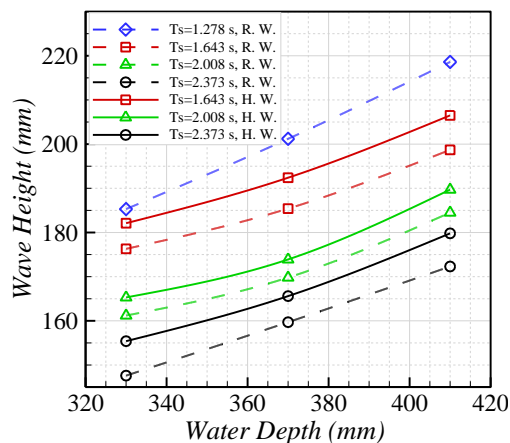
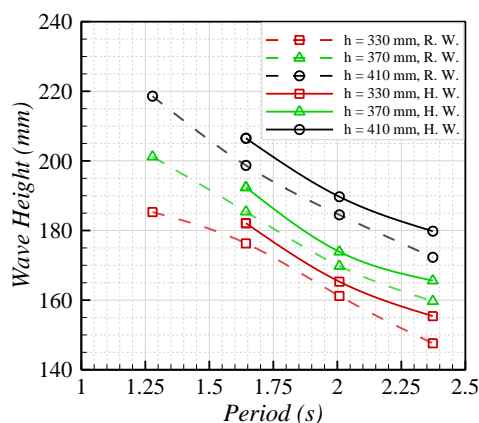
ب) موج منظم

شکل (۴). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم

در شکل (۵) نیز نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه در ارتفاع آب‌های مختلف در پای موج شکن و پیوند امواج برابر ۱,۲۷۸، ۱,۶۴۳، ۲,۰۰۸ و ۲,۳۷۳ در آزمایشگاه ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۵) مشخص می‌گردد، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی با افزایش ارتفاع آب در پای موج شکن افزایش می‌یابد. برعکس با افزایش پیوند امواج (به دلیل وارد شدن نیروی موج در مدت زمان بیشتر) ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.

بیشتر به لایه آرمور می‌توانند مخرب‌تر باشند. این موضوع هم در حالت موج منظم و هم در حالت موج نامنظم مشاهده گردید. بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که همواره عدد پایداری لایه آرمور موج شکن در حالت برخورد موج منظم بیشتر از موج نامنظم است. این بدان معنا است که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.

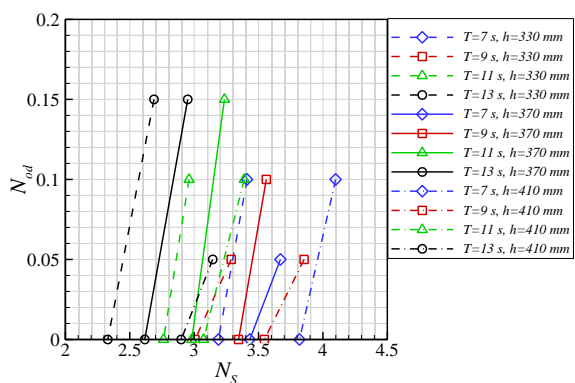


R.W.: موج نامنظم H.W.: موج منظم

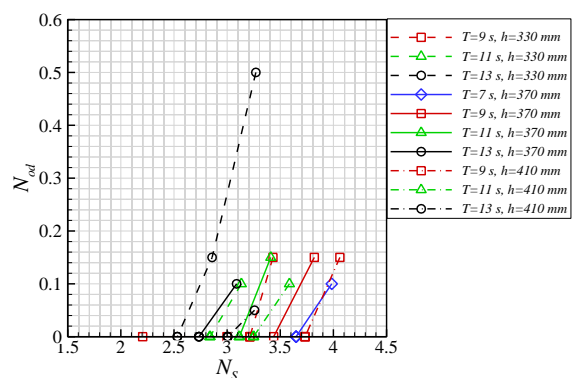
شکل (۳). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی دو لایه با چیدمان نامنظم

۲-۴. آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم

به منظور بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان تک لایه منظم در موج شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق تعداد ۶۰ آزمایش در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. آزمایش‌ها در دو حالت موج منظم و نامنظم انجام گرفت. بررسی خرابی‌های رخ داده در آرمور تک لایه مکعبی شکل با چیدمان منظم براساس معیار تعریف شده N_{od} در شکل (۴) ارائه شده است. آزمایش‌های با مقدار N_{od} بیشتر از صفر و کمتر از ۰,۲ به عنوان آزمایش‌های با سطح شروع خرابی در نظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در



الف) موج نامنظم

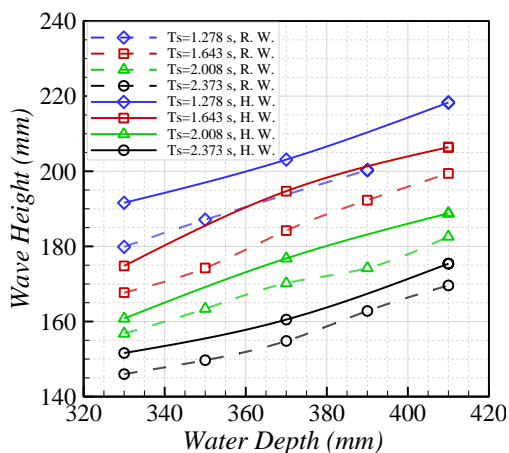
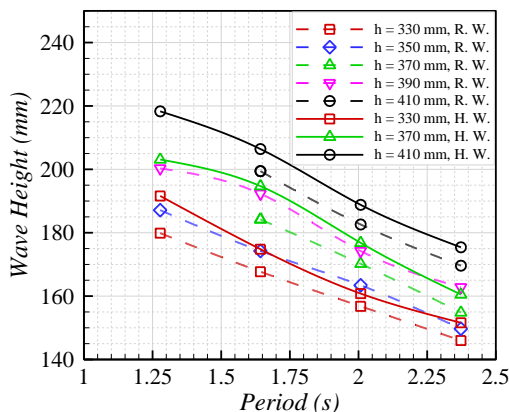


ب) موج منظم

شکل (۶). تغییرات N_{od} برحسب N_s برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم

در شکل (۷) داده‌های خام بدست آمده از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم ارائه شده است.

همانطور که از شکل (۷) مشخص می‌گردد و پیش‌تر نیز بیان شده است، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی با افزایش ارتفاع آب در پای موج شکن افزایش می‌یابد. برعکس با افزایش پریود امواج (به دلیل وارد شدن نیروی موج در مدت زمان بیشتر) ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که امواج نامنظم مخرب‌تر از امواج منظم می‌باشند.



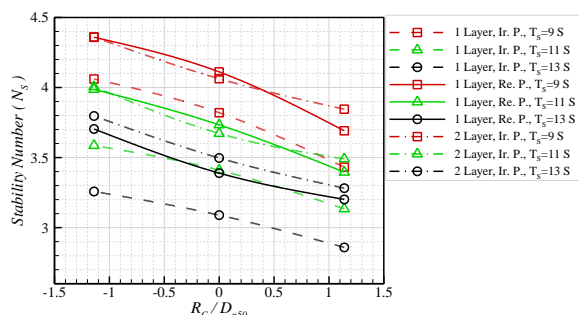
R.W.: موج نامنظم H.W.: موج منظم

شکل (۵). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی تک لایه با چیدمان منظم

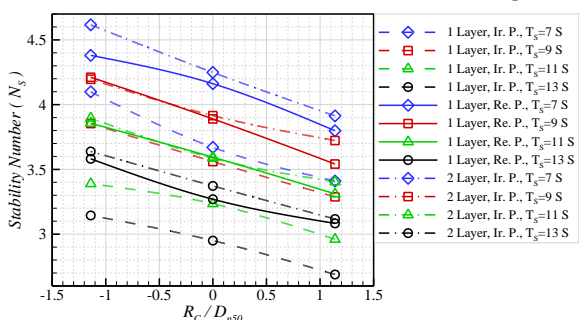
۳-۴. آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم

تعداد ۴۴ آزمایش برای بررسی رفتار آرمور مکعبی شکل در حالت چیدمان تک لایه نامنظم (با امواج منظم و نامنظم) در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. براساس توصیه [۴۰] برای بررسی معیار خرابی لایه آرمور مکعبی شکل از پارامتر بی‌بعد N_{od} استفاده شد. در شکل (۶) نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی امواج منظم و نامنظم در حالت آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) مشخص می‌گردد که حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}=0$ برابر ۲,۳۳ و حداقل عدد پایداری با در نظر گرفتن $N_{od}<0.2$ برابر ۲,۶۷ شده است.

نامنظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم نشان داده شده است.



الف) موج منظم

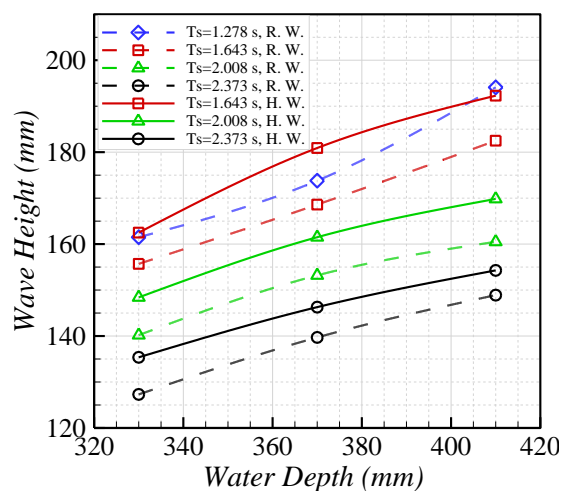
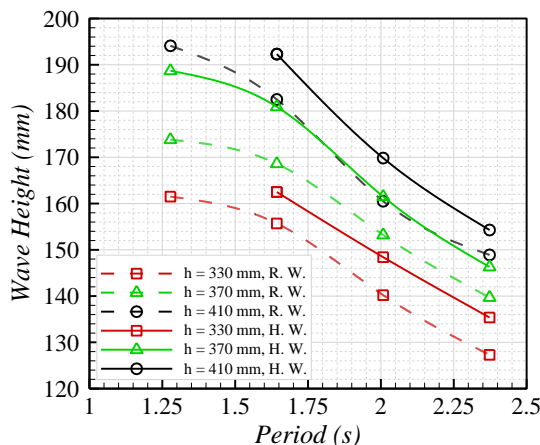


ب) موج نامنظم

شکل (۸). مقایسه نتایج آزمایش‌های بدست آمده برای N_s در مقابل R_c/D_{n50} برای آرمور دو لایه مکعبی نامنظم و آرمور تک لایه مکعبی منظم و نامنظم

همانطور که از نتایج شکل (۸) مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تراز آب در پای موج شکن، پایداری لایه آرمور افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پریود امواج مقدار پایداری لایه آرمور به دلیل برخورد نیروی امواج در مدت زمان بیشتر به لایه آرمور، کاهش می‌یابد. این رفتار در هر سه حالت آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه مکعبی با چیدمان منظم و نامنظم مشاهده می‌گردد.

یکی دیگر از نکات جالب توجه که از شکل (۸) مشاهده می‌گردد این است که در تمام پریودهای مختلف امواج و ترازهای آب متفاوت در پای موج شکن، مقدار عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم از دو حالت دیگر کمتر است. این نشان می‌دهد که چیدمان نامنظم لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه می‌تواند بسیار سست و ناپایدار باشد. در مقابل عدد پایداری هیدرولیکی آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم تقریباً مشابه با آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم است. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که عملکرد آرمور تک لایه با چیدمان منظم مشابه با عملکرد آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم است. البته لازم به ذکر است که رفتار آرمور تک



R.W. موج نامنظم H.W. موج منظم

شکل (۷). نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آرمورهای مکعبی تک لایه با چیدمان نامنظم

۵. نتیجه‌گیری

در بخش قبل نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم و همچنین آرمور تک لایه مکعبی شکل با چیدمان منظم و نامنظم ارائه شد. در این بخش به مقایسه نتایج بدست آمده برای آرمور تک لایه و دو لایه پرداخته می‌شود و عملکرد آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم در برابر آرمور دو لایه مقایسه می‌شود.

یکی دیگر از پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده برای ارائه نتایج و مقایسه آنها با یکدیگر، پارامتر بی‌بعد تیزی موج است. تیزی موج برای هر آزمایش براساس رابطه ۹ محاسبه می‌گردد.

$$S_0 = \frac{2\pi H_s}{gT^2} \quad (9)$$

در شکل (۸) مقایسه مقدار عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور در برابر مقدار بی‌بعد شده ارتفاع آزاد موج شکن برای آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم و

بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که به صورت کلی با افزایش تیزی موج، مقدار پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می‌یابد. این موضوع در هر سه حالت مورد آزمایش (آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم) مشاهده می‌گردد. همچنین با افزایش ارتفاع آزاد موج‌شکن، تیزی موج و در نتیجه عدد پایداری لایه آرمور برای شروع خرابی کاهش می‌یابد. بررسی اثر پارامتر تیزی موج بر پایداری لایه آرمور نشان می‌دهد که در یک تیزی موج یکسان بیشترین پایداری لایه آرمور مربوط به آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج‌شکن برابر ۴۱۰ میلیمتر است. کمترین حالت پایداری نیز مربوط به آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج‌شکن برابر ۳۳۰ میلیمتر است. البته مقدار عدد پایداری تک لایه آرمور منظم بسیار نزدیک به دو لایه نامنظم است. این رفتارها در هر دو حالت آزمایش با موج منظم و موج نامنظم مشاهده گردید.

۶. جمع‌بندی

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار آرمور دو لایه مکعبی شکل با چیدمان نامنظم و آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم و منظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم پرداخته شده است. تمام آزمایش‌ها بر روی موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق با شیب بدنه 1.0V-1.5H و با عرض تاج موج‌شکن برابر $5D_{n50}$ انجام گرفت. تراز آب در پای موج‌شکن ۵ مقدار ۳۳۰، ۳۵۰، ۳۷۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد و ارتفاع موج‌شکن نیز برابر ۳۷۰ میلیمتر بود. تراکم چیدمان لایه آرمور در تمام حالت‌ها برابر ۰,۷ در نظر گرفته شد. در حالت چیدمان آرمور دو لایه، تراکم چیدمان در هر لایه آرمور برابر ۰,۷ در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته به شرح موارد زیر می‌باشد.

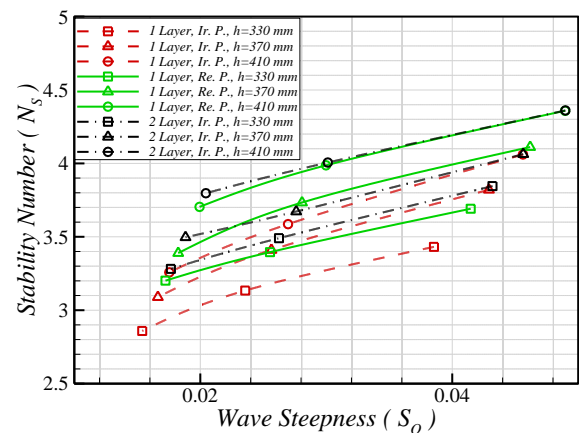
- نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در تمام آزمایش‌ها، با افزایش ارتفاع آب در پای موج‌شکن، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی در لایه آرمور افزایش می‌یابد؛ یعنی با مستغرق شدن هر چه بیشتر موج‌شکن‌های تاج کوتاه و مستغرق، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر در یک شرایط یکسان هر چه موج‌شکن مستغرق‌تر گردد و تراز آب در پای موج‌شکن افزایش یابد، به منظور تأمین پایداری لایه آرمور در برابر موج طراحی، بلوک با قطر کمتر مورد نیاز است.

- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پریود امواج برخوردی به لایه آرمور، ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور کاهش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که امواج دریا با پریودهای بالاتر توانایی تخریب بیشتری نسبت به امواج با پریود

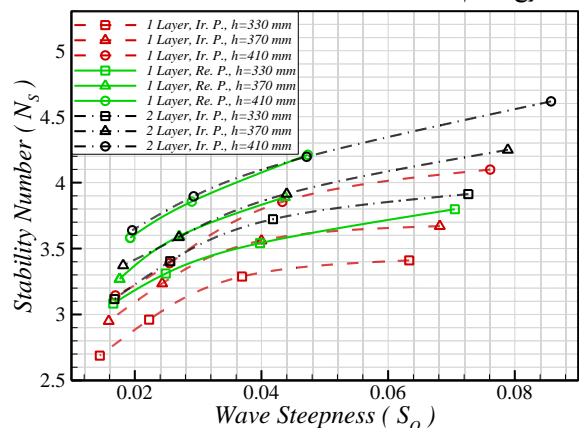
لایه مکعبی با چیدمان منظم بسیار ترد و شکننده است، به گونه‌ای که با جابه‌جا شدن تعداد اندک آرمور از درون لایه آرمور، خرابی کل لایه آرمور رخ می‌دهد. در مقابل آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم دارای انعطاف‌پذیری بیشتری می‌باشد و برای رسیدن به سطح خرابی کل لایه آرمور، تعداد آرمور بسیار بیشتری باید جابه‌جا شوند.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۸)، حداقل عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 2.69$ ، برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برابر $N_s > 3.08$ و برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 3.12$ است.

در شکل (۹) مقایسه مقدار تیزی موج در برابر عدد پایداری برای آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم در دو حالت برخورد موج منظم و نامنظم نشان داده شده است.



الف) موج منظم



ب) موج نامنظم

شکل (۹). نتایج تیزی موج S_o بر اساس N_s برای آرمور دو لایه مکعبی نامنظم و آرمور تک لایه مکعبی منظم و نامنظم

ANDRÉS BREAKWATER (PORT OF MALAGA, SPAIN). Coastal Engineering Proceedings, (33), 6-6.

[4] J. W. Van der Meer. (1988). Stability of cubes, tetrapods and accropode. In Conference Breakwaters88 (pp. 71-80).

[5] J. W. Van der Meer & K. W. Pilarczyk. (1993). Stability of low-crested and reef breakwaters. In Coastal Engineering 1990 (pp. 1375-1388).

[6] J. W. Van der Meer. (1999, June). Design of concrete armour layers. In Proceedings of the coastal structures (Vol. 99, pp. 213-221).

[7] M. R. A. Van Gent, S. E. Plate, E. Berendsen, G. B. H. Spaan, J. W. Van Der Meer & K. d'Angremond. (1999). Single-layer rubble mound breakwaters. In Proc. Coastal Structures (Vol. 99).

[8] A. Van den Bosch, K. D. Angremond, H. Jan Verhagen & J. Olthof. (2003). Influence of the density of placement on the stability of armour layers on breakwaters. In Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums (pp. 1537-1549).

[9] M. E. Gómez-Martín, & J. R. Medina. (2009). Cubipod concrete armour unit and heterogeneous packing. In Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes) (pp. 140-151).

[10] M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2014). Heterogeneous packing and hydraulic stability of cube and Cubipod armor units. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 140(1), 100-108.

[11] J. R. Medina, V. Pardo, J. Molines & M. E. Gómez-Martín. (2014). Armor porosity and hydraulic stability of mound breakwaters. International Conference on Coastal Engineering (ICCE).

[12] J. R. Medina, J. Molines & M. E. Gómez-Martín. (2014). Influence of armour porosity on the hydraulic stability of cube armour layers. Ocean Engineering, 88, 289-297.

[13] H. F. Burcharth & Z. Liu. (1992). Design of Dolos armour units. In Coastal Engineering 1992 (pp. 1053-1066).

[14] J. R. Medina, R. T. Hudspeth & C. Fassardi. (1994). Breakwater armor damage due to wave groups. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 120(2), 179-198.

[15] L. B. Hellinga. (2016). Stability of Single Layer Cubes on Breakwater Rear Slopes.

[16] J. C. Van der Lem, R. J. H. Stive & M. R. A. van Gent. (2016). SAL REI BREAKWATER WITH SINGLE LAYER CUBES.

[17] M.R.A. Van Gent, I.M. van der Werf. (2017). Single layer cubes in a berm. In: SAVE Proc. 8th SCACR Conference on Applied Coastal Research. Santander.

[18] M. Sarfaraz & A. Pak. (2017). An integrated SPH-polyhedral DEM algorithm to investigate hydraulic stability of rock and concrete blocks: Application to cubic armours in breakwaters. Engineering Analysis with Boundary Elements, 84, 1-18.

[19] M. Sarfaraz & A. Pak. (2018). Numerical investigation of the stability of armour units in low-crested breakwaters using combined SPH-Polyhedral DEM method. Journal of Fluids and Structures, 81, 14-35.

[20] G. Argente, M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2018). Hydraulic stability of the armor layer of overtopped breakwaters. Journal of Marine Science and Engineering, 6(4), 143.

[21] Y. Yuksel, E. Çevik, M. van Gent, C. Sahin, M. G. Gultekin & C. Gultekin. (2018). Stability effects of cube armor unit placement configurations in the berm of a breakwater. Coastal Engineering Proceedings, (36), 39-39.

کتر دارند. علت این موضوع می تواند به دلیل وارد شدن انرژی موج در مدت زمان بیشتری به بدنه موج شکن در پروده های بلندتر باشد.

- بررسی اثر نوع موج از نظر منظم و نامنظم بودن بر پایداری لایه آرمور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که ارتفاع موج لازم برای شروع خرابی لایه آرمور در حالت موج منظم بزرگتر از موج نامنظم است.

- نتایج آزمایش های صورت گرفته نشان می دهد که برای سطح معیار خرابی "شروع خرابی" حداقل عدد پایداری هیدرولیکی لایه آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 2.69$ ، برای آرمور مکعبی شکل تک لایه با چیدمان منظم برابر $N_s > 3.08$ و برای آرمور مکعبی شکل دو لایه با چیدمان نامنظم برابر $N_s > 3.12$ است. این بررسی به خوبی نشان می دهد که آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم ضعیف تر از آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و آرمور تک لایه با چیدمان منظم است. همچنین می توان نتیجه گرفت که رفتار آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم مشابه آرمور تک لایه با چیدمان منظم است.

- به صورت کلی با افزایش تیزی موج، مقدار پایداری هیدرولیکی لایه آرمور افزایش می یابد. این موضوع در هر سه حالت مورد آزمایش (آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم، آرمور تک لایه با چیدمان منظم و نامنظم) مشاهده می گردد. همچنین با افزایش ارتفاع آزاد موج شکن تیزی موج و در نتیجه عدد پایداری لایه آرمور برای شروع خرابی کاهش می یابد.

- بررسی اثر پارامتر تیزی موج بر پایداری لایه آرمور نشان می دهد که در یک تیزی موج یکسان بیشترین پایداری لایه آرمور مربوط به آرمور دو لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج شکن برابر ۴۱۰ میلی متر است. کمترین حالت پایداری نیز مربوط به آرمور تک لایه با چیدمان نامنظم و در حالت تراز آب در پای موج شکن برابر ۳۳۰ میلی متر است. البته مقدار عدد پایداری تک لایه آرمور منظم بسیار نزدیک به دو لایه نامنظم است. این رفتارها در هر دو حالت آزمایش با موج منظم و موج نامنظم مشاهده گردید.

۷. مراجع

[1] F. Vieira, F. Taveira-Pinto & P. Rosa-Santos. (2020). Single-layer cube armoured breakwaters: Critical review and technical challenges. Ocean Engineering, 216, 108042.

[2] M. R. Van Gent & L. Luis. (2013). Application of Cubes in a single layer. In Proc. 6th SCAR-International Short Course/Conference on Applied Coastal Research.

[3] A. Corredor, M. Santos, M. E. Gómez-Martín & J. R. Medina. (2012). PLACEMENT OF CUBIPOD ARMOR UNITS IN SAN

- [31] M. R. van Gent. (2014). Oblique wave attack on rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 88, 43-54.
- [32] G. Wolters & M. Van Gent. (2011). Oblique wave attack on cube and rock armoured rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 34-34.
- [33] L. I. P. Almeida. (2013). Experimental evaluation of the behaviour of rubble mound breakwaters with a single layer of cubic blocks. PhD diss .
- [34] R. Triemstra. (2000). The use of high-density concrete in the armour layer of breakwaters.
- [35] R. V. Van Buchem. (2009). Stability of a single top layer of cubes .
- [36] J. R. Medina, M. E. Gómez-Martín, & A. Corredor. (2010). Influence of armor unit placement on armor porosity and hydraulic stability. In *Proc. 32nd Int. Conf. on Coastal Engineering*.
- [37] L. H. Holthuijsen, "Waves in Oceanic and Coastal Waters: Cambridge Univ. Press, 387 p ".(2007).
- [38] S. A. Hughes. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering (Vol. 7). World Scientific.
- [39] E. P. D. Mansard, and E.R. Funke, 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering Proceedings* 17.
- [40] C. Ciria. (2007). *Cetmef (2007)-the rock manual. the use of rock in hydraulic engineering. Publicação, (C683)*.
- [41] K. d'Angremond, E. Berendsen, G. S. Bhageloe, M. R. A. Van Gent & J. W. Van der Meer. (1999). Breakwaters with a single armour layer. In *Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries* (pp. 1441-1449).
- [22] Á. Campos, C. Castillo & R. Molina-Sanchez. (2020). Damage in rubble mound breakwaters. Part I: Historical review of damage models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 317.
- [23] A. Campos, R. Molina-Sanchez & C. Castillo. (2020). Damage in rubble mound breakwaters. Part II: Review of the definition, parameterization, and measurement of damage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 306.
- [24] M. A. Losada, J. M. Desire & L. M. Alejo. (1986). Stability of blocks as breakwater armor units. *Journal of Structural Engineering*, 112(11), 2392-2401.
- [25] C. Vidal, M. A. Losada & R. Medina. (1991). Stability of mound breakwater's head and trunk. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 117(6), 570-587.
- [26] E. Maciñeira & H. F. Burcharth. (2009). New formula for stability of cube armoured roundheads. In *Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes)* (pp. 31-40).
- [27] E. G. Maciñeira & H. F. Burcharth. (2016). Stability of cube armoured roundheads exposed to long crested and short crested waves. *Coastal Engineering*, 112, 99-112.
- [28] M. R. A. Van Gent & G. B. H. Spaan. (1998). Breakwaters with a single layer of Cubes. *Delft Hydraulics report H*, 3387.
- [29] M. R. A. Van Gent, K. D'Angremond & R. Triemstra. (2002). Rubble mound breakwaters: Single armour layers and high-density concrete units. In *Breakwaters, coastal structures and coastlines: Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK on 26-28 September 2001* (pp. 307-318). Thomas Telford Publishing.
- [30] M. R. Van Gent. (2003). Recent developments in the conceptual design of rubble mound breakwaters. *COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka*.

فرآیند طراحی بهینه سازه‌های فولادی به کمک الگوریتم‌های هوش مصنوعی: نمونه موردی

بیمارستان آموزشی - درمانی الزهرا تبریز

آرش رهگذر^{۱*}، مجید کیانی^۲

^۱ پژوهشگر دکتری پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر ارائه الگوریتمی با استفاده از محاسبات هوش مصنوعی برای اکتان کلیه الزامات آیین‌نامه‌های استاندارد ۲۸۰۰، مبحث ۱۰ و مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان با تأمین حداقل وزن سازه می‌باشد. در ادبیات فنی کنترل قیود و طراحی بهینه قاب‌های خمشی فولادی به صورت دو بعدی و فقط با الگوریتم‌های کلاسیک انجام شده بود. یکی از مهمترین دستاوردهای این تحقیق تکمیل قیود جدید آیین‌نامه‌ای برای اکتان تمام قیود و طراحی بهینه انواع پر کاربرد سازه‌های فولادی کوتاه و میان مرتبه است. ضوابط و قیود آیین‌نامه‌ای لازم برای سه نوع سازه فولادی پر استفاده کشور شامل: (۱) قاب‌های دارای دیوار برشی و (۲) قاب‌های مهاربندی و (۳) قاب‌های خمشی دوگانه با دیوار برشی پیاده‌سازی شد. نتایج این الگوریتم با پروژه بیمارستان الزهرا تبریز صحت‌سنجی شد. از نتایج ارزشمند کار، تسهیل فرآیند کنترل و طراحی ایمن ساخت اسکلت فلزی با ارائه یک پنل گرافیکی برای ورودی مدل و نمایش تمامی نتایج مهم سازه در قالب متن و گراف می‌باشد. فرآیند کار به صورت هوشمند برنامه‌ریزی شده تا تنها با ورودی یک فایل استاندارد ETABS در الگوریتم روند طراحی لرزه‌ای بهینه به صورت اتوماتیک انجام شود. در فایل ETABS، برای هر گروه طراحی مقاطع به شکل لیست تعریف شده است تا الگوریتم هوش مصنوعی بهترین آرایش مقطع را انتخاب کند. برای سه نمونه سازه‌ای و پروژه بیمارستان الزهرا تبریز نشان داده شد که در کنار ایمن‌سازی طراحی می‌توان صرفه‌جویی زیادی روی وزن فولاد داشت.

کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، طراحی لرزه‌ای بهینه، سازه‌های فولادی، پروژه بیمارستانی اجرا شده

۱. مقدمه

کامپیوترها با نرم‌افزارهایی نظیر ETABS، SAP2000 و SAFE که موجب افزایش سرعت تحلیل‌ها شده است. در حال حاضر فناوری هوش مصنوعی در رشته‌های مهندسی پر کاربرد تا نقیصه‌های این نرم‌افزارها را به صورت هوشمند پوشش بدهد و امکان رسیدن به طراحی کامل را با سرعت خیلی بیشتری انجام بدهد. هدف این پژوهش، به کارگیری هوش مصنوعی در فرآیند یادگیری هوشمند، پیاده‌سازی کلیه الزامات و قیود لرزه‌ای آیین‌نامه متناسب با انواع سازه‌های فولادی رایج در کشور و بهینه‌سازی آن به کمک روش‌های محاسبات نرم است.

