



پژوهشی:

- کنترلر ترکیبی بهینه‌ی مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی
حسین غفارزاده، سمیرا صفی‌خانلو و علیرضا آران
- بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی
امید پورعبداله و رضا غیائی
- مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی
ایمان آقایی، محمود میری و حامد قوهانی عرب
- توسعه‌ی یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پایش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری: مطالعه‌ی موردی کانال غیاثوند تهران
عمار صفایی، محمد خانبجانی، زهرا کریمی شوکی، علیرضا هادیان، امیرحسین حدادی و هدیه رحمانی
- بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS)
محمدرضا فرج پور، جمشید صبوری و یوسف حسین زاده

یادداشت فنی:

- مدل‌های شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی انرژی و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)
محمد سامانی‌پور، سیدمحمد ضیا علوی و عباس بابازاده
- بررسی و تعیین عوامل موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق: ارائه‌ی راهکارهایی برای صادرکنندگان خدمات مهندسی
خلدون الالوسی، امیرحسین حسینی سرچشمه، علی رحیمیان، مجتبی مغربی و جعفر بلوری بزاز
- بررسی شاخص پایداری دینامیکی سازه‌های فولادی
محمدرضا غلامی، محمدرضا شکرزاده و مهدی شریفی
- بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون‌کشیدگی طناب‌های پلی‌اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی
رضا اکبری‌فر، علیرضا مرتضایی و علی بابایی
- مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده
احمد کامل ابراهیم الکنانی، علی اخترپور و مصطفی م. عبدالحسین

هیأت تحریریه

دکتر بینا آیتی

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر همایون استکانچی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی پاک

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرخنده خراشادی زاده

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا خویی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسین رحامی

دانشکده‌ی علوم مهندسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دکتر پیام رهنمایی ذکاوت

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه وسترن سیدنی

دکتر محسن سلطان پور

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

دکتر یوسف شفاهی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بهار فیروز آبادی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مجید قلهکی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دکتر موسی محمودی صاحبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر سید جمشید موسوی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران

شریف

دوره‌ی ۴۲

شماره‌ی ۱

بهار

۱۴۰۵

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سر دبیر: دکتر میرمصدق جمالی

سر دبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

کارشناس تخصصی و دبیر اجرایی: شیما آل اسداله

کارشناس تخصصی امور تولید و گرافیک: غزل احمدی میرقائد

ویراستار: رزیتا رستخیز پایدار

مجله‌ی مهندسی عمران شریف در پایگاه‌های DOAJ، ISC و SID نمایه می‌شود.

نشانی: تهران/ صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۸۶۳۹

دفتر مجله‌ی علمی شریف

تلفن: ۶۶۰۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی‌سایت: <http://journal.sharif.ir>

رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه‌ی تخصصی

سردبیر تخصصی: دکتر میرمصدق جمالی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجربی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر اکبر چشمی

دانشیار دانشکده‌ی زمین شناسی - دانشگاه صنعتی تهران

دکتر سیدمحسن حائری

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر سیدروح اله حسینی واعظ

استاد دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه مهندسی عمران دانشگاه قم

دکتر فیاض رحیم‌زاده رفوئی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر سیدرضی شیخ الاسلامی

استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حامد صادقی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محسن قائمیان

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر سیدسینا کورھلی

دانشیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر علی لکی روحانی

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه زنجان

دکتر علیرضا مرتضایی

استاد دانشکده مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

دکتر سید ناصر مقدس تفرشی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

هیأت مشاوران

دکتر محسن ابوطالبی اصفهانی

دانشکده‌ی حمل و نقل - دانشگاه اصفهان

دکتر مصطفی آدرسی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید رجایی

دکتر علیرضا اردکانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه ارومیه

دکتر غلامرضا اهری‌زمانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه ارومیه

دکتر کاظم اسماعیلی

گروه علوم و مهندسی آب - دانشکده کشاورزی - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر وحید بروجردیان

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پرستش

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر طاهره تقی زاده فیروزجانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود

دکتر محمدعلی روستا

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه یاسوج

دکتر علیرضا سلجوقیان

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر سیدرضا سمائی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

دکتر نوید سیاه پلو

مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان

دکتر اقبال شاکری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و فرهنگ

دکتر بهزاد شکسته بند

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی ارومیه

دکتر مهدی شفیعی فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حمید شیرمحمدی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دکتر مهدی عجمی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود

دکتر مجید قلهکی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه سمنان

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر محمدعلی کافی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه سمنان

دکتر سیدسینا کورھلی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر علیرضا معززی مهر طهران

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمود ملکوتی‌علون‌آبادی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه خلیج فارس بوشهر

دکتر مهدی محمد مهدیزاده

دانشکده‌ی علوم و فنون دریایی دانشگاه هرمزگان - بندرعباس

مقالات پژوهشی:

- ۳ کنترل ترکیبی بهینه مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی
حسین غفارزاده، سمیرا صفی‌خانلو و علیرضا آران
- ۱۷ بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی
امید پورعبداله و رضا غیاثی
- ۳۱ مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی
ایمان آقایی، محمود میری و حامد قوهانی عرب
- ۴۵ توسعه‌ی یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری: مطالعه‌ی موردی کانال غیاثوند تهران
عمار صفایی، محمد خانجانی، زهرا کریمی شوکی، علیرضا هادیان، امیرحسین حدادی و هدیه رحمانی
- ۵۹ بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS)
محمد رضا فرج پور، جمشید صبوری و یوسف حسین زاده

یادداشت فنی:

- ۷۵ مدل‌های شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی انرژی و جرم‌گی شکست مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)
محمد سامانی‌پور، سیدمحمد ضیا علوی و عباس بابازاده
- ۸۵ بررسی و تعیین عوامل موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق: ارائه‌ی راهکارهایی برای صادرکنندگان خدمات مهندسی
خلدون الالوسی، امیرحسین حسینی سرچشمه، علی رحیمیان، مجتبی مغربی و جعفر بلوری بزاز
- ۱۰۳ بررسی شاخص پایداری دینامیکی سازه‌های فولادی
محمد رضا غلامی، محمد رضا شکرزاده و مهدی شریفی
- ۱۱۷ بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون کشیدگی طناب‌های پلی‌اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی
رضا اکبری‌فر، علیرضا مرتضایی و علی بابایی
- ۱۲۷ مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده
احمد کامل ابراهیم الکنانی، علی اخترپور و مصطفی م. عبدالحسین

ضمائم:



Research Article

The Optimal Hybrid Controller Based on Ground Acceleration for a Structure Equipped with MR Dampers

Hossein Ghaffarzadeh*, Samira Safikhanlou and Alireza Aran

Faculty of Civil Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran

* corresponding author: (ghaffar@tabrizu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 16 November 2024

Revised: 24 January 2025

Accepted: 5 February 2025

Keywords:

Semi-active control,
MR damper,
skyhook,
groundhook,
pattern search algorithm.

Abstract

Magnetorheological (MR) dampers demonstrate intelligent behavior when subjected to a magnetic field, with their structural response controlled by adjusting the magnetic field's intensity. Various control algorithms and laws have been proposed to implement these control systems. Among the fundamental control laws for semi-active systems, the Skyhook and Groundhook control laws are particularly notable. A hybrid approach combining both of them can be employed to enhance the performance of these control laws. However, determining the optimal contribution of each control law—Skyhook and Groundhook—within the hybrid control law presents a significant challenge. In this study, an eight-story structure equipped with MR dampers is analyzed under the excitation of three earthquakes, Bam, Loma-Prieta, and Northridge, to evaluate the effectiveness of the proposed hybrid control law. The objective is to optimize the hybrid control law using the pattern search algorithm. The hybrid control law for structures with MR dampers can be implemented in two ways: on-off and continuous. In the on-off method, the voltage applied to the MR dampers is restricted to two extreme values, whereas the continuous method allows for voltage adjustment across the entire range between these boundaries. Through an analysis of both on-off and continuous hybrid control laws, it is evident that their performance in reducing the structure's displacement, velocity, and acceleration responses is nearly identical. However, the continuous hybrid control law achieves comparable efficiency with significantly lower control forces. As a result, the continuous optimal hybrid control law emerges as a simple yet highly effective solution. Furthermore, by assuming the same weight of force and displacement in the cost function, it is shown that the participation percentage of the Skyhook control law in the hybrid control law is much higher than that of the Groundhook control law. The optimal participation rate of the Skyhook law is obtained to be approximately 0.95.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Ghaffarzadeh, H., Safikhanlou, S. and Aran, A. 2026. The optimal hybrid controller based on ground acceleration for a structure equipped with MR dampers, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 3-16.
<https://doi.org/10.24200/30.2025.65523.3381>



کنترل ترکیبی بهینه مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی

حسین غفارزاده^{*}، سمیرا صفی‌خانلو و علیرضا آران

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

^{*}نویسنده مسئول (ghaffar@tabrizu.ac.ir)

چکیده

میراگرهای مغناطیسی به‌عنوان یکی از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با قرارگرفتن در معرض میدان مغناطیسی، رفتار هوشمندی از خود نشان می‌دهند و با تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی، کنترل سازه انجام می‌شود. جهت پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی اخیر، الگوریتم‌ها و قوانین کنترل مختلفی، مانند قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک ارائه شده است. به‌منظور بهبود قوانین کنترل مذکور، ترکیبی از آن‌ها می‌تواند به دو روش دو حالت و پیوسته استفاده شود. تعیین سهم هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی یک چالش است. هدف پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم جستجوی الگو به‌منظور بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که اگر در محاسبه‌ی تابع هزینه، وزن جابجایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی حدوداً ۹۵٪ به‌دست می‌آید. همچنین با مقایسه‌ی قانون کنترل ترکیبی دو حالت و پیوسته مشخص می‌شود که کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب در هر دو روش تقریباً یکسان است، اما نیروی کنترلی موردنیاز در قانون کنترل ترکیبی پیوسته کمتر است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

واژگان کلیدی:

کنترل نیمه‌فعال،

میراگر مغناطیسی،

اسکای‌هوک،

گروندهوک،

الگوریتم جستجوی الگو.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، کنترل ارتعاش سازه‌های تحت بارگذاری باد و زلزله به‌طور گسترده توسط بسیاری از پژوهشگران مطالعه شده است. بر این اساس، انواع مختلفی از دستگاه‌ها و الگوریتم‌های کنترلی با اهداف مختلف، مانند مقاوم‌سازی سازه‌ها توسعه یافته و استفاده شده‌اند.^[۱] یکی از روش‌های کنترل سازه، روش کنترل نیمه‌فعال^۱ است؛ که در آن، مشخصات سیستم از جمله سختی و میرایی در طول زمان بارگذاری قابلیت تغییر دارند و بر این اساس، سازه کنترل می‌شود. یکی از روش‌های کنترل نیمه‌فعال، استفاده از میراگرهای مغناطیسی (MR)^۲ است. میراگرهای مغناطیسی، دستگاه‌های قابل کنترل و هوشمندی هستند که مایع مغناطیسی دارند. ویژگی آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی قابلیت تغییر دارد. پس از اعمال میدان مغناطیسی، سیال در مدت زمان چند میلی‌ثانیه از حالت مایع به حالت نیمه‌جامد تغییر حالت می‌دهد و ذرات آهنی به دوقطبی‌های مغناطیسی تبدیل می‌شوند. بنابراین، دستگاه‌های میراگر مغناطیسی بدین روش اقدام به کنترل سازه می‌کنند. نیروی تولیدشده توسط سیستم پیستون و سیلندر در میراگرهای مغناطیسی، پایداری و قابلیت

اطمینان بالایی را نشان می‌دهد. تنظیم مشخصات و نیروی میراگر مغناطیسی با اعمال ولتاژ ورودی انجام می‌شود. هنگامی که ولتاژ ورودی به سیستم تغییر می‌کند، خواص مکانیکی سیال نیز دچار تغییر می‌شود.^[۲] ولتاژ ورودی موردنیاز سیستم می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌ها و قوانین کنترلی تعیین شود. از جمله قوانین کنترل^۳ پایه در روش کنترل نیمه‌فعال، قوانین کنترل اسکای‌هوک^۴ و گروندهوک^۵ است.^[۳]

قانون کنترل اسکای‌هوک، در ابتدا برای کاهش ارتعاش‌های واردشده از سطح جاده به بدنه‌ی خودرو استفاده می‌شده است.^[۴] پس از گذشت زمان، از قانون اخیر در سازه‌های عمرانی نیز استفاده شده است. خشنودیان و مهرپور (۲۰۱۳)،^[۵] تعمیم‌یافته‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک را برای سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که رویکرد کنترل نیمه‌فعال با استفاده از قانون کنترل اسکای‌هوک، نتایج بهتری نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال دارد. بررسی ایشان نشان داده است که روش استفاده‌شده برای بهبود عملکرد اجزاء سازه‌ای و غیرسازه‌ای مؤثر است.^[۵]

^۴ Skyhook

^۵ Groundhook

^۱ Semi-active control

^۲ Magneto- Rheological dampers

^۳ Control laws

استناد به این مقاله:

غفارزاده، حسین، صفی‌خانلو، سمیرا و آران، علیرضا، ۱۴۰۵. کنترل ترکیبی بهینه مبتنی بر شتاب زمین برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)،

صص ۳-۱۶. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.65523.3381>



اسکای هوک و گروندهوک را در کنترل ترکیبی به روش دو حالت بررسی کرده‌اند.^[۱۷]

در پژوهش حاضر، ارزیابی قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته مبتنی بر تصمیم‌گیری براساس شتاب زمین برای سازهی مجهز به میراگر مغناطیسی صورت گرفته و با قوانین کنترل ترکیبی دو حالت، اسکای هوک، و گروندهوک دو حالت و پیوسته مقایسه شده‌اند. جهت بهینه‌سازی وزن هر کدام از قوانین کنترلی پایه، از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی الگو^۹ استفاده و به‌عنوان یک قانون کنترل ترکیبی بهینه معرفی شده است.

۲. قوانین کنترل

۱.۲. قوانین کنترل پایه

از الگوریتم‌ها و قوانین کنترل نیمه‌فعال جهت تعیین وضعیت سازه و کاهش ارتعاش‌های وارد بر آن استفاده می‌شود. یکی از قوانین کنترل نیمه‌فعال، قانون کنترل اسکای هوک است؛ که برای استفاده از آن برای سازه‌های ساختمانی، از سرعت مطلق طبقه بالا و سرعت نسبی دو طبقه مجاور برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی استفاده می‌شود. دلیل نام‌گذاری قانون اخیر نیز استفاده از اطلاعات طبقه بالاتر است. قانون کنترل اسکای هوک به دو روش دو حالت و پیوسته به کار می‌رود. در روش دو حالت، دو مقدار مرزی حد بالا (High state) و حد پایین (Low state) در نظر گرفته می‌شوند؛ و در روش پیوسته، علاوه بر دو مقدار حدی مذکور، مقادیر مابین آن‌ها نیز می‌توانند لحاظ شوند. در صورت پیاده‌سازی قانون ذکرشده برای میراگرهای مغناطیسی، مقادیر مرزی حد بالا و پایین با بیشینه و کمینه ولتاژ قابل تنظیم میراگر مغناطیسی تعریف می‌شوند. در شکل ۱، وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل اسکای هوک مشاهده می‌شود.

در روش پیوسته قانون کنترل اسکای هوک، مقادیر ولتاژ ورودی به سیستم بین دو مقدار $V_{\min}$ و $V_{\max}$ می‌تواند متغیر باشند (رابطه ۱). به‌عنوان یک پیشنهاد، مقادیر مابین دو ولتاژ اخیر می‌تواند با استفاده از ضریب اصلاحی (MF)^{۱۰} تأمین شود، که عددی بین ۰ و ۱ است (رابطه ۲):

$$V_{\text{SkyHook}} = \begin{cases} V_{\max} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$MF = \frac{|\ddot{x}_{\text{زمین}}|}{\ddot{x}_{\text{مینا}}} \leq 1 \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، $\ddot{x}_{\text{مینا}}$ یک درصد شتاب مبنای طرح برای پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (۰/۳۵g) در نظر گرفته شده است. در نتیجه، ولتاژ میراگرهای مغناطیسی براساس قانون کنترل اسکای هوک به روش پیوسته به‌صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$V_{\text{SkyHook}} = \begin{cases} V_{\min} + MF(V_{\max} - V_{\min}) & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} \geq 0 \\ V_{\min} & \dot{x}_2 \times \dot{x}_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

قانون کنترل گروندهوک، یکی دیگر از قوانین کنترل پایه است، که در سازه‌های

تعمیم قانون کنترل اسکای هوک به قوانین کنترل فاز^۱ ساده نیز انجام شده است.^[۶ و ۷] در قانون کنترل اسکای هوک، سرعت طبقه بالا و سرعت نسبی بین دو طبقه مجاور سازهی عمرانی، نقش اساسی در تعیین وضعیت سیستم دارند. با تعمیم قانون مذکور به قانون کنترل فاز، جابجایی و شتاب طبقه پایین می‌توانند جایگزین سرعت مطلق طبقه بالا شوند. از طرفی، سرعت مطلق بالا می‌تواند جایگزین سرعت نسبی دو طبقه مجاور شود. این فرایند با بررسی فاز حرکت سیستم یک درجه‌ای آزاد انجام می‌شود. آنالیز خارج از تنظیم، آنالیز حساسیت، تأثیر تأخیر زمانی، و پارامترهای بهینه‌ی سیستم کنترل نیمه‌فعال جرم تنظیم‌شونده برای قوانین کنترل فاز انجام شده است.^[۸] یو^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، نیز تأخیر زمانی و غیرخطی بودن رفتار میراگر مغناطیسی بر مبنای قانون کنترل اسکای هوک را بررسی کرده‌اند.^[۹] قانون کنترل اسکای هوک به دو روش خاموش- روشن^۳ (دو حالت) و پیوسته^۴ کاربرد دارد. در روش دو حالت، فقط دو مقدار حدی برای میرایی یا ولتاژ در نظر گرفته می‌شود؛ اما در روش پیوسته، علاوه بر مقادیر حدی میرایی یا ولتاژ، سایر مقادیر بین دو مقدار اخیر نیز در نظر گرفته می‌شوند. مقایسه‌ی قانون کنترل اسکای هوک با قانون کنترل تعادل^۵ در دو روش دو حالت و پیوسته انجام شده است.^[۱۰]

قانون کنترل گروندهوک برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال موردتوجه بوده است؛ که مشابه قانون کنترل اسکای هوک، در ابتدا برای کنترل ارتعاش‌های وارد بر خودرو به دو صورت گروندهوک مبتنی بر جابجایی و گروندهوک مبتنی بر سرعت استفاده شده است.^[۱۱] ژانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی برای سازه‌های بلند تحت بارگذاری باد، قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت را با یکدیگر مقایسه کرده و عملکرد قانون کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی بهتر ارزیابی شده است.^[۱۲] با بررسی ترکیب قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت و تعمیم‌یافته‌ی آن، عملکرد بهتری برای کنترل‌کننده به‌دست آمده است.^[۱۳] قانون کنترل گروندهوک نیز مانند قانون کنترل اسکای هوک به دو روش دو حالت و پیوسته کاربرد دارد. در تعریف پایه‌ی قانون کنترلی گروندهوک، تعیین وضعیت سیستم با استفاده از سرعت طبقه پایین و سرعت نسبی دو طبقه مجاور سازه انجام می‌شود. کو^۷ و همکاران (۲۰۰۴)، عملکرد قوانین کنترل گروندهوک مبتنی بر جابجایی و سرعت را با استفاده از دو روش دو حالت و پیوسته مقایسه کرده‌اند.^[۱۴]

به‌منظور تکمیل قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک جهت تعیین وضعیت سیستم، قانون کنترل ترکیبی^۸، که تلفیقی از قوانین مذکور است، به کار گرفته شده است. ارزیابی قانون کنترل ترکیبی به روش دو حالت برای میراگرهای مغناطیسی صورت گرفته و عملکرد مناسب آن در مقایسه با قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک سنجیده شده است.^[۱۵] استفاده از ترکیب قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک مبتنی بر جابجایی به روش دو حالت در طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی، بهبود رفتار کنترل‌کننده‌ی معرفی شده را در مقایسه با قوانین اسکای هوک و گروندهوک نشان داده است.^[۱۶] وزن‌دهی بهینه‌ی قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی، مهم‌ترین بخش تعریف قانون کنترل برای سیستم کنترل نیمه‌فعال است. بدین منظور، جوادی‌نسب و همکاران (۲۰۱۴)، وزن بهینه‌ی هر کدام از قوانین

⁶ Zhang

⁷ Koo

⁸ Hybrid control law

⁹ Pattern search algorithm

¹⁰ Modify Factor

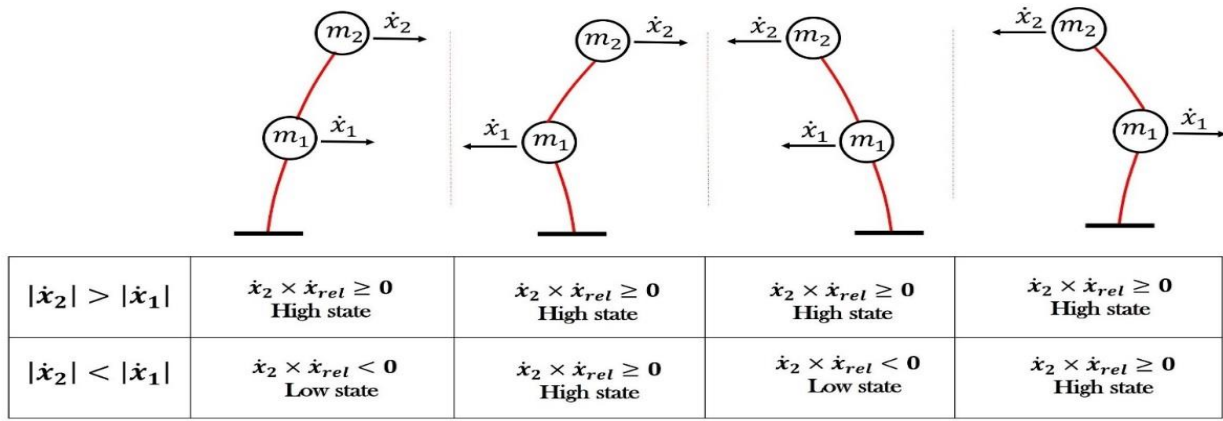
¹ Phase control laws

² Yu

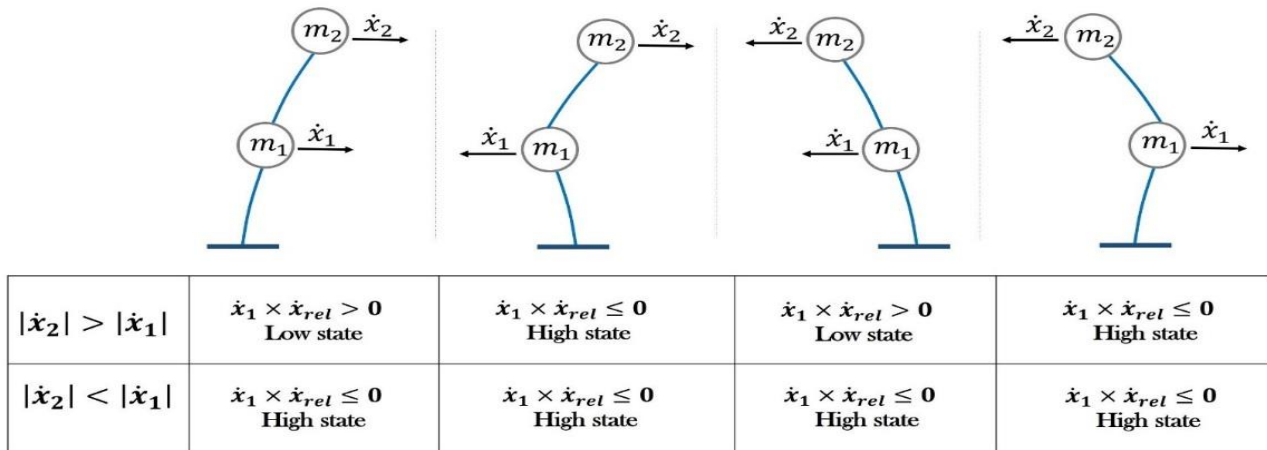
³ On-Off

⁴ Continuous

⁵ Balance control law



شکل ۱. توصیف حالت‌های مربوط به قانون کنترل اسکای‌هوک.



شکل ۲. توصیف حالت‌های مربوط به قانون کنترل گروند‌هوک.

ورودی میراگرهای مغناطیسی مبتنی بر قانون کنترل ترکیبی ارائه شده است.

$$V_{Hybrid} = \alpha V_{SkyHook} + (1-\alpha) V_{GroundHook} \leq V_{max} \quad (6)$$

که در آن، α بیانگر سهم قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی است. جهت ارائه قانون کنترل ترکیبی بهینه، ضریب α بهینه‌سازی شده است. به‌منظور بهینه‌سازی سهم هر کدام از قوانین اسکای‌هوک و گروند‌هوک در قانون کنترل ترکیبی، از الگوریتم جستجوی الگو می‌توان استفاده کرد. الگوریتم جستجوی الگو، یک بهینه‌ساز مقاوم^{۱۱} و سراسری^{۱۲} است؛ بنابراین، برای بهینه‌سازی قانون کنترل ترکیبی مناسب است. الگوریتم اخیر، دنباله‌ای از نقاط را محاسبه می‌کند تا به نقطه‌ی بهینه نزدیک شود. در هر مرحله، الگوریتم مجموعه‌ای از نقاط را که به‌عنوان مش شناخته می‌شوند، در اطراف نقطه‌ی فعلی جستجو می‌کند. با استفاده از الگوی مشخص، حرکات نقاط در اطراف مش دنبال می‌شود تا تابع هدف^{۱۳} بهبود یابد. اندازه‌ی مش پس از هر تکرار موفقیت‌آمیز افزایش می‌یابد و پس از هر تکرار ناموفق کاهش می‌یابد تا فرایند بهینه‌سازی به اتمام برسد. در طراحی کنترل‌کننده ترکیبی بهینه، ضریب α بین صفر و یک ($0 \leq \alpha \leq 1$) است، بنابراین، متغیر مسئله‌ی بهینه‌سازی مقید است. تابع هدف در طراحی کنترل‌کننده ترکیبی می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۷ تعریف شود:

$$Cost(f_1, f_2) = Wf_1 + (100 - W)f_2 \quad (7)$$

ساختمانی برای تعیین وضعیت نیروی کنترلی از سرعت مطلق طبقه‌ی پایین و سرعت نسبی دو طبقه‌ی مجاور استفاده می‌شود. در شکل ۲، وضعیت مختلف دو جرم مجاور مطابق قانون کنترل گروند‌هوک مشاهده می‌شود. قانون اخیر نیز به دو روش دو حالت و پیوسته به کار می‌رود، که به ترتیب در روابط ۴ و ۵ مشخص شده‌اند.

$$V_{GroundHook} = \begin{cases} V_{max} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 \\ V_{min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{GroundHook} = \begin{cases} V_{min} + MF(V_{max} - V_{min}) & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} \leq 0 \\ V_{min} & \dot{x}_1 \times \dot{x}_{rel} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

۲.۲. قانون کنترل ترکیبی بهینه

در قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروند‌هوک از سرعت مطلق یک طبقه استفاده می‌شود، که البته سرعت طبقه‌ی مجاور نیز در تعیین دستور کنترلی نقش مؤثری دارد. با توجه به اینکه استفاده از سرعت مطلق دو طبقه‌ی مجاور می‌تواند در تعیین دستور کلی موجب بهبود پاسخ‌های سازه شود، قانون کنترل ترکیبی به‌عنوان قانون جامع‌تر ارائه شده است. این قانون با ترکیب دو قانون کنترل پایه باعث منطقی‌تر شدن دستور کنترلی می‌شود. در ترکیب دو قانون مذکور، سهمی برای هر یک در نظر گرفته شده است. در رابطه‌ی ۶، نحوه‌ی محاسبه‌ی ولتاژ

¹³ Cost function

¹¹ Robust

¹² Global

که در آن، M, K, C و به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی، و میرایی هستند و ابعاد $n \times n$ دارند، که n بیانگر تعداد طبقات سازه است. $F(t)$ ماتریس نیروی میراگرهای مغناطیسی را نشان می‌دهد و ابعاد آن $r \times 1$ است (r بیانگر تعداد میراگرهای مغناطیسی است). $X(t), \dot{X}(t), \ddot{X}(t)$ به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت، و شتاب طبقات سازه را مشخص می‌کنند و ابعاد $n \times 1$ دارند. $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین و Λ نشانگر ضریب تأثیر زلزله با ابعاد $n \times 1$ است. Γ ماتریس موقعیت میراگرهاست، که از حاصل ضرب $\bar{\Gamma}$ و θ به دست می‌آید. $\bar{\Gamma}$ یک ماتریس ثابت با ابعاد $n \times n$ است و θ وجود یا نبود میراگر مغناطیسی در طبقه‌ی i ام را نشان می‌دهد و ابعاد $n \times r$ دارد (رابطه‌های ۹ و ۱۰).

$$\Gamma = \bar{\Gamma}_{n \times n} \theta_{n \times r} \quad (9)$$

$$\bar{\Gamma}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -1 & i = j - 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

با استفاده از تغییر متغیر $\begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix} = \{Z(t)\}$ معادله‌ی ۸ به صورت معادله‌ی ۱۱ بازنویسی می‌شود:

$$\dot{\{Z(t)\}} = [A]\{Z(t)\} + [B]F(t) - [D]\ddot{x}_g(t) \quad (11)$$

۲.۳. مدل رفتاری میراگر مغناطیسی

میراگرهای مغناطیسی از جمله میراگرهای پر کاربرد هستند، که با بهره‌گیری از مایعات کنترل پذیر، در کسری از ثانیه تحت جریان مغناطیسی قرار می‌گیرند و با تغییر فاز، انرژی ورودی تلف می‌شود. یکی از روش‌های مدل سازی رفتار هیستریزس میراگرهای مغناطیسی، مدل بوک-ون^{۱۶} است. نیروی غیرخطی برای یک مدل ایده آل میراگر مغناطیسی را می‌توان از طریق معادله‌ی ۱۲ به دست آورد.

$$F = C_0 \dot{x} + a z \quad (12)$$

که در آن، $\dot{x}, F$ و C_0 به ترتیب بیانگر نیرو، سرعت، و میرایی هستند. Z متغیری جهت توصیف تغییر شکل هیستریزس میراگرهای مغناطیسی است، که به صورت معادله‌ی ۱۳ تعریف می‌شود.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_0 \dot{x} \quad (13)$$

که در آن، γ و β پارامترهای شکی و A_0 شیب سیکل هیستریزس را نشان می‌دهند. درواقع، نحوه‌ی انتقال رفتار خطی به غیرخطی توسط پارامتر اخیر تعیین می‌شود.

پارامترهای C_0 و a به صورت یک مدل خطی از ولتاژ مؤثر به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شوند.

$$a = \alpha_a + \alpha_b u \quad (14)$$

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b} u \quad (15)$$

که در آن‌ها، u ولتاژ واقعی است. میراگرهای مغناطیسی با توجه به ساختار داخلی آن‌ها قادر به اعمال آنی ولتاژ واقعی نیستند. به عبارت دیگر، مدت زمانی طول می‌کشد تا ولتاژ واقعی میراگر تنظیم شود. بنابراین، ولتاژ مؤثر برای

که در آن، f_1 و f_2 به ترتیب ترم مربوط به نیروی کنترلی و جابجایی هستند، که سهم هر کدام از آن‌ها در محاسبه‌ی تابع هزینه با پارامتر W مشخص می‌شود.

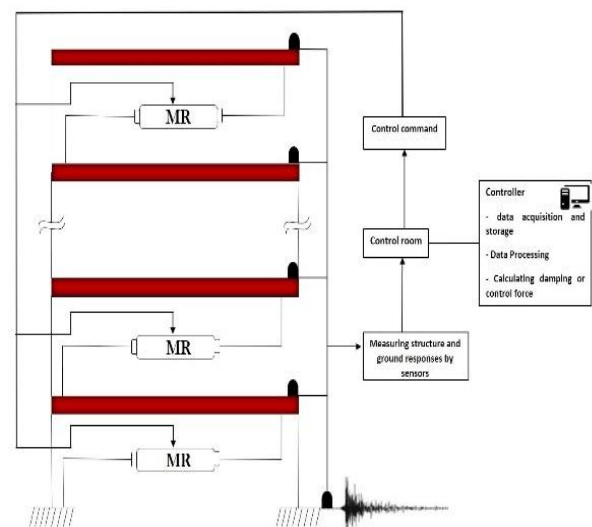
۳. پیاده سازی کنترل نیمه فعال برای سازهی مجهز به میراگرهای مغناطیسی

سیستم‌های کنترل نیمه فعال به منظور کنترل سازه در برابر نیروهای وارده از اجزا و المان‌هایی تشکیل شده‌اند، که هر کدام وظیفه‌ی مشخصی دارند. سیستم‌های مذکور از حس گر، کنترل کننده، و دستگاه کنترل نیمه فعال (مانند میراگر مغناطیسی) به وجود آمده‌اند. وظیفه‌ی حس گرها در فرایند کنترل، اندازه گیری اطلاعات (مانند پاسخ سازه‌ها) است. اطلاعات دریافت شده از حس گرها در کنترل کننده، پردازش می‌شود. سپس، با توجه به قوانین و الگوریتم‌های از پیش تعیین شده، نیرو یا میرایی مورد نیاز سازه در هر لحظه محاسبه می‌شود. دستور کنترلی دریافتی از کنترل کننده‌ها توسط دستگاه‌هایی مانند میراگرهای مغناطیسی به سازه اعمال و فرایند کنترل سازه تکمیل می‌شود. فرایند کنترل نیمه فعال سازه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۱.۳. معادله‌های حرکت

پاسخ‌های یک سازه‌ی ساختمانی که تحت نیروی ارتعاش زلزله قرار می‌گیرد، را می‌توان از طریق حل معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر آن به دست آورد. یکی از روش‌های حل معادله‌های دیفرانسیل، روش فضای حالت^{۱۴} است. در روش اخیر، معادله‌ی حرکت سازه‌ی ساختمانی، که یک معادله‌ی مرتبه‌ی دوم است، به معادله‌ی مرتبه‌ی اول با استفاده از متغیرهای حالت^{۱۵} تبدیل می‌شود. معادله‌ی حرکت سازه‌ی ساختمانی جهت ایجاد فضای حالت به صورت رابطه‌ی ۸ نوشته می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}(t) \\ \ddot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}_{2n \times r} F(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda \end{bmatrix}_{2n \times 1} \ddot{x}_g(t) \quad (8)$$

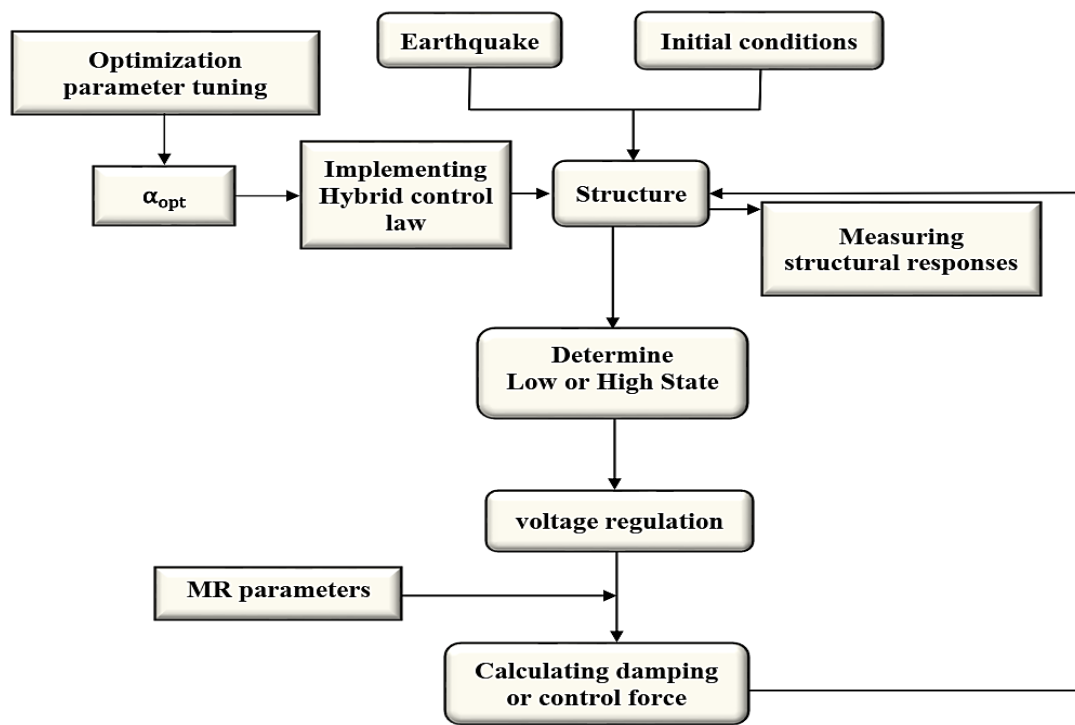


شکل ۳. فرایند کنترل نیمه فعال سازهی مجهز به میراگرهای مغناطیسی.

¹⁶ Bouc-Wen

¹⁴ State space

¹⁵ State variable



شکل ۴. فلوجارت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه. جدول ۱. مشخصات زلزله‌های انتخابی.

Earthquake	Station	year	PGA(g)
Loma-Prieta	Hollister	1989	0.370
Bam	Bam	2003	0.629
Northridge	Sylmar	1994	0.623

جدول ۲. پارامترهای مدل‌سازی میراگرهای مغناطیسی.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
α_a	$21744 \frac{N}{cm}$	$C_b \frac{N.s}{cm.V}$	8.8	β	$3cm^{-1}$
α_b	$99232 \frac{N}{cm.V}$	A.	1.2	η	$50s^{-1}$
C_a	$0.88 \frac{N.s}{cm}$	γ	$3cm^{-1}$	n	1

است. جرم، میرایی، و سختی تمامی طبقات سازه به ترتیب ۱۵۵/۶ ton، ۱۵۳۳۳۳ KN/m و ۱۰۹۷/۷ KN.s/m در نظر گرفته شده است. همچنین، مشخصات مربوط به سه زلزله‌ی لوما- پریتا، نورث‌ریج، و بم در جدول ۱ ارائه شده است.

فرض شده است میراگرهای مغناطیسی با مشخصاتی مطابق جدول ۲ در تمامی طبقات سازه نصب شده‌اند. مقادیر به کاررفته برای مدل‌سازی میراگرهای مغناطیسی در پژوهش حاضر، براساس مدل معین آزمایش شده در دانشگاه ایالت واشنگتن انتخاب شده است؛^[۱۹] به طوری که میراگرهای مغناطیسی تضمین می‌کنند تا در حد اشباع ولتاژ به مقدار ۵ ولت، تقریباً نیرویی معادل ۱۰۰ کیلونیوتن را تأمین کنند. بنابراین، با توجه به استفاده از قوانین پایه و

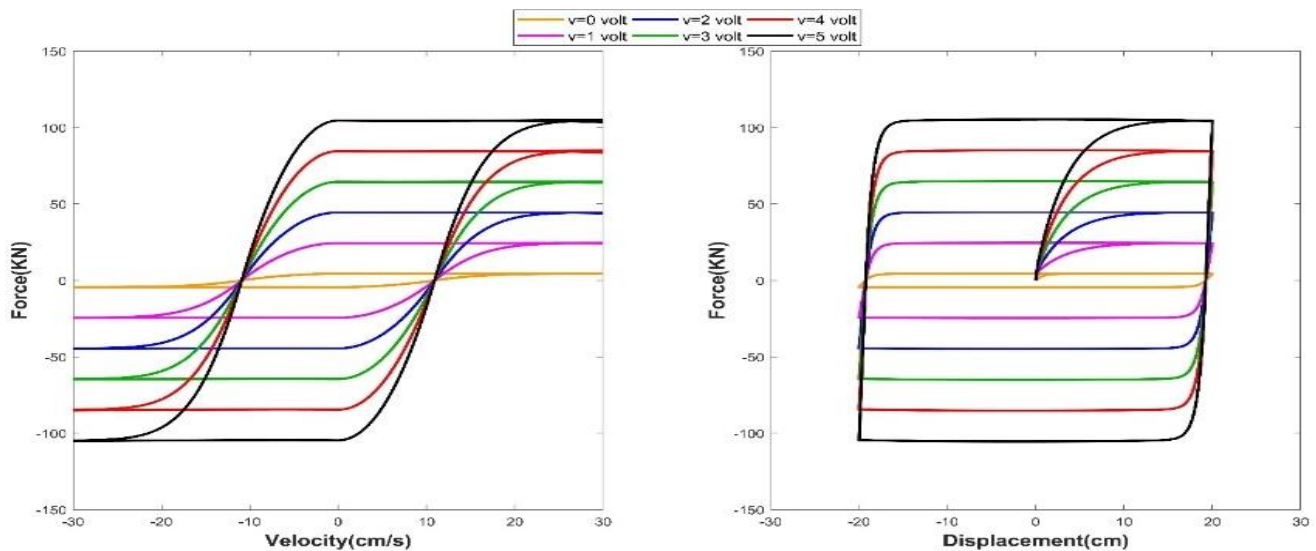
در نظر گرفتن تأخیر زمانی با استفاده از فیلتر مرتبه‌ی اول به صورت رابطه‌ی ۱۶ ارائه می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (16)$$

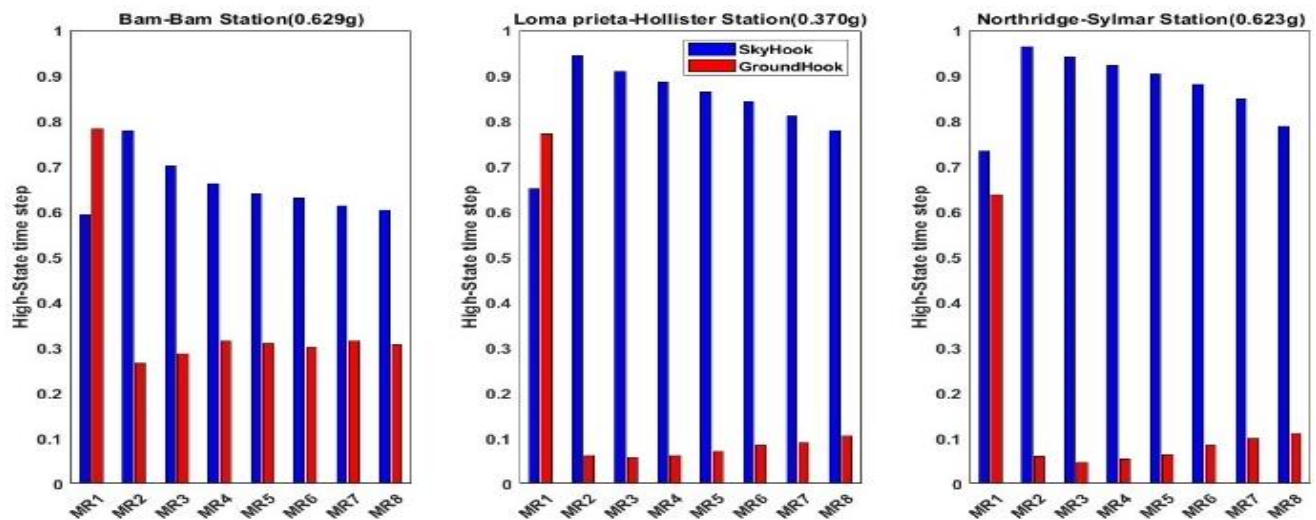
در پژوهش حاضر، جهت حل معادله‌ی ۱۳ و به دست آوردن پارامتر z ، از روش رانگ کوتا^{۱۷} مرتبه‌ی چهار استفاده شده است. در شکل ۴، فلوجارت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی براساس قانون کنترل ترکیبی بهینه مشاهده می‌شود.

۴. مثال‌های عددی

در بخش حاضر، عملکرد پروسه‌ی کنترل پیشنهادی برای یک سازه‌ی ۸ طبقه با مشخصات معلوم،^[۱۸] تحت ارتعاش دو زلزله‌ی لوما- پریتا و بم ارزیابی شده



شکل ۵. راستی آزمایی میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی ۱۰۰ کیلونیوتن.



شکل ۶. مقایسهی نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش دو حالت.

گسسته انجام پذیرد، تعداد گام‌های زمانی که در آن گام‌های میراگرهای مغناطیسی در وضعیت High-State قرار دارند، به راحتی قابل محاسبه است. با بررسی نسبت تعداد گام‌های با وضعیت High-State به تعداد کل گام‌های زمانی تحلیل تاریخچهی زمانی برای قوانین کنترل اسکای هوک و گروندهوک، مطابق شکل‌های ۶ و ۷ مشخص شده است که نسبت تعداد گام‌های زمانی که میراگرهای مغناطیسی در وضعیت High-State قرار می‌گیرند، در قانون کنترل اسکای هوک بیشتر از قانون کنترل گروندهوک است. از طرفی، مطابق نتایج به دست آمده مشاهده شده است که رفتار میراگر مغناطیسی طبقه‌ی اول با سایر طبقات متفاوت است؛ زیرا در تعیین وضعیت میراگر مغناطیسی طبقه‌ی اول، از اطلاعات سرعت زمین استفاده می‌شود و این موضوع باعث می‌شود تا قانون کنترل گروندهوک تعداد گام‌های زمانی بیشتری را نسبت به قانون کنترل اسکای هوک برای میراگر طبقه‌ی اول نتیجه دهد.

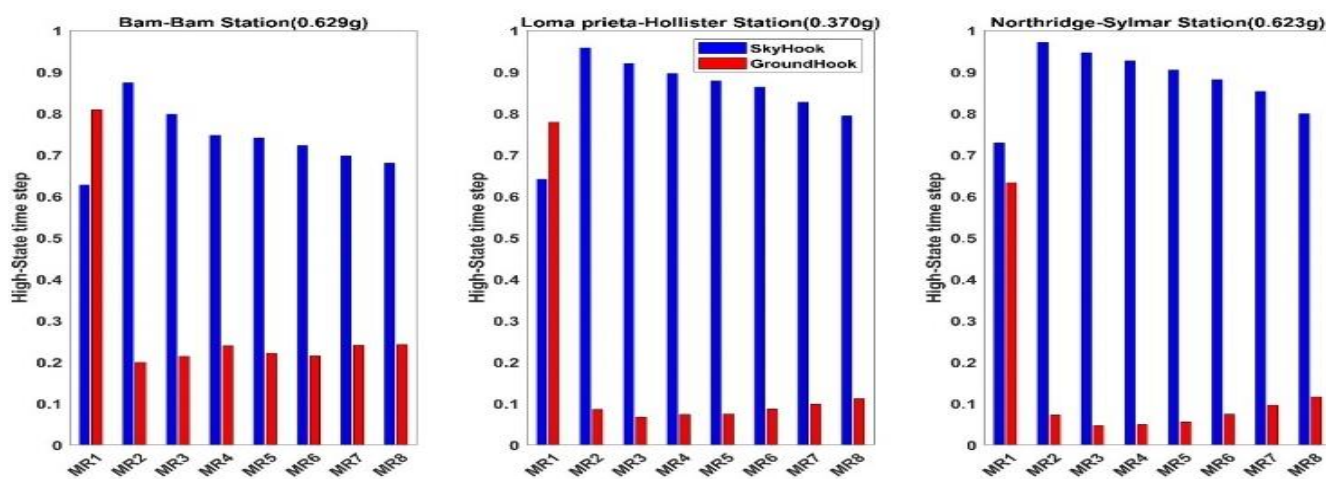
یکی از موضوعات مهم در سیستم‌های کنترل نیمه فعال مجهز به میراگرهای مغناطیسی، استفادهی بیشینه از ظرفیت میراگرهاست. با توجه به پارامترهای مدل سازی میراگرهای مغناطیسی در پژوهش حاضر، تأمین نیروی کنترل معادل ۱۰۰ کیلونیوتن توسط میراگرها در طول بارگذاری زلزله، مورد انتظار است. در شکل‌های ۸ الی ۱۳، تاریخچهی زمانی نیروی کنترلی میراگرهای

ترکیبی به صورت دو حالت و پیوسته، به ترتیب ولتاژها به صورت (۰ و ۵ ولت) و (۰ تا ۵ ولت) در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۵، راستی آزمایی رفتار میراگرهای مغناطیسی جهت تولید نیروی کنترلی ۱۰۰ کیلونیوتن ارائه شده است.

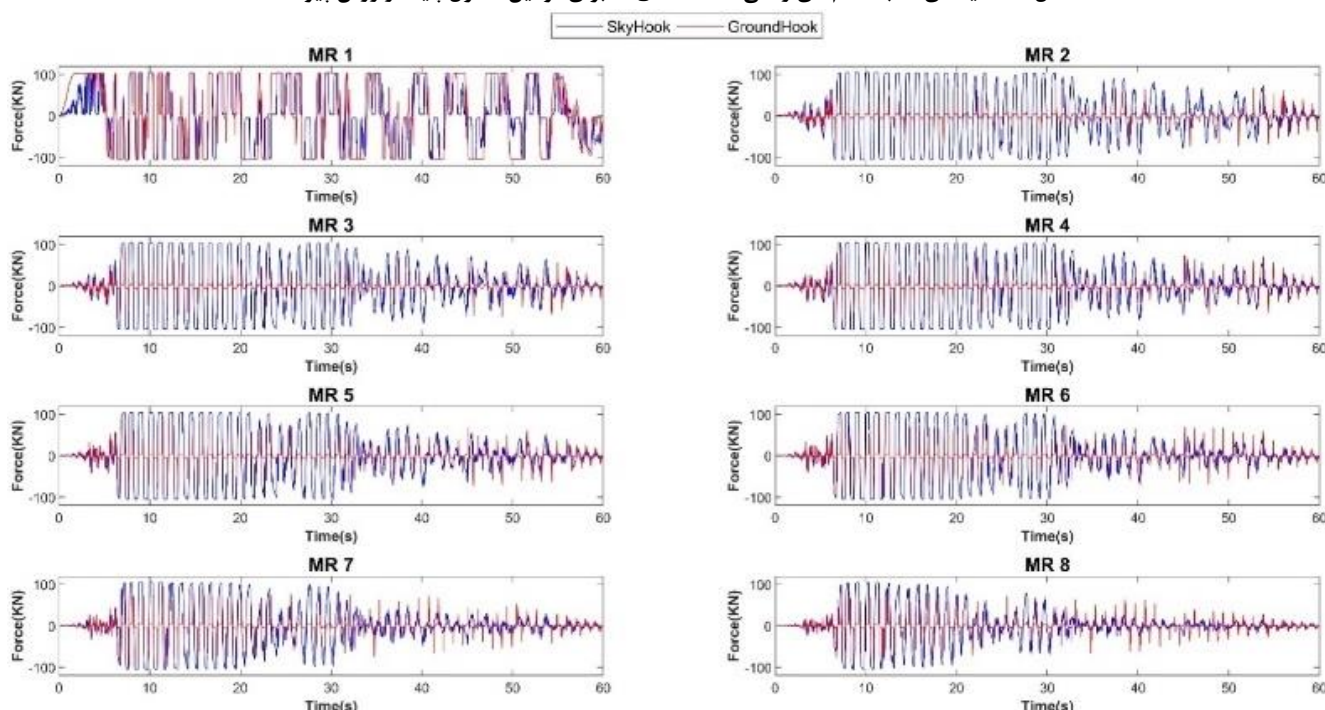
۱.۴. ارزیابی عملکرد قوانین کنترل پایه

برای سازهی در نظر گرفته شده، حس گرهای سرعت و شتاب تعبیه شده‌اند. سرعت سنج‌ها برای دریافت اطلاعات سرعت طبقات و زمین و استفاده از آن‌ها در تعیین وضعیت سازه طبق قوانین کنترلی، و شتاب سنج برای دریافت اطلاعات شتاب زمین جهت استفاده در قوانین کنترل پیوسته استفاده شده‌اند. در قانون کنترل دو حالت، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State به منزلهی تنظیم ولتاژ برابر با ۵ ولت است. اما در قانون کنترل پیوسته، قرار گرفتن میراگر مغناطیسی در وضعیت High-State، ولتاژ را در محدودهی ۰ تا ۵ ولت تنظیم می‌کند. در صورتی که میراگرهای مغناطیسی در وضعیت Low-State باشند، ولتاژ برابر با صفر ولت تنظیم می‌شود.

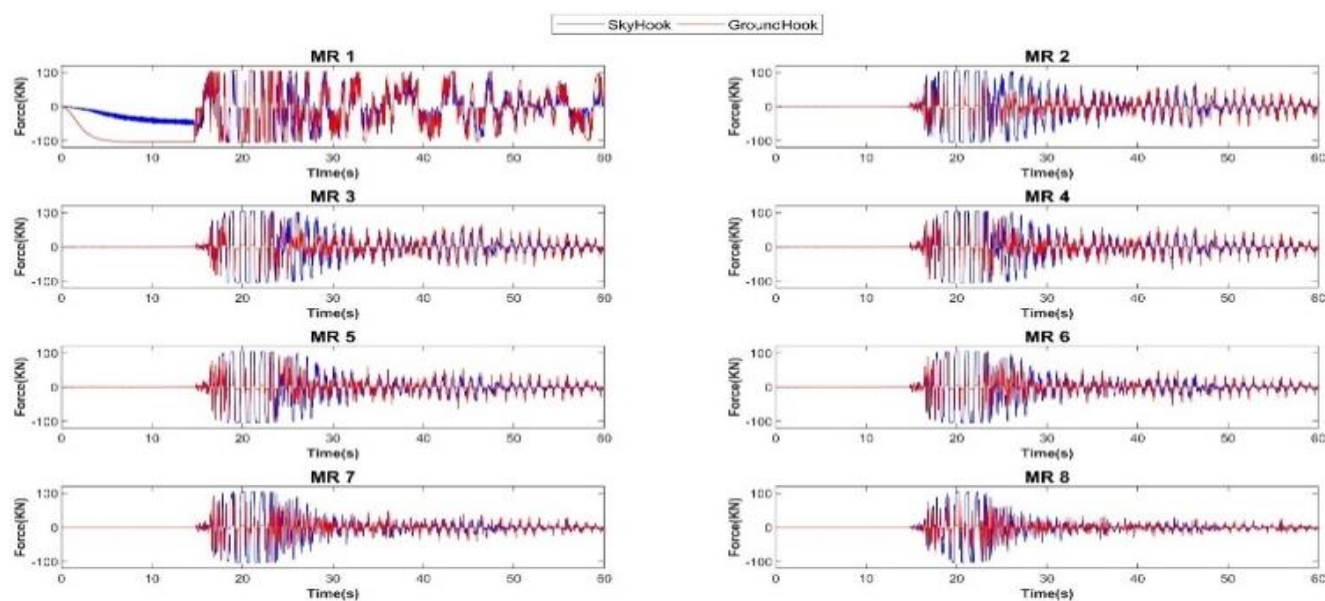
در تحلیل تاریخچهی زمانی سازه، تعیین وضعیت سازه در هر لحظه امکان پذیر است. در صورتی که تحلیل مطابق گام‌های زمانی رکورد شتاب زلزله به صورت



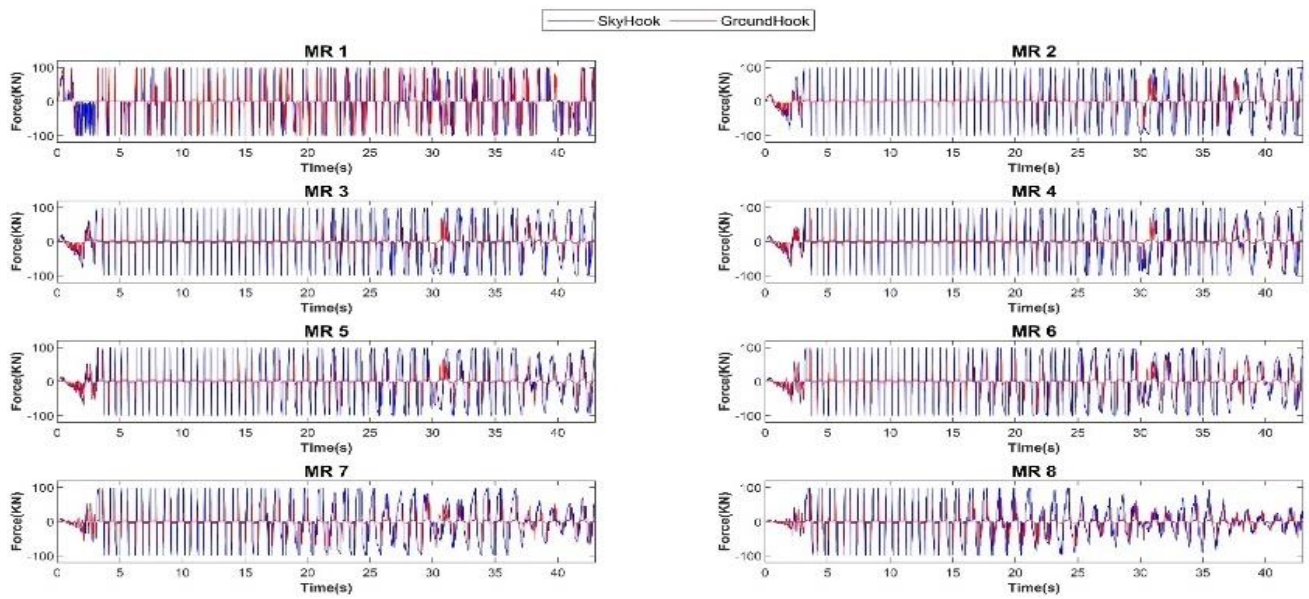
شکل ۷. مقایسه‌ی نسبت گام‌های زمانی High-State برای قوانین کنترل پایه در روش پیوسته.



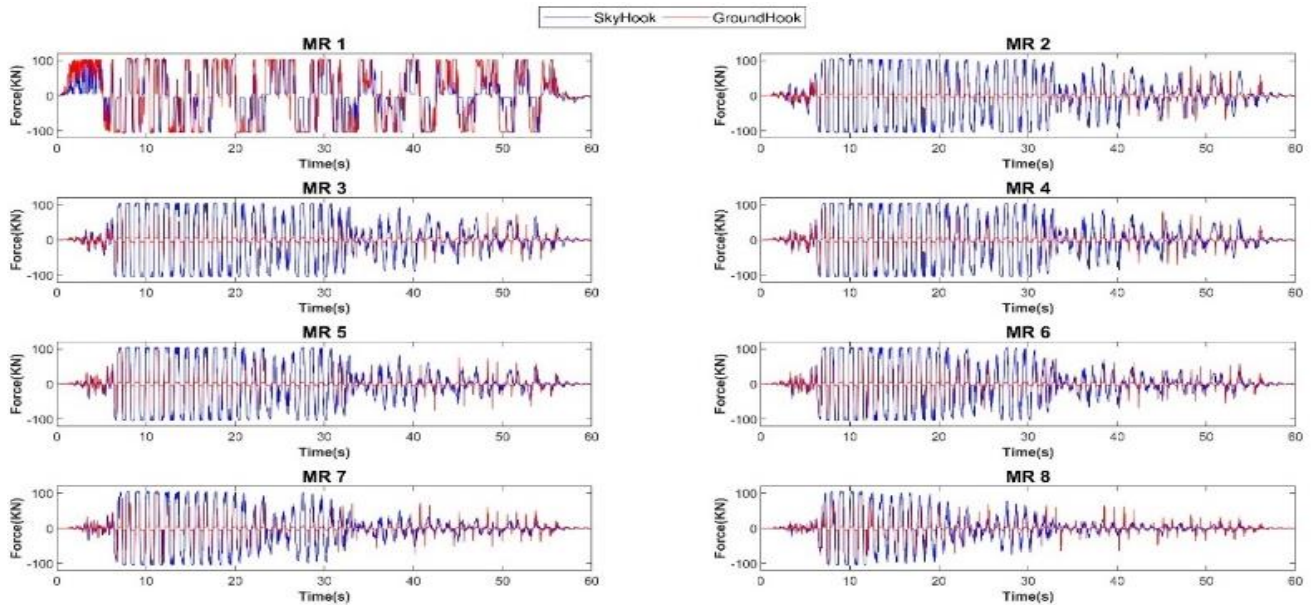
شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی لوما-پریتا).



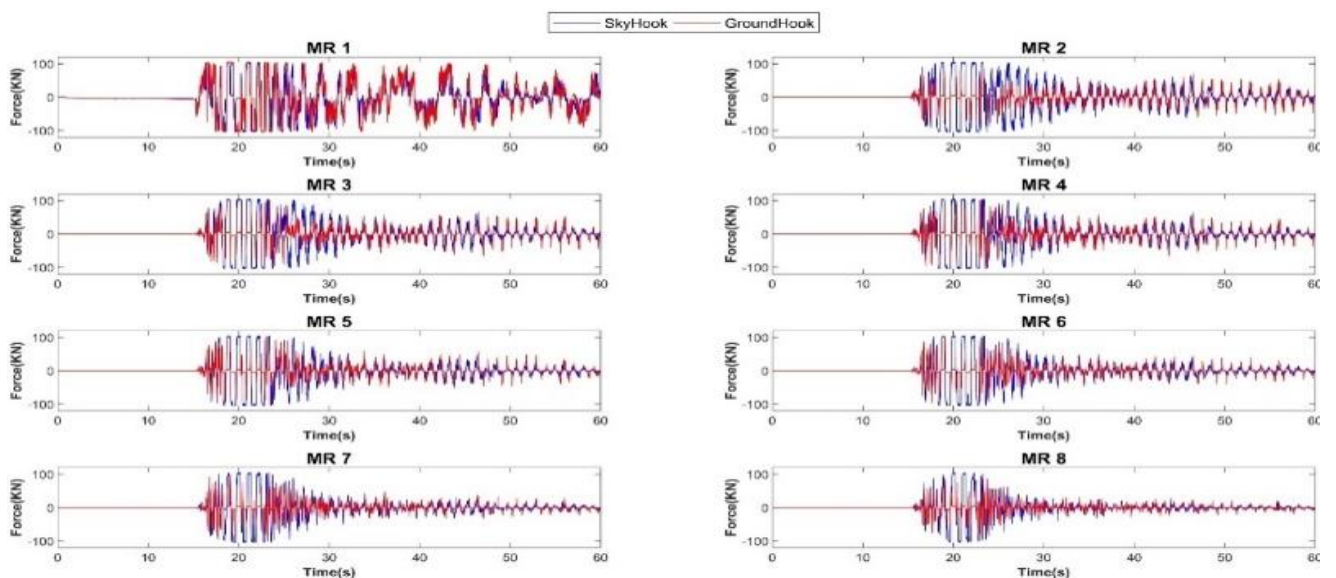
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی بم).



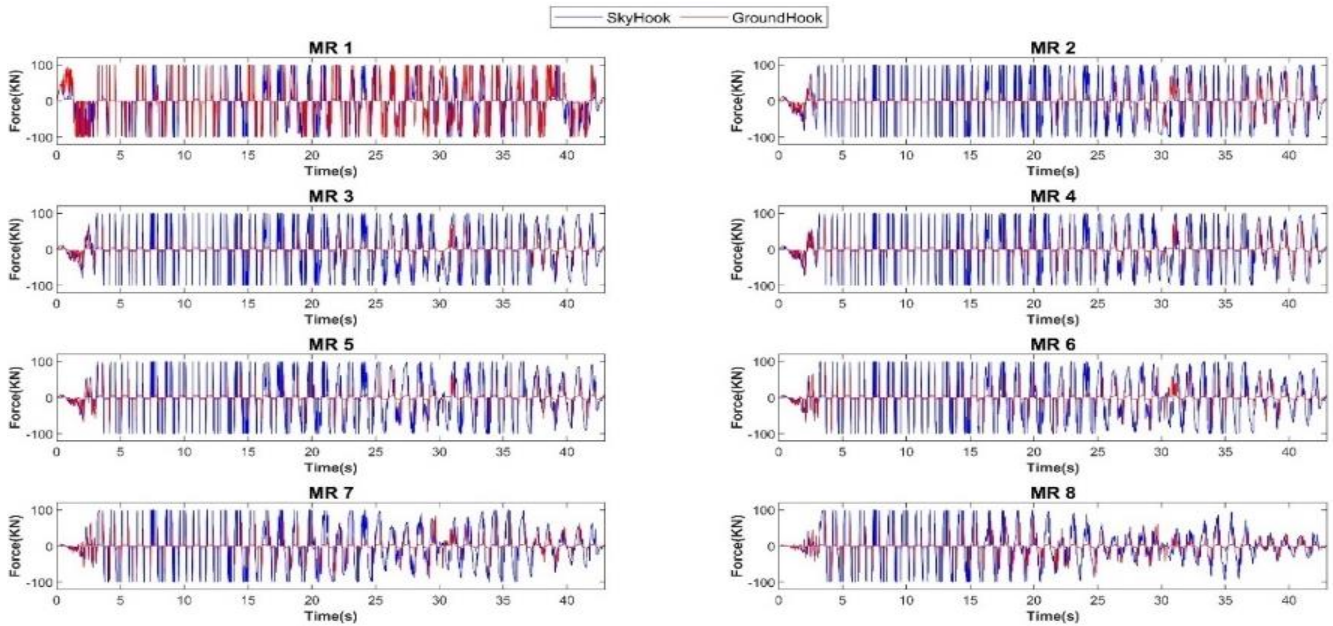
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش دو حالتی قوانین کنترل (زلزله‌ی نورث‌ریج).



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی لوما-پریتا).



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی بم).



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای کنترلی میراگرهای مغناطیسی در روش پیوسته‌ی قوانین کنترل (زلزله‌ی نورتریج).

$$FRR = \frac{\sum_{i=1}^r (RMS_f)_c(i)}{\sum_{i=1}^r CMR(i)} \quad (20)$$

که در آن‌ها، اندیس‌های C و uc به ترتیب برای سازه‌های کنترل شده و کنترل نشده به کار رفته‌اند. از طرفی، اندیس‌های f ، a ، v ، و d به ترتیب بیانگر نیرو، شتاب، سرعت، و جابجایی هستند.

میانگین پاسخ‌های جابجایی، سرعت، شتاب، و نیروی کنترلی با استفاده از جذر میانگین مربعات $(RMS)^{19}$ محاسبه شده‌اند. جهت محاسبه‌ی نسبت پاسخ نیروی کنترلی، نرمال‌سازی با استفاده از مجموع ظرفیت میراگرهای مغناطیسی $(CMR)^{20}$ انجام شده است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نسبت پاسخ‌های سازه بر حسب سهم متفاوت قانون کنترل اسکای‌هوک مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، نسبت پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب تا حد زیادی نزدیک به هم به دست آمده‌اند و با افزایش مقدار α تا محدوده‌ی مشخصی (در حدود $0.9 \sim 1$)، کاهش یافته‌اند. اما در مقابل، نسبت نیروی کنترلی تا محدوده‌ی اخیر افزایش یافته است. بنابراین، مفهوم بهینه‌سازی سهم هر یک از قوانین اسکای‌هوک و گروندهوک و یافتن α_{opt} با در نظر گرفتن تابع هزینه‌ی متشکل از نیرو و جابجایی معنا پیدا می‌کند.

با بهینه‌سازی سهم قانون کنترل اسکای‌هوک (پارامتر α) در قانون کنترل ترکیبی براساس توابع هزینه با وزن‌دهی متفاوت بین نیرو و جابجایی، α_{opt} و مقدار تابع هزینه‌ی متناظر محاسبه شده است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، تغییرات تابع هزینه بر حسب دو پارامتر α و W مشاهده می‌شوند؛ که مطابق نمودارهای مذکور، با افزایش وزن نیرو (W) در محاسبه‌ی تابع هزینه، مقدار تابع هزینه کاهش یافته است. در واقع، در یک α ثابت، با افزایش مقدار W تابع هزینه کاهش یافته است. زمانی که وزن جابجایی در بهینه‌سازی بیشتر در نظر گرفته

مغناطیسی برای قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، برخلاف قانون گروندهوک، در قانون اسکای‌هوک از ظرفیت اسمی (۱۰۰ کیلو نیوتن) تمامی میراگرها استفاده شده است. عملکرد میراگرهای تعبیه شده در طبقات، به جای‌گیری آن‌ها، سرعت طبقه، و پارامترهای مدل بستگی دارد. بنابراین، با توجه به استفاده از سرعت زمین در محاسبه‌ی نیروی کنترلی میراگر طبقه‌ی اول، رفتار متفاوت میراگر اخیر محسوس است.

۲.۴. ارزیابی عملکرد قانون کنترل ترکیبی بهینه

در استفاده از قانون کنترل ترکیبی، با ترکیب قوانین پایه‌ی اسکای‌هوک و گروندهوک، عملکرد سیستم کنترلی می‌تواند بهبود یابد. تفاوت در انتخاب سهم هر یک از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک موجب تغییر رفتار سازه و سیستم کنترلی می‌شود. با تعریف نسبت‌های پاسخ^{۱۸} جابجایی (DRR) ، سرعت (VRR) ، شتاب (ARR) ، و نیروی کنترلی (FRR) ، عملکرد قانون کنترل ترکیبی با مقدار ضریب α قابل ارزیابی است. نسبت‌های پاسخ سازه به صورت روابط ۱۷ الی ۲۰ تعریف می‌شوند:

$$DRR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_d)_{uc}(i)} \quad (17)$$

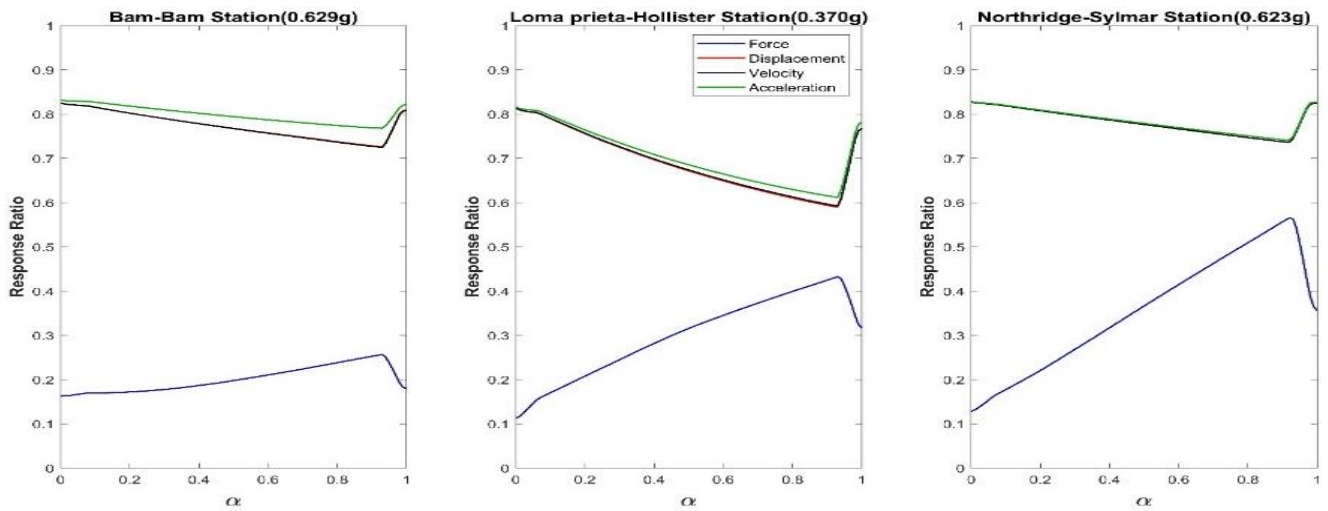
$$VRR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_v)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_v)_{uc}(i)} \quad (18)$$

$$ARR = \frac{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_c(i)}{\sum_{i=1}^n (RMS_a)_{uc}(i)} \quad (19)$$

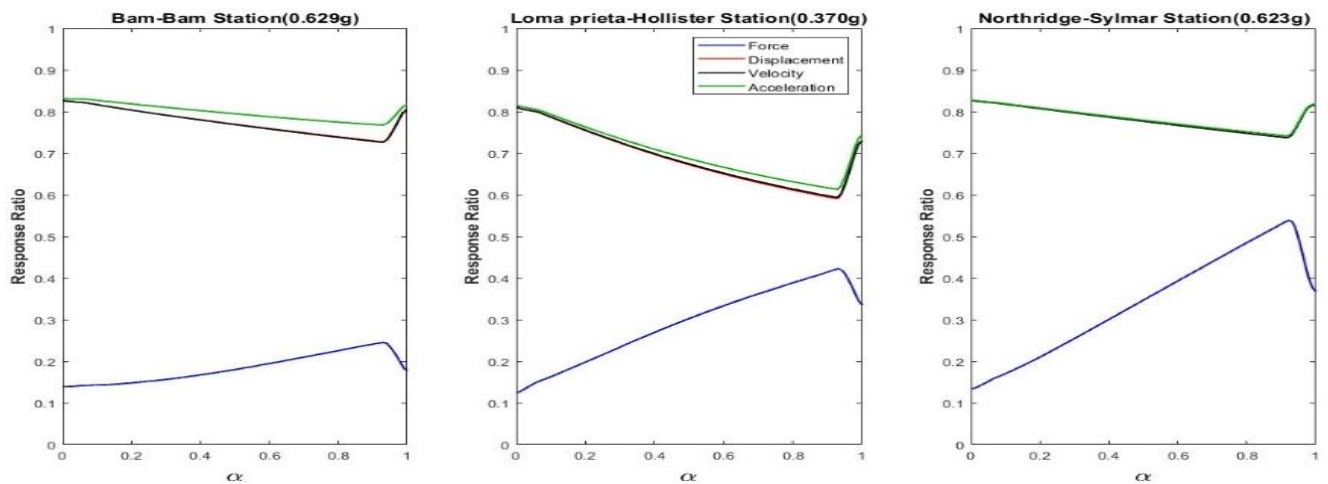
²⁰ Capacity of MR Dampers

¹⁸ Response ratio

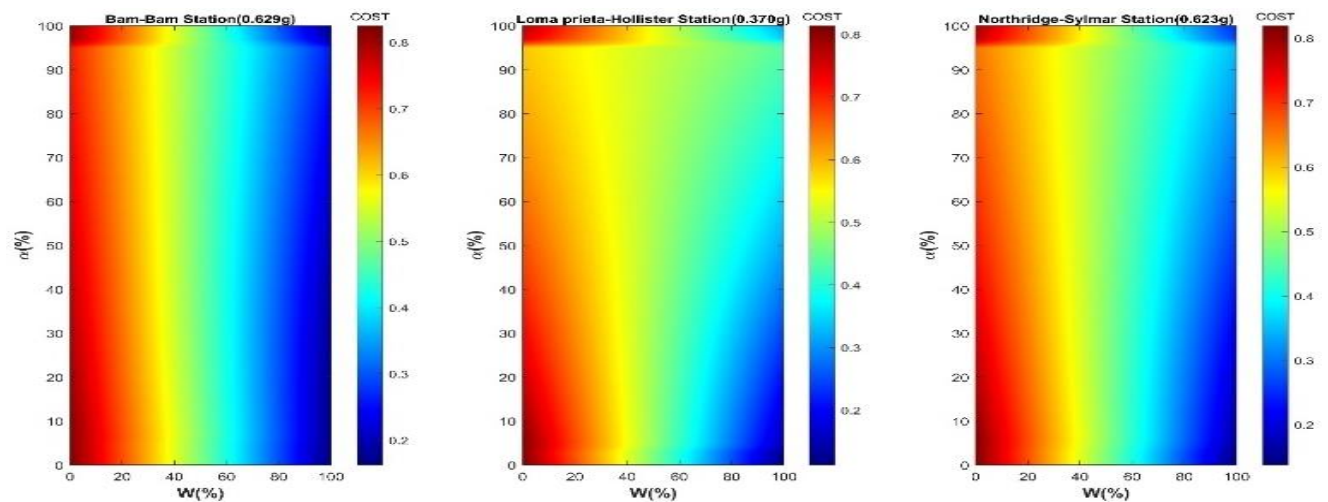
¹⁹ Root Mean Square



شکل ۱۴. تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه بر حسب α برای قانون کنترل ترکیبی دو حالت.



شکل ۱۵. تغییرات نسبت‌های پاسخ سازه بر حسب α برای قانون کنترل ترکیبی پیوسته.

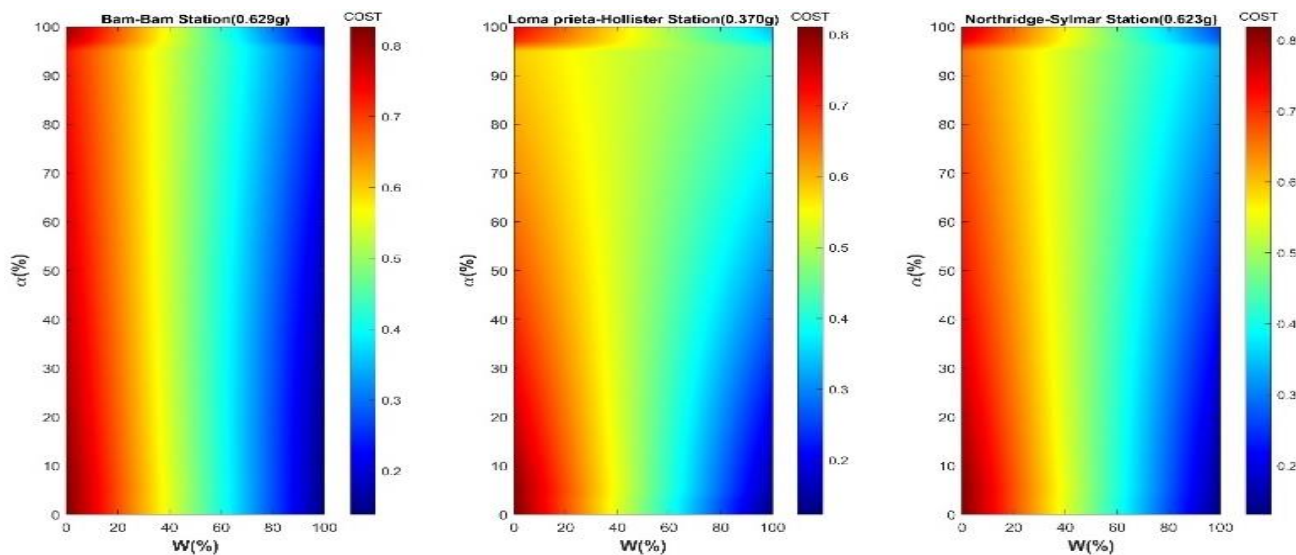


شکل ۱۶. تغییرات تابع هزینه براساس پارامترهای W و α در قانون کنترل ترکیبی دو حالت.

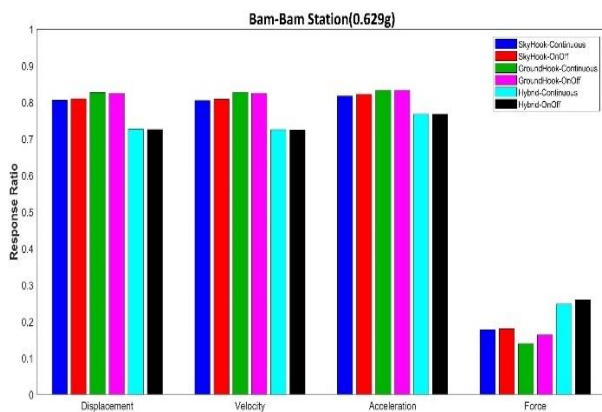
صعودی می‌شود. بنابراین، نتیجه می‌شود قانون کنترل اسکای‌هوک در کنترل جابجایی سازه مؤثر است؛ ولی در قانون کنترل گروندهوک، نیروی کنترلی کمتری نسبت به قانون کنترل اسکای‌هوک مصرف می‌شود.

با توجه به اهمیت کاهش جابجایی سازه با کمینه‌ی نیروی کنترلی ممکن، معمولاً وزن نیرو و جابجایی یکسان فرض می‌شوند. با فرض یکسان بودن وزن

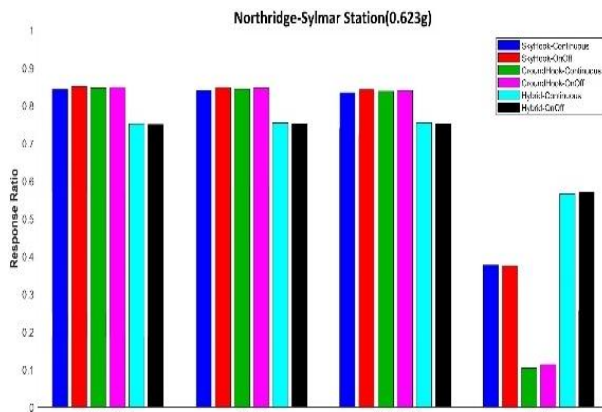
می‌شود، در یک وزن ثابت، مقدار تابع هزینه با افزایش α ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد؛ اما روند اخیر زمانی که وزن نیرو در بهینه‌سازی بیشتر است، برعکس می‌شود. از طرفی، در حالت‌هایی که وزن جابجایی در تابع هزینه بیشتر در نظر گرفته می‌شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در حدود ۹۵٪ است. اما زمانی که وزن نیرو در تابع هزینه افزایش پیدا می‌کند، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک نزولی و سهم بهینه‌ی قانون کنترل گروندهوک



شکل ۱۷. تغییرات تابع هزینه براساس پارامترهای W و α در قانون کنترل ترکیبی پیوسته.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی بم.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی نورتریج.

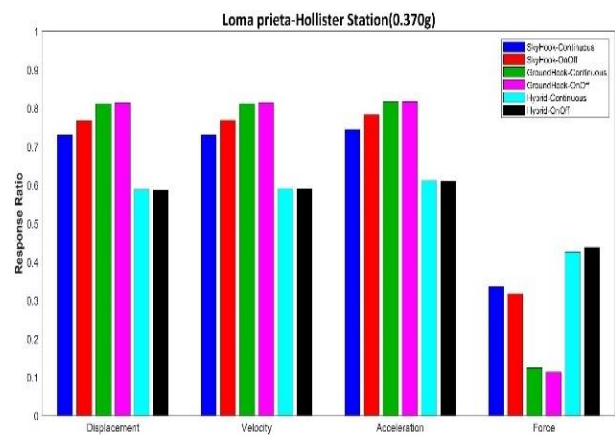
جابجایی، سرعت، و شتاب سازه تقریباً مشابه است؛ اما قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتری چنین نتیجه‌ای را به‌دست دهد. بنابراین، قانون کنترل ترکیبی بهینه به روش پیوسته می‌تواند به‌عنوان یک قانون کنترل ساده و سودمند استفاده شود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بررسی ترکیب بهینه از قوانین کنترل پایه در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال برای سازه‌ی مجهز به میراگرهای مغناطیسی صورت گرفته و

جدول ۳. مقادیر بهینه‌ی پارامتر α .

Hybrid control law	Earthquake	α_{opt}
on-off	Loma-prieta	94.83%
	Bam	94.75%
	Northridge	95.51%
Continuous	Loma-prieta	94.68%
	Bam	95.03%
	Northridge	94.89%



شکل ۱۸. مقایسه‌ی نسبت پاسخ‌های سازه تحت ارتعاش زلزله‌ی لوما پریتا.

نیرو و جابجایی ($W=0.5$) در محاسبه‌ی تابع هزینه، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی دو حالت و پیوسته در جدول ۳ ارائه شده است.

با مقایسه‌ی قوانین کنترل اسکای‌هوک، گروندهوک، و ترکیبی به دو روش دو حالت و پیوسته مطابق شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ نتیجه می‌شود که قانون کنترل ترکیبی در کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب سازه می‌تواند مؤثر واقع شود. اگرچه نیروی کنترلی مصرفی در قوانین کنترلی مذکور بیشتر از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک است، اما میراگرهای مغناطیسی به‌کاررفته، ظرفیت تأمین چنین نیرویی را دارند. با مقایسه‌ی روش‌های دو حالت و پیوسته در قانون کنترل ترکیبی مشخص می‌شود که عملکرد آن‌ها در کاهش پاسخ‌های

گروندهوک است. در مورد قانون کنترل ترکیبی به روش‌های پیوسته و دو حالت نشان داده شده است که اگر در محاسبه‌ی تابع هزینه، وزن جابجایی از نیرو بیشتر در نظر گرفته شود، سهم بهینه‌ی قانون کنترل اسکای‌هوک در قانون کنترل ترکیبی در حدود ۹۵٪ به دست می‌آید. با مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه در استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش‌های دو حالت و پیوسته مشخص شد که قانون کنترل ترکیبی پیوسته می‌تواند با نیروی کنترلی کمتری نسبت به قانون کنترل ترکیبی دو حالت، پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب را کاهش دهد.

عملکرد مناسب آن برای سازه‌های ساختمانی ارزیابی شده است. یک سازه‌ی ۸ طبقه تحت ارتعاش سه زلزله‌ی لوما- پریتا، بم، و نورث‌ریچ بررسی شده است. الگوریتم کنترل سازه با استفاده از قانون کنترل ترکیبی به روش پیوسته، قانون کنترل ترکیبی به روش دو حالت، و قوانین پایه‌ی اسکای‌هوک و گروندهوک به روش‌های دو حالت و پیوسته تعریف شده است. سهم هر کدام از قوانین کنترل اسکای‌هوک و گروندهوک در قانون کنترل ترکیبی با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی و قانون کنترل ترکیبی بهینه و پیوسته برای سازه‌ی موردنظر ارائه شده است. نتایج نشان داده‌اند که قانون کنترل اسکای‌هوک در کاهش پاسخ‌های جابجایی، سرعت، و شتاب مؤثر است و بهتر از قانون کنترل

References- منابع

1. Rousta, A.M., 2023. Seismic retrofitting of steel moment-resisting frames (SMRFs) using steel pipe dampers. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 87(1), pp.69-84. DOI: [10.12989/sem.2023.87.1.069](https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.1.069)
2. Ghaffari, A.H. and Ghaffarzadeh, H., 2023. Mine blast-induced ground motion response reduction using semi-active devices. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 32(8-9), p.e2005. DOI: [10.1002/tal.2005](https://doi.org/10.1002/tal.2005)
3. Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F., 2006. Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation. *John Wiley & Sons*. DOI: [10.1002/0470022914](https://doi.org/10.1002/0470022914)
4. Sohn, H.C., Hong, K.S. and Hedrick, J.K., 2000, September. Semi-active control of the Macpherson suspension system: hardware-in-the-loop simulations. In *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications*. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37162) (pp. 982-987). IEEE. DOI: [10.1109/CCA.2000.897600](https://doi.org/10.1109/CCA.2000.897600)
5. Khoshnoudian, F. and Mehrparvar, B., 2013. A new control algorithm to protect nonlinear base-isolated structures against earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(18), pp.1376-1389. DOI: [10.1002/tal.1012](https://doi.org/10.1002/tal.1012)
6. Moutinho, C., 2015. Testing a simple control law to reduce broadband frequency harmonic vibrations using semi-active tuned mass dampers. *Smart Materials and Structures*, 24(5), p.055007. DOI: [10.1088/0964-1726/24/5/055007](https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055007)
7. Ghaffarzadeh, H., Aran, A. and Javadi Amoodizaj, F., 2024. Phase motion predictive control for a structure equipped with MR dampers. *Journal of Structural and Construction Engineering*. DOI: [10.22065/jsce.2024.451732.3388](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388)
8. Ferreira, F., Moutinho, C., Cunha, Á. and Caetano, E., 2018. Proposal of optimum tuning of semiactive TMDs used to reduce harmonic vibrations based on phase control strategy. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(4), p.e2131. DOI: [10.1002/stc.2131](https://doi.org/10.1002/stc.2131)
9. Yu, H., Sun, X., Xu, J. and Zheng, P., 2016. The time-delay coupling nonlinear effect in sky-hook control of vibration isolation systems using Magneto-Rheological Fluid dampers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, pp.4157-4166. DOI: [10.1007/s12206-016-0827-9](https://doi.org/10.1007/s12206-016-0827-9)
10. Liu, Y., Waters, T.P. and Brennan, M., 2005. A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances. *Journal of sound and vibration*, 280(1-2), pp.21-39. DOI: [10.1016/j.jsv.2003.11.048](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.048)
11. Valášek, M., Novak, M., Šika, Z. and Vaculin, O., 1997. Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension. *Vehicle system dynamics*, 27(5-6), pp.289-303. DOI: [10.1080/00423119708969333](https://doi.org/10.1080/00423119708969333)
12. Zhang, Y., Schauer, T., Wernicke, L., Wulff, W. and Bleicher, A., 2020. Facade-integrated semi-active vibration control for wind-excited super-slender tall buildings. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), pp.8395-8400. DOI: [10.1016/j.ifacol.2020.12.1585](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1585)
13. Viet, L.D., Nghi, N.B., Hieu, N.N., Hung, D.T., Linh, N.N. and Hung, L.X., 2014. On a combination of ground-hook controllers for semi-active tuned mass dampers. *Journal of Mechanical Science and*

- Technology*, 28, pp.2059-2064. DOI: [10.1007/s12206-014-0109-3](https://doi.org/10.1007/s12206-014-0109-3)
14. Koo, J.H., Ahmadian, M., Setareh, M. and Murray, T., 2004. In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers. *Journal of Vibration and Control*, 10(2), pp.163-174. DOI: [10.1177/1077546304032020](https://doi.org/10.1177/1077546304032020)
 15. Kim, G.C. and Kang, J.W., 2011. Seismic response control of adjacent building by using hybrid control algorithm of MR damper. *Procedia Engineering*, 14, pp.1013-1020. DOI: [10.1016/j.proeng.2011.07.127](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.127)
 16. Kim, H.S. and Kang, J.W., 2012. Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*, 41, pp.242-257. DOI: [10.1016/j.engstruct.2012.03.038](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.038)
 17. Javadinasab, H.S., Salari, S. and Ghorbani-Tanha, A., 2014. Optimization of combination of sky-hook and ground-hook algorithms in semi-active control of steel frames. In *Proc., 6th World Conf. on Structural Control and Monitoring. Barcelona, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering*.
 18. Rashidi, H., Khanlari, K., Zarfam, P. and Ghafory-Ashtiany, M., 2021. A novel approach of active control of structures based on the critically damped condition. *Journal of Vibration and Control*, 27(13-14), pp.1511-1523. DOI: [10.1177/1077546320944300](https://doi.org/10.1177/1077546320944300)
 19. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., 2001. Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers. *Journal of engineering Mechanics*, 127(11), pp.1152-1164. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:11\(1152\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:11(1152))



Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

<https://sjce.journals.sharif.edu>



Research Article

Investigation of Brine Dispersion of Desalination Plants in the Vicinity of Kish Island Port Using Field Measurements and Numerical Modeling

Omid Pourabdollah¹ and Reza Ghiassi^{*2}

¹ Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

² School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* corresponding author: (rghiassi@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 11 May 2025

Revised: 4 August 2025

Accepted: 5 August 2025

Keywords:

Numerical modeling,
field study,
coastal desalination plants,
environmental impact.

Abstract

Desalination of seawater is one of the most effective methods, and in some cases, the only possible method for producing drinking water. The combined effect of desalination plants and port structures on the coastal environment can sometimes have specific environmental consequences. The dispersion from the desalination plants, especially the changes in salinity and temperature, has significant effects on coral reefs. In this paper, the effect of the commercial port of Kish Island with regard to the desalination plants was investigated using field measurements and numerical modeling. In 3 stages of field measurement, water quality parameters were measured from 24 different points near the northern coast of Kish Island. The speed and direction of the current were also measured to verify the accuracy of the numerical modeling. The current and dispersion of thermal and salinity pollution were modeled using the MIKE21 two-dimensional model. The computational domain was about 30 square kilometers in size and was discretized into four zones using four different element sizes. Comparison of the numerical modeling results with field measurements indicated acceptable accuracy. The results of the modeling of the salinity diffusion pattern indicate a significant spread in the zone surrounding the outfall of desalination plants and the Kish Island commercial port. Around the outfall, the average temperature and electrical conductivity (EC) increased by 16% and 14%, respectively. This is due to the effect of the west breakwater on current reduction, which resulted in increasing brine concentration. The ultimate point where the ambient temperature has increased by 3 degrees is 170 meters from the outfall. Therefore, considering the impact of temperature changes on coral reefs is critically important. Given the absence of measured data on water quality parameters, current, and velocity direction across various tides at this location, the findings of this study contribute to a better understanding of the environmental status of the area.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing.

To Cite this article:

Pourabdollah, O. and Ghiassi, R. 2026. Investigation of brine dispersion of desalination plants in the vicinity of kish island port using field measurements and numerical modeling, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 17-30 .
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.66751.3425>



بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی

امید پورعبداله^۱ و رضا غیائی^{۲*}

^۱ پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران.

^۲ دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول (rghiassi@ut.ac.ir)

چکیده

شیرین‌سازی آب دریا، یکی از بهترین یا در برخی مناطق، یگانه روش ممکن جهت تولید آب مصرفی است. تأثیر توأم تأسیسات آب شیرین‌کن و سازه‌های بندری در محیط‌زیست ساحل می‌تواند بعضاً تبعات خاص زیست‌محیطی به همراه داشته باشد. پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن و مشخصاً تغییرات میزان شوری و دما، آثار قابل‌توجهی در مجموعه‌های مرجانی دارد. در نوشتار حاضر، اثر توأم بندر تجاری جزیره‌ی کیش و تأسیسات آب شیرین‌کن در تغییرات کیفی آب محدوده‌ی مرتبط، بررسی میدانی و عددی شده است. در ۳ مرحله، نمونه‌برداری میدانی از ۲۴ نقطه‌ی مختلف نزدیک ساحل شمالی جزیره‌ی کیش، پارامترهای کیفی آب اندازه‌گیری شده‌اند. سرعت و جهت جریان نیز جهت راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام‌شده اندازه‌گیری شده‌اند. مدل‌سازی جریان و پراکنش آلودگی حرارتی و شوری با استفاده از مدل دوبعدی در پلان ۲۱ MIKE انجام شده است. میدان محاسباتی به ابعاد حدود ۳۰ کیلومترمربع و با کاربرد ۴ اندازه‌ی مختلف المان در ۴ ناحیه منقطع شده است. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی، نشانگر دقت قابل‌قبول است. نتایج مدل‌سازی الگوی انتشار شوری، بیانگر گستره‌ی قابل‌توجه در منطقه‌ی پیرامونی محل خروجی پساب و بندرگاه تجاری کیش است. به‌طوری‌که در محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی پساب، میزان شوری و دما به‌دلیل وجود موج‌شکن غربی، کاهش سرعت جریان، و عدم‌تغییر محل خروجی، ۱۵-۱۶ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده بوده است. دورترین نقطه‌ای که در آن دمای خروجی آب موجب افزایش ۳ درجه‌ای محدوده شده است، ۱۷۰ متر از محل خروجی بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

واژگان کلیدی:

مدل‌سازی عددی،

اندازه‌گیری میدانی،

آب شیرین‌کن ساحلی،

آثار زیست‌محیطی.

۱. مقدمه

زیست‌محیطی مهم است. برای درک کیفی وضعیت موجود نوار ساحلی و نحوه‌ی پراکندگی پساب آب شیرین‌کن، جمع‌آوری داده‌های میدانی، مانند: سرعت و جهت جریان در جزر و مد‌های مختلف، هیدروگرافی، و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای مرتبط انجام‌پذیر است. سهم قابل‌توجهی از آب شیرین‌کن‌های موجود در دنیا و عملاً تمامی آن‌ها درکشورمان به دو روش اسمز معکوس (RO) و تقطیری (MED) شیرین‌سازی آب دریا را انجام می‌دهند؛ که در هر دو روش مذکور در کنار مصرف انرژی، پساب خروجی باعث افزایش دما و شوری می‌شود. با توجه به اهمیت موارد زیست‌محیطی و عدم شناخت کافی نحوه‌ی انتشار پساب آب شیرین‌کن‌ها در موقعیت‌های مکانی مختلف، در طی سال‌های گذشته، مطالعات متنوعی در بخش برداشت‌های میدانی و تحلیلی کیفیت آب سواحل انجام شده است.

شیرین‌سازی آب دریا، یکی از بهترین یا در برخی مناطق مانند مناطق ساحلی، یگانه روش ممکن جهت تولید آب شیرین است. مناطق اخیر معمولاً برای تأمین نیازهای اقتصادی، اجتماعی، و حمل‌ونقل شامل سازه‌های بندری و دریایی هستند. شیرین‌سازی سایر فرآیندهای مهم صنعتی و عمرانی، آثار زیست‌محیطی دارند. تأثیر توأم تأسیسات آب شیرین‌کن و سازه‌های بندری و دریایی در محیط‌زیست ساحل می‌تواند بعضاً تبعات خاص زیست‌محیطی به همراه داشته باشد. با توجه به ماهیت پدیده‌ی انتقال و انتشار یک ماده در ماده‌ی دیگر، که معمولاً با حجم بیشتری نسبت به ماده‌ی انتقال‌یافته یا منتشرشده است، پدیده‌ی انتشار پساب تأسیسات آب شیرین‌کن‌ها به‌دلیل افزایش دو پارامتر اصلی دما و شوری در کنار سایر پارامترهای مؤثر

استناد به این مقاله:

پورعبداله، امید و غیائی، رضا، ۱۴۰۵. بررسی توزیع پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در اطراف بندر جزیره‌ی کیش با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی عددی. مهندسی عمران شریف،

صص ۳۰-۱۷. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.66751.3425>



با در نظر گرفتن پارامترهای جزر و مد و باد و اندازه‌گیری میدانی خلیج فارس، نتایج مدل‌سازی را واسنجی کرده‌اند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی جریان جزر و مدی با اندازه‌گیری میدانی، دقت قابل قبولی داشته و تأثیر توأمان باد و جزر و مد در کیفیت آب خلیج چابهار اثر قابل توجهی داشته است.

آبه‌سی^۸ و همکاران (۲۰۱۶)^{۱۹} آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی جت‌های متراکم خروجی پساب آب شور به صورت مایل در آب‌های کم‌عمق با نازل‌هایی در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور افقی انجام داده و تغییرات تمرکز غلظت در مسیر پرتاب را با روش سه‌بعدی فلورسانس القایی لیزر اندازه‌گیری کرده‌اند. سولا^۹ و همکاران (۲۰۱۹)^{۱۰} در بررسی اثر زیست‌محیطی ۳۰ عدد آب شیرین کن در کشور اسپانیا مابین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹، به ارزیابی کیفی طرح‌های زیست‌محیطی مانیتورینگ تأسیسات آب شیرین کن کشور اسپانیا پرداخته‌اند. الزام‌های مانیتورینگ پساب خروجی و طراحی با گذشت زمان بهبود یافته است؛ ولی بازنگری در الزام‌های مذکور، در سطح ملی جهت یکسان‌سازی توصیه شده است. این استانداردسازی باید بیشتر متوجه تأسیسات آب شیرین کن با ظرفیت بالا باشد، زیرا احتمال تأثیرگذاری بیشتری در محیط دریا دارند.

در زمینه‌ی مطالعات عددی کیفیت آب ساحلی، آنتون^{۱۱} و همکاران (۱۹۷۱)^{۱۱} جهت شناسایی معیار نحوه‌ی انتشار پساب خروجی تأسیسات آب شیرین کن در اقیانوس از مدل ساده‌شده‌ی ریاضی جریان یک‌بعدی در میدان سه‌بعدی استفاده کرده‌اند. استیدمن و کریج^{۱۱} (۱۹۸۳)^{۱۲} با مشاهده‌های اندازه‌گیری جریان در مطالعه و مدل‌سازی وضعیت گردش جریان آب در منطقه‌ی Cockburn Sound تحت تأثیر شرایط مختلف وزش باد، مانند نسیم ساحلی و طوفان زمستانی، نشان داده‌اند که میانگین سرعت کمتر از ۰/۰۵ متر بر ثانیه در منطقه‌ی مذکور و ۰/۰۷ متر بر ثانیه در آب‌های آزاد ساحلی مجاور بوده است. همچنین، بیشینه‌ی جریان ناشی از جزر و مد نیز بسیار کم و با بزرگی ۰/۰۱ متر بر ثانیه بوده است.

پایو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۰)^{۱۳} در بررسی تأثیر باد و امواج در رقیق شدن پساب خروجی دو تأسیسات آب شیرین کن در ساحل آلکانته واقع در جنوب شرقی اسپانیا دریافته‌اند که خروجی پساب دو تأسیسات ذکر شده با یک کانال مشترک به نزدیکی ساحل انتقال می‌یابند. مدیران تأسیسات باید قبل از تخلیه‌ی پساب، آن را با آب دریا رقیق کنند تا مقادیر شوری کاهش یابد. ایشان برای درک بیشتر، سناریوی منحصر به فرد اثر باد و امواج در روند اخیر مخلوط کردن در نزدیکی ساحل را ارائه کرده‌اند؛ که عملکرد موج حاکی از کاهش میزان شوری بوده است. نه فقط ارتفاع موج، بلکه مدت زمان طوفان نیز نقش مهمی را ایفا کرده است.

علیشیری و طیبی (۲۰۱۴)^{۱۴} به بررسی مفهومی فرآیندهای شیرین‌سازی آب دریا و ارائه‌ی الگوریتم مدل‌سازی غیرخطی معکوس در هوش مصنوعی با هدف اتخاذ تصمیم‌های اساسی جهت انتخاب بهینه‌ی فرآیند آب شیرین کن و به کاربردن مناسب‌ترین سیستم آب شیرین کن متناسب با پارامترهای مختلف

در یکی از قدیمی‌ترین مطالعات، فالکونر^۱ (۱۹۹۲)^{۱۱} یک مدل ریاضی دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق را برای پیش‌بینی مشخصات جریان توسعه داده است؛ که در آن، ارتفاع آب، سرعت میانگین در عمق، و توزیع غلظت در رودخانه‌ها، مصب‌ها، و آب‌های ساحلی قابل محاسبه بوده است.

مورتن^۲ و همکاران (۱۹۹۷)^{۱۲} آثار زیست‌محیطی ساحلی تأسیسات آب شیرین کن را با فرآیند اسمز معکوس در مقایسه با روش تقطیری بررسی و میزان مصرف آب ورودی، دما، و میزان غلظت مواد شیمیایی پساب خروجی آب‌شیرین کن را ارزیابی کرده‌اند.

بررسی آثار پساب آب شیرین کن ساحل بارانکو دل تورو^۳ واقع در جنوب جزایر قناری جهت شناسایی آثار ناشی از تخلیه بر روی جانوران و گیاهان منطقه، با توجه ویژه به وجود گونه‌ی گیاهی دریایی موجود در بستر شنی آن منطقه با انجام مطالعات ژرفاسنجی جهت شناسایی نحوه‌ی هدایت خروجی با توجه به تغییر عمق توسط تالاورا و رویز^۴ (۲۰۰۱) انجام شده است.^{۱۳} دانون^۵ و همکاران (۲۰۰۷)^{۱۴} آثار پساب تأسیسات آب شیرین کن در حیات دریا را بررسی کرده و دریافته‌اند که شوری، دما، و نوسان‌های قلیایی کل به دلیل تخلیه‌ی پساب از تأسیسات شیرین‌سازی می‌توانند نقش بسزایی در فراوانی و توزیع گونه‌های گیاهی و جانوری داشته باشند. تورکومادا^۶ و همکاران (۲۰۰۹)^{۱۵} با انجام بررسی‌های میدانی، پردازش داده‌ها، و مدل‌سازی در نرم افزار ArcGIS به اعتبارسنجی و ارزیابی مطالعات و مدل‌های ارائه‌شده‌ی پراکندگی پساب تأسیسات آب شیرین کن‌های غربی دریای مدیترانه به روش اسمز معکوس پرداخته‌اند.

کوداله^۷ (۲۰۱۰)^{۱۶} در ارزیابی تأثیر توسعه‌ی بندر و تغییرات در خط ساحلی و نیاز به حفاظت آن دریافته است که خط ساحلی به‌طور طبیعی تحت تأثیر جزر و مد و تغییرات فصلی مؤثر در امواج و باد است، که در مورفولوژی نوار ساحل تأثیرگذار است. درک صحیح از شناخت روند سواحل و پیش‌بینی وقایع، پیش از رخداد، اهمیت بسیاری دارد. تغییرات در تأسیسات ساحلی مستلزم توجه به موضوع لایروبی و در معرض قرار گرفتن فعالیت‌ها جهت حفظ عمق مورد نیاز بندر است. روش عبور رسوب (Sand bypassing) به عنوان یکی از بهترین روش‌ها جهت کاهش رسوب‌گذاری پیشنهاد شده است.

مرجانی و جمالی (۲۰۱۴)^{۱۷} در بررسی تأثیر تبادل جریان در دریاچه‌ی ارومیه، با توجه به اینکه یک جاده‌ی ۱۵ کیلومتری دریاچه را به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم می‌کند، دریافته‌اند که تفاوت‌های سطح آب و چگالی میان دو قسمت شمالی و جنوبی دریاچه در بهار به دلیل ورود حجم زیادی از آب شیرین به دریاچه‌ی جنوبی افزایش می‌یابد. با توجه به تبخیر زیاد در تابستان، آن‌ها با ادغام نتایج نظریه‌ی هیدرولیک نشان داده‌اند که جریان تبادل از طریق شکاف میان دو قسمت، تفاوت‌های سطح آب و شوری دو دریاچه را کاهش می‌دهد و بنابراین به احیاء وضعیت پیش از ساخت دریاچه تا پایان پاییز کمک می‌کند.

سلطان‌پور و دیباچ‌نیا (۲۰۱۵)^{۱۸} با ایجاد یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیک و

⁷ Kudale

⁸ Abessi

⁹ Sola

¹⁰ Anton

¹¹ Steedman & Craig

¹² Payo

¹ Falconer

² Morton

³ Barranco del Toro Beach

⁴ Talavera & Ruiz

⁵ Danoun

⁶ Torquemada

حدود ۹۵۰ پروفیل دمایی آب را در تابستان (ژوئیه تا سپتامبر)، تجزیه و تحلیل کرده‌اند.

نیا^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۴)^[۲۲] رویکرد تحلیلی جهت پیش‌بینی تغییرات فصلی شوری در خورها را ارائه کرده‌اند. پیش‌بینی دقیق تغییرات فصلی شوری برای ارزیابی سلامت اکوسیستم خورها، اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل‌های سنتی استفاده‌شده برای پیش‌بینی تغییرات شوری معمولاً نیاز به داده‌های گسترده و محاسباتی قابل توجه دارند. برای حل چالش‌های اخیر، آن‌ها یک مدل جدید با پیچیدگی کاهش یافته را ارائه کرده‌اند. مطالعات مشابه دیگری نیز توسط برخی پژوهشگران انجام شده است، که در آن‌ها مروری بر مطالعات مدل‌سازی‌های انجام‌شده بر خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن صورت گرفته است؛ که توسط احمد^{۲۲} و همکاران (۲۰۲۲)^[۲۳] به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی کاربرد قابل توجهی در علوم مهندسی داشته است. نمونه‌ای از کاربرد هوش مصنوعی در مباحث مهندسی سواحل مطالعات امینی و همکاران (۲۰۲۵)^[۲۴] در استفاده‌ی مدل‌های پیش‌بینی هوش مصنوعی برای چرخش‌های روزانه و فصلی در دریاچه‌های کم‌عمق است. اگرچه کاربرد هوش مصنوعی نمی‌تواند جایگزین اندازه‌گیری‌های میدانی و تحلیل‌های هیدرودینامیک باشد، ولی به عنوان یک ابزار کمکی در کنار روش‌های موجود جهت کاهش زمان و هزینه‌های اندازه‌گیری می‌تواند مفید باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، اثر موج‌شکن‌های بندر در خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن بررسی شده و با توجه به موقعیت خاص محیط زیست سواحل مرجانی منطقه، انجام پروژه‌ی مذکور، ویژه و توجیه‌پذیر است.

۲. منطقه‌ی مطالعه‌شده

۱.۲. جزیره‌ی کیش

جزیره‌ی مرجانی کیش، یکی از جزایر تاریخی و مهم خلیج فارس، همچون دیگر مناطق تحت تأثیر شرایط محیطی و ویژگی‌های جغرافیایی پیرامون خود قرار دارد؛ که با شکلی تقریباً بیضوی، مساحتی بالغ بر ۹۱ کیلومتر مربع دارد. طول آن حدود ۱۵/۵ کیلومتر و عرض آن در حدود ۷/۵ کیلومتر است، و بیش از ۳۵ کیلومتر خط ساحلی دارد. نزدیک‌ترین بندر برای تردد دریایی مسافر و بار، بندر آفتاب و بندر چارک هستند (شکل ۱).

مرجانی‌بودن سواحل جزیره‌ی کیش اهمیت ویژه‌ای برای بررسی عوامل تغییرات زیست‌محیطی دارد. ذخایر مرجانی کیش نه فقط به دلیل جذابیت‌های



شکل ۱. موقعیت جزیره‌ی کیش در خلیج فارس.

پرداخته‌اند. پتل^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۵] در مدل‌سازی عددی پراکندگی آب شور در آب‌های کم عمق ساحلی نشان داده‌اند که جهت بهره‌برداری بهینه از تأسیسات شیرین‌سازی آب، نحوه‌ی قرارگیری مکان ورودی و خروجی باید به‌گونه‌ای باشد که گردش جریان شوری خروجی در ورودی به میزان کمینه برسد. بدین منظور، پراکندگی پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن در پروژه‌های متداول با استفاده از روش مدل‌سازی عددی باید ارزیابی شود.

بوئل‌هو^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۶] در مطالعه‌ی موردی شبیه‌سازی عددی پراکندگی پساب خروجی مرحله‌ی دوم ساخت تأسیسات آب شیرین‌کن شهر پرتس استرالیا، نتایج شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفیت آب را جهت بررسی پراکندگی پساب خروجی توأمان بخش اول تأسیسات شیرین‌سازی و بخش پیشنهادی دوم تأسیسات مذکور بر منطقه‌ی Cockburn Sound را ارائه کرده‌اند. جهت راستی‌آزمایی نتایج مدل‌سازی عددی نیز برداشت‌های میدانی در فاصله‌های دور و نزدیک انجام داده‌اند. وود^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۷] در مدل‌سازی نحوه‌ی انتشار چند منبع خروجی پساب آب شیرین‌کن در نوار ساحل شرقی مدیترانه، آثار روش انتشار توده‌ی پساب در محدوده‌های دور و نزدیک از ساحل را بیان کرده‌اند. بررسی اثر پیش ترکیب‌کردن آب استفاده‌شده‌ی خنک‌سازی تأسیسات و پساب خروجی، حاکی از کاهش آثار منفی شناوری توده‌ی پساب و جلوگیری از گسترش آن بوده و این درحالی است که پساب خروجی پخش‌کنندها در محدوده‌ی دور از ساحل به‌صورت جریان‌هایی با چگالی بالای شوری، به‌صورت نامنظم انتشار یافته است.

پریتر^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۸] مدل‌سازی خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن فورت‌آلزا^{۱۷} برزیل را انجام داده و دریافته‌اند که مدل‌سازی تخلیه‌ی پساب در کیفیت آب سواحل فورت‌آلزا مؤثر بوده است. در مطالعه‌ی اخیر، ارزیابی رقیق‌سازی توده‌ی شوری در حوزه‌ی میدانی نزدیک ساحل و مدل‌سازی هیدرودینامیکی جهت ارزیابی رقیق‌سازی در محدوده‌ی دور ارائه شده و نتایج نشان داده است که توده‌ی پساب از خروجی بستر دریا بیش از ۲ کیلومتر از نزدیک‌ترین ساحل فاصله داشته است.

پرادهان^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۹] در مدل‌سازی همزمان هیدرودینامیک و کیفیت آب در آب‌های ساحلی چنای^{۱۹} در سواحل شرقی هند، پارامترهای کیفیت آب را در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی برای فصول مختلف برای دما، شوری، اکسیژن محلول، و کلروفیل شبیه‌سازی کرده و نتایج مدل‌سازی را با اندازه‌گیری‌های مکرر واسنجی کرده‌اند. به‌طوری که عملکرد مدل هیدرودینامیک و کیفیت آب تا سه روز پیش‌بینی قابل‌قبولی انجام داده است.

بررسی هیدرودینامیک فرآیند انتقال شوری در دریاچه‌ی ارومیه به‌عنوان یک دریاچه با شوری بالا (بیش از ۴۰۰ PSU) توسط صفایی و جماعت (۲۰۲۴)^[۲۰] با در نظر گرفتن فعالیت‌های انسانی و شرایط تغییر اقلیم به‌صورت مطالعه‌ی موردی انجام شده است.

تغییرات میانگین دمای آب دریاچه‌ی کونوسی فنلاند در فصل تابستان در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ توسط جیا^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۴)^[۲۱] بررسی شده و

¹⁸ Pradhan
¹⁹ Chennai
²⁰ Jia
²¹ Nia
²² Ahmed

¹³ Patel
¹⁴ Botelho
¹⁵ Wood
¹⁶ Pereira
¹⁷ Fortaleza



شکل ۳. (a) بندر تجاری کیش در سال ۱۹۸۷، (b) بندر تجاری کیش در سال ۲۰۲۴.



شکل ۴. عکس هوایی و جانمایی ورودی و خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن.

خورشیدی، ساخت اسکله‌ی ۱۲۰۰۰ تنی آغاز شده است. همان‌طور که در شکل ۳- a مشاهده می‌شود، در ابتدا حوضچه‌ی بندرگاه شمالی کیش به شکل مربع مستطیل و با ورودی در قسمت شمال شرقی بوده است. محل ورودی آب شیرین‌کن در بخش شمال غربی حوضچه‌ی بندرگاه و آب خروجی به بیرون از موج‌شکن‌های بندرگاه به دو صورت مسیر روباز و لوله در سطح خط ساحلی به دریا انتقال می‌یابد.

شرایط فعلی در سال ۱۴۰۴ از نظر موقعیت موج‌شکن‌ها و مرز خشکی و دریا مشابه شکل ۳- b است، با این تفاوت که تأسیسات در خشکی افزایش یافته و پُرکردن بخش استحصال‌شده نیز تقریباً تکمیل شده است. پُرکردن بخش اخیر سبب نفوذ مصالح از لابه‌لای موج‌شکن غربی حوضچه به داخل آن و متعاقباً ورودی آب شیرین‌کن شده است، که نیازمند تمهیدات بیشتری جهت کنترل ورودی است. در شکل ۴، جانمایی ورودی و خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن مشاهده می‌شود.

۴.۲. مشخصات فنی محدوده‌ی مطالعاتی

در بخش اول، مشخصات فنی محدوده‌ی مطالعاتی، میدان مطالعاتی، و محاسباتی، شامل مشخصات هندسی و هیدروگرافی و در بخش دوم، تعریف متغیرهای هیدرولیکی و کیفی آب دریا ارائه شده است.

۴.۲.۱. میدان مطالعاتی و محاسباتی

مطابق شکل ۵، عمق آب در نواحی ساحلی اطراف بندرگاه کیش از مقادیر بسیار کم آغاز می‌شود و تا رسیدن به دهانه‌ی بندر، عمق میانگین به حدود ۱۲



شکل ۲. موقعیت مکانی بندر شمالی و نیروگاه آب و برق کیش.

توریستی و اکوتوریسم مورد توجه‌اند، بلکه نقش آن‌ها در تعادل و پایداری اکوسیستم دریایی پیرامونی، حیاتی است. متأسفانه در سال‌های اخیر پدیده‌ی سفیدشدن مرجان‌ها، که به معنای آسیب یا مرگ آن‌هاست، در اثر تغییرات زیست‌محیطی شدت یافته است. فرایند ساخت و توسعه‌ی بندر معمولاً پیامدهای زیست‌محیطی به همراه دارند، لذا لازم است که براساس پارامترهای زیست‌محیطی و ضوابط قانونی، میزان آثار مذکور به میزان کمینه برسد. در اطراف بندر تجاری کیش، تأثیرات قابل توجهی مشاهده می‌شود، که عمدتاً ناشی از مجاورت آن با تأسیسات آب شیرین‌کن و خروجی پساب است. به‌طوری که، شرایط محیط پیرامون بخش مذکور، مسیر جریان پساب را تغییر داده است؛ که در نتیجه‌ی آن، دما و شوری آب در محدوده‌ی خروجی افزایش یافته است.

۲.۲. موقعیت آب شیرین‌کن شمالی و بندر تجاری

در ناحیه‌ی شمالی جزیره‌ی کیش، تأسیسات مشترک نیروگاه برق و آب (نیروگاه آب و برق کیش) واقع شده است، که مسئول تأمین بخش عمده‌ای از نیازهای برقی و آبی جزیره‌ی کیش است. همچنین، بندر تجاری کیش، که به‌عنوان بندرگاه اصلی جزیره شناخته می‌شود، در منطقه‌ی مذکور و در مختصات جغرافیایی $26^{\circ}33'43''$ شمالی و $53^{\circ}59'40''$ شرقی قرار گرفته است.

با افزایش تدریجی توسعه‌های صورت‌گرفته طی چند دهه‌ی اخیر، نیاز پایدار به تأمین منابع آب مصرفی، استفاده از روش‌های شیرین‌سازی آب دریا را ضروری ساخته است. نیروگاه شمالی جزیره، که به نام نیروگاه آب و برق کیش معروف است (شکل ۲)، نخستین تأسیسات تولید هم‌زمان برق و آب شیرین در شمال جزیره به‌شمار می‌رود. این پروژه از سال ۱۳۵۳ آغاز به کار کرده و با نصب ۴ دستگاه آب شیرین‌کن، فرایند شیرین‌سازی آب دریا را کلید زده است. در حال حاضر، تأسیسات اخیر قادر به تولید متوسط روزانه حدود ۲۲۰۰۰ مترمکعب آب شیرین از طریق دو روش MED (شیرین‌سازی چندمرحله‌ای) و RO (اسمز معکوس) هستند. فرایند کار به این صورت است که در هر ساعت، حدود ۵۰۰۰ مترمکعب آب دریا وارد سیستم و تقریباً ۱۰۰۰ مترمکعب آب شیرین تولید می‌شود.

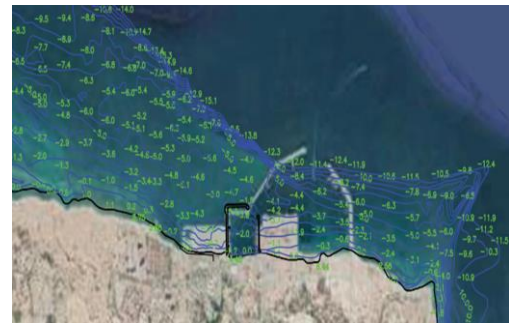
تفاوت دمایی میان آب ورودی و خروجی، بسته به فصل سال متغیر است؛ به‌عنوان مثال، در فصل تابستان، دمای آب ورودی به حدود 36°C رسیده و دمای پساب خروجی تا 50°C اندازه‌گیری شده است.

۳.۲. پلان بندر تجاری

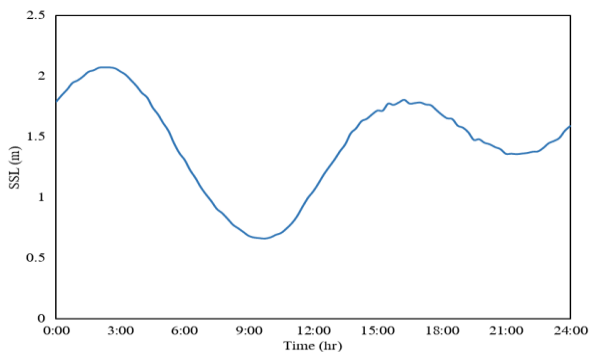
در دهه‌ی ۶۰ خورشیدی، اجرای بندر تجاری کیش شروع و طی سال‌های اخیر، جهت استحصال زمین، با لایروبی‌های انجام‌شده از درون حوضچه و اطراف بندرگاه، بخش جدیدی در ضلع غربی به محوطه‌ی باراندازی آن اضافه شده است. طول اسکله‌های بندر بیش از ۲۰۰۰ متر بوده و در دهه‌ی ۸۰



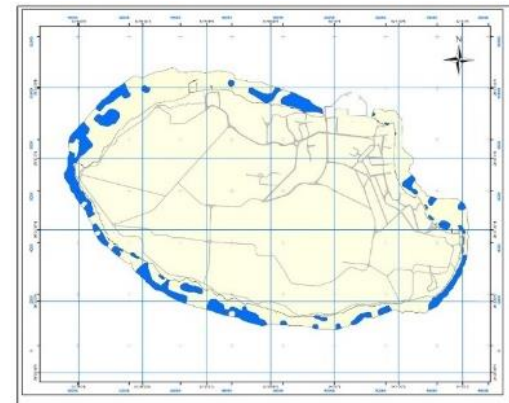
شکل ۷. محدوده‌ی مدل‌سازی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری.



شکل ۵. هیدروگرافی ناحیه‌ی شمالی پیرامون بندرگاه کیش.



شکل ۸. نمودار جز و مد (۱۰ مرداد، ۱۴۰۱).



شکل ۶. نقشه‌ی پراکنش مرجان‌های زنده (محدوده‌های آبی رنگ)

پیرامون جزیره‌ی کیش.

متر می‌رسد. این نتایج بر پایه‌ی آخرین داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی موجود در مرکز اسناد جزیره‌ی کیش است. در فاصله‌ی حدود ۱ کیلومتر از خط ساحلی، عمق به‌طور تقریبی به‌صورت خطی از ۰ تا ۷ متر افزایش می‌یابد؛ سپس افزایش ناگهانی به عمق حدود ۱۲ متر مشاهده می‌شود. با دور شدن از دهانه‌ی بندرگاه، عمق بستر به‌طور چشم‌گیری تا حدود ۲۵ متر افزایش می‌یابد. با توجه به ساختار موج جزر و مد پیرامونی جزیره‌ی کیش و اطراف بندرگاه و مقایسه‌ی آن با عمق محدود محدوده‌ی مذکور، می‌توان از فرضیات ویژه‌ی مدل‌سازی آب‌های کم‌عمق به‌عنوان روش مناسبی در تحلیل استفاده کرد.

از آنجایی که بستر دریا در منطقه‌ی ذکرشده، تپه‌های مرجانی زیرآبی دارد و ذخایر مرجانی اخیر به‌ویژه در ناحیه‌ی غربی بندرگاه کنونی گسترده‌اند، مطالعه‌ی دقیق محدوده‌ی اخیر، اهمیت بسیاری دارد. عمق متوسط بنادر مرجانی کیش حدود ۵ متر است و مرجان‌های زنده غالباً در عمق بین ۳ تا ۷ متر پراکنده‌اند.

در شکل ۶، نقشه‌ی پراکنش مرجان‌های زنده‌ی پیرامونی جزیره‌ی کیش مشاهده می‌شود. موقعیت قرارگیری جزیره در خلیج فارس و هیدروگرافی اطراف آن و ماهیت مرجانی محدوده سبب شده است که عملاً پدیده‌ی رسوب‌گذاری در ناحیه‌ی مذکور مشاهده نشود.

به‌منظور انجام مدل‌سازی، محدوده‌ی مدل‌سازی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری با توجه به شرایط هندسی محدوده و نحوه‌ی انتشار پساب مطابق با شکل ۷ تعیین شده است. مرز شرق و غرب به‌صورت شمالی-جنوبی و مرز شمالی به‌صورت شرقی-غربی قرار دارد. مرز پایین محدوده‌ی مدل‌سازی محصور به خط ساحلی و بخشی از دریا در سمت شمال شرقی جزیره تعریف شده است. طول امتداد مرزهای جنوب شرقی، شرق، غرب، و شمال به‌ترتیب برابر با ۱/۳،



شکل ۹. عقب‌نشینی و تغییرات تراز سطح آب در محدوده‌ی جزیره‌ی کیش.

۵/۸، ۳/۸، و ۷/۷ کیلومتر است. شایان ذکر است طول خط ساحلی، حدود ۴/۶ کیلومتر است.

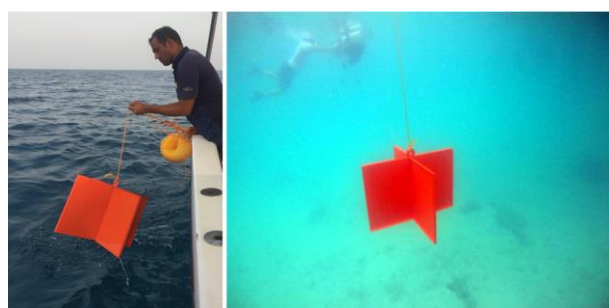
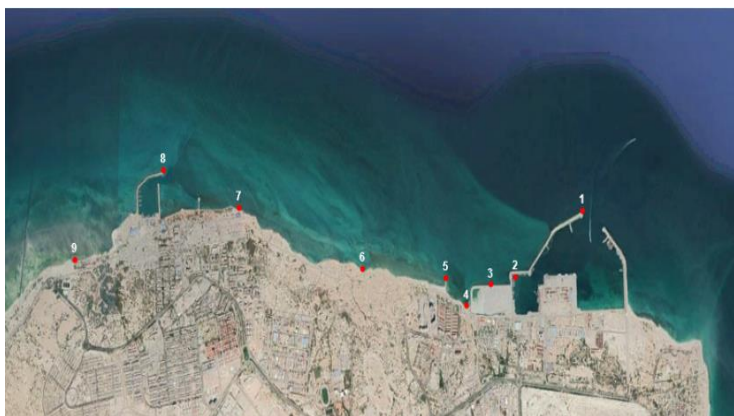
مسیر و نقاط مراحل سه‌گانه‌ی اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب و سرعت جریان علاوه‌بر شکل ۷، در بخش اندازه‌گیری میدانی نیز به تفکیک ارائه شده‌اند.

۲.۴.۲. متغیرهای هیدرولیکی و کیفی آب دریا

به‌منظور مدل‌سازی جریان و کیفیت آب در منطقه‌ی موردنظر، نیاز به تغییرات تراز آب در آنجاست. در محدوده‌ی پیرامونی جزیره‌ی کیش، اختلاف تراز سطح آب در روزهای مشخصی، مقدار قابل توجهی است. مثلاً طبق اطلاعات مندرج در سایت سازمان نقشه‌برداری، میانگین سالیانه‌ی اختلاف ارتفاع تراز آب در بازه‌ی ۲۰۲۳/۳/۶ الی ۲۰۲۴/۳/۶ به میزان ۱/۳۷ متر بوده است، که در بازه‌ی کمینه‌ی صفر و بیشینه‌ی ۲/۳۱ متری، به ترتیب ثبت شده است. میزان جز و مد اندازه‌گیری‌شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشوری در تاریخ ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ مطابق شکل ۸ است. محل نصب دستگاه سنجش تراز آب سازمان نقشه‌برداری کشوری در بخش شمال غربی حوضچه‌ی آرامش بندرگاه کیش بوده است. همچنین، در شکل ۹، میزان تغییرات تراز سطح آب دریا و نیز مقدار

جدول ۱. اندازه‌گیری اولیه پارامترهای کیفیت آب نوار شمالی جزیره کیش.

No.	Time	Temp (°C)	pH	TDS (g/L)	EC (mS/cm)
1	15:21	24	7.1	36.1	50.6
2	15:09	22.5	7.1	26.3	50.6
3	14:41	-	7.1	35.7	50.6
4	15:55	42	7.4	43	58.5
5	16:10	22.5	7.1	36.6	50.5
6	16:30	22	7.2	36.6	50.7
7	16:50	22.5	7.1	36.5	50.7
8	17:25	22.5	7.1	36.8	51
9	17:40	20	6.9	40	54.6



شکل ۱۰. شناور پره‌ای سطحی: (چپ) شناور زرد و پرهی قرمز در حال انداختن داخل آب؛ (راست) چهار پره در زیر آب در حال حرکت با جریان دریایی.

عقب‌نشینی در کنار یکی از صخره‌های مرجانی در نزدیکی ساحل مشاهده می‌شود.

۳. اندازه‌گیری میدانی

با توجه به نبود اطلاعات در مورد سرعت و جهت جریان، میزان دما، و شوری در محدوده‌ی مطالعه‌شده و همچنین، اهمیت تأثیر جزر و مد و هیدروگرافی محدوده در تغییرات کمیت‌های اخیر، پارامترهای کیفیت آب، سرعت، و جهت جریان به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شده‌اند.

۳.۱. روش اندازه‌گیری

به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب و با توجه به امکانات موجود، نمونه‌برداری از عمق کمتر از ۱ متر انجام شده است. دمای آب داخل ظرف توسط دماسنج جیوه‌ای با دقت ± 0.5 درجه‌ی سانتی‌گراد و بلافاصله پس از نمونه‌برداری (در سایه و دور از تابش مستقیم خورشید) اندازه‌گیری شده است. جهت اندازه‌گیری سایر پارامترهای کیفی آب (شوری، هدایت الکتریکی، و ...)، نمونه‌ها در آزمایشگاه مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری دقیق در جزیره کیش اندازه‌گیری شده‌اند. از دستگاه اندازه‌گیری مدل HACH، که مجهز به سنجنده‌های هدایت الکتریکی و شوری (به‌صورت مجزا) با قابلیت اندازه‌گیری آب دریاست، استفاده شده است. در انتقال و اندازه‌گیری نمونه‌ها، ضوابط استانداردهای مرتبط، مانند میزان دمای محیط جهت جلوگیری از تغییر شرایط نمونه‌ها در انتقال رعایت شده است. تعدادی از نمونه‌ها نیز جهت اندازه‌گیری مجدد در آزمایشگاه آب و محیط‌زیست دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران اندازه‌گیری شده‌اند.