برای این منظور از «الگوریتم» استفاده می‌شود. الگوریتم فرآیندی برای حل یک مسئله پیچیده، تقسیم آن مسئله به مراحل ساده‌تر و یافتن پاسخ مناسب است. علاوه بر این «هوش مصنوعی» علمی است که از فناوری‌های مختلفی مانند منطق

در طراحی مهندسی ساختمان‌های فولادی، طراحی کامل است که کلیه الزامات آیین‌نامه‌ای به صورت کامل کنترل گردد بطوری که ملاحظات اجرایی نهایی در نظر گرفته شود و از کمترین وزن مصالح فولاد استفاده شده باشد. انجام این طراحی کامل برای یک طراح مجهز به کامپیوتر کاری بسیار زمان‌بر و غیرممکن خواهد بود از این جهت که: (۱) فقط با توان و زمان محدودی می‌تواند کار کند، (۲) خطای خستگی انسان و کنار گذاشتن الزامات تعدادی از قیود آیین‌نامه ایران و (۳) پیچیدگی سازه‌های مربوط به تأثیرپذیری کل سازه با تغییر عضو آن، مانع رسیدن به چنین طرح کاملی می‌شود. از طرفی کنار گذاشتن کنترل برخی از قیود آیین‌نامه می‌تواند منجر به نایمن شدن طرح شود؛ بنابراین بعد از آمدن فناوری طراحی ساختمان در

مجموعه فازی، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های تکاملی تشکیل شده است [۱]. الگوریتم‌های هوش مصنوعی با استفاده از کامپیوتر و الگویی از طبیعت و هوش انسانی به شناخت رفتار سیستم‌های پیچیده و ارزیابی مسائل مهندسی می‌پردازد [۲]. سیستم‌های پیچیده، سیستم‌هایی هستند که در محاسبات عددی راه‌حل تحلیلی برای آن‌ها غیرممکن است و برای حل آن‌ها به جای محاسبات سخت از الگوریتم‌های محاسبات نرم استفاده می‌شود. محاسبات نرم راه‌حل‌های کاملاً منعطفی ارائه می‌دهد تا مسائل را با تعامل بین عدم دقت و عدم قطعیت مبتنی بر محاسبات فازی حل کنند. نمونه‌ای از محاسبات عددی نرم پیش‌بینی تغییر شکل دیوار تحت بار نامعین انفجار با روندی سعی و خطایی می‌باشد در حالی که در طرف مقابل محاسبات عددی سخت از روابط تحلیلی معین برای مثلاً محاسبه خیز تیرها است، استفاده می‌کنند [۳]. به کمک این الگوریتم‌ها می‌توان طیف گسترده‌ای از مسائل پیچیده نامعین را در حوزه‌های مهندسی سازه، بهینه‌سازی و طراحی قابلیت اطمینان و ایمن ساختمان‌ها پیاده‌سازی کرد. در ادامه، ادبیات فنی کاربرد الگوریتم‌های تکاملی تشریح می‌گردد که زیرمجموعه‌ای از محاسبات نرم می‌باشد.

در ادبیات فنی، بیشتر کارهای تحقیقاتی محدود به نمونه‌های دو بعدی ساده و یا تعدادی محدود نمونه سه‌بعدی بدون بستر هوش مصنوعی جامعی برای هوشمندسازی طراحی هر نوع سازه فولادی بوده است. اولین الگوریتم بهینه‌سازی در سال ۲۰۰۲ به کمک روش شبیه‌سازی تبرید (SA) در طراحی یک قاب فولادی دوبعدی به کمک مجموعه‌ای از کامپیوترها به دلیل ضعف پردازشگرهای آن زمان انجام شده بود [۴]. در سال ۲۰۰۹ محققین تعدادی الگوریتم برای حل سریع‌تری و کاهش حجم محاسبات بهینه‌سازی سازه‌های فولادی دو بعدی با تنها دو قید آیین‌نامه‌ای دریافت و نسبت تنش بررسی گردید که نهایتاً الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با عملکرد بهتری پیشنهاد شد. همچنین در سال ۲۰۰۹ قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی برش پایه قاب‌های خمشی و مهاربندی دوبعدی استفاده شد. در سال ۲۰۱۱ محققین با ترکیب الگوریتم انتقال موجک (WT) و ANN به بهینه‌سازی دو قاب فولادی

^۸ Ordinary moment frames

^۹ Intermediate moment frames

^{۱۰} Special moment frames

^{۱۱} Response spectrum analysis

^{۱۲} Colliding bodies optimization

^{۱۳} MATLAB nonlinear optimization function

^{۱۴} Multi-objective uniform damage optimization

^۱ Particle swarm optimization

^۲ Artificial neural network

^۳ Wavelet transform

^۴ Charged system search

^۵ Ant colony optimization

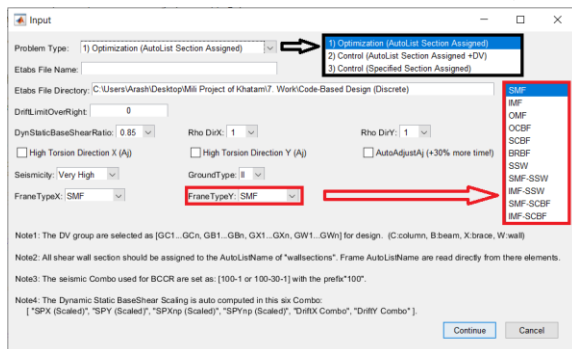
^۶ Harmony search

^۷ Tabu search

پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی به زبان برنامه نویسی MATLAB نوشته شده است و با استفاده از رابط API با نرم‌افزار تحلیل و طراحی ETABS رابطه برقرار می‌کند. در تحلیل سازه‌ها از تحلیل دینامیک طیفی (RSA) برای پوشش طیف وسیعی از سازه‌های سه‌بعدی فولادی استفاده گردید. بخش اول الگوریتم به یادگیری دانش اولیه مسئله شامل: ورودی پنل گرافیکی، مشخصات هندسی و مصالح سازه، لیست گروه‌بندی‌های (برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها و دیوارهای برشی) و لیست مقاطع موجود می‌پردازد. در بخش دوم الگوریتم به برنامه‌ریزی و شبکه‌سازی دانش اولیه و نیز اختصاص الزامات و قیود مربوط با هر سیستم لرزه‌ای می‌پردازد. در بخش سوم الگوریتم با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به جستجوی دانش جدید برای یافتن کامل‌ترین طراحی بهینه می‌پردازد. در ادامه به تشریح این سه بخش می‌پردازیم.

۴-۱. پنل گرافیکی ورودی دانش و اطلاعات اولیه

بخشی از دانش اولیه هر مسئله برای الگوریتم هوش مصنوعی از طریق پنل گرافیکی شکل (۱) تعریف می‌شود. این بخش از دانش اولیه شامل انتخاب نوع کار (کنترل مقطع مشخص، کنترل لیست، بهینه‌سازی)، آدرس و اسم فایل ETABS، ضریب نامعینی، محدودیت دلخواه در یافتن، ضریب هم‌پایه‌سازی دینامیکی، سطح لرزه خیزی، اعمال خودکار نامنظمی و نوع سیستم لرزه‌ای در دو جهت X و Y است.



شکل (۱). پنل گرافیکی ورودی پلتفرم و انتخاب پارامترهای ورودی.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مرجع قابل قبول طراحی ساختمان‌ها توسط نظام مهندسی کشور و اکثر طراحان از نرم‌افزار ETABS استفاده می‌کنند، از فایل مدل ETABS به عنوان ورودی الگوریتم گرفته می‌شود. سایر دانش اولیه مسئله به صورت مستقیم از نرم‌افزار ETABS اخذ می‌شود این اطلاعات شامل: تعداد طبقات، لیست مقاطع هر گروه، مصالح، تعداد

استفاده گردید و به ترتیب الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم گرادیانی (fmincon) بهترین عملکرد را داشتن [۱۲]. با نگاهی به مرور ادبیات انجام شده فقط به مقایسه انواع الگوریتم‌های تکاملی تحت تعدادی قیود محدود پرداخته شد و از پلتفرم هوش مصنوعی برای درک و بهینه‌سازی انواع سیستم‌های لرزه‌ای فولادی با قیود متفاوت استفاده نشده است. این پژوهش به رفع این شکاف تحقیقاتی برای سازه‌های سه‌بعدی فولادی می‌پردازد که قیود آن در بخش ۶ آمده است.

در ادامه، ابتدا بیان مسئله ارائه گردید و سپس، روش تحقیق، سؤال و فرضیه‌های تحقیق آمده و بعد از آن به معرفی پلتفرم هوش مصنوعی پرداخته شد. نهایتاً سه نمونه سازه‌ای با این پلتفرم بطور ایمن بهینه گردیده و در پایان با پروژه بیمارستان الزهرا تبریز صحت‌سنجی شد.

۲. روش پژوهش

ابتدا کارکرد پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی بررسی شده معرفی می‌گردد که به چه روشی فایل ETABS یک سازه فولادی را دریافت، ارزیابی و سپس آن را بهینه‌سازی می‌کند. بعد از آن به اختصار فرآیند جامع کنترل تمام قیود آیین‌نامه‌ای برای انواع سیستم‌های لرزه‌ای تشریح می‌شود. سپس بهینه‌سازی سه نمونه سازه‌ای سه‌بعدی نامنظم در پلان و ارتفاع که به ترتیب از نوع سیستم لرزه‌ای: (۱) قاب مهاربندی، (۲) قاب ساده با دیوار برشی و (۳) سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی ارزیابی می‌گردد. در این ارزیابی از سه الگوریتم تکاملی شامل: جستجوی هارمونی (HS)، ازدحام ذرات (PSO)، ژنتیک (GA) و یک الگوریتم گرادیانی (fmincon) استفاده شد. نهایتاً الگوریتم هوش مصنوعی با پروژه بیمارستان الزهرا تبریز صحت‌سنجی شده است.

۳. سوالات و فرضیه‌های پژوهش

چه ویژگی‌هایی باید فایل ETABS ورودی به این پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی داشته باشد؟ آیا تمام الزامات به درستی اکتفا می‌شوند؟ کدام الگوریتم تکاملی عملکرد بالاتری در رسیدن به جواب بهینه را داشته است؟ چه میزان صرفه‌جویی اقتصادی برای هر نوع سیستم لرزه‌ای ایجاد شده است؟ در پژوهش پاسخ به این سوالات با نمونه‌هایی کاربردی پاسخ داده می‌شوند.

۴. معرفی پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی

فولادی رایج کشور استفاده گردد. این الگوریتم‌های در برنامه MATLAB روزرسانی شدند تا بتوانند مسائل پیچیده را بهینه‌سازی کنند. عملکرد آن‌ها در نمونه‌های پیش رو بررسی خواهد شد.

۵. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی و کنترل الزامات و قیود

سازه‌های ورودی مسئله، تحت بارگذاری‌های مندرج در مبحث ۶ [۱۳] مقررات ملی ساختمان و الزامات و قیود استاندارد ۲۸۰۰ [۱۴] و مبحث ۱۰ سال ۱۴۰۱ [۱۵] تحلیل و طراحی خواهد شد. شایان به ذکر است، بهینه‌سازی روی مدل سه‌بعدی به کمک الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB و تحلیل دینامیک طیفی (RSA) در نرم‌افزار ETABS انجام می‌شود. هدف از طراحی بهینه، بهینه‌سازی وزن اصلی سازه (W_{igt0}) و اقلان شرایط هر کدام از الزامات آیین‌نامه‌ای ($g_i = Demand_i / Capacity_i$) می‌باشد. در صورت تجاوز حدود هر کدام از قیود مسئله، تابع جریمه (PF) آن به صورت تجمعی به کمک رابطه (۱) محاسبه شده است و این جریمه به کمک رابطه (۲) در وزن اصلی سازه ضرب می‌شود تا وزن جریمه‌دار سازه (W_{igtPT}) حاصل شود.

$$PF = \prod_{j=1}^k (\max\{g_j, 0\} + 1) \quad (1)$$

$$Weight_{PT} = \begin{cases} Weight_0 & ; \text{ if } PF = 1 \\ Weight_0 \times 2^{PF}; & \text{elseif } PF > 1 \end{cases} \quad (2)$$

در ادامه به فرآیند جامع کنترل الزامات و قیود آیین‌نامه به طور مختصر پرداخته می‌شود:

گام (۱) کنترل شکل‌پذیری لرزه‌ای مقاطع بر اساس نوع سیستم لرزه‌ای و نوع المان (ستون، تیر و مهاربند) لازم است.

گام (۲) کنترل دررفت اولیه سازه با لحاظ نمودن ضریب نامعینی سازه (ρ)، سپس ارزیابی نوع پیچش با نامنظمی زیاد یا شدید جهت اعمال ضریب A_z آیین‌نامه ۲۸۰۰ به نیروی زلزله در صورت لزوم و کنترل دررفت نهایی سازه.

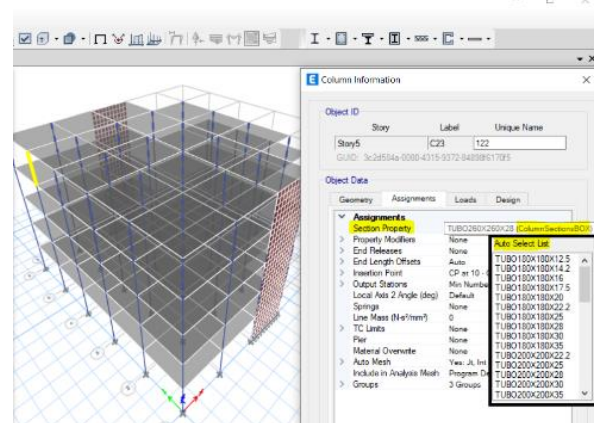
گام (۳) کنترل کردن نسبت تنش تمام ترکیب بارها مبحث ۶ سال ۱۳۹۸ و هشدار محدودیت‌های لرزه‌ای نظیر طول مهار تکیه‌گاه‌های جانبی برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها بر اساس مبحث ۱۰ سال ۱۴۰۱.

گام (۴) کنترل کردن خیز بارهای سرویس تخت بار زنده با $L/360$ و تحت ترکیب بار زنده و مرده با $L/240$ و نیز کنترل ارتعاش 5Hz تیرها تحت بار مرده مطابق با مبحث ۱۰.

خریشته‌ها، سربارها، برچسب‌گذاری المان‌ها و گروه ستون‌ها (GC1)، تیرها (GB1)، مهاربندها (GX1) و دیوارهای برشی (GW1).

۴-۲. شبکه‌سازی و برنامه‌ریزی اطلاعات اولیه

با تکمیل دانش اولیه مسئله، این اطلاعات و برچسب‌گذاری به صورت هوشمند برنامه‌ریزی می‌شوند تا به صورت مؤثر به عنوان دانش اولیه هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان نمونه لیست مقاطع گروه ستون ششم (GC6) در شکل (۲)، مربوط به طبقه آخر ساختمان، مستقیم از نرم‌افزار گرفته می‌شود و در الگوریتم بر اساس سطح مقطع مرتب‌سازی می‌شود بطوری که برچسب شماره یک متناظر با قوی‌ترین مقطع قابل استفاده باشد. به همین ترتیب شبکه‌سازی اولیه برای کل المان‌های سازه آماده‌سازی می‌شود تا در گام بعد برای تولید دانش جدید به کمک الگوریتم‌های تکاملی قابل استفاده و درک باشد. این گام شامل برنامه‌ریزی الزامات و قیود آیین‌نامه نیز می‌باشد که در بخش ۶ بحث می‌گردد.



شکل (۲). نمایشی از پنل گرافیکی ورودی پلتفرم پژوهش.

۴-۳. الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده در پلتفرم برای تولید دانش جدید

انتخاب الگوریتم‌های تکاملی و به‌کارگیری آن‌ها وابستگی زیادی به شرایط مسئله مورد بررسی، گسترش و بزرگی مسئله، نوع متغیرها و شرایط به‌کارگیری آن‌ها دارد. در صورت اشتباه در به‌کارگیری این ابزارها، هزینه و زمان زیادی تلف خواهد شد؛ بنابراین باید در انتخاب این ابزارها دقت زیادی نمود. به همین دلیل با توجه به ادبیات فنی ارائه شده در مقدمه از سه الگوریتم تکاملی جستجوی هارمونی (HS) [9]–[6]، ازدحام ذرات (PSO) [10]–[12]، ژنتیک (GA) [10]–[12] و یک الگوریتم گرادینانی (fmincon) [10]–[12] استفاده خواهد شد تا در نهایتاً بهترین آن‌ها برای مسئله طراحی کامل و بهینه‌سازی انواع سازه‌های

نهایتاً بر اساس ۱۱ دسته کلی ذکر شده در بالا الگوریتم به صورت هوشمند انتخاب می‌کند که در هر مسئله متفاوت کدام الزامات و قیود آیین‌نامه‌ای مطابق با سیستم لرزه‌ای انتخاب شده باید کنترل گردد. در ادامه سه نمونه با سه سیستم لرزه‌ای مختلف ارائه می‌شود.

۶. سه نمونه سازه‌ای کاربردی

در ادامه به ارزیابی عملکرد پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی در میل به بهینه‌ترین طراحی کامل پرداخته می‌شود. این پلتفرم با چهار الگوریتم معروف بهینه‌سازی GA, fmincon, PSO و HS به جستجوی جواب خواهد پرداخت. برای این امر سه ساختمان پنج طبقه نامنظم در ارتفاع و پلان با سه نوع سیستم لرزه‌ای شرح داده شده بررسی می‌گردد. به دلیل استفاده از تحلیل دینامیک طیفی، در تمام گام‌های تحلیل ضریب همپایگی دینامیکی توسط الگوریتم کنترل و اعمال می‌گردد.

۶-۱. سیستم قاب ساده با دیوار برشی

یک سازه پنج طبقه با سیستم قاب ساده با دیوار برشی ویژه در دو جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (۳) پیچش ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (۴) بهینه‌سازی گردید. در این بخش الگوریتم PSO توانسته وزن سازه بهینه را به 227.39ton یعنی حدود ۲۹٫۲۵٪ معادل ۶۶٫۵ تن سبک‌سازی بکند. سازه مینا مقایسه با وزن 293.9ton مطابق توضیحات قبل سازه‌ای است که تمام الزامات و قیود آیین‌نامه ایران را اقلان می‌کند. در رتبه دوم الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی داشته و موفق شده وزن سازه بهینه را به 229.77ton یعنی حدود ۲۷٫۹۱٪ معادل ۶۴٫۱ تن سبک‌سازی نماید. به همین ترتیب در رتبه سوم و چهارم الگوریتم fmincon و HS توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۲۰٫۶۷٪ و حدود ۸٫۵۲٪ سبک‌سازی گردند.

گام ۵) کنترل کردن اجرا پذیری طراحی برای هر کدام از اجزای ستون‌ها، مهاربندها و دیوارهای برشی با کنترل دقیق قرارگیری جزء تحتانی بزرگ‌تر یا مساوی در زیر جزء فوقانی آن صورت می‌پذیرد. این کنترل از دو منظور برای هوش مصنوعی بسیار مهم است تا اولاً، نرم‌افزار ETABS در تحلیل خطا یا اتلاف زمان صورت ندهد و دوماً هوش مصنوعی به جواب اشتباه میل نکند. همچنین کنترل حداقل و حداکثر تراکم آرماتور مجاز دیوار برشی مطابق مبحث ۹ سال ۱۳۹۹ [۱۶] در این بخش بررسی می‌شود.

گام ۶) کنترل کردن زلزله تشدید یافته مطابق با مبحث ۱۰ تحت ضریب اضافه مقاومت سیستم لرزه‌ای (Ω_0) برای ظرفیت محوری ستون‌ها صورت می‌پذیرد. این کار به صورت مستقیم و خودکار با ضرب ضریب Ω_0 در شدت زلزله و بینهایت کردن ظرفیت برشی و خمشی ستون‌ها انجام می‌شود.

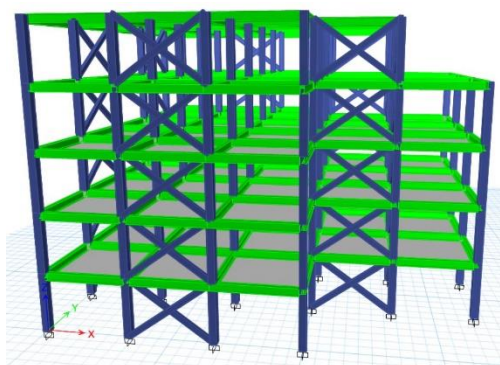
گام ۷) کنترل کردن ظرفیت اتصال بر اساس مبحث ۱۰ با محاسبه نسبت مجمع ظرفیت خمشی ستون‌ها به مجمع ظرفیت خمشی تیرها برای سیستم‌های قاب خمشی ویژه و دوگانه ارزیابی می‌شود. برخلاف کنترل ETABS، در آیین‌نامه ایران برای کنترل ظرفیت خمشی ستون‌ها گفته شده حتماً باید از نیروی محوری تحت زلزله تشدید یافته در کاهش ظرفیت آن استفاده شود که در الگوریتم اعمال شد. همچنین نقیصه ETABS در عدم کنترل این معیار برای تمام مقاطع فولادی نظیر مقاطع قوطی و SD به صورت مستقیم و هوشمند در الگوریتم نوشته شده رفع شده است.

گام ۸) کنترل کردن دریافت در بارگذاری سرویس برای سازه‌هایی با اهمیت خیلی زیاد، در این بخش سختی اعضاء نباید کاهش داده شود و شدت زلزله باید با ضریب یک ششم اعمال شود که در آن تحلیل ضریب رفتار (R) باید یک فرض گردد.

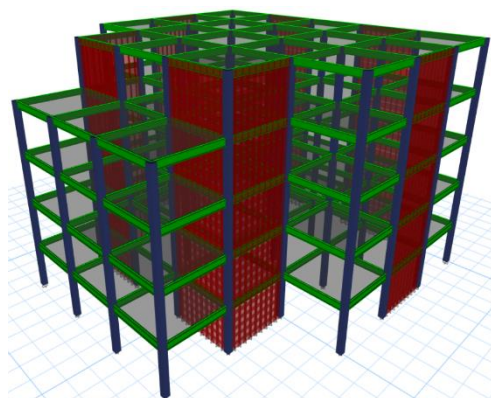
گام ۹) کنترل کردن نسبت تنش در بارگذاری سرویس، این کنترل‌ها با همان فرضیات بند ۸ قبلی ولی با کاهش سختی اعضاء انجام می‌شوند. در این کنترل نسبت تنش برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها بر اساس مبحث ۱۰ کنترل می‌شوند.

گام ۱۰) کنترل سیستم دوگانه برای سهم قاب خمشی تنها با ۲۵٪ شدت زلزله مطابق استاندارد ۲۸۰۰ صورت می‌گردد.

گام ۱۱) کنترل سیستم دوگانه مطابق استاندارد ۲۸۰۰ برای سهم سیستم مهاربند یا دیوار برشی با ۵۰٪ شدت زلزله صورت می‌گردد.

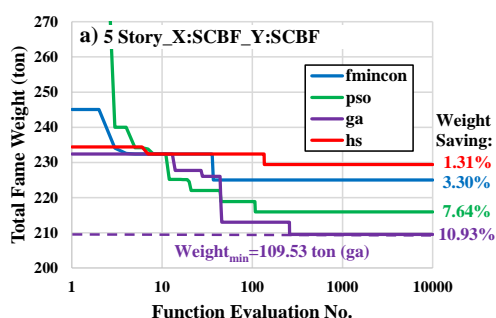


شکل (۵). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب مهاربندی.

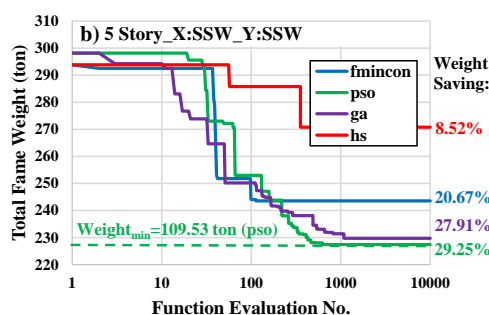


شکل (۳). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب ساده با

دیوار برشی نمونه سازه اول.



شکل (۶). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی سازه دوم.



شکل (۴). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی.

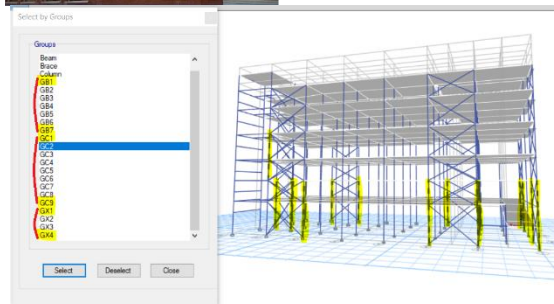
۳-۶. سیستم قاب خمشی ویژه دوگانه با دیوار برشی

یک سازه ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمشی در یک جهت و سیستم قاب خمشی دوگانه با دیوار برشی ویژه در جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (۷) پیش‌ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (۸) بهینه‌سازی شده است. در این بخش الگوریتم PSO توانسته وزن سازه بهینه را به 230.7ton یعنی حدود ۲۰٪ معادل ۴۶،۳ تن سبک‌سازی نماید. سازه مبنا مقایسه با وزن 277ton مطابق توضیحات قبل سازه‌ای است که کلیه الزامات و قیود آیین‌نامه ایران را اقلان کرده است. از جهتی الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی داشته و موفق شده وزن سازه بهینه را به 230.9ton یعنی حدود ۱۹،۹٪ معادل ۴۶،۱ تن سبک‌سازی نماید. به همین ترتیب در رتبه سوم و چهارم الگوریتم HS و fmincon توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۱۰،۲٪ و حدود ۶،۹٪ سبک‌سازی کردند.

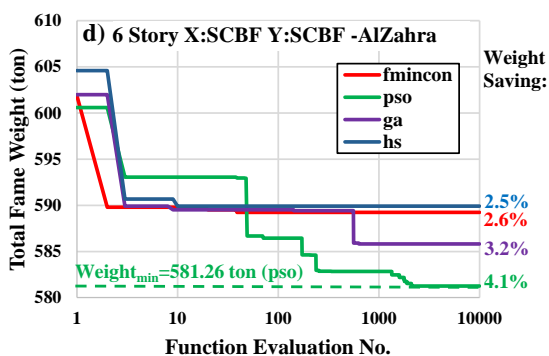
۲-۶. سیستم قاب مهاربندی

یک سازه پنج طبقه با سیستم قاب مهاربندی ضربدری ویژه در دو جهت متعامد به نحوی در نظر گرفته شد تا مطابق شکل (۵) پیش‌ناشی از نامنظمی آن به کمترین مقدار برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم ذکر شده مطابق شکل (۶) بهینه‌سازی می‌شود. در این بخش الگوریتم GA با عملکردی بهتر توانسته وزن سازه بهینه را به 209.52ton یعنی حدود ۱۰،۹٪ معادل ۲۲،۹ تن سبک‌سازی نماید. سازه مبنا مقایسه با وزن 232.43ton سازه‌ای است که تمام قیود آیین‌نامه ایران را اقلان کرده و در حد توان طراحی بعد از بهینه‌سازی خودکار ETABS با اقلان قیود و الزامات آیین‌نامه‌ای اقتصادی شده بود. نکته قابل توجه این است که جواب بهینه خودکار ETABS به دلیل اقلان نکردن قیود آیین‌نامه‌ای مانند عدم کنترل ضریب اضافه مقاومت در این پلتفرم با اعمال ضریب پینالتی به بینهایت (دو تا سه برابر وزن سازه) حرکت می‌کند. در رتبه دوم الگوریتم PSO نیز عملکرد خوبی داشته و توانست وزن سازه بهینه را به 215.94ton یعنی حدود ۷،۶۴٪ معادل ۱۶،۵ تن سبک‌سازی بکند. در رتبه سوم و چهارم الگوریتم HS و fmincon توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۳،۳٪ و حدود ۱،۳۱٪ سبک‌سازی بکنند.

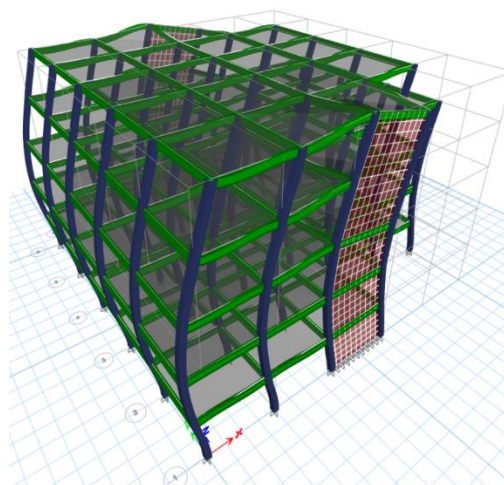
fmincon توانسته وزن سازه بهینه را به ترتیب حدود ۲,۶٪ و حدود ۲,۵٪ سبک‌سازی نماید. بعد از مقایسه انواع راه‌حل‌ها بهینه نهایتاً نتایج الگوریتم PSO به عنوان بهترین الگوریتم انتخاب شده است و به صورت گرافیکی در شکل (۱۱) با جزئیات بیشتر نمایش داده شده است.



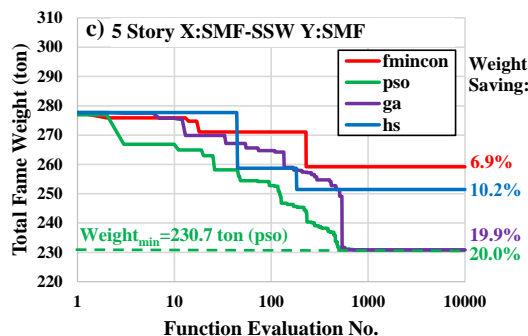
شکل (۹). اجرای اسکلت و شمای هندسه المان‌های سازه بیمارستان الزهرا.



شکل (۱۰). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی.



شکل (۷). شمایی از هندسه المان‌های سازه با سیستم قاب خمشی ویژه دوگانه با دیوار برشی.



شکل (۸). جزئیات همگرایی چهار الگوریتم بهینه‌سازی سازه سوم.