جهت اندازه‌گیری سرعت جریان روش‌های متفاوتی وجود دارد، که متناسب با شرایط محیطی و جغرافیایی استفاده می‌شوند؛ که یکی از آن‌ها، که در مناطق کم‌عمق به کار می‌رود، روش شناور پره‌ای سطحی (Surface Drifter) است، که دقت قابل‌قبولی جهت اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان‌های زیرسطحی دارد.^[۲۵] در روش اخیر، از طریق کاربرد مبانی روش مختصات لاگرانژی، سرعت جریان اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، متناسب با عمق محدوده‌ی بررسی‌شده، شناور ۴ پره ساخته و استفاده شده است. با توجه به مجهز بودن قایق استفاده‌شده به دستگاه موقعیت‌یاب دقیق و اندازه‌گیری موقعیت شناور پره‌ای در یک بازه‌ی زمانی مناسب، سرعت و جهت جریان در زمان‌ها و نقاط مختلف برداشت شده‌اند.

۳.۲. اندازه‌گیری مرحله‌ی اول

در مرحله‌ی اول اندازه‌گیری در بهمن ماه سال ۱۴۰۰، نمونه‌برداری در ۹ نقطه، که در شکل داخل جدول ۱ مشاهده می‌شود، در محدوده‌ی خط ساحلی انجام شده است. نمونه‌برداری از نقاط ۵، ۳، ۱، و ۸ از کنار موج‌شکن‌ها و نقطه‌ی ۲ از داخل حوضچه‌ی آرامش صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های پارامترهای کیفیت آب در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که نتایج آزمایش نشان می‌دهند، در نقطه‌ی ۴، که محل خروجی پساب است، تغییرات پارامترهای کیفیت آب کاملاً واضح است. به‌طوری که میانگین پارامترهای دما، PH، و هدایت الکتریکی نقاط ۲ الی ۸ به‌ترتیب ۲۲/۴، ۷/۱، و ۵۰/۶ بوده است، که در نقطه‌ی ۴، پارامترهای مذکور به‌ترتیب افزایش ۸۸، ۴، و ۱۶ درصدی داشته‌اند. عملاً با نزدیکی به محل خروجی پساب، پارامترهای کیفی آب تحت تأثیر قرار گرفته و با دورشدن از ناحیه‌ی مذکور، میزان آثار آن کاهش پیدا کرده است؛ که به‌دلیل افزایش سرعت جریان بوده و در ناحیه‌ی اطراف محل خروجی پساب، همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شده است، کاهش یافته است.

۳.۳. اندازه‌گیری مرحله‌ی دوم

پس از اندازه‌گیری مرحله‌ی اول در فصل زمستان و بررسی نتایج اولیه، با درنظرگرفتن شرایط اقلیمی جزیره کیش تصمیم بر اندازه‌گیری در تیرماه سال ۱۴۰۱ به‌دلیل افزایش دمای آب و محیط گرفته شده است. جهت ثبت اطلاعات دقیق‌تر از محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی پساب، نمونه‌برداری در ۱۲ نقطه مطابق شکل ارائه‌شده در جدول ۲ انجام شده است. مطابق نتایج

که تقریباً هر سه شرایط یکسانی داشته‌اند. این درحالی است که در برداشت‌های مرحله‌های اول و دوم، که در نزدیکی خروجی آب شیرین‌کن انجام شده بود، این تغییرات با نزدیک شدن به محل خروجی پساب افزایش قابل توجهی داشته است.

در بازه‌ی زمانی اندازه‌گیری مرحله‌ی سوم، جهت غالب جریان‌های جزر و مدی از سمت شرق به غرب بوده است. جهت اندازه‌گیری سرعت و جهت جریان، همان‌طور که در بخش روش اندازه‌گیری اشاره شده است، در یک بازه‌ی زمانی چند دقیقه‌ای، میزان جابجایی اندازه‌گیری شده است، تا مقادیر متوسط تغییرات سرعت ثبت شوند.

نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران،^[۳] درخصوص تأثیر پساب آب شیرین‌کن در اجتماعات زیستی محلی و به‌طور مشخص خطر آثار آن در محیط مرجانی در جزیره‌ی کیش منطبق بوده است. همان‌طور که در مطالعه‌ی کودال (۲۰۱۰)،^[۶] تأکید شده است، ساخت بندر بدون تمهیدات مدیریت رسوب و کیفیت آب، تبعات زیست‌محیطی دارد، و نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی مؤید مطلب اخیر است.

۴. مدل‌سازی جریان و کیفیت آب

به منظور درک بهتر از نحوه‌ی انتشار پساب آب شیرین‌کن و با توجه به شرایط محیطی، المان‌های مرزی و عدم امکان سنجش کامل پهنه‌ی موردنظر، از مدل‌سازی ریاضی جهت مدل‌سازی انتشار پساب استفاده شده است.

۱.۴. معادله‌های دیفرانسیل و نرم‌افزار مدل‌سازی

جهت مدل‌سازی جریان آب و نحوه‌ی انتقال و انتشار از حل عددی معادلات

ارائه‌شده‌ی آزمایش‌های پارامترهای کیفیت آب در جدول ۲، اثر پساب خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن در محدوده‌ی نزدیک به محل خروجی، به‌دلیل کم‌بودن سرعت جریان در کناره‌ی موج‌شکن واضح است؛ که به‌دلیل احداث موج‌شکن غربی و عدم تغییر محل خروجی پساب بوده است. در ناحیه‌ی تداخل ریختن پساب از لوله و نهر خروجی (نقطه‌های ۸ و ۹)، میانگین پارامترهای دما و هدایت الکتریکی (EC) نسبت به سایر نقاط به ترتیب افزایش ۱۶ و ۱۵ درصدی داشته است. نتایج برداشت این مرحله نسبت به مرحله‌ی قبل، شدت تأثیر پساب خروجی در محیط پیرامونی را دقیق‌تر نشان می‌دهد. به‌طوری که تأثیر محل و نحوه‌ی خروج پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در محیط پیرامونی کاملاً مشهود است.

۴.۳. اندازه‌گیری مرحله‌ی سوم

پس از اندازه‌گیری مرحله‌های اول و دوم، جهت ثبت اطلاعات بیشتری از پارامترهای کیفیت آب در فواصل دورتر از خط ساحلی و همین‌طور سرعت و جهت جریان اندازه‌گیری، مرحله‌ی سوم انجام شده است. بدین منظور در ۳ نقطه که در شکل ارائه‌شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج پارامترهای دما، شوری، مقدار سرعت، و جهت جریان در نقاط مختلف در مردادماه ۱۴۰۱ اندازه‌گیری شده‌اند. در مرحله‌ی سوم سعی شده است با توجه به شرایط تلاطم دریا، هیدروگرافی، تردد شناورها، محدوده‌ی مدل‌سازی عددی زمان و مکانی طوری انتخاب شود که بیان‌گر مناسب‌ترین حالت از وضعیت پارامترهای مدنظر باشد.

همان‌طور که مقادیر پارامترهای دما و شوری نشان می‌دهند، به‌دلیل افزایش سرعت جریان در فاصله‌ی دورتر از محدوده‌ی برداشت مراحل قبل، مقادیر پارامترهای دما، PH، و EC به حالت عادی آب دریا نزدیک شده است؛ به‌طوری

جدول ۲. اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت آب در محدوده نزدیک خروجی پساب.

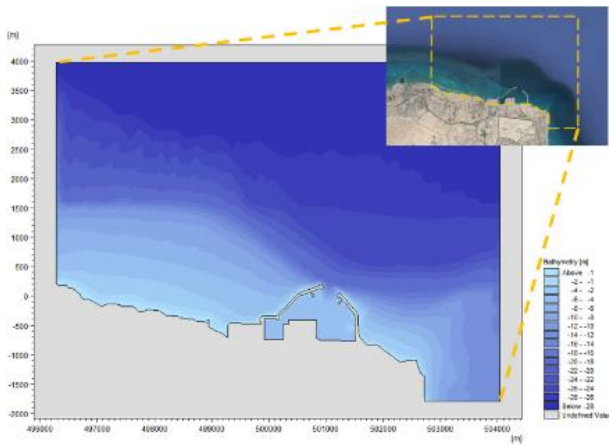
No.	Time	Temp (°C)	EC (mS/cm)
1	12:30	36.5	56.6
2	12:35	37	56.6
3	12:45	37	55.7
4	12:50	37	56.4
5	13:05	37	56
6	13:17	38	56.9
7	13:22	37.5	54.9
8	13:26	48.5	64.3
9	13:34	40.5	67.9
10	13:37	42	62.4
11	13:45	46	61.5
12	13:49	37	59



جدول ۳. نتایج برداشت میدانی مرداد ۱۴۰۱ در اطراف بندر کیش.

No.	Time	Temp (°C)	Salinity (psu)	Current Speed (m/s)	Direction (Deg)
1	13:45	35	33.6	0.31	304
2	14:05	35	32.5	0.32	301
3	14:16	35	32.5	0.48	293.6





شکل ۱۱. محدوده‌ی مدل‌سازی و تغییرات تراز بستر دریا در محدوده‌ی ساحل شمال شرقی.

جهت مدل‌سازی و طراحی استفاده می‌شوند. با توجه به هدف مدل‌سازی هر کدام از نرم‌افزارها، مزیت‌های بیشتری جهت استفاده‌ی کاربر دارند. نرم‌افزار مایک ۲۱ (Mike 21) توسط شرکت DHI ارائه شده و یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی در حوزه‌ی سواحل و بنادر است. مدل‌سازی در نرم‌افزار مایک ۲۱، بر پایه‌ی معادلات دو بُعدی متوسط‌گیری‌شده‌ی عمق جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک الگوی جریان طی جزر و مدهای مختلف تعریف شده است. پارامترهای اصلی هیدرودینامیکی استفاده‌شده در مدل‌سازی مطالعه‌ی حاضر، تعیین شرایط مرزی، میزان جزر و مد، ضریب زبری بستر، و چسبندگی هستند. از تغییرات اثر موج و باد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه‌ی مطالعه‌شده صرف‌نظر شده است.

۲.۴. میدان محاسباتی و مش‌بندی

محدوده‌ی میدان محاسباتی مطابق شکل ۷ تعیین شده است. موقعیت بندر و محل خروجی پساب در محدوده‌ی میدانی محاسباتی به ترتیب با فاصله‌های ۳/۵، ۴/۵، و ۴/۳ کیلومتر از مرزهای شرقی، شمالی، و غربی است. مرزهای محدوده‌ی مذکور در فواصلی انتخاب شده‌اند که تغییرات دما و شوری در آنجا متصور نباشد. جهت مدل‌سازی دقیق‌تر، اطلاعات هندسی و عمق‌سنجی^{۲۳} منطقه‌ی موردنظر در مدل‌سازی تعریف شده است. در شکل ۱۱، موقعیت محدوده‌ی مدل‌سازی در شمال شرقی جزیره‌ی کیش و نیز داده‌های ترسیم‌شده‌ی عمق‌سنجی مشاهده می‌شوند.

برای مدل‌سازی جریان و تغییرات دما در محدوده‌ی مورد مطالعه از ماژول مدل جریان با مش‌های منعطف (Flow Model (FM)) نرم‌افزار مایک استفاده شده است؛ که امکان مدل‌سازی دو بُعدی با در نظر گرفتن تغییرات عمق بستر با مش‌بندی انعطاف‌پذیر را نیز دارد. مش‌بندی انجام‌شده در میدان مذکور از نوع مثلثی با ابعاد متغیر ۷ متری تا ۲۰۰ متری در ۴ بخش مختلف مطابق شکل ۱۲ تقسیم‌بندی شده است.

بخش اول با مش‌های با بُعد بیشینه‌ی ۱۶۰ متر در محدوده‌ی مابین نوار ساحلی به طول بیشینه‌ی ۱/۸۱ کیلومتر و بیشینه‌ی فاصله‌ی ۶۱۰ متر از محل خروجی پساب، بخش دوم متشکل از مش‌هایی با بیشینه‌ی بُعد ۱۹۰ متر با بیشینه‌ی طول ۴/۰۳ کیلومتر و عرض ۱/۳۵ کیلومتر، بخش سوم با بزرگ‌ترین بُعد مش ۲۱۲ متری و بیشینه‌ی طول و عرض ۷/۷ و ۳/۲ کیلومتر، و بخش چهارم با

ریاضی استفاده شده است. معادله‌های هیدرودینامیک تغییر سطح آب و جریان تحت اثر نیروهای مختلف در دریا توسط مدول هیدرودینامیک مشخص می‌شوند. معادله‌های سه بُعدی مذکور با انتگرال‌گیری بر روی عمق (معادله‌های آب کم‌عمق) به معادله‌های دو بُعدی باقی‌جرم و باقی‌حرکت (ناویر-استوکس) به‌عنوان معادله‌های حاکم تبدیل می‌شوند. معادله‌ی پیوستگی متوسط‌گیری‌شده در عمق، به‌صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

که در آن، ζ تراز سطح آزاد آب، H عمق جریان، U و V سرعت آب در راستای x و y که از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آیند:

$$V = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} v dz \quad U = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} u dz \quad (2)$$

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت در جهت x متوسط‌گیری‌شده در عمق به‌صورت رابطه‌ی ۳ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U^2H) + \frac{\partial}{\partial y}(UVH) = gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{xz_b}}{r} + \nu^t H \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

و معادله‌ی اندازه‌ی حرکت در جهت y متوسط‌گیری‌شده در عمق به‌صورت رابطه‌ی ۴ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2H) = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{yz_b}}{\rho} + \nu^t H \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

که در آن، ν^t ویسکوزیته‌ی سینماتیکی آشفته‌گی است. τ_{xz_b} و τ_{yz_b} تنش برشی در راستای x و y هستند، که مطابق روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$\tau_{xz_b} = \rho \frac{g}{C_{chezy}^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

$$\tau_{yz_b} = \rho \frac{g}{C_{chezy}^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6)$$

که در آن‌ها، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، و C_{chezy} ضریب شزی هستند. معادله‌ی انتقال انتشار متوسط‌گیری‌شده در عمق نیز مطابق رابطه‌ی ۷ است:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HUC) + \frac{\partial}{\partial y}(HVC) = HD_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + HD_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S \quad (7)$$

که در آن، C غلظت کمیت موردنظر مثل دما یا شوری در هر المان D_x و D_y توسط ضریب انتشار در امتداد x و y و کمیت S منابع چشمه یا چاه کمیت موردنظر در هر المان هستند.

در حال حاضر، نرم‌افزارهای مدل‌سازی مختلفی توسط پژوهشگران و مهندسان

بازه‌ی زمانی لازم برای حرکت جزر و مد در فاصله‌ی مکانی حدود ۳ کیلومتر اعمال شده‌اند. اطلاعات مرزی استفاده‌شده در مرزهای شرقی و جنوب شرقی محدوده‌ی مدل‌سازی، داده‌های جزر و مدی اندازه‌گیری‌شده در تاریخ ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ بوده و در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به جریان غالب جزر و مد در خلیج فارس و تنگه‌ی هرمز که از سمت تنگه به سمت خلیج فارس در زمان مد است، با در نظر گرفتن موقعیت جزیره‌ی کیش، محدوده‌ی مدل‌سازی، مستندهای قبلی و مشاهده‌های میدانی جزر و مد مرزهای شرقی و جنوب شرقی با فاصله‌ی زمانی کوتاه به مرز غربی نیز منتقل می‌شود.

۳.۳.۴. مشخصات بستر

مقدار ضریب زبری بستر معادل عدد مانینگ به مقدار $32 (s/m^{1/3})$ و ضریب چسبندگی برابر با $0.02 (m^2/s)$ با توجه به مشاهده‌های میدانی و برخی مطالعات انجام‌شده،^[۲۸-۲۶] منظور شده است. ضریب چسبندگی در نرم‌افزار Mike ۲۱ با عنوان ضریب ویسکوزیته‌ی گردابی افقی (Horizontal Eddy Viscosity) تعریف شده است.

۴.۳.۴. مشخصات سطح آزاد

با توجه به اینکه هدف از اندازه‌گیری و مدل‌سازی بررسی آثار خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن در محیط پیرامونی است، محدوده‌ی مدل‌سازی با وسعت گسترده انتخاب نشده است. زمان انتخابی جهت اندازه‌گیری و مدل‌سازی ورزش باد بسیار کم بوده و از این رو شرایط مرزی خاصی برای ورزش باد به سطح آزاد آب در مدل اعمال نشده است. شایان ذکر است در مدل‌سازی انتشار حرارتی، دمای هوای محیط اعمال شده است.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شده است، پساب خروجی توسط دو مسیر نهر و لوله در مرز خط ساحلی به دریا انتقال پیدا می‌کند و هیچ‌گونه دیفیوژر ندارد.

۴.۴. نتایج مدل‌سازی

در ادامه‌ی بخش قبل، پارامترهای مختلف و موردنیاز مؤثر در مدل‌سازی توضیح داده شده‌اند. نتایج مدل‌سازی انتشار شوری و دما در روز ۱۰ مرداد ۱۴۰۱ به این شرح انجام شده است: مدل‌سازی برای یک روز کامل (۲۴ ساعت) که شامل ۲ جزر و مد بوده است، انجام شده است. جزر و مد اول با هدف آماده‌سازی مدل (warm-up) منظور شده بود، که از آن برای مقایسه‌ی نتایج استفاده نشده است (شکل ۱۳). گام‌های اعلام خروجی نتایج هر ۱۵ دقیقه یک‌بار تنظیم

بیشینه‌ی بُعد مش ۲۳۳ متر و بیشینه‌ی طول و عرض ۷/۷ و ۲/۶ کیلومتر تعیین شده است.

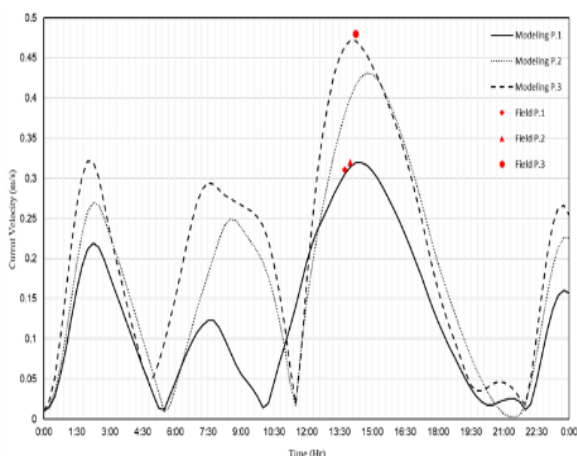
۳.۴. شرایط اولیه، مرزی، و بستر

۱.۳.۴. شرایط اولیه

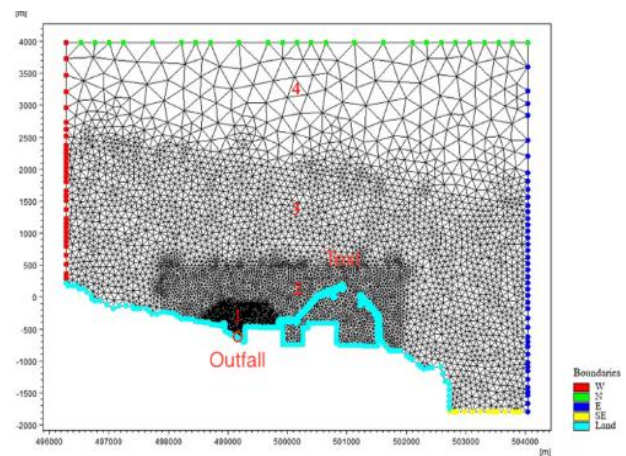
جهت مدل‌سازی، مقدار اولیه‌ی تراز سطح آب $1/792$ متر مطابق با مقدار جزر و مد اندازه‌گیری‌شده اعمال شده است. سرعت اولیه در راستای X و Y به ترتیب برابر با $0/01$ و $0/01$ تعریف شده است. با توجه به اینکه تغییرات شوری در طول یک شبانه‌روز در محدوده‌ی مطالعاتی بسیار اندک بوده است، مقدار شوری مبنا، 32 psu در شرایط اولیه ثابت فرض شده است. در خصوص تغییرات دما، علی‌رغم اینکه تغییرات دما در طول روز متفاوت بوده است، لیکن دمای آب در منطقه تغییرات چندانی نداشته و مقدار دمای اولیه، 34 درجه‌ی سانتی‌گراد تعریف شده است. مقدار دبی خروجی پساب $0/3 \text{ m}^3/s$ با شوری 45 psu و دمای خروجی 50 درجه‌ی سانتی‌گراد فرض شده است. میزان دبی خروجی با توجه به ظرفیت و راندمان تأسیسات آب شیرین‌کن فرض شده است. مقادیر شوری و دمای خروجی نیز با توجه به مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل خروجی پساب در مدل‌سازی اعمال شده است. دبی خروجی به‌صورت نقطه‌یی در محل لوله‌ی خروجی پساب و با آهنگ ثابت در طول مدل‌سازی تعریف شده است.

۲.۳.۴. شرایط مرزی جریان

تعریف مناسب شرایط مرزی در مدل‌سازی، اهمیت ویژه‌ی دارد. از این رو با توجه به اطلاعات و مدل‌سازی‌های انجام‌شده و قابل استناد در پهنه‌ی گسترده‌ی خلیج فارس، جهت دقت بیشتر مدل‌سازی و با توجه به نبود اطلاعات از پارامترهای محیطی در محدوده‌ی مطالعه‌شده، شامل خروجی تأسیسات آب شیرین‌کن و بندر تجاری کیش، محدوده‌ی مدل‌سازی مطابق با شکل ۱۲ تعریف شده است. برای اطراف میدان محاسباتی، پنج مرز تعریف شده است: (۱) مرز خط ساحلی، موج‌شکن‌ها، و حوضچه‌ی بندرگاه (Land) به رنگ آب آسمانی، که از نوع مرز خشکی است و سرعتی عمود بر آن وجود ندارد. (۲) و (۳) مرز جزر و مد در شرق east به رنگ آبی و جنوب شرقی south-east به رنگ زرد، که داده‌های آن‌ها با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ی جزر و مد در کناره‌ی موج‌شکن اعمال شده‌اند. (۴) مرز باز در شمال north به رنگ سبز، که امکان عبور جریان از آن وجود دارد. (۵) مرز جزر و مد در غرب west به رنگ قرمز، که داده‌های آن با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ی جزر و مد با احتساب



شکل ۱۳. تغییرات سرعت مدل عددی و اندازه‌گیری میدانی.



شکل ۱۲. محدوده‌ی مدل‌سازی و مش‌بندی.

جدول ۴. مقادیر میزان دمای اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی.

No.	Temp (°C) Field	Temp (°C) Model
1	35	34
2	35	34
3	35	34

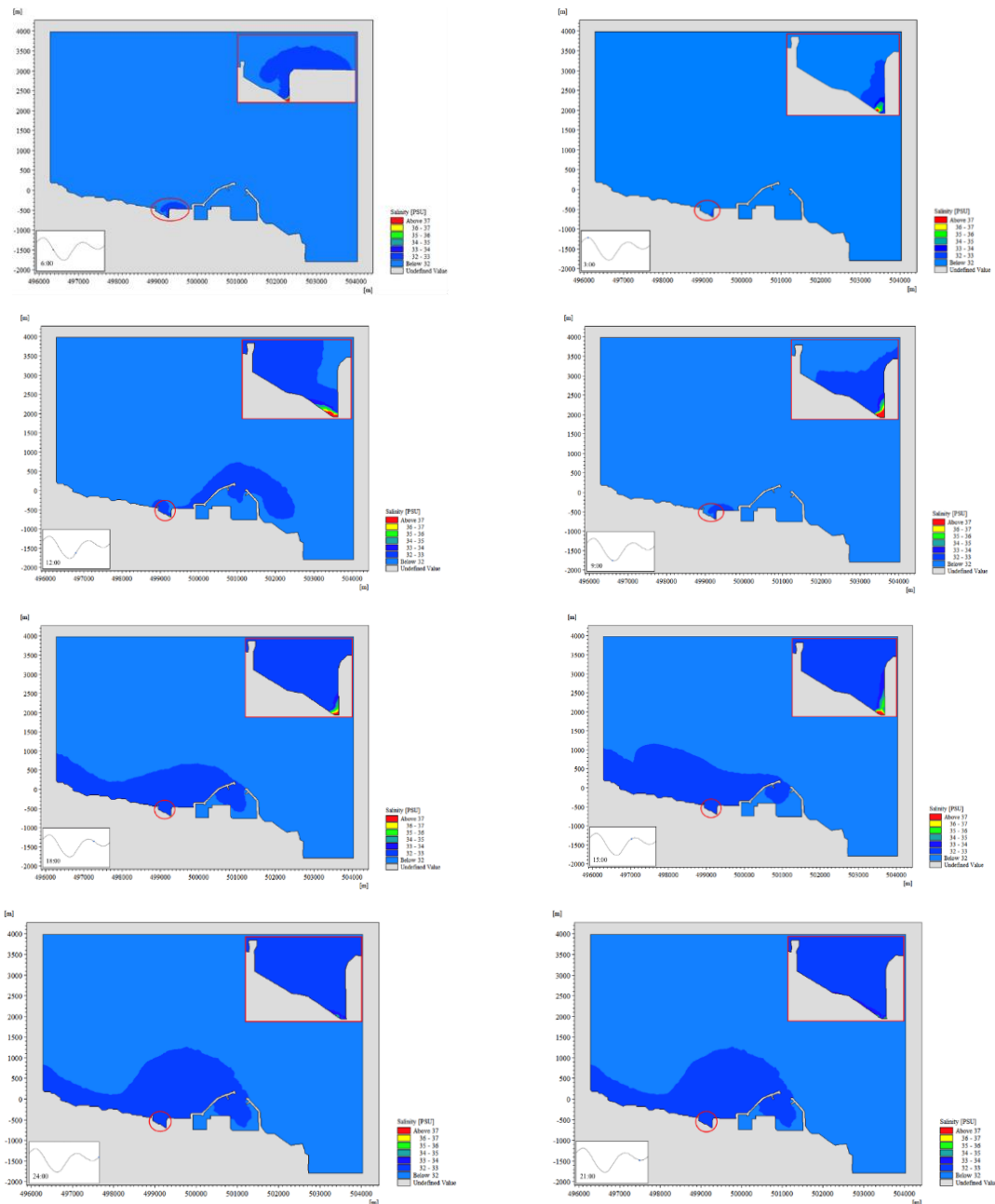
ارائه شده است. همان‌طور که دمای اندازه‌گیری شده در سه نقطه ثابت است، در مدل‌سازی نیز با اختلاف ۱ درجه، تغییرات دمایی در سه نقطه‌ی مذکور وجود ندارد.

در شکل ۱۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که نتایج مدل عددی می‌توانند معیار مناسبی از شرایط موجود در واقعیت باشد. در شکل ۱۴، الگوی انتشار شوری در ساعت‌های مختلف مدل‌سازی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، گستره‌ی قابل توجهی از محدوده‌ی مدل‌سازی تحت تأثیر پساب خروجی آب شیرین‌کن

شده است. کمینه و بیشینه‌ی گام زمانی حل معادله‌ها در مدل‌سازی ۰/۰۱ و ۳۰ ثانیه به ترتیب انتخاب شده است. نرم‌افزار Mike ۲۱ به صورت خودکار، پایداری Courant را کنترل و در صورت نیاز گام‌های محاسباتی را اصلاح می‌کند.

از آنجا که دقت مدل‌سازی باید با روشی دیگر واسنجی شود، نتایج مدل با اندازه‌گیری میدانی مقایسه شده است. در شکل ۱۳، تغییرات سرعت در مدل عددی و مقدار اندازه‌گیری شده در برداشت میدانی سوم مشاهده می‌شود.

مطابق شکل اخیر، اختلاف میزان سرعت در مدل‌سازی و مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه‌های ۱ و ۳ در زمان‌های موردنظر تقریباً بر هم منطبق هستند. در نقطه‌ی ۲، به دلیل موقعیت ورودی بندرگاه و تغییر جهت‌های احتمالی، میزان سرعت اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی با مقدار مدل‌سازی اختلاف دارد. در جدول ۴ نیز مقدار دما در سه نقطه‌ی اندازه‌گیری شده در برداشت سوم و مدل عددی



شکل ۱۴. الگوی انتشار شوری در ساعت‌های مختلف مدل‌سازی.

کیش دقت خوبی دارد. نتایج آزمایش‌های ۲۴ نقطه‌ای مختلف از پارامترهای کیفیت آب در محدوده ساحل شمالی جزیره کیش نشان می‌دهد که در نزدیکی محل خروجی پساب آب شیرین‌کن، دما و شوری افزایش قابل توجهی داشته است. به‌طوری که دما و شوری آب در نزدیکی خروجی، حدود ۱۵ الی ۱۶ درصد بالاتر از مقادیر طبیعی اندازه‌گیری شده و مدل عددی نیز همین حدود افزایش را تأیید کرده است.

در صورتی که ملاحظات لازم در محل خروجی پساب با توجه به موج‌شکن‌های بندر رعایت شده باشد؛ جریان در محدوده نزدیک ساحل، سرعت به مراتب بیشتری داشته و میزان اختلاط آب گرم خروجی از تأسیسات آب شیرین‌کن و آب دریا بسیار بهتر و در محدوده کوچکی اتفاق افتاده است. در نتیجه، آب گرم خروجی آب شیرین‌کن سریع‌تر با آب دریا مخلوط و زودتر محو می‌شده است. لیکن با توجه به وجود موج‌شکن‌ها در نزدیکی محل خروج پساب آب شیرین‌کن، میزان سرعت جریان در نزدیکی ساحل به شدت کاهش یافته و محدوده وسیع‌تری تحت اثر دمای بالاتر قرار گرفته است.

به‌طوری که در ناحیه‌ی تداخل ریختن پساب از لوله و نهر خروجی، میانگین پارامترهای دما و هدایت الکتریکی نسبت به سایر نقاط پیرامونی به ترتیب افزایش ۱۵/۸۶ و ۱۴/۸ درصد داشته است. همان‌طور که نتایج مدل عددی نشان داده است، گستره‌ی قابل توجهی از محدوده‌ی مدل‌سازی تحت تأثیر پساب خروجی آب شیرین‌کن قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به نظر می‌رسد لازم باشد برای کاهش آثار منفی زیست‌محیطی، بازنگری لازم نسبت به نحوه‌ی پخش پساب فعلی در داخل آب دریا اقدام شود. یکی از راهکارهای مناسب می‌تواند نصب دیفیوزر یا افشانه در دهانه‌ی لوله‌ی خروجی باشد، تا پساب به‌طور مناسب‌تری از لحاظ نحوه‌ی پخش وارد دریا شود و اختلاط اولیه بهبود یابد. در بلندمدت نیز بهتر است محل تخلیه به منطقه‌های دورتر از ساحل و نقاطی با سرعت آب بیشتر انتقال یابد.

همچنین در صورت وجود طرح توسعه برای تأسیسات آب شیرین‌کن جزیره کیش، توصیه می‌شود محل آبرگیر آب شیرین‌کن تغییر یابد.

جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که اعمال تغییرات شبانه‌روزی دما، کاربرد تئوری‌های مختلف آشفتگی و بررسی شرایط انتشار بدون وجود موج‌شکن‌های جدید در مدل‌سازی مدنظر قرار گیرد و تأثیر بلندمدت انباشت شوری در رسوب‌های بستر و تأثیر آن در زیست بوم نیز بررسی شود.

قرار گرفته است. میزان شدت تغییرات پارامترهای کیفیت آب همان‌طور که در اندازه‌گیری‌های میدانی در جدول‌های ۱ و ۲ نیز ارائه شده است، در اطراف محل خروجی پساب مشهود است. این درحالی است که نتایج ارائه‌شده در نوشتار حاضر، مدل‌سازی انجام‌شده برای یک روز است و طبیعتاً آثار خروجی پساب در طی ادوار گذشته و در آینده مقادیر قابل توجهی است. همان‌طور که ابعاد محدوده‌ی مدل‌سازی نشان می‌دهد، از محل خروجی پساب تا ورودی بندرگاه در سمت شرق و تا انتهای محدوده‌ی غربی مدل به ترتیب فواصلی بیش از حدود ۲ و ۳ کیلومتر است. این میزان تحت تأثیر قراردادن شوری و دما در خط ساحلی، حوضچه‌ی بندرگاه، و متعاقباً حجم کرانه‌ی ساحلی تأثیر قابل توجهی در محیط‌زیست دریا خواهد داشت. این در حالی است که ورودی تأسیسات آب شیرین‌کن نیز در این محدوده قرار دارد، که باید در بهترین مکان ممکن از لحاظ کیفیت آب ورودی قرار داشته باشد.

بررسی توزیع حرارت در زمان‌های مختلف در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که فاصله‌ی دورترین نقطه‌ای که در آن دمای خروجی آب موجب افزایش ۳ درجه‌ای محدوده شده است، ۱۷۰ متر از محل خروجی است. براساس توصیه‌ی مراجع علمی معتبر، به‌منظور پرهیز از آثار مخرب محیط‌زیستی ناشی از تغییرات دما لازم است میانگین افزایش دما در فاصله‌ی ۳۰۰ متری از محل خروج پساب از یک درجه تجاوز نکند.^[۲۹] با عنایت به اینکه دما در محدوده‌ی کمتر از ۳۰۰ متر تا حدود ۳ درجه افزایش یافته است، می‌توان گفت شرایط فعلی از نظر توصیه‌نامه‌های معتبر،^[۳۰] مشکل دارد.

در صورتی که ملاحظات لازم در محل خروجی پساب با توجه به موج‌شکن‌های بندر رعایت شده باشد؛ جریان در محدوده‌ی نزدیک ساحل، سرعت به مراتب بیشتری داشته و میزان اختلاط آب گرم خروجی از تأسیسات آب شیرین‌کن و آب دریا بسیار بیشتر بوده است، آب گرم خروجی آب شیرین‌کن سریع‌تر با آب دریا اختلاط پیدا می‌کرد، و زودتر محو می‌شد. لیکن در حال حاضر به‌علت تطویل موج‌شکن‌ها، میزان سرعت جریان در نزدیکی ساحل به شدت کاهش یافته و محدوده‌ی وسیع‌تری تحت اثر دمای بالاتر قرار گرفته است.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به راستی‌آزمایی نتایج حاصل از مدل‌سازی با اندازه‌گیری میدانی، این نتیجه به‌دست آمده است که الگوی مدل‌سازی‌شده‌ی انتشار شوری در محدوده‌ی اطراف خروجی پساب تأسیسات آب شیرین‌کن شمالی جزیره‌ی

References- منابع

1. Falconer, R. A., 1992. Flow and water quality modelling in coastal and inland water. *Journal of Hydraulic Research*, 30(4), pp.437-452 .
doi.org/10.1080/00221689209498893
2. Morton, A.J., Callister, I.K. and Wade, N.M., 1997. Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. *Desalination*, 108 (1-3), pp.1-10 .
3. Talavera, J.P. and Ruiz, J.Q., 2001. Identification of the mixing processes in brine discharges carried out in Barranco del Toro Beach, south of Gran Canaria (Canary Islands). *Desalination*, 139 (1-3), pp.277-286.
[doi:10.1016/S0011-9164\(01\)00320-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00320-4).
4. Danoun, R., 2007. Thesis. Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life.
[doi:10.1016/S0011-9164\(97\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00002-7).

5. Fernández-Torquemada, Y., González-Correa, J.M., Loya, A., Ferrero, L.M., Díaz-Valdés, M. and Sánchez-Lizaso, J.L., 2009. Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 5(1-3), pp.137-145. [doi:10.5004/dwt.2009.576](https://doi.org/10.5004/dwt.2009.576).
6. Kudale, M.D., 2010. Impact of port development on the coastline and the need for protection. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 39(4), pp. 597-604.
7. Marjani, A. and Jamali, M., 2014. Role of exchange flow in salt water balance of Urmia Lake. *Dynamics of atmospheres and oceans*, 65, pp.1-16 [doi:10.1016/j.dynatmoce.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2013.10.001).
8. Soltanpour, M. and Dibajnia, M., 2015. Field measurements and 3D numerical modeling of hydrodynamics in Chabahar Bay, Iran. *International journal of maritime technology*, 3, pp.49-60. [doi:10.1016/j.ijmte.2015.3.0.1.3](https://doi.org/10.1016/j.ijmte.2015.3.0.1.3).
9. Abessi, O. and Roberts, P.J., 2016. Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), p.04015033. [doi: 10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001057).
10. Sola, I., Zarzo, D. and Sánchez-Lizaso, J.L., 2019. Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain. *Desalination*, 471, p.114132. [doi: 10.1016/j.desal.2019.114132](https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114132).
11. Anton, J., Tse, E. and Wells, C., 1971, September. Parameter identification criteria for salt brine dispersion from desalination plant ocean outfalls. In IEEE 1971 Conference on Engineering in the Ocean Environment (pp. 313-316). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1971.1161030>
12. Steedman, R.K. and Craig, P.D., 1983. Wind-driven circulation of Cockburn Sound. *Marine and Freshwater Research*, 34(1), pp.187-212. [doi:10.1071/MF9830187](https://doi.org/10.1071/MF9830187).
13. Payo, A., Cortés, J.M., Antoranz, A. and Molina, R., 2010. Effect of wind and waves on a nearshore brine discharge dilution in the east coast of Spain. *Desalination and Water Treatment*, 18(1-3), pp.71-79. [doi:10.5004/dwt.2010.1335](https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1335).
14. Tayyebi, S. and Alishiri, M., 2014. The control of MSF desalination plants based on inverse model control by neural network. *Desalination*, 333(1), pp.92-100. [doi:10.1016/j.desal.2013.11.022](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.022).
15. Patel, Y.B., Nimbalkar, P.T., Nagendra, T. and Shukla, V.K., 2016. Numerical modeling of brine dispersion in shallow coastal waters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(3). [doi:IJCET 07 03 031](https://doi.org/10.1016/j.ijcet.2016.03.031).
16. Botelho, D.A., Singh, A., Mccall, E., Vos, C., Coletti, J., Bruce, L., Lyons, S., Gartner, A., Bailey, M., Atkinson, B. And Mccreath, A., 2016. Numerical simulations of brine dispersion associated with the discharge of the proposed stage 2 of the Perth Seawater Desalination Plant. In 2019 E-proceedings of the 38th IAHR World Congress (Panama City), Global Trends. [http://dx.doi.org/10.3850/38WC092019-1344](https://doi.org/10.3850/38WC092019-1344)
17. Wood, J.E., Silverman, J., Galanti, B. and Biton, E., 2020. Modelling the distributions of desalination brines from multiple sources along the Mediterranean coast of Israel. *Water Research*, 173, p.115555. [doi:10.1016/j.watres.2020.115555](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115555).
18. Pereira, S.P., Rosman, P.C.C., Alvarez, C., Schetini, C.A.F., Souza, R.O. and Vieira, R.H.S.F., 2015. Modeling of coastal water contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). *Water Science and Technology*, 72(6), pp.928-936. [doi:10.2166/wst.2015.292](https://doi.org/10.2166/wst.2015.292).
19. Pradhan, U., Panda, U.S., Naik, S., Mishra, P., Kumar, D.S., Begum, M. and Murthy, M.R., 2022. Coupled hydrodynamic and water quality modeling in the coastal waters off Chennai, East Coast of India. *Frontiers in Marine Science*, 9, p.987067. [doi: 10.3389/fmars.2022.987067](https://doi.org/10.3389/fmars.2022.987067).
20. Safaie, A. and Jamaat, A., 2024. Numerical study of hydrodynamics and salinity transport processes in a hypersaline lake: A case study of Lake Urmia. *Advances in Water Resources*, 185, p.104632. [doi:10.1016/j.advwatres.2024.104632](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104632).
21. Jia, Y., Yang, X., Jiang, H., Lu, B., Tuo, Y., Deng, Y., Zhang, X. and Li, J., 2024. Effect of two-dam coexistence on thermal regime: A special withdrawal measure in Fengman reservoir, China. *Ecological Informatics*, 82, p.102716. [doi:10.1016/j.ecoinf.2024.102716](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102716).
22. Nia, M.Y., Canestrelli, A., Klammler, H., Annable, M.D., Pinton, D. and Jawitz, J.W., 2024. An analytical approach to predict seasonal salinity variations in estuaries. AGU24 (New Orleans).
23. Ahmed, S.I.A., Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M.S. and Balah, A., 2022. Review on Hydrodynamic Modelling of Desalination Plants Brine Effluent Marine Outfalls. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 8, p.7. [doi:10.22161/ijaems.87.3](https://doi.org/10.22161/ijaems.87.3)
24. Amini, H., Lam, M.Y. and Ahmadian, R., 2025. Artificial Intelligence predictive models for diurnal and seasonal shallow lake turnovers. Copernicus Meetings. No. EGU25-20975. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-20975>.
25. Lumpkin, R., Özgökmen, T. and Centurioni, L., 2017. Advances in the application of surface drifters. *Annual review of marine science*, 9(1), pp.59-81. [doi: 10.1146/annurev-marine-010816-060641](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060641).
26. Mishra, P., Panda, U.S., Pradhan, U., Kumar, C.S., Naik, S., Begum, M. and Ishwarya, J., 2015. Coastal

water quality monitoring and modelling off Chennai city. *Procedia Engineering*, 116, pp.955-962.

[doi:10.1016/j.proeng.2015.08.386](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.386).

27. Kulkarni, R.R., 2013. Numerical Modelling of Coastal Erosion using MIKE21, Master's thesis, Institutt for bygg, anlegg og transport.

28. Nunes, V. and Pawlak, G., 2008. Observations of bed roughness of a coral reef. *Journal of Coastal Research*, 24-2B pp.39-50.

[doi:10.2112/05-0616.1](https://doi.org/10.2112/05-0616.1).

29. Khordagui, H., 1997. Environmental aspects of brine reject from desalination industry in the ESCWA region. *ESCWA*, Beirut, 3.

30. Mundial, B., 2007. Environmental, Health, and Safety (EHS) Guidelines.



Research Article

Numerical Study of Cyclic Behavior of Steel Column Base Angle Connections Using Taguchi Experimental Design

Iman Aghaei, Mahmoud Miri and Hamed Ghohani Arab*

Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran.

* corresponding author: (ghohani@eng.usb.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 28 May 2025

Revised: 12 August 2025

Accepted: 30 August 2025

Keywords:

Steel column base connection,
replaceable steel angle,
Finite Element Analysis(FEA),
cyclic behavior,
taguchi method.

Abstract

This study presents a numerical investigation into the cyclic behavior of steel column base connections equipped with replaceable yielding steel angles under cyclic loading conditions. Utilizing a combined methodology of finite element analysis through ABAQUS and the Taguchi design of experiments (DOE) approach, the research systematically evaluates the influence of three critical parameters: steel angle thickness, applied axial load ratio, and anchor bolt gauge distance from the column edge. The numerical model was rigorously validated against existing experimental results, demonstrating strong agreement and confirming its capability to accurately simulate the nonlinear hysteretic response of the connections. Nine strategically designed parameter combinations based on an L9 orthogonal array enabled an efficient exploration of the parameter space while capturing both individual and interactive effects. Statistical analysis via analysis of variance (ANOVA) identified the thickness of the steel angle as the most significant factor, accounting for approximately 59.43% of the variation in the maximum flexural moment capacity, followed by the gauge distance (24.95%) and axial load ratio (11.92%). The optimal parameter set—comprising a 10 mm angle thickness, 0.2 axial load ratio relative to column capacity, and 40 mm gauge distance—yielded a peak flexural moment capacity of 30.71 kN·m, closely matching the finite element prediction of 30.56 kN·m. Hysteresis curve analyses reveal enhanced energy dissipation capacity, increased initial stiffness, and improved ductility in the optimized configuration, although the connection behavior consistently remains within the pinned range as per ANSI/AISC 360-16 specifications. The concentrated plasticity in the replaceable angle elements effectively localizes damage, promoting easy post-earthquake repair without compromising the main structural components. A regression model derived from the DOE results facilitates reliable predictions of flexural capacity based on the aforementioned parameters, underscoring the practical utility of the Taguchi method in seismic design optimization. These findings provide critical insights into the design of resilient, low-damage steel column base connections capable of sustaining seismic demands while enhancing reparability and lifecycle performance.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Aghaei, I., Miri, M. and Ghohani Arab, H. 2026. Numerical study of cyclic behavior of steel column base angle connections using taguchi experimental design, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 31-43.
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.66939.3430>



مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی

ایمان آقایی، محمود میری و حامد قوهانی عرب*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

*نویسنده مسئول (ghohani@eng.usb.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی، شامل: ضخامت نبشی، نیروی محوری، و فاصله‌ی میل‌مهار از لبه‌ی ستون در رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی ستون‌های فولادی با نبشی‌های تسلیم‌شونده و قابل تعویض پرداخته شده است. هدف اصلی، ارزیابی ظرفیت خمشی اتصال‌های مذکور تحت بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس بوده است. تحلیل آماری نتایج به روش تحلیل واریانس نشان داده است که ضخامت نبشی با سهم ۵۹/۴۳٪، بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت خمشی داشته است؛ در حالی که فاصله‌ی میل‌مهار با ۲۴/۹۵٪ و نیروی محوری با ۱۱/۹۲٪ در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. معادله‌ی رگرسیونی توسعه‌یافته، رابطه‌ی بین پارامترهای ورودی و ظرفیت خمشی را با دقت بالا پیش‌بینی کرده است، که با نتایج مدل عددی تطابق نزدیکی داشته است. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰٪، و فاصله‌ی میل‌مهار ۴۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن.متر را حاصل کرده است. رفتار اتصال در تمامی ترکیب‌ها در ناحیه‌ی مفصلی باقی مانده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

واژگان کلیدی:

اتصال‌های پایه‌ی ستون

فولادی،

نبشی فولادی قابل تعویض،

رفتار چرخه‌ای،

تحلیل اجزاء محدود،

روش تاگوچی.

۱. مقدمه

اتصال‌های پایه‌ی ستون در سازه‌های فولادی به‌عنوان واسط بین اعضاء قائم و فونداسیون، نقش کلیدی در انتقال نیروهای محوری، خمشی، و برشی ایفا می‌کنند و عملکرد صحیح آن‌ها، به ویژه در هنگام وقوع زلزله، نقش حیاتی در پایداری و ایمنی سازه دارد.^[۱-۳] در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، اتصال‌ها باید ضمن انتقال مؤثر نیروها، شکل‌پذیری و مقاومت کافی داشته باشند، تا از انتقال آسیب به اعضاء اصلی سازه جلوگیری شود.^[۴-۶] اگرچه مطالعات گسترده‌ای روی اتصال‌های تیر-ستون انجام شده است، مطالعات مرتبط با اتصال‌های پایه‌ی ستون، به‌ویژه تحت بارگذاری چرخه‌ای، همچنان محدود باقی مانده‌اند.

طی سال‌های اخیر، استفاده از اتصال‌های کم‌آسیب^۱ مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. هدف از طراحی اخیر، محافظت از اعضاء اصلی سازه در برابر خرابی و فراهم کردن شرایطی برای تعمیر یا تعویض سریع قسمت‌های آسیب‌دیده، بدون لطمه به ستون‌ها یا پی سازه است. اتصال‌های کم‌آسیب در قالب روش‌هایی، نظیر: اتصال‌های اصطکاکی،^[۹-۶] استفاده از

کابل‌های پیش‌تنیده،^[۱۰-۱۲] و بهره‌گیری از میراگرهای تسلیم‌شونده،^[۱۳-۱۶] پیاده‌سازی می‌شوند. ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۲ و ۲۰۲۴)،^[۸، ۹] رفتار چرخه‌ای اتصال‌های اصطکاکی نامتقارن را در پایه‌ی ستون یک سازه‌ی سه‌طبقه بررسی کرده و نشان داده‌اند که اتصال‌های مذکور، نمودارهای هیستریزیس پرچمی شکل دارند. همچنین، در صورت تعویض پیچ‌ها و بارگذاری مجدد، عملکردی بدون کاهش مقاومت و سختی خواهند داشت. ایشان همچنین در مطالعاتی دیگر (۲۰۲۴)،^[۷] عملکرد اتصال‌های اخیر را تحت بارگذاری انفجاری و به‌صورت آزمایشگاهی و عددی ارزیابی کرده‌اند، که نتایج رضایت‌بخشی را نشان داده است. با این حال، پیچیدگی طراحی و هزینه‌ی بالای اجرا، کاربرد اتصال‌های اصطکاکی نامتقارن را در پروژه‌های عملی محدود کرده است. شن^۳ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۱] پایه‌ی ستون با اتصال‌های خودمركزگرا و میله‌های مقاوم در برابر کماتش را تحت بار فشاری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی تحلیل کرده و جذب انرژی و شکل‌پذیری را گزارش داده‌اند. همچنین عملکرد چرخه‌ای مطلوب و قابلیت بازگشت عملکرد سازه را گزارش کرده‌اند. کمپریدس^۴ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰] اتصال‌های پایه‌ی ستون خودمركزگرا با مقاومت جزئی را معرفی و

³ Shen

⁴ Kamperidis

¹ Low Damage

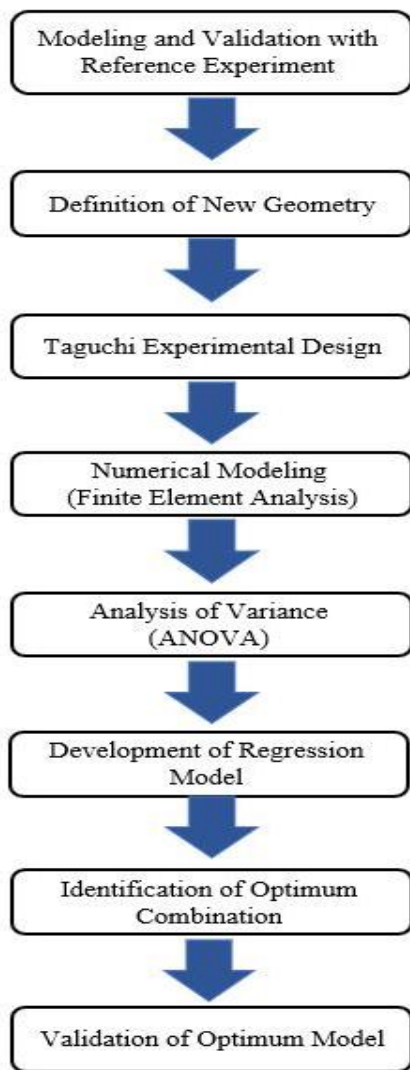
² Zhang

استناد به این مقاله:

آقایی، ایمان، میری، محمود و قوهانی عرب، حامد، ۱۴۰۵. مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی. مهندسی عمران

شریف، ۴۲(۱)، صص. ۳۱-۴۳. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.66939.3430>





شکل ۱. فلوچارت فرآیند پژوهش حاضر.

ستون مجهز به نبشی تسلیم‌شونده پرداخته شده است. رویکرد اخیر ضمن کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز، امکان تحلیل دقیق آثار متقابل پارامترها را فراهم کرده و راهکاری بهینه برای طراحی اتصال‌ها با هزینه‌ی محاسباتی پایین ارائه داده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر می‌تواند به بهبود استانداردهای طراحی و افزایش ایمنی سازه‌های فولادی در برابر زلزله کمک کند.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر، ابتدا مدل‌سازی عددی و راستی‌آزمایی آن با داده‌های آزمایشگاهی تشریح شده است. سپس، طراحی آزمایش به روش تاگوچی و تحلیل نتایج ارائه‌شده و درنهایت، پارامترهای بهینه برای دستیابی به بیشینه‌ی ظرفیت خمشی پیشنهاد شده است. در شکل ۱، فلوچارت کلی فرآیند تحلیل عددی و آماری اتصال‌های پایه‌ی ستون مشاهده می‌شود.

۲. مدل آزمایشگاهی و اجزاء محدود

۱.۲. مدل آزمایشگاهی

در شکل ۲، اجزاء نمونه‌ی آزمایشگاهی بررسی‌شده توسط برزویی (۲۰۱۵)،^[۱۷] مشاهده می‌شود. اتصال مذکور، شامل ستون با مقطع I شکل از نوع یونیورسال

به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده‌اند. هدف آن‌ها ارائه‌ی اتصالی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا بوده است. اما سیستم‌های ذکرشده به‌دلیل طراحی پیچیده، نیاز به تجهیزات تخصصی دارند. در سال‌های اخیر، به اتصال‌های کم‌آسیب با میراگرهای تسلیم‌شونده به‌دلیل توانایی در جذب انرژی و کاهش خرابی اعضاء اصلی سازه توجه شده است. وانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۴] یک اتصال پایه‌ی ستون خودمركزگرا با پیچ‌های آلایژ حافظه‌دار و نبشی‌های قابل تعویض را پیشنهاد کرده و نتایج آزمایش ایشان نشان داده است که وجود نبشی‌ها، ظرفیت خمشی پایه‌ی ستون را افزایش داده و نبشی‌های فولادی آسیب‌دیده توانسته‌اند به سرعت پس از زلزله بدون قطع عملکرد عادی ستون تعویض شوند. با این حال، استفاده از آلایژهای حافظه‌دار، هزینه‌ی تولید را افزایش می‌دهد. ژیانو^۲ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۶] یک سیستم پایه‌ی ستون لغزشی بتن مسلح با میراگرهای فلزی مقاوم در برابر کماتش با شکل‌های مختلف را پیشنهاد کرده‌اند؛ که تحت بارگذاری چرخه‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی، و شکل‌پذیری عالی از خود نشان داده است. با این حال، استفاده از بتن مسلح و میراگرهای پیچیده، چالش‌هایی در اجرا و هزینه ایجاد کرده است.

در مقابل، اتصال‌ها با نبشی تسلیم‌شونده به‌دلیل سادگی اجرا، هزینه‌ی پایین، و قابلیت تعویض آسان، به‌عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای پایه‌ی ستون‌های فولادی شناخته می‌شوند.^[۲۰-۱۷] برزویی^۳ (۲۰۱۵)،^[۱۷] به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی انواع اتصال‌های پایه‌ی ستون کم‌آسیب، از جمله اتصال‌ها با نبشی تسلیم‌شونده پرداخته و نشان داده است که افزایش ضخامت نبشی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت خمشی (لنگر تسلیم و نهایی) و همچنین افزایش سختی دورانی اتصال شود، که اثری مشابه با قراردادن میل‌مهارهای نزدیک‌تر به وجه ستون است. اما اثر متقابل پارامترهایی، مانند نیروی محوری و فاصله‌ی میل‌مهارها بررسی نشده است. هو^۴ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۸ و ۲۱] یک اتصال پیچی جدید با دو نبشی را برای ستون‌های بال‌پهن تحت بار فشار محوری و خمش حول محور قوی و ضعیف تحلیل کرده‌اند. اتصال به روشی شکل‌پذیر رفتار کرده و عملکرد اتلاف انرژی رضایت‌بخشی از خود نشان داده است، بدون اینکه هیچ‌گونه پارگی در اجزاء اتصال رخ دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که نسبت فشار محوری بیشتر در ستون، تمایل به ایجاد مقاومت جانبی بالاتری برای اتصال در محدوده‌ی چرخش اتصال داشته است. با این حال، مطالعه‌ی مذکور آثار متقابل پارامترها را در نظر نگرفته است.

با وجود پیشرفت‌های ذکرشده، چندین شکاف پژوهشی در ادبیات موجود وجود دارد. نخست، در بیشتر مطالعات پیشین، فقط یک یا دو پارامتر بررسی شده و تحلیل هم‌زمان آثار متقابل چندین پارامتر کلیدی کمتر صورت گرفته است.^[۱۷ و ۲۲] همچنین، اعمال نیروی محوری می‌تواند موجب ایجاد رفتار خودمركزگرایی و بازگردانی اتصال به حالت اولیه شود، اما هم‌زمان ممکن است سختی برگشتی و جذب انرژی سیستم را کاهش دهد.^[۲۳ و ۲۴] از سوی دیگر، رویکردهای آزمایشگاهی سنتی به‌دلیل هزینه و زمان بالا، توانایی بررسی ترکیب‌های متعدد پارامترها را ندارند.^[۲۵-۲۷]

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی^۵ و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، به تحلیل هم‌زمان آثار سه پارامتر کلیدی (ضخامت نبشی، نیروی محوری، و فاصله‌ی میل‌مهار) در رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی

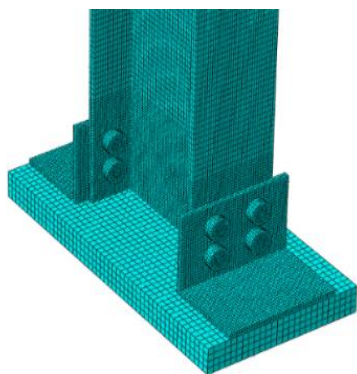
⁴ Hou

⁵ Taguchi

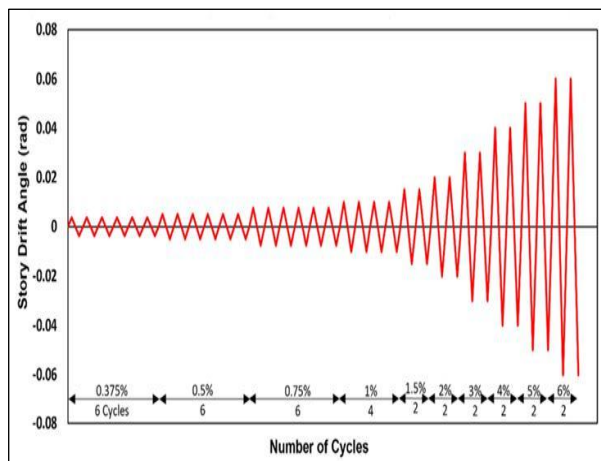
¹ Wang

² Xiao

³ Borzouie



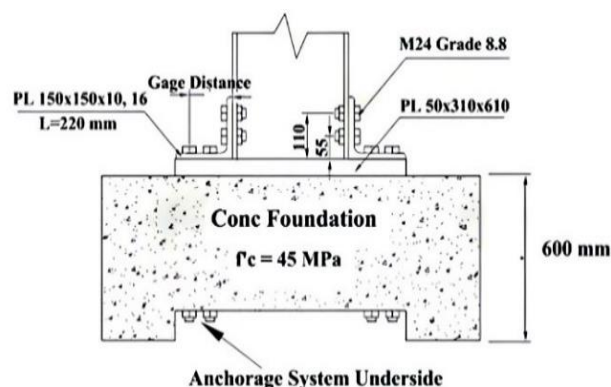
شکل ۳. مش بندی مدل عددی.



شکل ۴. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای.^[۳۱]

برابر در نظر گرفته شده است،^[۱۷] به طوری که تنش تسلیم فولاد برابر با ۳۲۰ مگاپاسکال و مدول یانگ معادل ۲۱۰ گیگاپاسکال تعیین شده است. این تذکر لازم است که پیش از آغاز مدل‌سازی اجزاء محدود، مقادیر تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش باید به مقادیر واقعی تبدیل شوند. تعامل بین اجزاء مختلف، تأثیر قابل توجهی در عملکرد چرخه‌ای پایه‌ی ستون دارد؛ بنابراین، تماس سطح به سطح (Surface-to-Surface Contact) همراه با مقدار ضریب اصطکاک ۰/۳ براساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی معتبر در مشابه-ترین شرایط تماس فولاد بر فولاد انتخاب شده است، تا دقت مدل‌سازی اندرکنش سطوح تماس تضمین شود.^[۳۰] در راستای قائم نیز شرط Hard Contact به کار رفته است، تا از نفوذ اجزا جلوگیری شود؛ در حالی که جداسازی در حضور نیروهای کششی مجاز در نظر گرفته شده است.

بارگذاری، ۲ گام داشته است: الف) بار عمودی به مقدار ۳۲۰ کیلونیوتن، که به سطح بالای ستون اعمال شده است، که این مقدار ۰/۲ از کل ظرفیت محوری ستون بوده است. ب) بارگذاری چرخه‌ای به صورت افقی به انتهای ستون اعمال شده و براساس پروتکل بارگذاری آزمایش بوده است. بیشینه‌ی نسبت دریافت رادیان بوده است. مطابق شکل ۴، پروتکل جابجایی چرخه‌ای براساس استاندارد ANSI/AISC ۳۴۱-۱۶ تنظیم و با توجه به ارتفاع ۱۲۰۰ میلی‌متر در آباکوس تعریف شده است.^[۳۱] پروتکل بارگذاری چرخه‌ای به صورت توالی جابجایی‌های افزایشی تعریف شده است، که شامل ۶ سیکل در سطوح دریافت ۰/۳۷۵، ۰/۵، و ۰/۷۵ درصد، ۴ سیکل در سطوح دریافت ۱٪، و ۲ سیکل در سطوح دریافت بالاتر بوده است. این پروتکل در نرم‌افزار آباکوس از طریق تعریف توابع دامنه‌ی Amplitude در ماژول بارگذاری اعمال شده است، تا رفتار چرخه‌ای اتصال پایه‌ی ستون شبیه‌سازی شود.



شکل ۲. اجزاء اتصال پایه‌ی ستون با نبشی تسلیم‌شونده در مدل آزمایشگاهی.^[۱۷]

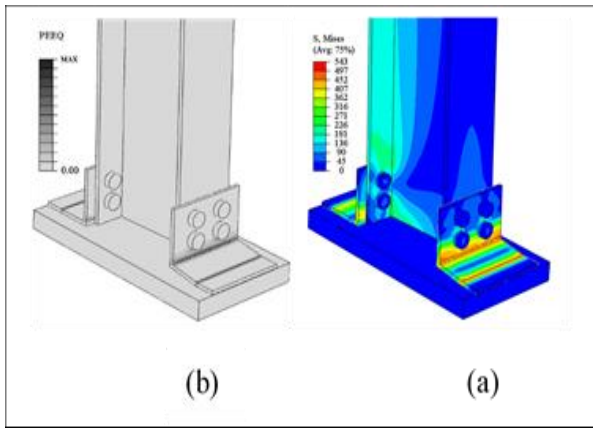
با نماد اختصاری 310UB46.2 و یک جفت نبشی است که به بال‌های ستون و کف ستون به وسیله‌ی پیچ‌های پرمقاومت متصل شده‌اند و از هیچ‌گونه جوش در آزمایش ذکر شده استفاده نشده است. مشخصات تمامی اجزاء اتصال در شکل ۲ نشان داده شده است. در بررسی آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی اتصال اخیر، مدل شماره‌ی ۴ مرجع، دارای نبشی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز میل‌مهارها از ستون مقدار ۱۱۰ میلی‌متر است. جزئیات بیشتر در مرجع^[۱۷] ارائه شده است.

۲.۲. مدل اجزاء محدود

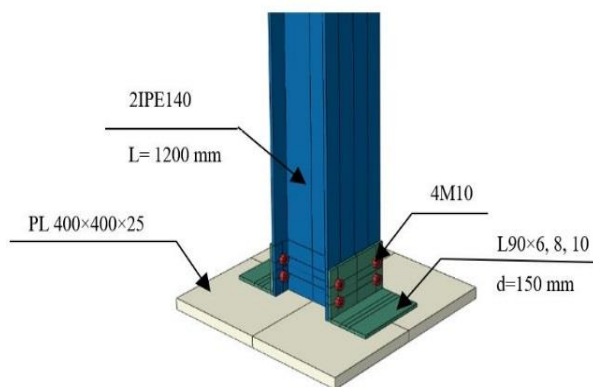
در مدل اجزاء محدود، فونداسیون به صورت یک صفحه‌ی فولادی مدل‌سازی و شرط مرزی گیردار در سطح زیرین آن اعمال شده است، تا ضمن حفظ دقت کافی، پیچیدگی و هزینه‌ی محاسباتی کاهش یابد و تأثیر آن در نتایج اتصال ناچیز باشد. از آنجا که نتایج آزمایش نشان می‌دهند که اتصال‌های نبشی به کف ستون تقریباً هیچ تغییرشکل نسبی از خود نشان نداده‌اند؛ بنابراین، اتصال‌های مذکور به صورت قیود Tie ساده‌سازی شده‌اند. درجه‌ی آزادی انتقالی در انتهای آزاد ستون حول محور ضعیف مقید شده است، تا از پیچش در اثر جابجایی جانبی جلوگیری شود.

مدل اجزاء محدود با استفاده از المان جامد هشت گره‌ی بی (C3D8R) در نرم‌افزار آباکوس،^[۲۸] مدل‌سازی شده است. تحلیل به صورت ضمنی، شبه‌استاتیکی و از نوع Static General برای کاهش اثر دینامیکی استفاده شده است. اندازه‌ی مش‌های مختلف برای کاهش زمان محاسبات اتخاذ شده است. اندازه‌ی مش نبشی‌ها و پیچ‌ها ۴ میلی‌متر و ستون دارای اندازه‌ی مش از ۵ تا ۱۰ میلی‌متر از ناحیه‌ی اتصال‌ها تا محل اعمال بارگذاری متغیر بوده است. اندازه‌ی مش ۴ میلی‌متر برای مدل‌سازی اتصال پای ستون در نرم‌افزار آباکوس انتخاب شده است، که تعادل مناسبی بین دقت شبیه‌سازی رفتار پلاستیک نبشی و هزینه‌ی محاسباتی ایجاد می‌کند. تحلیل حساسیت نشان داده است که مش‌های درشت‌تر قادر به توصیف دقیق تغییرشکل‌های پلاستیک نبوده و همگرایی مطلوبی نداشته‌اند، در حالی که مش‌های ریزتر به دلیل افزایش قابل توجه زمان محاسبات به صرفه نبوده‌اند. بنابراین، انتخاب مش ۴ میلی‌متر موجب تضمین درستی نتایج و بهینه‌سازی هزینه‌ی محاسباتی شده است. لذا، به دلیل تغییرشکل قابل توجه پلاستیک نبشی‌ها، در جهت ضخامت از دو لایه مش استفاده شده است (شکل ۳).

همچنین، یک مدل سخت‌شدگی ایزوتروپیک دوخطی برای تحلیل استفاده شده است.^[۲۹] مقادیر تنش تسلیم و مقاومت نهایی اجزا با داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۶. (a) توزیع تنش فون میسز؛ (b) کرنش پلاستیک معادل مدل اجزاء محدود.



شکل ۷. هندسه‌ی مدل عددی.

شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کرنش پلاستیک با افزایش میزان دریافت به‌صورت تدریجی افزایش یافته و ناحیه‌ی پلاستیک عمدتاً در محدوده‌ی نبشی‌های فولادی متمرکز شده است. این تمرکز کرنش در ناحیه‌ی مذکور نشانگر عملکرد مناسب نبشی‌ها به‌عنوان اجزاء جذب‌کننده‌ی انرژی و شکل‌پذیر در اتصال است.

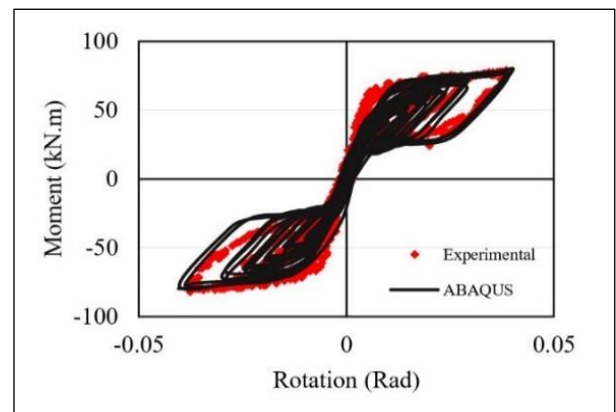
۴.۲. مدل اصلاح‌شده برای تحلیل پارامتریک

با توجه به رایج‌بودن طراحی ستون‌ها به شکل مرکب، از ستون با مقطع ۲IPE۱۴۰ و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (فاصله از ورق پایه‌ی ستون تا نقطه‌ی اعمال بار) مدل‌سازی و تمامی جابجایی‌ها و دوران‌ها نسبت به ارتفاع مذکور محاسبه شده‌اند. ورق پایه‌ی ستون با ابعاد ۴۰۰×۴۰۰×۲۵ میلی‌متر و پیچ‌های اتصال نبشی به ستون با اندازه‌ی M۱۰ و از نوع A۳۲۵ در نظر گرفته شده‌اند. نبشی‌ها از نوع L۹۰ و با طول ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۷، هندسه‌ی مدل عددی مشاهده می‌شود.

خواص مکانیکی فولادها از نوع S۲۳۵ با مدول الاستیسیته‌ی ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال تعریف شده است. پیچ‌ها از نوع A۳۲۵ با تنش تسلیم ۶۳۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۸۱۰ مگاپاسکال در کرنش ۲۵٪ در نظر گرفته شده‌اند.^[۲۱]

۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

تحلیل پارامتری برای بررسی تأثیر سه متغیر اصلی در رفتار اتصال طراحی شده است. متغیرها شامل نیروی محوری (براساس نسبتی از ظرفیت فشار محوری



شکل ۵. منحنی هیستریزیس (لنگر- دوران) مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج لنگر خمشی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی.

Rotation (Rad)	Experimental: Moment (kN.m)	ABAQUS: Moment (kN.m)	Error percentage
0.01	68	63	7
0.015	69.5	65	6.5
0.2	71.2	68	4.5
0.3	73.4	70.5	4
0.4	78.95	78.9	0.06

۳.۲. اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

در شکل ۵، نمودار هیستریزیس حاصل از آزمایش‌های تجربی با خروجی‌های مدل اجزاء محدود مقایسه شده است. در جدول ۱، مقادیر لنگر در نقاط پیک از زاویه‌ی چرخش ۰/۱ تا ۰/۴ رادیان ارائه شده‌اند. انطباق زیاد نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی با اختلاف کمتر از ۷٪ در مقادیر اوج دقت و درستی مدل عددی را تأیید می‌کند. البته این میزان اختلاف در مقادیر لنگر و شیب نمودار هیستریزیس ناشی از ساده‌سازی‌های انجام‌شده در فرآیند مدل‌سازی و نادیده‌گرفتن ویژگی‌های آسیب‌دیدگی و شکست در اجزاست. این همخوانی حاکی از سازگاری فرضیات مدل‌سازی، از جمله خواص مواد، شرایط مرزی، و تماس‌های بین اجزا با شرایط واقعی است.

در شکل ۶، توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در نرم‌افزار آباکوس مشاهده می‌شود. شکل ۶ (b)، کانتور توزیع کرنش پلاستیک تجمعی (PEEQ) در مدل عددی را به صورت مقیاس خاکستری (از روشن تا تیره) نمایش می‌دهد. نواحی تیره‌رنگ در تصویر مذکور، معرف مناطقی هستند که ماده دچار کرنش پلاستیک شده است و نواحی جاری‌شدن و تغییرشکل غیرالاستیک را نشان می‌دهند. در مقابل، بخش‌های روشن، نقاطی را نشان می‌دهند که کرنش پلاستیک صفر یا بسیار ناچیز دارند و از رفتار الاستیک پیروی می‌کنند. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، دو خط تیره‌ی مشخص و ممتد در ناحیه‌ی اتصال وجود دارد که نمایانگر تمرکز کرنش پلاستیک و شروع رفتار تسلیم ماده در بخش‌های مذکور است. نواحی اخیر دقیقاً منطبق بر مناطقی هستند که در آن‌ها تنش فون میسز (شکل ۶ (a)) به مقدار بحرانی خود نزدیک و موجب گسیختگی یا پلاستیک‌شدن موضعی می-

بررسی تأثیر ضخامت نبشی (۶، ۸، و ۱۰ میلی‌متر)، نیروی محوری (۰، ۰/۱ و ۰/۲ نسبت به ظرفیت فشار محوری ستون)، و فاصله‌ی میل‌مهارها (۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر) در رفتار چرخه‌ای اتصال پایه‌ی ستون‌های فولادی با نبشی بوده است. نمودارهای هیستریزس لنگر- دوران به همراه منحنی‌های دوطبقی ایده-آل شده برای ۹ ترکیب عددی در شکل ۸ مشاهده می‌شوند.

نمودارهای ذکرشده، بازتاب‌دهنده‌ی رفتار غیرخطی واقعی اتصال‌ها هستند و تحلیل پارامترهایی، نظیر: سختی اولیه، سختی ثانویه، شکل‌پذیری، و ظرفیت نهایی خمشی را تسهیل می‌کنند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت خمشی ستون در ترکیب‌های مختلف، به‌ویژه با افزایش ضخامت نبشی از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین در بسیاری از مدل‌ها، ترکیب‌هایی با نیروی محوری فشاری بیشتر، عملکرد بهتری از لحاظ ظرفیت خمشی از خود نشان داده‌اند؛ اما این اثر مثبت همواره مطلق نبوده و در مواردی نظیر مدل ۷، پارامترهایی مانند کاهش ضخامت و افزایش فاصله‌ی میل‌مهارها موجب تضعیف عملکرد خمشی شده و تأثیر مثبت نیروی فشاری را خنثی کرده‌اند. این نکته بر اهمیت بررسی هم‌زمان و ترکیبی پارامترهای هندسی و بارگذاری در تحلیل رفتار سازه‌ای تأکید دارد. نتایج تحلیل آماری نیز این وابستگی متقابل بین پارامترها را تأیید می‌کند. علاوه بر این، ظرفیت جذب انرژی (که از گسردگی حلقه‌های هیستریزس و انطباق رفتار با منحنی‌های دوطبقی استنباط می‌شود) در ترکیب‌هایی با نیروی محوری بالاتر بهبود یافته است. باید توجه داشت که اثر مثبت نیروی محوری در جذب انرژی، فقط در شرایطی معتبر است که سایر پارامترهای هندسی کنترل شده باشند. با این حال، کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری متوالی در تمامی ترکیب‌ها مشاهده شده است؛ که بیانگر آسیب تجمعی یا کاهش بازدهی در رفتار چرخه-ای اتصال است. تفاوت‌های عملکردی اخیر، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم متغیرهای هندسی و بارگذاری در رفتار چرخه‌ای اتصال است و با نتایج برخی مطالعات پیشین،^{[۱۷] و [۲۴]} بخصوص اثر نیروی محوری در ظرفیت خمشی سازه‌ها مطابقت دارد.

در پژوهش حاضر، در جدول ۴، نسبت شکل‌پذیری (θ_u/θ_y) اتصال‌های پایه‌ی ستون فولادی تحت تأثیر سه پارامتر کلیدی ضخامت نبشی، نیروی محوری اعمالی، و فاصله‌ی میل‌مهار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت نبشی باعث بهبود قابل‌توجه شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود؛ در حالی که افزایش نیروی محوری به‌خصوص در ضخامت‌های کمتر، کاهش شکل‌پذیری را در پی دارد. فاصله‌ی میل‌مهار، تأثیر کمتری نسبت به دو پارامتر دیگر دارد؛ اما تغییرات آن در ظرفیت خمشی مؤثر است. با توجه به طراحی آزمایش تاگوچی و تغییر هم‌زمان پارامترها، تفکیک دقیق اثر هر متغیر دشوار است، اما روند کلی حاکی از اهمیت بالای ضخامت نبشی و نقش محدودکننده‌ی نیروی محوری در ظرفیت دوران پلاستیک است. این نتایج همسو با الزام‌های کدهای لرزه‌ای، نشان‌دهنده‌ی قابلیت اتصال‌ها در تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک با شکل‌پذیری زیاد، به ویژه در ترکیب بهینه‌ی پارامترها هستند.^[۲۲]

در اتصال‌هایی که تحت تأثیر نیروی محوری قرار دارند، پدیده‌ی جمع‌شدگی (Pinching) در نمودارهای هیستریزس مشاهده می‌شود؛ که ناشی از وجود نیروی محوری است، که با ایجاد خود مرکزگرایی در اتصال، موجب تمایل سازه برای بازگشت به وضعیت اولیه پس از باربرداری می‌شود. در چنین شرایطی، نیروی محوری از طریق اجزاء پیش‌تنیده یا فشار محوری موجود در اتصال،

جدول ۲. متغیرها و سطح‌های آن‌ها.

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Axial Load ratio	0	0.1	0.2
Thickness (mm)	6	8	10
Gage distance (mm)	40	50	60

جدول ۳. ترکیب‌های طراحی آزمایش با روش تاگوچی.

Sample No.	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)
1	0	6	40
2	0	8	50
3	0	10	60
4	0.1	6	50
5	0.1	8	60
6	0.1	10	40
7	0.2	6	60
8	0.2	8	40
9	0.2	10	50

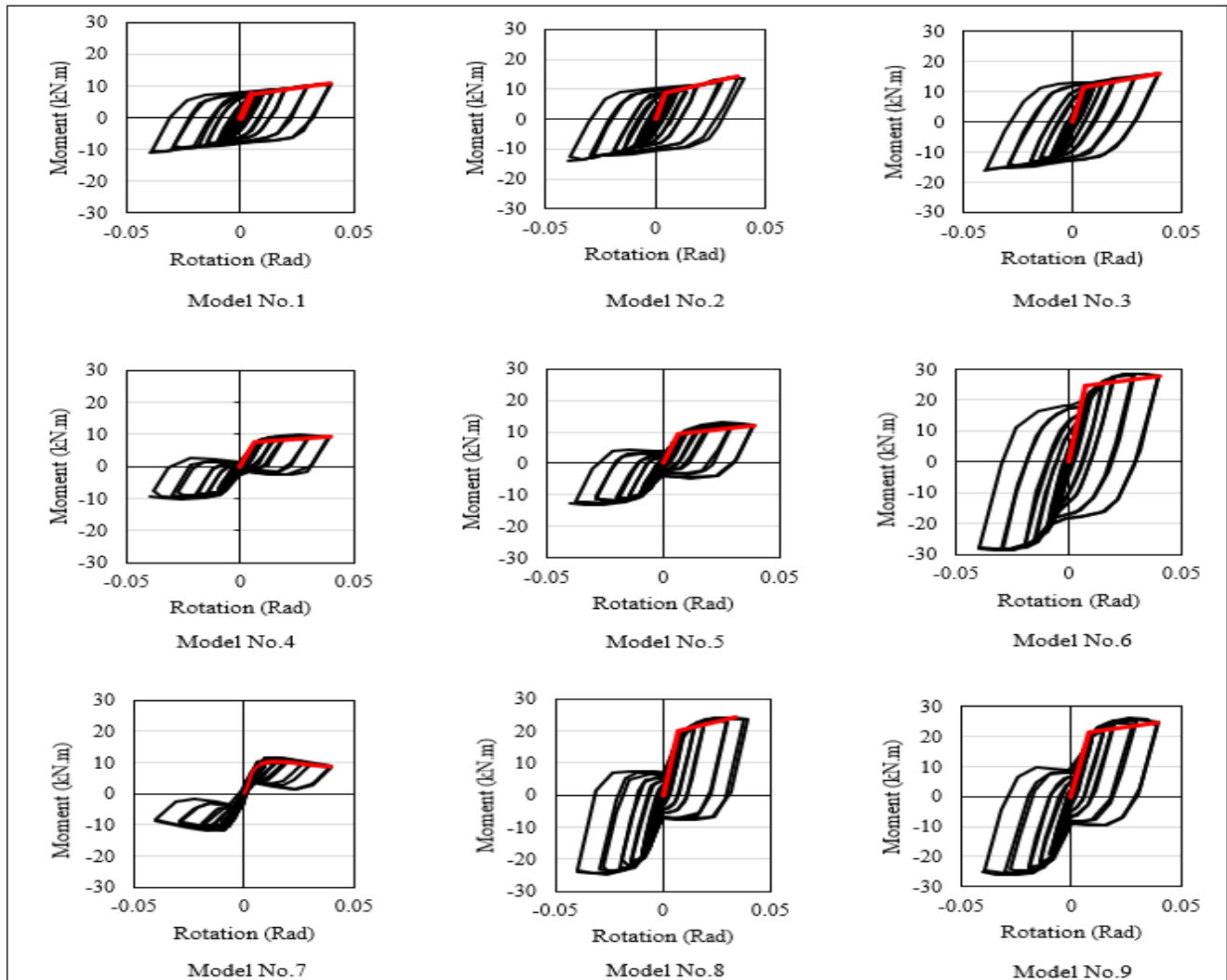
ستون)، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مهارها از لبه‌ی ستون انتخاب شده‌اند. ظرفیت فشار محوری ستون برابر با ۶۷۹ کیلو نیوتن بوده است، که نسبت نیروی محوری از صفر تا ۰/۲ اعمال شده است. هر متغیر، سه سطح داشته است، که در جدول ۲، سطوح آن‌ها ارائه شده است. متغیرهای مذکور براساس اهمیت آن‌ها در رفتار چرخه‌ای اتصال‌ها تعیین شده‌اند. برای کمینه‌سازی تعداد شبیه‌سازی‌ها، از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌ها یا مدل‌های عددی را از ۲۷ (3^3) به ۹ کاهش داده و آثار اصلی و تعاملات متغیرها را ارزیابی کرده است. مزیت روش تاگوچی نسبت به رویکردهای سنتی، کاهش قابل‌توجه تعداد شبیه‌سازی‌ها و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان و منابع محاسباتی بدون کاهش دقت تحلیل است.^[۲۵] روش تاگوچی ویژگی‌های کیفی را به ۳ دسته تقسیم می‌کند: «کمتر-بهرتر»، «بیشتر-بهرتر»، و «اسمی-بهرتر». در پژوهش حاضر، با هدف افزایش ظرفیت خمشی، دسته‌ی «بیشتر-بهرتر» انتخاب شده است.^[۲۵] برای ارزیابی عملکرد، نسبت سیگنال به نویز (S/N) محاسبه شده است، که نشان‌دهنده‌ی تغییرات پاسخ نسبت به تنظیم‌های عوامل است. نسبت S/N بالاتر، بیانگر تغییرات کمتر و عملکرد بهتر است.^[۲۷]

۹ ترکیب مذکور در نرم‌افزار ۴- Qualitek طراحی و آنالیز و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. برای هر ترکیب، شبیه‌سازی در آباکوس صورت گرفته و خروجی‌هایی، نظیر بیشینه‌ی لنگر خمشی و انرژی جذب‌شده استخراج شده‌اند، تا متغیرهای غالب شناسایی شوند.

۴. نتایج و بحث

۴.۱. نمودارهای هیستریزس

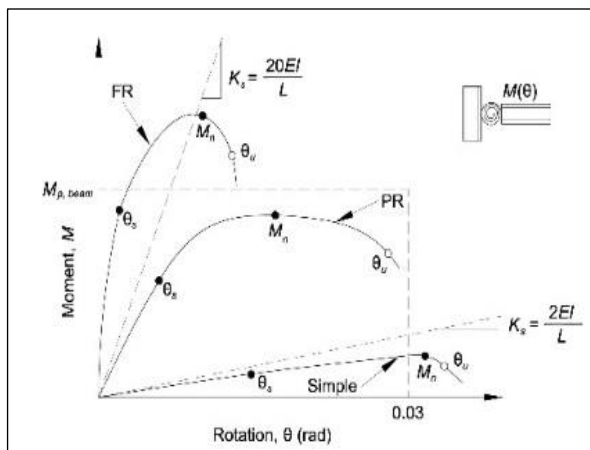
نتایج مدل‌سازی‌های عددی برای نمونه‌های طراحی‌شده در بخش ۳، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس استخراج و در بخش حاضر، ارائه و تفسیر شده‌اند. هدف،



شکل ۸. نمودارهای هیستریزیس لنگر- دوران و دوخطی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی.

جدول ۴. پارامترهای خروجی از مدل‌های عددی برای ۹ ترکیب تاگوچی.

Sample No.	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Absorbed energy (kJ)	Rigidly	$\frac{\theta_u}{\theta_y}$
1	0	6	40	7.44	10.86	4.86	0.76	7.8
2	0	8	50	8.59	14.1	5.7	0.95	7.8
3	0	10	60	11.27	16.01	6.4	1.1	7.2
4	0.1	6	50	7.64	9.26	3.1	0.62	6
5	0.1	8	60	9.57	12.03	4	0.8	6.2
6	0.1	10	40	24.7	28.5	10.5	1.75	3.9
7	0.2	6	60	9.78	9.99	2.1	0.61	2.1
8	0.2	8	40	20	24.2	8.1	1.45	4.6
9	0.2	10	50	21.64	24.94	8.4	1.46	5
Average				13.4	16.66	5.91	1.1	5.6
Variance					7.29	2.73		



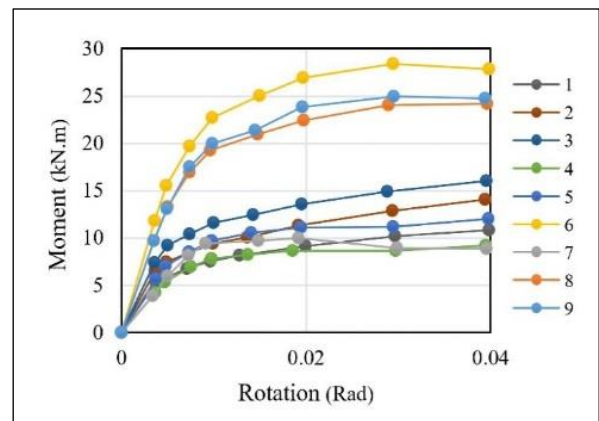
شکل ۱۰. گستره‌ی صلبیت بر اساس استاندارد ۳۶۰-۱۶ ANSI/AISC [۳۳].

(Flexible) تقسیم کرده و براساس نسبت صلبیت اتصال به صلبیت الاستیک ستون تعریف شده است. رفتار غیرخطی اتصال نیز با استفاده از منحنی دوخطی ایده‌آل‌سازی شده است، تا نقاط تسلیم و نهایی به‌صورت دقیق تعیین شوند.

مقادیر لنگر بیشینه (M_{max}) و تسلیم (M_y)، انرژی جذب‌شده (E_d)، و صلبیت (R) اتصال برای ۹ ترکیب مختلف در جدول ۴ گزارش شده‌اند. میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی در تحلیل‌های عددی مذکور به ۱۶/۶۶ کیلو نیوتن.متر رسیده است، که نشانگر عملکرد کلی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای است. صلبیت اتصال در تمامی ترکیب‌ها در محدوده‌ی رفتار مفصلی قرار داشته است. این رفتار اتصال با هدف طراحی اتصال‌های کم‌آسیب سازگار است. در تمامی مدل‌های بررسی‌شده، ناحیه‌ی تمرکز تنش، تسلیم، و آسیب به‌صورت یکنواخت و کنترل‌شده در اجزاء نبشی متمرکز شده است و سایر اجزاء اتصال از جمله ستون، صفحه‌ی پایه‌ی ستون فاقد خرابی بوده‌اند. این موضوع حتی در مدل‌هایی مانند مدل ۷، که شدت آسیب در نبشی بیشتر بوده است، نیز صادق است. بنابراین، عملکرد اتصال به‌گونه‌ای بوده است که رفتار غیرخطی به اجزاء قابل‌تعویض و طراحی‌شده برای تسلیم (نبشی‌ها) محدود شده و مکانیزم شکست در کنترل باقی مانده است.

۳.۲.۴. ضریب میرایی معادل

به‌منظور ارزیابی دقیق رفتار چرخه‌ای اتصال در طول چرخه‌های بارگذاری، ضریب میرایی معادل ویسکوز برای هر سیکل بارگذاری برای ۹ ترکیب عددی مبتنی بر آرایه‌ی L_9 استخراج شده و تغییرات آن بیانگر میزان اتلاف انرژی و پایداری عملکرد اتصال در برابر بارهای چرخه‌ای بوده است. ضریب میرایی معادل برای هر نمونه و هر سیکل بارگذاری با استفاده از روش انرژی هیستریزس محاسبه شده است، تا پایداری رفتار اتصال پایه‌ی ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شود. ضریب میرایی معادل فقط به‌عنوان شاخصی برای مقایسه‌ی رفتار نسبی نمونه‌ها در تحلیل چرخه‌ای اعمال شده و به هیچ عنوان نمایانگر دقیق مقدار میرایی واقعی سازه نبوده است. ضریب میرایی با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است، که مطابق شکل ۱۱، در آن، (E_d) نمایانگر انرژی تلف‌شده در هر چرخه‌ی بارگذاری و (E_s) نشان‌گر انرژی الاستیک (مربوط به مثلث زیر منحنی الاستیک) است. شاخص مذکور، معیاری معتبر برای سنجش ظرفیت استهلاک انرژی در رفتار هیستریزس اتصال به‌شمار می‌رود و نقشی کلیدی در تحلیل عملکرد چرخه‌ای سیستم ایفا می‌کند.



شکل ۹. نمودار ساختاری لنگر- دوران حاصل از ۹ مدل عددی.

سبب کاهش میزان تغییرمکان باقی‌مانده و کاهش نیروهای انتقالی در مرکز چرخه‌های بارگذاری می‌شود. نتیجه‌ی فرآیند اخیر، شکل‌گیری یک منحنی هیستریزس باریک در ناحیه‌ی مرکزی است، که بیانگر کاهش سختی برگشتی و کاهش ظرفیت جذب انرژی در طی بارگذاری‌های چرخه‌ای است. این رفتار در سیستم‌های خود مرکز‌گرا، مانند اتصال‌ها با کابل‌های پیش‌تنیده به‌وضوح مشاهده می‌شود.

۲.۴. تحلیل عملکرد چرخه‌ای

۱.۲.۴. نمودارهای ساختاری^۶

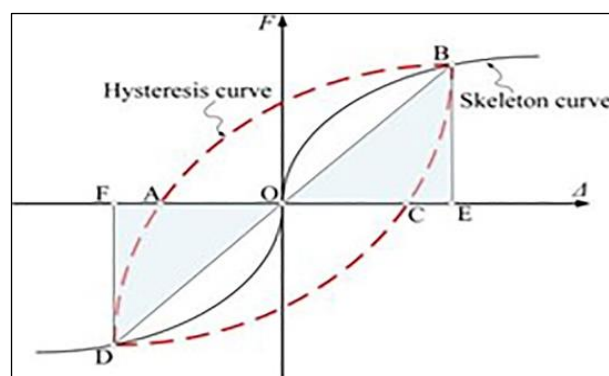
در شکل ۹، نمودارهای ساختاری مربوط به ۹ ترکیب مختلف اتصال مشاهده می‌شود. در بخش ابتدایی نمودار و پیش از تسلیم نبشی‌ها، رفتار اتصال به‌صورت خطی بوده است، که نشان می‌دهد سختی اولیه بالا بوده است. پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، رفتار وارد ناحیه‌ی پلاستیک شده و اتصال ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان داده است. با افزایش بارگذاری، هر چند سختی اتصال کاهش یافته است، اما ظرفیت کلی باربری همچنان روند افزایشی داشته است. با این حال، مطابق شکل ۹، برخی نمونه‌ها مانند مدل ۷ به دلیل ویژگی‌های هندسی و بارگذاری، کاهش ظرفیت باربری و جذب انرژی داشته‌اند. این تفاوت‌ها ناشی از آثار ترکیبی پارامترهای هندسی (ضخامت نبشی و فاصله‌ی میل‌مه‌ار) و بار محوری است، که می‌تواند باعث کاهش عملکرد در برخی موارد شود. تفاوت‌های ذکرشده بیانگر پیچیدگی رفتار اتصال‌ها تحت شرایط متغیر است و اهمیت تحلیل چندمتغیری در تفسیر نتایج را برجسته می‌سازد. تحلیل دقیق منحنی‌های ساختاری مذکور، امکان استخراج پارامترهایی نظیر: سختی اولیه، سختی ثانویه، و ظرفیت نهایی باربری اتصال را فراهم می‌سازد؛ که نقش کلیدی در ارزیابی عملکرد چرخه‌ای و غیرخطی اتصال‌های سازه‌ای دارند.

۲.۲.۴. انرژی جذب‌شده و صلبیت

برای تحلیل نتایج، میزان انرژی جذب‌شده با محاسبه‌ی مساحت زیر نمودارهای هیستریزس لنگر- دوران در هر چرخه تعیین شده است. صلبیت اتصال نیز از طریق نسبت شیب اولیه‌ی نمودار لنگر- دوران به سختی خمشی ستون ($\frac{EI}{L}$) به‌دست آمده است، که بیانگر سختی دورانی اتصال در محدوده‌ی الاستیک است. به‌منظور دسته‌بندی صلبیت اتصال، مقادیر محاسبه‌شده با مرزبندی استاندارد ارائه‌شده در استاندارد ۳۶۰-۱۶ ANSI/AISC مقایسه شده‌اند. [۳۳] این مرزبندی، که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، گستره‌ی صلبیت را به سه دسته‌ی: صلب (Rigid)، نیمه‌صلب (Semi-Rigid)، و انعطاف‌پذیر

۵. تحلیل آماری نتایج

هدف از تحلیل آماری در پژوهش حاضر، بررسی دقیق اثر پارامترهای مختلف در رفتار چرخه‌ای اتصال نبشی پایه‌ی ستون‌های فولادی با استفاده از روش تاگوچی است؛ که با طراحی ۹ نمونه‌ی آزمایشی، امکان ارزیابی تأثیر عوامل کلیدی، مانند: نیروی فشار محوری، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مه‌ارها را در ظرفیت خمشی فراهم کرده است. با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، می‌توان میزان تأثیر هر عامل و تعاملات آن‌ها را در عملکرد چرخه‌ای به‌صورت کمی تعیین کرد. همچنین، می‌توان با مدل رگرسیونی، رابطه‌ی بین متغیرها و ظرفیت خمشی را فرموله ساخت، که به پیش‌بینی رفتار اتصال و بهبود طراحی سازه‌ها در برابر بارهای زلزله کمک می‌کند.



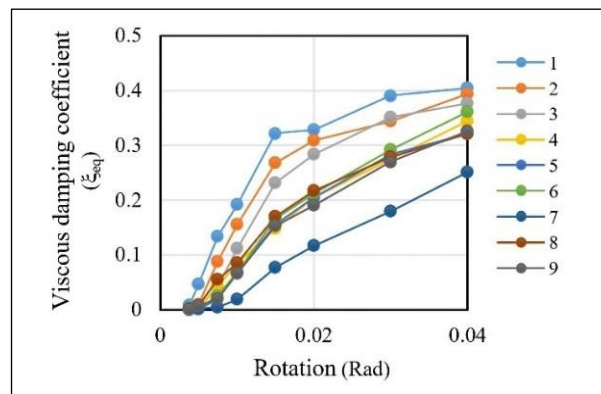
شکل ۱۱. دیاگرام تحلیل ضریب میرایی معادل ویسکوز.

۱.۵. تحلیل واریانس

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار ۴ Qualitek صورت گرفته و نتایج آن به این صورت ارائه شده‌اند:

نمودار میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی براساس سه متغیر در شکل ۱۳ ترسیم شده است و نشان می‌دهد که ضخامت نبشی، بیشترین تأثیر را در افزایش میانگین لنگر داشته است؛ زیرا شیب تغییرات آن بیشتر از سایر متغیرها بوده است. در هر سه نمودار، مقادیر خروجی (Error Bar) مستقیم روی هر ستون درج شده است، که بیانگر پراکندگی داده‌ها حول میانگین‌ها (۱۶/۶۶) است. کوتاهی نسبی نوارهای مذکور نشانگر دقت مدل‌سازی و پایایی نتایج عددی است. به‌طور مثال، در نمودار مربوط به فاصله‌ی میل‌مه‌ارها، مقدار میانگین لنگر برای سطح ۴۰ میلی‌متر، ۲۱/۱۹ کیلونیوتن.متر با پراکندگی محدود بوده است، که قابل قبول است و نشان می‌دهد داده‌ها به خوبی حول میانگین متمرکز هستند. این ویژگی تأکید می‌کند که میانگین‌های به‌دست‌آمده، نماینده‌ی قابل‌اعتمادی از عملکرد سیستم در سطوح مختلف پارامترها هستند.

تحلیل سطوح مختلف هر پارامتر به روشی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی میل‌مه‌ارها از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی به‌طورمنظم کاهش یافته و در تمام سطوح، مقادیر هر ستون، نشانگر اختلاف معنادار و پایدار است. افزایش ضخامت از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر را از ۱۰/۵ به ۲۳/۱۴ کیلونیوتن.متر افزایش داده و مقدار ستون در سطح ۱۰ میلی‌متر، دلالت بر بازایی بیشینه‌ی ظرفیت خمشی با پراکندگی کم داده‌ها دارد. نسبت نیروی محوری بالاتر نیز منجر به رشد چشمگیر میانگین لنگر خمشی شده است؛ در حالی که پراکندگی داده‌ها نسبتاً ثابت و محدود بوده است. تفسیر نتایج دلالت بر قابل‌قبول‌بودن عملکرد مدل عددی و روش طراحی آزمایش تاگوچی برای

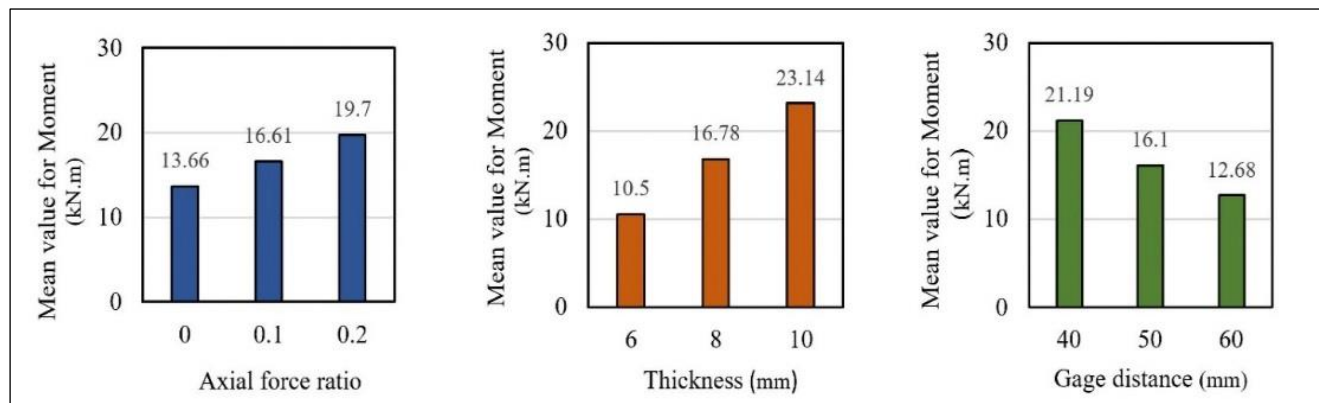


شکل ۱۲. ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_d}{E_s} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{AOBE} + S_{AODF}} \quad (1)$$

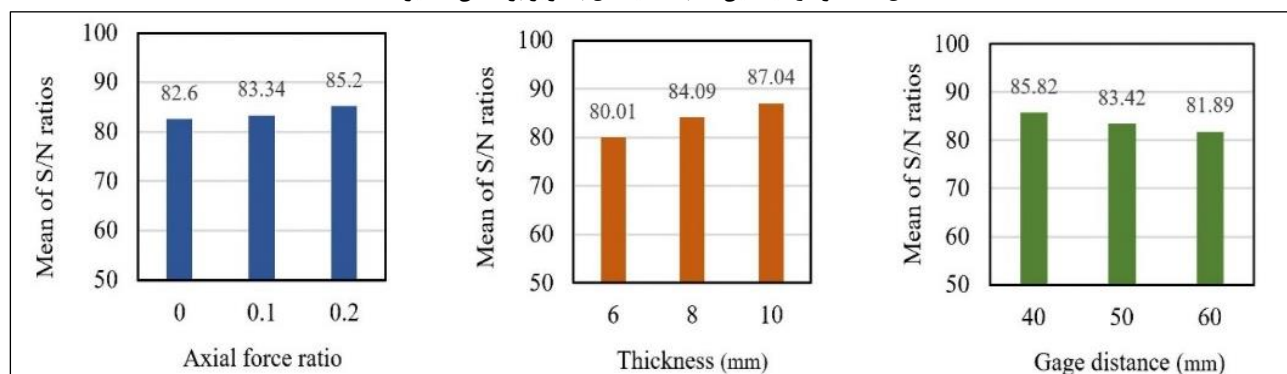
که در آن، S_{ABC} و S_{CDA} : مساحت ناحیه‌ی محصورشده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط ABC و $CDAC$ ؛ و S_{AOBE} و S_{AODF} : مساحت مثلث‌های قائم‌الزاویه تشکیل‌شده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط OBE و ODF هستند.

نتایج تحلیل در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن، نمودار ضریب میرایی معادل، روند تغییرات اتلاف انرژی در هر سیکل را نشان می‌دهد. در برخی نمونه‌های بدون نیروی محوری، مقدار ضریب میرایی بیشتر بوده است، که به‌دلیل شکل یکنواخت‌تر و نبود جمع‌شدگی در منحنی‌های هیستریزس است. این موضوع الزاماً به معنای جذب انرژی بیشتر در مجموع سیکل‌ها نیست. بلکه بیانگر پایداری پاسخ چرخه‌ای و یکنواختی در هر سیکل است. لذا تحلیل ضریب میرایی باید در کنار تحلیل هیستریزس به‌صورت مکمل بررسی شود.



شکل ۱۳. نمودار میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی براساس متغیرها.

شکل ۱۴. نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز براساس متغیرها.

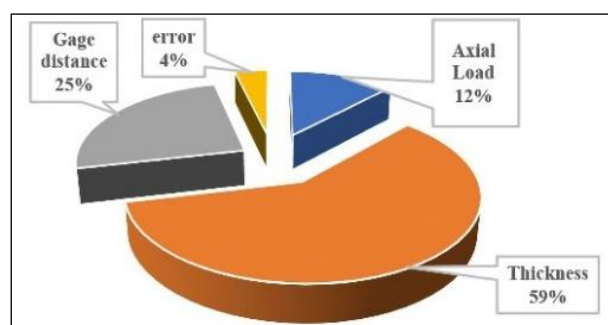


جدول ۵. تحلیل واریانس (ANOVA) متغیرها براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

Parameters	Degrees of Freedom	Sum of squares	Variance	F-ratio	Significance (%)	Rank
Axial Load ratio	2	56.671	27.335	13.919	11.92	3
Thickness (mm)	2	256.826	28.413	65.386	59.43	1
Gage distance (mm)	2	110.104	55.052	28.031	24.95	2
Error	2	3.927	1.963	-	3.69	
Total	8	425.53	-	-	100	

جدول ۶. ترکیب بهینه‌ی متغیرها براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

Parameter	Level	Level description	Contri-Bution(kN.m)
Axial Load ratio	3	0.2	3.041
Thickness (mm)	3	10	6.481
Gage distance (mm)	1	40	4.534
Total contributions from all parameters			14.056
Current grand average of performance for moment			16.655
Expected result at optimum conditions			30.711



شکل ۱۵. چارت دایره‌ای اهمیت متغیرهای تحلیل‌شده براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

۲.۵. معادله‌ی رگرسیون نهایی برای پیش‌بینی لنگر خمشی

با استفاده از تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود و به‌کارگیری روش طراحی آزمایش‌ها، معادله‌ی رگرسیونی برای پیش‌بینی لنگر خمشی به‌دست آمده است (رابطه ۲)؛ که بر اساس سه پارامتر کلیدی مدل (نیروی محوری، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مه‌ار) فرموله شده است:

$$M = 8653 + 30250 n + 3275 t - 424/6 g \quad (2)$$

که در آن، M پیش‌بینی لنگر خمشی (N.m)، n نسبت نیروی محوری (۰، ۰/۱)،

پیش‌بینی مقادیر پیشینه‌ی لنگر به دلیل خطای معیار پایین دارد. این مسئله نشان می‌دهد که روند مشاهده‌شده در نمودارها واقعی است و حاصل تصادف یا نویز داده‌ها نیست.

نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود و الگوی مشابهی را تأیید می‌کند؛ که کیفیت و پایداری پاسخ پیشینه‌ی لنگر خمشی را در برابر خطاهای احتمالی نشان می‌دهد. در جدول ۵، گزارش تحلیل واریانس (ANOVA) ارائه و اهمیت نسبی و رتبه‌ی هر متغیر مشخص شده است. براساس تحلیل اخیر، ضخامت نبشی با مقدار ۵۹/۴۳ اهمیت، رتبه‌ی اول و پس از آن فاصله‌ی مه‌اری و نیروی محوری به ترتیب با ۲۴/۹۵ و ۱۱/۹۲ درصد در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند، که در شکل ۱۵ به‌صورت بصری مشاهده می‌شوند.

ترکیب بهینه در جدول ۶ نشان می‌دهد که با اعمال سطح پیشنهادی برای هر متغیر، چه میزان تغییر در لنگر ایجاد می‌شود. در ترکیب اخیر، پیش‌بینی شده است که مقدار ۱۴/۰۵۶ کیلو نیوتن.متر به میانگین لنگر (۱۶/۱۶ کیلو نیوتن.متر) افزوده شود. به‌طور خاص، با اعمال نیروی محوری ۲۰٪، ضخامت ۱۰ میلی‌متر، و فاصله‌ی مه‌اری ۴۰ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود مقدار پیشینه‌ی لنگر خمشی به ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن.متر برسد. این موضوع به‌وضوح تأثیر هم‌زمان سه متغیر بررسی‌شده را در عملکرد دینامیکی اتصال نشان می‌دهد.

جدول ۷. پارامترهای خروجی از مدل عددی برای ترکیب بهینه متغیرها.

	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Absorbed energy (kJ)	Rigidly
Optimal model	0.2	10	40	27.28	30.56	10.12	1.72

۶. نتیجه‌گیری

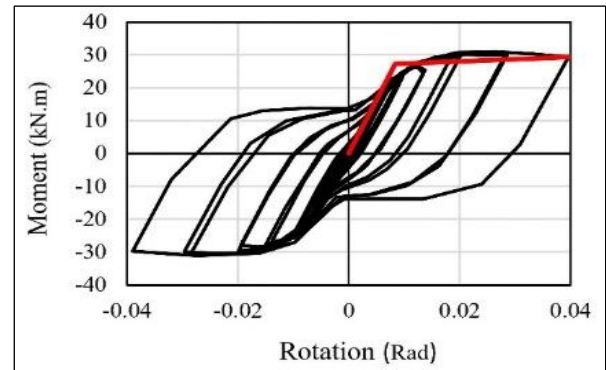
در پژوهش حاضر، با هدف تحلیل رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی ستون فولادی مجهز به نبشی تسلیم‌شونده و قابل تعویض، تأثیر سه پارامتر کلیدی، شامل: ضخامت نبشی، نیروی فشار محوری، و فاصله‌ی میل‌مه‌ار به‌صورت هم‌زمان و ترکیبی بررسی شده است. برای این منظور، از تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس و روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی پس از اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی، دقت و تطابق بالایی داشته‌اند.

تحلیل آماری نتایج به‌روش ANOVA نشان داده است که ضخامت نبشی، بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت خمشی اتصال داشته است (۵۹/۴۳٪)؛ در حالی که فاصله‌ی میل‌مه‌ار (۲۴/۹۵٪) و نیروی محوری (۱۱/۹۲٪) در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰٪ و فاصله‌ی میل‌مه‌ار ۴۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن‌متر را به همراه صلبیت مناسب و ظرفیت بالای جذب انرژی (۱۰/۱۲ کیلوژول) حاصل کرده است. این مقادیر با نتایج مدل عددی به‌خوبی تطابق داشته‌اند (۳۰/۵۶ کیلو نیوتن‌متر).

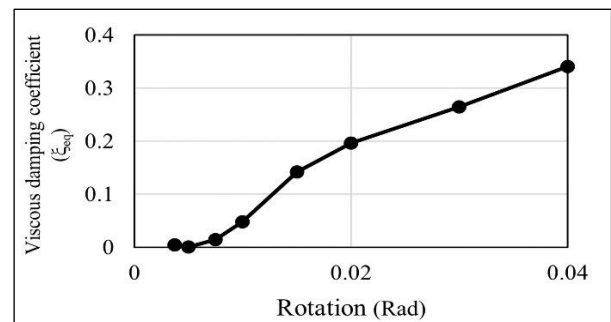
تحلیل نمودارهای هیستریزیس و منحنی‌های دوخطی نشان داده است که تأثیر مثبت بار محوری در عملکرد اتصال‌ها، مشروط به وجود شرایط هندسی و سازه‌ای مناسب است و در صورت وجود ضعف هندسی (مانند ضخامت کم نبشی و فاصله‌ی زیاد میل‌مه‌ارها)، بار محوری می‌تواند زمینه‌ساز زوال زود هنگام رفتار اتصال شود. ترکیب بهینه، منجر به بهبود سختی اولیه، افزایش شکل‌پذیری، و ارتقاء عملکرد اتصال‌ها در برابر بارهای چرخه‌ای می‌شود. هر چند طبق ضوابط استاندارد ۱۶-۳۶۰-ANSI/AISC، رفتار اتصال‌ها در محدوده‌ی مفصلی باقی مانده‌اند، اما همین امر نیز با هدف طراحی اتصال‌های کم‌آسیب، مطلوب تلقی می‌شود.

معادله‌ی رگرسیون پیشنهادی، ابزار دقیقی برای پیش‌بینی بیشینه‌ی لنگر فراهم کرده است، که دقت آن با اعتبارسنجی تأیید شده است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که روش تاگوچی در کاهش تعداد آزمایش‌ها و مدل‌های عددی و بهینه‌سازی عملکرد چرخه‌ای اتصال‌ها مؤثر بوده است و کاربرد آن می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش ایمنی سازه‌ها شود.

توصیه می‌شود برای توسعه‌ی پژوهش حاضر در مطالعات آتی، به بررسی متغیرهایی، نظیر ویژگی‌های مکانیکی مختلف برای نبشی‌ها یا استفاده از شکل‌های دیگر میراگرهای تسلیم‌شونده در اتصال پرداخته شود، تا بتوان عملکرد چرخه‌ای را بهبود بخشید. همچنین بررسی عملکرد اتصال‌های پای ستون تحت خمش حول محور ضعیف نیز می‌تواند اطلاعات بیشتری از رفتار آن به‌دست دهد.



شکل ۱۶. نمودار هیستریزیس لنگر - دوران و دوخطی مدل عددی برای ترکیب بهینه‌ی متغیرها.



شکل ۱۷. ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی برای ترکیب بهینه.

و ۰/۲)، مقدار ضخامت نبشی (mm)، و g فاصله‌ی میل‌های مه‌اری از بال ستون (mm) هستند.

۳.۵. اعتبارسنجی تحلیل تاگوچی

برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل واریانس نمونه‌های طراحی‌شده با روش تاگوچی و ارزیابی دقت پیش‌بینی ترکیب بهینه‌ی ارائه‌شده در جدول ۵، نمونه‌ی مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نمودار هیستریزیس و منحنی دوخطی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۷ گزارش شده و تطابق نزدیک بین مقدار بیشینه‌ی لنگر خمشی پیش‌بینی‌شده (۳۰/۷۱ کیلو نیوتن‌متر) و نتیجه‌ی مدل عددی اجزاء محدود (۳۰/۵۶ کیلو نیوتن‌متر، دقت بالای تحلیل تاگوچی و مدل عددی را تأیید می‌کند. همچنین، معیارهای دیگر مانند انرژی جذب‌شده و صلبیت برای ترکیب مذکور محاسبه و گزارش شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی رفتار چرخه‌ای بهبودیافته با صلبیت مفصلی است. ضریب میرایی معادل در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. روش تاگوچی با کاهش تعداد مدل‌های عددی به ۹ نمونه و ارائه‌ی معادله‌ی رگرسیون و اعتبارسنجی موفق، کارایی بالایی در بهینه‌سازی و پیش‌بینی لنگر بیشینه را نشان داده است.

References- منابع

1. Kanvinde, A.M., Jordan, S.J. and R.J. Cooke., 2013. Exposed column base plate connections in moment frames — Simulations and behavioral insights. *Journal of Constructional Steel Research*, 84: p. 82-93. DOI: [10.1016/j.jcsr.2013.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.02.015).
2. Lim, W. Y., Lee, D. and You, Y. C., 2017. Exposed column-base plate strong-axis connections for small-size steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp. 286-296. DOI: [10.1016/j.jcsr.2017.06.018](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.018).
3. Sivandi-Pour, A., Gerami, M. and Taghdisi, M., 2019. Assessment of the effect of column base connection rotation. DOI: [10.24200/j30.2018.2132.2103](https://doi.org/10.24200/j30.2018.2132.2103).
4. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A., 2021. An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(2), pp. 629-638. DOI: [10.1007/s40996-020-00410-z](https://doi.org/10.1007/s40996-020-00410-z).
5. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A., 2021. Impact of temperature rise on the seismic performance of concrete-filled double skin steel columns with prismatic geometry. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(4), pp. 2800-2815. DOI: [10.1520/jte20200037](https://doi.org/10.1520/jte20200037).
6. Aghaei, I. and Miri, M., 2023. Experimental and analytical investigation of asymmetric friction connections in steel column bases. *13th International Congress on Civil Engineering*, [in Persian]. <https://civilica.com/doc/1853046>.
7. Zhang, R., Liu, J., Xu, J. and Jia, L., 2024. Low-damage performance of blast resilient steel rocking column base with friction connection. *Thin-Walled Structures*, 197, pp. 111598. DOI: [10.1016/j.tws.2024.111598](https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111598).
8. Zhang, R., Xie, J., Chouery, K., Liu, J., Jia, L., Xiang, P., Zhao, X., MacRae, G., Clifton, G. C., Dhakal, R., Ramhormozian, S. and Yan, Z., 2022. Strong axis low-damage performance of rocking column-base joints with asymmetric friction connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, pp. 107175. DOI: [10.1016/j.jcsr.2022.107175](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107175).
9. Zhang, R., Yan, Z., Xie, J., Liu, J., Jia, L., Xiang, P., Zhao, X., MacRae, G., Clifton, G. C., Dhakal, R. and Ramhormozian, S., 2024. Weak axis low-damage performance of seismic resilient rocking steel column base with friction connection. *Journal of Building Engineering*, 86, pp. 108778. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.108778](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108778).
10. Kamperidis, V.C., Karavasilis, T.L. and Vasdravellis, G., 2018. Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices. *Journal of Constructional Steel Research*, 149, pp. 14-30. DOI: [10.1016/j.jcsr.2018.06.027](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.027).
11. Shen, P., Yang, P., Chen, Y., Yang, Y. and Zhou, J., 2024. Seismic performance of self-centering steel column base with buckling-restrained bars. *Journal of Building Engineering*, 91, pp. 109474. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.109474](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109474).
12. Gerami, M. and Khatami, M., 2017. The effects of initial post tensioning force on seismic behavior of steel moment resisting frames by post-tensioned connections. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(1.1), pp. 107-115. [in Persian]. DOI: [10.24200/j30.2017.1101](https://doi.org/10.24200/j30.2017.1101).
13. Li, Y. W. and Koetaka, Y., 2022. Steel rocking column bases with replaceable cover plates: Cyclic loading behaviour and practical design. *Engineering Structures*, 264, pp. 114467. DOI: [10.1016/j.engstruct.2022.114467](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114467).
14. Wang, B., Zhu, S., Chen, K., Qiu, C.X. and Chen, P., 2024. Damage-free self-centering steel columns incorporating SMA bolts and replaceable steel angles. *Engineering Structures*, 321, pp. 119000. DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.119000](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119000).
15. Wang, X. T., Xie, C.T., Lin, L.L. and Li, J., 2019. Seismic behavior of self-centering concrete-filled square steel tubular (CFST) column base. *Journal of Constructional Steel Research*, 156, pp. 75-85. DOI: [10.1016/j.jcsr.2019.01.025](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.025).
16. Xiao, G., Wang, H., Pan, P., Pan, H., He, R. and Tian, G., 2024. Development of self-centering and energy-dissipating dual-stage reinforced concrete rocking column-base system. *Engineering Structures*, 321, pp. 118943. DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.118943](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118943).
17. Borzouie, J., 2015. low damage steel base connection. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
18. Hou, H., Wang, C., Qu, B. and Liang, Y., 2021. Cyclic testing of bolted base connections for wide-flange columns. *Engineering Structures*, 235, pp. 112024. DOI: [10.1016/j.engstruct.2021.112024](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112024).
19. Bagheri, S. and Vafi Tabrizi, N., 2014. Evaluation of partial rigidity of simple steel frames with angle connections under gravity loads. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 30(1.2), pp. 137-146. [in Persian].
20. Tarighi, P., Kafi, M.A. and Vahdani, R., 2024. Experimental investigation of the performance of

- replaceable-rigid connection. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39(4), pp. 3-17. [in Persian].
21. Hou, H., Sun, B., Qu, B., Wang, C., Zhang, S. and Liang, Y., 2021. Testing of bolted base connections for wide-flange columns under combined axial compression and weak-axis lateral forces. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, pp. 106547. DOI: [10.1016/j.jcsr.2021.106547](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106547).
22. Meng, B., Du, Q., Zhong, W., Tan, Z. and You, K., 2024. Performance analysis of novel double web V-bending angle-steel connections against progressive collapse. *Structures*, 59, pp. 105705. DOI: [10.1016/j.istruc.2023.105705](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105705).
23. Sun, D., Yang, Y., Miao, J., Feng, S. and Xue, W., 2024. Moment-rotation model of self-centering (SC) column base with web-friction-device (WFD) and stiffener-steel (SS) angles. *Journal of Constructional Steel Research*, 219, pp. 108801. DOI: [10.1016/j.jcsr.2024.108801](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108801).
24. Sun, D., Yang, Y., Ma, Y., Xue, Y., Yu, Y. and Feng, S., 2022. Seismic behavior of self-centering column base with replaceable stiffener angle steels. *Thin-Walled Structures*, 181, pp. 110113. DOI: [10.1016/j.tws.2022.110113](https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110113).
25. Aabid, A., Ibrahim, Y., Hrairi, M. and Ali, J.S.M., 2023. Optimization of structural damage repair with single and double-sided composite patches through the finite element analysis and taguchi method. *Materials*, 16(4), pp. 1581. DOI: [10.3390/ma16041581](https://doi.org/10.3390/ma16041581).
26. Mohammad Bagheri, S., Naderi, M., Vajdi, M., Sadegh Moghanlou, F. and Tarlani Beris, A., 2023. Numerical optimization of sample and die geometric parameters to increase the attainable temperature during spark plasma sintering of TiC ceramics. *Synthesis and Sintering*, 3(4). DOI: [10.53063/synsint.2023.34179](https://doi.org/10.53063/synsint.2023.34179).
27. Sharifi, H., Adib, A., Ahmadi, Z., Gemikonakli, E. and Shahedi Asl, M., 2024. Taguchi optimization of mask stereolithographic 3D printing parameters for tensile strengthening of functionally graded resins. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(7), pp. 4899-4910. DOI: [10.1007/s12008-024-01839-6](https://doi.org/10.1007/s12008-024-01839-6).
28. Abaqus, F., 2014. ABAQUS 6.14 Documentation. *Dassault Syst Provid Google Scholar*, 12, pp. 129-130.
29. Wei, J. P., Tian, L.M., Guo, Y., Qiao, H.Y., Jiao, Z.A. and Bao, Y., 2022. Design and cyclic behavior of a bidirectional double-hinge steel column base. *Structures*, 43, pp. 1573-1591. DOI: [10.1016/j.istruc.2022.07.052](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.052).
30. He, X., Ke, K., Guo, L., Yam, M.C.H. and Wang, Z., 2021. A replaceable fuse steel-concrete composite connection: Force transfer mechanism and design considerations. *Journal of Constructional Steel Research*, 183, pp. 106760. DOI: [10.1016/j.jcsr.2021.106760](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106760).
31. AISC 341, 2016. Seismic provisions for structural steel buildings, ANSI/AISC. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL.
32. ASCE 41, 2017. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, Standard ASCE/SEI 41-17. American society of civil Engineers, pp. 623.
33. AISC 360, 2016. Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16). American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.



Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

<https://sjce.journals.sharif.edu>



Research Article

Development of a Hybrid Machine Learning-Based Framework for Monitoring and Predicting Odor Pollution in Urban Surface Water Canals: A Case Study of the Ghiyasvand Canal, Tehran

Ammar Safaie*, Mohammad Khanjani, Zahra Karimi Shavaki, Alireza Hadian, Amirhossein Haddadi, Hediye Rahmani¹

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology.

* corresponding author: (asafaie.sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 24 May 2025

Revised: 13 September 2025

Accepted: 22 October 2025

Keywords:

Unpleasant odor,
urban surface water canals,
water quality,
random forest algorithm.

Abstract

Unpleasant odors emitted from urban surface-runoff canals pose a significant environmental and public health challenge in large cities such as Tehran. These odors, primarily caused by anaerobic decomposition of organic matter and the inflow of untreated wastewater, degrade water quality, generate public dissatisfaction, and reduce the environmental health and livability of urban areas. Despite their widespread impact, the spatial distribution and intensity of odor emissions in such canals are rarely monitored systematically. To fill this gap, this study introduces a practical framework for monitoring, quantifying, and predicting odor intensity in urban surface water canals. The proposed framework was implemented and evaluated in a pilot project along the Ghiyasvand Canal in Tehran. Weekly field sampling was carried out at ten critical locations over a ten-week period, during which key water-quality parameters (including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), dissolved oxygen (DO), and water temperature) and meteorological variables (such as air temperature, wind speed, and relative humidity) were collected. In addition, odor intensity was measured with a portable odor meter. Pearson, Spearman, and Kendall correlation analyses, along with a random forest regression model, were employed to examine and predict the relationships between physicochemical and atmospheric variables and odor intensity. Correlation analyses indicated that water temperature, electrical conductivity, and air temperature were positively correlated with odor intensity, whereas DO showed a negative correlation, indicating its critical role in odor suppression. The developed model performed well in predicting odor intensity, achieving an accuracy of 83% for both training and testing data. This study demonstrates the potential of integrated field monitoring and machine learning approaches to support practical odor management in urban water systems, leading to improved environmental quality and public well-being. While the framework was applied to a specific case in Tehran, the results and approach are broadly applicable to similar urban settings facing odor-related challenges.

Funding: This research was supported by the Tehran Urban Planning and Research Center under Research Contract No. 137/305026.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

To Cite this article:

Safaie, A., Khanjani, M., Karimi Shavaki, Z., Hadian, A., Haddadi, A.H. and Rahmani, H. 2026. Development of a hybrid machine learning-based framework for monitoring and predicting odor pollution in urban surface water canals: a case study of the ghiyasvand canal, tehran, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 45-57.
<https://doi.org/10.24200/30.2025.66941.3433>



توسعه‌ی یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پایش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری: مطالعه‌ی موردی کانال غیاثوند تهران

عمار صفایی^{*}، محمد خانجانی، زهرا کریمی شوکی، علیرضا هادیان، امیرحسین حدادی و هدیه رحمانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^{*}نویسنده مسئول (asafaie.sharif.edu)

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، یک چارچوب عملیاتی برای پایش، کمی‌سازی، و پیش‌بینی شدت بوی نامطبوع در کانال‌های جمع‌آوری آب سطحی ارائه شده است، که در قالب یک پروژه‌ی پایلوت در کانال غیاثوند در تهران اجرا شده است. شاخص‌های کیفیت آب، متغیرهای هواشناسی، و شدت بوی نامطبوع در داده‌برداری میدانی هفتگی جمع‌آوری شده‌اند. روابط میان متغیرهای کیفی آب و هواشناسی با شدت بو، ابتدا با استفاده از تحلیل‌های همبستگی بررسی و سپس با الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی کمی شدت بو مدل‌سازی شده و نتایج نشان داده‌اند که دمای آب، هدایت الکتریکی، و دمای هوا دارای همبستگی مثبت و اکسیژن محلول دارای همبستگی منفی با شدت بو بوده و مدل توسعه داده‌شده، عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی شدت بو داشته است ($R^2 = 0.83$ برای داده‌های آموزش و آزمون). پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های میدانی و روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی شدت بو و توسعه‌ی سامانه‌های پایش هوشمند و مدیریت کیفیت آب در بسترهای شهری فراهم آورد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

واژگان کلیدی:

بوی نامطبوع،
کانال آب سطحی شهری،
کیفیت آب،
الگوریتم جنگل تصادفی.

۱. مقدمه

مختلفی داشته باشد. برای مثال، واحدهای تولید کمپوست در مراکز پرورش قارچ معمولاً به دلیل تجزیه‌ی مواد آلی، موجب انتشار غلظت‌های بالای آمونیاک و سولفید هیدروژن و در نتیجه، بوی ناخوشایند می‌شوند.^[۱] برخی کارخانه‌های فرآوری شیر پاستوریزه نیز به دلیل دفع غیراصولی پسماندهای آلی، منبع تولید بوهای نامطبوع محسوب می‌شوند.^[۲] فعالیت واحدهای تصفیه‌ی روغن نیز می‌تواند بوی ناخوشایندی مشابه با بوی قیر در نواحی اطراف آن ایجاد کند.^[۳] همچنین، مراکز دامداری، مرغداری‌ها، و گاوداری‌ها، که به واسطه‌ی تجزیه‌ی فضول‌های دامی، آمونیاک آزاد می‌کنند، نیز از جمله منابع مهم آلودگی بو به‌شمار می‌روند.^[۴] بوهای نامطبوع تولیدشده، به‌ویژه در شهرهایی مانند تهران، که شبکه‌ی گسترده‌ای از کانال‌های آب سطحی در مناطق پرتراکم شهری وجود دارد، می‌توانند مشکلات جدی اجتماعی و محیط‌زیستی را به همراه داشته باشند. بوی نامطبوع ناشی از فعالیت‌های بی‌هوازی و تجزیه‌ی مواد آلی در کانال‌های آب سطحی، علاوه بر تخریب زیست‌گاه‌های آبی، آثار منفی مستقیمی در کیفیت زندگی ساکنان مناطق مذکور دارد و می‌تواند منجر به نارضایتی شهروندان شود.

کیفیت نامطلوب آب در کانال‌های جمع‌آوری آب سطحی شهری، یکی از چالش‌های اساسی محیط‌زیستی و مدیریت شهری است، که مستقیماً در سلامت عمومی، رفاه شهروندان، و پایداری اکوسیستم‌های آبی تأثیرگذار است. کیفیت پایین آب در کانال‌های مذکور، علاوه بر آثار محیطی، استفاده‌ی ایمن از منابع آبی آن‌ها را محدود می‌کند و خطرهای بهداشتی را افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند زندگی ساکنان مناطق اطراف کانال‌های جمع‌آوری آب سطحی شهری را مختل کند. سازمان ملل متحد نیز با تعریف هدف توسعه‌ی پایدار ششم، که بر دسترسی همگانی به آب تمیز و بهداشت تأکید دارد، به چالش جهانی مذکور اذعان کرده است.^[۱] با گسترش شهرنشینی و افزایش ورود آلاینده‌ها به کانال‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری، مشکلاتی نظیر: کاهش کیفیت آب، تولید گازهای بد بو، و انتشار آلودگی به محیط اطراف تشدید شده است. آلاینده‌های کاهش کیفیت آب، باعث تولید گازهای بد بو، نظیر: سولفید هیدروژن، آمونیاک، و ترکیب‌های آلی فرار می‌شوند. انتشار بوی نامطبوع محدود به آب آلوده در رودخانه‌ها و کانال‌ها نیست و می‌تواند منابع

استناد به این مقاله:

صفایی، عمار، خانجانی، محمد، کریمی شوکی، زهرا، هادیان، علیرضا، حدادی، امیرحسین و رحمانی، هدیه، ۱۴۰۵. توسعه‌ی یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پایش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری: مطالعه‌ی موردی کانال غیاثوند تهران. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص ۴۵-۵۷.

<https://doi.org/10.24200/j30.2025.66941.3433>



آمونیاک، و ترکیب‌های آلی فرار قرار می‌گیرد. در برخی مطالعات پیشین، روش‌هایی مانند روش بویایی پویا و روش کیسه‌ی بوی مثلثی برای اندازه‌گیری بوی نامطبوع استفاده شده‌اند، اما روش‌های اخیر با محدودیت‌هایی، از جمله: حس‌بودن و دشواری در تشخیص بوهایی با آستانه‌ی پایین مواجه بوده‌اند.^[۲۱] با این حال، کمی‌سازی و شناسایی بو از طریق روش‌های پیشرفته‌ی تحلیلی به‌ویژه با ادغام روش‌های حسی و ابزاری، فرصت‌های جدیدی برای ارزیابی‌های دقیق‌تر و قابل‌تکرار فراهم کرده است. برای پُر کردن خلأ میان ادراک بویایی انسان و داده‌های عینی، روش‌هایی مانند کروماتوگرافی گازی- طیف‌سنجی جرمی- اولفکتومتری، که پیشتر در تحلیل آب آشامیدنی و بررسی طعم غذا به‌کار رفته‌اند، به‌عنوان ابزارهایی امیدوارکننده برای شناسایی دقیق‌تر ترکیب‌های بوزا و ایجاد همبستگی‌های قوی‌تر بین شدت بو و غلظت شیمیایی پیشنهاد شده‌اند.^[۲۲] با این حال، روش‌های ذکرشده اغلب با چالش‌هایی، نظیر: هزینه، پیچیدگی عملیاتی، و نیاز به تخصص‌های خاص روبرو هستند، که بر ضرورت توسعه‌ی جایگزین‌های مقرون به‌صرفه‌تر تأکید می‌کنند.