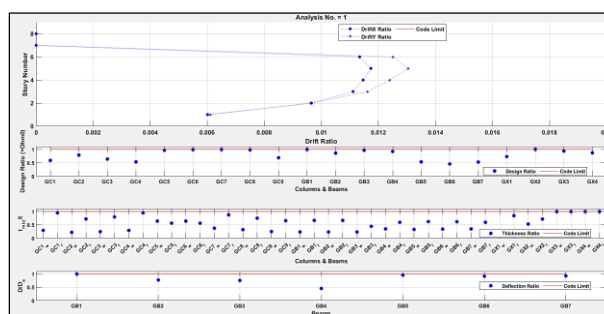
۷. ارزیابی پلتفرم با پروژه بیمارستان الزهرا

برای صحت‌سنجی کارکرد درست پلتفرم با ساختمان‌های پیچیده‌تر از پروژه بیمارستان الزهرا تبریز با دو خریشته در دو ارتفاع مختلف دارد و با زیربنای ۹۲۰۰ مترمربع که در ۶ طبقه احداث شده، بررسی شد. این بیمارستان مطابق شکل (۹) از دو سیستم قاب مهاربندی در دو جهت متعامد استفاده شده است و به نحوی قرار گرفتند تا پیش‌ناشی از نامنظمی آن به حداقل ممکن برسد. روند بهینه‌سازی این ساختمان به کمک پلتفرم این پروژه با چهار الگوریتم اشاره شده مطابق شکل (۱۰) بهینه‌سازی گردید. در این بخش الگوریتم PSO با عملکرد بهتر توانسته وزن سازه بهینه را به 581.2ton یعنی حدود ۴,۱٪ معادل ۲۳,۴ تن سبک‌سازی نماید. سازه مینا مقایسه با وزن 604.6ton سازه‌ای است که در زمان اجرا به صورت بهینه طراحی شده بود و با این وجود این الگوریتم توانست با موفقیت طراحی آن را بهبود بخشد. از جهتی الگوریتم GA نیز عملکرد خوبی دارد و موفق شده وزن سازه بهینه را به 585.8ton یعنی حدود ۳,۲٪ معادل ۱۸,۸ تن سبک‌سازی نماید. همچنین در رتبه سوم و چهارم الگوریتم HS و

بیمارستان الزهرا تبریز برای بررسی کارکرد مناسب پلتفرم در سازه‌های پیچیده‌تر ارزیابی شد. در این پروژه با وجود بهینه بودن طرح اجرا شده، این پلتفرم موفق شده طرح بهینه‌تری به میزان ۱،۴٪ (23.4ton) صرفه‌جویی فولاد پیدا کند که این میزان مقداری زیاد و قابل توجهی می‌باشد. با توجه به قیمت نهایی واحد هر کیلو فولاد برابر با ۶۰ هزار تومان با احتساب هزینه رنگ، اتصالات و نصب هر کیلو فولاد، این پلتفرم ۱،۴ میلیارد تومان صرفه‌جویی مالی و اقتصادی در پروژه الزهرا و نیز صرفه‌جویی در منابع با ارزش فولاد کشور انجام شده است. این در حالی است بطور هوشمند که با حذف خطای انسانی به یک طراحی کامل و ایمن دست یافتیم.

۹. مراجع

- [1] “Abbasi M, Eshagh M. ‘Use of artificial neural network in estimating seismic bearing capacity of strip surface foundations located on top of unlined cavity in homogeneous cohesive soils’, Construction science and technology. , vol. 1, no. 4, pp. 65-75, 2021.”
- [2] S. Rajasekaran and G. A. V. Pai, *Neural networks, fuzzy logic and genetic algorithm: synthesis and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd. , 2003.
- [3] B. Choudhury and R. M. Jha, “Soft Computing Techniques,” in *Soft Computing in Electromagnetics*, Cambridge University Press, 2016, pp. 9–44.
- [4] H. S. Park and C. W. Sung, “Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers,” *Comput. Struct.* , vol. 80, no. 14–15, pp. 1305–1316, 2002.
- [5] S. Gholizadeh and O. A. Samavati, “Structural optimization by wavelet transforms and neural networks,” *Appl. Math. Model.* , vol. 35, no. 2, pp. 915–929, 2011.
- [6] A. Kaveh and S. Talatahari, “Charged system search for optimal design of frame structures,” *Appl. Soft Comput.* , vol. 12, no. 1, pp. 382–393, 2012.
- [7] R. Alberdi and K. Khandelwal, “Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization,” *Eng. Struct.* , vol. 102, pp. 40–60, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.012>.
- [8] A. Kaveh, M. H. Ghafari, and Y. Gholipour, “Optimal seismic design of 3D steel moment frames: different ductility types,” *Struct. Multidiscip. Optim.* , vol. 56, no. 6, pp. 1353–1368, 2017.
- [9] A. Kaveh, M. Z. Kabir, and M. Bohlool, “Optimum design of three-dimensional steel frames with prismatic and non-prismatic elements,” *Eng. Comput.* , pp. 1–17, 2019.



شکل (۱۱). شمای گرافیکی از خروجی‌های بهینه‌ترین گزینه طراحی پروژه بیمارستان الزهرا.

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک پلتفرم الگوریتم هوش مصنوعی معرفی شده است. این پلتفرم به زبان برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شد و به کمک ارتباط API با نرم‌افزار تحلیل و طراحی ETABS ارتباط برقرار شده است. با وارد کردن یک فایل ورودی ETABS با استانداردهای خواسته شده در پنل گرافیکی، این پلتفرم قابلیت طراحی هوشمندانه انواع سازه‌های فولادی متداول کشور را فراهم می‌کند. این موضوع تا به حال کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است چراکه علم لازم برای گسترش این فناوری هوشمند در طراحی خودکار فراهم نبود و از طرفی اقتناع کلیه الزامات و قیود آیین‌نامه کار بسیار سنگین بوده که با ابتکارات فراوانی به این هدف بزرگ رسیدیم. در این پژوهش بیشتر به معرفی نتایج و کلیات کار پرداخته شده است. کلیه قیودات و الزامات آیین‌نامه‌ای استاندارد ۲۸۰۰، میبحث ۶، میبحث ۹ و میبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان مربوط به انواع سازه‌های فولادی در این پلتفرم پیاده‌سازی گردید. استفاده از هوش مصنوعی در طراحی‌های مهندسی پدیده‌ای نوع ظهوری است که به سرعت در حال تکامل می‌باشد و کشور ایران نباید از آن عقب بماند.

در مقایسه الگوریتم‌های این پروژه، الگوریتم PSO با بالاترین عملکرد برای انواع سازه‌های شناسایی شده است و به عنوان الگوریتم تکاملی برگزیده برای این پلتفرم انتخاب گردید. دلیل علمی برتری الگوریتم PSO در این مسئله پیچیده، تعریف مقاطع پروفیل‌ها به صورت مرتب و نزولی بر اساس کاهش سطح مقطع فولاد آن می‌باشد. این پلتفرم برای سه سیستم سازه‌ای رایج در کشور مورد مطالعه: (۱) قاب مهاربندی، (۲) قاب ساده با دیوار برشی و (۳) قاب خمشی دوگانه با دیوار برشی توانسته است به ترتیب به میزان ۱۱٪ (23ton)، ۲۹٪ (66.5ton) و ۲۰٪ (46.3ton) صرفه‌جویی فولاد داشته باشند. در هر سه نمونه سازه‌ای دیده شده که هوش مصنوعی با کاهش وزن سازه و افزایش زمان تناوب اصلی آن موفق شده است بار لرزه‌ای وارد به سازه را کاهش دهد و در نتیجه منجر به طرح اقتصادی‌تری شده است. همچنین پروژه

- Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2018.(In Persian). ”
- [14] “Bureau of National Building Regulations, ‘Standard 2800: Design Code of Buildings Against Earthquake’, 4th Edition, Iran Development Publishing House, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2014.(in Persian). ”
- [15] “Office of National Building Regulations, ‘Mabhas 10: Design and Implementation of Steel Buildings’, Iran Development Publishing House, Housing and Construction Deputy, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2022.(in Persian). ”
- [16] “Office of National Construction Regulations, ‘Mabhas 9: Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings’, Iran Development Publishing House, Housing and Construction, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran, 2020.(In Persian). ”
- [10] M. Sarcheshmehpour, H. E. Estekanchi, and H. Moosavian, “Optimum seismic design of steel framed-tube and tube-in-tube tall buildings,” *Struct. Des. Tall Spec. Build.* , vol. 29, no. 14, 2020, doi: 10.1002/tal. 1782.
- [11] A. Ghasemof, M. Mirtaheri, R. Karami Mohammadi, and M. R. Mashayekhi, “Multi-objective optimal design of steel MRF buildings based on life-cycle cost using a swift algorithm,” *Structures*, vol. 34, 2021, doi: 10.1016/j. istruc. 2021.09.088.
- [12] S. A. Mirfarhadi, H. E. Estekanchi, and M. Sarcheshmehpour, “On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value based seismic design approach,” *Eng. Struct.* , vol. 231, 2021, doi: 10.1016/j. engstruct. 2020.111751.
- [13] “Office of National Building Regulations, ‘Mabhas 6: Loads on Buildings’, Iran Development Publishing House, Housing and Construction Deputy, Ministry of

بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل (مطالعه موردی، قطعه ۲ تونل

انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه)

منصور صبری^{۱*}، حسن وحیدی^۲، محمد رستمی^۳، علی ذنوبی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس

^۲ مدیر پروژه تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه

^۳ مدیر عامل هلدینگ تخصصی نیرو، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص)

^۴ مدیر عامل مؤسسه فاطر، هلدینگ تخصصی نیرو

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

تیغه‌های حفاری به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین اجزاء در فرآیند برش سنگ توسط دستگاه حفاری مکانیزه تونل (TBM) می‌باشد که بر اثر سایش از حالت بهینه خود خارج شده و راندمان عملیات حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا در صورت رسیدن مقدار سایش تیغه‌ها به یک حد بحرانی، باید نسبت به تعویض و جایگزینی آن اقدام شود ولی در پروژه‌های اجرایی بعضاً به دلایل مختلفی همچون کاهش زمان خواب دستگاه و کاهش تعداد تیغه‌های مصرفی، این مهم با تأخیر صورت می‌پذیرد. لذا در این مطالعه هدف بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر روی پارامترهای عملیاتی ماشین حفر تونل مانند نیروی پیشران، گشتاور، نرخ نفوذ و انرژی ویژه و همچنین تأثیر بر سرعت پیشروی و زمان نهایی اجرای پروژه می‌باشد. بدین منظور پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری تونل انتقال آب کانی سیب پس از ۹۴ مورد تعویض تیغه‌های مستهلک بیش از ۱۰ درصد تیغه‌ها بصورت یکجا و در شرایط زمین‌شناسی یکسان مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد پس از تعویض تیغه‌های سایش یافته، میانگین نیروی رانش ۱۱ درصد کاهش می‌یابد این در حالی است که گشتاور ۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش متوسط ۲۵ درصدی در نرخ نفوذ نیز قابل مشاهده است. این بدان معناست که با تعویض به موقع تیغه‌های مستهلک، زمان کل عملیات حفاری با فرض ضریب بهره‌وری ۳۰ درصدی عملیات، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و تعلق در تعویض تیغه‌های مستهلک هزینه‌های قابل توجهی را به پروژه تحمیل می‌نماید که قابل مقایسه با مقدار ناچیز هزینه‌های تأمین تیغه‌های صرفه‌جویی شده نمی‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سایش تیغه، تغییرات نیروی پیشران، گشتاور محرک، راندمان حفاری

۱. مقدمه

شامل فرآیندهای مختلفی مانند خرد شدن^۱، تشکیل ترک^۲ و تشکیل تراشه^۳ می‌باشد که هر کدام نتیجه یکی از خاصیت فیزیکی سنگ می‌باشد. مطابق شکل (۱) در ابتدای کار با اعمال فشار به جبهه کار، ناحیه‌ای از سنگ‌های خرد شده توسط تیغه‌های غلتان ایجاد می‌شود [۱].

فرآیند حفاری توسط ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل شامل نفوذ دادن تیغه حفاری به درون سنگ با اعمال نیروی نسبتاً زیادی در هر مرحله چرخش کله‌حفار می‌باشد. نفوذ در سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تنش ناشی از نیرو عمودی پشت تیغه در محل تماس تیغه با سنگ، از مقدار مقاومت سنگ بیشتر باشد. در این حالت، مقداری از تیغه در سنگ نفوذ کرده و سبب ایجاد یکسری ترک در آن می‌شود. خردایش سنگ توسط تیغه حفاری

^۳ Chipping

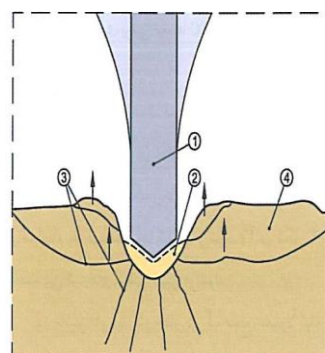
^۱ Crushing

^۲ Cracking

جدول (۱). مکانیسم‌های مختلف خرابی تیغه‌های حفاری [11]

نوع سایش	توصیف	شکل سایش
سایش همگن	سایش متقارن روی لبه تیغه حفاری	
سایش نامتقارن ^۴	سایش یک‌طرفه تیغه‌حفاری بر اثر جام کردن بلبرینگ بر اثر گردوخاک	
شکست تیغه ^۵	بر اثر سقوط سنگ و فشار بالا	
لب‌پریدگی ^۶	بر اثر خستگی سطح بیرونی تیغه‌حفاری و لب‌پریدگی تیغه	
قارچ شدگی ^۷	سختی نامناسب تیغه‌حفاری که سبب تغییر شکل تیغه می‌شود	
در رفتگی رینگ ^۸	وارد آمدن بار بسیار بالا و آسیب به هاب	
Wipe out	خرابی پی‌درپی رولبرینگ و خرابی تیغه‌ها حفاری مشابه جام شدن	
تیز شدگی ^۹	سایش شدید بدنه تیغه نسبت به لبه، نفوذ زیاد سبب افزایش دما و تشدید شرایط می‌شود	
لبه دو قوسی ^{۱۰}	شکست بیش‌ازحد تیغه‌حفاری- سمباده خورده	

عمده خرابی تیغه‌ها از نوع سایش همگن و متقارن می‌باشد که بر اثر خاصیت ساینندگی توده سنگ ایجاد می‌شود که در این تحقیق مدنظر می‌باشد. در ادامه به بررسی تأثیر سایش همگن تیغه‌ها بر روی پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب پرداخته و تأثیرات عدم تعویض به‌موقع آن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.



۱. تیغه برشی
۲. سنگ خرد شده
۳. ترک‌های شعاعی
۴. خرده سنگ جدا شده

شکل (۱). زون‌های مختلف شکست سنگ توسط تیغه

به دلیل وجود فشار بالا در زیر تیغه برشی، تنش‌های کششی شکافنده در سنگ ایجاد می‌شود که منجر به ترک‌های شعاعی می‌شود. با گسترش این ترک‌ها و رسیدن آن‌ها به سطح آزاد سینه کار و یا ترک‌های شعاعی حاصل از تیغه حفاری مجاور، خرده‌سنگ‌ها تشکیل می‌شود.

اندازه این خرده‌سنگ‌ها با توجه به فاصله بین شیارهای برشی و فاصله بین تیغه حفاری تعیین می‌شود. چنانچه فاصله بین تیغه حفاری به قدری از هم زیاد باشد که ترک‌های شعاعی به همدیگر نرسند در این صورت فرآیند خردایش دچار مشکل شده و مقداری از سنگ مابین دو تیغه باقی خواهد ماند.

بر اثر اندرکنش سنگ و تیغه نیروی عمودی^۱ جهت نفوذ تیغه، نیروی غلطشی^۲ جهت غلبه بر نیروی اصطکاکی در برابر غلطش تیغه‌ها و نیروی جانبی^۳ که بر اثر تشکیل تراشه در یک سمت تیغه حفاری و ایجاد بارگذاری نامتقارن تولید می‌شود.

در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی در خصوص مطالعه مراحل برش سنگ و نیروهای اعمالی بر روی تیغه‌های حفاری بصورت نظری، آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است [2]–[10]. سایش تیغه‌های حفاری یکی از مهمترین چالش‌های پیش رو در حفاری مکانیزه است که بشدت بر روی زمان و هزینه‌های اجرای پروژه‌ها تونلسازی مکانیزه تأثیرگذار می‌باشد.

بسته به شرایط زمین، پارامترهای اپراتوری و کیفیت تیغه‌های حفاری، ممکن است مطابق جدول (۱) یکی از انواع خرابی تیغه‌ها حادث شود.

۶ Chipping

۷ Mushrooming

۸ Ring Slip

۹ Self-Sharpening

۱۰ Double Curved Edge Wear

۱ Normal Force

۲ Rolling Force

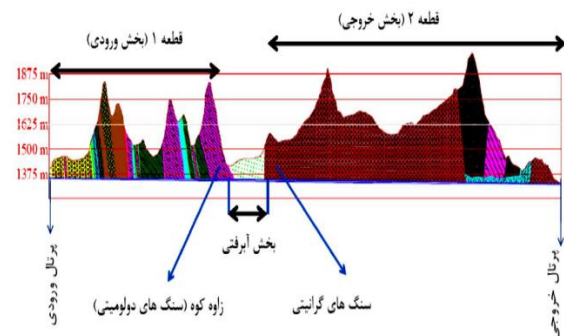
۳ Side Force

۴ Uneven Wear

۵ Impact Whattering

۲. روش تحقیق

تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه به طول ۳۵,۶۷ کیلومتر می‌باشد که از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران در محدوده کمربند دگرگونی و افیولیتی زون سنندج - سیرجان می‌باشد. مطابق شکل (۲) این تونل با توجه به لیتولوژی مسیر و تناوب سنگ‌ها و واحدهای زمین‌شناسی متفاوت در دو قطعه مجزا به وسیله دو دستگاه حفاری مکانیزه متفاوت طرح‌ریزی و اجرا گردیده است. قطعه ۱ به طول ۱۵,۳۷ کیلومتر به دلیل برخورد با توده سنگ‌های مقاومت پایین و بخش آبرفتی به وسیله یک دستگاه سپر فشار تعادلی زمین^۱ و قطعه ۲ نیز به طول ۲۰,۳۰ کیلومتر به موجب مسیری کاملاً سنگی با پارامترهای مقاومتی بالا بوسیله یک دستگاه حفاری سنگ سخت^۲ حفاری گردیده است.



شکل (۲). مقطع زمین‌شناسی تونل انتقال آب کانی سیب

با توجه به اینکه عمده تیغه‌های مصرفی در این پروژه مربوط به بخش سنگی قطعه ۲ می‌باشد، مطالعه تأثیر سایش بر روی راندمان عملیات حفاری در این قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. حدود ۸۰ درصد از مسیر تونل قطعه دوم در سنگ‌های آذرین شامل گرانیت و گرانودیوریت و مابقی در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی قرار گرفته است.

روش تحقیق به منظور بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری در زمان‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته به این ترتیب است که پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری ده کورس قبل و ده کورس بعد از تعویض بیش از ۱۰ درصد کل تیغه‌ها در شرایط یکنواخت و یکسان زمین‌شناسی پایش خواهد شد. علت اینکه تنها دفعاتی که بیش از ده درصد تیغه‌ها تعویض می‌شوند مد نظر است، این است که در تعداد تعویض‌های کمتر، این تأثیر خیلی قابل توجه و اثرگذار نیست. همچنین گام جک‌ها ۱,۵ متر می‌باشد؛ بنابراین تأثیر تعویض تیغه‌ها در یک طول تقریباً ۳۰ متری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی مصرف تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی

سیب

همانگونه که گفته شد، بیش از ۸۰ درصد از مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب از توده سنگ‌های گرانیت-گرانودیوریتی با پارامترهای بالای مقاومتی و سایشی تشکیل شده است. همین امر سبب افزایش قابل توجه نرخ مصرف تیغه‌ها در این قطعه گردیده که نمونه‌هایی از آن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳). نمونه‌ای از الگوهای متداول خرابی تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی سیب

با بررسی کل قطعه ۲ تونل کانی سیب، در مجموع ۳۹۴۴ حلقه تیغه به یکی از الگوهای یاد شده مصرف شده است. نمودار دایره‌ای شکل (۴) سهم هر کدام از خرابی‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، عمده علت تعویض تیغه‌ها، سایش معمولی و متقارن می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار، درصد بالای خرابی سیستم باربری و یاتاقان تیغه می‌باشد که ۳۵ درصد از کل خرابی‌ها را تشکیل می‌دهد. این مهم به دلیل بالا بودن پارامترهای مقاومتی توده سنگ و افزایش نیروی پیشران دستگاه می‌باشد.

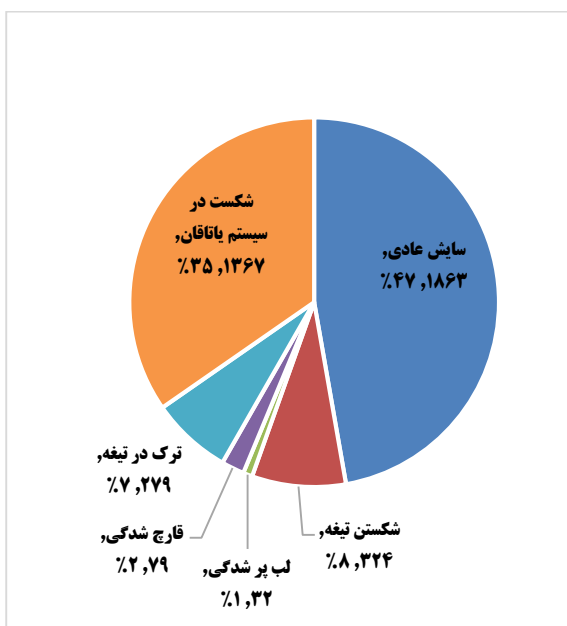
بررسی و مقایسه سهم هر کدام از علل خرابی، می‌توان علت شکست سیستم یاتاقان را غیرعادی و مورد بحث قرار داد.

بر اساس این نمودار عمده خرابی تیغه‌های مرکزی به دلیل مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاتاقان می‌باشد (بیش از ۷۴٪)؛ به عبارت دیگر تیغه‌های مرکزی به دلیل در معرض بودن نیروی نامتقارن و در عین حال شدید جانبی، عمدتاً از ناحیه یاتاقان و سیستم داخلی دچار شکست و خرابی می‌شود. این مقدار برای تیغه‌های میانی و لبه‌ای به ترتیب ۲۶٪ و ۴۴٪ می‌باشد. درصد نسبتاً بالای ۴۴ برای تیغه‌های لبه‌ای می‌تواند به دلیل زاویه‌داری این تیغه نسبت به امتداد تونل و نیروهای بالای جانبی ناشی از آن باشد.

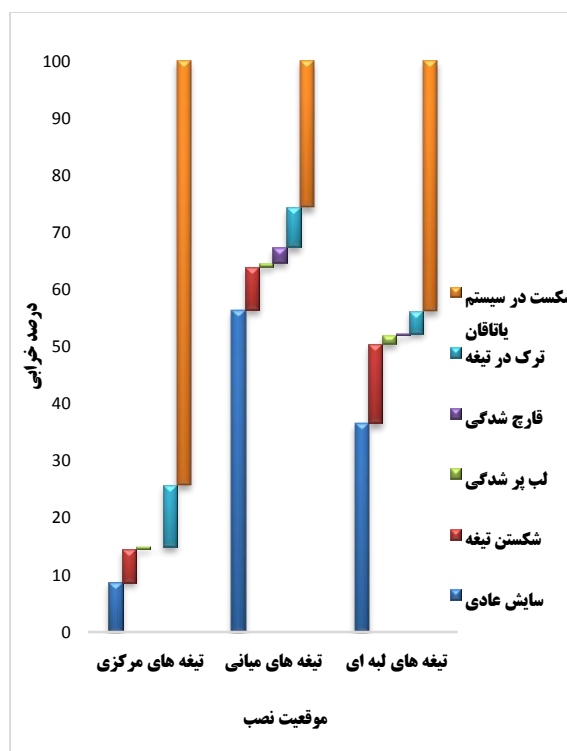
۲-۳. تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری

با بررسی تغییرات ایجاد شده در پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری بعد از تعویض تیغه‌های سایش یافته، در واقع بصورت غیرمستقیم تأثیر سایش تیغه‌ها قابل بررسی خواهد بود. با بررسی همه نوبت‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته در طول قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب، ۹۴ نوبت حائز شرایط مد نظر بوده و مورد بررسی قرار گرفته است. از مهمترین پارامترهای مؤثر در سرعت پیشروی ۱ و نرخ آسیب‌ها و صدمات وارده به دستگاه، نرخ نفوذ، نیروی کل پیشران و گشتاور می‌باشد که مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۶) جهت نمایش واضح‌تر اطلاعات، نمودار میله‌ای مربوط به تغییرات نیروی پیشران، گشتاور و نرخ نفوذ تنها ده نوبت از تعویض تیغه‌ها نشان داده شده است چرا که با توجه به اطلاعات گسترده همه ۹۴ نوبت تعویض، امکان نمایش نمودار وجود ندارد.

نتایج حاصل مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل (۶) می‌باشد. در این نمودارها، هر جفت ستون مربوط به تغییرات یکی از پارامترهای دستگاه، قبل و بعد از یک نوبت تعویض تیغه‌ها می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود نیروی پیشران بدون استثناء در همه موارد، بعد از تعویض تیغه‌های مستهلک کاهش یافته است. این به معنای افزایش نیروی پیشران به دلیل سایش تیغه‌ها به بیش از حد مجاز می‌باشد. این کاهش سبب بهبود شرایط حفاری، افزایش عمر سایر تیغه‌های سالم، سیستم محرکه دستگاه، جک‌ها و ... می‌شود و در مجموع موجب سلامت دستگاه حفاری و کاهش هزینه‌ها و زمان تعمیر و نگهداری خواهد شد. حداکثر مقدار کاهش نیروی پیشران ثبت شده ۴۵٪ و مقدار متوسط در طول کل قطعه ۲ برای همه ۹۴ مورد تعویض بیش از ۱۱٪ می‌باشد.



شکل (۴). نمودار دایره‌ای الگوهای خرابی تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی سیب



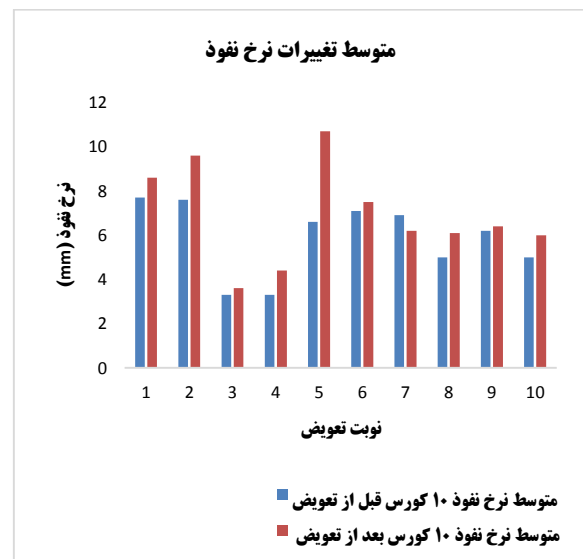
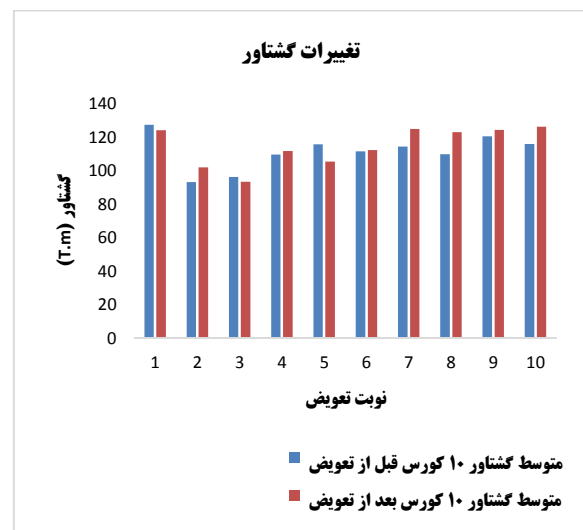
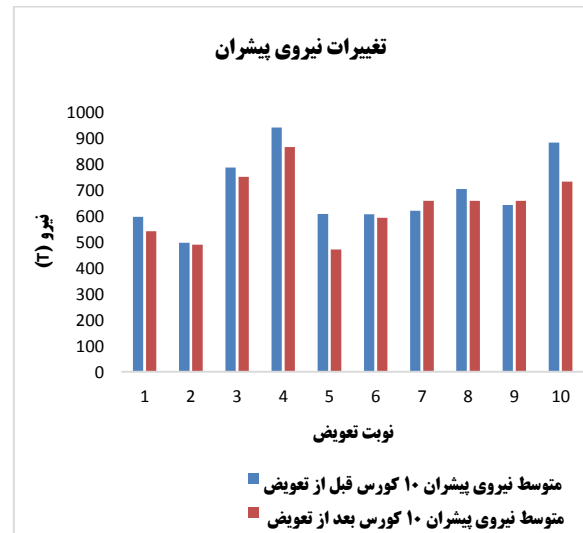
شکل (۵). درصد خرابی تیغه‌ها برحسب موقعیت نصب بر روی کله حفاری

همچنین نمودار شکل (۵) به بیان دیگر، سهم انواع خرابی برحسب موقعیت نصب بر روی کله حفاری را نشان می‌دهد. با

در مقابل تغییرات گشتاور کله حفار روند متناوبی داشته و در برخی موارد افزایشی و در برخی نیز کاهش می‌دهد. این افزایش می‌تواند به واسطه افزایش نرخ نفوذ دستگاه و در نتیجه رشد نیروهای اصطکاکی مقاوم بین مصالح و کله حفار باشد که منتج به افزایش گشتاور مقاوم زمین می‌شود؛ اما مطابق شکل (۶) تغییرات نرخ نفوذ دستگاه بر اثر تعویض تیغه‌های مستهلک بسیار قابل محسوس و مثبت می‌باشد به طوری که در همه ۹۴ مورد بدون استثناء پس از تعویض تیغه‌ها، نرخ نفوذ افزایش یافته است. در این مورد نیز مقدار متوسط افزایش نرخ نفوذ ۲۵٪ درصد می‌باشد که عدد بسیار قابل توجهی است و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ماشین (بطور متوسط ۳۰ درصد) و سایر زمان‌ها، می‌تواند تا ۲۰٪ زمان اجرای پروژه را کاهش دهد (محاسبات با فرض متوسط نرخ نفوذ ۶ میلی‌متر در هر دور، سرعت دوران حفاری ۵ دور بر دقیقه و طول کورس حفاری ۱,۵ متر انجام شده است).

این مقدار کاهش در زمان اجرا با توجه به هزینه‌های ثابت و پنهان سرسام‌آور حفاری مکانیزه، می‌تواند صرفه‌جویی مالی قابل توجهی را به دنبال داشته و در مقابل عدم توجه به آن هزینه‌های مضاعف بالایی را به طرح تحمیل کند؛ بنابراین به‌عنوان یک نتیجه کاربردی و کلی، عدم تعویض به موقع تیغه‌ها توسط متصدیان اجرایی با فرض کاهش هزینه‌های ناشی از تأمین تعداد کمتری تیغه به واسطه افزایش خرابی مجموعه دستگاه و همچنین تطویل زمان اجرا به مقدار متوسط ۲۰٪، نه تنها هیچ کاهش هزینه‌ای بدنال نداشته، بلکه خود بار مالی و هزینه‌ای قابل توجهی را تحمیل می‌کند.