در برخی از مطالعات اخیر از روش‌هایی نظیر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای پیش‌بینی و مدیریت بو استفاده شده است.^[۲۳ و ۲۴] با ایجاد همبستگی میان متغیرهای کیفیت آب، مانند: اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، و نیاز اکسیژن بیوشیمیایی با شدت بو، پژوهشگران پتانسیل مدل‌های پیش‌بینی را برای بهبود مدیریت بو نشان داده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از جمله جنگل تصادفی^۳ و شبکه‌های عصبی، در شناسایی نقاط بحرانی انتشار بو و پیش‌بینی تغییرات زمانی آن دقت بالایی از خود نشان داده‌اند.^[۲۴-۲۶] رویکردهای اخیر، به دلیل اجرایی‌بودن، مزایای قابل‌توجهی دارند و بینش‌های عملیاتی ارزشمندی در اختیار برنامه‌ریزان شهری و تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهند. علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوریانه، امکان پایش انتشار بو را از طریق ابزارهایی، مانند بینی‌های الکترونیکی^۴ فراهم کرده‌اند؛^[۲۷] که به حسگرهای شیمیایی حساس به ترکیب‌های فرار مجهز هستند، و بر اساس شاخص‌های ساده و قابل‌اندازه‌گیری، مانند pH^۵، نیاز شیمیایی اکسیژن، غلظت نیتروژن کل، و فسفر کل عمل می‌کنند و امکان شناسایی مناطق بحرانی و پیش‌بینی شدت بو را فراهم می‌آورند. مطالعات انجام‌شده در کشور چین، کارایی فناوری اخیر را در ارزیابی انتشار بو در رودخانه‌های آلوده نشان داده و همبستگی‌های بالایی ($R^2 > 0.9$) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی گزارش کرده‌اند.^[۲۷] یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که ترکیب روش‌های داده‌محور با ابزارهای سنجش پیشرفته می‌تواند چارچوبی مؤثر برای پایش مستمر و مدیریت هدفمند انتشار بو در محیط‌های آبی فراهم کند.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در به‌کارگیری روش‌های داده‌محور و یا ابزارهای پیشرفته برای سنجش شدت بو، هنوز یک چارچوب عملیاتی و قابل‌اجرا برای ارزیابی و پایش انتشار بوی نامطبوع در پهنه‌های آبی در محیط‌های شهری ارائه نشده است.^[۲۱] همچنین ابزارهای فعلی قادر به تشخیص بو به صورت در محل، بخصوص با آستانه‌ی تشخیص بوی بسیار پایین نیستند. فقدان چنین چارچوبی موجب شده است که درک درستی از پهنه‌بندی و توزیع مکانی شدت بوی نامطبوع و ارتباط آن با شاخص‌های کیفی آب به‌دست نیاید و در نتیجه، امکان اقدام‌های مدیریتی به موقع و مؤثر فراهم نباشد.

رودخانه‌های: زرجوب و گوهررود در شهر رشت،^[۶] بشار در یاسوج،^[۷] چنار راهدار در شیراز،^[۸] و کشف‌رود در مشهد،^[۹] از جمله منابع آبی سطحی هستند که به‌دلیل ورود مستقیم رواناب‌های سطحی، پساب‌های شهری، و فاضلاب‌های صنعتی، با افزایش بار آلودگی و در نتیجه، تغییر رنگ، کاهش کیفیت، و انتشار بوی نامطبوع مواجه شده‌اند، که نشان‌گری اختلال در اکوسیستم آبی است. چالش‌های ناشی از کیفیت پایین آب و انتشار بوهای نامطبوع از آب‌های سطحی، محدود به ایران نیست و در سطح جهانی نیز مشاهده می‌شود. برای مثال، کانال هوم وود در ایالات متحده، رودخانه‌ی تیمز در انگلستان، و دریاچه‌ی بیوا در ژاپن نمونه‌هایی هستند که به‌دلیل ورود مستمر آلاینده‌ها با مشکلات جدی مواجه شده‌اند.^[۱۰] همچنین، آب‌های به شدت آلوده در مناطق مختلف، سیاه و بد بو می‌شوند. رودخانه‌های: چونگ‌گی^۱ در کره‌ی جنوبی،^[۱۱] امشر^۲ در آلمان،^[۱۲] سن در فرانسه،^[۱۳] و دانوب در اتریش،^[۱۴] کانال گوانوس در ایالات متحده‌ی آمریکا،^[۱۵] و رودخانه‌های آلوده‌ی شیانگ در چین،^[۱۶] نمونه‌هایی از بحران ذکرشده هستند، که با چالش‌های جدی مواجه بوده و هستند. اگرچه اغلب کمتر به آلودگی بوی نامطبوع آب در آیین‌نامه‌های محیط‌زیستی توجه شده است، اما مسئله‌ی ذکرشده علاوه بر اینکه می‌تواند منجر به نارضایتی و شکایت‌های شهروندان شود، هشدار مهم در خصوص کیفیت نامطلوب و آلودگی آب است. سنجش کیفیت آب در مناطقی که مشکل بوی نامطبوع دارند، کمک می‌کند عوامل ایجاد بو شناسایی و اقدام‌های مقتضی جهت رفع آن و بهبود کیفیت آب صورت گیرد. برای مثال، در رودخانه‌های به‌شدت آلوده در برزیل، پژوهشگران دریافته‌اند که غلظت‌های سولفید هیدروژن (ناشی از تجزیه‌ی گوگرد در مواد آلی) و آمونیاک (ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، و تجزیه‌ی مواد نیتروژنی) از آستانه‌های مجاز فراتر رفته و عامل اصلی ایجاد بوی نامطبوع و شکایت‌های گسترده‌ی عمومی بوده‌اند.^[۱۷] بوی نامطبوع رودخانه‌ها اغلب در شرایطی که کیفیت آب کاهش یابد، میزان اکسیژن محلول کم و دمای آب و هوا بالا باشد، تشدید می‌شوند. شرایط مذکور، ضرورت پایش منظم شدت بو و متغیرهای کیفی آب را نشان می‌دهد و بر لزوم مدیریت منابع آلاینده برای جلوگیری از بی‌هوازی شدن آب و تشدید بوی نامطبوع به‌ویژه در فصل‌های گرم تأکید دارد.

بررسی تجربه‌های موفق و ناموفق احیای رودخانه‌ها و کانال‌های آب ذکرشده حاکی از آن است که طراحی و اجرای یک برنامه‌ی پایش مستمر برای ارزیابی دوره‌ای کیفیت آب و انتشار بوی نامطبوع در رودخانه‌ها و کانال‌های شهری، گامی ضروری است. این موضوع علاوه بر شناسایی به موقع ورود آلاینده‌های سمی، به ارزیابی اقدام‌های نظارتی و ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها و قوانین حفاظت از محیط‌زیست کمک زیادی می‌کند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهشگران از زوایای متنوعی سعی کرده‌اند به مسئله‌ی اخیر بپردازند و برخی از روش‌ها را برای درک فرآیندهای ایجاد بو، توسعه‌ی روش‌های اندازه‌گیری دقیق بوی نامطبوع، و ارائه‌ی راهکارهای مدیریت مؤثر به‌کار برده‌اند.^[۱۸-۲۰]

از چالش‌های اساسی در اندازه‌گیری بو، ماهیت چندعاملی ایجاد بو در سیستم‌های آبی، تغییرپذیری، و پیچیدگی بو است، که تحت تأثیر شرایط محیطی، ترکیب‌های بیوشیمیایی آب، و حضور آلاینده‌هایی مانند: سولفیدها،

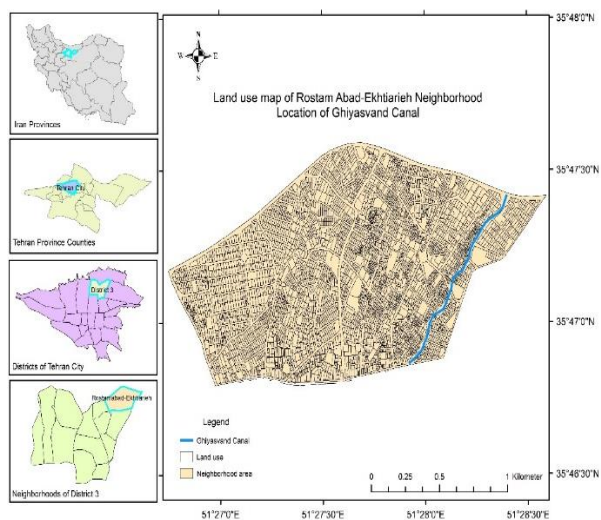
⁴ E-nose

⁵ Potential of Hydrogen

¹ Cheonggye

² Emscher

³ Random Forest



شکل ۱. موقعیت مکانی کانال جمع‌آوری آب‌های سطحی غیاثوند در شهر تهران.

موازات خیابان‌های غیاثوند، خاش، و هیرمند ادامه می‌یابد. ارتفاع متوسط منطقه ۳ حدوداً ۱۴۰۰ متر، جهت شیب شمال به جنوب و به طور متوسط حدود ۷/۵٪ است.^[۲۹] با توجه به موقعیت شهری و الزامات شهرسازی، ساختار کانال به صورت متناوب شامل بخش‌های روباز، مدفون، و سرپوشیده طراحی شده است. طول کل کانال غیاثوند مساوی ۲۷۸۲ متر است، که شامل ۱۵۰۲ متر بخش روباز، ۱۸۵ متر بخش مدفون، و ۱۰۹۵ متر بخش سرپوشیده است.^[۲۹] مشاهدات میدانی حاکی از آن است که در سال‌های اخیر، مجدداً بخش قابل توجهی از کانال غیاثوند به دلیل قرارگیری در بافت متراکم شهری، به صورت سرپوشیده درآمد است. با این حال، کانال غیاثوند در حد فاصل زیر پل بزرگراه شهید صدر تا خیابان شهید کلاهدوز همچنان به صورت روباز است، که در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است. مقطع کانال در محدوده‌ی اخیر به شکل مستطیلی با عرض ۳ متر و ارتفاع دیواره بین ۲ تا ۳/۵ متر است. جنس دیواره‌ی کانال در طول مسیر، سنگی با ملات ماسه سیمان و جنس کف آن سیمانی با ضریب زبری مانینگ ۰/۱۵ است. ظرفیت مقطع کانال نیز از ۰/۳۷ تا ۰/۹۹ مترمکعب بر ثانیه در طول کانال تغییر می‌کند.^[۲۹] مطابق با نمونه‌برداری‌های انجام‌شده در محدوده‌ی زمانی مطالعه‌شده، دمای آب به طور میانگین از ۲۲/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد در اواخر شهریور به تدریج به ۱۵/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد در اواخر پاییز کاهش یافته است. همچنین، میانگین تراز آب در کانال در بازه‌ی زمانی ذکرشده حدود ۲۰ سانتی‌متر، متوسط سرعت آب حدود ۰/۶ متر بر ثانیه، و متوسط دبی آب حدود ۰/۳۶ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده شده است. در مورد حجم و موقعیت دقیق ورودی‌های فاضلاب به کانال گزارش دقیقی وجود ندارد، اما بررسی‌های میدانی در مورد کاربری‌های اطراف کانال و مصاحبه با مسئولان و شهروندان حاکی از آن است که منازل مسکونی، مدارس، رستوران‌های موجود در حاشیه‌ی آن و همچنین پارکینگ حمل زباله‌ی شهرداری در مجاورت میدان خاش با تولید فاضلاب‌های حاوی مواد آلی، شوینده‌ها و چربی‌ها در صورت دفع نامناسب، موجب افزایش بار آلی و آلودگی میکروبی کانال می‌شوند. رواناب‌های سطحی ناشی از بارش در خیابان‌های منتهی به کانال، تعمیرگاه‌ها، ایستگاه‌های تاکسی، و پارکینگ‌ها حامل آلاینده‌هایی، نظیر: روغن، سوخت، ذرات معلق، و ضایعات آلی هستند، که مستقیماً وارد جریان آب می‌شوند. فضاهای سبز موجود در حاشیه‌ی کانال (از جمله بوستان مازیار) با ورود کودها و سموم شیمیایی موجب افزایش بار

بنابراین، هدف اصلی پروژه‌ی پژوهشی حاضر، توسعه‌ی یک چارچوب عملیاتی برای پایش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های جمع‌آوری آب سطحی شهری است. در این راستا، کانال غیاثوند در تهران به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده است؛ که ضمن ایفای نقش مهم در هدایت رواناب‌های شهری، به دلیل ورود فاضلاب‌های تصفیه‌نشده و تجمع آلاینده‌ها، به یکی از کانون‌های اصلی انتشار بوی نامطبوع در محله‌ی اختیاریه (منطقه‌ی ۳ شهرداری تهران) تبدیل شده است. به منظور بررسی پدیده‌ی ذکرشده، داده‌های میدانی از بخش‌هایی که بر اساس گزارش‌های مردمی و مشاهدات میدانی بیشترین شدت بوی نامطبوع یا تجمع آلاینده‌ها در آن‌ها رخ می‌دهد، گردآوری شده است. در نقاط مذکور، شاخص بوی نامطبوع همراه با متغیرهای کیفی آب و هواشناسی اندازه‌گیری شده و در ادامه، با بهره‌گیری از روش‌های آماری و یک مدل یادگیری ماشین، چارچوبی داده‌محور برای پیش‌بینی شدت بوی توسعه یافته است. سؤال‌های پژوهشی مهم در این پروژه عبارت‌اند از:

- (۱) آیا می‌توان شاخص بوی نامطبوع را به صورت کمی بیان کرد؟
 - (۲) پهنه‌بندی بوی نامطبوع و جانمایی نقاط بحرانی در طول کانال جمع‌آوری آب سطحی در منطقه‌ی مطالعاتی به چه صورتی هست؟
 - (۳) چه عواملی بیشترین تأثیر را در شدت بوی دارند؟
 - (۴) آیا الگو و رابطه‌ای بین متغیرهای کیفی آب و شدت انتشار بوی نامطبوع وجود دارد؟
 - (۵) آیا می‌توان با اندازه‌گیری داده‌های کیفی در دسترس و قابل اندازه‌گیری در محل، شدت بوی را در زمان و مکان با دقت مناسب پیش‌بینی کرد؟
- نتایج پژوهش حاضر می‌تواند مبنای توسعه‌ی سامانه‌های پایش و مدیریت بوی در سایر کانال‌های شهری باشد و به بهبود کیفیت زندگی در مناطق شهری کمک کند. در نهایت، چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر می‌تواند الگویی قابل تعمیم برای طراحی راهکارهای بومی در مدیریت بوی نامطبوع در مناطق مختلف شهری باشد و زمینه‌ساز سیاست‌گذاری‌های مؤثرتر در ارتقاء بهداشت محیط و رفاه عمومی شود.

۲. روش شناسی

۲.۱. معرفی محدوده‌ی مطالعاتی

کانال مطالعه‌شده در پژوهش حاضر، در ناحیه‌ی ۳ منطقه‌ی ۳ شهرداری تهران و در محله‌ی رستم آباد- اختیاریه واقع شده است، که موقعیت مکانی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. منطقه‌ی ۳ شهرداری تهران، یکی از مناطق شهری تهران است، که در پهنه‌ی شمال شرقی شهر تهران واقع شده است. منطقه‌ی ۳ با داشتن ۳۰/۲۰۸ کیلومترمربع مساحت، از لحاظ وسعت در مناطق ۲۲ گانه‌ی تهران در رتبه‌ی دهم شهر تهران قرار دارد و ۴/۳٪ از کل وسعت شهر تهران را شامل می‌شود.^[۲۸] کانال غیاثوند در منطقه‌ی ۱ از تقاطع خیابان باهنر و شهید آقایی آغاز شده و در ادامه‌ی کانال جمشیدیه قرار گرفته است. کانال مذکور کاملاً در محدوده‌ی شهری قرار دارد و آب‌های سطحی درون‌شهری را جمع‌آوری می‌کند و به پایین‌دست انتقال می‌دهد. مساحت حوضه‌ی تحت پوشش کانال غیاثوند با احتساب حوضه‌های برون‌شهری ۲۹/۵۵ کیلومترمربع است. کانال غیاثوند در راستای شمالی- جنوبی پس از تقاطع با بزرگراه شهید صدر، وارد منطقه‌ی ۳ می‌شود و مسیر آن در راستای شمالی- جنوبی و به

هم‌زمان مدل‌سازی و کمی‌سازی کند. در برخی از مطالعات پیشین، الگوریتم جنگل تصادفی با موفقیت برای مدل‌سازی و مدیریت بوی نامطبوع نیز استفاده شده است. برای مثال، یانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۴] در مراکز تأسیسات بازگردانی منابع آب، از الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی غلظت ترکیب‌هایی مانند H_2S و تعیین دوز بهینه‌ی مواد کنترل‌کننده‌ی بو استفاده کرده‌اند. همچنین مولرو^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰)، از مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی شکایت‌های ناشی از بوی نامطبوع بر اساس داده‌های حس‌گرهای H_2S و اطلاعات هواشناسی استفاده کرده و دقت قابل‌قبولی در هشدار زودهنگام بوی نامطبوع ارائه داده‌اند.^[۲۵] شواهد اخیر نشان می‌دهند که جنگل تصادفی می‌تواند ابزار مؤثری در تحلیل و پیش‌بینی بوی نامطبوع در سامانه‌های آبی باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، برای ساخت مدل پیش‌بینی بوی نامطبوع، مراحل مختلفی موردنیاز است، که به‌طور خلاصه نمودار جریان روند انجام آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مرحله‌ی اول، داده‌برداری میدانی است که در بخش ۲.۲ توضیح داده شده است. در مرحله‌ی بعد، لازم است داده‌های جمع‌آوری‌شده، پیش‌پردازش شوند تا از نبود داده‌های پرت اطمینان حاصل شود و از ورود آن‌ها در مجموعه‌ی داده، قبل از آموزش مدل ممانعت به عمل آید. سپس در مرحله‌ی تحلیل داده‌های اکتشافی، به‌منظور تحلیل روابط میان شدت بوی نامطبوع (متغیر هدف) و متغیرهای کیفی و اقلیمی (ویژگی‌ها)، از روش‌های تحلیل اکتشافی داده‌ها و به ویژه از ماتریس‌های همبستگی استفاده شده است. هدف از تحلیل اخیر، شناسایی الگوها، درک نوع و شدت وابستگی میان متغیرها، و کاهش ابعاد مسئله از طریق حذف ویژگی‌های کم‌اهمیت برای توسعه‌ی مدلی دقیق‌تر بوده است.

برای سنجش نوع همبستگی میان متغیرها، سه روش آماری استفاده شده است: ضریب همبستگی پیرسون^{۱۴} برای بررسی روابط خطی، ضریب همبستگی اسپیرمن^{۱۵} برای ارزیابی روابط غیرخطی با داده‌های رتبه‌ای، و همچنین ضریب کندال^{۱۶} که به‌ویژه برای داده‌هایی با حجم نمونه‌ی کم، عملکرد بهتری دارد. استفاده از سه شاخص مذکور در قالب ماتریس‌های همبستگی، امکان ارزیابی دقیق و چندبعدی روابط بین متغیرهای مؤثر را فراهم ساخته و مبنای انتخاب ترکیب بهینه‌ی ویژگی‌ها در فرآیند مدل‌سازی قرار گرفته است.

برای ساخت مدل پیش‌بینی شدت بوی نامطبوع، پس از انجام مراحل پیش‌پردازش و تحلیل ویژگی‌ها، مجموعه‌ی داده‌های نهایی به دو بخش آموزش (۸۰٪) و آزمون (۲۰٪) تقسیم شده است. مجموعه‌ی داده‌ی آموزش نیز به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل، به دو زیرمجموعه، شامل: داده‌های آموزش (۸۵٪) و داده‌های اعتبارسنجی (۱۵٪) تفکیک شده است. مدل رگرسیون جنگل تصادفی بر روی داده‌های آموزش، آموزش داده شد.^[۳۶] سپس، عملکرد آن به‌صورت هم‌زمان با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی ارزیابی شده است. درنهایت، برای ارزیابی دقت مدل نهایی، از داده‌های آزمون که در فرآیند آموزش استفاده نشده بودند، بهره گرفته شده است. همچنین، به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل و دستیابی به بهترین ترکیب پارامترها، ابتدا از روش جستجوی

آلودگی و کاهش کیفیت آب کانال می‌شوند. دفع نامناسب زباله‌های جامد در کاربری‌های تجاری، مانند سوپرمارکت‌ها و مشاوران املاک نیز، از دیگر منابع آلاینده در کانال مطالعه‌شده به‌شمار می‌روند.

۲.۲. داده‌برداری میدانی

در پروژه‌ی پژوهشی حاضر، ۱۰ نقطه‌ی بحرانی با توجه به شدت بوی مشاهده‌شده در کانال انتخاب و به صورت هفتگی از نقاط بحرانی در طول ۱۰ هفته در بازه‌ی زمانی شهریور تا آذر ۱۴۰۳ نمونه‌برداری شده‌اند. برای اندازه‌گیری شدت بوی نامطبوع در مطالعه‌ی حاضر از دستگاه سنجنده‌ی بو با مدل OMX-SRM استفاده شده است؛ که با مقایسه‌ی غلظت بو در هوا با هوای تصفیه‌شده، شدت نسبی بو را به صورت عددی تعیین می‌کند. سپس نمونه‌ای به حجم ۲ لیتر از آب کانال برداشت شده است، تا متغیرهای کیفی آب در محل سنجیده شوند. برای سنجش متغیرهای غلظت کل جامدات محلول در آب (TDS)، هدایت الکتریکی، دمای آب، pH، و شوری آب از دستگاه مولتی پارامتر مدل Apera PC400S استفاده شده است. برای اندازه‌گیری اکسیژن محلول در آب نیز از دستگاه اکسیژن‌سنج Hanna HI98193 استفاده شده است. همچنین داده‌های ثبت‌شده‌ی هواشناسی، نظیر: رطوبت هوا، سرعت باد، و دمای هوا در ایستگاه سینوپتیک تهران- شمیران به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه جمع‌آوری شده‌اند.

۲.۳. مدل‌سازی و پیش‌بینی بوی نامطبوع

همان‌طور که اشاره شد، یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر، یافتن الگو و رابطه‌ی بین متغیرهای کیفی آب و شدت انتشار بوی نامطبوع است. از آنجایی که رابطه‌ی تجربی مشخصی بین متغیرهای معمول کیفی آب (اعم از دمای آب، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، متغیرهای آب و هوایی، و ...) و شدت بوی نامطبوع وجود نداشته است؛ بنابراین، استفاده از مدل‌سازی‌های آماری به‌طورخاص یادگیری ماشین، که مبتنی بر داده‌هاست، انتخاب مناسبی برای هدف مذکور است. یکی از پرکاربردترین روش‌ها در یادگیری ماشین، الگوریتم جنگل تصادفی است، که در پژوهش حاضر استفاده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی، که توسط لئو بریمان^{۱۶} (۲۰۰۱) معرفی شده است،^[۳۰] یکی از روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر یادگیری گروهی^۷ است، که از ترکیب چند درخت تصمیم‌گیری^۸ برای بهبود دقت پیش‌بینی و جلوگیری از بیش‌برازش^۹ استفاده می‌کند و برای مسائل طبقه‌بندی^{۱۰} و رگرسیون^{۱۱} به‌کار می‌رود. مطالعات پیشین در مسائل مهندسی آب و محیط‌زیست نشان داده‌اند که الگوریتم جنگل تصادفی در پیش‌بینی کیفیت آب در مقایسه با سایر روش‌های یادگیری ماشین عملکرد بسیار قابل‌قبولی دارد. برخی مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مدل مذکور نه فقط توانسته است متغیرهای مختلفی، مانند: نیتروژن کل، فسفر، کدورت، و شوری را با دقت بالا پیش‌بینی کند، بلکه حتی با داده‌های محدود نیز نتایج قابل‌اتکایی ارائه داده و به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آبی به‌کار رفته است.^[۳۵-۳۱] مدل جنگل تصادفی، یک مدل از زیرشاخه‌های روش‌های مبتنی بر درخت است، که می‌تواند بدون نیاز به تنظیم‌های پیچیده‌ی پارامترها، روابط غیرخطی میان چند متغیر مستقل و متغیر هدف را به‌طور

¹² Yang

¹³ Mulrow

¹⁴ Pearson

¹⁵ Spearman

¹⁶ Kendall's tau

⁶ Leo Breiman

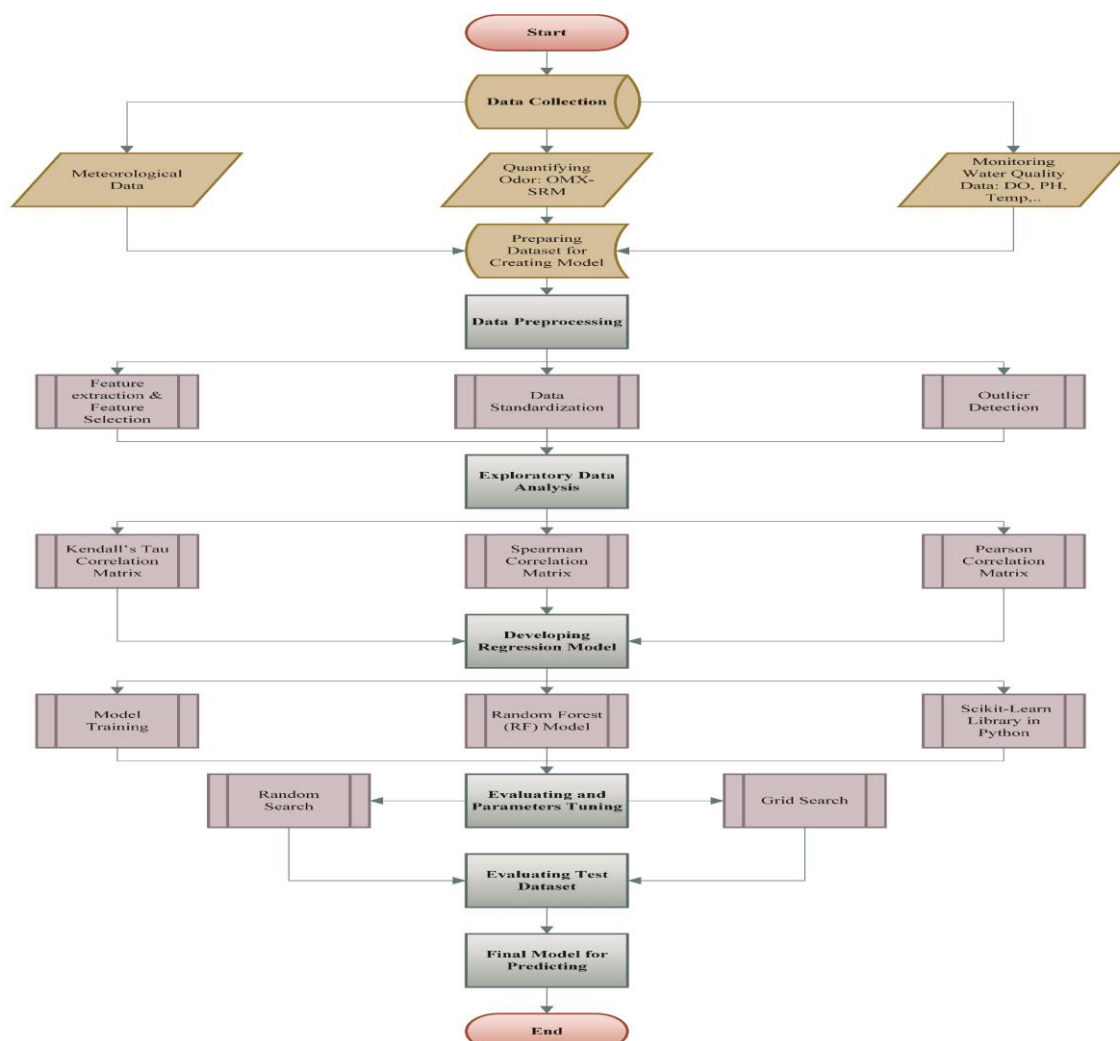
⁷ Ensemble Learning

⁸ Decision Trees

⁹ Overfitting

¹⁰ Classification

¹¹ Regression



شکل ۲. نمودار جریان مراحل اجرایی مدل سازی پیش بینی بوی نامطبوع.

جدول ۱. خلاصه متغیرهای کیفی آب و متغیرهای هواشناسی در دوره پایش در کانال غیاثوند.

Variables	Unit	Notation	Min	Avg	Max
Electrical Conductivity	$\mu\text{S/cm}$	EC	774	854	950
Total Dissolved Solids	mg/L	TDS	550	606	674
Salinity	PPT	S	0.39	0.43	0.47
Water Temperature	$^{\circ}\text{C}$	T_w	15.6	19.1	23.2
Dissolved Oxygen	mg/L	DO	1.56	5.37	8.80
pH	-	pH	7.67	8.36	8.83
Relative Humidity	%	RH	9.9	28.75	62.0
Air Temperature	$^{\circ}\text{C}$	T_{air}	10.0	20.3	34.0
Wind Velocity	m/s	Wind	0	1.61	4.0
Odor Intensity	-	Oder	0	2.1	6.1

میانگین روزانه پارامترهای کیفی آب در کانال غیاثوند نیز در شکل ۳ مشاهده می شود.

در طول داده برداری، تغییرات هدایت الکتریکی و غلظت کل جامدات محلول به ترتیب بین ۷۷۴ تا ۸۵۴ $\mu\text{S/cm}$ و ۶۰۶ تا ۵۵۰ mg/L بوده است. نتایج ماتریس های همبستگی که در شکل ۴ ارائه شده اند، نشان می دهند که بین هدایت الکتریکی و شدت بو، همبستگی مثبت و متوسط وجود دارد (ضریب پیرسون و اسپیرمن حدود ۰/۳۶ و ضریب کندال حدود ۰/۲۴). نتایج همبستگی بین غلظت کل مواد جامد محلول و شوری نیز مشابه با هدایت الکتریکی بوده

تصادفی^{۱۷}،^[۳۶] برای شناسایی بازه های مناسب پارامترهای مدل استفاده شده است. در مرحله ی بعد، از روش جستجوی شبکه ای^{۱۸}،^[۳۶] برای یافتن دقیق ترین ترکیب از پارامترها استفاده شده است، تا مدل نهایی با بیشترین دقت و کارایی بهینه سازی شود.

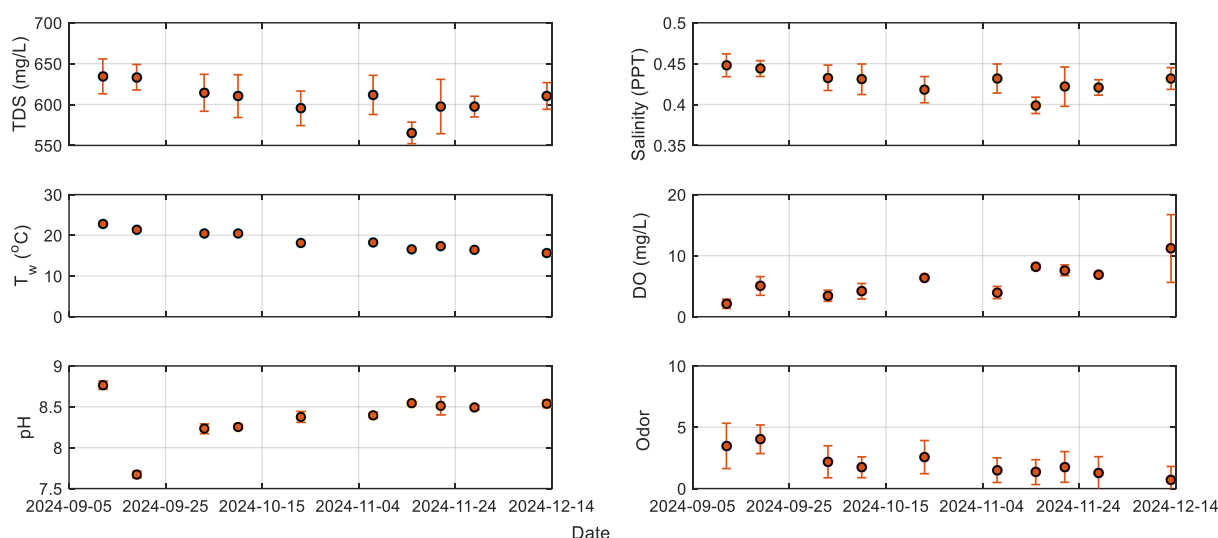
۳. نتایج و بحث

خلاصه ای از متغیرهای کیفی آب و متغیرهای هواشناسی، که در دوره ی پایش در کانال غیاثوند اندازه گیری شده اند، در جدول ۱ ارائه شده است. سری زمانی

¹⁸ Grid Search

¹⁷ Random Search

توسعه‌ی یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پایش و پیش‌بینی بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری: مطالعه‌ی موردی...- عمارصفایی و همکاران



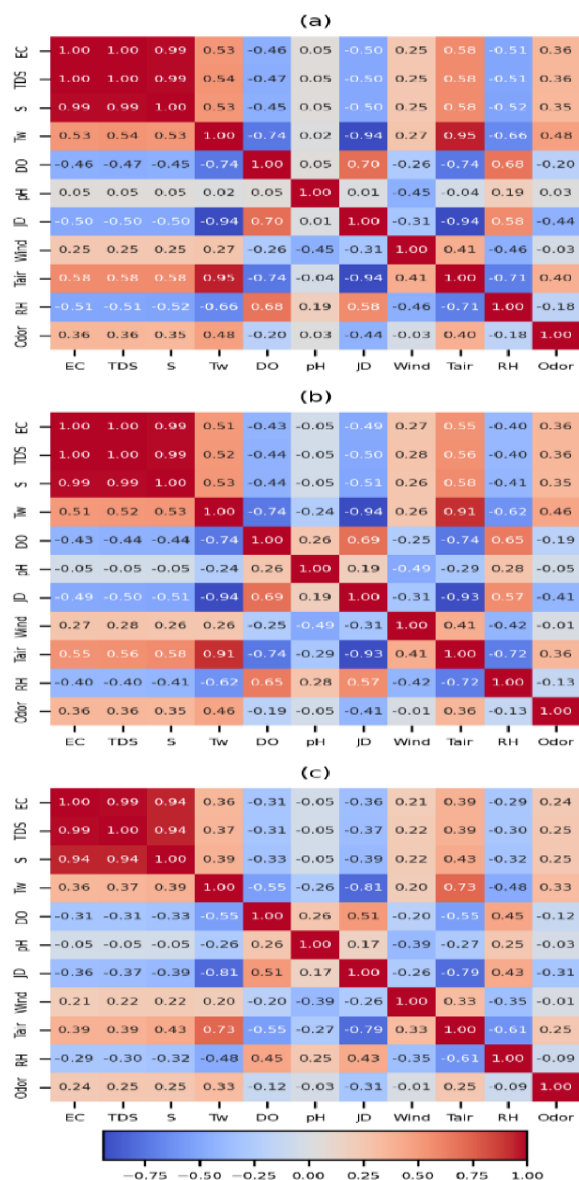
شکل ۳. سری زمانی میانگین روزانه‌ی پارامترهای کیفی آب در کانال غیاثوند.

است. به عبارت دیگر، با افزایش مقدار هدایت الکتریکی و غلظت کل مواد جامد محلول و شوری، تمایل به افزایش شدت بو وجود دارد. یافته‌های اخیر با مطالعات قبلی همخوانی دارد، جایی که همبستگی مثبت بین پارامترهای کیفی آب، مانند هدایت الکتریکی و انتشار ترکیب‌های بویایی مانند NH_3 و H_2S در رودخانه‌های شهری آلوده گزارش شده است.^[۱۷]

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، متغیرهای هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، و شوری نه فقط با متغیر پیش‌بینی همبستگی مشابهی دارند، بلکه بین یکدیگر نیز همبستگی بسیار بالایی دارند؛ زیرا دستگاه سنجنده، فقط یکی از متغیرهای مذکور را مستقیماً اندازه‌گیری کرده و بقیه از طریق روابط معین محاسبه شده‌اند. بنابراین، برای کاهش ابعاد مسئله و افزایش دقت مدل، فقط متغیر هدایت الکتریکی برای مدل‌سازی انتخاب شده است.

شوری و pH در بازه‌ی زمانی ذکرشده، تغییرات کمی داشته و به ترتیب بین ۰/۳۹ تا ۰/۴۳ PPT و ۷/۶۷ تا ۸/۳۶ ثبت شده است. نتایج همبستگی بین pH و شدت بو نشان می‌دهد که همبستگی معنی‌داری وجود ندارد (ضرایب حدود ۰/۰۳- تا ۰/۰۴-). در طول داده‌برداری، سرعت باد در صبح بین ۴ تا ۱۰ متر بر ثانیه متغیر بوده است؛ اما در بعد از ظهر، نوسان‌های کمی بین ۱ تا ۲ متر بر ثانیه داشته است. تحلیل ضرایب همبستگی بین سرعت باد و شدت بو نشان می‌دهد که سرعت باد تأثیر یا ارتباط قابل توجهی با تغییرات شدت بو نداشته است.

دمای هوا در اولین روز داده‌برداری حدود ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و به تدریج روندی کاهشی داشته و در آخرین روز داده‌برداری دمای هوا بین ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های پیرسون، اسپیرمن، و کندال نشان می‌دهد که بین دمای هوا و شدت بو، یک رابطه‌ی همبستگی مثبت متوسط وجود دارد (ضریب پیرسون ۰/۳۹، ضریب اسپیرمن ۰/۳۶، و ضریب کندال ۰/۲۵) و با افزایش دمای هوا معمولاً شدت بو نیز افزایش یافته است. روند تغییرات دمای آب نیز مشابه با دمای هوا بوده و از مقدار ۲۳/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد در اولین روز داده‌برداری به مقداری بین ۱۶ تا ۱۷ درجه‌ی سانتی‌گراد در آخرین روز کاهش یافته است. نتایج آزمون‌های پیرسون، اسپیرمن، و کندال حاکی از آن است که همبستگی بین دمای آب و شدت بو کمی قوی‌تر از دمای هوا با شدت بو است (ضریب پیرسون ۰/۴۷، ضریب



شکل ۴. ماتریس‌های همبستگی: پیرسون (a)، اسپیرمن (b)، و کندال (c) بین متغیرهای کیفی آب، هواشناسی، و شدت بوی نامطبوع در کانال غیاثوند.

جدول ۲. بهترین ترکیب‌های مدل‌سازی با استفاده از شاخص‌های R^2 و RMSE.

Model	Feature Combinations	RMSE Metric		R^2 Metric	
		Test	Train	Test	Train
1	$EC, T_w, DO, JD, T_{air}, RH$	0.841	0.651	0.631	0.798
2	$pH, DO, JD, Wind, T_{air}, RH$	0.747	0.677	0.710	0.782
3	$JD, T_{air}, pH \times JD, pH \times T_{air}, DO \times JD$	0.671	0.505	0.765	0.878
4	pH, DO, T_{air}, RH	0.635	0.472	0.790	0.894
5	DO, JD, T_{air}, RH	0.759	0.601	0.700	0.828
6	$JD, T_{air}, DO \times JD, JD \times T_{air}, JD \times RH$	0.698	0.617	0.746	0.819
7	$DO, JD, Wind, T_{air}, RH$	0.709	0.685	0.738	0.776
8	$JD, T_{air}, DO \times JD, JD \times Wind, JD \times RH$	0.581	0.589	0.824	0.835
9	$T_w, pH, DO, JD, Wind, T_{air}, RH$	0.845	0.785	0.628	0.707
10	pH, DO, JD, T_{air}, RH	0.691	0.568	0.751	0.846

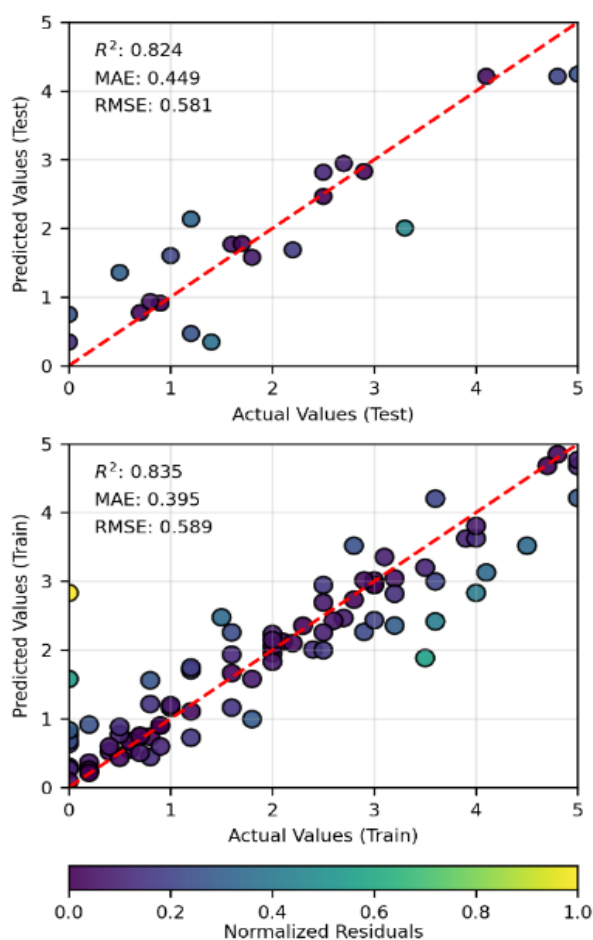
می‌رفت با گذر زمان با توجه به کاهش دمای هوا و دمای آب به دلیل تغییر فصل، شدت بو کاهش یافته است.

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور ارزیابی تأثیر ترکیب‌های مختلف متغیرهای کیفی و هواشناسی در دقت مدل‌سازی شدت بو، با استفاده از الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی، مدل‌هایی با ورودی‌های متفاوت از متغیرهای کیفی و هواشناسی ساخته شده است، تا مشخص شود کدام ترکیب از متغیرها، عملکرد بهتری در پیش‌بینی دارد. این رویکرد مشابه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی غلظت بو بر اساس پارامترهای کیفی آب، مانند: BOD، DO، pH در کارخانه‌های تصفیه‌ی فاضلاب است.^[۲۶] در جدول ۲، مدل‌هایی که بر اساس R^2 و RMSE بهترین نتیجه را بر اساس بهینه‌سازی و ترکیب پارامترها داشته‌اند، ارائه شده‌اند. مقایسه‌ی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که ترکیب متغیرهای ورودی، تأثیر قابل‌توجهی در عملکرد مدل جنگل تصادفی داشته است. در برخی از ترکیب‌ها، اضافه کردن و در نظر گرفتن تعامل متغیرها سبب شکل‌گیری مدل‌های با دقت بالا شده است. برای مثال مدل‌های ۳، ۶، و ۸ متغیرهای تعاملی داشته‌اند. در مدل ۶، متغیرهایی از حاصل‌ضرب متغیر شمارنده‌ی روز در متغیرهای رطوبت نسبی، دمای هوا، و اکسیژن محلول به وجود آمده است، که عملکرد مدل را افزایش داده‌اند. مدل ۸ شامل متغیرهای دمای هوا، شمارنده‌ی روز، و تعامل آن با متغیرهای اکسیژن محلول، سرعت باد، و رطوبت نسبی به بالاترین دقت منجر شده است. مقدار R^2 و RMSE به دست آمده برای داده‌های آموزش ۰/۸۳۵ و ۰/۵۸۹ و برای داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۸۲۴ و ۰/۵۸۱ بوده است. نتایج اخیر نشان می‌دهند که مدل توسعه داده شده نه فقط توانایی بالایی در تطبیق با داده‌های آموزشی داشته است، بلکه قابلیت تعمیم مناسبی برای پیش‌بینی در شرایط نادیده نیز دارد. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، در همه‌ی مدل‌های منتخب، رطوبت نسبی، دمای هوا، و اکسیژن محلول به عنوان متغیر ورودی استفاده شده‌اند؛ که نشانگر اهمیت سه متغیر اخیر در پیش‌بینی شدت بوی نامطبوع است. همچنین، مدل‌هایی که شماره‌ی روز را در ترکیب نگه داشته‌اند، معمولاً عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های فاقد آن داشته‌اند، که نشان از نقش مهم روند زمانی در بروز بوی نامطبوع دارد. در

اسپیرمن ۰/۴۶، و ضریب کندال ۰/۳۳). به عبارت دیگر، تغییرات دمای آب نسبت به تغییرات دمای هوا، تأثیر بیشتری در افزایش شدت بو داشته است. نتایج اخیر با نتایج مطالعات پیکاردو^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۲) همسو بوده و نشان داده است که افزایش دما می‌تواند انتشار ترکیب‌های بویایی را از طریق افزایش فعالیت میکروبی و نرخ تبخیر تسهیل سازد.^[۳۷] رطوبت نسبی نیز در طول داده‌برداری روند افزایشی داشته است. در روز اول داده‌برداری، مقدار رطوبت نسبی معادل ۱۰٪ و در صبح داده‌برداری روز هشتم نیز به بیش از ۶۰٪ رسیده است. نتایج به دست آمده از آزمون‌های پیرسون، اسپیرمن، و کندال نشان می‌دهند که بین رطوبت نسبی و شدت بو همبستگی منفی ضعیفی وجود داشته است (ضریب پیرسون ۰/۱۸-، ضریب اسپیرمن ۰/۱۳-، و ضریب کندال ۰/۰۹-). به عبارت دیگر، با افزایش رطوبت نسبی، شدت بو تمایل به کاهش داشته است، هر چند ارتباط به صورت ضعیف و نسبتاً نامحسوس بوده است. مقدار اکسیژن محلول در آب در اولین روز داده‌برداری، کمترین مقدار خود را داشته و مقداری معادل ۱/۵۶ mg/L ثبت شده است. به تدریج با کاهش دما و در اثر بارندگی‌ها در بالادست، مقدار اکسیژن محلول به طور نسبی افزایش پیدا کرده است. به طوری که بالاترین مقدار آن معادل ۸/۸ mg/L در انتهای داده‌برداری در ۲۵ آبان تا ۸ آذر به ثبت رسیده است. نتایج آزمون‌های پیرسون، اسپیرمن، و کندال نشان می‌دهند که بین اکسیژن محلول و شدت بو یک همبستگی منفی ضعیف وجود دارد (ضریب پیرسون ۰/۲۰-، ضریب اسپیرمن ۰/۱۸-، و ضریب کندال ۰/۱۲-). این نتیجه به این معناست که افزایش اکسیژن محلول ممکن است با کاهش کمی در شدت بو همراه باشد، اما تأثیر آن به صورت نسبی ضعیف است. این همبستگی منفی با یافته‌های مطالعات پیشین سازگار است و نشان می‌دهد که سطوح پایین DO با افزایش انتشار H_2S همراه بوده است، که یکی از عوامل اصلی بوی نامطبوع در آب‌های سطحی آلوده محسوب می‌شود.^[۱۷] شاخص بو نیز با طیف وسیعی از مقادیر در محدوده‌ی ۰ تا ۶/۱ به ثبت رسیده است. میانگین این شاخص ۲/۱ بوده است، که به صورت بوی نامطبوع متوسط قابل توصیف است. نتایج آزمون‌های آماری نشان می‌دهد که بین شماره‌ی روز داده‌برداری (JD) و شدت بو، رابطه‌ی همبستگی منفی متوسطی وجود دارد. به بیان دیگر، همان‌طور که انتظار

جدول ۳. پارامترهای بهینه‌ی الگوریتم جنگل تصادفی در مدل منتخب.

Model	Bootstrap	Criterion	Max Features	Min Samples Leaf	Min Samples Split	Max Depth	Number of Trees (n_estimators)
1	True	Squared error	Sqrt	1	4	14	8
2	True	Squared error	Sqrt	1	2	14	4
3	False	Squared error	Sqrt	2	2	14	12
4	False	Absolute error	Sqrt	1	4	8	8
5	False	Squared error	Sqrt	1	6	8	16
6	False	Absolute error	Sqrt	2	2	8	12
7	False	Squared error	Sqrt	2	6	8	12
8	False	Absolute error	Sqrt	2	2	8	20
9	True	Squared error	Sqrt	2	6	14	12
10	False	Squared error	Sqrt	2	2	14	4



شکل ۵. نتایج واقعی و پیش‌بینی شاخص بو.

(Bootstrap) غیرفعال شده است، تا برای ساخت هر درخت، کل داده‌های آموزش به جای نمونه‌برداری با جایگزینی استفاده شوند. تنظیمات اخیر، به‌طور کلی نسبت به مدل‌های قبلی منجر به توسعه‌ی مدلی بهینه‌تر با دقت بالاتر و تعمیم‌پذیری مناسب‌تر بر روی داده‌های آزمون شده است. به طوری که علی‌رغم دقت بالا، اختلاف دقت در داده‌های آموزش و آزمون، به میزان کمی رسیده و نشانه‌ای از بیش‌برازش در آن وجود نداشته است. در شکل ۵، نتایج پیش‌بینی برای داده‌های آزمون و مقایسه‌ی آن با مقادیر واقعی داده‌ها مشاهده می‌شود؛ که مطابق با آن، مدل با شاخص R^2 معادل ۰/۸۳ توانسته است شدت بوی نامطبوع را به صورت کمی پیش‌بینی کند. شاخص‌های آماری R^2 .

مقابل، مدل‌هایی که متغیر هدایت الکتریکی و دمای آب را حذف کرده‌اند، دقت کمتری داشته‌اند. به طور کلی، ترکیبی از متغیرهای کیفی کلیدی، متغیرهای هواشناسی، و شاخص زمانی، بهترین کارایی را در مدل‌سازی شدت بو فراهم کرده‌اند. به دلیل کوچک‌بودن مجموعه‌ی داده، استفاده از مدل‌های با دقت بالا سبب چالش بیش‌برازش مدل شده بود، که با در نظر گرفتن معماری‌های ساده‌تر و کاهش پیچیدگی آن تلاش شد که از آن ممانعت به عمل آید. در مجموع هر ۱۰ مدل با ترکیب متغیرهای مختلف و عملیات تنظیم پارامترها با استفاده از بهینه‌سازی (جدول ۳)، عملکرد بسیار خوبی با داشتن مجموعه‌ی داده‌ی کم داشته‌اند.

در مدل ۴، با در نظر گرفتن متغیرهای ساده و کم (اکسیژن محلول، رطوبت نسبی، دمای هوا، و pH)، دقت شاخص R^2 برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۸۹۴ و ۰/۷۹۰ به دست آمده است. مدل‌های ۳، ۶، و ۸ به ترتیب متشکل و تعامل یافته از مدل‌های ۲، ۵، و ۸ هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن تعامل متغیر شمارنده‌ی روز در متغیرهای کیفی و اقلیمی، دقت شاخص‌ها در مجموعه‌ی آموزش و آزمون افزایش یافته است. این تعامل به نوعی رفتار فصلی و ماهانه‌ی متغیرهای کیفی اقلیمی را نشان می‌دهد، که سبب افزایش دقت مدل شده است. نکته‌ی قابل توجه در مدل ساخته‌شده در سناریوی شماره‌ی ۹ این است که با افزایش و در نظر گرفتن متغیرهای بیشتر، دقت مدل نسبت به سناریوهای دیگر کاهش یافته است. همان‌طور که پیشتر اشاره شده است، به منظور افزایش دقت پیش‌بینی و بهینه‌سازی ساختار مدل جنگل تصادفی، از دو الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی تصادفی و جستجوی شبکه‌ای استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی پارامترهای جنگل تصادفی در جدول ۳ ارائه شده است. برای مثال، در بهترین مدل (شماره‌ی ۸) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده، تعداد درخت‌های تصمیم‌گیری مساوی ۲۰ و عمق بیشینه‌ی درخت‌ها مساوی ۸ تعیین شده است، که نشان‌دهنده‌ی ساختار نسبتاً فشرده اما مؤثر مدل است. تعداد کمینه‌ی نمونه‌های لازم برای تقسیم یک گره نیز مساوی ۲ به دست آمده است. همچنین، تعداد کمینه‌ی نمونه‌هایی که باید در یک برگ درخت قرار گیرد، مساوی ۲ به دست آمده است، که نشانگر انعطاف بالای مدل در یادگیری الگوهای موجود در داده است. معیار ارزیابی مناسب برای تقسیم گره‌ها در مدل ذکر شده، خطای مطلق پیش‌بینی‌ها تعیین شده است. همچنین، در هر گره از درخت تصمیم‌گیری، فقط به تعداد ریشه‌ی دوم آن از ویژگی‌های تصادفی انتخاب شده‌اند، تا داده‌ها بر اساس آن‌ها تقسیم شوند. در نهایت، نمونه‌برداری مجدد

اگرچه حجم داده‌های مطالعه‌ی حاضر به یک دوره‌ی ۱۰ هفته‌ای محدود است و پیش‌بینی‌های بلندمدت و تعمیم مدل به کانال‌های دیگر ممکن است با عدم قطعیت‌هایی همراه باشد، نتایج به‌دست‌آمده، نشانگر عملکرد قابل‌اعتماد مدل در شناسایی روندهای کوتاه‌مدت و ویژگی‌های کیفی آب در محدوده‌ی مطالعه است. این امر اهمیت مطالعه را به عنوان پایه‌ای محکم برای توسعه‌ی مدل‌های جامع‌تر و اعمال در کانال‌های دیگر افزایش می‌دهد. برای تعمیم و تقویت پیش‌بینی‌های بلندمدت، جمع‌آوری داده‌های طولانی‌تر و متنوع‌تر، به‌کارگیری روش‌های تقویت داده یا انتقال یادگیری و اعتبارسنجی مدل با داده‌های مستقل از زمان یا مکان دیگر، مسیرهای پژوهشی آینده و گام‌های منطقی برای بهبود و توسعه‌ی مدل حاضر محسوب می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری

بوی نامطبوع منتشرشده از کانال‌های آب سطحی شهری، یکی از معضلات رو به رشد در کلان‌شهرهایی همچون تهران است، که نه فقط بر کیفیت محیط‌زیست و سلامت عمومی تأثیرگذار است، بلکه می‌تواند موجب نارضایتی گسترده‌ی شهروندان شود. در مطالعه‌ی حاضر، با تمرکز بر کانال غیاثوند به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، برای نخستین بار تلاش شده است که یک چارچوب عملیاتی برای کمی‌سازی و پیش‌بینی شدت بوی نامطبوع بر اساس پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری کیفیت آب و شرایط هواشناسی ارائه شود. تحلیل همبستگی نشان داده است که متغیرهایی مانند: دمای آب، دمای هوا، هدایت الکتریکی، و اکسیژن محلول نقش مؤثری در شدت بوی نامطبوع دارند. به‌ویژه، دمای آب بیشترین همبستگی مثبت و اکسیژن محلول بیشترین همبستگی منفی را با شاخص بو نشان داده‌اند. همچنین مدلی بر پایه‌ی الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی توسعه یافته است، که با استفاده از ترکیب بهینه‌ای از متغیرهای کیفی و هواشناسی، توانسته است شدت بو را با دقت بالا پیش‌بینی کند ($R^2 = 0.824$ برای داده‌های آزمون). مدل پیشنهادی پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی شبکه‌ای و تصادفی، به ساختاری فشرده و کارآمد با قابلیت تعمیم‌پذیری مطلوب دست یافته است. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که متغیرهایی مانند: دمای هوا، رطوبت نسبی، اکسیژن محلول، و شماره‌ی روز داده‌برداری به‌عنوان ورودی در تمام مدل‌های برتر حضور داشته و نقش کلیدی در افزایش دقت مدل ایفا کرده‌اند.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهند که بوی نامطبوع آب سطحی، نه فقط تابع کیفیت لحظه‌ای آب است، بلکه تحت تأثیر روندهای زمانی، اقلیمی، و تغییرات فصلی نیز قرار دارد. چارچوب پیشنهادی مطالعه‌ی حاضر می‌تواند به‌عنوان مدلی کاربردی برای شناسایی، پهنه‌بندی، و پیش‌بینی بوی نامطبوع در دیگر کانال‌ها و رود دره‌های شهری توسعه یابد و در آینده به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی سامانه‌های پایش هوشمند و تصمیم‌یار در مدیریت شهری استفاده شود. چارچوب مذکور نه فقط در سطح منطقه‌ای، بلکه در مقیاس وسیع‌تر نیز قابلیت پیاده‌سازی دارد و می‌تواند در سایر رود دره‌ها، کانال‌های شهری، و حتی محیط‌های صنعتی برای پایش سریع، مقرون‌به‌صرفه، و هدفمند بوی نامطبوع استفاده شود. از آنجا که پژوهش حاضر به‌صورت پایلوت و با تعداد محدودی نمونه انجام شده است، انتظار می‌رود که با پایش بلندمدت و افزایش حجم داده‌ها، دقت مدل و اعتبار نتایج به‌طور چشمگیری ارتقاء یابد. در نهایت، پژوهش حاضر، گامی عملیاتی در جهت رفع یک نیاز واقعی در حوزه‌ی مدیریت شهری است و پایش بوی نامطبوع می‌تواند مسیر طراحی سیاست‌ها و اقدام‌های پیشگیرانه در برابر این معضل را هموارتر سازد.

MAE و RMSE برای مدل نهایی برای داده‌های آموزش و آزمون در جدول ۲ ارائه شده‌اند؛ که نتایج آن نشان می‌دهد دقت مدل قابل‌قبول بوده و عملکرد خوبی داشته است. این تذکر لازم است که تفاوت بین مقادیر شاخص‌های به‌دست‌آمده در داده‌های آموزش و آزمون در برخی از مدل‌ها، به این دلیل است که مجموعه‌ی داده‌ها به‌صورت میدانی در هفته‌های مختلف جمع‌آوری شده‌اند؛ بنابراین، تعداد نمونه‌ها محدود به دوره‌ی داده‌برداری بوده است. بنابراین انتظار می‌رود با پایش بلندمدت و جمع‌آوری مجموعه‌ی داده‌ی بزرگ (به عنوان مثال با بیش از ۱۰۰۰ داده)، اختلاف اخیر بین دو مجموعه‌ی داده‌ی آموزش و آزمون، کاهش پیدا کند و دقت و اعتمادپذیری مدل‌های پیش‌بینی در داده‌های آزمون نیز همچون عملکرد آن در پیش‌بینی داده‌های آموزش به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد.

در پایان، نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان داده است که استفاده از داده‌های میدانی در کنار مدل‌سازی داده‌محور می‌تواند رویکرد مؤثری برای پیش‌بینی شدت بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری باشد. مدل نهایی توسعه‌یافته با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی و بهینه‌سازی دقیق پارامترها، توانسته است با دقت قابل‌قبولی ($R^2 \approx 0.83$) شدت بو را پیش‌بینی کند. این سطح از دقت، به‌ویژه با توجه به محدودیت تعداد نمونه‌های میدانی، بسیار امیدوارکننده است و نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده، ظرفیت بالایی برای تعمیم‌پذیری دارد. با توسعه‌ی شبکه‌های پایش و افزایش حجم داده‌ها در آینده، می‌توان دقت مدل را بیش از پیش ارتقا داد. یافته‌های بخش حاضر، پایه‌ای علمی برای طراحی سامانه‌های پایش مستمر بو در شبکه‌ی آب‌های سطحی فراهم کرده‌اند و می‌توانند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای مدیریت شهری و کنترل آلودگی‌های بویایی استفاده شوند. در پژوهش‌های آتی، مطالعاتی با پایش‌های بلندمدت و حجم داده‌ی بیشتر می‌توانند بستر مناسبی برای به‌کارگیری مدل‌های ترکیبی پیشرفته و یادگیری عمیق فراهم کنند و به ارتقاء بیشتر دقت و قابلیت تعمیم چارچوب پیشنهادی منجر شوند.

مطالعه‌ی حاضر با ارائه‌ی چارچوبی ترکیبی مبتنی بر داده‌های میدانی، شاخص‌های کیفی آب، متغیرهای هواشناسی، و مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی، گامی نوآورانه در جهت پیش‌بینی و مدیریت بوی نامطبوع در کانال‌های آب سطحی شهری برداشته است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در تلفیق داده‌برداری میدانی با مدل‌سازی هوشمند و دستیابی به دقت بالا در پیش‌بینی شدت بو، آن هم در شرایط محدودیت داده، نهفته است. مدل نهایی با R^2 برابر با ۰/۸۲۴ برای داده‌های آزمون، قابلیت تعمیم‌پذیری مناسبی را نشان می‌دهد و می‌تواند مبنای تصمیم‌سازی برای اقدام‌های مدیریتی هدفمند در شهرهای بزرگ قرار گیرد. چارچوب مذکور، نه فقط در سطح منطقه‌ای، بلکه در مقیاس وسیع‌تر نیز قابل توسعه است و می‌تواند در سایر رود دره‌ها، کانال‌های شهری، و حتی در محیط‌های صنعتی برای پایش سریع و کم‌هزینه‌ی بوی نامطبوع توسعه یابد و استفاده شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با افزایش حجم داده‌ها از طریق پایش‌های بلندمدت، استفاده از حسگرهای آنلاین و ترکیب روش‌های پیشرفته‌ی یادگیری عمیق، دقت و قابلیت اطمینان چارچوب اخیر بیش از پیش ارتقاء یابد و به‌عنوان بخشی از سیستم‌های هوشمند مدیریت کیفیت محیط‌زیست شهری استفاده شود. همچنین در مطالعات آینده، توسعه‌ی یک مدل مفهومی و یکپارچه، که علاوه بر پیش‌بینی، قابلیت تصمیم‌سازی و کنترل را نیز پوشش دهد، با بهره‌گیری از شبکه‌های پایش گسترده‌تر و داده‌های بلندمدت پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نوشتار حاضر برگرفته از نتایج پروژه‌ی پژوهشی انجام‌شده به شماره‌ی قرارداد ۱۳۷/۳۰۵۰۲۶ در مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران است و نویسندگان آن از حمایت‌های مرکز مذکور کمال تشکر را دارند. از سرکار خانم دکتر زهرا برزگر، مدیر محترم گروه مطالعات محیط‌زیست مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، که مسئولیت راهبری و هدایت پروژه را داشتند و همچنین از ناظر

علمی پروژه، جناب آقای دکتر مجید حسین زاده نیز تشکر و قدردانی می‌شود. دستگاه سنجش بو، که در پروژه‌ی پژوهشی حاضر استفاده شده است، با استفاده از اعتبار اعطایی جایزه‌ی دکتر کاظمی آشتیانی از سوی بنیاد ملی نخبگان تهیه شده است و لازم است از این بنیاد گرانقدر به‌دلیل حمایت‌های ارزشمندشان صمیمانه قدردانی شود. در انتها، از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف نیز تشکر و قدردانی می‌شود.

References- منابع

1. United Nations, *The sustainable development goals report 2018*, 2018. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2018/goal-06/>.
2. Sun, Y., Xu, Z., Zhang, N., Hu, D., Liang, Y., Liu, C., Zhu, Y. and Chen, X., 2025. Unveiling the intrinsic relationship between ammonia and hydrogen sulfide generation during composting. *Environmental Technology & Innovation*, 39, 104298. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104298>
3. Lu, M., Lamichhane, P. and Liang, F., 2008. Identification of odor causing compounds in a commercial dairy farm. *Water Air & Soil Pollution: Focus*, 8, pp.359–367. <https://doi.org/10.1007/s11267-007-9150-x>
4. Han, B., Liu, Y.T. and Wu, J.H., 2018. Characterization of industrial odor sources in Binhai New Area of Tianjin, China. *Environmental Science And Pollution Research*, 25, pp.14006–14017. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1596-z>
5. Riaz, S., Mehmood, R., Kareem, H.A. and Sadia, H., 2023. Livestock waste, types, sources, pollution potential, and country-wise comparisons. In: *Waste Problems And Management In Developing Countries*. 1st ed. Apple Academic Press, pp.1–27. <https://doi.org/10.1201/9781003283621-9>
6. Valipoori Goodarzi, H., Fadaei Tehrani, M.R. and Mohammad Zadeh, S., 2024. Investigation regarding assessment of potentially toxic elements (PTEs) contamination risk in Rasht city with emphasis on the two rivers, Goharroud and Zarjoub, Gilan province, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 10, 50. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01025-8>.
7. Khalili, R., Parvinnia, M. and Motaghi, H., 2020. Evaluation of Bashar River water quality using CCME water quality index. *Journal Of Environmental Science Studies*, 5(3), pp.2807–2814.
8. Shakeri, A. and Moore, F., 2010. The impact of an industrial complex on freshly deposited sediments, Chener Rahdar river case study, Shiraz, Iran. *Environmental Monitoring And Assessment*, 169, pp.321–334. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1173-5>.
9. Seyednezhad, N., Salimi Gol Sheikhi, M. and Barati, R., 2022. Analytical note: Discussion to determine the network of problems of Kashaf Rood river. *Journal Of Water And Sustainable Development*, 9(2), pp.135–137.
10. Cao, J., Sun, Q., Zhao, D., Xu, M., Shen, Q., Wang, D., Wang, Y. and Ding, S., 2020. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods. *Journal Of Hazardous Materials*, 385, 121511. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121511>
11. Choe, L.J., Jung, S.W., Kim, D.G., Baek, M.J., Kang, H.J., Lee, C.Y. and Bae, Y.J., 2014. Temporal changes in benthic macroinvertebrates and their interactions with fish predators after restoration in the Cheonggyecheon, a downtown stream in Seoul, Korea. *Entomological Research*, 44(6), pp.338–348. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12080>
12. Gerner, N.V., Nafo, I., Winking, C., Wencki, K., Strehl, C., Wortberg, T., Niemann, A., Anzaldúa, G., Lago, M. and Birk, S., 2018. Large-scale river restoration pays off: A case study of ecosystem service valuation for the Emscher restoration generation project. *Ecosystem Services*, 30, pp.327–338. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.03.020>
13. Romero, E., Le Gendre, R., Garnier, J., Billen, G., Fisson, C., Silvestre, M. and Riou, P., 2016. Long-term water quality in the lower Seine: Lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science & Policy*, 58, pp.141–154. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.016>
14. Chițescu, C.L., Ene, A., Geana, E.I., Vasile, A.M. and Ciucure, C.T., 2021. Emerging and persistent pollutants in the aquatic ecosystems of the Lower Danube Basin and North West Black Sea Region—A review. *Applied Sciences*, 11(20), 9721. <https://doi.org/10.3390/app11209721>
15. Krishna, C.R., Klein, C.R., Jones, K.W., Clesceri, N.L. and Stern, E.A., 1995. Human exposure to toxic materials. *The Mount Sinai Journal Of Medicine*, 62, p.5.

16. Liang, K., Feng, X., Yang, B., Dou, Z. and Chen, W., 2021. Research on treatment measures and treatment effects of black and smelly water body in Shenyang area. *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, 651(4), 042043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/651/4/042043>
17. Cruz, L.P., Alves, R.S., da Rocha, F.O., Moreira, M.S. and dos Santos Júnior, A., 2022. Atmospheric levels, multivariate statistical study, and health risk assessment of odorous compounds (H₂S and NH₃) in areas near polluted urban rivers in the city of Salvador, in Northeastern Brazil. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(1), pp.159–176. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01095-7>
18. Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, S., Leger, C., Locoge, N. and Savary, G., 2021. A review of environmental odor quantification and qualification methods: The question of objectivity in sensory analysis. *Science Of The Total Environment*, 795, 148862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148862>
19. Bax, C., Sironi, S. and Capelli, L., 2020. How can odors be measured? An overview of methods and their applications. *Atmosphere*, 11(1), 92. <https://doi.org/10.3390/atmos11010092>
20. Sado-Inamura, Y. and Fukushima, K., 2018. Considering water quality of urban rivers from the perspectives of unpleasant odor. *Sustainability*, 10(3), 650. <https://doi.org/10.3390/su10030650>
21. Wang, Y., Shao, L., Kang, X., Zhang, H., Lü, F. and He, P., 2023. A critical review on odor measurement and prediction. *Journal Of Environmental Management*, 336, 117651. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117651>
22. Lebrero, R., Bouchy, L., Stuetz, R. and Muñoz, R., 2011. Odor assessment and management in wastewater treatment plants: a review. *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, 41(10), pp.915–950. <https://doi.org/10.1080/10643380903300000>
23. Wei, L., Huang, C., Wang, Z., Wang, Z., Zhou, X. and Cao, L., 2019. Monitoring of urban black-odor water based on Nemerow index and gradient boosting decision tree regression using UAV-borne hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 11(20), 2402. <https://doi.org/10.3390/rs11202402>
24. Yang, F., Pluth, T.B., Fang, X., Francq, K.B., Jurjovec, M. and Tang, Y., 2021. Advanced machine learning application for odor and corrosion control at a water resource recovery facility. *Water Environment Research*, 93(11), pp.2346–2359. <https://doi.org/10.1002/wer.1618>
25. Mulrow, J., Kshetry, N., Brose, D.A., Kumar, K., Jain, D., Shah, M., Kunez, T.E. and Varshney, L.R., 2020. Prediction of odor complaints at a large composite reservoir in a highly urbanized area: A machine learning approach. *Water Environment Research*, 92(3), pp.418–429. <https://doi.org/10.1002/wer.1191>
26. Kang, J.H., Song, J., Yoo, S.S., Lee, B.J. and Ji, H.W., 2020. Prediction of odor concentration emitted from wastewater treatment plant using an artificial neural network (ANN). *Atmosphere*, 11(8), 784. <https://doi.org/10.3390/atmos11080784>
27. Qiu, S., Hou, P., Huang, J., Han, W. and Kang, Z., 2021. The monitoring of Black-Odor River by electronic nose with chemometrics for pH, COD, TN, and TP. *Chemosensors*, 9(7), 168. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9070168>
28. Iran, Tehran Municipality, 2015. Operational studies for implementation of the comprehensive surface water management plan and preparation of improvement plans for streams and canals in the 22 districts of Tehran City – Conceptual design studies of District 3 – Second Edition, Volume 1. Tehran: Yekom Consulting Engineers. [In Persian]
29. Iran, Tehran Municipality, 2015. Operational studies for implementation of the comprehensive surface water management plan and preparation of improvement plans for streams and canals in the 22 districts of Tehran City – Conceptual design studies of District 3 – Second Edition, Volume 2. Tehran: Yekom Consulting Engineers. [In Persian]
30. Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45, pp.5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
31. Wang, F., Wang, Y., Zhang, K., Hu, M., Weng, Q. and Zhang, H., 2021. Spatial heterogeneity modeling of water quality based on random forest regression and model interpretation. *Environmental Research*, 202, 111660. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111660>
32. Alnahit, A.O., Mishra, A.K. and Khan, A.A., 2022. Stream water quality prediction using boosted regression tree and random forest models. *Stochastic Environmental Research And Risk Assessment*, 36(9), pp.2661–2680. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02152-4>
33. Sakaa, B., Elbeltagi, A., Boudibi, S., Chaffai, H., Islam, A.R.M.T., Kulimushi, L.C., Choudhari, P., Hani, A., Brouziyne, Y. and Wong, Y.J., 2022. Water quality index modeling using random forest and improved SMO algorithm for support vector machine in Saf-Saf river basin. *Environmental Science And Pollution Research*, 29(32), pp.48491–48508. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18644-x>
34. Fang, X., Li, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Qian, J., Hao, C., Zhou, J. and Wu, Y., 2021. Random forest-based understanding and predicting of the impacts of anthropogenic nutrient inputs on the water quality of a tropical lagoon. *Environmental Research Letters*,

- 16(5), 055003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf395>
35. Xu, J., Xu, Z., Kuang, J., Lin, C., Xiao, L., Huang, X. and Zhang, Y., 2021. An alternative to laboratory testing: random forest-based water quality prediction framework for inland and nearshore water bodies. *Water*, 13(22), 3262. <https://doi.org/10.3390/w13223262>
36. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V. and Vanderplas, J., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal Of Machine Learning Research*, 12, pp.2825–2830.
37. Piccardo, M.T., Geretto, M., Pulliero, A. and Izzotti, A., 2022. Odor emissions: A public health concern for health risk perception. *Environmental Research*, 204, 112121. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112121>

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.



Research Article

Finite Element Investigation of Novel Semi-Rigid Connection with Controlled Damage Position in CFS Frames

Mohammad Reza Farajpour¹, Jamshid Sabouri^{1*} and Yousef Hosseinzadeh²

¹Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

²Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* corresponding author: (j-sabouri@iaut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 13 July 2025

Revised: 7 October 2025

Accepted: 22 October 2025

Keywords:

Cold-formed steel frames (CFS), semi-rigid connections, finite element modeling, moment-rotation curve, controlled damage position and monotonic behavior.

Abstract

In this study, a novel semi-rigid connection with a Controlled Damage Position (CCDP) is introduced for cold-formed steel (CFS) frames, and its structural performance is thoroughly evaluated through both finite element (FE) modeling and experimental tests. The connection is specifically designed to incorporate a flexural fuse at the beam-to-column joint, thereby effectively relocating damage concentration away from the column and directing it toward a predefined region intended for controlled localized yielding. The proposed connection was fabricated using galvanized steel plates, which were carefully cut and bent to thicknesses of 1-, 2-, and 3-mm. Comparative results between FE simulations and experimental tests demonstrated excellent agreement, with the maximum deviation being less than 9%, confirming the reliability of the FE modeling approach. A detailed parametric investigation was conducted to assess the influence of key geometric parameters, including plate thickness, inclination angle of the connecting components, length of the control segment, and the size of flange stiffeners. The results indicated that increasing plate thickness significantly enhanced both the flexural strength and the initial stiffness of the connection. Furthermore, the parametric analysis revealed that extending the control segment length increased the flexural capacity by up to 18% and the initial stiffness by up to 12%, whereas removal of this segment prevented the proper localization of the plastic hinge. Increasing the inclination angle of the sloped component improved flexural capacity by approximately 13%, while enlarging the flange stiffener length enhanced the flexural resistance by up to 35%, although excessive stiffening could potentially increase the likelihood of local buckling in the beam. Among all the studied configurations, the specimen with 2-mm plates and a 70-mm control segment exhibited the highest moment capacity and initial stiffness. Moreover, the obtained moment-rotation curves confirmed that the CCDP connection provided reliable semi-rigid behavior and effectively controlled buckling within the designated fuse region; in most specimens, no local buckling was observed in either the beam or the column up to a rotation of 0.07 radians.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Farajpour, M.R., Saburi, J. and Hosseinzadeh, Y. 2026. Finite element investigation of novel semi-rigid connection with controlled damage position in CFS frames, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 59-74.
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.67113.3437>



بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS)

محمدرضا فرج پور^۱، جمشید صبوری^{۱*} و یوسف حسین زاده^۲

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران.

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول (j-sabouri@iaut.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از اتصال نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده برای قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS) معرفی و رفتار آن به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمایش‌های تجربی بررسی شده است. اتصال مذکور به گونه‌ای طراحی شده است که با ایجاد یک فیوز خمشی در محل اتصال تیر به ستون، تمرکز آسیب از ستون دور شود و به ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده برای تسلیم موضعی انتقال یابد. پارامترهای هندسی مختلف، شامل: ضخامت ورق، زاویه‌ی شیب قطعات اتصال، طول قطعه‌ی کنترلی، و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال بررسی شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که افزایش ضخامت ورق موجب رشد قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت خمشی و افزایش سختی اولیه شده است. در تحلیل پارامتریک نیز افزایش طول قطعه‌ی کنترلی منجر به افزایش مقاومت خمشی تا ۱۸٪ و سختی اولیه تا ۱۲٪ شده است؛ در حالی که حذف قطعه‌ی اخیر مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین‌شده می‌شود. تغییر زاویه‌ی بخش شیب‌دار، اتصال مقاومت خمشی را حدود ۱۳٪ افزایش داده و افزایش اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال باعث رشد مقاومت خمشی تا ۳۵٪ شده است، هر چند سختی بیش از حد می‌تواند احتمال کمانش موضعی در تیر را افزایش دهد. بررسی منحنی‌های لنگر-دوران حاکی از آن است که اتصال جدید، رفتار نیمه‌گیردار مناسبی داشته و به‌طور مؤثر کمانش اعضا تیر و اتصال را در ناحیه‌ی فیوز کنترل کرده است؛ به گونه‌ای که در بیشتر نمونه‌ها تا دوران ۰/۰۷ رادیان، هیچ‌گونه کمانش موضعی در تیر یا ستون مشاهده نشده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

واژگان کلیدی:

قاب فولادی سبک سرد

نوردشده (CFS)،

اتصال‌های نیمه‌گیردار،

مدل‌سازی اجزاء محدود،

منحنی لنگر-دوران،

موقعیت آسیب کنترل‌شده،

رفتار مونوتونیک.

۱. مقدمه

سازه، رفتار لرزه‌ای آن را بهبود بخشند. تیر در قاب‌های فولادی سبک، مستعدترین نقطه برای تشکیل مفصل پلاستیک است. ظرفیت دورانی مناسب اتصال‌ها، این امکان را به سازه می‌دهد که به جای ایجاد خرابی، با تغییر شکل غیرالاستیک و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری کند و شکل‌پذیری سازه را بهبود بخشد. رفتار کلی اتصال‌های فولادی را چیدمان، نیروی سفت‌شدگی پیچ، و رفتار خمشی اعضا اتصال تعیین می‌کند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی اخیر روی اتصال‌های خمشی متعارف استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک، نشان‌دهنده‌ی مقاومت خمشی مناسب اتصال‌های مذکور است. توجه به این نکته ضروری است که اتصال‌های متعارف در قاب‌هایی که نسبت عرض به ضخامت مقاطع جدارنازک استفاده‌شده در آن‌ها بسیار بالا باشد، شکل‌پذیری و جذب انرژی ضعیفی دارند.^[۱] این موضوع ضرورت اصلاح و بهبود رفتار اتصال‌ها در سازه‌های فولادی سبک در مناطق لرزه‌خیز را نشان می‌دهد.

سازه‌های سردنورد فولادی، نسبت سختی به وزن مصالح بیشتری نسبت به سازه‌های گرم‌نورد دارند و سازه‌هایی اقتصادی به حساب می‌آیند. سازه‌های سردنورد فولادی، به دلیل نسبت بالای عرض به ضخامت اعضا، بیشتر از مقاطع گرم‌نوردشده، مستعد کمانش و خرابی موضعی هستند. به همین دلیل، بیشتر مواقع، از مقاطع سردنوردشده به عنوان اعضا غیرسازه‌ای استفاده می‌شود.^[۱] با روشن شدن مزایای اقتصادی سازه‌های سردنورد فولادی، استفاده از آن‌ها به عنوان اعضا سازه‌ای رو به گسترش است. از مقاطع جدار نازک به صورت قاب‌های خمشی با اتصال‌های پیچی می‌توان در سازه‌های با ارتفاع کم تا متوسط به عنوان اعضا سازه‌ای استفاده کرد. در سازه‌های فولادی سردنوردشده، سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی به طور کلی به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) سیستم دیوار برشی با قاب‌های سبک پانلی، (۲) سیستم دیوار برشی با مهاربند تسمه‌ای، و (۳) سیستم قاب خمشی با اتصال‌های گیردار. اتصال‌های خوب طراحی‌شده می‌توانند با مشارکت در رفتار غیرخطی

استناد به این مقاله:

فرج پور، محمدرضا، صبوری، جمشید و حسین زاده، یوسف، ۱۴۰۵. بررسی اجزاء محدود اتصال جدید نیمه‌گیردار با موقعیت آسیب کنترل‌شده در قاب‌های فولادی سرد نوردشده (CFS). مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص ۷۴-۵۹. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.67113.3437>



سخت‌کننده‌ی اتصال رخ داده است. به نظر می‌رسد کمناش جانبی ستون، عمده‌ی ایراد مدل قاب خمشی ارائه‌شده‌ی مکروم و همکاران بوده است.

نوع جدیدی از اتصال‌های گیردار تیر به ستون نیز توسط عماد حسن و همکاران (۲۰۱۷)^[۸] ارائه شده است؛ که در آن، از سخت‌کننده‌های قائم و افقی متعدد در محل اتصال استفاده شده است. از معایب اتصال مذکور، استفاده‌ی زیاد از مصالح و دشواری اتصال جوشی سخت‌کننده‌ها بوده است. با توجه به ضخامت کم ورق تیر، استفاده از جوش جهت اتصال سخت‌کننده‌ها مناسب به نظر نمی‌رسد.

عامل کلیدی محدودکننده‌ی شکل‌پذیری قاب‌های فولادی سردنورد، عدم توانایی در کنترل محل ایجاد کمناش است. باقری صباغ و همکاران (۲۰۱۲)^[۹] اقدام به توسعه‌ی نوع جدیدی از اتصال‌های گیردار با استفاده از ورق‌های میان‌گذر کرده و توانسته‌اند ظرفیت خمشی اتصال را ۳۵٪ افزایش دهند و شکل‌پذیری قاب‌های سردنوردشده را تا ۷۵٪ بهبود بخشند. یکی از ایرادهای مهم اتصال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های میان‌گذر با عرض زیاد است، که مانع از اجرای صحیح عرشه در سازه‌های فولادی سبک می‌شود.

سنوک^۲ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۰] در یک مطالعه‌ی عددی، اقدام به بهبود جزئیات اتصال‌های خمشی ارائه‌شده توسط باقری صباغ و همکاران،^[۹] کرده و با تغییر شکل و ضخامت ورق‌های میان‌گذر، با حفظ گیرداری اتصال‌ها، ایرادهای مدل ایشان را رفع کرده‌اند.

پاپاگریوس^۳ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۱] مطالعات عددی گسترده‌ای روی سه نوع اتصال نوآورانه با استفاده از صفحات انتهایی و سخت‌کننده‌های لچکی انجام داده‌اند. ایشان اتصال‌های گیردار را در سه حالت مختلف: اتصال بال تیر به بال ستون با استفاده از لچکی، اتصال جان تیر به جان ستون با ورق میان‌گذر، و ترکیبی از دو روش مذکور مطالعه کرده و با ترکیب سخت‌کننده‌ها و لچکی‌های اتصال‌دهنده‌ی بال، تعادلی بین ظرفیت باربری و عملکرد لرزه‌ای ایجاد کرده‌اند.

سناپاتی^۴ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۲] با ادغام قاب‌های خمشی متوسط که در جهت نیروی جانبی تراز شده‌اند، ظرفیت باربری جانبی کلی سازه را افزایش داده‌اند. در مطالعات ایشان، راهکاری عملی برای ایجاد اتصال‌های گیردار ارائه نشده و فقط از ظرفیت باربری قاب‌ها در راستای نیروی جانبی جهت انتقال نیروهای افقی استفاده شده است.

شاهینی و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۳] با تمرکز بر ساز و کار لغزش اصطکاکی اتصال‌های پیچی و بررسی اتصال‌ها با آرایش‌های مختلف پیچ توانسته‌اند اتلاف انرژی قاب‌های خمشی سردنوردشده را تا ۷۵٪ افزایش دهند. براساس مطالعات ایشان، آرایش پیچی دایره‌ای با سوراخ‌های شکاف‌دار توانسته است به‌طور مؤثری خرابی کمناشی تیرها در سازه‌های فولادی سبک را به تأخیر بیندازد.

مطالعات قابل‌توجهی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی از طریق به‌کارگیری اجزاء مستهلک‌کننده‌ی انرژی متمرکز انجام شده است؛ که یکی از رویکردهای نوین مذکور، استفاده از فیوز خمشی است، که با افزایش شکل‌پذیری، آسیب را در یک بخش متمرکز می‌سازد و از خرابی اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌کند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که به‌کارگیری

مقاومت خمشی اتصال‌های سازه‌های سبک فولادی تحت بارگذاری‌های رفت و برگشتی به‌صورت عددی و آزمایشگاهی توسط عماد حسن و همکاران (۲۰۱۶)^[۳] بررسی شده و نتایج نشان داده است که اتصال‌های مذکور به‌صورت نیمه‌گیردار عمل کرده و فقط مقاومت لازم برای قاب فولادی با مقاومت خمشی کم و متوسط را فراهم ساخته است.

نتایج مطالعات عددی لیم و همکاران (۲۰۱۶)^[۴] نیز نشان داده است که مشخصات پیچ استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک، تأثیر زیادی در ظرفیت خمشی قاب دارد و مقاومت خمشی و شکل‌پذیری در قاب‌های فولادی سبک براساس ۴ عامل اصلی تأمین می‌شود: (۱) مشخصات مصالح و تنش تسلیم آن؛ (۲) نحوه‌ی کمناش اعضاء قاب در محل اتصال؛ (۳) شکل توزیع پیچ‌ها؛ و درنهایت، (۴) شکل مقطع تیر و ستون. با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که با یک طراحی مناسب می‌توان شکل‌پذیری و مقاومت خمشی مناسبی از مقاطع جدار نازک به‌دست آورد.

مجتبایی و حاجی‌رسولی‌ها (۲۰۱۹)^[۵] در ارائه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود از قاب‌های فولادی با ستون‌های ساخته‌شده از پروفیل مربعی شکل با اتصال‌های صلب، جهت ایجاد یک اتصال گیردار بین تیر و ستون از ورق‌های فولادی مثلی‌شکل استفاده کرده‌اند. در مدل قاب خمشی ارائه‌شده، افزایش مقاومت جانبی قاب نسبت به قاب‌های سبک فولادی متعارف محسوس بوده است. در مدل ارائه‌شده، کمناش بال ستون در نزدیکی محل اتصال ستون به پی رخ داده است. سپس دومین نقطه‌ی ستون در نزدیکی ورق اتصال دچار کمناش موضعی شده است. در مدل‌های مذکور، جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب، افزایش قابل‌توجهی داشته و تأثیر اندازه‌ی پروفیل ستون در افزایش مقاومت خمشی قاب از تأثیر نسبت عرض به ضخامت ستون بیشتر بوده است. ضریب کاهش مقاومت برخی از مدل‌های ارائه‌شده براساس آیین‌نامه‌های طراحی کافی به نظر رسیده است. قابل توجه است که کمناش ستون در نزدیکی پی و در محل اتصال تیر به ستون، عمده‌ی مشکل مدل پیشنهادی مجتبایی و حاجی‌رسولی‌ها بوده است.

همچنین ایشان در مطالعات آزمایشگاهی دیگری (۲۰۲۰)^[۶] نشان داده‌اند که استفاده از شکل‌های خاص و افزایش بُعد و مقاومت خمشی بال‌های مقاطع تیر و ستون می‌تواند تأثیر زیادی در مقاومت کمناشی اعضاء قاب داشته باشد. لذا برای رسیدن به هدف اخیر، استفاده از مقاطع تیر با شکل بال‌های گوناگون، از جمله چندوجهی و گرا د پیشنهاد کرده‌اند. با توجه به اینکه مقاطع استفاده‌شده در قاب‌های فولادی سبک از ورق‌های نازک با قابلیت برشکاری و خمکاری ساخته می‌شوند، به‌راحتی می‌توان مقاطع جدید با هندسه‌ی مختلف ساخت. ولی نحوه‌ی اتصال پیچی تیر با هندسه‌ی پیچیده به اعضاء اتصال و ستون، یکی از مشکلات مقاطع با شکل‌های هندسی پیچیده است.

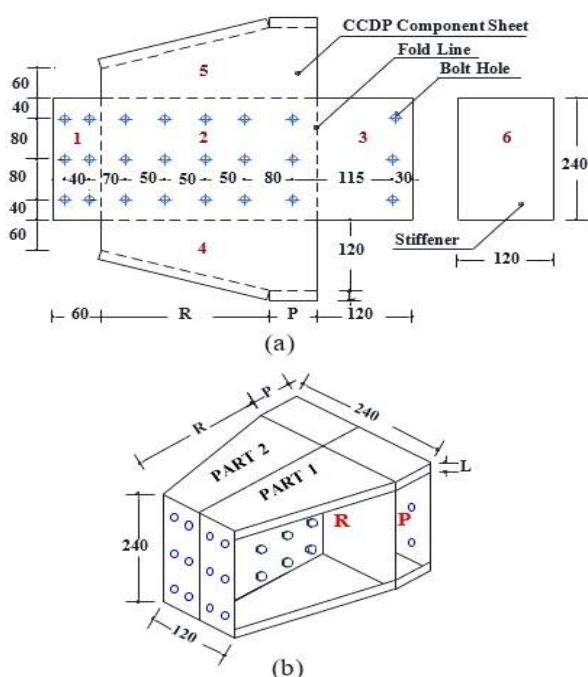
مکروم^۱ و همکاران (۲۰۱۹)^[۷] یک نوع قاب با اتصال گیردار نوین جهت ایجاد گیرداری در اتصال با استفاده از ورق‌های مثلی و سخت‌کننده‌های مختلف ارائه کرده‌اند؛ که در آن‌ها، جذب انرژی بالاتر، شکل‌پذیری بهتر، و شکل هیستریزیس پایدارتری نسبت قاب‌های فولادی سبک متعارف مشاهده شده است. همچنین در مدل‌های ارائه‌شده، کمناش جانبی جان ستون در محل اتصال ستون به ورق

³ Papargyriou

⁴ Senapati

¹ McCrum

² Seok



(a) نحوه ی برش و خمکاری ورق هر پارت، (b) شکل اتمام یافته ی اتصال.

شکل ۱. نحوه ی ایجاد اتصال CCDP (ابعاد به میلی متر).

بوده است. هر قطعه ی اتصال بعد از خم کاری و مونتاژ، از دو باکس یا بخش R و P تشکیل شده و به صورت یک سیستم یکپارچه، نیروی برشی و لنگر خمشی تیر را به ستون منتقل کرده است. مجموعه ی اتصال مطابق شکل ۱، از ۶ جزء تشکیل شده است، که بعد از خم کاری و اتصال به یکدیگر، به صورت یک سیستم واحد عمل می کنند. ورق های ۱، ۳، و ۶ علاوه بر اتصال قسمت های R و P، نقش سخت کننده را نیز داشته اند. جهت اتصال دو قطعه ی پیش ساخته به هم، از ۱۵ عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. جهت متصل ساختن تیر به اتصال CCDP نیز از ۱۲ عدد پیچ و جهت متصل کردن اتصال CCDP به ستون، از ۶ عدد پیچ شماره ۸ استفاده شده است. پیچ های به کار رفته از نوع CL۸.۸ بوده اند. هدف از طراحی بخش های مختلف اتصال CCDP، ایجاد گیرداری در محل اتصال تیر به ستون و کنترل کمانش اعضا اتصال و تیر بوده است. بخش P اتصال، وظیفه ی دور کردن تغییر شکل های پلاستیک و کمانش از بر ستون را بر عهده داشته است، تا از آسیب به اتصال در بر ستون جلوگیری کند. استهلاک انرژی و کمانش بال فشاری در یک نقطه ی از پیش تعیین شده در وسط قطعه ی R رخ می دهد. در طراحی تیر و اتصال، محدودیت عرض بال به ضخامت ورق جهت کنترل تسلیم موضعی و مقاومت پیچ و جوش براساس آیین نامه ی Eurocode ۳^[۱۸] رعایت شده است. مجموعه ی تیر و قطعه ی CCDP با استفاده از ۶ پیچ M۱۰ به یک ستون به طول ۳۰۰ سانتی متر متصل شده است. ضخامت ورق و سخت کننده های ستون در همه ی مدل ها ۳ میلی متر و دو انتهای ستون دارای تکیه گاه گیردار بوده است. از ورق تقویت کننده ی بال در محل اتصال تیر به قطعه ی اتصال CCDP استفاده شده است. ورق تقویت کننده ی بال، الگوی کمانش تیر و اتصال را تغییر می دهد و استفاده از آن در محل اتصال تیر به قطعه ی CCDP از جداسدگی ورق انتهایی تیر و قطعه ی CCDP ممانعت می کند و رفتار اتصال را بهبود می بخشد. ورق تقویتی به طول ۴۰۰ میلی متر و به وسیله ی ۱۲ پیچ شماره ۱۲ به بال های تیر و قطعه ی

چنین فیوزهایی موجب افزایش جذب انرژی و کنترل مکانیزم های خرابی پس از زلزله می شود. کافی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۴] با ارزیابی یک سیستم تسلیم شونده به صورت آزمایشگاهی و عددی به شکل پذیری بالا و ظرفیت مطلوب در جذب انرژی دست یافته اند؛ به طوری که مفصل پلاستیک فقط در یک نقطه ی مشخص تشکیل شده و سایر اعضا در محدوده ی الاستیک باقی مانده اند. یافته های اخیر، اهمیت استفاده از مکانیزم های تسلیم کنترل شده در سازه های فولادی را نشان می دهند؛ رویکردی که همسو با توسعه ی اتصال های خمشی با ناحیه ی آسیب از پیش تعیین شده در قاب های فولادی سردنورد شده است.^[۱۵]

محمد محمود و همکاران (۲۰۲۶)^[۱۶] اثر پیکربندی اتصال انتهای تیر به بستر خرپاهای ساخته شده از فولاد سردنورد شده را به صورت آزمایشی بررسی کرده و دریافته اند که نوع اتصال انتهایی، نقش مؤثری در انتقال بار، شکل پذیری اعضا، و توزیع تنش دارد؛ و تغییر در جزئیات اتصال می تواند موجب کاهش تمرکز تنش در نقاط بحرانی یا افزایش ظرفیت باربری شود. یافته های اخیر، اهمیت طراحی اتصال های خمشی با کنترل دقیق مکانیزم های تسلیم و تمرکز بر رفتار غیرالاستیک در مناطق از پیش تعیین شده را تأیید می کند.

پژوهشگران همواره به اهمیت ایجاد کمانش های موضعی در اجزاء قاب های فولادی سبک واقف بوده و با ارائه ی راهکارهای مختلف سعی در کنترل و دور کردن آن از نقاط حساس قاب کرده اند. با توجه به اهمیت کنترل محل کمانش موضعی در اجزاء قاب های فولادی سبک، در نوشتار حاضر نوع جدیدی از اتصال های نیمه گیردار با موقعیت آسیب کنترل شده پیشنهاد شده است؛ که به عنوان یک فیوز خمشی، آسیب و کمانش را از ستون و تیر دور می کند. اتصال های نیمه گیردار نوین از خم و برش ورق های گالوانیزه ایجاد و توسط پیچ مابین تیر و ستون متصل می شوند. جهت بررسی عددی رفتار اتصال های مذکور، مدل های اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس^۵ ایجاد و دقت مدل های اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سنجیده شده است. رفتار اتصال های جدید تحت بارگذاری مونوتونیک و نیز کمانش موضعی اجزاء اتصال، مقاومت خمشی، و دوران اتصال بررسی شده اند. همچنین در ادامه ی پژوهش، تأثیر پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال های نوین ملاحظه شده و نتایج نشان داده اند که اتصال های پیشنهادی با درجه ی گیرداری مناسب جهت استفاده در قاب های فولادی سردنورد ب و در کنترل محل ایجاد کمانش و ممانعت از انتقال تغییر شکل های بزرگ به ستون و تیر، مناسب عمل کرده اند.

۲. نحوه ی ساخت اتصال گیردار جدید با موقعیت آسیب کنترل شده (CCDP)

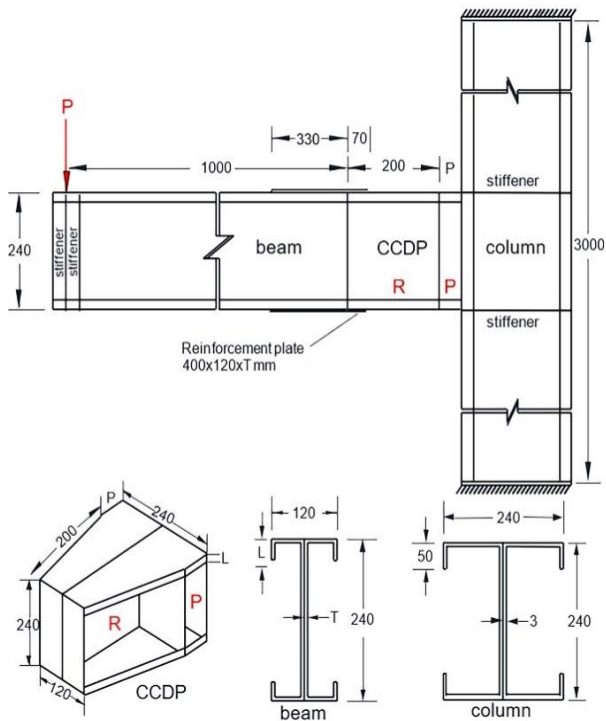
در ساخت اتصال نیمه گیردار تیر به ستون جدید با موقعیت آسیب کنترل شده (CCDP)^۶، یک قطعه با استفاده از یک ورق به صورت شکل (۱-۱) بریده و خم شده است. سپس یک قطعه ی دیگر به روش مشابه ساخته شده است، که دقیقاً هم اندازه با قطعه ی قبلی بوده و با اتصال دو قطعه ی مذکور توسط پیچ، قطعه ی اتصال دهنده ی واسط بین تیر و ستون مطابق شکل (۱-۲) ایجاد شده است. انتقال نیروهای داخلی از تیر به ستون، توسط دو قطعه ی اخیر انجام شده است. قطعات پیش ساخته ی مذکور از خم و برش ورق گالوانیزه با ضخامت های ۱، ۲، و ۳ میلی متر، براساس آیین نامه ی طراحی سازه های سردنورده ی ۲۴-۱۰۰ AISI-S^[۱۷] ساخته شده اند. شعاع خم کاری در ساخت آن ها، ۲ میلی متر

^۶ Connection with Controlled Damage Position

^۵ ABAQUS



شکل ۲. نمونه‌ی آزمایشگاهی تیر و اتصال CCDP.



شکل ۳. اندازه‌ی مدل‌های اجزاء محدود (ابعاد به میلی‌متر).

اتصال متصل شده است. در مدل‌های مذکور، ضخامت ورق تقویتی با ضخامت اجزاء تیر و اتصال یکسان بوده و در موقعیت ۷۰ میلی‌متری ابتدای قطعه‌ی CCDP و ۳۳۰ میلی‌متری انتهایی تیر نصب شده است. تعداد پیچ‌های اتصال ورق تقویتی به نحوی طراحی شده‌اند که مقاومت کافی جهت تحمل نیروهای کششی حاصل از خمش را داشته باشند. در شکل ۲، یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال CCDP با ورق تقویتی بال مشاهده می‌شود.

جهت بررسی رفتار اتصال پیشنهادی، ۲۱ مدل اجزاء محدود در سه ضخامت مختلف ایجاد شده است. میزان گیرداری اتصال‌ها با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۱۸] تعیین شده است؛ که براساس آن، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار قرار داشته‌اند. در شکل ۳، اندازه‌ی قطعات اتصال مشاهده می‌شود.

جهت بررسی پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده (L) در سه اندازه‌ی ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شده‌اند. پارامتر مؤثر دیگر در رفتار اتصال، زاویه‌ی افزایش عرض قطعه‌ی R اتصال است. در حالت اول، قطعه‌ی R اتصال با زاویه‌ی افزایش عرض ۱۷ درجه، کل عرض بال ستون و در حالت دوم، با زاویه‌ی افزایش عرض ۹ درجه، ۷۵٪ عرض بال ستون را پوشش داده است. در هر دو حالت، طول قطعه‌ی R برابر ۲۰۰ میلی‌متر بوده است. پارامتر هندسی سوم، طول بخش کنترلی ثابت P است، که در ۴ اندازه‌ی مختلف: صفر، ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر بررسی شده است. در جدول ۱، مشخصات مدل‌های اجزاء محدود ایجادشده ارائه شده است. در نام‌گذاری مدل‌ها، T ضخامت ورق استفاده‌شده در ساخت تیر و اتصال، L اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، P طول قسمت ثابت کنترلی اتصال، و R در دو حالت R_۱ و R_۲، شیب افزایش عرض قطعه‌ی R را نشان

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ها (ابعاد به میلی‌متر).

specimen	Plate thickness (T)	wing stiffener edge (L)	Length of (R)	Width of (P)	Length of (P)
T1L2R1P0	1	20	200	240	0
T1L2R1P2	1	20	200	240	20
T1L2R1P5	1	20	200	240	50
T1L2R1P7	1	20	200	240	70
T1L1R1P5	1	10	200	240	50
T1L2R2P5	1	20	200	180	50
T1L3R1P5	1	30	200	240	50
T2L2R1P0	2	20	200	240	0
T2L2R1P2	2	20	200	240	20
T2L2R1P5	2	20	200	240	50
T2L2R1P7	2	20	200	240	70
T2L1R1P5	2	10	200	240	50
T2L2R2P5	2	20	200	180	50
T2L3R1P5	2	30	200	240	50
T3L2R1P0	3	20	200	240	0
T3L2R1P2	3	20	200	240	20
T3L2R1P5	3	20	200	240	50
T3L2R1P7	3	20	200	240	70
T3L1R1P5	3	10	200	240	50
T3L2R2P5	3	20	200	180	50
T3L3R1P5	3	30	200	240	50

جدول ۲. مشخصات مصالح مصرفی.

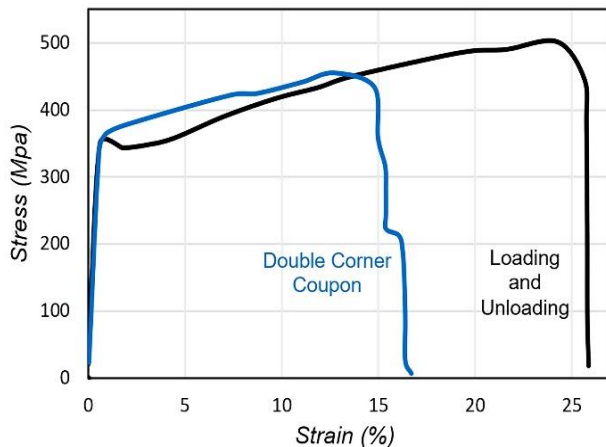
specimen	type	thickness (mm)	E (GPa)	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_f (%)
1, 2	flat	1.0	214	379	424	25.9
4, 5	flat	2.0	220	329	387	20.1
1, 3	corner	1.0	-	354	393	16.3
3, 4	corner	2.0	-	363	400	13.2
average	-	-	217	356	401	18.9

جدول ۳. نتایج تحلیل همگرایی مش‌بندی تیر تحت بارگذاری خمشی.

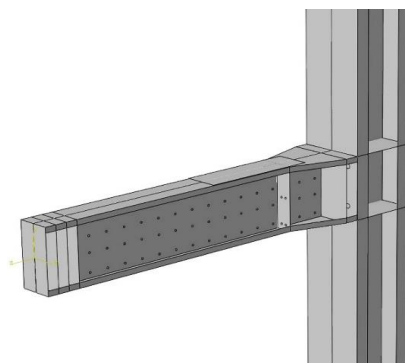
Mesh size (mm)	at beam end Displacement (mm)	Max von mises stress (Mpa)	Displacement deviation (%)	Von-mises stress deviation (%)
5	3.57820	172.1	-	-
4	3.44119	159.3	7%	7.9%
3*	6.3149	154.7	2%	2.9%



شکل ۴: نمونه‌های کوپن تیر و اتصال.



شکل ۵. منحنی تنش و کرنش مصالح مصرفی.



شکل ۶. مدل اجزاء محدود اتصال CCDP.

می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، اجزاء محدود مشخصات هندسی ستون یکسان بوده‌اند.

۳. مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌ها

جهت مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال‌ها از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در مدل‌های اجزاء محدود، رفتار غیرخطی هندسی، غیرخطی مصالح، و تغییرشکل‌های بزرگ مورد توجه قرار گرفته است. ساختار استفاده‌شده برای مدل‌سازی اجزاء اتصال، حالت SHELL است، که کماتش موضعی اعضا را به‌خوبی نشان می‌دهد.^[۲]

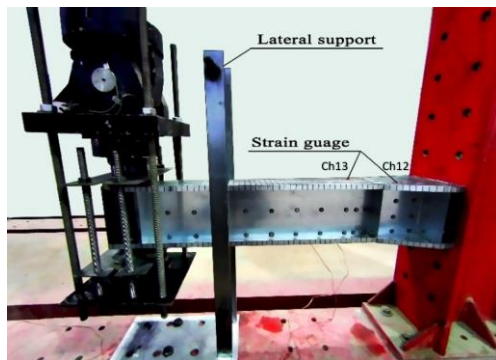
خواص مکانیکی مصالح فولاد تیر، ستون، و ورق اتصال براساس نتایج کوپن آزمون نمونه‌های آزمایشگاهی در دو حالت مسطح و خم به‌دست آمده است. در شکل ۴، نمونه‌های کوپن تیر و اتصال و در شکل ۵، منحنی تنش و کرنش مصالح مشاهده می‌شوند. همچنین در جدول ۲، مشخصات مصالح مصرفی ارائه شده است؛ که در آن، E مدول الاستیسیته‌ی مصالح، $\sigma_{0.2\%}$ تنش تسلیم مصالح، F_u مقاومت کششی نهایی، و ϵ_f کرنش نهایی مصالح هستند. جهت مدل‌سازی پیچ در مدل‌های المان از اتصال‌دهنده‌ی (connector-beam) استفاده شده است، که دوران و تغییرشکل پیچ را در نظر نمی‌گیرد و یک اتصال کامل مابین صفحات در محل پیچ ایجاد می‌کند.

در مدل‌سازی اجزاء محدود، برای مش‌بندی اجزا از مش‌های چهارضلعی با ۴ گره‌ی پوسته‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته‌ی S4R در حالت تنش سه‌بعدی استفاده شده است. برای تعیین اندازه‌ی مناسب مش‌بندی، از تحلیل همگرایی مش استفاده شده است. یک نمونه‌ی اجزاء محدود تیر تحت بارگذاری خمشی ثابت ۱۵ کیلونیوتن متر، با اندازه‌ی مش‌های مختلف تحلیل شده و با مقایسه‌ی تفاوت تغییرمکان و بیشینه‌ی تنش فون میزس حاصل از بارگذاری در یک المان مشخص در انتهای تیر، اندازه‌ی مش مناسب به‌دست آمده است. نتایج تحلیل همگرایی مش تیر در جدول ۳ ارائه شده است. بیشینه‌ی خطای حاصل از اندازه‌ی مش‌بندی، ۲/۹٪ بوده است. جهت افزایش دقت مدل‌سازی، نسبت ابعاد مش‌بندی (aspect-ratio)، در محل اتصال قطعات، کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. مطابق نمونه‌های آزمایشگاهی، بارگذاری مونوتونیک اتصال‌ها تا دوران ۰/۰۷ رادیان در محل اتصال اعمال شده است. در شکل ۶، یک نمونه مدل اجزاء محدود تیر و اتصال مشاهده می‌شود.

۴. راستی‌آزمایی مدل‌های اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی اجزاء محدود از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های $T1L2R1P5$ و $T2L2R1P5$ استفاده شده است.^{۱۹} در شکل ۷، نحوه‌ی نصب و آزمون نمونه‌ی آزمایشگاهی $T1L2R1P5$ مشاهده می‌شود؛ که در آن، ضخامت ورق تیر و اتصال، ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال ۲۰ میلی‌متر؛ و همچنین طول قطعه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر و زاویه‌ی قطعه‌ی R اتصال از راستای تیر، ۱۷ درجه است. در نمونه‌های آزمایشگاهی، مجموعه‌ی تیر و قطعه‌ی اتصال توسط ۱۲ عدد پیچ شماره‌ی ۱۰ به ستون صلب آزمایشگاه متصل شده‌اند. بارگذاری توسط جک ۵۰۰ تنی در انتهای تیر اعمال شده است. جهت ممانعت از کمانش جانبی تیر، تکیه‌گاه جانبی در فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری انتهای تیر قرار داده شده است. جهت ممانعت از کمانش موضعی محل اعمال نیرو، سه عدد سخت‌کننده در انتهای تیر در محل اتکای جک تعبیه شده است. محل اعمال نیرو در انتهای تیر به صورت مفصلی است. در شکل ۸، جزئیات اتکای مفصلی جک به تیر مشاهده می‌شود. جهت مقایسه‌ی کرنش ایجادشده در اجزاء اتصال و تیر، دو عدد کرنش‌سنج در فاصله‌ی ۵ سانتی‌متری محل اتصال تیر به قطعه‌ی CCDP روی لبه‌ی بیرونی بال کششی مطابق شکل ۷ نصب شده است. در جدول ۴، نیز مقایسه‌ی نتایج تحلیل آزمایشگاهی و اجزاء محدود ارائه شده است. در نمونه با ضخامت ۱ میلی‌متر، سختی اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود به ترتیب ۳۹۴۵ و ۴۰۵۸ کیلونیوتن بر متر رادیان بوده است. همچنین لنگر بیشینه‌ی تحمل‌شده توسط مجموعه‌ی تیر و اتصال در دوران ۰/۰۷ رادیان در نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود به ترتیب ۲۴/۳۱ و ۲۴/۸۱ کیلونیوتن متر بوده است. در نمونه با ضخامت ۲ میلی‌متر نیز مشابه نمونه با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، سختی اولیه و لنگر بیشینه‌ی تیر و اتصال در مدل‌های اجزاء محدود بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. کرنش محاسبه‌شده توسط کانال ۱۲ روی بال کششی اتصال و کانال ۱۳ روی بال کششی تیر هم تطابق خوبی با نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود نشان داده‌اند. خطای مدل‌سازی اجزاء محدود نمونه‌های مذکور با روش $RMSE^7$ محاسبه شده است. خطای مدل‌سازی برای نمونه با ضخامت ۱ میلی‌متر، ۸/۸۲٪ و برای نمونه با ضخامت ۲ میلی‌متر در حدود ۹/۱۷٪ بوده است.

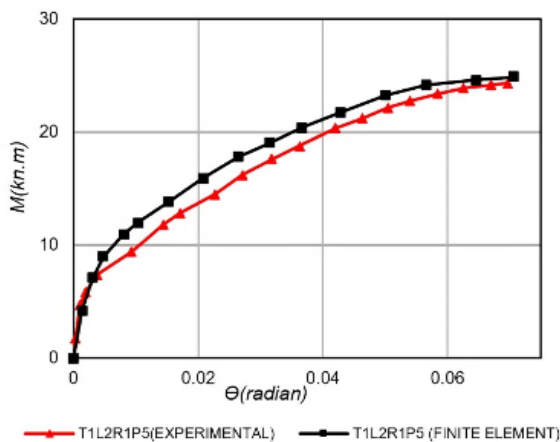
منحنی لنگر- دوران نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود در شکل‌های ۹ و ۱۰ و نوع آسیب و کمانش اجزاء اتصال $T1L2R1P5$ در شکل ۱۱ مشاهده می‌شوند. در نمونه‌ی آزمایشگاهی با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، با لغزش در پیچ‌های ورق تقویتی بال کششی تیر در دوران ۰/۰۵ رادیان، سختی خمشی



شکل ۷. نحوه‌ی نصب و چیدمان نمونه‌ی آزمایشگاهی اتصال $T1L2R1P5$.



شکل ۸. اتصال مفصلی محل اعمال نیروی جک.

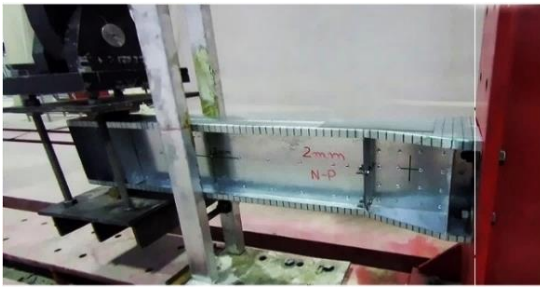


شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی لنگر- دوران نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال $T1L2R1P5$.

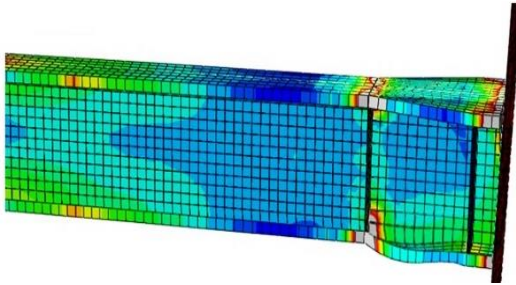
جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال‌های $T1L2R1P5$ و $T2L2R1P5$.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	M_{max} (0.07 rad) (kN.m)	Strain 0.07rad (ch.13) %	Strain 0.07rad (ch.12) %
Experimental T1L2R1P5	3945	24.31	2.93	3.85
Finite element T1L2R1P5	4058	24.81	2.80	3.55
Experimental T2L2R1P5	8933	56.59	2.65	4.04
Finite element T2L2R1P5	9265	58.28	2.49	3.82

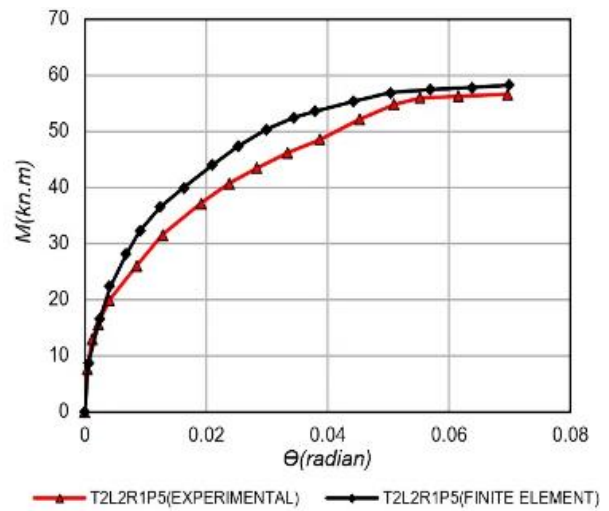
⁷ Root-Mean-Square Error



نمونه‌ی آزمایشگاهی (a)



نمونه‌ی اجزاء محدود. (b)



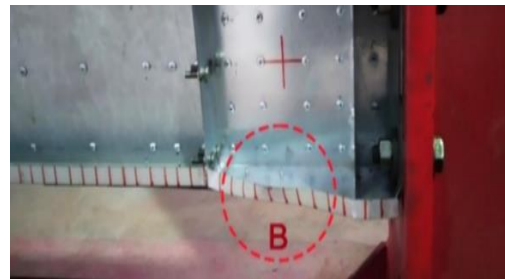
شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی لنگر - دوران نمونه‌ی آزمایشگاهی و اجزاء محدود اتصال T2L2R1P5.

شکل ۱۲. مدل آسیب و کمانش نمونه‌ی T2L2R1P5 تحت بارگذاری مونوتونیک.

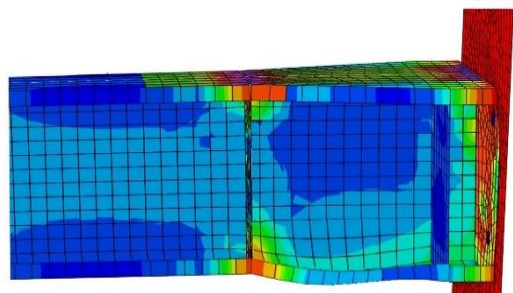
۱ میلی‌متر، قطعه‌ی CCDP علاوه بر افزایش مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی اتصال، از ایجاد تغییرشکل در بر ستون جلوگیری کرده است. در هر دو نمونه‌ی اتصال بررسی شده، کمانش و تغییرشکل ماندگار در تیر ایجاد نشده و قطعه‌ی اتصال به خوبی توانسته است از ایجاد کمانش و تسلیم‌شدگی در تیر و ستون جلوگیری و کمانش را در وسط قطعه‌ی R اتصال متمرکز کند. شکل توزیع تنش و آسیب اتصال‌ها در مدل‌سازی اجزاء محدود تطابق خوبی با مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود، اتصال CCDP به صورت یک فیوز خمشی کارآمد عمل کرده است.

۵. تحلیل پارامتریک اتصال گیردار CCDP

برای بررسی رفتار اتصال‌های نیمه‌گیردار پیشنهادی و تأثیر پارامترهای هندسی دخیل در آن، ۲۱ مدل اجزاء محدود اتصال‌ها، مطابق جدول ۱ ایجاد و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفته‌اند. پارامترهای هندسی دخیل در رفتار اتصال، شامل: ضخامت ورق تیر و اتصال، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی تیر، اندازه‌ی قطعه‌ی ثابت کنترلی P و شیب قطعه‌ی R هستند. براساس آیین‌نامه‌ی طراحی ۱۰۰-S2۴-AISI^[۱۷]، ضخامت مجاز برای ساخت قطعات سردنورده، ۵/۰ تا ۳ میلی‌متر است. جهت بررسی تأثیر ضخامت ورق در رفتار اتصال، تیر و اجزاء اتصال با ضخامت‌های ۱، ۲، و ۳ میلی‌متر ایجاد شده است. قطعه‌ی ثابت P اتصال، وظیفه‌ی کنترل و دورکردن محل ایجاد کمانش اجزاء اتصال از بر ستون را بر عهده دارد. طول قطعه‌ی P در چهار حالت مختلف: صفر، ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر بررسی شده است. قطعه‌ی R اتصال، محل ایجاد مفصل پلاستیک از پیش تعیین شده است. همچنین استهلاک انرژی در قطعه‌ی R رخ می‌دهد. برای بررسی تأثیر شیب قطعه‌ی R در رفتار اتصال، نمونه‌های اجزاء محدود با شیب ۹ و ۱۷ درجه برای قطعه‌ی R ایجاد شده‌اند. اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال تیر و اتصال، تأثیر زیادی در سختی اتصال و نحوه‌ی آسیب و کمانش آن دارد. بدین جهت، نمونه‌هایی با اندازه‌ی لبه‌های سخت‌کننده‌ی ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر ایجاد و نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه‌ها مقایسه شده‌اند.



نمونه‌ی آزمایشگاهی (a)



نمونه‌ی اجزاء محدود. (b)

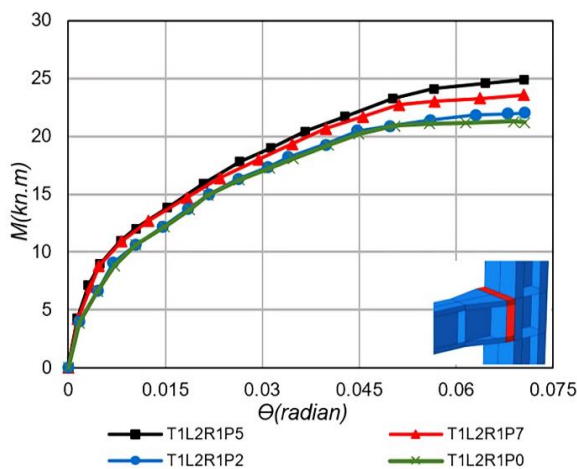
شکل ۱۱. مدل آسیب و کمانش نمونه‌ی T2L2R1P5 تحت بارگذاری مونوتونیک.

اتصال کاهش می‌یابد و در اجزاء اتصال، کمانش و تغییرشکلی تا دوران ۰/۰۲ رادیان ایجاد نمی‌شود. با ادامه‌ی بارگذاری، کمانش محدود لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری قطعه‌ی CCDP در نقطه‌ی B آغاز و در بال فشاری قطعه‌ی R گسترش می‌یابد. با تمرکز تغییرشکل و کمانش در وسط قطعه‌ی R اتصال، از ایجاد تغییرشکل در بر ستون و کمانش موضعی در تیر جلوگیری می‌شود. در دوران ۰/۰۷ رادیان، ۶٪ دوران اتصال به دلیل لهیدگی ورق تقویتی و ۹۴٪ دوران، به دلیل کمانش لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری قطعه‌ی R اتصال رخ داده است.

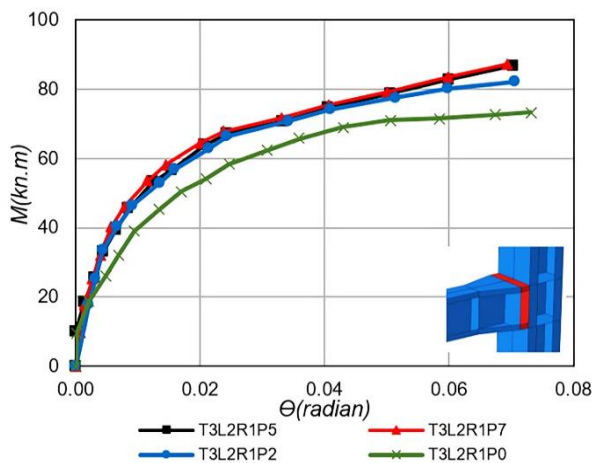
مدل آسیب اجزاء اتصال T2L2R1P5 در شکل ۱۲ نشان داده شده است؛ که در آن، لغزش پیچ و لهیدگی ورق تقویتی مشاهده نشده است. در اتصال اخیر، تغییرشکل در وسط بخش R قطعه‌ی CCDP به صورت کمانش موضعی لبه‌ی سخت‌کننده و بال فشاری اتصال رخ داده و همانند اتصال با ضخامت ورق

اتصال کاهش شدیدتری نسبت به اتصال‌های با ضخامت ورق کمتر داشته و در بارگذاری نهایی در حدود ۱۹٪ کاهش یافته است.

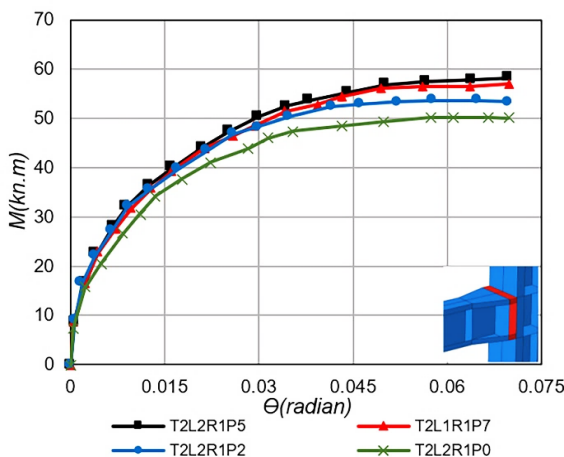
در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، منحنی‌های لنگر دوران اتصال‌ها و در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸، توزیع تنش و نحوه‌ی کماتش نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اتصال‌ها با



شکل ۱۳. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.



شکل ۱۴. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.



شکل ۱۵. نمودار لنگر دوران اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر.

۱.۵. بررسی تأثیر ضخامت و اندازه‌ی قطعه‌ی ثابت P در رفتار اتصال

تأثیر قطعه‌ی P در رفتار اتصال CCDP وابستگی مستقیم به ضخامت ورق استفاده‌شده در ساخت اجزاء اتصال دارد. برای بررسی تأثیر قطعه‌ی P در رفتار اتصال، ۳ گروه مختلف مدل اجزاء محدود با ضخامت ۱، ۲، و ۳ میلی‌متر تحلیل و مقایسه شده‌اند. در تمام مدل‌های مذکور، اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، طول و شیب قطعه‌ی R به ترتیب: ۲۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر، و ۱۷ درجه است. مدل T1L2R1P0، مدل اتصال بدون قطعه‌ی P است. مدل‌های دیگر اتصال CCDP با اضافه‌شدن قطعه‌ی P به طول ۲۰، ۵۰، و ۷۰ میلی‌متر ما بین ستون و قطعه‌ی R ایجاد شده‌اند. در جدول ۵، نتایج تحلیل نمونه‌ها ارائه شده است.

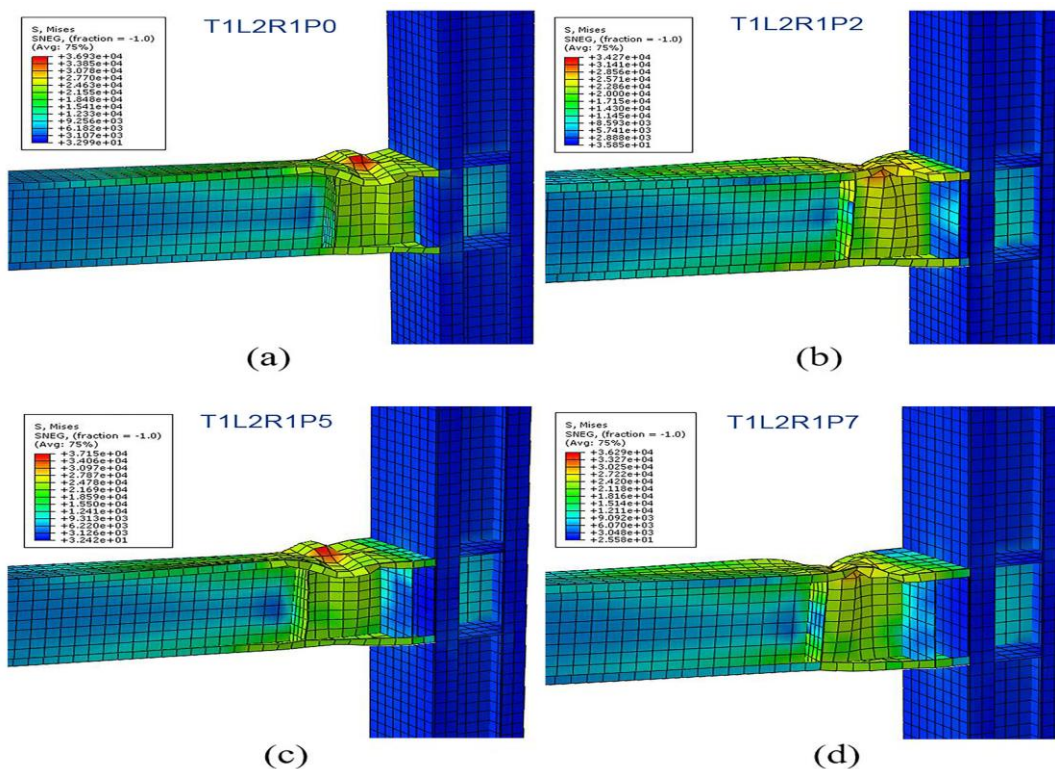
در ضخامت ۱ میلی‌متر، اتصال با قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۵۰ میلی‌متر، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده است. در صورت استفاده از قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۷۰ میلی‌متر، مقاومت در حدود ۳٪ نسبت به اتصال با اندازه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در اتصال با قطعه‌ی P با اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر کاهش مقاومت نسبت به اتصال با اندازه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر، در حدود ۹٪ بوده است. در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P در اتصال مقاومت خمشی اتصال در حدود ۱۶٪ کاهش می‌یابد.

رفتار اتصال‌ها با ضخامت ۲ میلی‌متر مشابه اتصال‌ها با ضخامت ۱ میلی‌متر است. در اتصال اخیر هم بیشترین مقاومت خمشی در اتصال با اندازه‌ی قطعه‌ی P برابر ۵۰ میلی‌متر رخ داده است. با افزایش اندازه‌ی قطعه‌ی P، کاهش مقاومت اتصال محسوس نیست. در صورت حذف قطعه‌ی P، مقاومت اتصال در حدود ۱۶٪ کاهش می‌یابد.