در ادامه و با توجه به تغییرات قابل توجه ایجاد شده در پارامترهای مؤثر اپراتوری دستگاه حفاری بر اثر تعویض تیغه‌های سایش یافته، به‌منظور بررسی پارامتریک بیشتر و دقیق‌تر موضوع، یکی از نوبت‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته (یک زوج نمودار ستونی ارائه شده در شکل (۶) به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. محدوده مورد نظر حد فاصل کیلومتراژ Km: 23+351 تا Km: 23+380 به طول ۲۹ متر می‌باشد که در اواسط آن در یک نوبت و بصورت یکجا ۱۷ حلقه تیغه‌ی مستهلک (بیش از ۳۶٪ کل تیغه‌ها) با تیغه‌های نو و کارنکرده تعویض شده است. پس از شروع عملیات حفاری به تعداد ده گام و حفاری نزدیک به ۱۵ متر، مطابق جدول (۱)، پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری از سیستم ثبت ماشین استخراج و با مقادیر قبل از تعویض مقایسه شده است. با توجه به این مسئله که خروجی دستگاه بصورت نیروی پیشران و گشتاور کل کله حفاری می‌باشد، به‌منظور تبدیل



شکل (۶). تغییرات نیروی پیشران، گشتاور کل و نرخ نفوذ بر اثر تعویض تیغه‌های سایش یافته در قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب

مطابق جدول (۱) پس از تعویض تیغه‌ها، متوسط نیروی عمودی وارده بر هر تیغه از مقدار ۲۵۶٫۸۱ کیلونیوتن به ۱۷۰٫۷۰ کیلونیوتن و به مقدار ۳۴٪ کاهش یافته است. این در حالی است که متوسط مقدار نیروی غلطشی، افزایشی و به مقدار ۱۶٪ می‌باشد که می‌تواند ناشی از افزایش نیروهای مقاوم اصطکاکی بر اثر رشد نرخ نفوذ و به دنبال آن مصالح مابین سینه‌کار و کله حفار باشد. تغییرات نرخ نفوذ نیز بصورت صعودی از مقدار ۴٫۱ میلی‌متر در هر دور به ۴٫۸ میلی‌متر در هر دور با درصد رشد ۱۷٪ می‌باشد. همچنین در سطر آخر جدول مقادیر نیروهای نرمال و غلطشی با استفاده از روابط ۳-۵ و ۳-۶ پیش‌بینی شده است. فاصله‌داری و پهنای لبه تیغه‌ها بر اساس اطلاعات موجود پروژه به ترتیب ۷۵ میلی‌متر و ۲۲ میلی‌متر در روابط لحاظ شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌گردد مقادیر نیروهای عمودی و غلطشی برای وضعیت جدید تیغه‌ها به ترتیب ۱۷۲٫۵۵ کیلونیوتن و ۱۵٫۱۸ کیلونیوتن برآورد می‌شود.

مطابق فرمول (۳) و (۴)، انرژی ویژه^۲ (SE) و ضریب برش^۳ (CC) از شاخص‌های بسیار مهم تعیین بهره‌وری و راندمان ماشین حفاری مکانیزه تونل می‌باشد که در ادامه برای کیلومترهای مورد نظر بررسی شده است. طبق تعریف انرژی ویژه، مقدار انرژی مورد نیاز جهت حفاری واحد حجم سنگ می‌باشد. هرچه انرژی ویژه کاهش یابد به معنای افزایش راندمان عملیات می‌باشد. ضریب کاتر نیز نسبت نیروی غلطشی به نیروی عمودی است. افزایش ضریب کاتر به معنای کاهش مقدار نیروی عمودی و در نتیجه بهبود شرایط حفاری می‌باشد.

$$SE = \frac{F_r l}{V} \quad (۳)$$

$$CC = \frac{F_r}{F_n} \quad (۴)$$

در این رابطه F_r و F_n به ترتیب نیروهای عمودی و غلطشی برش (N)، l طول مسافت طی شده در چرخش تیغه (m) و V حجم سنگ حفاری شده (m³)، SE و CC به ترتیب انرژی ویژه حفاری (J/m³) و ضریب برش می‌باشد.

شکل (۷-الف) روند تغییرات انرژی ویژه حفاری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل انرژی ویژه حفاری در بازه زمانی قبل از تعویض بالا و در بازه ۷۰ الی ۱۲۰ مگاژول بر مترمکعب می‌باشد. این به معنای عدم وجود شرایط بهینه حفاری با مصرف بالای انرژی می‌باشد؛ اما پس از جایگزینی تیغه‌های مستهلک شاهد بهبود شرایط و کاهش انرژی ویژه حفاری و در نتیجه افزایش

آن‌ها به نیروی عمودی و غلطشی برش یک عدد تیغه، از فرمول (۱) و (۲) استفاده شده است.

$$F_n = \frac{(TH - f_{sh})}{N} \quad (۱)$$

$$F_r = \frac{Tor}{\sum_1^N r_i} \quad (۲)$$

در این روابط F_r و F_n به ترتیب نیروی عمودی و غلطشی وارده بر یک تیغه ((TH , (KN)) نیروی پیشران دستگاه ((KN))، f_{sh} نیروی اصطکاک سپر دستگاه با زمین ((KN))، N تعداد کل تیغه‌ها، Tor گشتاور کل کله حفار و r_i شعاع نصب تیغه نام می‌باشد. مقدار نیروی اصطکاک بین سپر و زمین مطابق بررسی‌های صورت گرفته توسط گونگ^۱ در سال ۲۰۰۷ برابر با مقدار نیروی پیشران ثبت شده دستگاه به هنگام عقب کشیدن مجموعه سپر و کله حفاری به هنگام بازسازی و تعمیر می‌باشد [12]. این مقدار با بررسی اطلاعات ثبت شده برای دستگاه حفاری قطعه ۲ کانی سیب، در حدود ۵۶۰ کیلو نیوتن می‌باشد.

جدول (۱)، تغییرات پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری برای یک تیغه- حد فاصل کیلومترهای ۲۳+۳۵۱ تا ۲۳+۳۸۰ Km:

پارامترهای اپراتوری قبل از تعویض			
P (mm/rev)	F_n (kN)	F_r (kN)	کیلومترهای
5	190.21	10.91	23380
3	267.87	11.27	23379
5	281.7	12.46	23378
4	272.13	8.9	23376
3	264.68	9.49	23375
3	254.04	13.05	23373
4	275.32	13.05	23371
4	243.4	10.08	23369
5	254.04	9.91	23367
5	264.68	10.68	23364
4.1	256.81	10.98	مقدار متوسط
پارامترهای اپراتوری بعد از تعویض			
P (mm/rev)	F_n (kN)	F_r (kN)	کیلومترهای
3	252.98	13.35	23364
3	258.3	12.63	23362
3	254.04	15.54	23361
4	158.3	13.05	23359
4	168.94	14.24	23358
6	126.38	11.86	23357
8	88.09	11.86	23355
5	126.38	11.27	23354
5	147.66	11.51	23352
7	126.38	11.51	23351
4.8	170.7	12.7	مقدار متوسط

^۳ Cutting Coefficient

^۱ Gong

^۲ Specific Energy

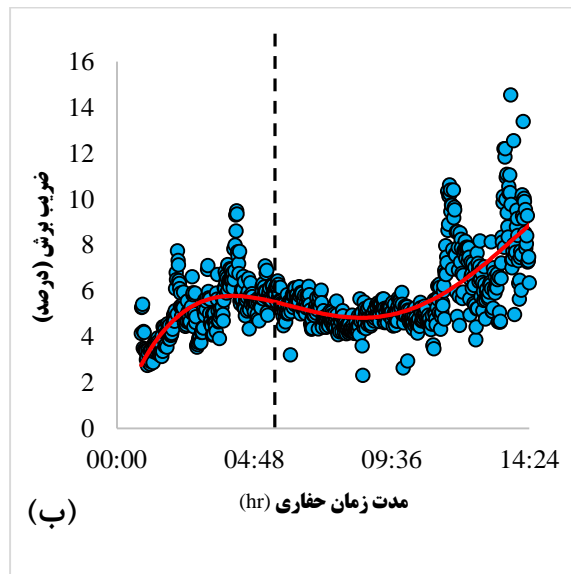
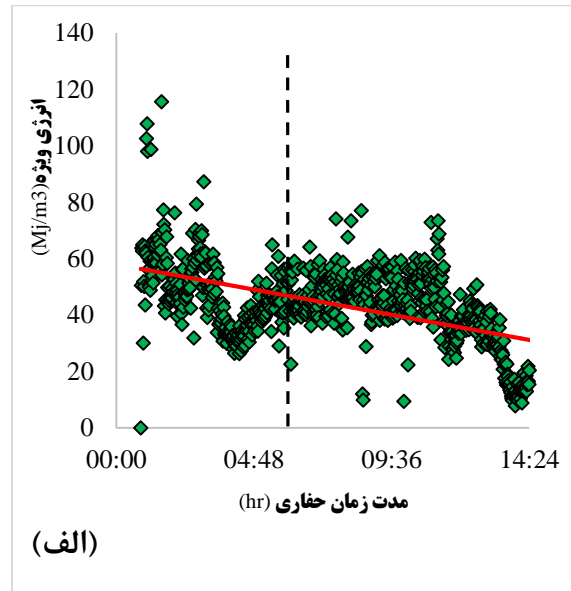
۴. نتیجه‌گیری

تیغه‌های حفاری به‌عنوان اصلی‌ترین اجزاء دستگاه‌های تمام مقطع حفر مکانیزه تونل، در حین اجرا دچار سایش شده و باید تعویض گردند. در این بین در پروژه‌های اجرایی، گاهی اوقات به‌منظور کاهش هزینه‌های تأمین ابزارهای برش، تعویض تیغه‌ها با تأخیر انجام می‌شود با این امید که با استفاده بیشتر از تیغه‌ها، هزینه‌ها کاهش یابد؛ بنابراین در این مطالعه به بررسی این موضوع و میزان صحت آن پرداخته شده است. لذا این مطالعه به‌عنوان یک بررسی موردی، به بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها در فرآیند حفاری مکانیزه تونل و پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب پس از تعویض تیغه‌های مستهلک پرداخته است. با بررسی ۹۴ مورد تعویض تیغه با تعداد بیش از ۵ حلقه در یک نوبت، نتایج نشان می‌دهد نرخ نفوذ دستگاه بطور متوسط ۲۵٪ افزایش یافته است. این افزایش با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ۳۰ درصدی ماشین حفاری، می‌تواند تا ۲۰٪ زمان اجرای پروژه را کاهش دهد. این کاهش با توجه به هزینه‌های قابل توجه بالاسری و ثابت پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل، عدد بسیار قابل توجهی می‌باشد. همچنین نیروی عمودی برش که عامل صدمه به مجموعه دستگاه حفاری می‌باشد، بطور متوسط ۱۱٪ کاهش نشان می‌دهد. این کاهش، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی افزایش راندمان و سلامت دستگاه حفاری، به‌ویژه جک‌های پیشران و سگمنت‌ها داشته و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را بصورت محسوسی کاهش دهد؛ بنابراین عدم تعویض بموقع تیغه‌ها با فرض کاهش هزینه‌های خرید، توجیه فنی (به دلیل افزایش نیروی پیشران) و اقتصادی (افزایش ۲۰ درصدی زمان پروژه) ندارد. همچنین با بررسی سهم خرابی تیغه‌ها برحسب موقعیت نصب، بیش از ۷۴٪ از علت خرابی تیغه‌های مرکزی، مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاتاقان می‌باشد که می‌تواند ناشی از نیروهای جانبی بالا و نامتقارن وارده به تیغه‌هایی با شعاع نصب پایین باشد.

۵. مراجع

- [1] W. Wittke, C. Erichsen, and J. Gattermann, "Stability analysis and design for mechanized tunnelling," *Geotech. Eng. Res. Pract.*, vol. 581, 2007.
- [2] H. Copur, "Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 104–120, 2010.
- [3] I. C. Engin, F. Bayram, and N. E. Yasitli, "Experimental and statistical evaluation of cutting methods in relation to specific energy and rock properties," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 4, pp. 755–766, 2013.
- [4] X. Huang *et al.*, "Cutting force measurement and analyses of shell cutters on a mixshield tunnelling machine," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 82, pp. 325–345, 2018.

بهره‌وری عملیات می‌باشیم. در این لحظات، مقادیر انرژی ویژه به زیر ۶۰ مگاژول بر مترمکعب کاهش یافته و حتی در برخی لحظات مقدار آن حتی کمتر از ۱۰ مگاژول بر مترمکعب نیز می‌باشد.



شکل (۷). الف) تغییرات انرژی ویژه حفاری و ب) تغییرات ضریب کاتر در کیلومتر از Km: 23+351 to Km: 23+380

در مقابل اما مطابق شکل (۷-ب) روند تغییرات CC کاملاً برعکس بوده و مقدار آن قبل از تعویض تیغه‌ها از زیر ۵٪ تا ۱۵٪ بعد از تعویض افزایش نشان می‌دهد که به معنای کاهش نیروی عمودی برش و رشد نیروی غلطشی می‌باشد.

- [5] Y. Pan, Q. Liu, J. Liu, X. Peng, and X. Kong, "Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting forces by TBM disc cutter," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 6, pp. 1697–1713, 2018.
- [6] Y. Pan, Q. Liu, X. Peng, X. Kong, J. Liu, and X. Zhang, "Full-scale rotary cutting test to study the influence of disc cutter installment radius on rock cutting forces," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 7, pp. 2223–2236, 2018.
- [7] G. Qi, W. Zhengying, and M. Hao, "An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 52, pp. 182–191, 2016.
- [8] G. Qi, W. Zhengying, M. Hao, and C. Qiao, "Numerical and experimental research on the rock-breaking process of tunnel boring machine normal disc cutters," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 1733–1745, 2016.
- [9] M. Stavropoulou and G. Exadaktylos, "Characterization of rock masses based on geostatistical joint mapping and rock boring operations," in *Rock Mechanics and Engineering*, CRC Press, 2017, pp. 139–179.
- [10] D. Tumac and C. Balci, "Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 45, pp. 84–98, 2015.
- [11] E. Farrokh and D. Y. Kim, "A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 81, pp. 336–357, 2018.
- [12] Q. M. Gong, J. Zhao, and Y. S. Jiang, "In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 303–316, 2007.

بررسی آزمایشگاهی مقاومت پسماند خمشی بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک

علیرضا دوست محمدی^{۱*}

^۱مدیر فنی شرکت نانونخ و گرانول سیرجان

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

استفاده از تکنولوژی بتن الیافی در قالب کفسازی با قابلیت حذف میلگردهای حرارتی و کاهش مصرف میلگردهای سازه‌ای امروزه در دنیا رواج یافته است و در کشور ما نیز بصورت تجربی استفاده از این روش در حال گسترش است. با توجه به گسترش این موضوع لازم است تا ویژگی‌های الیاف قابل استفاده در بتن و همچنین خواص عملکردی آن در بتن مورد ارزیابی قرار بگیرد و طرح مخلوط بتن الیافی مناسب با سطح انتظارات از هر پروژه ارائه شود. خواص مکانیکی بتن الیافی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر نوع الیاف، مقدار مصرف الیاف، مشخصات ابعادی الیاف، مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف و همچنین هندسه و شکل ظاهری آن می‌باشد. اصلی‌ترین پارامتر مکانیکی در تعیین عملکرد بتن الیافی مقاومت خمشی پس از ترک‌خوردگی بتن الیافی است که این مشخصه مکانیکی عموماً در استانداردها و آیین‌نامه‌های طراحی به عنوان مقاومت پسماند بتن الیافی شناخته می‌شود. هدف از پژوهش انجام شده، بررسی اثر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر مقاومت پسماند بتن می‌باشد. بدین منظور در مجموع هشت طرح مخلوط بتن الیافی با استفاده از الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب با مقادیر ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن و نمونه شاهد بدون الیاف در دو رده بتن با مقاومت فشاری ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال طراحی شد. روش انجام آزمون مقاومت پسماند نمونه‌های ساخته شده نیز بر اساس استاندارد ASTM-C1609 انجام شد. همچنین افزون بر آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی، خواص بتن تازه و آزمایش مقاومت فشاری نیز بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت پسماند نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ماکروسنتتیک باعث قابلیت باربرداری نمونه‌های تیرچه خمشی پس از ترک‌خوردگی می‌شود که مقدار و قابلیت تحمل بار پس از ترک‌خوردگی تابع مقدار مصرف الیاف می‌باشد و با افزایش دوز مصرف الیاف مقاومت پسماند افزایش می‌یابد. در آزمایش مقاومت فشاری نیز استفاده از الیاف اگرچه در مقدار مقاومت فشاری تأثیر ندارد اما نوع شکست را از حالت ترد به حالت نرم تغییر می‌دهد. در خصوص خواص بتن تازه بتن نیز استفاده از الیاف باعث کاهش اسلامپ و افزایش درصد هوا می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بتن الیافی، الیاف ماکروسنتتیک، مقاومت پسماند

۱. مقدمه

قابل توجه فنی و اقتصادی این تکنولوژی می‌باشد. استفاده از الیاف در بتن یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش ترک‌خوردگی، افزایش طاقت خمشی و جذب انرژی بهتر همراه با افزایش مقاومت کششی بتن می‌باشد [۹] - [۱۲]. در این نوع بتن‌ها پخش همگن رشته‌های الیاف درون مخلوط بتن آن را تبدیل به ماده‌ای شکل‌پذیر می‌کند و همچنین در کنترل و محدود کردن تعداد ترک و عرض آن‌ها بسیار تأثیرگذار می‌باشد. در واقع رفتار بتن الیافی به عنوان یک ماده مرکب تابع جنس، نوع، مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در واحد حجم بتن می‌باشد [۱۳] - [۱۵]. اولین نوع الیاف‌ها را می‌توان الیاف طبیعی دانست که از گذشته به عنوان عامل تسلیح درون کاهگل مورد استفاده بوده است. اولین نسل از الیاف‌هایی که درون بتن استفاده شد الیاف فولادی بود که استفاده از آن در کشورهای اروپایی و

امروزه استفاده از دال‌های بتنی روی زمین نظیر کفسازی، رویه‌های بتنی، روسازی باند فرودگاه و کف‌های صنعتی با استفاده از الیاف در دنیا بسیار متداول است و دهه‌های زیادی از به‌کارگیری آن‌ها در کشورهای توسعه‌یافته سپری می‌شود که در این راستا استانداردها [۱] و آیین‌نامه‌های طراحی بین‌المللی [۲] - [۸] نیز تألیف شده است. در ابتدا استفاده از الیاف طبیعی و کمی بعد استفاده از الیاف فولادی در بتن رایج شد. امروزه نسل جدید الیاف بتن با استفاده از پلیمر در فرآیند خاصی تولید می‌شود از مزایای این نوع الیاف بر نوع فولادی قیمت پایین‌تر، وزن مخصوص سبک‌تر، مقاومت در برابر زنگ‌زدگی و خوردگی و همچنین مقاومت بالا در شرایط محیطی اسیدی و قلیایی می‌باشد. [۹] افزایش طول عمر و دوام کف‌های بتنی از مزایای

الاستیسیته و کرنش از پارامترهای تأثیرگذار در مطالعات پیشین می‌باشد. هرچه مقاومت و مدول الیاف بالاتر باشد نتایج مقاومت پس از ترک خوردگی نیز در بتن الیافی افزایش خواهد یافت. در نتیجه بتن الیافی از ظرفیت کششی و خمشی بالاتری برخوردار خواهد بود [۲۱]، [۲۲] و [۲۴]. در این خصوص استاندارد ASTM-D7508 الیاف پلیمری مورد مصرف در بتن باید حداقل دارای مقاومت ۳۴۰ مگاپاسکال باشد [۲۵].

کشور ما اخیراً در این زمینه پژوهش‌هایی به صورت موضوعی انجام گرفته است اما هیچکدام از آن‌ها به صورت جامع و با رویکرد ارائه روش طراحی بتن الیافی نمی‌باشد؛ بنابراین با توجه به وجود ظرفیت تولید داخل نیاز است تا مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در واحد حجم بتن متناسب با شرایط پروژه‌های بومی (شرایط محیطی، نوع بارگذاری و سطح استقامت بتن) بر اساس الیاف تولیدات داخلی تعیین شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مصالح مصرفی

در این پروژه مصالح مصرفی به شرح ذیل است. سیمان مورد استفاده سیمان تپ ۲ ساوه و آب مورد مصرف در ساخت نمونه‌ها آب شهری تهران می‌باشد. مصالح سنگدانه از نوع شن شکسته و ماسه طبیعی از معدن شهریار تهیه شد که دانه‌بندی آن در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین الیاف ماکروسنتتیک مورد استفاده با برند کورتا سینوسی تولید شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان می‌باشد که تصویر و مشخصات مکانیکی آن به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۲) آمده است.

جدول (۱). دانه‌بندی مصالح سنگی

اندازه الک (میلیمتر)	درصد تجمعی عبوری (%)
۱۰۰	۳۷/۵
۱۰۰	۲۵
۹۷/۹	۱۹
۹۰/۷	۱۲/۵
۸۱/۹	۹/۵
۶۲/۸	۴/۷۵
۴۱/۸	۲/۳۶
۲۵/۵	۱/۱۸
۱۳/۹	۰/۶
۷/۱	۰/۳
۰/۱	۰/۱۵

آمریکای شمالی از سال ۱۹۷۰ آغاز شد [۱۶]. نسل جدید الیاف بتن که از نوع پلیمری می‌باشد نیز امروزه گسترش یافته است [۱۷]. استفاده از هر یک از انواع بتن خصوصیات مکانیکی و دوامی را به بتن اضافه می‌کند [۱۸]. بر اساس مطالعات پیشین سه عامل تعیین‌کننده در بهبود مشخصات مکانیکی بتن نسبت طول به قطر الیاف، مقدار مصرف آن در واحد حجمی بتن می‌باشد و مشخصات مکانیکی الیاف می‌باشد [۱۹] و [۲۰].

بررسی نسبت طول به قطر الیاف در واقع معیاری از تأمین طول مهاری الیاف درون بتن می‌باشد و هرچه این نسبت بزرگتر باشد مقاومت پیوستگی بین الیاف و بتن بیشتر خواهد بود و در نتیجه ظرفیت مقطع بتن الیافی افزایش خواهد یافت [۲۱]. مطالعات پیشین نشان داده اند مقدار بهینه برای نسبت طول به قطر الیاف در بازه‌ای بین ۶۰ تا ۱۰۰ پیشنهاد می‌شود. هرچه مقدار این نسبت به ۱۰۰ نزدیکتر باشد توانایی الیاف در کنترل ترک و افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی مؤثرتر خواهد بود [۴]. همچنین در این خصوص استانداردهای الیاف و آیین‌نامه‌های طراحی بتن الیافی بازه مذکور را پیشنهاد می‌دهند [۱].

بررسی درصد حجمی الیاف درون بتن نیز یکی از پارامترهای اساسی جهت تعیین خواص مورد نظر می‌باشد بازه مورد استفاده در این تحقیقات در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ درصد حجمی بتن می‌باشد [۱۳]. اگرچه در تحقیقات دیگری این محدوده مصرف تا ۱٪ حجمی بتن نیز افزایش داشته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد با افزایش درصد حجمی مصرف الیاف منجر به افزایش مقاومت باقیمانده (کششی و خمشی) و جذب انرژی می‌شود. از طرفی دیگر افزایش مقدار الیاف باعث کاهش روانی بتن یا به عبارتی باعث افت اسلامپ می‌شود [۲۲]. خواص مکانیکی بتن الیافی بر اساس آزمایش خمش خالص در نمونه‌های تیر منشوری شکل می‌باشد [۲۳]. در این آزمایش تیرهای بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۵۵۰ میلیمتر با دهانه خالص ۴۵۰ میلیمتر تحت خمش چهار نقطه‌ای قرار می‌گیرد این آزمایش مطابق استاندارد ASTM-C1609 انجام می‌شود. مقدار پارامترهای مقاومت باقیمانده کششی و خمشی بتن الیافی پس از ترک خوردگی به عنوان پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی‌های کاربردی در نظر گرفته می‌شود.

الیاف‌ها جدا از مشخصات مکانیکی و جنس آن به لحاظ ابعاد فیزیکی مطابق استاندارد ASTM-C1116 به دو دسته تقسیم می‌شوند الیاف‌هایی که قطر سطح مقطع معادل آن‌ها بیش از ۰/۳ میلیمتر باشند به عنوان الیاف ماکرو و کمتر از آن به عنوان الیاف میکرو دسته‌بندی می‌شوند. نتایج تحقیقات نشان داده است الیاف ماکرو نقش مؤثرتری در بهبود خواص مکانیکی بتن الیافی دارد [۱۹]. مشخصات مکانیکی الیاف نظیر مقاومت کششی، مدول

جدول (۳). جزئیات طرح مخلوط نمونه‌ها

کد نمونه	الیاف kg/m^3	$\frac{w}{c}$	سیمان kg/m^3	شن نخودی kg/m^3	شن بادامی kg/m^3	ماسه kg/m^3
C25	۰	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۲۰
C25F2	۲	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۲۰
C25F4	۴	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۲۰
C25F6	۶	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۲۰
C35	۰	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F2	۲	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F4	۴	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F6	۶	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰



شکل (۱). تصویر الیاف ماکروسنتتیک سینوسی برند کورتا

جدول (۲). مشخصات مکانیکی الیاف ماکروسنتتیک سینوسی

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص	gr/cm^3	۰/۹۱
قطر معادل	mm	۰/۷
طول	mm	۵۰
مقاومت کششی	MPa	۴۳۰
کرنش نهایی	%	۱۰
مدول الاستیسیته	GPa	۴/۵
نوع پلیمر	-	پلی اولفین
مقاومت اسیدی و قلیایی	-	عالی
جذب آب	%	۰
دمای ذوب	C°	۱۶۰

۳-۲. ابزاربندی و انجام آزمایش

در این مقاله آزمایش‌های مربوط به خواص تازه شامل درصد هوای بتن و اسلامپ به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C143 و ASTM C231 انجام شد. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی بتن دو آزمایش مقاومت فشاری بتن و مقاومت پسماند به ترتیب طبق استانداردهای ASTM C39 و ASTM C1609 انجام شد. در آزمایش مقاومت پسماند نمونه‌های تیر با ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۴۰۰$ میلیمتر با دهانه ۳۰۰ میلیمتر تحت بار خمشی چهار نقطه‌ای (خمشی خالص) انجام می‌شود. پروسه آزمایش و سرعت بارگذاری در این آزمایش با افزایش خیز وسط دهانه تیر بصورت تغییر مکان کنترل و با نرخ $۰/۱۲۵$ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. فرایند آزمایش تیرها در این روش تا خیز $\frac{1}{150}$ دهانه که در اینجا معادل خیز ۲ میلیمتر است انجام می‌شود و رسیدن به این خیز به منزله خاتمه آزمایش می‌باشد. همچنین در حین آزمایش نیرو و تغییر مکان قائم وسط دهانه (خیز) تا نقطه پایان آزمایش اندازه‌گیری شد. شکل (۲) پیکربندی آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۲. طرح مخلوط و نمونه‌ها

در این تحقیق از دو رده بتن با مقاومت فشاری ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال استفاده شد که جزئیات مصالح استفاده شده در جدول (۳) ارائه شده است.

همچنین بمنظور مشخص شدن عملکرد الیاف در بتن و تأثیر مقدار الیاف بر مقاومت پسماند بتن الیافی به ترتیب از سه مقدار ۲ ، ۴ و ۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن استفاده شد؛ بنابراین جمعاً ۸ طرح مخلوط شامل دو طرح شاهد و شش طرح الیافی ساخته شد.

جزئیات هر طرح جدول (۳) ارائه شده است. از هر طرح مخلوط نمونه استوانه به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و نمونه تیرچه به ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۴۰۰$ میلیمتر جهت انجام آزمایش مقاومت پسماند ساخته شد.

لازم به ذکر است برای انجام هر آزمایش تعداد سه نمونه ساخته شد و جمعاً در این پژوهش ۴۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل (۲). پیکربندی آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی

۳. نتایج و بحث

۳-۱. خواص بتن تازه

خواص بتن تازه شامل آزمون اسلامپ و درصد هوا به ترتیب طبق استانداردهای انجام شد و نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده می‌توان اظهار داشت وجود الیاف در مخلوط بتن خواص تازه آن شامل اسلامپ و درصد هوا را تحت تأثیر می‌گذارد. در خصوص اسلامپ این تأثیر به گونه‌ای است که استفاده از الیاف در مقدار مصرف ۲ کیلوگرم در هر مترمکعب تأثیر چندانی بر کاهش اسلامپ ندارد اما در مقادیر بالاتر این کاهش محسوس است. در خصوص درصد هوا نیز نتایج نشان داد افزایش مقدار الیاف باعث افزایش درصد هوا می‌شود، در واقع وجود الیاف مانع از خروج هوا می‌شوند.

جدول (۴). نتایج خواص تازه بتن

کد نمونه	روان کننده (%)	اسلامپ (cm)	درصد هوا (%)
C25	۰/۸	۲۱	۲/۹
C25F2	۰/۸	۲۰	۲/۹
C25F4	۰/۸	۱۶/۵	۳/۷
C25F6	۰/۸	۱۴	۴/۶
C35	۰/۷	۲۰/۵	۲/۷
C35F2	۰/۷	۱۹	۳/۲
C35F4	۰/۷	۱۶	۳/۶
C35F6	۰/۷	۱۴/۵	۴/۹

۴۰/۹	میانگین (Ave)	C35
۱/۱۳	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۱	میانگین (Ave)	C35F2
۳/۱۱	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۴	میانگین (Ave)	C35F4
۲/۱۳	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۳	میانگین (Ave)	C35F6
۱/۴۳	ضریب تغییرات (CV)	



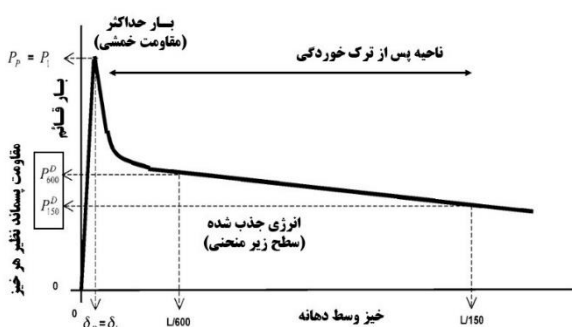
شکل (۳). تفاوت مود شکست بتن الیافی و بتن ساده (شاهد)

۳-۲. خواص مکانیکی بتن

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۵) و نتایج آزمایش مقاومت پسماند در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج آزمون مقاومت فشاری نشان داد که استفاده از الیاف تأثیر چندانی بر کاهش یا افزایش مقاومت فشاری ندارد اما باعث تغییر مؤد شکست بتن از حالت ترد به حالت نرم می‌شود که این مورد در شکل (۳) نشان داده شده است. ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های الیافی بصورت بسیار محدود و کنترل شده مشاهده شدند در حالی که نمونه شاهد دچار گسیختگی کامل و ترک‌های گسترده می‌باشد.

جدول (۵). نتایج آزمون مقاومت فشاری

کد نمونه	مقاومت فشاری (MPa)
C25	میانگین (Ave) ۳۲/۳
	ضریب تغییرات (CV) ۲/۸۵
C25F2	میانگین (Ave) ۳۲/۶
	ضریب تغییرات (CV) ۳/۶۵
C25F4	میانگین (Ave) ۳۱/۴
	ضریب تغییرات (CV) ۲/۳
C25F6	میانگین (Ave) ۳۱/۲
	ضریب تغییرات (CV) ۳/۲۷



شکل (۴). نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی طبق ASTM C1609

نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی الیاف بصورت شماتیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

خروجی نمودارهای حاصل شامل پارامترهای حداکثر مقاومت خمشی (f_p)، مقاومت خمشی نظیر خیز $\frac{L}{150}$ معادل خیز ۲ میلیمتر (f_D^{150})، مقاومت خمشی نظیر خیز $\frac{L}{600}$ معادل خیز ۰/۵ میلیمتر (f_D^{600})، سطح زیر نمودار به عنوان جذب انرژی تا خیز نهایی معادل خیز ۲ میلیمتر (T_D^{150})، نسبت مقاومت پسماند (R_{e3}) و مقاومت پسماند (f_{e3})، در واقع پارامتر مقاومت پسماند

۹/۱۶	۴/۹۸	۲/۵۷	ضریب تغییرات (CV)	
۱/۹۵	۵۰/۶۱	۳/۹۴	میانگین (Ave)	C25F6
۵/۱۳	۳/۹۱	۳/۳	ضریب تغییرات (CV)	
.	.	۴/۷۶	میانگین (Ave)	C35
-	-	۵/۰۴	ضریب تغییرات (CV)	
۱/۰۹	۲۴/۸۵	۴/۵۹	میانگین (Ave)	C35F2
۰/۳	۲۷/۶۹	۴/۱۴	ضریب تغییرات (CV)	
۱/۶۳	۳۵/۳۷	۴/۵۸	میانگین (Ave)	C35F4
۴/۹۱	۴/۹۸	۲/۶۲	ضریب تغییرات (CV)	
۲/۱۷	۵۰/۶۱	۴/۵	میانگین (Ave)	C35F6
۴/۱۵	۳/۹۱	۴/۲۲	ضریب تغییرات (CV)	

۴. نتیجه گیری

با توجه به آزمون‌های انجام شده در این تحقیق نتایج زیر قابل استنباط می‌باشد:

۱- استفاده از الیاف در مقادیر کمتر از ۲ کیلوگرم در هر مترمکعب تأثیر چندانی بر خواص بتن تازه ندارد اما استفاده از مقادیر بالاتر باعث کاهش اسلامپ و افزایش درصد هوا می‌شود.

۲- افزایش مقدار الیاف، باعث افزایش مقاومت پسماند بتن می‌شود.

۳- مقادیر مقاومت پسماند برای نمونه‌های حاوی الیاف با مقادیر ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هر مترمکعب برای بتن رده C25 به ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۱/۳۱ و ۱/۹۵ مگاپاسکال و برای بتن رده C35 به ترتیب برابر با ۱/۰۹، ۱/۶۳ و ۲/۱۷ مگاپاسکال می‌باشد.

۴- از مقاومت خمشی ایجاد شده پس از ترک خوردگی بتن که با عنوان مقاومت پسماند تعریف می‌شود را می‌توان در ناحیه بتن کششی لحاظ کرد و تأثیر آن را در محاسبه ظرفیت خمشی دید.

۵- افزایش مقدار مصرف الیاف باعث می‌شود تا تعداد رشته‌های الیاف موجود در مقطع ترک خورده بیشتر باشد و در نتیجه عرض

(R_{e3}) به عنوان جایگزین دو پارامتر (f_D^{150}) و (f_D^{600}) می‌باشد و رفتار کلی تری از عملکرد بتن الیافی ارائه می‌کند.

نتایج خروجی‌های مذکور در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین فرمول محاسبه آن‌ها طبق استاندارد ASTM C1609 می‌باشد که در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد وجود الیاف ماکروستنتیک قابلیت باربری نمونه را پس از ترک خوردگی همچنان حفظ می‌کند لازم به ذکر است مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در حجم بتن روی مقاومت پسماند تأثیرگذار است و با افزایش مقدار الیاف شاهد افزایش ظرفیت باربری نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت پسماند می‌باشد.

الیاف ماکروستنتیک پس از رسیدن به حداکثر بار و ایجاد ترک، همچنان قابلیت تحمل دارد بنابراین در منحنی آن‌ها رفتار پس از ترک بعد از رسیده به حداکثر بار قابل مشاهده است. مکانیزم عملکرد الیاف پس از ایجاد ترک فعال می‌شود و بین دو طرف ترک ایجاد شده پل می‌زند. افزایش مقدار الیاف در حجم بتن باعث می‌شود تا تعداد رشته‌های الیاف بیشتری بین مقطع ترک خورده درگیر شوند در نتیجه این عملکرد باعث می‌شود عرض ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی الیاف کنترل و محدود شود و ظرفیت باربری مقطع پس از ترک خوردگی نیز حاصل همین مکانیزم می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است تکرار آزمایش در هر نمونه طرح مخلوط سه مورد در نظر گرفته شد.

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (۱)$$

$$R_{e3} = \frac{150 \times T_{150}^D}{bh^2} \quad (۲)$$

$$f_{e3} = R_{e3} \times f_p \quad (۳)$$

جدول (۶). نتایج آزمون مقاومت پسماند

کد نمونه	پارامترهای آماری	f_p (MPa)	R_{e3} (%)	f_{e3} (MPa)
C25	میانگین (Ave)	۳/۹۷	.	.
	ضریب تغییرات (CV)	۲/۰۲	-	-
C25F2	میانگین (Ave)	۳/۹۲	۴/۸۵	۰/۷۹
	ضریب تغییرات (CV)	۱/۷۹	۲۷/۶۹	۶/۳۳
C25F4	میانگین (Ave)	۳/۸۹	۳۵/۳۷	۱/۳۱

- concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 790–800, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.166.
- [15] F. Fotouhi, G. D. Ashkezari, and M. Razmara, “Experimental relationships between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete,” *J. Build. Eng.*, p. 101613, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101613.
- [16] ASTM, “A820 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete,” no. October, pp. 1–4, 2011, doi: 10.1520/A0820.
- [17] A. Nobili, L. Lanzoni, and A. M. Tarantino, “Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 888–895, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077.
- [18] Y. Chen, G. Cen, and Y. Cui, “Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 34–44, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223.
- [19] H. Rooholamini, A. Hassani, and M. R. M. Aliha, “Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 517–529, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002.
- [20] D. Biddle, “Fiber Reinforced Concrete Pavements: Real Research & Real Projects,” 2017.
- [21] A. Alsaif, L. Koutas, S. A. Bernal, M. Guadagnini, and K. Pilakoutas, “Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 533–543, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010.
- [22] A. Caggiano, S. Gambarelli, E. Martinelli, N. Nisticò, and M. Pepe, “Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1035–1043, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068.
- [23] C. C. Test, T. Drilled, C. Concrete, and S. T. Panels, “C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) 1,” *Astm*, vol. i, no. C 1609/C 1609M-05, pp. 1–8, 2005, doi: 10.1520/C1609.
- [24] S. E. Vakili, P. Homami, and M. R. Esfahani, “Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars,” *Structures*, vol. 20, no. April, pp. 290–297, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.04.006.
- [25] ASTM D7508, “Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete,” 2010.
- ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی مقدار الیاف بیشتر محدودتر شده و در نتیجه ظرفیت باربری مقطع نیز افزایش می‌یابد.
- ## ۵. مراجع
- [1] ASTM C1116, “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete,” 2010.
- [2] ACI 544.2R-17, “Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete,” *Am. Concr. Inst.*, pp. 1–24, 2017.
- [3] ACI 544.7R-16, Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments. 2016.
- [4] ACI 544.4R-18, Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete. 2018.
- [5] ACI 544.8R-18, “ACI 544.8R-16: Report on Indirect Method to Obtain Stress-Strain Response of Fiber-Reinforced Concrete (FRC),” p. 22, 2016.
- [6] ACI 544.5R-10, Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. 2010.
- [7] ACI 544.6R-15, and Construction of, no. 2. 2004.
- [8] ACI 544.3R-08, “544.3R-08 Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete,” vol. 16, pp. 0–15, 2010.
- [9] H. Bolooki Poorsaheli, A. Behravan, S. T. Tabatabaei Aghda, and A. Gholami, “A study on the durability parameters of concrete structures reinforced with synthetic fibers in high chloride concentrated shorelines,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 578–585, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.155.
- [10] C. Meng, W. Li, L. Cai, X. Shi, and C. Jiang, “Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120055, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120055.
- [11] H. Wu, X. Lin, and A. Zhou, “A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 135, no. April, p. 106117, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106117.
- [12] M. Usman Rashid, “Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118910, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118910.
- [13] A. P. Fantilli, B. Chiaia, and A. Gorino, “Fiber volume fraction and ductility index of concrete beams,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 139–149, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.019.
- [14] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado, “The need to consider flexural post-cracking creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced

آنالیز حساسیت پارامترهای اپراتوری حفاری مکانیزه در سنگ گرانیت

محمدحسین علیکاهی^{*۱}

^۱ کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

بررسی و بهبود عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل‌ها به دلیل تأثیر آن بر هزینه‌های حفاری از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بدین منظور نیاز است تا پارامترهای مؤثر بر حفاری شناسایی و اثر آنها مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از دسته پارامترهای مؤثر بر حفاری مکانیزه تونل‌ها پارامترهای اپراتوری می‌باشند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای عمق نفوذ، سرعت دورانی و فاصله بین تیغه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی پارامترهای بیان شده از مدلسازی دستگاه برش خطی سنگ (LCM)، در محیط نرم‌افزار آباکوس بهره گرفته شده است. پس از ساخت هندسه اولیه آنالیزهای متعددی با مقادیر متفاوت از هر یک از پارامترها صورت پذیرفته و از این طریق تأثیر پارامترها بر عملکرد دستگاه و انرژی لازم برای حفاری مشخص شد. با انجام آنالیزهای حساسیت مشخص می‌شود که در محیط گرانیتی عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵ بیشترین اثر را بر کاهش انرژی لازم برای حفاری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که اثر سرعت دورانی بر تغییرات انرژی لازم برای حفاری اندک می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: دستگاه TBM، آزمون برش خطی سنگ، پارامترهای اپراتوری، انرژی ویژه، مدل‌سازی عددی

۱. مقدمه

یکی از عوامل مهم در پروژه‌های بزرگ عمرانی، بودجه و هزینه‌های پروژه می‌باشد. افزایش بازدهی حفاری مکانیزه باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های حفاری، تعمیر و نگهداری دستگاه و کاهش زمان حفاری و جلوگیری از آسیب و خرابی به تونل نهایی می‌شود. علیرغم اهمیت افزایش بازدهی حفاری و کاهش هزینه‌ها به خصوص در پروژه‌های بزرگ عمرانی، دستورالعمل مشخصی برای رسیدن به حداکثر بازدهی در محیط‌های سنگی مختلف وجود ندارد.

بمنظور افزایش بازدهی حفاری باید مقادیر بهینه پارامترهای اثرگذار بر حفاری را تعیین نمود. پارامترهای اثرگذار بر حفر مکانیزه تونل شامل پارامترهای مقاومتی و سایش توده سنگ و همچنین پارامترهای مربوط به دستگاه حفاری می‌باشند. در این میان پارامترهای دستگاه نیز به دو گروه پارامترهای اپراتوری حفراری و مشخصات ماشین و ابزارهای برشی تقسیم‌بندی می‌شوند. برخلاف پارامترهای مربوط به توده سنگ، پارامترهای مربوط به دستگاه حفاری غیرتحمیلی می‌باشند. اگرچه پارامترهای مربوط به هندسه دستگاه غیرتحمیلی می‌باشند و می‌توان این دسته از پارامترها را در مرحله طراحی دستگاه بهینه نمود ولی در

محل کارگاه این پارامترها غیرقابل تغییر می‌باشند و در کارگاه تنها پارامترهای اپراتوری غیرتحمیلی بوده و می‌توان با تغییر مقادیر این پارامترها راندمان حفاری را تغییر داد.

در چند دهه اخیر به کمک انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس مانند آزمون برش خطی سنگ (Linear Cutting Test, LCT) و آزمون‌های کوچک مقیاس مانند برش خطی سنگ (Small Scale LCT) و آزمون برش مغزه (Core Cutting Test) و همچنین انجام مدل‌سازی‌های عددی به کمک نرم‌افزارهای مهندسی مختلف، محققان به بررسی عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل پرداخته‌اند.

از مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین عملکرد دستگاه TBM می‌توان به تحقیقات [۱-۳] اشاره کرد.

از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده به کمک مدل‌سازی عددی نیز می‌توان به پژوهش [۴] اشاره کرد. در این پژوهش محققین از دو روش المان محدود (FEM) و المان گسسته (DEM) به صورت همزمان برای مدل‌سازی بهره برده‌اند. بدین صورت که بخشی از سنگ که در تماس با تیغه دیسکی بوده و به عبارت دیگر در معرض برش قرار دارد به روش المان گسسته مدل شده و سایر بخش‌های

دیگر محققین [۶] به کمک مدل‌سازی عددی تعدادی از آزمایش‌های LCM در نرم‌افزار انسیس AUTODYN-3D به بررسی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی دستگاه TBM پرداخته‌اند. هدف نهایی از این پژوهش یافتن مقدار بهینه فاصله میان تیغه‌ها می‌باشد. پیش از انجام آنالیزهای عددی اصلی بمنظور رسیدن به هدف پژوهش نیاز است تا اثر سرعت بر راندمان حفاری مشخص شود و سرعت بهینه حفاری تعیین شود؛ بدین جهت تعدادی آنالیز عددی با سرعت‌های مختلف انجام می‌گیرد. با بررسی نتایج بدست آمده از این آنالیزها مشاهده می‌شود که انرژی ویژه وابستگی اندکی به سرعت حفاری دارد. علیرغم این نتیجه مشاهده می‌شود که زمان لازم برای حفاری با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. در این تحقیق حرکت تیغه به صورت غیرهمزمان می‌باشد؛ به بیان دیگر ابتدا تیغه یک خط برش در نمونه سنگی ایجاد می‌کند سپس به میزان فاصله میان تیغه‌ها جابجا شده و خط برش دوم را ایجاد می‌نماید. برای تعیین نسبت فاصله به عمق بهینه از عمق نفوذ ۴ میلی‌متر و فواصل ۲۸، ۴۰، ۴۸، ۶۰، ۷۲ و ۸۰ میلی‌متر (نسبت فاصله به عمق ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰) استفاده شده است. با بررسی‌های انجام شده نتیجه گرفته می‌شود که برای نسبت فاصله به عمق ۷ تا ۱۲ عبور خط برش اول باعث تأثیر بر سنگ‌های کنده شده در خط برش دوم می‌شود ولی برای نسبت فاصله به عمق‌های بیشتر از ۱۵ اثر خط برش اول کاسته می‌شود. برای تعیین مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق باید مقداری از این نسبت که به ازای آن انرژی ویژه حداقل می‌شود را گزارش نمود که این مقدار برابر ۱۲ می‌باشد.

از دیگر پژوهش‌های عددی انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات [۷] که به بررسی فاصله بهینه بین تیغه‌ها در سنگ‌های درزه‌دار در محیط نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند، تحقیقات [۸] که در مورد بهینه‌سازی و طراحی دستگاه حفاری مکانیزه به روش DEM می‌باشد، تحقیقات [۹] در زمینه بررسی عملکرد کاترهد دستگاه TBM در نرم‌افزار AUTODYN-3D اشاره نمود.

پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند حفاری تونل به کمک دستگاه TBM به بررسی مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای اپراتوری در شرایط مختلف زمین‌شناسی می‌پردازد.

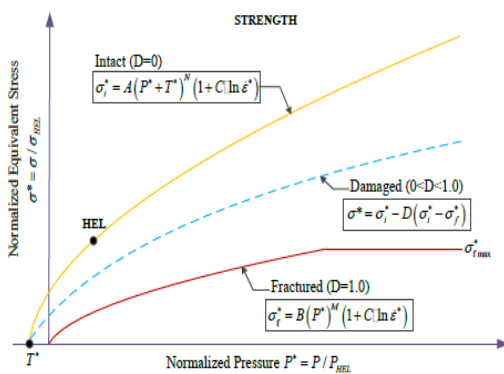
تفاوت پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین، بررسی اثر پارامترهای اپراتوری دستگاه و انجام آنالیزهای حساسیت برای تعیین مقادیر بهینه هر پارامتر در شرایط مختلف می‌باشد.

۲. روش تحقیق

محیط سنگی به صورت پیوسته و به کمک روش المان محدود مدل‌سازی می‌شود. در پژوهش حاضر برای بررسی فرآیند برش سنگ به مطالعه اثر عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها بر نیروهای وارد بر تیغه و انرژی ویژه لازم برای حفاری پرداخته شده است. با بررسی نتایج این پژوهش مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نفوذ نیروی عمودی و نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی نیز افزایش می‌یابد. این اثر با وضوح بیشتری در مورد نیروی غلتشی نمایان است و از آنجایی که نیروی غلتشی با انرژی لازم برای حفاری در ارتباط است می‌توان از این رابطه برای بررسی اثر عمق نفوذ بر انرژی لازم برای حفاری بهره جست. همچنین با بررسی نتایج حاصل از این پژوهش به این نتیجه دست یافته می‌شود که عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها دو عامل بسیار مهم و اثرگذار بر چگونگی پیش‌بینی عملکرد حفاری می‌باشند.

در پژوهشی دیگر، محققین [۵] به بررسی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی دستگاه TBM پرداخته‌اند. این محققین با استفاده از مدل رفتاری دراگر-پراگر به همراه مدل آسیب Lemaitre به مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند. مدل ساخته شده در نرم‌افزار در واقع مدلی از آزمایش RCM با استفاده از دو تیغه دیسکی می‌باشد. دو تیغه دیسکی علاوه بر دوران نسبت به محور Z در دستگاه مختصات کلی نسبت به محور X در دستگاه مختصات محلی تیغه نیز دوران می‌کنند. تیغه اول به اندازه ۵ درجه جلوتر از تیغه دوم قرار دارد که بیانگر حفاری غیرهمزمان تیغه‌ها در واقعیت می‌باشد. بمنظور تعیین بهینه‌ترین مقدار فاصله میان تیغه‌های دیسکی از ۸ مدل عددی با فاصله میان تیغه‌های ۴۰، ۴۸، ۵۶، ۶۴، ۷۲، ۸۰، ۸۸ میلی‌متر استفاده شده است. با بررسی نیروهای عمودی و غلتشی وارد بر تیغه در حین برش مشاهده می‌شود که میان تغییر فاصله و این نیروها رابطه خطی وجود دارد. با توجه به نتایج موجود مشاهده می‌شود که برای خط برش اول نیروهای وارد بر تیغه بدون تغییر می‌ماند. ولی برای خط برش دوم نیروهای وارد بر تیغه با افزایش فاصله میان تیغه‌ها افزایش می‌یابد. در حین برش عبور اول باعث ایجاد آسیب در سنگ شده که باعث عبور راحت‌تر تیغه در عبور دوم می‌شود ولی هرچه فاصله میان تیغه‌ها افزایش می‌یابد اثر خط برش اول کاسته می‌شود که باعث افزایش نیروهای وارد بر تیغه می‌شود. با بررسی تغییرات انرژی ویژه در مقابل فاصله میان تیغه‌ها برای تعیین بهینه‌ترین فاصله مشاهده می‌شود که نمودار حاصل سینوسی شکل بوده و فاصله ۷۲ میلی‌متر کمترین میزان انرژی ویژه را به خود اختصاص داده است. به بیان دیگر برای داشتن حداکثر بازدهی در حین حفاری در سنگ ماسه‌ای سخت باید از فاصله ۷۲ میلی‌متری میان تیغه‌ها استفاده نمود.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی محیط سنگی که شامل سه محیط گرانیتی، ماسه‌سنگی و دولومیتی می‌شود از مدل رفتاری جانسون-هلمکوئیست (JH-2) استفاده شده است. مدل رفتاری جانسون-هلمکوئیست ابتدا برای شبیه‌سازی خصوصیات مواد شکننده مانند سرامیک‌ها استفاده می‌شد ولی امروزه از آن برای مدل کردن خصوصیات سنگ و بتن نیز استفاده می‌شود [۱۰]. در این مدل خصوصیات نرم‌شدگی نیز در نظر گرفته می‌شود و شامل مقاومت متناسب با فشار، آسیب، خرابی و اثر نرخ کرنش می‌باشد. در شکل ۱ خلاصه‌ای از مفاهیم مدل جانسون-هلمکوئیست آورده شده است.



شکل (۱). مدل مقاومتی مدل جانسون-هلمکوئیست [۱۰]

مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی سنگ گرانیت و ماسه سنگ و دولومیت به کمک مدل جانسون-هلمکوئیست در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲). پارامترهای محیط‌های سنگی برای شبیه‌سازی با مدل جانسون-هلمکوئیست [۱۰]

Constants	Granite	Constants	Granite
Density (g/cm ³)	2.66	Hugoniot elastic limit HEL (GPa)	4.5
Shear modulus (GPa)	21.9	HEL pressure (GPa)	2.93
Intact strength coefficient A	1.248	Bulk factor β	1.0
Fractured strength coefficient B	0.68	Damage coefficient D ₁	0.008
Strain rate coefficient C	0.0051	Damage coefficient D ₂	0.435
Fractured strength exponent M	0.83	Bulk modulus K ₁ (GPa)	25.7
Intact strength exponent N	0.676	Second pressure coefficient K ₂ (GPa)	-386
Maximum tensile strength T (GPa)	57	Third pressure coefficient K ₃ (GPa)	12800
Maximum normalized fractured strength σ _{F max}			0.16

در این پژوهش سعی بر آن است که با مدل‌سازی عددی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی کانرهد دستگاه TBM در نرم‌افزار ABAQUS و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نتایج فرآیند برش، عملکرد دستگاه TBM در شرایط مختلف تعیین شود.

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی فرآیند برش سنگ از دستگاه برش خطی سنگ (LCM) که در تحقیقات [۱] گزارش شده استفاده شده است. این دستگاه قادر است تا فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه‌های دیسکی را در شرایط محل حفاری شبیه‌سازی کند. همچنین به کمک این دستگاه می‌توان اثر پارامترهای اپراتوری مختلف را در محدوده گسترده‌ای از سنگ‌ها مورد مطالعه قرار داد.

به منظور مدل‌سازی فرآیند برش سنگ به کمک دستگاه LCM ابتدا باید هندسه مدل در نرم‌افزار رسم شود. تیغه دیسکی در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی، یک برش دهنده مقطع ثابت با قطر ۴۳۱ میلی‌متر (۱۷ اینچ) ساخته شرکت رابینز واشنگتن است. نوع برش دهنده B-49225 می‌باشد که به برش دهنده سخت معروف است. ضخامت لبه رینگ حدوداً ۱۱/۵ میلی‌متر (۰/۴۵ اینچ) است که با زاویه ۵ درجه از لبه به سمت تویی به تدریج این ضخامت افزایش می‌یابد. خصوصیات مکانیکی برای تیغه دیسکی، فولاد از نوع AISI-4340 در نظر گرفته شده است و در جدول ۱ آورده شده است. چون مطالعه حاضر بر مکانیسم خردشدگی سنگ بیشتر از ماندگاری نوک تیغه می‌پردازد، سایش تیغه دیسکی در این مدل لحاظ نمی‌شود و بنابراین مدل تسلیم و شکست برای فولاد در خصوصیات مکانیکی آن در نظر گرفته نشده است.

جدول (۱). خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای تیغه دیسکی

نوع مواد	مدول الاستیسیته		تنش تسلیم		ضریب پواسون
	GPa	ksi	MPa	ksi	
فولاد-AISI 4340	۲۰۰	۲۹۰۰۰	۸۶۰	۱۲۳۸۴۰	۰/۲۹

ابعاد هندسه بلوک سنگ در آزمایش برش خطی معمولاً حداکثر تا ۱×۱×۰/۷ متر انتخاب می‌شود؛ اما در این تحقیق به منظور کاهش زمان محاسبات با اندازه ۰/۲×۰/۲×۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. این شرایط برای هندسه مدل سنگ به گونه‌ای انتخاب شده است که بر نتایج تحلیل‌ها اثری نداشته باشد.

می‌شود. سپس در قسمت میانی که فرآیند برش و عبور تیغه دیسکی در آن اتفاق می‌افتد اندازه المان‌ها را کوچکتر و برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته و اندازه المان‌ها را در دو بخش جانبی بزرگتر و برابر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

به منظور دست یافتن به هدف این پژوهش باید از آنالیز حساسیت پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری در شرایط مختلف استفاده کرد. برای انجام آنالیز حساسیت هر پارامتر باید حداقل انرژی صرف شده برای حفاری به ازای مقادیر مختلف آن پارامتر را بدست آورد. بدین منظور در این پژوهش به ازای مقادیر مختلف هر یک از پارامترها آنالیز عددی انجام می‌شود. برای یافتن مقدار بهینه هر پارامتر باید از انرژی ویژه استفاده کرد و مقداری از پارامتر که به ازای آن انرژی ویژه کمینه می‌شود را به عنوان مقدار بهینه پارامتر برای داشتن حداکثر بازدهی گزارش کرد.

برای تعیین انرژی ویژه طبق رابطه (۱) با داشتن جرم اولیه نمونه سنگی و جرم باقی‌مانده از سنگ پس از اتمام فرآیند برش، جرم سنگ کنده شده در طی فرآیند برش بدست می‌آید. با داشتن چگالی نمونه سنگی و جرم سنگ کنده شده، حجم سنگ کنده شده تعیین می‌شود. برای یافتن میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی نیز پس از پایان آنالیز عددی با داشتن نمودار نیروی غلتشی وارد بر تیغه در طول فرآیند برش و حذف قسمت‌های ابتدایی و انتهایی که تحت تأثیر شرایط مرزی می‌باشد و با میانگین‌گیری از مقادیر باقی‌مانده نتیجه مطلوب بدست می‌آید.

$$SE = \frac{MRF \times l_x}{m/\rho} \quad (1)$$

به طوری که در آن SE انرژی ویژه، MRF میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه، l_x اندازه برش، m جرم برش خورده از سنگ و ρ دانسیته سنگ خواهد بود.

در این پژوهش از پارامترهای عمق نفوذ و فاصله بین تیغه‌ها (نسبت فاصله به عمق) و سرعت دورانی برای آنالیز حساسیت در محیط سنگی گرانیته استفاده شده است.

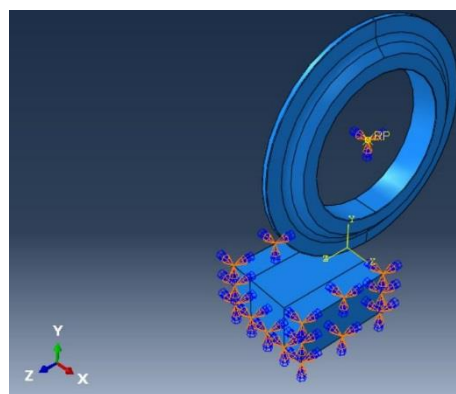
۳. نتایج و بحث

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد دستگاه TBM و بهبود آن می‌باشد. بدین منظور در محیط سنگی گرانیته پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با تعیین مقدار هر یک از این پارامترها که به ازای آن انرژی ویژه حداقل می‌شود به عنوان مقدار بهینه، روشی برای بهبود عملکرد دستگاه ارائه می‌شود.

در این مدل‌سازی تیغه دیسکی به صورت یک جسم صلب مدل خواهد شد. بدین منظور نقطه مرکز تیغه به عنوان نقطه مرجع تعیین می‌شود. حال می‌توان سرعت‌های خطی و دورانی و سایر خصوصیات تیغه را به این نقطه مرجع اختصاص داد.

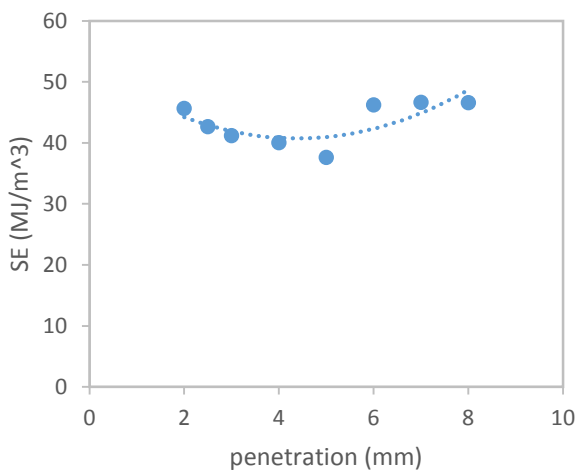
برای اعمال شرایط مرزی می‌توان از شرایط مرزی آزمایش برش خطی استفاده کرد. در این حالت تیغه دستگاه تنها در راستای برش امکان جابجایی و دوران دارد و در سایر راستاها می‌توان با اعمال قید از حرکت جلوگیری کرد. این حالت دقیقاً مشابه کاری است که بلبرینگ‌های موجود در کنار دیسک در حین آزمایش انجام می‌دهند و مانع از حرکت تیغه به چپ و راست در اثر نیروهای اعمالی حین برش می‌شوند. همچنین در این بخش می‌توان سرعت خطی ۲ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۱۰ رادیان بر ثانیه تعیین شده برای مدل‌سازی فرآیند برش را به نقطه مرجع تیغه دیسکی اعمال کرد.