در اتصال‌های با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، مقاومت خمشی اتصال با قطعه‌ی P به طول ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر، یکسان بوده است. با کاهش طول قطعه‌ی اخیر، مقاومت خمشی کاهش یافته است. در صورت حذف قطعه‌ی P، مقاومت خمشی

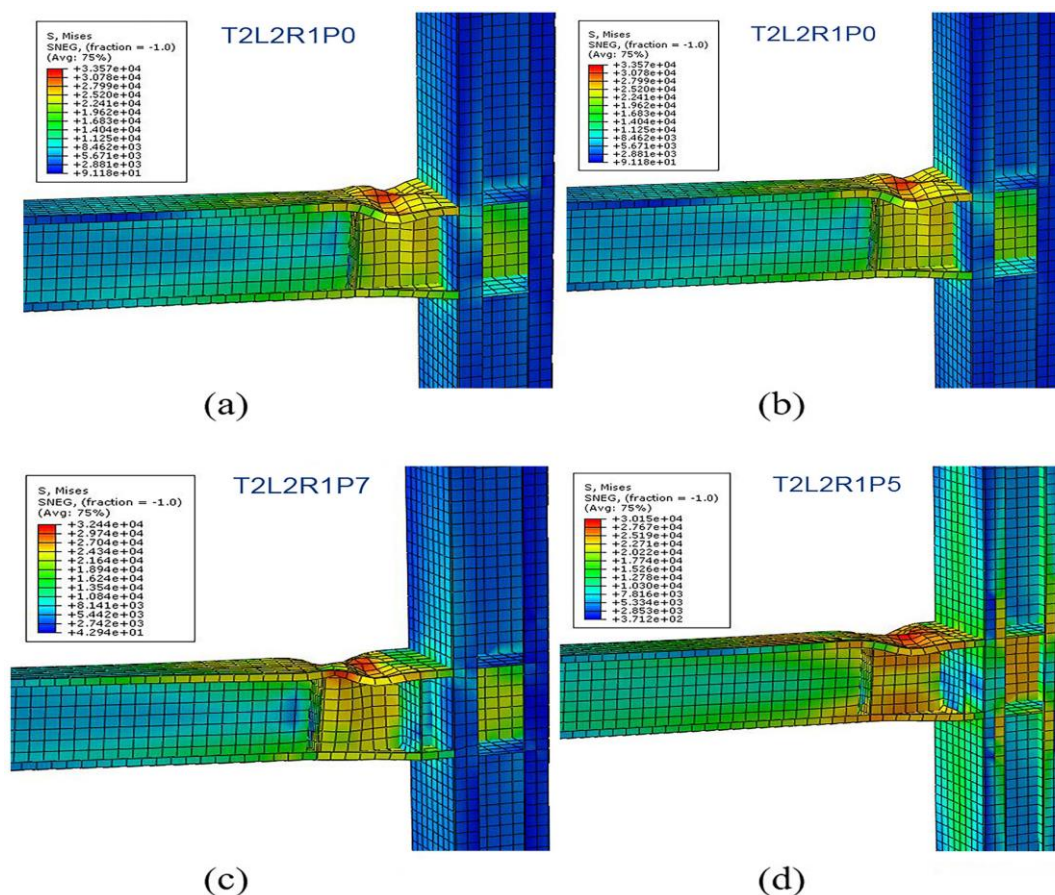
جدول ۵. نتایج تحلیل مونوتونیک نمونه‌های اجزاء محدود با طول p مختلف.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad (kN.m)
T1L2R1P0	3965	21.2
T1L2R1P2	3998	22.03
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L2R1P7	4001	23.55
T2L2R1P0	8825	50.04
T2L2R1P2	8896	53.36
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L2R1P7	8920	56.93
T3L2R1P0	22560	73.29
T3L2R1P2	22630	82.20
T3L2R1P5	23880	87.24
T3L2R1P7	23400	87.36



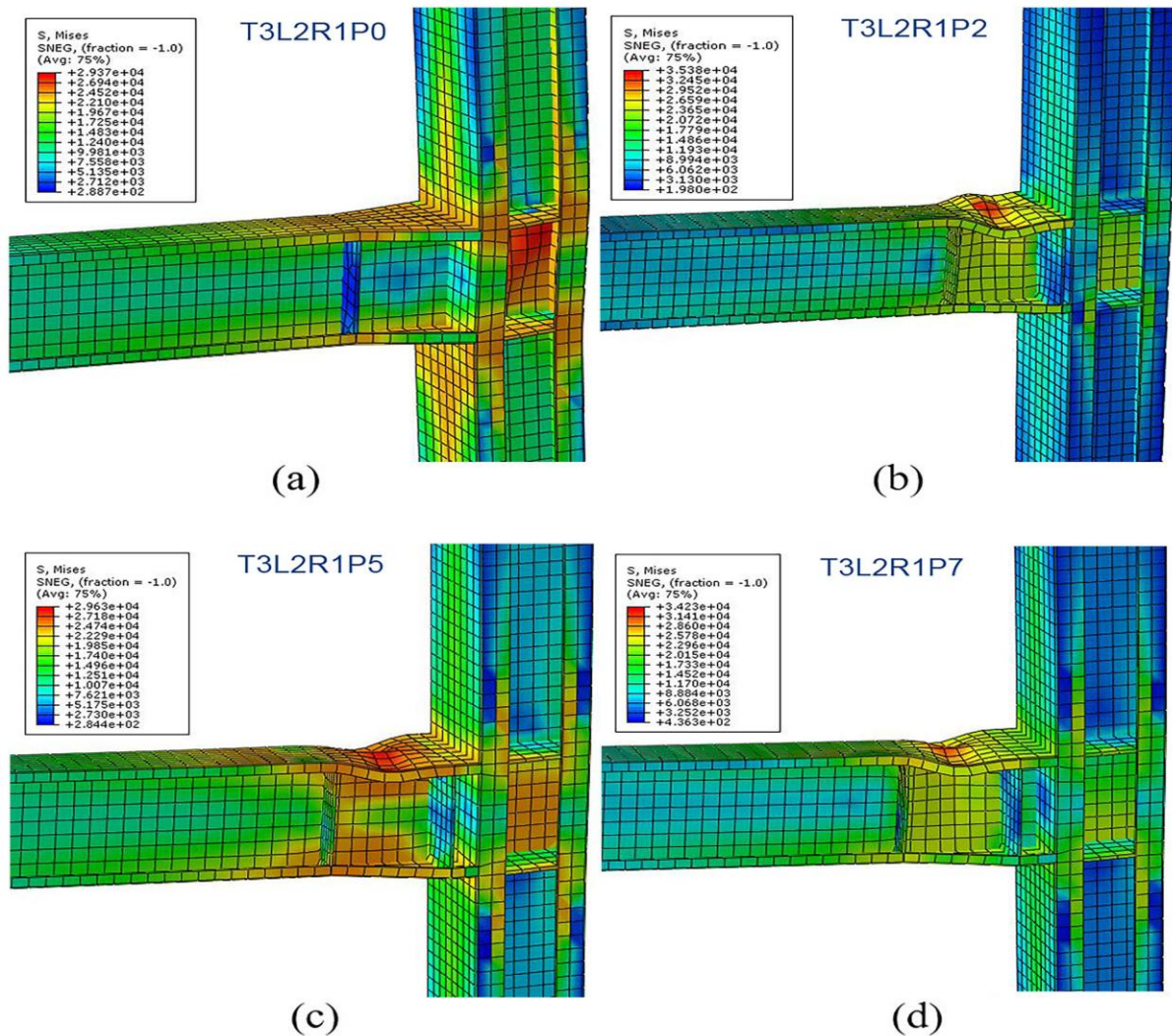
(a) اتصال T1L2R1P0 (b) اتصال T1L2R1P2 (c) اتصال T1L2R1P5 (d) اتصال T1L2R1P7

شکل ۱۶. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm^2).



(a) اتصال T2L2R1P0 (b) اتصال T2L2R1P2 (c) اتصال T2L2R1P5 (d) اتصال T2L2R1P7

شکل ۱۷. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm^2).



(a) اتصال T3L2R1P0؛ (b) اتصال T3L2R1P2؛ (c) اتصال T3L2R1P5؛ (d) اتصال T3L2R1P7.

شکل ۱۸. توزیع تنش در اتصال‌های CCDP با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی قطعه‌ی P متغیر (N/cm²):

مدل‌سازی و نتایج مقایسه شده‌اند. در مدل‌های R₁ عرض بال تیر توسط قطعه‌ی R با شیب ۱۷ درجه به بال ستون که ۲۴۰ میلی‌متر است، متصل شده است. در مدل R₂ قطعه‌ی R عرض بال تیر را با شیب ۹ درجه به ۳/۴ عرض بال ستون متصل می‌کند. در شکل ۱۹، جزئیات دو مدل اتصال و در شکل ۲۰، منحنی لنگر- دوران اتصال‌ها مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۶، نتایج حاصل از تحلیل ارائه شده است.

در اتصال‌های با ورق ۱ میلی‌متر، رفتار دو اتصال یکسان بوده و هر دو اتصال، مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی یکسانی داشته‌اند. در مدل با ضخامت ۲ میلی‌متر، مقاومت خمشی اتصال تا دوران ۰/۰۲ رادیان در هر دو مدل یکسان بوده است؛ ولی در اتصال با قطعه‌ی R₂، مقاومت خمشی نهایی در حدود ۱۳٪ نسبت به اتصال R₁ کاهش یافته است. در اتصال‌های با ضخامت ۳ میلی‌متر، سختی اولیه‌ی دو اتصال یکسان بوده است. در دوران ۰/۰۴ رادیان، اتصال با قطعه‌ی R₂ دچار کاهش مقاومت خمشی شده و این روند تا بارگذاری نهایی و دوران ۰/۰۷ رادیان ادامه داشته است. در بارگذاری نهایی، مقاومت نهایی اتصال R₂ در حدود ۱۴٪ نسبت به اتصال R₁ کاهش یافته است. همچنین تنش منتقل‌شده به جان ستون در اتصال اخیر، در حدود ۱۵٪ کاهش نشان داده است.

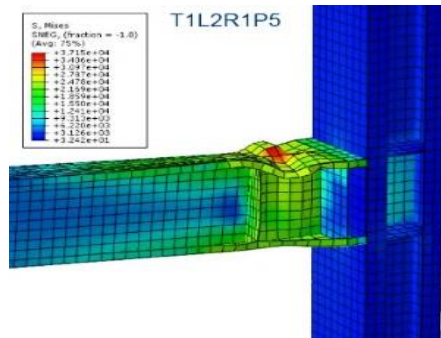
ضخامت ورق‌های ۱ و ۲ میلی‌متر، رفتار تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند. در اتصال‌های اخیر، کمانش موضعی سخت‌کننده‌ی بال در دوران ۰/۰۳ رادیان آغاز و با افزایش بارگذاری، تغییرشکل در بال فشاری قطعه‌ی R گسترش یافته و در دوران ۰/۰۵ رادیان، بال فشاری اتصال کمانش کرده است. همچنین، در اتصال‌های مذکور هیچ کمانش یا تغییرشکلی در تیر مشاهده نشده و اتصال ذکرشده از انتقال تغییرشکل‌های بزرگ و کمانش به جان ستون ممانعت کرده است.

در اتصال‌های با ضخامت بالای ورق، استفاده از قطعه‌ی P، تأثیر زیادی در دور کردن تنش از بر ستون و ممانعت از انتقال تغییرشکل‌های بزرگ به ستون دارد. در اتصال‌ها با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P، جان ستون کمانش می‌کند. استفاده از قطعه‌ی P در اتصال‌های CCDP ضروری به نظر می‌رسد. در صورت عدم استفاده از قطعه‌ی P در اتصال، نمی‌توان از کنترل محل کمانش اطمینان حاصل کرد.

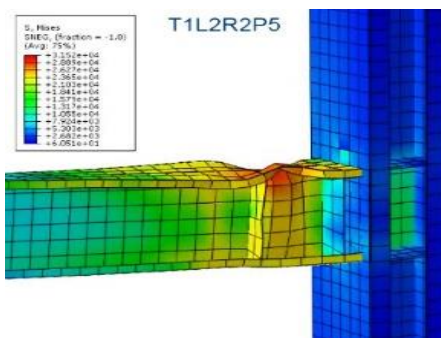
۲.۵. تأثیر شیب قطعه‌ی R در رفتار اتصال گیردار CCDP

قطعه‌ی R، وظیفه‌ی کنترل محل ایجاد مفصل پلاستیک در اتصال را دارد و کمانش اتصال در بال فشاری آن رخ می‌دهد. با توجه به تأثیر هندسه‌ی قطعه‌ی R در توزیع تنش، کنترل کمانش و محل آسیب، اتصال در دو هندسه‌ی مختلف

در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، توزیع تنش و کماتش بال فشاری مدل‌ها مشاهده می‌شود. در تمامی مدل‌ها، کماتش بال فشاری اتصال در محل پیش‌بینی شده و در وسط قطعه‌ی R رخ داده و تغییر در عرض قطعه‌ی R، تأثیری در رفتار فیز

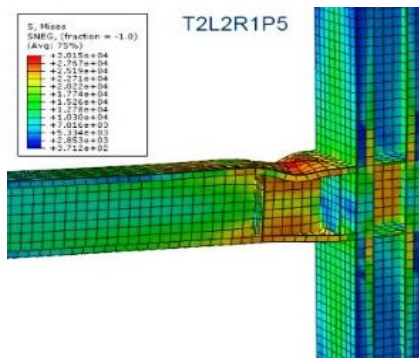


(a) اتصال T1L2R1P5

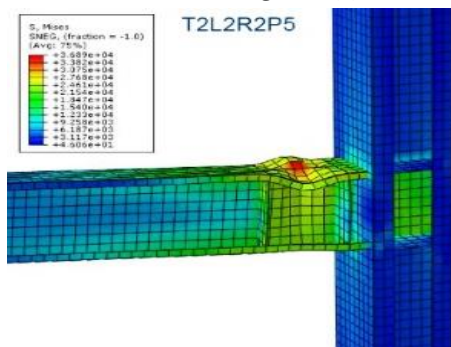


(b) T1L2R2P5

شکل ۲۱. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۱ میلی‌متر (N/cm^2)

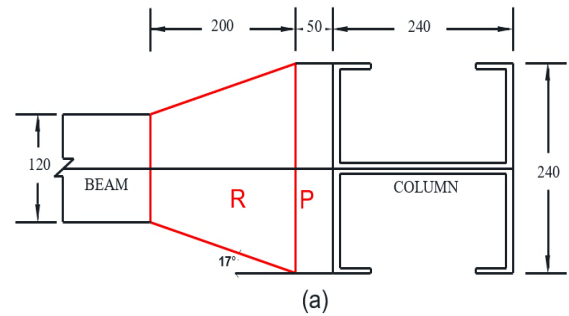


(a) اتصال T2L2R1P5

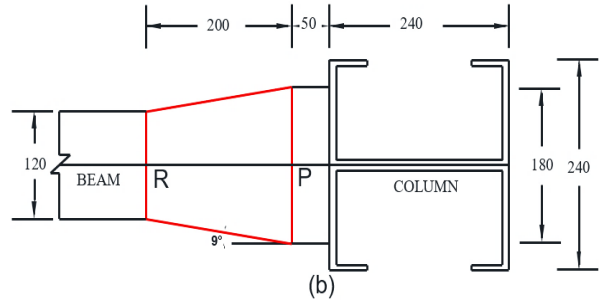


(b) T2L2R2P5

شکل ۲۲. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۲ میلی‌متر (N/cm^2)



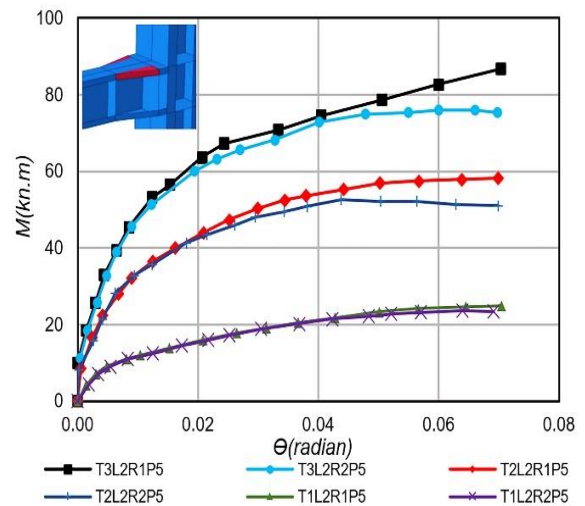
(a)



(b)

(a) اتصال‌ها با قطعه‌ی R۱؛ (b) اتصال‌ها با قطعه‌ی R۲

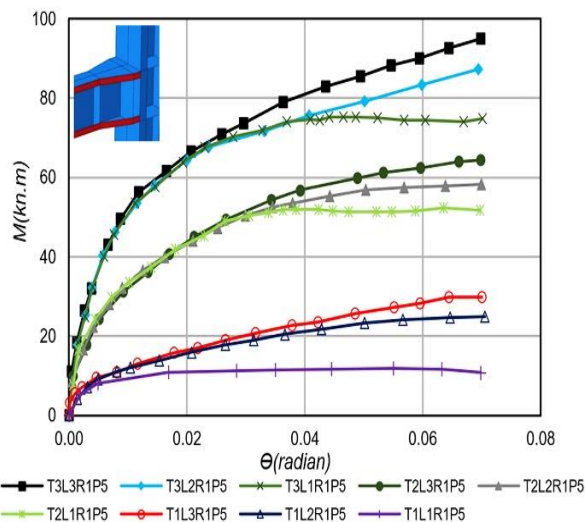
شکل ۱۹. اتصال‌های CCDP با شیب قطعه‌ی R مختلف (ابعاد به میلی‌متر):



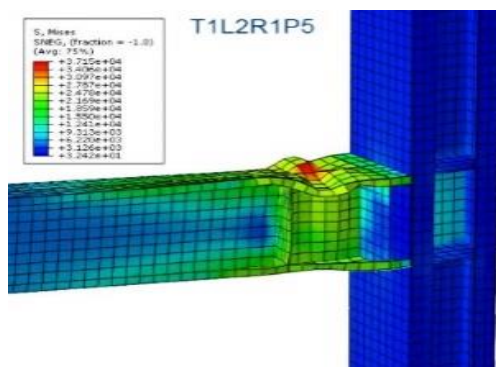
شکل ۲۰. منحنی لنگر دوران اتصال‌های CCDP با شیب قطعه‌ی R مختلف.

جدول ۶. نتایج تحلیل نمونه‌های اجزاء محدود با شیب قطعه‌ی R متغیر.

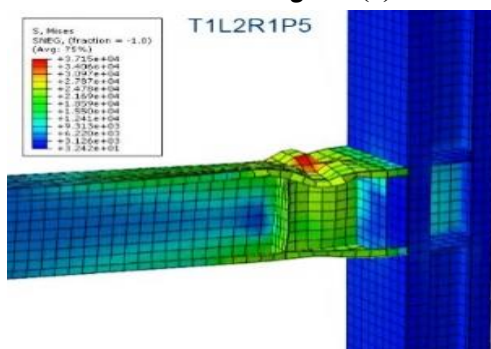
Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad (kN.m)
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L2R2P5	4062	23.44
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L2R2P5	8898	51.01
T3L2R1P5	23880	87.24
T3L2R2P5	23015	75.38



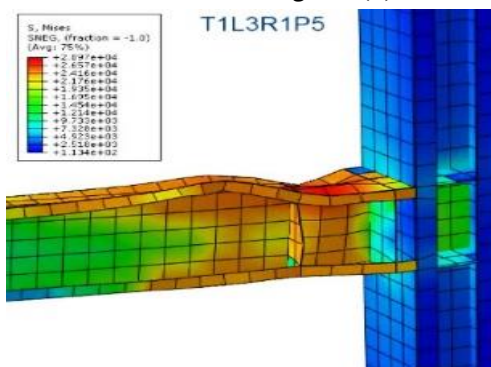
شکل ۲۴. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی L در مقاومت خمشی اتصال CCDP.



(a) اتصال T₁L₂R₁P₅



(b) اتصال T₁L₂R₁P₅



(c) اتصال T₁L₃R₁P₅

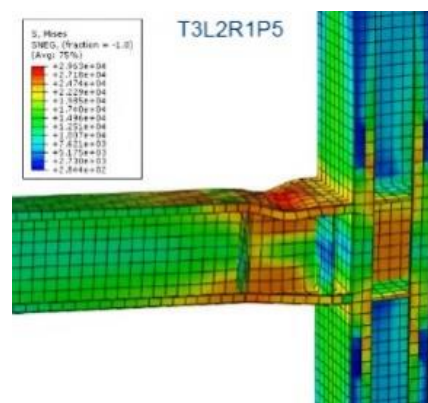
شکل ۲۵. توزیع تنش و کماتش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2).

خمشی آن نداشته است؛ ولی کاهش عرض قطعه‌ی R باعث کاهش مقاومت خمشی اتصال، علی‌الخصوص در مدل‌های با ضخامت ورق بالاتر شده و تنش انتقال‌یافته به جان ستون را کاهش داده است.

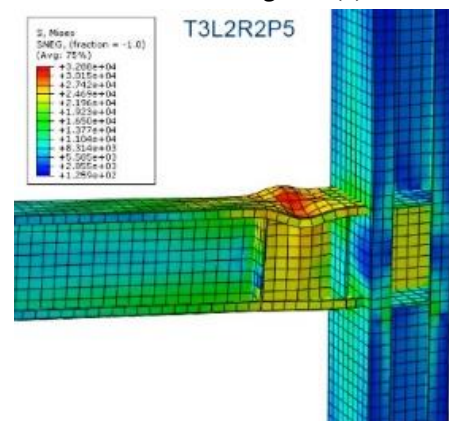
۳.۵. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال (L) در رفتار اتصال‌های CCDP

ورق تقویتی و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال، دو پارامتر هندسی کنترل‌کننده‌ی محل ایجاد مفصل پلاستیک در اتصال CCDP هستند. استفاده از ورق تقویتی بال باعث افزایش مقاومت خمشی انتهای تیر و تقویت اتصال پیچی آن می‌شود و از ایجاد کماتش در تیر و جداسازی ورق اتصال انتهایی جلوگیری می‌کند. همچنین، خروج از محوریت لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال اتصال از راستای اعمال لنگر، باعث کاهش تأثیر سخت‌کنندگی و ایجاد کماتش موضعی در اتصال می‌شود. جهت بررسی تأثیر پارامتر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده در رفتار اتصال، مدل‌های اجزاء محدود با اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر ایجاد شده‌اند. در تمامی مدل‌ها، اندازه‌ی قطعه‌ی P و شیب قطعه‌ی R اتصال ثابت و به ترتیب ۵۰ میلی‌متر و ۱۷ درجه بوده است. در شکل ۲۴، منحنی لنگر دوران اتصال‌ها با اندازه‌ی لبه‌های مختلف و در شکل‌های ۲۵ الی ۲۷، توزیع تنش و کماتش موضعی بال فشاری اتصال‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین، در جدول ۷، خلاصه‌ی نتایج ارائه شده است.

در مدل‌ها با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر، کماتش از محل لبه‌ی سخت‌کننده در وسط قطعه‌ی R آغاز و به بال فشاری اتصال گسترش یافته است. در آن‌ها، تغییرشکل در ستون ایجاد نشده است، ولی در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی

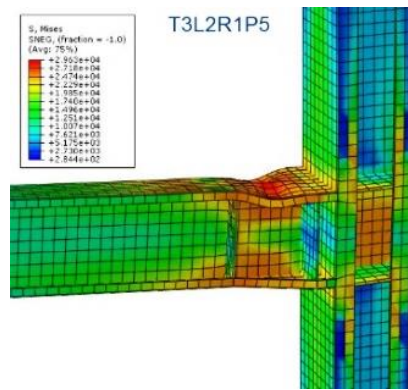


(a) اتصال T₃L₂R₁P₅

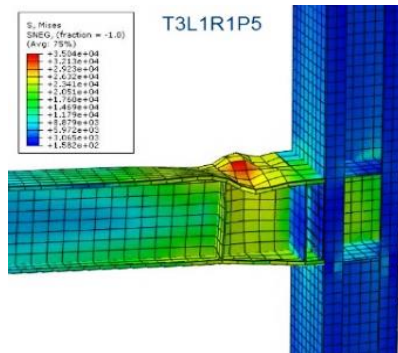


(b) اتصال T₃L₂R₂P₅

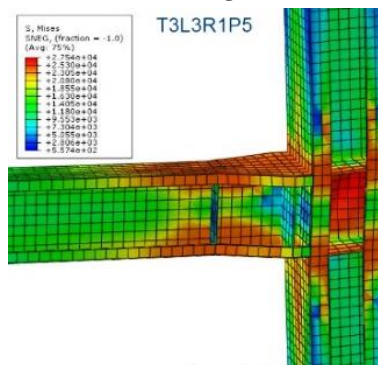
شکل ۲۶. تأثیر تغییر شیب قطعه‌ی R در توزیع تنش در اتصال CCDP با ضخامت ۳ میلی‌متر (N/cm^2).



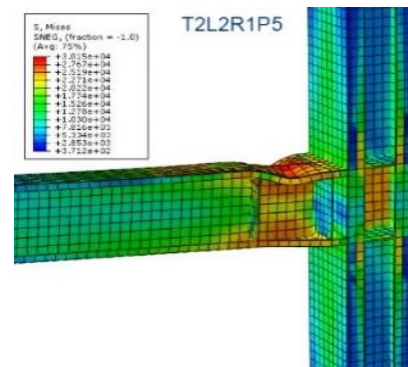
(a) اتصال T3L1R1P5؛



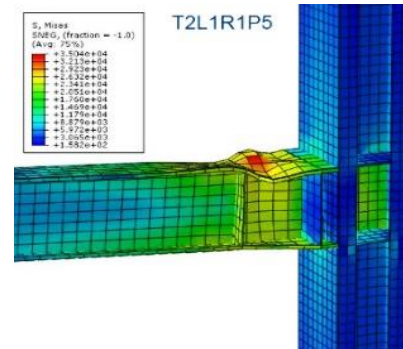
(b) اتصال T3L2R1P5؛



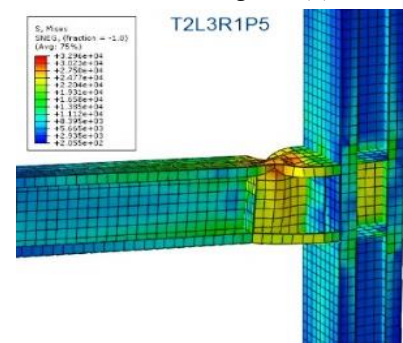
(c) اتصال T3L3R1P5؛



(a) اتصال T2L1R1P5؛



(b) اتصال T2L2R1P5؛



(c) اتصال T2L3R1P5؛

شکل ۲۶. توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2).

جدول ۷. تأثیر اندازه‌ی لبه‌ی L در مقاومت خمشی و سختی اولیه‌ی

اتصال CCDP.

Specimen	Initial stiffness (kN.m/rad)	Moment at 0.07 rad(kN.m)
T1L1R1P5	3856	10.76
T1L2R1P5	4058	24.85
T1L3R1P5	4503	29.84
T2L1R1P5	8854	51.69
T2L2R1P5	9065	58.26
T2L3R1P5	9154	64.03
T3L1R1P5	21650	74.02
T3L2R1P5	23880	78.23
T3L3R1P5	25610	95.12

شکل ۲۷. توزیع تنش و کمانش موضعی در مدل‌های اتصال با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر و اندازه‌ی لبه‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر (N/cm^2).

سخت‌کننده‌ی ۳۰ میلی‌متر، به دلیل سختی بالای لبه‌ی بال، کمانش به تیر منتقل شده است. تغییر در اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال باعث تغییر شدید در مقاومت خمشی اتصال‌ها می‌شود. مقاومت خمشی نمونه با لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۱۰ میلی‌متری نسبت به مدل با اندازه‌های لبه‌های سخت‌کننده‌ی ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۴۰ و ۹۰ درصد و سختی اولیه در حدود ۵٪ کاهش یافته است.

در اتصال‌ها با ضخامت ۲ میلی‌متر، با افزایش اندازه‌ی لبه‌ی L، رفتار اتصال بهبود یافته و کاهش مقاومت خمشی بعد از لحظه‌ی کمانش لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال کمتر شده است. اتصال با اندازه‌ی لبه‌ی ۳۰ میلی‌متر، مقاومت خمشی بالاتر و کاهش مقاومت خمشی بعد از کمانش بال فشاری کمتری داشته است. اتصال با اندازه‌ی لبه‌ی ۲۰ میلی‌متر، توزیع تنش بهتری داشته و کمترین تنش و تغییرشکل به ستون منتقل شده است. با تغییر در اندازه‌ی لبه‌ی L، تغییری در محل ایجاد کمانش در بال فشاری اتصال رخ نداده

و اتصال همچنان به‌عنوان فیوز خمشی بوده و محل کمانش را کنترل کرده است.

در اتصال‌ها با ضخامت ۳ میلی‌متر، مقاومت خمشی تا دوران ۰/۲ رادیان و قبل از ایجاد کمانش در لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال فشاری یکسان بوده است. با افزایش بارگذاری در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۱۰ میلی‌متر، افت شدید مقاومت خمشی مشاهده می‌شود. در مدل با اندازه‌ی لبه‌ی ۳۰ میلی‌متر، کمانش در قطعه‌ی اتصال رخ نداده و تغییرشکل و تنش به جان ستون هدایت شده است. در اتصال‌ها با ضخامت ورق ۳ میلی‌متر، استفاده از اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی ۳۰ میلی‌متری باعث افزایش ۸ درصدی سختی اتصال شده و کنترل محل ایجاد خرابی در قطعه‌ی CCDP را غیرممکن ساخته است. تعیین هندسه‌ی مناسب برای کارکرد بهینه‌ی اتصال CCDP، مستلزم کنترل هم‌زمان تأثیر ضخامت ورق و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی اتصال است. در صورت استفاده از ورق با ضخامت بالاتر و لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بزرگ‌تر، به‌دلیل سختی بالای اتصال نسبت به سختی تیر و ستون، تغییرشکل‌های بزرگ و کمانش موضعی به تیر و ستون هدایت می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک نوع اتصال نیمه‌گیردار نوین با موقعیت آسیب کنترل‌شده (CCDP) برای قاب‌های فولادی سبک سردنوردشده (CFS) معرفی شده است؛ که براساس آیین‌نامه‌ی Eurocode ۳^[۱۸] در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار طبقه‌بندی می‌شود. هدف اصلی از توسعه‌ی اتصال CCDP، ایجاد گیرداری نسبی در اتصال و تمرکز خرابی و تسلیم در ناحیه‌ای از پیش تعیین‌شده است، تا از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون و بروز کمانش موضعی در تیر ممانعت شود. برای دستیابی به هدف تعیین‌شده، ۲۱ مدل اجزاء محدود با پارامترهای هندسی مختلف در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و با داده‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. مدل‌سازی اجزاء محدود اتصال‌ها، دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها داشته و در بیشتر موارد، خطای مدل‌های اجزاء محدود کمتر از ۱۰٪ بوده است.

اتصال جدید CCDP از دو بخش R و P تشکیل شده است. قطعه‌ی P جهت دور کردن کمانش و محل آسیب از بر ستون به اتصال اضافه شده است. قطعه‌ی R، وظیفه‌ی کنترل محل آسیب را بر عهده دارد. رفتار اتصال جدید وابسته به

پارامترهای ضخامت ورق، شیب و با عرض قطعه‌ی R، طول قسمت کنترلی P، و اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال اتصال است. تحلیل پارامتریک اتصال پیشنهادی نشان داده است که افزایش ضخامت ورق از ۱ به ۳ میلی‌متر، موجب رشد چشمگیر ظرفیت خمشی و افزایش سختی اولیه می‌شود. این موضوع بیانگر وابستگی مستقیم عملکرد اتصال به ضخامت ورق است.

افزایش طول قطعه‌ی P از ۲۰ به ۷۰ میلی‌متر می‌تواند مقاومت خمشی را تا ۱۹٪ و سختی اولیه‌ی اتصال را تا ۱۲٪ افزایش دهد. در حالی که حذف قطعه‌ی P مانع از هدایت مفصل پلاستیک به محل از پیش تعیین‌شده می‌شود و احتمال ایجاد مفصل پلاستیک در بر ستون را افزایش می‌دهد. افزایش زاویه‌ی شیب قطعه‌ی R از ۹ به ۱۷ درجه، مقاومت خمشی اتصال را در حدود ۱۳٪ افزایش داده و توزیع تنش مناسب‌تری را در مقطع اتصال ایجاد کرده است. بررسی اثر اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال (L)، مشخص شد که افزایش اندازه از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر، باعث افزایش مقاومت خمشی اتصال تا ۹۰٪ شده است. افزایش اندازه‌ی لبه‌ی سخت‌کننده‌ی بال در اتصال‌ها با ضخامت ورق بالا، باعث افزایش شدید سختی اتصال می‌شود و رفتار فیوز خمشی اتصال را مختل می‌کند و مفصل پلاستیک را به انتهای تیر هدایت می‌کند. با طراحی مناسب پارامترهای هندسی اتصال و کنترل سختی آن در مقایسه با سختی خمشی تیر و ستون، می‌توان رفتار پایدار و مقاومت خمشی مناسب اتصال را تأمین کرد. به‌طوری که در بیشتر نمونه‌های اتصال پیشنهادی، در دوران بیشینه‌ی ۰/۰۷ رادیان، هیچ نوع کمانش و تغییرشکل ماندگار در ستون یا تیر ثبت نشده است.

اتصال نیمه‌گیردار CCDP با کنترل محل آسیب، بهبود مقاومت خمشی، و سهولت ساخت، راهکاری کارآمد برای استفاده در قاب‌های فولادی سردنوردشده به‌ویژه در نواحی لرزه‌خیز فراهم می‌سازد، که تمرکز آسیب اهمیت ویژه‌ای دارد. اتصال CCDP نه فقط موجب افزایش ایمنی سازه در برابر بارهای جانبی می‌شود، بلکه با توجه به کاهش مصرف مصالح، راه‌حلی اقتصادی نیز محسوب می‌شود. طرح پیشنهادی اخیر، یک رویکرد عملی و مقاوم برای ارتقاء عملکرد سازه‌ای و ایمنی سیستم‌های فولادی سبک تحت تقاضاهای تغییرشکل غیرالاستیک ارائه می‌دهد. این تذکر لازم است که استفاده از اتصال پیشنهادی در کارهای اجرایی نیازمند بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بیشتر و همچنین ارائه‌ی روش‌های دقیق طراحی است.

منابع - References

1. YE, J., Becque, J., Hajirasouliha, I., Mojtabaei, S. M. and LIM, J. B. P. 2018. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering Structures*, 161, pp. 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.070>.
2. Mojtabaei, S. M. Kabir, M. Z. Hajirasouliha, I. M. Kargar. 2018. Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames.

- Journal of Constructional Steel Research*, 143, pp.18-31. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.013>.
3. Serror, M.H., E.M. Hassan, and S.A. Mourad. 2016. Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, pp.216-228. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.005>.
4. James B.P Lim, Gregory J. Hancock, G. Charles Clifton, Cao Hung Pham, 2016. DSM for ultimate

- strength of bolted moment-connections between cold-formed steel channel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp.196-203. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.005>.
5. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. 2019. Seismic performance of cold-formed steel bolted moment connections with bolting friction-slip mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, 156, pp. 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.013>.
6. Ye, J., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I. and Pilakoutas, K. 2020. Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames. *Thin-Walled Structures*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>.
7. McCrum, D. P., Simon, J., Grimes, M., Broderick, B. M., Lim, J. B. P. and Wrzesien, A. M. 2019. Experimental cyclic performance of cold-formed steel bolted moment resisting frames. *Engineering Structures*, 181, pp.1-14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.063>.
8. Hassan, E. M., Serror, M. H. and Mourad, S. A. 2017. Numerical prediction of available rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, pp.84-98. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
9. Bagheri Sabbagh, A., Petkovski, M., Pilakoutas, K. and Mirghaderi, R., 2012. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections, FE modelling frame buildings. *Journal of constructional steel research*, 80, pp.100-108. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.010>.
10. Seok, S., Lee, J., Sik Choi, C. and Hwang, H. S., 2022. A practical design of cold-formed steel bolted moment connection: numerical investigation with an improved bolt slip bearing model. *J. Build Engineering*, 62. pp.1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105345>.
11. Papargyriou, I., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I., Becque, J. and Pilakoutas, K. 2022. Cold-formed steel beam-to-column bolted connections for seismic applications. *Thin-Walled Structures*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108876>.
12. Senapati, S. and Sangle, K. K. 2022. Nonlinear static analysis of cold-formed steel frame with rigid connections. *Results in Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100503>.
13. Shahini, M., Sabbagh, A. B., Davidson, P. and Mirghaderi. 2019. Development of cold-formed steel moment-resisting connections with bolting friction-slip mechanism for seismic applications. *Thin-walled structures*, 141, pp. 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.011>.
14. Ghasem Pachideh, Mohammadali Kafi, Majid Gholhaki. 2020. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, pp. 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.007>.
15. Ghasem Pachideh, Majid Gholhaki and Mohammadali Kafi. 2020. Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Steel and Composite Structures*, 36(2), pp. 197-211. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.36.2.197>.
16. Mohamed E. M., Alao E. S., Ahmed E., Ahmed E. and Hani S., Effect of end-bearing connection configuration on static response of full-scale CFS trusses. 2026. *Journal of Constructional Steel Research*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109988>.
17. AISI-S100-24. 2024. North American specification for the design of cold-formed steel structural members. USA, Chicago. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.010>.
18. Eurocode 3. 2023. Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
19. M.R. Farajpour, J. Saburi., Y. Hosseinzadeh. 2026. DSM-based design framework and monotonic behavior of a novel semi-rigid flexural fuse moment connection for cold-formed steel frames. *Journal of Structures*, submitted.



Research Note

Neural Network Models for Predicting Fracture Energy and Toughness of Asphalt Mixtures Based on Semi-Circular Bending (SCB) Test Results

Mohammad Samanipour, Mohammad Zia Alavi and Abbas Babazadeh*

School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* corresponding author: (ababazadeh@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 5 February 2025

Revised: 16 February 2025

Accepted: 5 March 2025

Keywords:

Asphalt mixtures,
semi-circular bending test,
fracture energy,
fracture toughness,
neural network.

Abstract

The measurement of failure characteristics in the semi-circular bending (SCB) test of asphalt mixtures has significantly expanded over the last decade, with laboratory study results being published in numerous studies. The purpose of this article is to develop neural network models to predict the fracture energy and fracture toughness of asphalt mixtures based on data mining principles. For this purpose, 3290 data points from SCB fracture test results of asphalt samples were collected from 102 credible articles. Out of these, 1627 data points are used to predict fracture energy and 1663 data points are used to predict fracture toughness.

The input layer of the neural networks includes data collected on fracture mode, loading rate, test temperature, sample thickness, notch dimension, presence of modifier, maximum nominal aggregate size, air void percentage, binder percentage, aging, and binder type of asphalt mixtures. The output layer generates fracture energy and fracture toughness for each assumed input. The results show that the constructed neural network models can predict fracture energy with 75% accuracy and fracture toughness with 70% accuracy.

The sensitivity analysis reveals that the loading rate, test temperature, air void percentage, and binder percentage are the most influential characteristics on the prediction models' results. The integration of data mining principles and neural network algorithms enhances the prediction accuracy of asphalt mixture properties, which can aid in designing more durable pavement materials.

The accuracy of the models was validated using metrics such as Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Squared Error (MSE), with RMSE values of 0.727 for fracture energy and 0.170 for fracture toughness. The regression analysis between actual and predicted values showed R^2 values of 0.75 for fracture energy and 0.70 for fracture toughness, indicating robust model performance.

In conclusion, the neural network models based on collected SCB test data exhibit acceptable performance in predicting the fracture energy and toughness of asphalt mixtures. The study's findings highlight the importance of considering key input variables such as air void percentage, binder percentage, test temperature, and loading rate in developing reliable predictive models for asphalt mixture behavior.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Samanipour, M., Alavi, M.Z. and Babazadeh, A. 2026. Neural network models for predicting fracture energy and toughness of asphalt mixtures based on semi-circular bending (SCB) test results, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 75-84.
<https://doi.org/10.24200/30.2025.64904.3353>



مدل‌های شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی انرژی و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)

محمد سامانی‌پور، سیدمحمد ضیا علوی و عباس بابازاده*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (ababazadeh@ut.ac.ir)

چکیده

اندازه‌گیری خصوصیات شکست در آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB) مخلوط‌های آسفالتی در دهه‌ی گذشته گسترش وسیعی یافته و نتایج مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی مذکور در نوشتارهای متعددی منتشر شده است. هدف نوشتار حاضر، ایجاد و توسعه‌ی مدل‌های شبکه‌ی عصبی به‌منظور پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی بر مبنای اصول داده‌کاوی است. بدین منظور، ۳۲۹۰ داده‌ی حاصل از نتایج آزمایش شکست SCB نمونه‌های آسفالتی از ۱۰۲ نوشتار معتبر جمع‌آوری شده است، که ۱۶۲۷ داده برای پیش‌بینی انرژی شکست و ۱۶۶۳ داده برای محاسبه‌ی چقرمگی شکست استفاده شده‌اند. همچنین، لایه‌ی ورودی شبکه‌های عصبی، شامل داده‌های جمع‌آوری شده از: مد شکست، سرعت بارگذاری، دمای آزمایش، ضخامت نمونه، عمق شیار، وجود اصلاح‌کننده، بزرگ‌ترین اندازه‌ی اسمی سنگ‌دانه، درصد هوا، درصد قیر، پیرشدگی، و نوع قیر مخلوط آسفالتی بوده است. در لایه‌ی خروجی نیز انرژی و چقرمگی شکست برای هر ورودی مفروض تولید می‌شوند. نتایج نشان داده‌اند که مدل‌های شبکه‌ی عصبی ساخته‌شده می‌توانند انرژی شکست را با دقت ۷۵٪ و چقرمگی شکست را با دقت ۷۰٪ پیش‌بینی کنند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

واژگان کلیدی:

مخلوط‌های آسفالتی،
آزمایش خمش نیم دایره‌ای،
انرژی شکست،
چقرمگی شکست،
شبکه‌ی عصبی.

۱. مقدمه

برای اندازه‌گیری خصوصیات شکست در مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های مختلفی، از جمله آزمایش‌های کشش غیرمستقیم آسفالت^۱ و خمش نیم دایره‌ای^۲ (SCB) استفاده می‌شوند. آزمایش خمش نیم دایره‌ای به‌طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. دو نتیجه‌ی مهم حاصل از آزمایش اخیر، انرژی شکست^۳ و چقرمگی شکست^۴ هستند، که به‌خوبی می‌توانند رفتار مخلوط آسفالتی را در برابر ایجاد و انتشار ترک تعیین کنند. نتایج حاصل از آزمایش شکست نمونه‌ی نیم دایره‌ای، علاوه بر خصوصیات مواد و نسبت مواد تشکیل‌دهنده‌ی مخلوط آسفالتی، وابسته به دمای آزمایش، نرخ بارگذاری، خصوصیات هندسی نمونه (نظیر ضخامت و عمق شیار)، و مد بارگذاری اعمالی است. هدف از نوشتار حاضر، ارائه‌ی مدل‌هایی قابل‌اعتماد به منظور پیش‌بینی انرژی و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی بر مبنای نتایج آزمایش SCB جمع‌آوری شده از نوشتارها و منابع معتبر پژوهشی است.

به‌طور کلی براساس حرکت نسبی سطح ترک‌خورده، سه مد اصلی شکست در

رویه‌ی آسفالتی قابل‌تعریف است:^[۱]

- **مد اول (حالت بازشونده):** در این حالت، در اثر تغییرات دما، انقباض و انقباض مصالح، ترک ایجاد می‌شود و سپس در اثر خمش ناشی از بارگذاری ترافیک در لایه گسترش پیدا می‌کند.

- **مد دوم (حالت برشی):** در این حالت، در اثر تنش‌های برشی حاصل از بارگذاری ترافیک، ترک ایجاد می‌شود و سپس در لایه گسترش پیدا می‌کند.

- **مد سوم (حالت پارگی):** در این حالت، در اثر تنش‌های سطحی افقی بین چرخ و سطح روسازی، که حاصل بارگذاری ترافیک است، ترک ایجاد می‌شود و سپس در لایه گسترش پیدا می‌کند.

انرژی شکست به معنای مقاومت پتانسیل مواد در برابر شکستگی است.^[۲] علاوه بر این، انرژی شکست با نسبت کار شکستگی به ناحیه‌ی شیار ترک

³ Fracture Energy (Kj/m²)

⁴ Fracture Toughness (MPa.m^{0.5})

¹ Indirect Tensile Strength test

² Semi-Circular Bending Test

استناد به این مقاله:

سامانی‌پور، محمد، علوی، سیدمحمد ضیا و بابازاده، عباس، ۱۴۰۵. مدل‌های شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی انرژی و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB). مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص. ۷۵-۸۴. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.64904.3353>



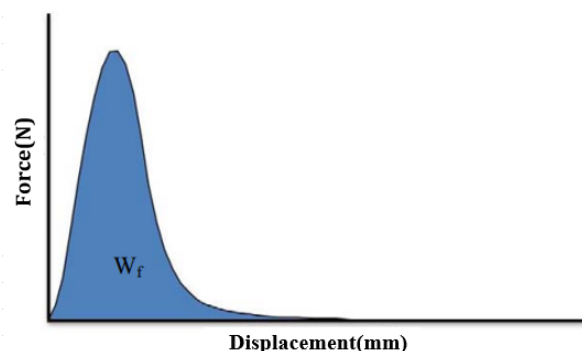
آزمایش استاندارد استفاده شده برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت به‌طور گسترده استفاده می‌شود. علی‌رغم مزیت‌های بسیار زیاد روش مذکور، تغییر شکل‌های ماندگار به‌وجود آمده بر روی نمونه‌ی آسفالت در زیر میله‌های بارگذاری دستگاه آزمایش، نامطلوب بوده و در بعضی موارد، نتایج آن برای ارزیابی پتانسیل ایجاد ترک در مخلوط‌های آسفالتی مناسب نبوده است. آزمایش خمش نمونه‌ی نیم دایره‌ای می‌تواند تا حد زیادی تغییر شکل‌های ماندگار ایجاد شده در زیر میله‌ی بارگذاری را کاهش دهد و در نتیجه، به‌عنوان گزینه‌ی مناسب‌تری برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت نسبت به آزمایش کشش غیرمستقیم در نظر گرفته شود. در ادامه، برخی مطالعات در زمینه‌ی آزمایش خمش نمونه‌ی نیم دایره‌ای ارائه شده است:

استفاده از پلیمر SBS باعث بهبود مقاومت چسبندگی و افزایش مقاومت ترک‌خوردگی می‌شود. با کاهش نرخ بارگذاری، نرخ رهاسازی انرژی کاهش می‌یابد و در نتیجه جذب انرژی در نمونه‌ها تا لحظه‌ی شکست کمتر می‌شود. در سرعت‌های بارگذاری بالاتر، رفتار ماده به رفتار الاستیک نزدیک‌تر می‌شود.^[۴]

با افزایش درصد قیر، چقرمگی شکست نمونه‌ها کاهش و با کاهش دمای آزمایش، مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد.^[۵] مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها تحت مد II بارگذاری به‌طور قابل توجهی (سه برابر) بیشتر از مقاومت شکست تحت مد I بارگذاری است.^[۶] عامل اصلی رشد ترک‌خوردگی در مد I تنش‌های کششی است.^[۷] با نرم‌تر شدن قیر استفاده شده، سختی شکست نمونه‌ها در دمای پایین افزایش می‌یابد. استفاده از مصالح درشت‌دانه‌تر منجر به افزایش چقرمگی شکست نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد فضای خالی، چقرمگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.^[۸]

ژائو و سرچی^۲ (۲۰۰۹)، با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی ساخت مدل‌های پیش‌بینی رفتار سختی مخلوط‌های بتن آسفالت لاستیکی با تراشه‌ی آسفالت را بررسی کرده‌اند. در مجموع ۲۹۶ تیر مخلوط آسفالت از دو نوع لاستیک مختلف محیطی و برودتی، دو منبع تراشه‌ی آسفالت مختلف، و چهار محتوای لاستیک صفر، ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد ساخته شده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها در دو دمای آزمایش مختلف ۵ و ۲۰ درجه‌ی سلسیوس آزمایش شده‌اند. از روش آماری رگرسیون برای پیش‌بینی رفتار سختی مخلوط‌های ذکر شده از طریق ۷ متغیر ورودی، که خواص مهندسی مواد تیرهای آسفالت را پوشش می‌دهند، استفاده شده است. علاوه بر این، داده‌ها به صورت ۵ متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به عنوان ورودی مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سختی تیرهای مخلوط اصلاح شده سازماندهی شده و نتایج نشان داده است که روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی در پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط اصلاح شده نسبت به مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر رگرسیون سنتی مؤثرتر هستند.

شفابخش و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۵)، به بررسی کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد شیارافتادگی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند، که با افزودنی‌های نانو و سرباره‌ی فولادی تقویت شده‌اند. در پژوهش مذکور، ۲۷۰ نمونه‌ی آسفالتی با دو نوع سنگ‌دانه (طبیعی و سرباره‌ی فولادی) ساخته و مخلوط‌ها با افزودنی‌های میکروسیلیکا و نانو $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ در غلظت‌های مختلف اصلاح شده‌اند. آزمایش‌ها در سه دمای مختلف (۴۰،



شکل ۱. منحنی بار-جابجایی آزمایش شکست.^[۱۲]

(ضخامت و طول شیار نمونه) اندازه‌گیری می‌شود، جایی که کار شکست نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی زیر منحنی بار-جابجایی نشان داده شده در شکل ۱ است.

مقدار انرژی شکست G_f با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

که در آن، G_f برابر با انرژی شکست بر حسب واحد ژول بر مترمربع (J/m^2) و W_f برابر با کار شکست با واحد ژول (J)، و A_{lig} برابر با مساحت زیر منحنی است؛ و پارامترهای W_f و A_{lig} مطابق روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند:

$$W_f = \int_0^u P du \quad (2)$$

که در آن، P مقدار بار وارده با واحد نیوتن (N) و u جابجایی خط بار بر حسب متر (m) هستند.

$$A_{lig} = (r - a) \cdot t \quad (3)$$

که در آن، r برابر با شعاع نمونه بر حسب متر (m)، a برابر با عمق شیار بر حسب متر (m)، و t برابر با ضخامت نمونه بر حسب متر (m) هستند.

مقدار چقرمگی مخلوط آسفالتی براساس روابط ۴ الی ۶ محاسبه می‌شود:^[۱۲]

$$\frac{K_I}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} = Y_{I(0.8)} \quad (4)$$

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 \exp \left(7.045 \left(\frac{a}{r} \right) \right) \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_{cr}}{2rt} \quad (6)$$

که در آن‌ها، K_I عامل شدت تنش، P_{cr} بار بحرانی بر حسب نیوتن، و $Y_{I(0.8)}$ پارامتر بدون بُعدی است که از تحلیل اجزاء محدود به‌دست می‌آید و وابسته به طول ترک و شعاع نمونه است.

هوانگ^۱ و همکارانش^{۱۲} (۲۰۰۵)، در پژوهش خود به مقایسه‌ی مقاومت کششی به‌دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت و آزمایش خمش نمونه‌ی نیم دایره‌ای پرداخته‌اند. آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت به‌عنوان

یارو و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۴] به پیش‌بینی مدول سختی و شیارافتادگی در قیرهای اصلاح‌شده با کلینکر روغن پالم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ پرداخته‌اند. برای ساخت قیرهای اصلاح‌شده از ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد کلینکر روغن پالم استفاده شده است. نتایج آزمایش مذکور نشان داده است که اختلاط کلینکر روغن پالم، خواص قیر ساده را با افزایش سختی و حساسیت دما بهبود می‌بخشد. نتایج مدل‌های پیش‌بینی نشان داده است که مدل شبکه‌ای عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ، عملکرد بهتری داشته است.

برغبانی و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۵] به بررسی استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار شکست در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از داده‌های آزمایش SCB پرداخته‌اند. مدل توسعه‌یافته با دقت بالا، نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی (JC) را به‌عنوان یک پارامتر کلیدی شکست پیش‌بینی کرده است. مدل اخیر بر مبنای روابط غیرخطی بین متغیرهای ورودی (مانند ترکیب‌بندی مخلوط آسفالتی، دانه‌بندی، نوع قیر، دمای آزمایش، نرخ بارگذاری) طراحی شده و در بهبود طراحی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نقش مؤثری داشته است. مدل شبکه‌ای عصبی توسعه یافته با دقت بالا با ضریب تعیین حدود ۰/۹۴، مقدار JC را پیش‌بینی کند. مدل مذکور، توانایی عمومی سازی برای شرایط مختلف مخلوط‌های آسفالتی را داشته است.

نوآوری مطالعه حاضر، مشخصاً کاربرد علم داده‌کاوی در تحلیل داده‌های گسترده‌ی جمع‌آوری‌شده از خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی و ارائه‌ی مدل‌های قلیل‌اعتماد برای پیش‌بینی خصوصیات مذکور با تکیه بر الگوریتم‌های شبکه‌ای عصبی بوده است. به‌دلیل زمان نسبتاً طولانی آزمایش خمش نیم دایره‌ای و همچنین مطالعات بسیار زیاد قبلی در این زمینه، که جمع‌آوری داده‌های مناسب برای مدل‌سازی انرژی شکست و چقرمگی شکست را ممکن ساخته است، انجام مطالعه برای ساخت چنین مدل‌هایی با توجه به صرفه‌جویی در هزینه و زمان، قابل توجیه است.

۲. مشخصات داده‌های جمع‌آوری‌شده

در مطالعه حاضر، حدوداً به ۲۵۰ نوشتار برای جمع‌آوری داده‌ها استناد شده و در مجموع ۳۲۹۰ داده‌ی قابل اعتماد از ۱۰۲ نوشتار به‌دست آمده است. در شکل ۲، روند کلی مطالعه مشاهده می‌شود. اطلاعات استخراج‌شده، شامل: سال انتشار، نام نویسنده، مرجع انتشار، دمای آزمایش، نرخ بارگذاری، ضخامت نمونه، عمق شیار ایجادشده در نمونه، مد شکست، نوع قیر براساس ذکر دمای بالا و پایین عملکردی قیر، درصد قیر، بزرگ‌ترین اندازه‌ی اسمی سنگ‌دانه، درصد هوای مخلوط، نوع اصلاح‌کننده (در صورت استفاده)، شرایط پیرشدگی، مقدار چقرمگی شکست، و انرژی شکست اندازه‌گیری‌شده برای نمونه‌های آسفالتی است. در شکل ۳، تعداد نوشتارهای جمع‌آوری‌شده به تفکیک کشور مشاهده می‌شود.

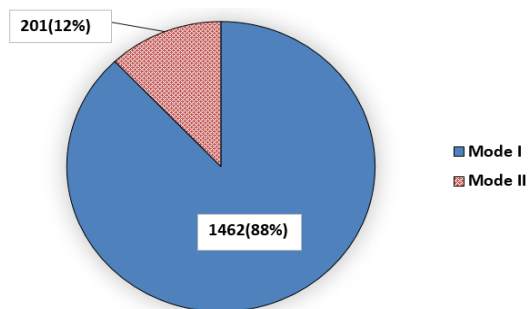
در شکل ۴، تعداد داده‌های جمع‌آوری‌شده برای انرژی شکست به تفکیک مد شکست مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تعداد کل داده‌ها برابر ۱۶۲۷ است، که ۱۳۸۲ عدد آن برای مد I شکست و تعداد ۲۴۵ در مد II شکست قرار دارد. همچنین، در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تعداد داده‌های جمع‌آوری‌شده برای چقرمگی شکست برابر با ۱۶۶۳ است، که ۱۴۶۲ عدد از آن‌ها برای مد I

۵۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) و پنج سطح تنش (۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال) انجام شده‌اند. مدل ANN با ۵ پارامتر ورودی طراحی شده است: نوع سنگ‌دانه، نوع افزودنی، مقدار افزودنی، دمای آزمایش، و تنش اعمال‌شده. ضریب تعیین مدل شبکه‌ای عصبی مصنوعی (ANN) به میزان ۰/۹۸ گزارش شده است؛ که نشانگر دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط آزمایشی مختلف است.

میرعبدالعظیمی و شفافبخش (۲۰۱۷)^[۱۱] به مطالعه‌ی مدل‌سازی پیش‌بینی عمق شیارافتادگی در آسفالت‌های مخلوط داغ (HMA) حاوی الیاف فورتا پرداخته‌اند؛ که شامل آزمایش‌های خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالت بوده است، که تحت شرایط دما و تنش‌های مختلف انجام شده‌اند. مطالعه‌ی مذکور از دو روش شبکه‌ای عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) برای توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی استفاده و عملکرد آن‌ها را مقایسه کرده است. مدل‌های ANN و GP هم‌راستایی خوبی با داده‌های تجربی نشان داده‌اند؛ در حالی که GP مدل‌هایی قابل تفسیر فراهم می‌کند و ANN انعطاف‌پذیری بیشتری در پیش‌بینی دارد. دقت مدل ANN ضریب تعیین ۰/۹۶ را ارائه داده است، در حالی که مدل GP ضریب تعیین ۰/۹۳ را نشان داده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که هر دو مدل مذکور، قابلیت پیش‌بینی قابل توجهی دارند، با این حال مدل ANN دقت بالاتری در پیش‌بینی عمق شیارافتادگی نشان داده است.

لئون و گی^۳ (۲۰۱۹)^[۱۲] با استفاده از روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) به مدل‌سازی و بررسی تأثیر زاویه‌داری سنگ‌دانه‌ها در تغییرشکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. ایشان، داده‌های آزمایشگاهی را برای اندازه‌گیری تغییرشکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی جمع‌آوری کرده‌اند؛ که شامل آزمایش نمونه‌هایی با مقادیر مختلف زاویه‌داری سنگ‌دانه‌ها بوده است، که اثر متغیر مذکور را در رفتار تغییرشکل تحت بارگذاری مکرر بررسی کرده‌اند. از آزمایش‌های خزش دینامیکی برای کمی‌سازی ویژگی‌های تغییرشکل دائمی استفاده شده است؛ که داده‌های لازم برای توسعه و ارزیابی مدل GEP را فراهم می‌کنند. زاویه‌داری سنگ‌دانه‌ها تأثیر قلیل توجهی در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل دائمی داشته است. مدل GEP دقت بالایی داشته و ضریب تعیین حدود ۰/۹۵ نشان‌دهنده‌ی توافقی بسیار خوب بین نتایج پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی بوده است.

مجدی‌فرد و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۳] به بررسی استفاده از دو روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و ترکیب شبکه‌ای عصبی مصنوعی با آنیلینگ شبیه‌سازی شده (ANN/SA) برای پیش‌بینی انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. پایگاه داده‌ی پژوهش مذکور، شامل نتایج آزمایش‌های تنش دیسک‌شکل فشرده (DC(T))، که در دماهای مختلف بر روی نمونه‌های آسفالتی انجام شده است، بوده است. متغیرهای ورودی، شامل: درجه‌بندی عملکرد قیر (PG)، محتوای قیر، اندازه و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، محتوای آسفالت باز یافتی (RAP)، شینگل آسفالتی باز یافتی (RAS)، محتوای لاستیک خردشده، و دمای آزمایش بوده‌اند. در نتایج پژوهش اخیر، مدل GEP عملکرد بهتری نسبت به ANN/SA نشان داده است. ضریب تعیین مدل GEP، ۰/۹۷ و مدل ANN/SA، ۰/۹۳ بوده است؛ که نشانگر مدل GEP نسبت به ANN/SA است.



شکل ۵. نسبت مدهای شکست در داده‌های جمع‌آوری شده برای چقرمگی شکست.

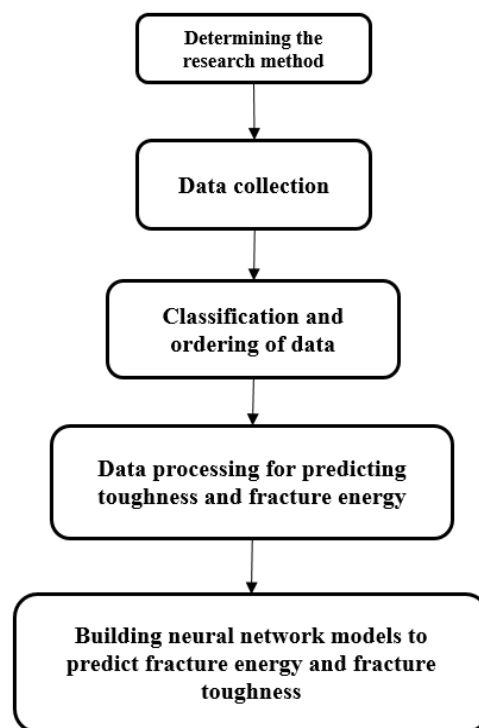
جدول ۱. خصوصیات جمع‌آوری شده از مخلوط‌های آسفالتی و دامنه‌ی تغییرات آن‌ها برای شبکه‌های عصبی انرژی شکست و چقرمگی شکست.

Characteristic	Fracture energy	Fracture toughness
Loading rate(mm/min)	0.03 - 50.8	0.018 - 50.8
Sample thickness(mm)	25 - 75	4 - 70
Notch dimension(mm)	0 - 50	2 - 30
NMAS(mm)	4.75 - 25.4	4.75 - 25.4
air void percentage	3 - 11	3 - 11
Aging	0 - 2	0 - 2
Test temperature(C°)	-33 - 44	-33 - 44
High binder temperature	64 - 82	28 - 70
Low binder temperature	-34 - -16	-64 - -16
Binder percentage	1.5 - 8.8	3.6 - 8.8
Fracture (KJ/m ²) energy	0.042 - 8.92	---
Fracture toughness (MPa.m ^{0.5})	---	0.06 - 2.49

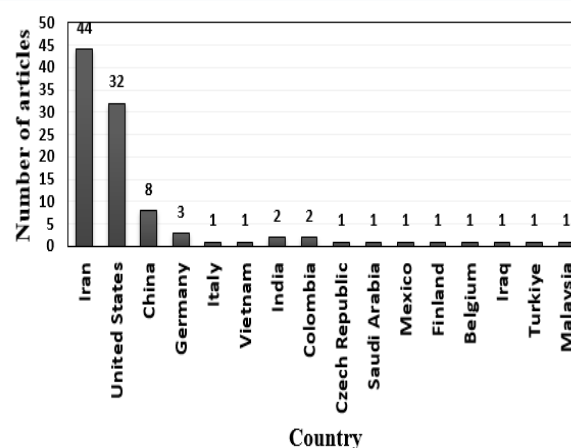
به‌عنوان نتیجه‌ی شبکه‌ی عصبی در لایه‌ی خروجی قرار می‌گیرند، سایر خصوصیات، لایه‌ی ورودی شبکه‌ی عصبی را تشکیل می‌دهند. دمای آزمایش به‌عنوان مهم‌ترین داده‌ی ورودی از بین تمامی خصوصیات در نظر گرفته شده است. همچنین درصد قیر، درصد هوا، و نرخ بارگذاری نیز در کنار دمای آزمایش، تأثیرگذاری بیشتری نسبت به سایر داده‌های ورودی داشته‌اند. برای استفاده از نوع قیر به‌عنوان ورودی در مدل‌های شبکه‌ی عصبی، از دو ورودی دمای بالای قیر و دمای پایین قیر استفاده و سایر داده‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۳. روش انجام مدل‌سازی

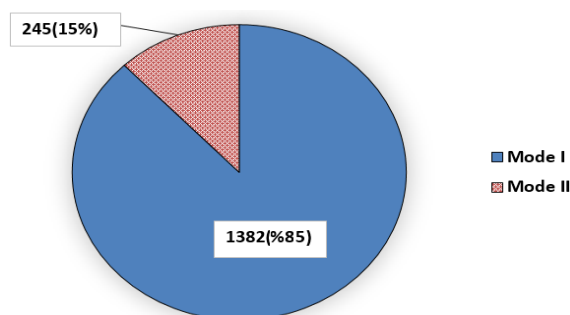
در مرحله‌ی حاضر، پایش داده‌ها صورت گرفته است. با توجه به نیازهای مدل شبکه‌ی عصبی، از ۱۲ خصوصیت ورودی برای پیش‌بینی مقدار انرژی شکست



شکل ۲. روند کلی انجام مطالعه.

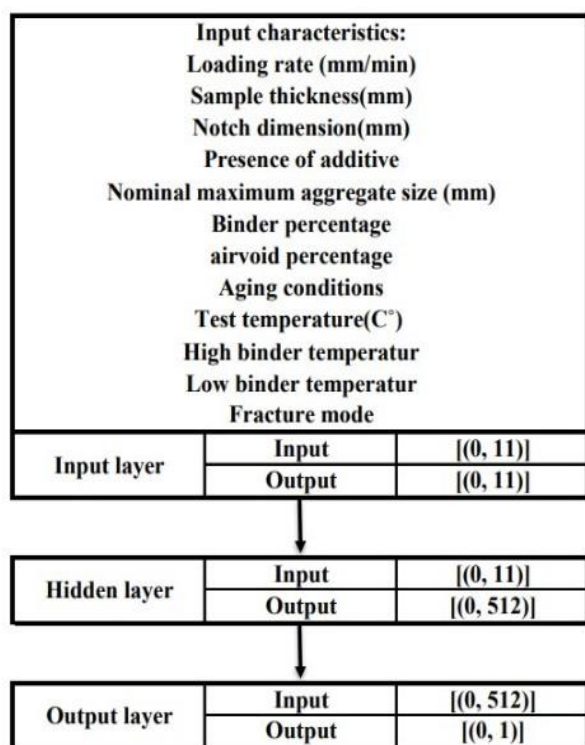


شکل ۳. تعداد نوشتارهای جمع‌آوری شده به تفکیک کشور.



شکل ۴. نسبت مدهای شکست در داده‌های جمع‌آوری شده برای انرژی

شکست، و تعداد ۲۰۱ در مد II شکست قرار دارند. در جدول ۱، نیز داده‌های جمع‌آوری شده از خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی نمونه و بازه‌ی تغییرات هر کدام ارائه شده است. خصوصیات ذکر شده در نوشتار حاضر، برای مدل‌سازی شبکه‌های عصبی پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی استفاده شده‌اند. به جز دو خصوصیت انرژی و چقرمگی شکست، که



شکل ۶. ساختمان شبکه‌ی عصبی.

جدول ۲. نتایج پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی مخلوط‌های آسفالتی.

Coefficient of determination (R ²)	Mean square error (MSE)	Root mean square error (RMSE)	Characteristics of fracture
0.75	0.529	0.727	Fracture energy (KJ/m ²)
0.70	0.032	0.170	Fracture toughness (MPa.m ^{0.5})

خطای میانگین مربعات (MSE)، و ضریب تعیین (R²) ارائه شده‌اند. مقدار RMSE برای انرژی شکست و چقرمگی به ترتیب برابر ۰/۷۲۷ و ۰/۱۷۰ بوده است، که نشان می‌دهد خطای میانگین بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی برای انرژی شکست نسبتاً کم و برای چقرمگی بسیار کم است. همچنین مقدار MSE برای دو خصوصیت اخیر به ترتیب برابر ۰/۵۲۹ و ۰/۰۳۲ به‌دست آمده است، که نشان می‌دهد خطای مربع میانگین برای پیش‌بینی انرژی شکست کمتر از ۱ و برای چقرمگی شکست، بسیار کمتر از ۱ بوده است. مقادیر مذکور حاکی از عملکرد خوب مدل‌های شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی خصوصیات شکست مخلوط‌های آسفالتی است. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده، بیانگر کارایی مدل‌های شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی هستند و می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مفیدی در طراحی و ارزیابی مصالح روسازی استفاده شوند.

و چقرمگی شکست استفاده شده است، که شامل خصوصیات مخلوط و شرایط آزمایش بوده‌اند.