در آزمایش برش خطی نمونه سنگی در داخل یک جعبه قالب‌بندی قرار دارد و اطراف آن نیز توسط بتن پوشانده شده است به همین دلیل در مدل‌سازی عددی به جز وجه بالایی نمونه بقیه سطوح بصورت مقید تعریف می‌شوند. نحوه قرارگیری تیغه و نمونه سنگی و شرایط مرزی مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲). نحوه قرارگیری و شرایط مرزی مدل

موضوع مهمی که در این بخش وجود دارد اندازه المان‌ها می‌باشد. اندازه المان‌ها اگر خیلی بزرگ باشد دقت آنالیز پایین می‌آید و نتیجه دلخواه از مدل‌سازی بدست نمی‌آید. از طرف دیگر اگر اندازه المان‌ها خیلی ریز هم باشد زمان آنالیز بدون اینکه افزایش دقت و مزیتی داشته باشد افزایش پیدا می‌کند. پس نیاز است به کمک آنالیزهای مختلف و همچنین استفاده از مطالعات محققین گذشته اندازه مناسب المان‌ها را پیدا کرد؛ که در این پژوهش با انجام آنالیزهای مختلف به این نتیجه دست یافته شد که برای نمونه سنگی به منظور کاهش حجم محاسبات با استفاده از پارتیشن‌بندی نمونه به یک بخش میانی و دو بخش جانبی تقسیم



شکل (۴). تغییرات انرژی ویژه در مقابل عمق نفوذ سنگ گرانیت

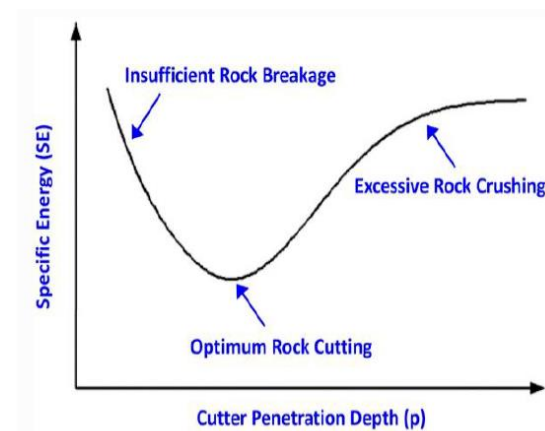
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود به ازای عمق نفوذ ۵ میلی‌متر مقدار انرژی ویژه کمترین مقدار خود را خواهد داشت و به بیان دیگر برای شرایط ذکر شده در فرآیند برش در سنگ گرانیت مقدار نفوذ ۵ میلی‌متر، عمق نفوذ بهینه برای داشتن بهترین عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه می‌باشد.

دومین پارامتر فاصله میان تیغه‌های دیسکی (نسبت فاصله به عمق) می‌باشد. زمانی که فاصله میان دو تیغه خیلی زیاد باشد ترک‌های ایجاد شده ناشی از عبور و برش تیغه تنها در اطراف مسیر برش تشکیل شده و با یکدیگر برخورد نداشته و با برخورد به سطح آزاد نمونه چپ‌ها و تراشه‌های کوچک مثلثی شکلی را تشکیل می‌دهند. در این حالت مصالح موجود میان تیغه سالم باقی‌مانده و یک حائل میان دو بخش آسیب‌دیده زیر تیغه را تشکیل می‌دهند. همچنین اگر فاصله میان تیغه‌ها خیلی کم باشد و یا نیروی وارد بر سنگ خیلی زیاد باشد، ترک‌های ایجاد شده گسترش یافته ولی به علت هم‌پوشانی زیادی که با هم دارند تشکیل یک کانال را داده و در واقع تراشه تشکیل شده حداکثر تراشه ممکن نخواهد بود. ولی در شرایطی که فاصله میان تیغه‌ها به مقدار بهینه خود می‌رسد ترک‌های تشکیل شده مصالح بیشتری را درگیر کرده و باعث می‌شوند در شرایط یکسان با صرف انرژی کمتر مقدار سنگ بیشتری کنده شده و بازدهی حفاری افزایش یابد.

فاصله میان تیغه‌ها بر اندازه تراشه‌های تشکیل شده نیز اثر دارد که این امر باعث تغییر در میزان بازدهی حفاری می‌شود. با افزایش فاصله نیروی عمودی وارد بر تیغه‌ها نیز افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در این حالت تیغه‌ها باید سنگ‌های دست‌نخورده بیشتری مقابله کنند. همچنین افزایش فاصله باعث

اولین پارامتری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است؛ عمق نفوذ می‌باشد. عمق نفوذ و فاصله (همچنین نسبت فاصله به عمق (S/P)) از عوامل مهم و مؤثر بر انرژی ویژه و راندمان حفاری می‌باشند. مطابق شکل ۳ وقتی نسبت فاصله به عمق خیلی کم باشد سطح سنگ تحت برش قرار گرفته پودر می‌شود که باعث صرف انرژی ویژه بالایی می‌شود در مقابل وقتی این نسبت خیلی زیاد باشد تراشه‌های شکل گرفته به علت فاصله زیاد از هم امکان اتصال را نداشته که این امر باعث کاهش راندمان حفاری و در نتیجه صرف انرژی ویژه بیشتری برای حفاری سنگ می‌شود.

برای تعیین مقدار بهینه عمق نفوذ باید با انجام آنالیزهای مختلف برای عمق نفوذهای متفاوت مقدار انرژی ویژه را محاسبه نموده و مقدار عمق نفوذ متناظر با انرژی ویژه کمینه را به عنوان مقدار بهینه عمق نفوذ گزارش نمود. روند کار طبق توضیحات بخش پیشین بوده و پس از تعیین مقدار سنگ کنده‌شده و میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی طبق رابطه ۱ انرژی ویژه را محاسبه نمود. عمق نفوذهای مورد استفاده در این پژوهش برای آنالیز حساسیت، عمق‌های ۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۳). انرژی ویژه در مقابل عمق نفوذ و نسبت فاصله به عمق [۸]

در شکل ۴ روند تغییرات انرژی ویژه در مقابل تغییرات عمق نفوذ تیغه دیسکی در سنگ گرانیت به منظور تعیین عمق نفوذ بهینه نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مشابه توضیحات داده شده، نمودار تغییرات انرژی ویژه در مقابل نسبت فاصله به عمق دارای یک قعر بوده که متناظر با حداقل مقدار انرژی ویژه و مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق می‌باشد. در این حالت مقدار نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵ کمترین مقدار انرژی ویژه را به خود اختصاص داده است. همچنین با توجه به خط روند رسم شده مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق در بازه میان مقادیر ۱۱ و ۱۲ قرار گرفته است و به بیان دیگر با داشتن نسبت فاصله به عمق بین ۱۱ تا ۱۲ در سنگ گرانیت و با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها حفاری بیشترین میزان بازدهی را داشته و می‌توان با کمترین مقدار صرف انرژی حداکثر نتیجه را کسب نمود.

بمنظور مطالعه اثر سرعت دورانی بر راندمان حفاری و تعیین مقدار بهینه این پارامتر لازم است از سرعت دورانی کاترهد استفاده شود. این موضوع به این دلیل است که تیغه‌های دیسکی دارای موتور مجزا نبوده و در اثر چرخش کاترهد و تماس با محیط سنگی مجاور تیغه دوران پیدا می‌کنند. بر روی کاترهد دستگاه TBM تعداد زیادی تیغه در شعاع‌های مختلف قرار دارند. در این پژوهش با در نظر گرفتن کاترهدی با قطر ۶/۵ متر که تیغه‌های دیسکی از شعاع ۱۰ سانتی‌متری تا ۳۲۰ سانتی‌متری بر روی آن تعبیه شده‌اند می‌توان تیغه دیسکی با شعاع قرارگیری ۱/۵ متر به عنوان نماینده تیغه‌ها استفاده نمود.

حال برای بررسی اثر سرعت دورانی و سرعت خطی می‌توان این پارامترها را برای تیغه‌های دیسکی معادل‌سازی کرد. بدین منظور با داشتن سرعت دورانی کاترهد دستگاه می‌توان به کمک رابطه $V = r \cdot \omega$ و شعاع قرارگیری تیغه‌ها سرعت خطی تیغه را بدست آورد. همچنین با داشتن سرعت خطی تیغه و شعاع تیغه و استفاده دوباره از رابطه بالا سرعت دورانی تیغه را نیز بدست آورد.

سرعت دورانی‌های مورد استفاده در این پژوهش برای انجام آنالیز حساسیت نسبت به سرعت دورانی، سرعت‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ دور بر دقیقه می‌باشد.

در شکل ۶ تغییرات انرژی ویژه در مقابل سرعت دورانی برای تیغه قرارگرفته در شعاع ۱/۵ متری نمایش داده شده است.

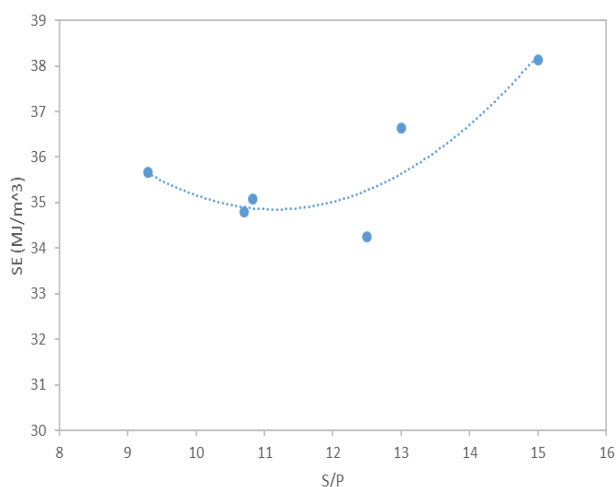
تشکیل تراشه‌های بیشتری می‌شود ولی این موضوع زمانی حداکثر تأثیر خود را دارد که همراه با افزایش عمق نفوذ باشد.

با افزایش فاصله میان تیغه‌ها نیروی غلتشی و نیروی عمودی بیشتر در طول فرآیند برش به تیغه‌ها وارد می‌شود. نرخ افزایش نیروها متناظر با افزایش فاصله، در فواصل کم زیاد است ولی هرچه فاصله بیشتر می‌شود اثر آن بر تغییرات نیروها کمتر می‌شود و در فواصل زیادتر مقادیر نیرو ثابت می‌شود. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که در فواصل زیاد، اثر دو تیغه بر روی یکدیگر از بین رفته و در واقع می‌توان دو تیغه را به عنوان دو تک تیغه در نظر گرفت و دیگر تغییرات فاصله اثری بر فرآیند برش و نیروهای حاصل از آن نخواهد داشت.

با انجام آنالیزهای بیشتر مشاهده می‌شود که در عمق نفوذهای کم مقدار فاصله‌ای که به ازای آن نیروهای وارد بر تیغه ثابت می‌شوند مقدار کمتری خواهد داشت. همچنین افزایش عمق نفوذ باعث افزایش فاصله موردنظر خواهد شد. به همین جهت معمولاً در تحقیقات اثر فاصله و عمق نفوذ را به صورت همزمان و با پارامتر نسبت فاصله به عمق (S/P) می‌سنجند.

به منظور مطالعه اثر فاصله بر بازدهی حفاری سنگ از ۶ آنالیز عددی با نسبت فاصله به عمق‌های مختلف استفاده می‌شود. ۶ آنالیز عددی انجام شده برای سه عمق ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر و دو فاصله ۶۵ و ۷۵ میلی‌متری می‌باشد که در نتیجه آن ۶ نسبت فاصله به عمق ۱۵، ۱۳، ۱۲/۵، ۱۰/۸۳، ۱۰/۷ و ۹/۳ حاصل می‌شود.

نتایج مربوط به آنالیزهای عددی انجام شده در سنگ گرانیت در شکل ۵ آورده شده است.



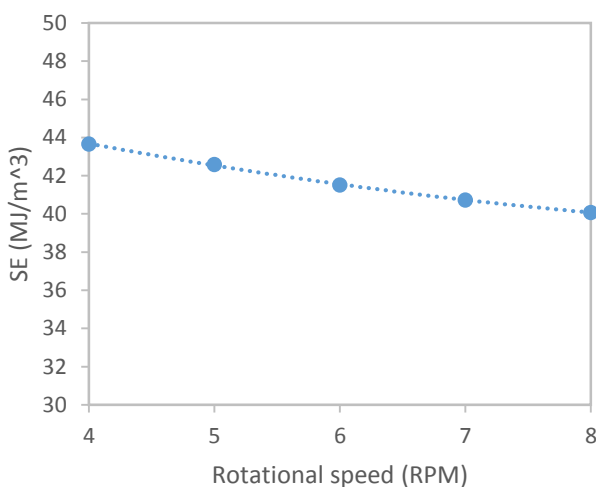
شکل (۵). تغییرات انرژی ویژه در مقابل نسبت فاصله به عمق در سنگ گرانیت

با بررسی‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که رفتار دو پارامتر عمق نفوذ و نسبت فاصله به عمق تیغه‌های دیسکی مشابه یکدیگر بوده و نمودار تغییرات این دو پارامتر در مقابل تغییرات انرژی ویژه حالت U شکل دارد؛ به عبارت دیگر در عمق نفوذها و فاصله بین تیغه‌های کم فرآیند برش سنگ و تشکیل تراشه‌ها و پیوستن آنها به یکدیگر کامل صورت نپذیرفته که باعث هدر رفت انرژی و افزایش انرژی لازم برای حفاری می‌شود. همچنین در مقادیر زیاد نیز به دلیل نیاز بر غلبه بر المان‌های زیادی از سنگ در هر مرحله از حفاری به انرژی زیادی لازم است که عملکرد دستگاه حفاری را تضعیف می‌کند. مقادیر بهینه حفاری مقادیر میانی بازه در نظر گرفته شده (عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵) می‌باشد که با استفاده از این مقادیر برای پارامترهای ذکر شده دستگاه بهترین عملکرد را خواهد داشت.

برخلاف دو پارامتر دیگر اثر سرعت دورانی بر تغییرات انرژی لازم برای حفاری اندک می‌باشد و نشان‌دهنده این موضوع است که اثر سرعت دورانی بر بهبود عملکرد دستگاه TBM محدود می‌باشد و می‌توان از سرعت‌های مجاز دستگاه متناسب با محیط‌های مختلف حفاری استفاده نمود.

۵. مراجع

- [1] Rostami, J., (1997). "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure". PhD thesis, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, USA.
- [2] Pan, Y; Liu, Q; Liu, J; Huang, X; Liu, Q; Peng, X. (2018). "Comparison between experimental and semi-theoretical disc cutter cutting forces: implications for frame stiffness of the linear cutting machine." Arabian Journal of Geosciences, 11(11):266, 2018.
- [3] Gertsch, R; Gertsch, L; Rostami, J. (2007). "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 44 (2007), 238-246.
- [4] Labra, C.; Rojek, J; Onate, E. (2017). "Discrete/Finite Element Modelling of Rock Cutting with a TBM Disc Cutter". Rock Mech Rock Eng (2017) 50:621-638.
- [5] Qi, G; Zhengying, W; Hao, M; Qiao, C. (2016). "Numerical and experimental research on the rock-breaking process of tunnel boring machine normal disc cutters." Journal of mechanical science and Technology 30(4) (2016) 1733-1745.
- [6] Cho, J; Jeon, S; Yu, S; Chang, S. (2010). "Optimum spacing of TBM disc cutter: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method." Tunnelling and underground space technology 25 (2010) 230-244.



شکل (۶). تغییرات انرژی ویژه در مقابل سرعت دورانی برای سنگ گرانیت

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی مقدار انرژی ویژه کاهش می‌یابد و به بیانی دیگر با افزایش سرعت دورانی راندمان حفاری افزایش می‌یابد. البته موضوع دیگری که در این شکل می‌توان به آن اشاره کرد این است که میزان تغییرات انرژی ویژه محدود است و هر چه سرعت دورانی افزایش می‌یابد این تغییرات کمتر می‌شود پس می‌توان نتیجه گرفت که اثر سرعت دورانی به خصوص در سرعت دورانی‌های زیاد کم است و در مقایسه با عمق نفوذ، اثر سرعت دورانی بر راندمان حفاری کمتر از اثر عمق نفوذ می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به آنالیز حساسیت پارامترهای عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌های دیسکی و سرعت دورانی به منظور تعیین مقدار بهینه‌ای که به ازای آن راندمان حفاری بیشینه می‌شود در محیط سنگی گرانیت به منظور بررسی و بهبود عملکرد دستگاه TBM پرداخته شد. در این پژوهش به منظور انجام آنالیزهای عددی از مدل‌سازی دستگاه برش خطی سنگ (LCM) که در تحقیقات محققین قبلی [۱] گزارش شده استفاده شده است. برای انجام آنالیز حساسیت نسبت به سه پارامتر عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها و سرعت دورانی، با انجام چند آنالیز عددی و استخراج نتایج و تعیین انرژی ویژه متناظر با هر آنالیز؛ مقداری از پارامترها که به ازای آن مقدار انرژی ویژه حداقل می‌شود را به عنوان مقدار بهینه پارامتر که در صورت استفاده از آن دستگاه بهترین عملکرد را خواهد داشت گزارش شد.

- [9] Han, M.D; Cai, Z.X; Qu, C.Y; Jin, L.S. (2017). "Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunneling". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017. **70**: p. 286–298.
- [10] Wang, J; Yin, Y; Luo, Ch. (2018). "Johnson-Holmquist-II (JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting". *Applied Science*, 2018, 8, 1675.
- [7] Zare, M; Mikaeil, R. (2016). "Optimization of tunnel boring machine (TBM) disc cutter spacing in jointed hard rock using a distinct element numerical simulation." *Periodica Polytechnica civil engineering* 61(1), pp. 56-65.
- [8] Medel-Morales, R; Botello-Rionda, S. (2013). "Design and optimization of tunnel boring machines by simulating the cutting rock process using the discrete element method". *Computacion y Sistemas*, Vol. 17, No. 3, pp. 329-339.

شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش‌تنیده پس کشیده برای پل‌های بتنی پیش‌تنیده

امید رعنائی^{۱*}، سجاد حیدری^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ دکترای تخصصی عمران - زلزله

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

امروزه پل‌ها نقش مهمی در شبکه‌های حمل و نقل ایفا می‌کنند به طوری که پل‌های بتنی پیش‌تنیده به روش پس کشیده یکی از رایج‌ترین روش‌های ساخت و ساز است که به منظور رفع نیازهای زیرساختی تهیه شده‌اند. از آنجا که این نوع پل‌ها در زمان بهره‌برداری تحت تأثیر آسیب‌های مختلفی مانند آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش‌تنیده قرار می‌گیرند؛ لذا پایش وضعیت یکپارچگی آن‌ها در زمان بهره‌برداری از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در این مقاله برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش‌تنیده از روشی مبتنی بر تغییرات کرنش محوری در صفحه گوه استفاده شده است. بدین منظور ابتدا دو صفحه گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای در نرم‌افزار ABAQUS مدل شد و نقاط کنترلی برای پایش وضعیت در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از سناریوهای آسیب منفرد و ترکیبی اقدام به بررسی عملکرد معیار شناسایی آسیب مبتنی بر تغییرات کرنش محوری شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی به صورت تغییرات کرنش محوری و ایجاد یکسری قله در نقاط نظارتی می‌شود. به طوری که با نزدیک بودن محل رشته دچار آسیب شده به نقاط نظارتی، میزان تغییرات کرنش محوری شدیدتر خواهد بود. لذا با استفاده از آستانه‌های مطرح شده برای هر نوع صفحه گوه می‌توان شماره رشته‌ای که در کابل فلزی پیش‌تنیده دچار آسیب شده است را شناسایی کرد.

کلید واژه‌ها: پایش سلامت سازه‌ها، پل‌های بتنی پیش‌تنیده، شناسایی آسیب، کابل‌های فلزی پس کشیده، صفحه گوه

۱. مقدمه

تنیدگی پس کشیده را به دو دسته پیوسته (Bonded) و غیر پیوسته (Unbonded) تقسیم کرد [۱]. این کابل‌ها در زمان بهره‌برداری تحت شرایط محیطی و ترافیکی دچار آسیب‌هایی از جمله خوردگی و خستگی می‌شوند. لذا در سیستم‌های پایش سلامت توصیه می‌شود که در ساخت پل‌های بتنی پیش‌تنیده از تکنیک پس کشیدگی غیر پیوسته استفاده شود. زیرا در این حالت بجای استفاده از مصالح گروت یا دوغاب سیمانی از مصالح منعطف مانند گریس استفاده می‌شود و در صورت وجود آسیب امکان تعویض رشته‌های کابل فلزی وجود دارد.

تکنیک‌های مختلفی برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش‌تنیده مانند بازرسی بصری [۲-۳]، رادیوگرافی [۴]، روش دینامیکی [۵-۹]، روش‌های مغناطیسی [۱۰-۱۳]، روش‌های الکتریکی [۱۴-۱۵] و روش‌های مبتنی بر انتشار امواج [۱۶-۲۰] ارائه شده است. بازرسی‌های بصری یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های پایش سلامت است که بدون استفاده از تجهیزات تخصصی این عملیات صورت می‌گیرد. اما اگر محل کابل‌ها مدفون باشد، لازم است که یکسری حفرات و مغزه زنی‌ها در محل‌هایی که احتمال

استفاده از کابل‌های فلزی پیش‌تنیده برای ساخت پل‌های بتنی یکی از تکنیک‌های رایج ساخت و ساز است زیرا از مزایای چشمگیری شامل کاهش اندازه اعضا، کنترل خیز و ترک، ساخت سریع پل و انعطاف‌پذیری طراحی برخوردار است [۱]. بسته به ترتیب کشش و مکانیزم انتقال نیروی کابل فلزی به بتن، پیش‌تنیدگی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: پیش‌تنیدگی به روش پیش کشیده و پس کشیده. در پیش کشیدگی ابتدا کابل‌های فلزی توسط جک کشیده می‌شود و سپس عملیات بتن‌ریزی انجام می‌شود. در این حالت پس از اینکه بتن به مقاومت مشخصه رسید، کابل‌ها را از تکیه‌گاه‌های دو طرف آزاد کرده تا نیروی جک آزاد شود. اما در روش پس کشیده ابتدا عملیات بتن‌ریزی انجام شده و سپس کابل‌های فلزی توسط جک به میزان معینی کشیده می‌شود. در این حالت کابل‌ها درون غلاف قرار دارد و به منظور محافظت کابل‌های فلزی در برابر خوردگی معمولاً از مواد پرکننده استفاده می‌شود که بسته به نوع ماده پرکننده می‌توان روش پیش

مقاومت موازی را به سیستم وارد می‌کند که منجر به کاهش مقاومت معادل اندازه‌گیری شده بین رشته و فولاد تقویت‌کننده می‌شود. علی‌رغم مزیت اتصال الکتریکی ساده در صفحه‌گیره‌ها، ایجاد مقاومت ظاهری پایه ممکن است در کاربردهای عملی یک چالش باشد. روش‌های مبتنی بر انتشار موج بر اساس نحوه تولید موج و دریافت توسط سنسور آلتراسونیک به دو بخش آلتراسونیک و انتشار آکوستیک تقسیم می‌شود که در مقایسه با سایر روش‌ها بیش‌تر در سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است اما مهم‌ترین محدودیتی که این روش دارد این است که نیاز به پردازش و فیلتر مناسب برای حذف نویز است و قادر به شناسایی محل شماره رشته دچار آسیب شده نیست. جدول ۱ مزایا و معایب روش‌های شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی را نشان می‌دهد.

یکی از تکنیک‌های شناسایی آسیب در رشته سیم‌های کابل فلزی پایش تنیده، استفاده از تغییرات پاسخ کرنش در صفحه گوه پایش تنیده است. نتایج تحقیقات در مورد روش‌های موجود برای پایش وضعیت کابل‌ها بسیاری از محدودیت‌های آن‌ها از جمله مشکلات دسترسی برای قرار دادن و نصب سنسور، حساسیت به محیط و سر و صدا، پراکندگی زیاد داده‌های اندازه‌گیری شده،

وقوع پارگی است ایجاد شود که به دلیل ماهیت مخرب بودن آن باعث عوارض بیش‌تر می‌شود. روش رادیوگرافی با موفقیت در چندین برنامه برای ارزیابی غیر مخرب (NDE) و تشخیص نقص استفاده شده است. اما کاربرد آن در سازه‌های بتنی محدود شده است زیرا ماهیت ناهمگن بتن تمایل به پراکندگی اشعه X دارد. همچنین علاوه بر تجهیزات گران قیمت و اپراتورهای آموزش‌دیده، مشکلات دسترسی و خطر تشعشع چالش‌هایی است که برای کاربرد این روش وجود دارد. رویکرد مبتنی بر تحلیل مودال، وجود آسیب با استفاده از تغییرات در پاسخ ارتعاش دینامیکی شناسایی می‌شود. اما این رویکرد به تنهایی برای شناسایی محل آسیب کافی نیست و به شدت آسیب وابسته است. در روش‌های مغناطیس باقیمانده (RM)^۱ و نشت شار مغناطیسی (MFL)^۲ با استفاده از آهنربای الکترومغناطیسی اقدام به شناسایی آسیب می‌شود. زیرا در مجاورت یک نقص، به دلیل ناپیوستگی موضعی (نشت) باز توزیع دو قطبی مغناطیسی روی می‌دهد. اما گاهی اوقات میدان مغناطیسی اغلب توسط سایر عناصر فولادی تعبیه‌شده مختل می‌شود و تفسیر سیگنال را دشوار می‌کند. رویکرد مبتنی بر مقاومت الکتریکی بر اساس میزان مقاومت ظاهری برای عبور یک جریان متناوب است. وجود یک نقص یک

جدول (۱). مزایا و معایب روش‌های شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی

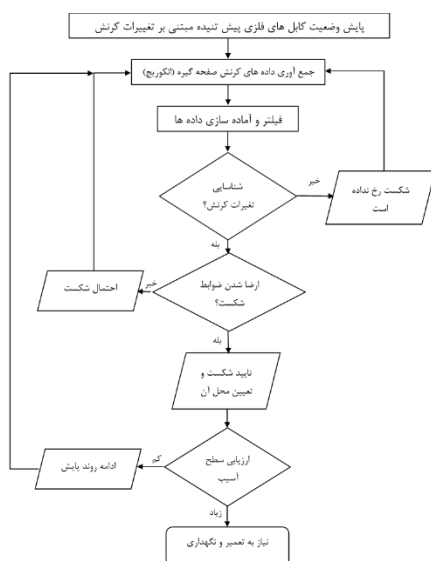
معایب	مزایا	تکنیک‌ها	روش‌های شناسایی آسیب کابل
- پارگی کابل بایستی به صورت فیزیکی قابل مشاهده باشد	+ سادگی		بازرسی بصری
- ماهیت ناهمگن بتن باعث پراکندگی اشعه X می‌شود. - تجهیزات گران قیمت، خطر تشعشع	+ جزء بازرسی‌های غیر مخرب است.		رادیوگرافی
- ایجاد تغییرات در پارامترهای مودال به شدت وابسته به میزان آسیب است (عدم حساسیت نسبت به آسیب‌های کوچک). - عدم شناسایی محل آسیب	+ می‌تواند به طور کلی شناسایی کند که آیا آسیب در سازه رخ داده است یا نه.	استفاده از پارامترهای مودال	روش دینامیکی
- تحت تأثیر قرار گرفتن میدان مغناطیسی توسط عناصر فولادی تعبیه شده و نیاز به پردازش سیگنال است که نسبتاً از پیچیدگی بالایی برخوردار است.	+ به تعداد کمی سنسور مورد نیاز است.	مغناطیس باقیمانده (RM) نشت شار مغناطیسی (MFL)	روش‌های مغناطیسی
- تجهیزات گران قیمت (آنالیزگر مقاومت ظاهری) - عدم توانایی محل شناسایی آسیب	+ فقط در مکان‌های صفحه‌گیره نیاز به دسترسی است. + در پدیده‌های بدون پارگی کم‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.	روش مبتنی بر مقاومت الکتریکی (EMI)	روش‌های الکتریکی
- پردازش و فیلتر مناسب برای حذف نویز پس زمینه مورد نیاز است. - قادر به شناسایی آسیب در رشته نیست. نیاز به نظارت مستمر است.	+ در روش (AE) به تعداد کمی سنسور نیاز است و کافی است بر روی سطح بتن نصب شود	آلتراسونیک (GWUT) انتشار آکوستیک (AE)	روش‌های مبتنی بر انتشار موج (بر اساس نحوه تولید موج و دریافت توسط سنسور آلتراسونیک)

^۲ Magnetic flux leakage

^۱ Remnant magnetism

پیش‌تنیده وجود دارد؛ در حالی که مدل شناسایی آسیب مبتنی بر گروه‌های رشته‌های کابل فلزی، برای صفحات گوه کوچک با چیدمان عدم تقارن کاربرد دارد. بدین منظور می‌توان صفحات گوه را به دو دسته تقسیم کرد: (۱) صفحات گوه‌ای که کم‌تر از رشته‌های کابل، از کرنش سنج استفاده می‌شود (کابل‌های بزرگ‌تر). (۲) صفحات گوه‌ای که به تعداد رشته‌های کابل، از کرنش سنج استفاده می‌شود (کابل‌های کوچک‌تر).

شکل ۱ یک چارچوب پایش وضعیت کابل فلزی پیش‌تنیده با رویکرد مبتنی بر تغییرات کرنش نشان می‌دهد. هدف از این چارچوب، ارائه هشدارهای لازم برای هنگامی که شکست در رشته‌های کابل فلزی پیش‌تنیده رخ داده است. در این روش جمع‌آوری داده‌ها و پردازش آن به صورت خودکار است. در این چارچوب ابتدا یک صفحه گوه چند رشته‌ای با تعدادی کرنش سنج در نظر گرفته شده است؛ که کرنش‌های محوری را مطابق با یک برنامه از پیش تعیین شده برداشت می‌کند. این برنامه اندازه‌گیری می‌تواند به صورت روزانه یا هفتگی باشد و معمولاً در هنگام شب که بارهای ترافیکی و دما در پایین‌ترین حد خود است، اقدام به اندازه‌گیری کرنش می‌نماید. داده‌های کرنش صفحه گیره (انکورج) برای مدت کافی برای گرفتن میانگین سطح کرنش در هر روز جمع‌آوری می‌شود. سپس داده‌های پردازش شده با داده‌های اولیه مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا بتوان تشخیص داد که آیا تغییر کرنش قابل توجهی در سیستم صفحه گیره رخ داده است؟ که با این عمل می‌توان اقدام به شناسایی آسیب در کابل کرد. پس از تشخیص آسیب در کابل فلزی پیش‌تنیده، در مرحله بعد اقدام به شناسایی آسیب در رشته کابل می‌شود. در نهایت اقدام به ارزیابی میزان خسارت برای انجام عملیات بهسازی می‌شود.



شکل (۱). چارچوب پایش وضعیت کابل‌های فلزی پیش‌تنیده

عدم حساسیت نسبت به آسیب‌های نسبتاً کوچک مانند آسیب در سیم‌های کابل چند رشته‌ای و هزینه بالا را نشان می‌دهد. اگرچه پایش وضعیت کابل‌ها به روش آکوستیک در چندین برنامه پایش پل‌ها به اثبات رسیده است، اما این امر به روش‌های پیچیده فیلتراسیون، سازوکار دستیابی و پردازش داده‌های اختصاصی نیاز دارد به طوری که قادر به شناسایی آسیب در رشته آسیب دیده نیست. روش جدید مبتنی بر پاسخ کرنش صفحه گوه، بسیاری از محدودیت‌های فوق را پشت سر می‌گذارد و گزینه مناسبی برای تشخیص آسیب در رشته‌های کابل فلزی چند رشته‌ای است [۲۱].

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از تغییرات کرنش محوری در صفحه گوه محل شماره رشته‌ای که در کابل فلزی پیش‌تنیده دچار آسیب شده است را شناسایی کرد. بدین منظور دو صفحه گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای در نرم‌افزار ABAQUS مدل شد. سپس با استفاده از نقاط کنترلی که در محیط پیرامونی صفحه گوه در نظر گرفته شد، می‌توان رشته دچار آسیب را شناسایی کرد. عملکرد این معیار شناسایی آسیب معرفی شده با استفاده از سناریوهای آسیب منفرد و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش‌تنیده پس‌کشیده غیر پیوسته

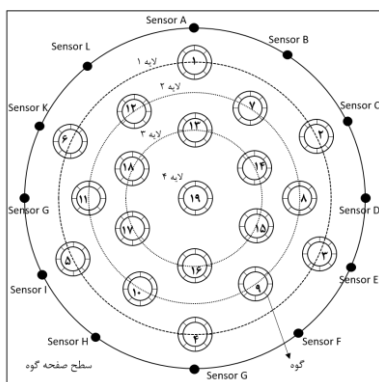
صفحات گوه که در صنعت پل استفاده می‌شود از نظر تعداد و الگوی رشته‌ها متفاوت است. روش پیشنهادی برای پایش وضعیت کابل‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که رشته یا رشته‌های آسیب دیده را می‌توان با تعداد بهینه حسگر و با به حداقل رساندن فاصله سنسورها در صفحه گیره، اقدام به شناسایی آسیب نمود. در این بخش به ارائه یک چارچوب برای شناسایی آسیب در مجموعه رشته‌های کابل‌های فلزی پیش‌تنیده در صفحه گوه براساس روش پیشنهادی عبدالله و همکاران [۲۱] پرداخته می‌شود. به طوری که براساس پیچیدگی، تعداد و هندسه چیدمان رشته‌های کابل فلزی پیش‌تنیده در صفحه گوه، می‌توان دو الگوریتم شناسایی آسیب برای کابل‌های فلزی تعریف کرد.

۱. شناسایی آسیب براساس چیدمان مجموعه لایه‌های رشته‌های کابل فلزی (a layer-based method)

۲. شناسایی آسیب براساس مجموعه گروه‌های رشته‌های کابل فلزی (a group-based method)

معمولاً مدل شناسایی آسیب مبتنی بر لایه‌های رشته‌های کابل فلزی پیش‌تنیده، برای صفحات گوه بزرگ کاربرد دارد زیرا سنسورهای کم‌تری در مقایسه با تعداد رشته‌های کابل فلزی

پایش بر روی محل تقاطع خطوط شعاعی با سطح محیطی صفحه گوه انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که در روش پیشنهادی می‌توان با استفاده از تغییرات کرنش‌های محوری اقدام به شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده نمود.



شکل (۲). موقعیت کرنش سنج‌ها و رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده ۱۹ رشته‌ای

۲-۱-۲. توسعه الگوریتم پیشنهادی

در شکل ۳ خلاصه مراحل مختلف با استفاده از پارامترهای معرفی شده و آستانه‌های مختلف، برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ارائه شده است که به دنبال آن شرح الگوریتمی گام‌به‌گام ارائه می‌شود.

۱. محاسبه حداکثر درصد تغییرات کرنش

بدین منظور حداکثر درصد تغییرات کرنش (P)، برای نقاط کنترلی مورد نظر براساس رابطه (۱) مورد محاسبه قرار می‌گیرد که i بیانگر تعداد نقاط کنترلی است.

$$p = \max(\Delta \varepsilon_i) \quad (1)$$

درصد تغییرات کرنش در نقاط کنترلی $(\Delta \varepsilon_i)$ براساس رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{(\varepsilon_i)_b - (\varepsilon_i)_a}{(\varepsilon_i)_b} \times 100 \quad (2)$$

که $(\varepsilon_i)_a$ و $(\varepsilon_i)_b$ به ترتیب مقدار کرنش نقطه کنترلی مورد نظر قبل و بعد از خرابی است.

۲. ارزیابی وقوع خرابی در کابل‌های پیش تنیده

شناسایی آسیب با مقایسه بین حداکثر درصد تغییرات کرنش با مقدار آستانه مجاز ϕ به صورت زیر صورت می‌گیرد. به طوری که اگر حداکثر درصد تغییرات کرنش بیش از آستانه مجاز باشد در کابل فلزی پیش تنیده آسیب رخ داده است.

لذا الگوریتم شناسایی آسیب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

۲-۱. شناسایی آسیب براساس چیدمان مجموعه لایه‌های رشته‌های کابل فلزی ۱۹ رشته‌ای

یکی از چالش‌های اصلی در شناسایی آسیب مجموعه رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، الگوی توزیع رشته‌ها در صفحه گوه است. در صفحات گوه متقارن که توزیع رشته‌ها به صورت لایه‌های دایره‌ای شکل با فواصل مختلف از مرکز سطح گوه قرار گرفته است؛ از روش فوق مبتنی بر چیدمان مجموعه لایه‌ها استفاده می‌شود. به طور مثال در صفحات ۱۹ رشته‌ای که به صورت متقارن توزیع رشته‌ها قرار گرفته است؛ می‌توان مجموعه رشته‌ها را به صورت چند لایه با دایره متحدالمرکز در نظر گرفت. در این حالت لایه‌های خارجی به دلیل نزدیک بودن به نقاط پایش از دقت بالایی برخوردار است. به این ترتیب، شکستگی در لایه‌های خارجی در مقایسه با لایه‌های داخلی، قله تیزتری را در نمودارهای تغییر کرنش ایجاد می‌کند. در واقع با استفاده از نمودار تغییرات ناهمسان کرنش می‌توان به وجود آسیب پی برد که برای شناسایی آسیب می‌توان از دو پارامتر استفاده کرد: حداکثر درصد تغییر کرنش (P) و حداکثر درصد نسبی تغییر کرنش (T). سپس این پارامترها با گروهی از آستانه‌های از پیش تعیین شده $(\phi, \gamma, \psi, \lambda)$ مقایسه می‌شود تا رویکرد آسیب در کابل تأیید شود. از آنجا که هر رشته کابل فلزی پیش تنیده در فاصله متفاوتی از نقاط پایش کرنش قرار دارد، تغییرات کرنش محاسبه شده با فاصله بین نقاط پایش و رشته‌های کابل نرمال می‌شوند.

۲-۱-۱. نحوه سنسورگذاری

به منظور شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ابتدا بایستی یک الگوریتم هندسی برای نحوه چیدمان رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده مشخص شود. سپس با استفاده از عملیات سنسورگذاری (کرنش سنج‌ها)، مقدار تغییرات کرنش برای پایش وضعیت عملکرد کابل‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

نحوه چیدمان رشته‌ها در صفحات گوه ۱۹ رشته‌ای به صورت لایه‌های دایره‌ای شکل متحدالمرکز است، که با فاصله شعاعی مختلفی از مرکز صفحه گوه قرار گرفته است (شکل ۲). لذا سطح صفحه گوه به چهار لایه تقسیم شده است؛ که لایه یک به عنوان بیرونی‌ترین لایه شامل رشته‌های ۱-۶، لایه دوم شامل رشته‌های ۷-۱۲، لایه سوم شامل رشته‌های ۱۳-۱۸ و لایه ۴ شامل رشته ۱۹ است. الگوی رشته در چنین صفحه گوه منجر به تعداد خطوط شعاعی منحصر به فرد می‌شود، زیرا چندین رشته مختلف لایه‌ها روی همان خط شعاعی قرار می‌گیرند. بنابراین فقط ۱۲ خط شعاعی برای ۱۹ رشته لازم است. برای به حداقل رساندن فاصله سنسور و رشته، سنسورها بایستی روی خطوط شعاعی اتصال‌دهنده مرکز صفحه گوه و هر رشته قرار گیرند. لذا نقاط

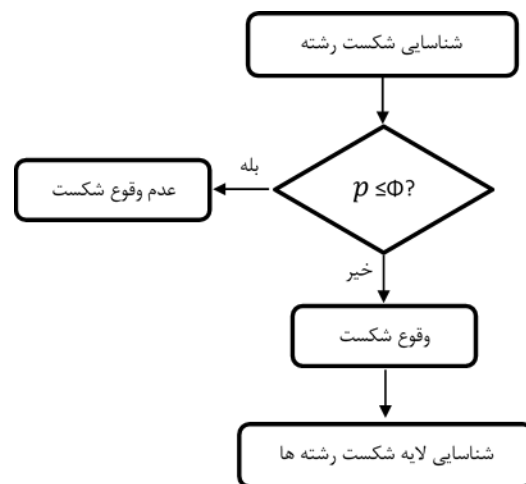
تغییر کرنش نسبی در نقاط نظارتی، منجر به یک قله مشخص در نزدیک‌ترین نقطه نظارت در رشته آسیب دیده می‌شود و اندازه قله میزان آسیب بالقوه را نشان می‌دهد. لذا با توجه به نحوه توزیع رشته‌ها در صفحه گیره، یک الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که با توجه به نحوه توزیع رشته‌ها برخلاف روش قبل، از روش شناسایی آسیب مبتنی بر گروه‌های رشته‌ای استفاده شده است که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

در برنامه پیشنهادی انتظار می‌رود که در اولین پارگی رشته کابل، باعث اوج تغییر کرنش در محل نزدیک حسگرها شود که به راحتی می‌توان رشته آسیب دیده را شناسایی کرد. با این حال عوامل مختلفی مانند پارگی‌های بعدی در رشته‌های دیگر کابل، نقص در محل گوه‌ها و تحمل صفحه گوه بر روی صفحه گیره باعث تغییرات تنش و در نتیجه تغییرات توزیع کرنش شود که نیاز به بررسی دقیق‌تر برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل است. در نتیجه به جای در نظر گرفتن تنها نزدیک‌ترین کرنش سنج نزدیک به رشته دچار آسیب دیده، لازم است ترکیبی از سنسورهای کمکی در نظر گرفته شود. در مدل پیشنهادی، نزدیک‌ترین و دو سنسور مجاور هر رشته یک گروه سنسور (S) برای آن رشته تشکیل می‌دهد که رشته‌های موجود در یک بخش (G) توسط یک گروه سنسور مورد پایش قرار می‌گیرد.

۲-۱-۲. اثرات الگوی گوه در صفحه گیره و تنظیم

محل سنسورها (نقاط پایش)

به منظور شناسایی آسیب در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای ابتدا لازم است که نحوه چیدمان رشته‌ها در سطح صفحه گیره مورد بررسی قرار گیرد تا براساس آن نقاط نظارتی تعیین گردد. لذا براساس نحوه توزیع رشته‌ها، صفحه گوه را می‌توان به ۶ برش با زاویه ۶۰ درجه تقسیم کنیم که نقاط کنترلی G, H, I, J, K و L برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که رشته‌های درون هر برش ۶۰ درجه یک گروه رشته را تشکیل می‌دهد. شکل ۴ نمای کلی تعیین نقاط کنترلی برای صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۳). الگوریتم پیشنهادی معیار شناسایی آسیب

۲-۱-۳. سناریوهای آسیب

در این پژوهش به منظور شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پل‌های بتنی پیش تنیده به روش پس کشیده، روشی مبتنی بر تغییرات نسبی کرنش در محل گیره‌ها (anchorage) ارائه شده است. به این ترتیب می‌توان پارگی در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را با مشاهده تغییر غیریکنواخت میدان کرنش بر روی منطقه گیره‌ها در مقابل تغییر یکنواخت کرنش‌ها تشخیص داد. روش این معیار شناسایی آسیب معرفی شده بدین صورت است که ابتدا یک مدل المان محدود براساس مشخصات گیره‌ها که در بخش قبل توضیح داده شد؛ تهیه می‌شود و کرنش محوری ایجاد شده در اطراف گیره‌ها (محل سنسورها) بدون هیچ آسیبی در کابل‌ها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. سپس چند سناریو آسیب مختلف برای هر یک از کابل‌ها معرفی می‌شود. این سناریوهای آسیب می‌تواند به صورت پارگی منفرد در یک رشته کابل فلزی یا به صورت پارگی ترکیبی در چند رشته کابل فلزی باشد.

۲-۲. شناسایی آسیب براساس مجموعه گروه‌های

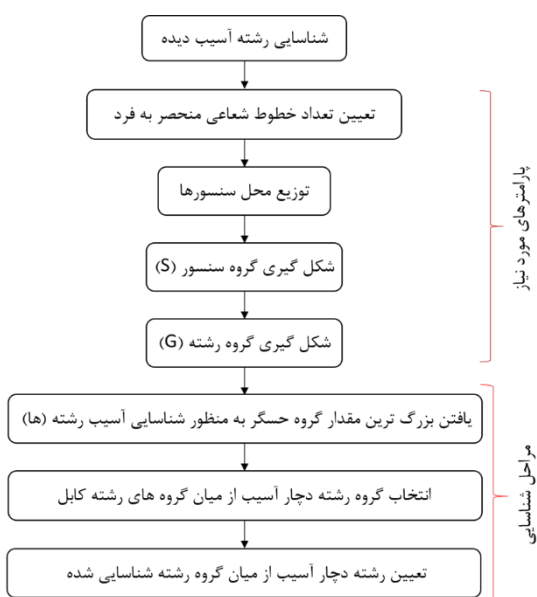
رشته‌های کابل فلزی (a group-based method) ۱۲ رشته‌ای

در این بخش یک الگوریتم کارآمد برای شناسایی خودکار رشته‌های آسیب دیده در کابل پیش تنیده فلزی ارائه می‌شود. این مدل با توجه به شرایط واقعی؛ مانند اثرات پارگی رشته (ها) بعدی کابل و محل قرارگیری گوه‌های مختلف در سطح صفحه گیره همراه با توزیع کرنش صفحه گیره در نظر گرفته شده است.

مفهوم شناسایی آسیب در این روش بدین صورت است که بخشی از صفحه گوه در نزدیکی محل وقوع آسیب کرنش بیش‌تری در مقایسه با منطقه دورتر تجربه می‌کند. به طوری که

۲-۲-۲. توسعه الگوریتم پیشنهادی

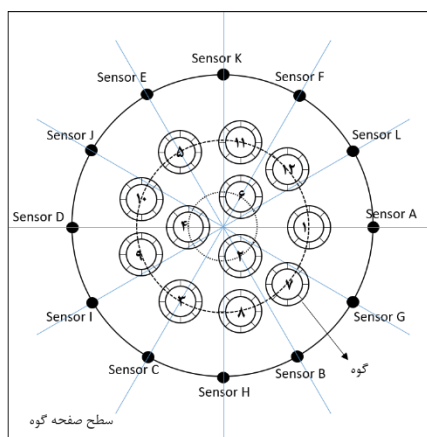
به منظور شناسایی پس از شکل‌گیری گروه‌های سنسور و رشته، نخستین مرحله یافتن گروه سنسوری است، که بیشترین تغییرات کرنش را تجربه می‌کند. سپس رشته مربوط به بزرگ‌ترین گروه سنسور و دو رشته مجاور آن برای شناسایی گروه (های) رشته دچار آسیب در نظر گرفته می‌شود. لذا با توجه به الگوریتم پیشنهادی می‌توان چارچوب کلی برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را در شکل ۵ مشاهده کرد.



شکل (۵). الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای

پس از شناسایی گروه حسگری که بیش‌ترین تغییر کرنش را تجربه می‌کند، لازم است که براساس الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ اقدام به شناسایی آسیب در رشته کابل فلزی پیش تنیده شود. به طور مثال اگر گروه سنسور ۲S، ۷S یا ۸S بیشترین کرنش را تجربه کند، گروه رشته ۲G که شامل رشته‌های ۲،۷ و ۸ است در آن احتمال وقوع شکست است. اما بایستی رشته‌های مرزی ۱ و ۳ مورد بررسی قرار گیرد؛ به طوری که اگر گروه سنسور ۷S یا ۸S بیشترین کرنش را تجربه کند بایستی با استفاده از فلوجارت ذکر شده مقادیر گروه سنسور ۲S با گروه سنسور ۹S و ۱۲S مقایسه شود تا بتوان دید در کدام گروه سنسور ۱G، ۲G یا ۳G شکست رخ داده است.

در تعیین رشته دقیق درون گروه ۲G (۲،۷،۸) سنسورهای گروه ۱S (L، A، G) و ۳S (I، C، H) باید مقایسه شود. اگر رشته ۲ دچار آسیب شده باشد انتظار می‌رود گروه سنسور ۱S و ۳S تقریباً برابر باشد. زیرا این دو گروه سنسور فاصله یکسانی از رشته شماره ۲ دارد. بنابراین، نسبت بین ۱S و ۳S با آستانه β



شکل (۴). موقعیت کرنش سنج‌ها و رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده ۱۲ رشته‌ای

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید، ۶ گروه رشته داریم به طوری که G1 بیانگر رشته ۱ و G2 بیانگر رشته‌های ۲،۷ و ۸ است. با توجه به نحوه گروه‌بندی رشته‌ها می‌توان ۶ نقطه کنترلی برای پایش وضعیت رشته‌ها در صفحه گوه معرفی کرد ولی به دلیل وجود مرز مشترک بین رشته‌ها لازم است ۶ نقطه کنترلی دیگر در میانه ۶ نقطه کنترلی اول در نظر گرفت. بنابراین تعداد کل نقاط نظارت شامل ۱۲ نقطه است که به ازای هر رشته به محور شعاعی منحصر به فرد می‌توان در نظر گرفت. از طرف دیگر با توجه به نقاط کنترلی، برای هر رشته می‌توان سه سهم ۳ نقطه کنترلی نزدیک به آن را در نظر گرفت به عنوان مثال، برای رشته شماره ۱، از سه نقطه کنترل پایش A، L، G و S1 استفاده کرد و برای رشته شماره ۲، از سه نقطه کنترل پایش G، B و H (S2) می‌توان استفاده کرد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، گروه سنسورهای ۲S، ۷S و ۸S با گروه چند رشته‌ای ۲G مطابقت دارد. به طور مشابه گروه سنسور ۴S، ۹S و ۱۰S با گروه چند رشته‌ای ۴G و گروه سنسور ۶S، ۱۱S و ۱۲S با گروه چند رشته‌ای ۶G مطابقت دارد و بقیه گروه‌های سنسور ۱S، ۳S و ۵S به ترتیب با گروه تک رشته‌ای ۱G، ۳G و ۵G مطابقت دارد.

جدول (۲). مجموع تغییر کرنش نسبی در محل سه سنسور نزدیک به هر یک از رشته‌ها

$S1 = L + A + G$	$S7 = A + G + B$
$S2 = G + B + H$	$S8 = B + H + C$
$S3 = H + C + I$	$S9 = C + I + D$
$S4 = I + D + J$	$S10 = D + J + E$
$S5 = J + E + K$	$S11 = E + K + F$
$S6 = K + F + L$	$S12 = F + L + A$

ترکیبی از وقوع پارگی‌های پی در پی برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده به عنوان سناریوی آسیب در نظر گرفته شده است.

سناریوی آسیب در نظر گرفته شده برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی بدین صورت است که به ترتیب رشته ۲،۳ و ۸ دچار آسیب شود. علت استفاده از این سناریو آسیب این است که علاوه بر تحقق اهداف ذکر شده در قسمت بالا، عملکرد الگوریتم برای گروه‌های طبقه‌بندی شده را بررسی می‌کند.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای هر یک از صفحات گوه ۱۹ و ۱۲ رشته‌ای با توجه به سناریوهای آسیب مختلف مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تلیل‌های مربوط به هر یک از صفحات گوه، ضرایب مربوط به آستانه‌های پارگی مورد بررسی قرار گرفت.

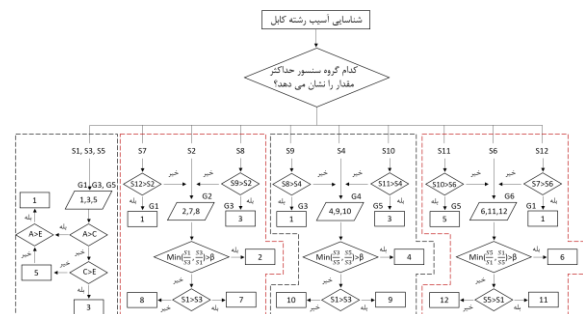
۳-۱. نتایج مدل المان محدود (FEM) برای صفحه گوه ۱۹ رشته‌ای

هدف از این مدل توسعه یافته بررسی قابلیت شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده است که معمولاً در صنعت استفاده می‌شود. لذا با استفاده از چند نقطه پایش، میزان کرنش محوری صفحه گیره استخراج شده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی اقدام به شناسایی آسیب در صفحه گیره شد. لازم به ذکر است که مدل المان محدود (FEM) برای طیف گسترده‌ای از سناریوهای آسیب تهیه و تولید شد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که به طور کلی، اوج تغییرات کرنش در نزدیک‌ترین محل پارگی رشته در محیط صفحه گیره اتفاق می‌افتد و شدت تغییرات کرنش با شدت آسیب افزایش می‌یابد. شکل ۷ نشان می‌دهد که حداکثر تغییرات کرنش در ۲۱۰ درجه مکانی از محور اصلی صفحه گوه رخ داده است که نزدیک‌ترین مکان آن رشته ۱۰ است که نشان‌گر آسیب در آن رشته کابل فلزی پیش تنیده است. به طوری که با افزایش شدت آسیب میزان تغییرات کرنش افزایش می‌یابد. لذا در جایی که نتایج همراه با تغییر شدید در میزان کرنش محوری همراه است، می‌توان وقوع پارگی را با استفاده از الگوریتم توسعه یافته شناسایی نمود. به طور مثال نقطه H که نزدیک‌ترین نقطه به رشته ۱۰ کابل فلزی پیش تنیده است (سناریو آسیب ۱)، بالاترین تغییر کرنش را تجربه می‌کند و پس از آن نقاط G و I که در مجاورت نقطه H قرار دارند، تغییرات کرنش را تجربه می‌کنند. به طوری که هرچه از محل آسیب دورتر شویم میزان تغییرات کرنش محوری کاهش می‌یابد.

مقایسه می‌شود که نزدیک به واحد است. اگر ۱S بیشتر از ۳S باشد، رشته ۷ دچار آسیب شده است در غیر این صورت رشته ۸ دچار آسیب شده است. بنابراین همین روش را می‌توان برای گروه سنسور ۴S، ۹S و ۱۰S و گروه سنسور ۶S، ۱۱S و ۱۲S انجام داد.

در صورتی که گروه سنسور ۱S، ۳S یا ۵S بیشترین مقدار کرنش را تجربه کند، شکست در گروه تک رشته‌ای ۱،۳ یا ۵ رخ داده است. به منظور تعیین دقیق شکست رشته ۱،۳ یا ۵ باید دید که در کدام سنسور A، C یا E حداکثر کرنش تجربه می‌شود.



شکل (۶). فلوجارت شناسایی آسیب رشته در صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای

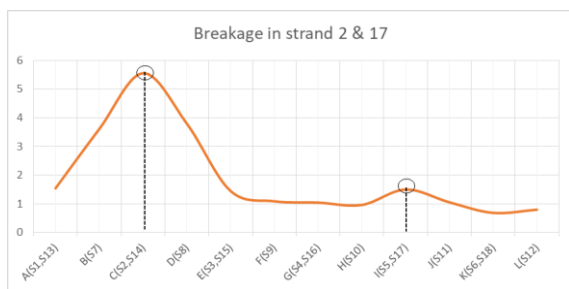
۲-۲-۲. سناریوهای آسیب

مدل پیشنهادی برای شناسایی آسیب در صفحه گیره ۱۲ رشته‌ای به گونه‌ای است که بایستی حداقل به اندازه رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، خطوط شعاعی تقسیم‌کننده وجود داشته باشد. بنابراین هر یک از خطوط شعاعی به عنوان یک نقطه پایش برای رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده در نظر گرفته می‌شود. لذا حداقل نیاز به ۱۲ سنسور است که با استفاده از تغییرات کرنش در نزدیکی محل آسیب می‌توان آسیب را شناسایی نمود. در شرایط ایده‌آل اگر در یک رشته کابل فلزی دچار شکست شود، حداکثر تغییر کرنش به سادگی در نزدیک‌ترین محل کرنش سنج اتفاق می‌افتد که می‌توان آسیب را شناسایی نمود. که در الگوریتم پیشنهادی برای صفحه گوه ۱۹ رشته‌ای نشان داده شده است.

با این حال، در شرایط واقعی عوامل متعددی مانند پارگی متوالی در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده، نشست متفاوت قطعات گوه به دلیل نقص هندسی باعث تغییر در مکانیزم توزیع کرنش شود. در نتیجه برای شناسایی آسیب نیاز است که بجای در نظر گرفتن نزدیک‌ترین نقطه پایش (کرنش سنج) مشارکتی از نقاط پایش مجاور آن در نظر گرفته شود. لذا در این پژوهش برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی برای این صفحه گوه ۱۲ رشته،

نزدیک و دور از نقاط پایش نشان می‌دهد؛ که در ادامه به این نوع سناریوهای آسیب می‌پردازیم.

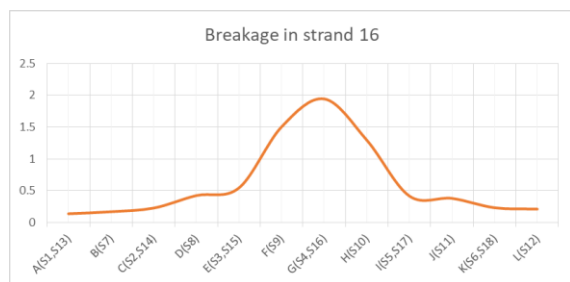
در این حالت مشاهده شده است که میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی C برای حالتی که پارگی در رشته شماره ۲ رخ دهد در حدود ۵,۵٪ است و برای حالتی که پارگی در رشته شماره ۱۷ رخ دهد میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی I در حدود ۱,۹ درصد است.



شکل (۹). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۳

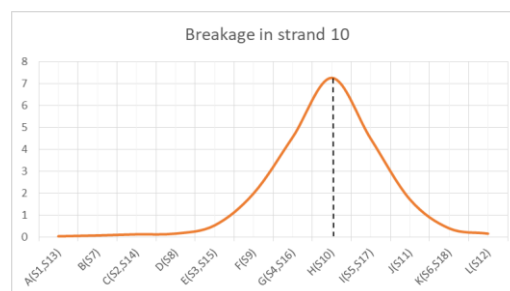
هدف از سناریوهای آسیب شماره ۴ و ۵ این است که میزان تغییرات کرنش محوری در صورت وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی را متناسب با فاصله آن‌ها از نقاط نظارتی آن‌ها مورد بررسی قرار دهیم. لذا در سناریوی آسیب ۴، به بررسی آسیب در شماره رشته ۱۶ که فاصله دورتری نسبت به نقطه کنترلی G دارد مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

بر اثر پارگی در رشته ۱۶ کابل فلزی پیش تنیده تغییر کرنش محوری در حدود ۲٪ مشاهده می‌کنیم در حالی که اگر پارگی در رشته شماره ۴ کابل فلزی رخ می‌داد، میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه کنترلی G بیشتر خواهد بود.



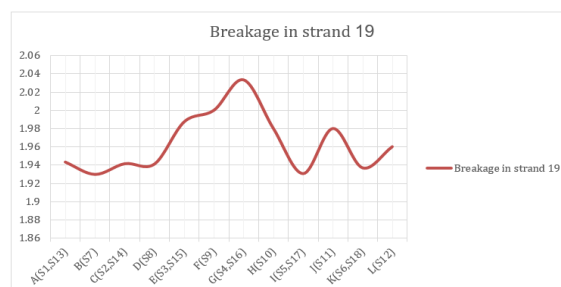
شکل (۱۰). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۴

در سناریو آسیب ۵، به بررسی وجود آسیب در رشته ۵ کابل فلزی پیش تنیده پرداخته شده است. که در این حالت رشته مورد نظر فاصله کمتری به نقطه نظارتی I دارد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌کنید، میزان تغییرات کرنش محوری در نقطه نظارتی I در حدود ۴,۵ درصد است در حالی که در سناریو آسیب



شکل (۷). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۱

در سناریو آسیب ۲، اگر رشته مرکزی (۱۹) کابل فلزی پیش تنیده دچار آسیب شود، همگی نقاط نظارتی به یک اندازه میزان تغییرات کرنش را تجربه می‌کنند و هیچ قله‌ای در نمودار تغییرات تنش مشاهده نمی‌شود. علت تغییر یکنواخت کرنش محوری این است که تمام نقاط نظارتی فاصله یکسانی از محل آسیب دارند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنید؛ برای سناریو آسیب ۲ که رشته مرکزی دچار آسیب شده است کلیه نقاط نظارتی تغییرات کرنش محوری در حدود ۱,۹۳ تا ۲ درصد را تجربه می‌کند که تقریباً میزان تغییرات کرنش محوری برای کلیه نقاط نظارتی یکسان است.



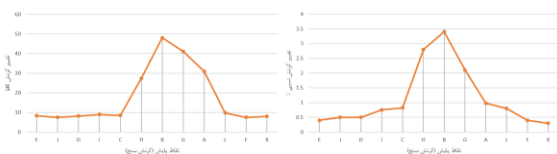
شکل (۸). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۲

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید، میزان تغییرات کرنش محوری ناشی از پارگی در رشته‌های ۲ و ۱۷ کابل فلزی پیش تنیده را نشان می‌دهد (سناریو ۳ آسیب). همانطور که انتظار می‌رفت، یک تغییر کرنش محوری بزرگ در محل C به دلیل پارگی در رشته ۲ کابل فلزی روی داده است، بنابراین یک قله در محل C شکل گرفته است. در این سناریو حتی اگر پارگی دیگری در سایر رشته‌ها روی دهد باز هم می‌توان یافت، همانطور که در این سناریو در محل نقطه پایش I یک تغییر کرنش محوری دیگری روی داده است و به صورت قله نمایان شده است. از آنجا که ایجاد قله در محل I می‌تواند پارگی در رشته‌های ۵ یا ۱۷ باشد، لذا به منظور تشخیص آن دو سناریو آسیب (سناریو ۴ و ۵) تعریف شد. این سناریوها میزان تغییرات کرنش محوری در فواصل

تغییرات بین ۰,۳ و ۰,۷ باشد، احتمال پارگی در رشته‌های لایه دو وجود دارد. لازم به ذکر است که اگر میزان تغییرات بیش‌تر از ۰,۷ و کم‌تر از ۱ باشد، احتمال وقوع پارگی در رشته‌های لایه اول وجود دارد.

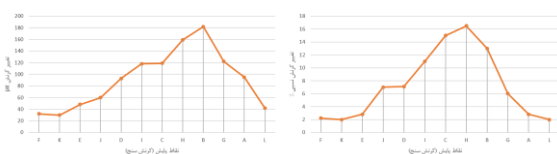
۲-۳. نتایج مدل المان محدود (FEM) برای صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای

با توجه به سناریوی آسیب معرفی شده، ابتدا تغییرات کرنش پس از وقوع پارگی در رشته ۲ مورد بررسی قرار گرفت و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پارگی در کابل ۲ باعث ایجاد تغییرات کرنش شدید در نزدیکی محل نقاط پایش (کرنش سنج) می‌شود. براساس الگوریتم پیشنهادی گروه سنسور ۲S که شامل نقاط پایش G, B و H است بیش‌ترین تغییرات کرنش را تجربه می‌کند. لذا بر اساس فلوجارت شکل ۶ احتمال وقوع شکست در رشته‌های ۱,۳,۲,۷ و ۸ است که براساس چارت ذکر شده احتمال وقوع شکست در رشته ۲ است که براساس سناریوی آسیب در نظر گرفته شده، وقوع پارگی در رشته‌های کابل بر اساس الگوریتم پیشنهادی به درستی شناسایی شده است.



شکل (۱۲). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۲

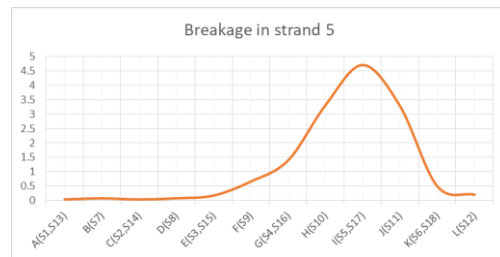
براساس سناریوی آسیب تعریف شده، پس از وقوع آسیب در رشته شماره ۲، اقدام به ایجاد آسیب در رشته شماره ۳ کابل فلزی پیش تنیده شد. سپس تغییرات کرنش در صفحه گوه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۳). نتایج حاصل نشان می‌دهد که براساس الگوریتم پیشنهادی، حداکثر تغییرات کرنش در گروه سنسور اصلی ۳S یا گروه سنسوری مکمل ۸S رخ می‌دهد و براساس الگوریتم پیشنهادی در فلوجارت شکل ۱۴ می‌توان وقوع آسیب در رشته شماره ۳ را پیش‌بینی نمود که مؤید کارآمدی الگوریتم پیشنهادی است.



شکل (۱۳). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۲ و ۳

پس از وقوع آسیب در رشته‌های ۲ و ۳ اقدام به ایجاد پارگی در رشته شماره ۸ شد. نتایج حاصل از تغییرات کرنش در شکل

۴ میزان تغییرات کرنش محوری در حدود ۰,۲٪ بود. علت این موضوع این است که هر چه محل آسیب از نقطه‌های نظارت دورتر باشد میزان تغییرات کم‌تر است و ارتفاع قله‌های آن نسبت به محل‌های نظارت کوتاه‌تر است. با این وجود هر یک از آسیب در رشته‌های کابل فلزی به صورت قله نمایان می‌شود و هرچه میزان ارتفاع قله‌ها کم‌تر باشد، آسیب مربوط به رشته‌های لایه‌های درونی است.

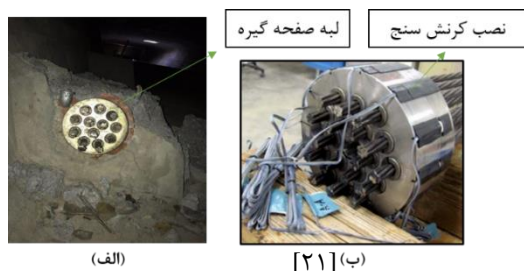


شکل (۱۱). درصد تغییرات کرنش محوری در نقاط پایش برای سناریوی آسیب ۵

۱-۱-۳. تعیین آستانه‌ها برای شناسایی آسیب

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد در صورت وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی، تغییرات کرنش محوری به صورت قله‌هایی در نقاط نظارتی نمایان می‌شود. حال اگر پارگی در رشته‌های کابل فلزی نزدیک به نقاط نظارتی باشد میزان تغییرات کرنش محوری بیش‌تر خواهد بود. بنابراین با توجه به سناریوهای آسیب معرفی شده و نتایج مربوط به آن، می‌توان نتیجه گرفت که اگر میزان تغییرات کرنش محوری برای هر یک از نقاط نظارتی بیش از ۱,۹ درصد باشد احتمال وقوع آسیب در رشته‌های کابل‌های فلزی پیش تنیده وجود دارد و بایستی عملیات کنترلی بیش‌تری صورت گیرد. بنابراین میزان Φ (درصد تغییرات کرنش محوری) برای وقوع آسیب را می‌توان بین ۱,۹ تا ۲ درصد در نظر گرفت. حال برای شناسایی در رشته‌های کابل فلزی لازم است که سه پارامتر تحت عنوان λ ، μ و ν تعریف شود که هر یک از مقادیر به ترتیب بیانگر آستانه‌های پارگی رشته‌ها در لایه یک، دو و سه است. با توجه به سناریوهای آسیب معرفی شده و مدل‌های المان محدود برای هر یک از آن‌ها، اگر حداکثر تغییرات کرنش محوری را برای کلیه حالات استخراج کنیم و سپس عملیات نرمال‌سازی تغییرات کرنش برای هر یک از سناریوهای آسیب با توجه به حداکثر تغییرات کرنش انجام دهیم، متوجه می‌شویم که ν برابر یک، λ برابر ۰,۷ و μ برابر ۰,۳ است. یعنی اگر حداکثر درصد تغییرات کرنش محوری برابر ۵,۵ درصد باشد و سپس عملیات نرمال‌سازی را با توجه به حداکثر درصد تغییرات کرنش محوری محاسبه کنیم اگر میزان تغییرات کم‌تر از ۰,۳ باشد احتمال وقوع شکست در لایه سه است و اگر میزان

توجه به ماهیت پژوهش، این الگوریتم شناسایی آسیب برای کابل‌های فلزی پیش تنیده غیر پیوسته کاربرد دارد. لذا پیشنهاد می‌شود که در سیستم پل‌های بتنی پیش تنیده به جای استفاده از گروت یا دوغاب برای پر کردن غلاف‌های کابل فلزی پیش تنیده، از گریس استفاده شود؛ تا بتوان علاوه بر بهره بردن از مزایای سیستم گروت یا دوغاب، امکان تعویض رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را فراهم ساخت. همچنین پیشنهاد می‌شود که بخشی از محیط پیرامونی صفحه گوه در هنگام ساخت پل‌های بتنی پیش تنیده با استفاده از کپ‌های قابل تعویض (پوشش‌های پلیمری) پوشش داده شود. برای برداشت داده‌ها، ابتدا بایستی کرنش سنج‌ها را در راستای محوری صفحه گیره بر کنار لبه‌های آن نصب کنیم. پس از قرارگیری کرنش سنج در محل خود با استفاده از چسب یک دو سه در محل مورد نظر نصب می‌کنیم و پس از آن با ورق‌هایی از جنس مواد نارسا یا پلاستیکی به طوری که بر محل سنسور فشاری وارد نشود، از آسیب‌های احتمالی محافظت می‌کنیم. پس از نصب کرنش سنج‌ها با استفاده از یک برنامه از پیش تعیین شده بر اساس فلوجارت پیشنهادی (شکل ۱) اقدام به برداشت داده‌ها می‌شود تا بتوان آسیب مورد نظر در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را شناسایی نمود.

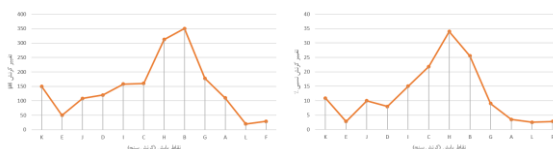


شکل (۱۵). نحوه نصب کرنش سنج روی صفحه گوه

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اقدام به ارائه روشی مبتنی بر تغییرات کرنش در صفحه گیره برای شناسایی آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده شده است. به منظور بررسی عملکرد و کارایی معیار شناسایی آسیب معرفی شده، ابتدا یک صفحه گیره ۱۹ رشته‌ای با استفاده از سناریوهای آسیب مختلف (منفرد-ترکیبی) مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس اقدام به ارزیابی عملکرد معیار شناسایی معرفی شده با استفاده از سناریوهای آسیب مختلف شد. پس از تأیید الگوریتم پیشنهادی، اقدام به شناسایی آسیب در صفحه گیره ۱۲ رشته‌ای برای پل جناح شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده کارآمد است.

۱۴ نشان داده شده است. براساس روش ذکر شده حداکثر تغییر کرنش در گروه سنسور فرعی ۸S رخ داده است که می‌توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آسیب را در رشته ۸ شناسایی نمود.



شکل (۱۴). تغییرات کرنش پس از پارگی در رشته ۲،۳ و ۸

۳-۲-۱. تعیین آستانه‌ها برای شناسایی آسیب

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که وجود آسیب در رشته‌های کابل فلزی پیش تنیده را می‌توان با استفاده از گروه سنسوری که میزان تغییرات کرنش محوری را اندازه‌گیری می‌کند، شناسایی کرد. ابتدا حداکثر گروه تغییر کرنش را شناسایی می‌کنیم و سپس گروه‌های سنسور مجاور آن را بررسی می‌کنیم و براساس شکل ۴-۱۸ گروه رشته‌ای که احتمالاً دچار آسیب شده است را می‌توان شناسایی کنیم. حال اگر میزان تغییرات کرنش محوری به سمت گروه‌های سنسور مجاور حرکت کند، احتمال وقوع شکست در دو رشته مجاور گروه‌های سنسور وجود دارد. حال اگر نسبت گروه دو سنسور مجاور در حدود ۰٫۹۸ تا ۱ باشد، احتمال وقوع آسیب در رشته مرکزی گروه رشته وجود دارد. بنابراین میزان β برای این نوع صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای در حدود ۰٫۹۸ تا ۱ در نظر گرفته شده است.

۳-۳. دستورالعمل اجرایی شناسایی آسیب در

کابل‌های فلزی پیش تنیده غیر پیوسته

برای شناسایی آسیب در کابل‌های فلزی پیش تنیده ابتدا لازم است که آماده‌سازی لبه بیرونی صفحه گیره و نصب کرنش سنج‌های مقاومتی برای اندازه‌گیری کرنش محوری صورت گیرد. برای نصب کرنش سنج‌ها ابتدا بایستی عملیات اسیدشویی و حذف آلاینده‌ها از روی سطح مورد نظر صورت گیرد. لذا برای انجام این عملیات ابتدا به طور مثال یک صفحه گوه ۱۲ رشته‌ای از پل جناح را انتخاب می‌کنیم (شکل ۱۵ الف)). سپس لبه بیرونی صفحه گیره را با عملیات سمباده زنی و اسیدشویی عاری از هرگونه آلاینده می‌کنیم و کرنش سنج‌ها را بر روی لبه با استفاده از نقاط کنترلی که برای هر یک از صفحات گوه مطرح کردیم نصب می‌کنیم (شکل ۱۵ ب)). لازم به ذکر است از آنجا که برای نصب کرنش سنج‌ها در لبه بیرونی صفحه گیره عمقی در حدود ۲ سانتیمتر لازم است و از طرف دیگر لبه بیرونی صفحه گیره در حدود بیش از ۵ سانتیمتر از بتن فاصله دارد؛ لذا می‌توان کرنش سنج‌ها را در محیط پیرامونی صفحه گیره نصب کنیم. با

۵. مراجع

- [15] Annamdas, Venu Gopal Madhav, and Chee Kiong Soh. "Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues." *Journal of Intelligent material systems and structures* 21.1 (2010): 41-59.
- [16] Chaki, S. , and G. Bourse. "Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands." *Ultrasonics* 49.2 (2009): 162-171.
- [17] Ervin, Benjamin L. , et al. "Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves." *Journal of engineering mechanics* 135.1 (2009): 9-19.
- [18] Ji, Qian, et al. "Stress evaluation in seven-wire strands based on singular value feature of ultrasonic guided waves." *Structural Health Monitoring* (2021): 14759217211005399.
- [19] Calabrese, Luigi, and Edoardo Proverbio. "A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking." *Corrosion and Materials Degradation* 2.1 (2021): 1-30.
- [20] Baifeng, J. , & Weilian, Q. (2008, April). The research of acoustic emission techniques for non destructive testing and health monitoring on civil engineering structures. In 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (pp. 782-785). IEEE.
- [21] Abdullah, A. B. M. *A tendon monitoring framework for unbonded post-tensioned bridges based on anchor strain response*. Diss. University of Florida, 2015.
- [1] Corven, J. , Naito, C. , & Pessiki, S. (2018). Designing and Detailing Post-Tensioned Bridges to Accommodate Nondestructive Evaluation (No. FHWA-HIF-18-029).
- [2] Agdas, Duzgun, et al. "Comparison of visual inspection and structural-health monitoring as bridge condition assessment methods." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30.3 (2016): 04015049.
- [3] Comisu, Cristian-Claudiu, et al. "Structural health monitoring system of bridges." *Procedia engineering* 199 (2017): 2054-2059.
- [4] Ahlborn, T. M. , et al. "The state-of-the-practice of modern structural health monitoring for bridges: a comprehensive review." (2010).
- [5] Yan, Y. J. , et al. "Development in vibration-based structural damage detection technique." *Mechanical systems and signal processing* 21.5 (2007): 2198-2211.
- [6] Huseynov, F. , et al. "Bridge damage detection using rotation measurements–Experimental validation." *Mechanical Systems and Signal Processing* 135 (2020): 106380.
- [7] Maeck, Johan, and Guido De Roeck. "Damage detection on a prestressed concrete bridge and RC beams using dynamic system identification." *Key Engineering Materials*. Vol. 167. Trans Tech Publications, 1999.
- [8] Hu, Wei-Hua, et al. "Structural health monitoring of a prestressed concrete bridge based on statistical pattern recognition of continuous dynamic measurements over 14 years." *Sensors* 18.12 (2018): 4117.
- [9] Astroza, Rodrigo. *Vibration-Based Health Monitoring and Mechanics-Based Nonlinear Finite Element Model Updating of Civil Structures*. University of California, San Diego, 2015.
- [10] Sun, Yanhua, et al. "Magnetic flux leakage structural health monitoring of concrete rebar using an open electromagnetic excitation technique." *Structural Health Monitoring* 17.2 (2018): 121-134.
- [11] Wong, K. Y. , and Y. Q. Ni. "Structural health monitoring of a suspension bridge." *Multi Science Pub.* , 2011.
- [12] Deza, Ursula M. *Development, evaluation and implementation of sensor techniques for bridges critical to the national transportation system*. Diss. Iowa State University, 2011.
- [13] Gao, Wei, Donglai Zhang, and Xueli Zhu. "Tension Monitoring and Defect Detection by Magnetostrictive Longitudinal Guided Wave for Fine Wire Rope." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021): 1-7.
- [14] Yang, Yaowen, Yee Yan Lim, and Chee Kiong Soh. "Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment." *Smart Materials and Structures* 17.3 (2008): 035008.

Damage Detection in Strands of Post-Tensioned Tendon for Prestressed Concrete Bridges

O. Ranaei*, S. Heydari

Abstract

Today, bridges play an important role in transportation networks, so that prestressed concrete bridges with post-tension tendon is one of the most common construction methods that have been prepared to meet the needs of infrastructure. These types of bridges are subject to various damages during operation, such as breakage in strands of tendons. Therefore, monitoring the status of their integrity during operation is of great importance. In this paper, a method based on axial strain changes in the wedge plate is used to identify strand breakage in post-tension tendons. Two wedge plate patterns, including 19- and 12-strand wedge plates, were modeled in ABAQUS software. Then, monitoring points were considered to identify the broken strand. Afterward, the performance of the damage detection framework based on axial strain changes was investigated by various wire breakage scenarios. The results show that the presence of breakage in strands of the tendon can be detected by observing distinct peaks at monitoring points. As the location of the damaged strand is closer to the monitoring points, the rate of axial strain changes will be more severe. Therefore, using the thresholds for each type of wedge plate, it is possible to identify the strand number that has been damaged in the post-tension tendon.

Keywords: Structural Health Monitoring, Prestressed Concrete Bridges, Damage Detection, Post-Tension Tendon, Wedge Plate

*Corresponding author E-mail: omid.ranaei94@gmail.com

Sensitivity analysis of operating parameters of mechanized tunneling in granite

M. Alikahi*

Abstract

Investigating and improving the performance of the tunnel boring machines is very important because of its impact on drilling costs. In this regard, it is necessary to identify effective excavation parameters and study their impact. Of the most effective parameters on mechanized tunneling are operator parameters. Accordingly, this study investigates the influence of parameters such as penetration depth, rotational speed, and distance between disc cutters. In order to examine these parameters, linear cutting machine (LCM) modeling has been used in the Abaqus software. After constructing the initial geometry, several analyzes were performed with different values of each parameters, and in this way, the parameters' effect on the device's performance and the energy required for drilling was determined. By conducting sensitivity analysis, it is found that in the granite, the penetration depth of 5 mm and the distance-to-depth ratio of 12.5 significantly reduce the energy required for drilling. Moreover, it can be seen that the effect of rotational speed on the energy changes required for drilling is low.

Keywords: Tunnel Boring Machine, Linear Cutting Test, Operating Parameters, Specific Energy, Numerical Modeling

Experimental study on residual flexural strength of macrosynthetic fiber reinforced concrete

A. Doostmohamadi *

Abstract

The use of fiber concrete technology in the form of flooring with the ability to remove thermal rebar's and reduce the consumption of structural rebar's is popular in the world today, and the use of this method is expanding experimentally in our country. Due to the expansion of this issue, it is necessary to evaluate the properties of fibers that can be used in concrete as well as its mechanical properties in concrete, so that provide a fiber concrete mixture design suitable for the level of expectations from each project. The mechanical properties of fiber concrete are influenced by various parameters such as the type of fibers, the amount of fiber consumption, the dimensional characteristics of the fibers, the physical and mechanical characteristics of the fibers, as well as its geometry and appearance. The main mechanical parameter in determining the performance of fiber reinforced concrete is the ability to provide bending strength after cracking, which is generally known as the residual strength of fiber reinforced concrete in design standards and codes. The purpose of the present research is to investigate the effect of different amounts of macrosynthetic fibers on the residual strength of concrete. For this purpose, a total of eight concrete mix designs were designed using macrosynthetic fibers with amounts of 2, 4, and 6 kg per cubic meter of concrete and a control sample without fibers in two types of concrete with a compressive strength of 25 and 35 MPa. The method of performing the residual resistance test of the manufactured samples was also based on the ASTM-C1609 standard. Also, in addition to testing the residual strength of fiber reinforced concrete, the properties of fresh concrete and compressive strength testing were also performed on the samples. The results of the residual strength test show that the use of macrosynthetic fibers increases the load-carrying capacity of the bending beam samples after cracking, that the amount and load-carrying capacity after cracking is a function of the amount of fiber consumption, and with the increase of the consumption dose Residual resistance fibers increase. In the compressive strength test, the use of fibers, although it has no effect on the compressive strength value, changes the type of fracture from brittle to ductile. Regarding the fresh properties of concrete, the use of fibers reduces the slump and increases the air percentage.

Keywords: Fiber Reinforced Concrete, Macrosynthetic Fiber, Average Residual Strength

*Corresponding author E-mail: doostmohamadi92@gmail.com

Investigating the effect of disc cutter wear on the performance of the mechanized tunnel boring machine (case study, lot 2 of the Kani Sib water transfer tunnel)

M. Sabri*, H. Vahidi, M. Rostami, A. Zanobi

Abstract

The wear of the disc cutter results in an increase in contact area with the rock, so when the wearing of the cutter exceeds its maximum limits, it should be replaced. However, this is not done on time because of cost concerns' Thus, this study will investigate the effects of disc cutter wear on tunnel boring machines (TBMs) operational parameters such as thrust force, torque, penetration rate, and specific energy as well as how it impacts advance rate and project time. for this goal, the hard rock TBM parameters of the Kani Sib water conveyance tunnel have been studied after the replacement of worn disc cutters. The results show that the average thrust force decreases by 11%, while the torque increases by 2%. Furthermore, an average increase of 25% in penetration rate can also be observed. The reduction of specific energy is also significant. This means that by changing worn disc cutters on time, excavation time is reduced, excavation efficiency is improved, and final costs are reduced significantly.

Keywords: Disc Cutter Wear, Thrust Force, Penetration Depth, TBM Performance

*Corresponding author E-mail: m.sabri@modares.ac.ir

The optimal design process of steel structures with the help of artificial intelligence algorithms: a case study of Al-Zahra Educational-Therapeutic Hospital in Tabriz

A. Rahgozar*, M. Kiani

Abstract

Current research is to use artificial intelligence computation to provide algorithms that meet all Mabhas-6, Mabhas-10, and Standard-2800 regulations of national building codes while minimizing the weight of structures. In previous studies, the control of boundary conditions and optimal design of steel moment frames was done in 2D and only with older algorithms. One of the most important tasks of this research is to perfect new constraint rules to control all constraints and to optimally design the common short and medium length steel structures. All the necessary regulations and controls for the three main types of steel structures widely used in the country: 1) braced frames and 2) frames with shear walls, and 3) a dual system of moment frames and shear walls are implemented. Finally, the results of this algorithm were validated in the Tabriz hospital project. One of the valuable results of this work is that it facilitates a safe design and control process for steel buildings by providing a graphical panel of model inputs and displaying all the key results of the structure in the form of text and diagrams. The work process is intelligently programmed to automatically run by simply inputting a standard ETABS file into the optimal seismic design process algorithm. In the ETABS file, each group sections are defined as a list to allowing artificial intelligence algorithms to choose the best placement. The hospital project demonstrated design safety as well as the ability to significantly reduce the total weight of the steel.

Keywords: Artificial Intelligence, Genetic Algorithm, Optimal Seismic Design, Steel Structures, Actual Hospital Project

*Corresponding author E-mail: a.rahgozar@ut.ac.ir

Investigating the behavior of single-layer and double-layer cubic armor in low-crested/submerged breakwaters

M. Mohammadnia*

Abstract

Cube-shaped armors are the first type of concrete armors used by humans. In the past, cubic blocks were used as a double-layers. The high consumption of concrete in double-layer cube-shaped armors made the idea of producing armors with an interlocking function that have corners and consume less concrete volume to be considered. For a long time, blocks with an interlocking were used in the armor layer, but due to some of their disadvantages, such as the possibility of breaking during transportation, the difficulty and complications of production, problems during installation, and difficulties related to the usage, caused renewed attention to cubic armors and other bulky armors. The use of cubic armors as a single layer has not been investigated much. Therefore, in this article, the behavior of single-layer cubic armors with regular and irregular placement and comparing its behavior with double-layer armors in low-crested/submerged breakwaters have been investigated. The results of the experiments showed that single-layer armors with regular placement perform relatively well and can be used instead of double-layer armors with irregular placement. While single-layer armor with irregular placement has a very poor performance against wave attack and the spread of damage in the armor layer occurs quickly in this case.

Keywords: Low-Crested Breakwater, Submerged Breakwater, Cubic Armor, Single-Layer, Double-Layer.

*Corresponding author E-mail: mo.mohammadnia@gmail.com

علاقه‌مندان به اشتراک مجله می‌توانند فرم زیر را تکمیل و به یکی از روش‌های (فکس، ایمیل و یا صندوق پستی) به دفتر مجله ارسال نمایند.

هزینه اشتراک برای چهار شماره در سال مبلغ ۷۶۰۰/۱۰۰۰ ریال می‌باشد که می‌بایست به حساب جاری ۸۴۸۸۰۰۱۶۰۴۰۷ بانک سپه شعبه دانشگاه جامع امام حسین(ع)، شماره کارت: ۵۸۹۲۱۰۱۱۹۳۷۵۶۷۷۸، شماره شبانه: IR۳۷۰۱۵۰۰۰۰۰۰۰۸۴۸۸۰۰۱۶۰۴۰۷ به نام درآمدهای موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه جامع امام حسین(ع)، واریز و اصل فیش بانکی آن را به همراه فرم اشتراک تکمیل شده به دفتر مجله ارسال نمایید.

نام خانوادگی:	نام:	<input type="checkbox"/> شخصی:	<input type="checkbox"/> موسسه‌ای:
تاریخ درخواست اشتراک:	شغل:		
نشانی کامل:			
تلفن: دورنگار: آدرس الکترونیکی:			
شماره‌های درخواستی:			
وضعیت درخواست اشتراک: <input type="checkbox"/> جدید <input type="checkbox"/> تمدید			
در صورت تمدید، کد اشتراک قبلی:			
لطفاً در صورت تغییر نشانی و یا عدم دریافت به موقع نشریه، مراتب را در اسرع وقت به دفتر مجله اعلام فرمایید.			

نشانی: تهران، بزرگراه شهید بابایی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، معاونت پژوهش و فناوری، موقعیت مرکزی، ساختمان باقرالعلوم(ع)، دایره نشریات، دفتر فصل‌نامه علمی علوم و فنون سازندگی
تلفن و نمابر: ۷۴۱۸۸۲۳۶ صندوق پستی: ۱۶۵۸۵-۱۹۴

مجله الصاق تصویر فیش واریزی هزینه اشتراک

راهنمای تهیه و تدوین مقالات

از نگارندگان گرامی تقاضا می‌شود مقاله خود را مطابق راهنمای تدوین مقالات مجله علمی «مهرنخن‌مانند» تهیه و ارسال نمایند:

الف) نحوه ارسال:

- از طریق تماس با دفتر مجله نسبت به ارسال مقاله خود اقدام فرمایید.
- مقاله ارسال شده، نباید در هیچ مجله داخلی و یا خارجی چاپ شده باشد و در حین داوری توسط این مجله، نباید برای مجله دیگری ارسال شود.
- ارائه آدرس رایانامه و شماره تلفن همراه تمام نویسندگان و معرفی ۵ داور متخصص پیشنهادی در هنگام ارسال مقاله الزامی است.

ب) نحوه نگارش:

- مقاله مطابق با قالب مجله از نظر نوع، فونت، سایز قلم، درج شکل‌ها و ... باید به زبان فارسی و با استفاده از نرم‌افزار Word حداقل در ۸ و حداکثر در ۱۵ صفحه به صورت دو ستونی با عرض هر ستون ۷/۵cm و حاشیه‌ها از هر طرف ۲/۵cm تهیه شود.
- صفحه نخست مقاله باید شامل عنوان مقاله، نام نویسنده‌ها، چکیده و واژه‌های کلیدی در دو بخش فارسی و لاتین، به صورت تک ستونی باشد.
- متن اصلی مقاله باید حداقل شامل بخش‌های مقدمه، متن اصلی، نتیجه‌گیری و مراجع باشد.
- شماره مرجع مورد استفاده به ترتیب و در کنار متن مربوطه داخل کروشه آورده شود (مثال [۲]).
- اشکال و نمودارها باید کیفیت مطلوب داشته باشد. اندازه قلم و شکل‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که در چاپ سیاه و سفید مجله، خوانا و مشخص باشد.
- عنوان جدول‌ها در بالای آن‌ها و نام شکل‌ها در زیر آن‌ها به صورت وسط‌چین شماره‌گذاری شود.
- مرتبه علمی یا عنوان شغل نویسندگان مقاله و محل انجام تحقیق همچنین کلمات و عبارات لاتین (غیر از اختصارات) باید آورده شوند.

اندازه قلم	نام قلم	صفحه اول مقاله	
۱۴	B Titr	عنوان مقاله (حداکثر ۱۵ کلمه، وسط‌چین)	بخش فارسی
۱۲	B Lotus Bold	نام نویسنده‌ها (نویسنده مسئول با ستاره مشخص شود)	
۱۲	B Lotus	محل انجام تحقیق، مرتبه علمی یا عنوان شغلی	
۱۲	B Nazanin	چکیده (حداکثر ۱۰ خط، تک ستونی)	
۱۱	B Nazanin Bold	واژه‌های کلیدی (حداکثر ۶ کلمه)	
۱۴	Times New Roman Bold	عنوان مقاله (حداکثر ۱۵ کلمه، وسط‌چین)	بخش لاتین
۱۲	Times New Roman Bold	نام نویسنده‌ها (نویسنده مسئول با ستاره مشخص شود)	
۹	Times New Roman	محل انجام تحقیق	
۱۰	Times New Roman Italic	چکیده (تک ستونی)	
۱۰	Times New Roman	واژه‌های کلیدی (حداکثر ۶ کلمه)	
۱۰	Times New Roman	رایانامه نویسنده مسئول (به صورت پاورقی)	
اندازه قلم	نام قلم	متن مقاله	
۱۱	B Nazanin	متن مقاله دو ستونی (Single Space)	
۱۰	Times New Roman	کلمه‌های انگلیسی داخل متن	
۱۳	B Nazanin Bold	عنوان بخش‌ها (مثال: ۳)	
۱۲	B Nazanin Bold	عنوان زیر بخش‌ها (مثال: ۳-۱)	
۱۰	B Nazanin Bold	شماره جدول‌ها و شکل‌ها (وسط چین)	
۱۰	B Nazanin	توضیحات جدول‌ها و شکل‌ها	

د) مراجع در پایان مقاله و در بخش مراجع به صورت زیر و با فونت Times New Roman-8 ارائه شوند:

۱. مقاله‌های چاپ‌شده در مجلات:

[1] G. Hsin Lai, Ch. Chen, B. Chiang Jeng, and W. Chao, "Ant-based IP traceback," Expert Systems with Applications vol. 34, pp. 3071-3080, 2008.

۲. مقاله‌های ارائه‌شده در کنفرانس‌ها:

[1] H. Zeidanloo and J. M. Zadeh, "A Taxonomy of Botnet Detection Techniques," 3rd IEEE Conference paper, 2010.

۳. کتاب‌ها:

[1] J. Padhye, V. Firoiu, and D. Towsley, "A stochastic model of TCP Reno congestion avoidance and control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech. Rep. 99-02, 1999.

۴. گزارش‌های ثبت اختراع (پتنت):

[1] R. E. Sorace, V. S. Reinhardt, and S. A. Vaughn, "High-speed digital-to-RF converter," U.S. Patent 5 668 842, Sept. 16, 1997.

۵. پایان‌نامه‌ها:

[1] R. T. Enander, "Lead Particulate and Methylene Chloride Risks in Automotive Refinishing" Ph.D. Thesis, Tufts Univ, Medford, MA, 2001.

۶. پایگاه‌های اینترنتی:

[1] OWASP, "Risk Rating Methodology" <http://www.owasp.org>, 2009.



Journal of Science and Technology Construction

Volume 4, Number 1, 2023 (Serial No. 11)

Managing Director: Abdoreza Abed
Editor-in-Chief: Abolghasem Mozaffari
Administrative Director: Amir Kouchaki

- Publisher: Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University
- Administrative Assistant: Dr.Mohammad Ali Tahmasebi
- Editor and Top Rated: Saeed Hamzehee
- Printing: Sepah Print Center

Address: Babaii Highway, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, I.R.Iran
P.O.Box: 16585-194 Phone: +98-21-74188236