برای پیش‌بینی خصوصیات انرژی و چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی از مدل شبکه‌ی عصبی متوالی^۴ استفاده شده است. مدل شبکه‌ی عصبی متوالی، یک نوع معماری شبکه‌ی عصبی است، که در آن لایه‌ها به‌صورت ترتیبی یکی پس از دیگری قرار می‌گیرند. در این نوع معماری، خروجی هر لایه به‌عنوان ورودی لایه‌ی بعدی استفاده می‌شود و اطلاعات از ابتدا تا انتها به‌صورت خطی انتقال می‌یابند. به‌عبارت دیگر، در مدل متوالی هیچ ارتباط پرش یا بازگشتی بین لایه‌ها وجود ندارد و اطلاعات فقط در یک جهت جریان می‌یابند. در مدل‌سازی از الگوریتم آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۵ برای بهینه‌سازی استفاده شده است. آنالیز مؤلفه‌های اصلی، یک روش ریاضی است، که در تجزیه و تحلیل داده‌ها و کاهش ابعاد استفاده می‌شود. هدف اصلی آنالیز PCA، کاهش تعداد خصوصیات ورودی به شبکه‌ی عصبی ضمن حفظ اطلاعات مهم است. به‌طور خلاصه، آنالیز مؤلفه‌های اصلی تبدیلی خطی است که به‌صورت اتوماتیک، ورودی‌های اصلی را طوری استخراج می‌کند که بیشترین واریانس را در داده‌ها توضیح دهند. کاهش تعداد ورودی‌ها در کاربردهایی، چون: تجزیه و تحلیل داده‌ها، تشخیص الگو، دسته‌بندی داده‌ها و تصاویر، روش‌های شناسایی چهره، و غیره استفاده شده است. ساختار شبکه‌های عصبی مطالعه‌ی حاضر به این صورت است که لایه‌ی ورودی، خصوصیات تعیین‌شده در آنالیز مؤلفه‌های اصلی را به‌عنوان ورودی می‌گیرد، لایه‌های پنهان از تابع فعال‌سازی واحد خطی اصلاح‌شده‌ی (Relu)^۶ استفاده می‌کند، که غیرخطی را به مدل یادگیری معرفی می‌کند. لایه‌ی خروجی، یک مقدار واحد تولید می‌کند، که همان انرژی شکست یا چقرمگی پیش‌بینی‌شده توسط شبکه‌ی عصبی است. انتخاب معماری با لایه‌های مخفی متعدد به شبکه‌ی عصبی اجازه می‌دهد تا الگوهای پیچیده در داده‌ها را بیاموزد. تعداد نورون‌ها در هر لایه را می‌توان براساس پیچیدگی و میزان داده‌های موجود برای آموزش تنظیم کرد. تابع Relu به‌دلیل توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی معمولاً در لایه‌های پنهان استفاده می‌شود. فعال‌سازی خطی برای مسائل رگرسیون مناسب است، جایی که هدف پیش‌بینی یک مقدار پیوسته در لایه‌ی خروجی است. در شکل ۶، ساختمان شبکه‌ی عصبی ایجادشده مشاهده می‌شود، که در آن تمامی خصوصیات ذکرشده‌ی مخلوط آسفالتی در جدول ۱ در لایه‌ی ورودی استفاده شده است. در مدل مذکور، از یک لایه‌ی پنهان با تعداد ۵۱۲ نورون استفاده شده و در نهایت، مدل انرژی شکست یا چقرمگی را به‌عنوان یگانه خروجی ارائه داده است. با افزایش تعداد لایه‌ی پنهان و یا تعداد نورون، بهبودی در عملکرد مدل ایجاد نشده و زمان اجرای مدل افزایش پیدا کرده است. در ساختار نشان داده‌شده در شکل ۶، مدل در حالت بهینه‌ی خود عمل کرده و از پیش‌برازش جلوگیری شده است.

۴. نتایج عددی

در بخش کنونی، نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی ساخته‌شده در نوشتار حاضر ارائه شده است:

در جدول ۲، خطای مدل‌های شبکه‌ی عصبی انرژی شکست و چقرمگی شکست بر حسب معیارهای ریشه‌ی خطای میانگین مربعات (RMSE)،

⁶ Relu Activator Function

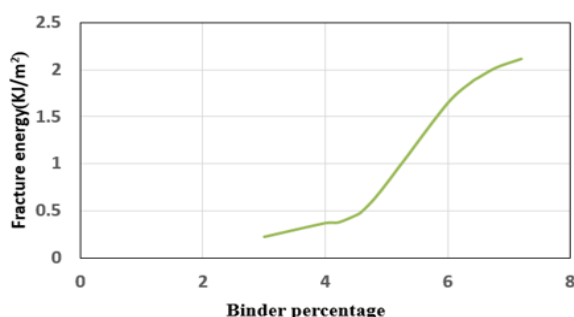
⁴ Sequential Neural Network Model

⁵ Principal Component Analysis

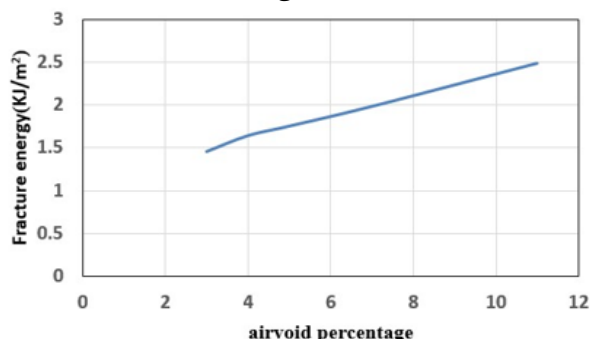
شکست در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش درصد هوا، انرژی شکست افزایش پیدا کرده است.

نتایج مدل انرژی شکست ارائه‌شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در دماهای زیر صفر با افزایش دما، انرژی شکست افزایش و در دماهای بالای صفر با افزایش دما، انرژی شکست کاهش پیدا کرده است. نتایج اخیر با نتایج نوشتار انسینجیمو^۷ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۹] برای دماهای آزمایش بالای صفر، و با نتایج نوشتار زی و لی^۸ (۲۰۱۰)،^[۲۰] برای دمای‌های آزمایش زیر صفر تطابق داشته است. همچنین، براساس نوشتار انسینجیمو و همکاران،^[۱۹] با افزایش نرخ بارگذاری، انرژی شکست روند افزایشی ملایمی داشته است، که با توجه به شکل ۱۲، با نتایج مدل شبکه‌ی عصبی انرژی شکست همخوانی داشته است.

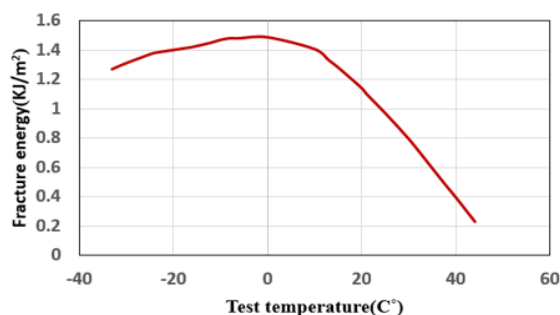
براساس نتایج نوشتار بویی و مفرش^۹ (۲۰۲۱)،^[۲۱] با افزایش درصد قیر، چقرمگی شکست کاهش یافته است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در مدل



شکل ۹. تغییرات انرژی شکست با افزایش درصد قیر در مدل شبکه‌ی عصبی.



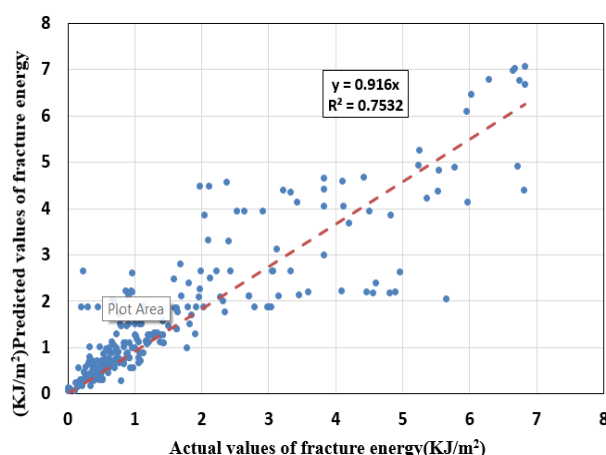
شکل ۱۰. تغییرات انرژی شکست با افزایش درصد هوا در مدل شبکه‌ی عصبی.



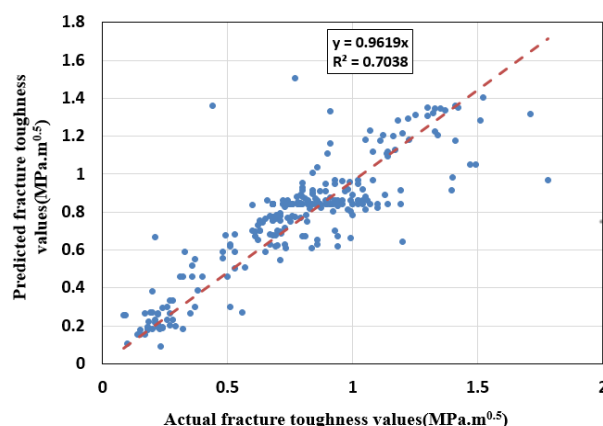
شکل ۱۱. تغییرات انرژی شکست با افزایش دمای آزمایش در مدل شبکه‌ی عصبی.

در شکل‌های ۷ و ۸، خطوط رگرسیون بین مقادیر واقعی (حاصل از آزمایش) و پیش‌بینی‌شده، انرژی شکست و چقرمگی مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهند. ضریب R^2 مربوط به خطوط رگرسیون مذکور به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۰ بوده است؛ که بیانگر دقت قابل قبول مدل‌ها در پیش‌بینی خصوصیات ذکرشده است. مقدار R^2 نشان می‌دهد که ۷۵٪ از تغییرات در مقادیر انرژی شکست و ۷۰٪ از تغییرات در مقادیر چقرمگی توسط مدل‌های شبکه‌ی عصبی تبیین می‌شود، که حاکی از توانایی مناسب مدل‌های مذکور در پیش‌بینی نتایج است."

برای اعتبارسنجی بهتر مدل‌های شبکه‌ی عصبی، اثر ۴ ورودی مهم (درصد هوا، درصد قیر، دمای آزمایش، و نرخ بارگذاری) در پیش‌بینی خصوصیات انرژی شکست و چقرمگی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در برخی نوشتارها،^[۱۶، ۱۷] نتایج یکسانی را در مورد تأثیر درصد قیر در انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی ارائه نداده‌اند، در حالی که شکل ۹ نشان می‌دهد که انرژی شکست با افزایش درصد قیر روندی افزایشی داشته است. نتایج آزمایشگاهی نوشتار ملک و کی‌منش (۲۰۲۳)،^[۱۸] نشان داده است که با افزایش درصد هوا، مقدار کار شکست و در نتیجه، انرژی شکست نیز کاهش یافته‌اند. ولی نتایج ارائه‌شده‌ی مدل شبکه‌ی عصبی انرژی



شکل ۷. خط رگرسیون بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی انرژی شکست.

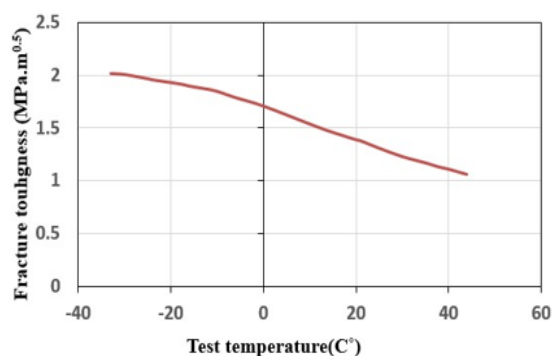


شکل ۸. خط رگرسیون بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی چقرمگی شکست.

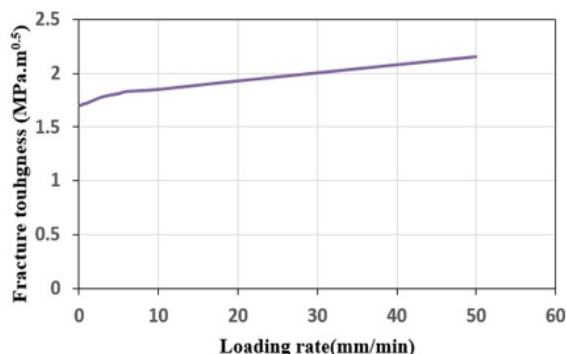
⁹ Bui & Mofreh

⁷ Nsengiyumva

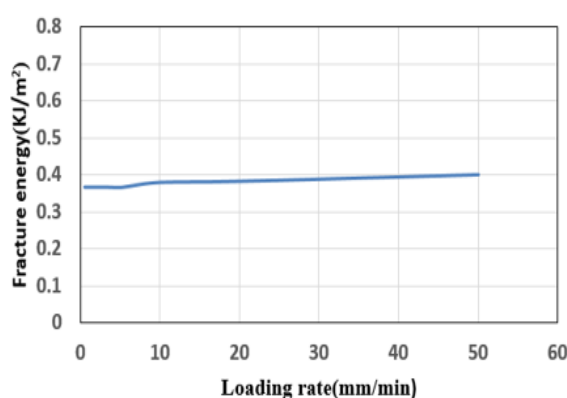
⁸ X & Li



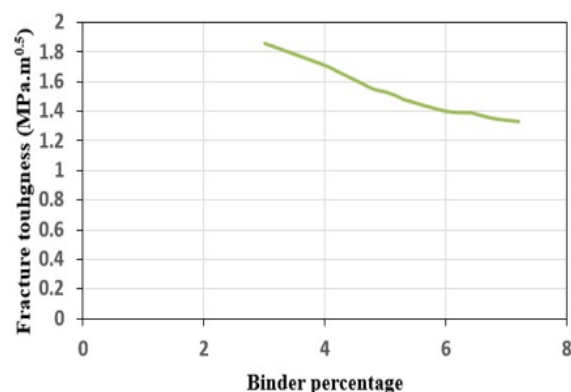
شکل ۱۵. تغییرات چقرمگی شکست با افزایش دمای آزمایش در مدل شبکه‌ی عصبی.



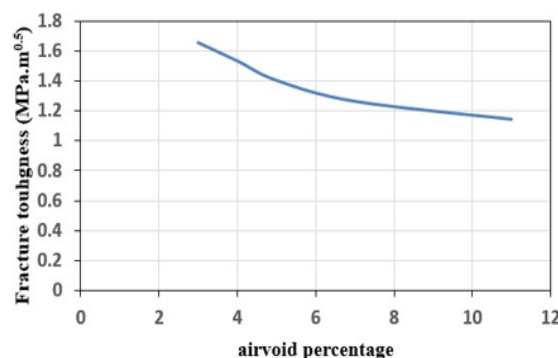
شکل ۱۶. تغییرات چقرمگی شکست با افزایش نرخ بارگذاری در مدل شبکه‌ی عصبی.



شکل ۱۲. تغییرات انرژی شکست با افزایش نرخ بارگذاری در مدل شبکه‌ی عصبی.



شکل ۱۳. تغییرات چقرمگی شکست با افزایش درصد قیر در مدل شبکه‌ی عصبی.



شکل ۱۴. تغییرات چقرمگی شکست با افزایش درصد هوا در مدل شبکه‌ی عصبی.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB) و سایر اطلاعات استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر از حدود ۱۰۰ نوشتار معتبر جمع‌آوری و از داده‌های مذکور برای ساخت مدل‌های شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی نتایج آزمایش SCB، شامل انرژی شکست و چقرمگی، استفاده شده است. نوشتارهای مختلفی در شرایطی متفاوت، از جمله: درصد قیر، افزودنی، و یا نوع قیر متفاوت و موارد دیگر، آزمایش SCB را انجام داده‌اند. براساس داده‌های جمع‌آوری‌شده، دو مدل شکست در نظر گرفته شده و مدل‌سازی هم برای مد I شکست، هم برای مد II و هم برای ترکیب داده‌های دو مد I و II به‌صورت اضافه‌کردن یک متغیر باینری صورت گرفته است. سپس خروجی‌های مدل‌های ساخته‌شده، تجزیه و تحلیل شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- مدل‌های شبکه‌ی عصبی ساخته‌شده بر مبنای داده‌های جمع‌آوری‌شده از نوشتارهای مختلف، عملکردی قابل قبول در پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی شکست داشته‌اند.
- استفاده از ترکیب داده‌های مدهای I و II، شکست در ساخت مدل‌های شبکه‌ی عصبی، دقت مدل‌های پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشیده است.
- ضریب تعیین R^2 خط رگرسیون بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی انرژی شکست و چقرمگی شکست به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۰ بوده است، که نشانگر دقت قابل قبول مدل‌های شبکه‌ی عصبی است.

شبکه‌ی عصبی هم با افزایش درصد قیر، چقرمگی شکست کاهش یافته است. براساس نتایج آزمایشگاهی نوشتار انسینجیمو و همکاران،^[۱۹] با افزایش درصد هوا، چقرمگی شکست کاهش یافته است و در شکل ۱۴، نیز چنین رفتاری برای نتایج مدل شبکه‌ی عصبی چقرمگی مشاهده می‌شود. در ضمن، براساس نوشتار انسینجیمو و همکاران،^[۱۹] با افزایش دمای آزمایش در دماهای زیر صفر، چقرمگی شکست کاهش پیدا کرده است، که با نتایج مدل شبکه‌ی عصبی ارائه‌شده در شکل ۱۵ تطابق دارد. نتایج آزمایشگاهی نوشتار اربانی و فردوسی^[۲۰] (۲۰۰۷)، نیز نشان داده است که با افزایش نرخ بارگذاری، چقرمگی شکست روند افزایشی داشت است، و در شکل ۱۶ نیز روند افزایشی اخیر در نتایج مدل مشاهده می‌شود.

- خطای پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی مدل‌های شبکه‌ی عصبی بر حسب معیارهای RMSE و MSE در حد قابل قبولی بوده است، هر چند خطای مدل پیش‌بینی چقرمگی به مراتب کمتر بوده است.
- مدل‌های شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی عملکرد مواد و ساختارهای شکست‌پذیر قابل استفاده هستند.
- اثر چهار ورودی مهم (درصد هوا، درصد قیر، دمای آزمایش و نرخ بارگذاری) بر پیش‌بینی انرژی شکست و چقرمگی شکست بررسی شد.
- مدل‌های شبکه‌ی عصبی ساخته‌شده، قابلیت پیش‌بینی دقیق و مؤثر انرژی شکست و چقرمگی را در سناریوهای مختلف درصد هوا، درصد قیر، دمای آزمایش و نرخ بارگذاری نشان داده‌اند.
- ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی بهبود قابل توجهی در عملکرد و دقت مدل‌های شبکه‌ی عصبی ساخته‌شده ایجاد کرده است.

References - منابع

1. Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M., 2020. *Fracture behavior of asphalt materials*.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-39974-0>
2. Huang, B., Shu, X. and Tang, Y., 2005. Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures. *Advances in Pavement Engineering*, pp.1–12.
[https://doi.org/10.1061/40776\(155\)14](https://doi.org/10.1061/40776(155)14)
3. AASHTO, 2010. Determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semi circular bend geometry (SCB). In Designation: *TP 105-20*, Washington, DC 20004.
4. Lancaster, I. and Khalid, H., 2011. Crack growth analysis of polymer modified asphalt using linear and non linear fracture mechanics. *Fifth International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, pp.612–623.
5. Biligiri, K., Said, S. and Hakim, H., 2012. Asphalt mixtures crack propagation assessment using semi-circular bending tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(4), pp.209–217.
6. Im, S., Ban, H. and Kim, Y. R., 2014. Mode-dependent fracture behavior of asphalt mixtures with semicircular bend test. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2447, pp.23–31.
<https://doi.org/10.3141/2447-03>
7. Mahmoud, E., Saadeh, S., Hakimelahi, H. and Harvey, J., 2014. Extended finite-element modelling of asphalt mixtures fracture properties using the semi-circular bending test. *Road Materials and Pavement Design*, 15, pp.153–166.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2013.863737>
8. Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M., 2015. Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading. *Cold Regions Science and Technology*, 110, pp.149–159.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.03.001>
9. Xiao, F. and Serji, N., 2009. Artificial neural network approach to estimating stiffness behavior of rubberized asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 135, (8), pp.580–589.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000014](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000014)
10. Shafabakhsh, G. H., Jafrai Ani, O. and Talebsafa, M., 2015. Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 85, pp.136–143.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.060>
11. Mirabdolazimi, S. and Shafabakhsh, G., 2017. Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique. *Construction and Building Materials*, 148, pp.666–674.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.088>
12. Leon, P. L. and Gay, D., 2019. Gene expression programming for evaluation of aggregate angularity effects on permanent deformation of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 211, pp.470–478.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.225>
13. Majdifard, H., Jahangiri, B., Buttlar, W. G. and Alavi, A. H., 2019. New machine learning-based prediction models for fracture energy of asphalt mixtures. *Measurement*, 135, pp.438–451.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.081>
14. Yaro, N., Sutanto, M. H., Habib, N. Z., Napiah, M., Usman, A. and Muhammad, 2022. Comparison of

- response surface methodology and artificial neural network approach in predicting the performance and properties of palm oil clinker fine modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 324, 126618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126618>
15. Barghabany, P., Zhang, J., Mohammad, L. N. and Cooper, S. B., 2022. Novel model to predict critical strain energy release rate in semi-circular bend test as fracture parameter for asphalt mixtures using an artificial neural network approach. *Journal of the Transportation Research Board*. <https://doi.org/10.1177/03611981211036357>
 16. Abuawad, I., Al-Qadi, I. and Trepanier, J., 2015. Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: testing techniques and additives/modifiers effectiveness. *Construction and Building Materials*, 84, pp.437-443. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.001>
 17. Hamed, G. H., Saedi, D. and Ghahremani, H., 2020. Effect of short-term aging on low-temperature cracking in asphalt mixtures using mechanical and thermodynamic methods. *ASCE*, 32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003388](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003388)
 18. Malek, M. and Keymanesh, M., 2023. Impact of thickness, void content, temperature and loading rate on tensile fracture toughness and work of fracture of asphalt mixtures-an experimental study using the SCB test. *Engineering Solid Mechanics*, 11, pp.163-174. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2023.000015>
 19. Nsengiyumva, G., You, T. and Kim, Y., 2017. Experimental-statistical investigation of testing variables of a semicircular bending (SCB) fracture test repeatability for bituminous mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 45, pp.1691-1701. <https://doi.org/10.1520/JTE20160103>
 20. X., J. and Li, M., 2010. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*, 50, pp.867-876. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9303-0>
 21. Bui, H. and Mofreh, S., 2021. Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. *Engineering Fracture Mechanics*, 242, 107452. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107452>
 22. Arabani, M. and Ferdowsi, B., 2007. Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures. *International Journal of Engineering*, 22, pp.47-58. <https://doi.org/10.22068/ije.22.1.47>



Research Note

Investigating and Determining Project Success Factors in Iraq: Advice for Exporters of Engineering Services

Khaldoon Al-Aloosy¹, Amirhossein Hosseini Sarcheshmeh¹, Ali Rahimian², Mojtaba Maghrebi^{1*} and Jafar Bolouri Bazaz¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

²School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author: (mojtabamaghrebi@um.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 18 January 2025

Revised: 23 April 2025

Accepted: 2 June 2025

Keywords:

Project success,
construction projects in Iraq,
success factors,
exporters of engineering
services,
failure factors.

Abstract

Project success in the construction industry refers to the achievement of predetermined goals for the project and the organization within specified time and cost constraints, along with the quality expected by the client. In this context, Iraq, as a developing country, faces numerous challenges regarding project failures. A more detailed examination of the reasons behind these issues could be beneficial for stakeholders in Iran's construction industry, especially since Iraq is currently one of Iran's largest trading partners. Understanding the factors contributing to the success of construction projects in Iraq can serve as a valuable guide for those involved in exporting technical services to this country. In this study, the factors influencing the success of construction projects in Iraq were identified through two sources: reputable scientific articles and interviews with 40 expert professionals. After prioritizing these factors, six final elements were identified, including the financial capability of the contracting company, support from senior management, utilization of consulting firms, evaluation and selection of the best contracting company, use of turnkey contracts, and coordination among various project sectors. Among these factors, three, namely the financial capability of the contracting company, support from senior management, and evaluation and selection of the best company, were presented quantitatively, while the other factors were presented qualitatively. In this research, school construction projects in Wasat province were selected as a case study, and 32 projects were analyzed to assess the impact of these six factors. Given that the projects had similar dimensions, construction methods, and costs, time delay was used as a key parameter to determine project success or failure. Based on this criterion, 17 projects were identified as successful and 15 as unsuccessful. Ultimately, a significant relationship was found among all identified success factors in these projects, and recommendations were provided for achieving success in similar projects.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Al-Aloosy, Kh., Hosseini Sarcheshmeh, A.H., Rahimian, A., Maghrebi, M. and Bolouri Bazaz, J. 2026. Investigating and determining project success factors in Iraq: advice for exporters of engineering services, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 85-102. <https://doi.org/10.24200/ij30.2025.66077.3400>



بررسی و تعیین عوامل موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق: ارائه راهکارهایی برای صادرکنندگان خدمات مهندسی

خلدون الالوسی^۱، امیرحسین حسینی سرچشمه^۱، علی رحیمیان^۲، مجتبی مغربی^{۱*} و جعفر بلوری بزازی^۱

^۱گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۲دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mojtabamaghrebi@um.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
موفقیت پروژه در صنعت ساخت به معنای تحقق اهداف تعیین شده برای پروژه و سازمان در زمان و هزینه مشخص، همراه با کیفیت موردانتظار کارفرماست. با توجه به چالش‌ها و شکست‌های متعدد پروژه‌ها در کشور عراق، شناسایی دلایل این موضوع برای فعالان صنعت ساختمان ایران، اهمیت ویژه‌ای دارد. عراق به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین شرکای تجاری ایران، فرصت‌های زیادی برای صادرات خدمات فنی و مهندسی فراهم کرده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از نوشتارهای علمی و مصاحبه با کارشناسان حوزه صنعت ساخت، ۶ عامل کلیدی مؤثر در موفقیت پروژه‌ها شناسایی و اولویت‌بندی شده‌اند؛ که شامل: توانایی مالی شرکت‌های پیمانکاری، پشتیبانی مدیریت ارشد، استفاده از دفاتر مشاوره اجرایی، ارزیابی، و انتخاب بهترین شرکت پیمانکاری، استفاده از قرارداد کلید در دست، و هماهنگی میان بخش‌های مختلف پروژه هستند. شناخت و درک عوامل مذکور می‌تواند به بهبود عملکرد پروژه‌ها و افزایش نرخ موفقیت آن‌ها کمک کند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲ واژگان کلیدی: موفقیت پروژه، پروژه‌های عمرانی عراق، عوامل موفقیت، صادرات خدمات مهندسی، عوامل شکست.

۱. مقدمه

اجرای موفق پروژه‌های عمرانی همواره موضوع موردتوجه کارفرمایان و پیمانکاران پروژه‌ها و پژوهشگران بوده و از زوایای مختلف در مطالعات گوناگون بررسی شده است. موفقیت یک پروژه و رضایت تمامی ذی‌نفعان، از جمله: مدیران ارشد، ذی‌نفعان کلیدی و غیرکلیدی، مشتریان، کاربران، و اعضاء تیم پروژه، به‌عنوان اصلی‌ترین جنبه در مدیریت پروژه شناخته می‌شود. بنابراین، لازم است که تمامی ابزارها، روش‌ها، تجربیات، و مفاهیم استفاده شوند تا موفقیت اخیر حاصل شود. تعاریف موفقیت پروژه به نوع، اندازه، و پیچیدگی پروژه و همچنین افراد درگیر و عوامل دیگر وابسته است.^[۱-۳] به‌عنوان مثال، اشلی^۱ و همکاران (۱۹۸۷)،^[۴] موفقیت پروژه را این‌گونه تعریف کرده‌اند: "موفقیت پروژه به معنای دستیابی به نتایج بهتر در زمینه‌های هزینه، زمان‌بندی، کیفیت، ایمنی، و رضایت ذی‌نفعان نسبت به انتظارات اولیه یا آنچه در عمل مشاهده می‌شود، است. یک پروژه زمانی موفق تلقی می‌شود که اهداف مربوط به هزینه و زمان محقق شده باشد." کرزرنر^۲ (۲۰۰۱)،^[۵] نیز تعریفی جامع‌تر از موفقیت پروژه ارائه داده و شرایط دیگری را برای آن در نظر گرفته‌اند. ایشان پروژه‌ای را موفق می‌دانند که تحت این شرایط تکمیل شود:

- در بازه‌ی زمانی تعیین شده،
- در محدوده‌ی بودجه‌ی پیش‌بینی شده،
- در سطح عملکرد یا مشخصات مناسب،
- با رضایت کارفرما،
- با کمینه‌ی تغییرات در محدوده‌ی پروژه یا با تغییرات پذیرفته‌شده‌ی دوطرفه،
- بدون اختلال در جریان کاری اصلی سازمان و بدون تغییر در فرهنگ سازمانی.

اگر عوامل اصلی پروژه قادر به پیش‌بینی رویدادهای احتمالی باشند، این امر می‌تواند به بهبود موفقیت آن‌ها منجر شود و از وقوع پروژه‌های ناموفق جلوگیری کند. با این حال، نحوه‌ی اندازه‌گیری موفقیت پروژه به دلیل تفاوت در درک صاحبان منافع از مفهوم شکست و موفقیت همچنان نامشخص باقی مانده است.^[۶] به‌عبارت دیگر، تفاوت معیارهای موفقیت، سبب به‌وجودآمدن عوامل موفقیت متعدد و مختلف شده است.

² Kerzner

¹ Ashley

در صنعت ساخت عراق، که به‌عنوان یکی از کشورهای در حال توسعه و یکی از بزرگ‌ترین شرکای تجاری ایران شناخته می‌شود، تعداد زیادی از پروژه‌های عمرانی با شکست مواجه می‌شوند؛^[۷] که معمولاً به‌دلیل رعایت‌نکردن محدودیت‌های زمانی، هزینه‌ای، و کیفیت موردانتظار است. وجود مشکلات اخیر در پروژه‌های عمرانی می‌تواند منجر به کاهش رشد توسعه‌ی زیرساخت‌ها، عدم امنیت سرمایه‌گذاری، و چالش‌های مشابه شود.^[۸] بنابراین، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق، اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا می‌تواند به‌عنوان راهنمایی پیش روی صادرکنندگان خدمات فنی و مهندسی به کشور عراق باشد.

هدف پژوهش حاضر، شناسایی عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌های عمرانی با تمرکز بر ۳۲ پروژه‌ی ساخت مدارس در استان واسط عراق بوده است. بدین منظور، در مرحله‌ی اول به بررسی عوامل موفقیت پروژه‌های شناسایی‌شده در کشورهای دیگر از طریق منابع کتابخانه‌ای پرداخته شده است. سپس با استفاده از تجربیات مهندسان و کارشناسان فعال در حوزه‌ی صنعت ساخت در عراق، عوامل مذکور، تأیید و ارزیابی شده‌اند. کشور عراق از جنبه‌های مختلف به‌ویژه در حوزه‌ی صنعت ساخت، فرصت‌ها و پتانسیل‌های منحصر به فردی برای صادرات خدمات فنی مهندسی ایران دارد، به طوری که آمارها حاکی از آن است که در سال ۲۰۱۹ میلادی، هزینه‌ی پروژه‌های عمرانی در بخش دولتی حدود ۳۳۰ میلیون دلار (دلار آمریکا) و در بخش خصوصی، حدود ۸۷۰ میلیون دلار بوده است.^[۹] نگاه ویژه‌ی مسئولان داخل کشور به اهمیت بازار صنعت ساخت گسترده در عراق، مرز طولانی، و وجود گمرک‌ها و بازارچه‌های متعدد در استان‌های مرزی، به عنوان عوامل مؤثر در توسعه‌ی صادرات مصالح ساختمانی و بهره‌برداری از ظرفیت‌های بالقوه در بخش‌های خدمات فنی و مهندسی، از جمله نقاط مثبت منحصر به فرد کشور عراق در عرصه‌ی صنعت ساخت محسوب می‌شود، که بیانگر اهمیت بررسی این موضوع برای ایران است.

۲. مرور ادبیات

برای بررسی پیشینه‌ی پژوهش، ابتدا به تعریف و تحلیل عوامل کلیدی موفقیت پرداخته شده است. سپس، با استناد به نوشتارهای معتبر در حوزه‌ی صنعت ساخت‌وساز، عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌ها بررسی و تحلیل شده‌اند.

۲.۱. تعریف عوامل کلیدی موفقیت پروژه

موضوع دستیابی به موفقیت در پروژه‌ها، یکی از مباحثی است که در آن، به‌طور مکرر بررسی صورت گرفته و تحلیل‌های زیادی در زمینه‌ی مذکور انجام شده است. پژوهش درخصوص شناسایی عوامل موفقیت در مطالعات مدیریتی، موضوع تازه‌ای نیست و از دهه‌ی ۱۹۶۰، مطالعات متعددی در راستای شناسایی عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌ها انجام شده است.^[۱۰، ۱۱] از طرفی، فقدان درک جامع و کافی از عوامل مذکور، مدیریت، پایش، و ارزیابی عملکرد پروژه‌ها را با چالش‌هایی مواجه می‌سازد.^[۱۲]

راکارت^۱ (۱۹۷۹)،^[۱۳] برای نخستین بار به بررسی عوامل کلیدی موفقیت در مدیریت پروژه پرداخته و آن‌ها را به‌عنوان عوامل پیش‌بینی‌کننده‌ی موفقیت پروژه معرفی کرده است. ایشان، سه منبع اصلی، شامل: عوامل محیطی و

موقعیتی، ساختار صنعت، و راهبرد رقابتی را به‌عنوان عوامل کلیدی اخیر شناسایی کرده است. پینتو و اسلوین^۲ (۱۹۸۷)،^[۱۴] نیز عوامل بحرانی موفقیت را به‌عنوان ابزاری برای افزایش احتمال موفقیت پروژه‌ها در نظر گرفته‌اند. لیم و محمد^۳ (۱۹۹۹)،^[۱۵] نیز عوامل اصلی موفقیت پروژه را به‌عنوان مجموعه‌ای از عوامل محیطی، واقعیت‌ها، و مؤلفه‌های تأثیرگذار تعریف کرده‌اند، که می‌توانند در نتایج پروژه تأثیر بگذارند. عوامل ذکرشده می‌توانند سرعت اجرای پروژه را افزایش دهند یا آن را با چالش‌هایی روبرو کنند و همچنین می‌توانند موجب موفقیت یا شکست پروژه شوند، اما نمی‌توانند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پروژه استفاده شوند. چاو و کائو^۴ (۲۰۰۸)،^[۱۶] معتقدند که عوامل بحرانی موفقیت به تخصیص بهینه‌ی منابع محدود، نظیر: زمان، بودجه، و نیروی انسانی در پروژه‌ها کمک می‌کند. در پژوهش دیگری (۱۳۸۷)، مدلی برای شناسایی عوامل و دامنه‌ی موفقیت پروژه‌ها در شرکت‌های کوچک و متوسط ارائه شده است.^[۱۷] بررسی نوشتارهای صورت‌گرفته نشان می‌دهد که مطالعات متعددی در زمینه‌ی شناسایی عوامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها انجام شده است، که عمدتاً بر شناسایی و طبقه‌بندی عوامل اخیر از طریق نظرسنجی‌ها و تحلیل‌های آماری متمرکز بوده‌اند.^[۱۸ و ۱۹]

۲.۲. معیار موفقیت پروژه

براساس مطالعه‌ی بولن و روکارت^۵ (۱۹۸۷)،^[۲۰] عوامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها به حوزه‌های خاصی در هر پروژه محدود می‌شوند و اگر حوزه‌های مذکور در پروژه‌های یک سازمان به نتایج مطلوب دست یابند، می‌توانند عملکرد رقابتی موفق را برای آن سازمان به ارمغان آورند. شنهار^۶ و همکاران (۱۹۹۷)،^[۲۱] نیز بر این باورند که معیارهای سنتی ارزیابی پروژه‌ها (زمان، هزینه، و کیفیت) همگن نیستند. ایشان اشاره کرده‌اند که در بحث منابع پروژه، معیارهای زمان و هزینه از یک نوع هستند؛ در حالی که کیفیت از جنس دیگری است. به همین ترتیب، ایشان در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۱)،^[۲۲] معیارهای اخیر را به‌عنوان معیارهای ارزیابی کوتاه‌مدت شناخته و بر اهمیت زمان در دستیابی به سهم بازار تأکید کرده‌اند. بررسی ادبیات مدیریت پروژه نشان می‌دهد که تفسیر جامع و ثابتی از مفهوم موفقیت پروژه وجود ندارد. مک‌کوی^۷ (۱۹۸۶)،^[۲۳] برای نخستین بار بیان کرده است که نه فقط تعریفی استاندارد برای موفقیت پروژه وجود ندارد، بلکه متدولوژی اثبات‌شده‌ای برای اندازه‌گیری آن نیز در دسترس نیست. آنچه می‌تواند به تعریف موفقیت در یک پروژه کمک کند، معیارهای سنجش موفقیت و ترتیب اهمیت آن‌هاست، که باید در ابتدای پروژه تعیین شوند؛ در غیر این صورت، اعضاء تیم ممکن است در برداشت خود از موفقیت پروژه دچار اختلاف شوند و برخی از آن‌ها ممکن است پروژه را ناموفق تلقی کنند. برای دستیابی به موفقیت در یک پروژه، لازم است که در دو حوزه‌ی مختلف عملکرد موفق وجود داشته باشد:^[۲۴]

۱. موفقیت مدیریت پروژه

۲. موفقیت محصول.

معیارهای ارزیابی موفقیت پروژه باید شامل جنبه‌ها و ابعاد مختلفی باشند. به همین دلیل، استاکن براک^۸ (۱۹۸۶)،^[۲۵] ابعاد موفقیت پروژه را در قالب جدول ۱ دسته‌بندی کرده است.

⁵ Bullen & Rockart

⁶ Shenhar

⁷ McCoy

⁸ Stuckenbruck

۸۷

¹ Rockart

² Pinto & Slevin

³ Lim & Mohamed

⁴ Chow & Cao

جدول ۱. ابعاد موفقیت پروژه از دیدگاه استاکن براک.

Organizational Benefits Gained	Impact on Client	Design Objectives Achievement
Commercial Success Level	Client Satisfaction Level	Achieving Organizational Goals
Maximizing Market Share	Utilized by Client	Achieving Cost Objectives
Creation of New Market	Meeting Client Needs	Achieving Technical Specifications
Creation of New Product Line	Resolving Key Performance Issues	Achieving Performance Specifications
Development of New Technology		

نامناسب بین ذی‌نفعان شود. از این رو، شناسایی و تحلیل عوامل موفقیت در پروژه‌های ساخت‌وساز، اهمیت ویژه‌ای دارد. عوامل بحرانی موفقیت، عامل‌هایی هستند که مدیر پروژه باید آن‌ها را شناسایی و مدیریت کند و غفلت از آن‌ها، احتمال شکست پروژه را افزایش می‌دهد.^[۳۰] از دهه‌ی ۱۹۶۰، پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی شناسایی عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌ها انجام شده است، که برای مثال می‌توان به برخی منابع،^[۳۱، ۱۵، ۱۴، ۱۰] اشاره کرد. در ادامه، به معرفی و دسته‌بندی برخی عوامل موفقیت پرداخته شده است.

۲.۵.۱. عوامل موفقیت پروژه‌ی مرتبط با کارفرما

نتایج برخی مطالعات،^[۳۵-۳۲] نشان داده‌اند که عوامل مرتبط با کارفرما به‌عنوان مهم‌ترین عناصر تأثیرگذار در موفقیت پروژه‌ها شناخته می‌شوند. همچنین، عوامل دیگری که به‌طور غیرمستقیم از نقش کارفرما ناشی می‌شوند، مانند تخصیص منابع کافی و انتخاب پیمانکار و مشاور مناسب، نیز در موفقیت پروژه نقش دارند. بریسنن و هاسلم^[۱۰] (۱۹۹۱)، بر این باور بوده‌اند که ناکارآمدی پروژه‌ها مستقیماً به کارفرما مرتبط است و اقدام‌های ایشان در مراحل مختلف پروژه، قبل، حین، و بعد از اجرا در عملکرد کلی آن تأثیرگذار است. از این رو، کارفرما باید در تمامی مراحل از شرایط پروژه به‌خوبی مطلع باشد. همچنین، مسئولیت‌پذیری کارفرما ابعاد متعددی دارد؛ او باید از درخواست‌هایی که از طرف ذی‌نفعان پروژه در مراحل مختلف پروژه، شامل پیش از شروع، حین اجرا، و یا پس از اتمام پروژه مطرح می‌شوند، آگاه باشد؛ توانایی ارائه‌ی پاسخ سریع را داشته باشد؛ نسبت به تصمیم‌های اتخاذشده مطلع باشد؛ از تنوع تصمیم‌ها آگاه شود، و اطمینان حاصل کند که تمامی گروه‌های ذی‌نفع از تصمیم مأخوذ با خبر هستند. درنهایت، کارفرما باید نیازهای مالی پروژه را نیز برآورده سازد. از سوی دیگر، سایر گروه‌ها نیز باید به‌طور مداوم با کارفرما در ارتباط باشند تا از نیازهای او آگاهی یابند و هیچ ابهامی باقی نماند.^[۳۷]

۲.۵.۲. عوامل موفقیت پروژه‌ی مرتبط با ذی‌نفعان

نقش ذی‌نفعان به‌عنوان عاملی مؤثر در اجرای پروژه و تحویل آن شناخته می‌شود. تمامی ذی‌نفعان کلیدی باید در فرآیند تهیه‌ی طرح اصلی مشارکت داشته باشند و امکان اظهارنظر درباره‌ی آن را پیدا کنند؛ همچنین، به همه‌ی ذی‌نفعان این فرصت داده شود که نظرهای خود را در مورد اهداف و مأموریت پروژه بیان کنند. آگاهی از اینکه چه کسی در مورد شرایط پروژه تصمیم‌گیری می‌کند، نیز برای تمامی افراد دخیل در پروژه ضروری است. به وضوح، مشارکت ذی‌نفعان اصلی در طول چرخه‌ی عمر پروژه با قدرت مدیریت در تحویل موفقیت‌آمیز آن ارتباط نزدیکی دارد. علاوه بر این، حمایت مداوم از سوی مراتب بالایی سازمان، به‌خصوص توافق ذی‌نفعان با طرح‌های پروژه، به‌عنوان عامل

۳.۲. نقش برنامه‌ریزی و کنترل پروژه در موفقیت پروژه

مطالعات فراوانی در زمینه‌ی اهمیت برنامه‌ریزی و کنترل پروژه انجام شده است، که تأثیر مثبت آن در موفقیت پروژه‌ها را به اثبات رسانده‌اند. در پروژه‌های بزرگ عمرانی، نیاز به برنامه‌ریزی جامع و دقیق قبل از آغاز کار و همچنین کنترل مستمر در حین اجرا وجود دارد. از آنجایی که پروژه‌های بزرگ، انتظارهای اقتصادی و اجتماعی بالایی را برآورده می‌سازند، هرگونه تأخیر در تکمیل آن‌ها می‌تواند به کاهش بازدهی موردانتظار منجر شود و در نتیجه، به هدررفتن منابع مالی و آسیب به اعتبار پروژه منتهی شود.^[۲۶] برنامه‌ریزی به اعضای تیم این امکان را می‌دهد که موقعیت کنونی خود را شناسایی کنند، فاصله‌ی خود از اهداف تعیین‌شده را ارزیابی و نیازمندی‌های لازم برای دستیابی به آن‌ها را مشخص کنند. در صورت انجام برنامه‌ریزی و کنترل دقیق، دستیابی به اهداف پروژه تسهیل خواهد شد.^[۲۷] برای تحقق برنامه‌ریزی و کنترل مؤثر، تیم پروژه باید از ابزارها و روش‌های مدیریت پروژه به بهترین نحو استفاده کند.^[۲۸]

۴.۲. نقش عملکرد سازمانی در تعیین عوامل موفقیت پروژه

دانیل^[۲۹] (۱۹۶۱)، بر این باور بود که سازمان‌ها برای جلوگیری از بار اطلاعاتی اضافی و به‌منظور افزایش کارایی، باید سیستم‌های اطلاعاتی خود را بر روی عوامل کلیدی متمرکز کنند، که موفقیت سازمان را تضمین می‌کنند. در این راستا، مدیریت می‌تواند با استفاده از عوامل کلیدی ذکرشده به‌عنوان فیلتر، اطلاعاتی را که برای تصمیم‌گیری‌های حیاتی در سازمان اهمیت دارد، جمع‌آوری و تحلیل کند. بنابراین، تصمیم‌گیری مؤثرتر بر پایه‌ی داده‌هایی است که به‌طور خاص با موفقیت سازمان در ارتباط هستند. مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد هر سازمان تحت تأثیر ۵ منبع اصلی قرار دارد، که بخش عمده‌ای از عوامل بحرانی موفقیت از منابع مذکور ناشی می‌شود.^[۲۰]

- صنعت،
- راهبرد رقابتی و موقعیت صنعتی،
- عوامل محیطی،
- عوامل موقتی،
- موقعیت مدیریتی.

۵.۲. عوامل موفقیت پروژه

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یک حوزه‌ی تجاری رقابتی با ریسک‌های بالا شناخته می‌شود و با چالش‌های متعددی، نظیر: همکاری ناکافی، بی‌اعتمادی، و ارتباط‌های غیرمؤثر مواجه است، و موارد اخیر می‌توانند منجر به روابط

¹⁰ Bresnen & Haslam

⁹ Daniel

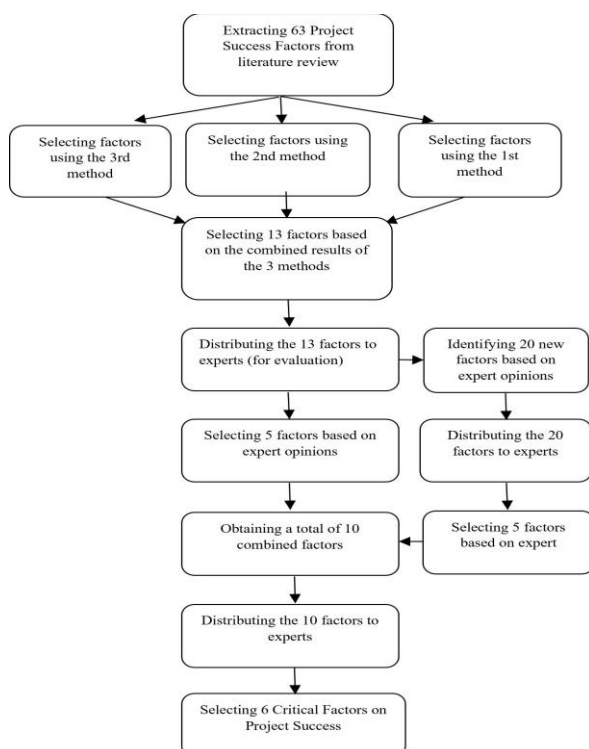
ادبیات موجود در پژوهش‌های داخلی و خارجی، مجموعاً ۶۳ عامل موفقیت شناسایی شده‌اند. جدول ۲، شامل عوامل موفقیت پروژه‌هایی است که در ۴۰ نوشتار بررسی شده‌اند. سپس با به‌کارگیری سه روش مختلف، ۱۳ عامل انتخاب و به ۴۰ نفر از مهندسان و کارشناسان با تجربه‌ی عراقی در شهرهای مختلف عراق ارسال شده‌اند. از ویژگی‌های افراد مذکور می‌توان به سابقه‌ی کاری بیش از ۱۰ سال در حوزه‌هایی مانند: معاونت توسعه و ساخت وزارت آموزش و پرورش عراق، شهرداری‌ها، و کمیته‌ی فنی استان در شهرهای واسط، نجف، کربلا، کرکوک، و بغداد اشاره کرد. از آن‌ها خواسته شد تا براساس تجربیات و قضاوت شخصی خود، ۵ عامل را از میان ۱۳ عامل ارسال‌شده برگزینند که بیشترین تناسب را با محیط صنعت ساخت عراق داشته باشد. استفاده از ۳ روش مختلف برای انتخاب عوامل موفقیت پروژه به‌منظور افزایش دقت و اعتبار نتایج بوده است. روش اول، به شناسایی عواملی پرداخته است، که بیشترین تکرار را در نوشتارهای مختلف داشته‌اند. روش دوم، با تمرکز بر نوشتارهای ژورنالی اعتبار بیشتری برای انتخاب عوامل ایجاد کرده است. روش سوم، با ارزیابی اعتبار نوشتارها، اطمینان حاصل می‌کند که عوامل شناسایی‌شده از منابع علمی معتبر استخراج شده‌اند. در شکل ۱، مراحل انجام پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.

۱.۳. روش اول انتخاب عوامل

در روش اول، ۱۰ عاملی که در بین نوشتارها، بیشترین تکرار را داشته‌اند، انتخاب شده‌اند.

۲.۳. روش دوم انتخاب عوامل

نوشتارهای منتشرشده در ژورنال‌ها به‌طور کلی اعتبار و غنای بیشتری نسبت به نوشتارهای کنفرانسی داشته‌اند. به همین دلیل، انتخاب عواملی که در آن‌ها به کرات ذکر شده‌اند، اعتبار بیشتری نسبت به نوشتارهای کنفرانسی خواهند



شکل ۱. گام‌های طی‌شده در پژوهش حاضر.

کلیدی در دست‌یابی به اهداف کلی پروژه مطرح شده است. این موضوع در برخی پژوهش‌ها،^[۳۷ و ۳۸] نیز تأیید شده است. آلبرز^{۱۱}، (۲۰۱۰)،^[۳۹] در مطالعه‌ی خود نشان داده است که ۵ مورد از ۱۲ عامل موفقیت پروژه‌های عمرانی به عوامل محیطی بیرونی مربوط می‌شود و همچنین اهمیت رضایت مشتری در ارزیابی موفقیت پروژه به‌طور مکرر در مطالعات پیشین بررسی شده است.^[۴۰] ^[۴۲] مولر و ترنر^{۱۲} (۲۰۰۷)،^[۴۳] در پژوهش خود با عنوان "تطبیق سبک‌های رهبری"، تأثیر شایستگی‌های مختلف رهبری در موفقیت پروژه را بررسی کرده و معیارهای ارائه‌شده توسط وسترولد و والترز^{۱۳} (۲۰۰۱)،^[۴۴] (شامل: رضایتمندی حامیان، کاربران، تأمین‌کنندگان، تیم پروژه، و سایر ذی‌نفعان) را پس از اعتبارسنجی از طریق مصاحبه‌های ساختارمند به‌کار برده‌اند. همچنین، اندرسون^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۶)،^[۴۵] ۶۸ عامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها را شناسایی و آن‌ها را در ۹ دسته تقسیم‌بندی کرده‌اند، که در آن‌ها، ذی‌نفعان پروژه، نقش محوری داشته‌اند. عوامل بحرانی موفقیت به‌طور خلاصه به معنای فرآیند تعیین اهداف روشن و شفاف برای جلب اعتماد و مشارکت ذی‌نفعان تعریف می‌شوند.

۳.۵.۲. سایر عوامل موفقیت پروژه

برخی مطالعات نشان داده‌اند که در گذشته، مطالعات زیادی در زمینه‌ی شناسایی عوامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها انجام شده است، که بیشتر بر شناسایی و طبقه‌بندی آن‌ها از طریق نظرسنجی و تحلیل‌های آماری متمرکز بوده‌اند.^[۴۸-۴۹] در پژوهش حاضر، هدف این بوده است که با مرور جامع ادبیات، ابتدا عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌ها شناسایی شوند و سپس از طریق نظرسنجی از خبرگان، عوامل مذکور تعیین و موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق براساس مقایسه‌ی آن‌ها در نمونه‌های منتخب ارزیابی شود. عوامل موفقیت پروژه منحصر به فرد نیستند و بسته به شرایط و محیط می‌توانند متفاوت باشند. با بررسی نوشتارهای منتشرشده در زمینه‌ی شاخص‌های موفقیت بحرانی پروژه در نشریات معتبر علمی، ۷ عامل موفقیت که در کشورهای توسعه‌یافته‌ی همچون: چین، بریتانیا، آمریکا، و استرالیا به‌طور مکرر ذکر شده‌اند، شناسایی شده‌اند که شامل این موارد هستند:^[۴۹-۵۱]

- کسب‌وکار کارفرما، سازمان، و نیازمندی‌های پروژه،
- نیازمندی‌های سهامداران و ذی‌نفعان،
- دانش، تجربه، و پیشینه‌ی فرهنگی سهامداران،
- تصمیم‌گیری و مهارت‌های مدیریتی مدیران عالی رتبه‌ی پروژه،
- صلاحیت تیم طراحی،
- علاقه‌مندی مشارکان پروژه،
- فرآیندهای مختصرسازی.

۳. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کمی نسبی محسوب می‌شود. روش‌های تحقیق کمی به بررسی یک فرضیه‌ی علمی در یک نمونه‌ی آماری می‌پردازند. یکی از ویژگی‌های اصلی پژوهش‌های مذکور، تعیین واحد تحلیل است؛ که هدف آن شناخت رفتار یا ویژگی‌های آن است. در مطالعه‌ی حاضر، واحد تحلیل، تعداد عوامل موفقیت پروژه‌های عمرانی در عراق است. پس از تعریف هدف اصلی، که شناسایی عوامل کلیدی موفقیت است، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و مرور

¹³ Westerveld & Walters

¹⁴ Andersen

¹¹ Albers

¹² Müller & Turner

جدول ۲. عوامل موفقیت استخراج‌شده از برخی نوشتارها. [۱، ۱۰، ۱۱، ۱۲-۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۷، ۳۱، ۴۶، ۴۷، ۵۲-۵۵]

Row	Success Factors	Frequency	Row	Success Factors	Frequency
1	Senior Management Support	35	33	Success in Market and Sales	6
2	Communication	32	34	Profit Margin in Jobs and Contracts	6
3	Availability of Required Technology and Expertise	30	35	Use of Software Programs	6
4	Client Acceptance or Satisfaction	28	36	Management and Monitoring of Cash Flow in Projects	6
5	Competition and Project Team Capabilities	26	37	Project Volume	6
6	Clear and Specific Project Objectives	20	38	Contractor Company Policies (Financial, HR, Safety, etc.)	5
7	Supervision and Timely Feedback with Comprehensive Control at Each Implementation Stage	20	39	Constructive Conflict Resolution	5
8	Precise Specifications for Project Execution Stages	18	40	Market Selection	5
9	Capability to Manage Unexpected Crises	15	41	Country's Economic Conditions	5
10	Quality Control	14	42	Time Forecasting	5
11	Commitment to Planning and Execution Control	14	43	Change Management	5
12	Realistic Objective	13	44	Adherence to Budget	4
13	Risk Management	12	45	Safety	4
14	Recruitment, Selection, and Training of Project Team Personnel	12	46	Alignment with Expectations	4
15	Cost	12	47	Proper Equipment Maintenance	4
16	Organization and Planning	12	48	Education Level of the Project Team	3
17	Brand Image or Project Reputation in Financial Markets	11	49	Honesty	3
18	Motivation	11	50	Project Return on Investment Considering Environmental Indices	3
19	Political Connections	11	51	Stakeholder Participation (Local Community, Employers, Contractors, etc.)	3
20	Proper Understanding of Employee Needs	11	52	Weather	2
21	Effective Communication	10	53	Having a Website	2
22	Learning from Mistakes	10	54	Proper Stakeholder Notification	2
23	Availability of Sufficient Resources for Project Execution	9	55	Timely Invoice Payments	2
24	Various Project Leadership Styles	9	56	Low Interest Rates in Economy (Reducing Borrowing Costs and Increasing Project Appeal)	2
25	Coordination	9	57	Identifying General Needs	2
26	Team Spirit and Experience of the Contractor's Project Team	8	58	Suitable Sales Offices (Enhancing Marketing, Attracting Clients, and Increasing Sales)	2
27	Measurable Project Objectives	8	59	Innovative Products	2
28	Mutual Trust	8	60	Fair Pricing	2
29	Business Management	8	61	Sustainability	2
30	Project Delays	8	62	Maintenance and Preservation of Project's Positive Record	1
31	Type of Contract Agreed Between Parties (e.g., Employer and Contractor)	7	63	Electronic Marketing	1
32	Control of Subcontractors' Performance	7			

اعتبار وجود دارد. بنابراین، برای ارزیابی اعتبار نوشتارهای ژورنالی و کنفرانسی و شناسایی معتبرترین عوامل مؤثر در موفقیت پروژه، نیاز به یک معیار برای سنجش سطح اعتبار مجلات علمی و کنفرانس‌ها احساس می‌شود. در این مرحله، پژوهشگران با استفاده از رابطه‌ی ۱، نوشتارها را امتیازدهی و ۱۰ عامل با بالاترین امتیاز را شناسایی کرده‌اند.

داشت. در بخش حاضر، ۱۰ عامل از میان ۶۳ عامل مؤثر در موفقیت پروژه، براساس میزان تکرار در نوشتارهای ژورنالی انتخاب شده‌اند.

۳.۳. روش سوم انتخاب عوامل

این تذکر لازم است که تمامی نوشتارهای بررسی‌شده، یک سطح اعتبار یکسان نداشته‌اند. حتی در میان نوشتارهای ژورنالی، تفاوت‌هایی در سطح علمی و

جدول ۳. عوامل موفقیت پروژه‌ی استخراج‌شده از طریق سه روش.

Row	Project Success Factors	Frequency	Row	Project Success Factors	Frequency
1	Senior Management Support	27	8	Quality Control	14
2	Supervision and Timely Feedback with Comprehensive Project Control Information	21	9	Commitment to Planning and Execution Control	14
3	Capability to Manage Unexpected Crises	19	10	Recruitment and Training of Project Personnel	13
4	Detailed Project Planning	18	11	Client Acceptance or Satisfaction with the Final Project	12
5	Communication	17	12	Recognizing Risk in Large Tenders	11
6	Availability of Required Technology and Expertise	15	13	Clear Project Mission and Objectives	5
7	Competition and Project Team Capabilities	14			

منتخب با ۵ عاملی که بیشترین تکرار را در نوشتارها داشته‌اند، ترکیب و دوباره برای کارشناسان ارسال شدند تا از میان ۱۰ عامل ترکیبی، ۵ عامل مؤثرتر را انتخاب کنند. نتایج مرحله‌ی نهایی در جدول ۵ ارائه شده است.

در نهایت، ۶ عامل نهایی از بین ۱۰ عامل با بیشترین تکرار انتخاب شده‌اند، که به این شرح هستند:

- توانایی مالی شرکت پیمانکار (کمی)،
- پشتیبانی مدیر ارشد (کمی)،
- استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی (کیفی)،
- ارزیابی شرکت پیمانکار (کمی)،
- استفاده از قرارداد کلید در دست (کیفی)،
- هماهنگی قبلی بین همه‌ی بخش‌های پروژه (کیفی).

۴. یافته‌های پژوهش

در بخش کنونی، رابطه‌ی میان عوامل شناسایی‌شده و موفقیت پروژه‌ها بررسی شده است. شایان ذکر است که برای هر یک از عوامل اخیر، شاخص‌هایی براساس نظر خبرگان تعیین شده است؛ به‌عنوان مثال، در ارزیابی ۳ عامل کمی پژوهش حاضر، به عامل توانایی مالی شرکت پیمانکار از دو شاخص شامل تجهیزات (شامل مواد و مصالح که با توجه به درصد میزان پیش‌پرداخت توسط کارفرما به پیمانکار سنجیده شده‌اند) و ماشین‌آلات (تعداد ماشین‌آلات هر پیمانکار به صورت درصدی از بیشترین ماشین‌آلات موجود در شرکت پیمانکار برتر در حوزه‌ی مذکور محاسبه شده است) توجه شده است. همچنین عامل پشتیبانی مدیر ارشد شامل دو شاخص تعداد بازدید از پروژه توسط مقام‌های عالی (کارفرما و یا نمایندگان آن) و تعداد مهندسان همکار، که به صورت درصدی مطابق روش محاسبه‌ی شاخص ماشین‌آلات بررسی شده‌اند. در مورد آخرین عامل کمی، که ارزیابی شرکت پیمانکار است، نیز دو شاخص تعداد سابقه‌ی کار مشابه شرکت پیمانکار و تعداد گروه تیم پروژه‌ی پیمانکار، که به صورت درصدی مشابه روش شاخص ماشین‌آلات محاسبه شده‌اند، به‌عنوان شاخص در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده‌اند. در نتایج و نمودارهای آینده، سعی

$$Score = IF \times 0.5 + \left(\frac{1}{Q} \right) \times \begin{cases} Journal = 2 \\ Conference = 1 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، IF (Impact Factor) ضریب تأثیر مجله است، که نشان‌دهنده‌ی میزان ارجاع به نوشتارهای منتشرشده در آن مجله در یک بازه‌ی زمانی مشخص است؛ که به‌عنوان معیاری برای سنجش اعتبار و کیفیت مجلات علمی استفاده می‌شود. Q (Quartile Ranking)، رتبه‌بندی چارک نوشتار است، که نشانگر جایگاه مجله در بین سایر مجلات حوزه‌ی تخصصی مرتبط است و معمولاً به ۴ سطح Q1 تا Q4 تقسیم می‌شود، که Q1 بالاترین سطح و Q4 پایین‌ترین سطح را نشان می‌دهند.

Journal = ۲: وزن در نظر گرفته‌شده برای نوشتارهای ژورنالی است، که بیانگر اهمیت بالاتر این نوع نوشتارها نسبت به نوشتارهای کنفرانسی در ارزیابی علمی است.

Conference = ۱: وزن در نظر گرفته‌شده برای نوشتارهای کنفرانسی است، که معمولاً اعتبار علمی پایین‌تری نسبت به نوشتارهای ژورنالی دارند.

پس از بررسی برآیند مشترک سه روش اخیر، ۱۳ عامل منحصر به فرد شناسایی شده‌اند، که بیشترین تکرار را در هر سه روش داشته‌اند. در جدول ۳، ۱۳ عامل مشترک در هر سه روش ارائه شده است.

در مرحله‌ی بعد، ۱۳ عامل شناسایی‌شده به‌صورت پرسش‌نامه‌ای برای ۴۰ نفر از متخصصان حوزه‌ی ساخت‌وساز در عراق ارسال شده است. همچنین، جدولی اضافی طراحی شد تا در صورت وجود عوامل موفقیتی فراتر از ۱۳ عامل مشخص‌شده، پاسخ‌دهندگان بتوانند آن‌ها را یادداشت کنند. با توجه به نظرهای ۴۰ نفر مذکور و پس از حذف تکرارها، حدود ۲۰ عامل اضافی مرتبط با موفقیت پروژه‌های عمرانی شناسایی شده است (جدول ۴). سپس، ۲۰ عامل اخیر دوباره برای همان ۴۰ مهندس و کارشناس عراقی ارسال و از آن‌ها خواسته شد تا از میان ۲۰ عامل ارسالی، ۵ عامل را براساس قضاوت، تجربه، و تناسب با شرایط صنعت ساخت عراق انتخاب کنند. از بین پاسخ‌ها، ۵ عاملی که بیشترین توافق را میان پاسخ‌دهندگان داشته‌اند، انتخاب شده‌اند. در مرحله‌ی نهایی، ۵ عامل

جدول ۴. پیشنهادهای عوامل موفقیت از نظر کارشناسان در کشور عراق.

Row	Success Factors	Frequency	Row	Success Factors	Frequency
1	Prior Coordination Among All Project Sectors	19	11	Facilitating the Approval Process for Changes in Project Activity Quantities	10
2	Financial Capability of Contractor Companies	17	12	Ensuring Project Security	9
3	Contractor Evaluation	14	13	Controlling Administrative and Financial Corruption in the Project	9
4	Use of Turnkey Contracts	14	14	Emphasis on Providing Similar Services for the Project by the Investor	9
5	Use of Executive Consulting Firms	13	15	Necessity of Utilizing Services from Specialized and Experienced Companies in the Project	8
6	Project Management and Planning Without Political Influence	13	16	Suitable Legal Environment for Executing All Project Stages	6
7	Absence of Disputes or Chaos Across the Project Geography and Surrounding Residential Areas	13	17	Increasing the Contractor's Advance Payment Ratio for the Project	6
8	Project Safety and Lack of Risk of Physical Incidents or Casualties	11	18	Ensuring No Interference from Local Governments in the Technical Aspects of the Project	5
9	Conducting Economic and Operational Feasibility Assessments of the Project Based on Scientific and Professional Principles Without Political Influence	10	19	Ensuring Investment Security	2
10	Continuity in Contractor Funding and Timely Payment of Incurred Costs	10	20	Transparency and Clarity in Transactions	2

جدول ۵. نتایج نهایی (عوامل موفقیت پروژه از نظر کارشناسان و نوشتارهای با بیشترین تکرار).

Row	Project Success Factors	Frequency	Row	Project Success Factors	Frequency
1	Financial Capability of the Contractor Company	28	6	Prior Coordination Among All Project Sectors	21
2	Senior Management Support	27	7	Communication	16
3	Use of Executive Consulting Firms	24	8	Supervision and Timely Feedback with Comprehensive Project Control Information	15
4	Contractor Evaluation	23	9	Capability to Manage Unexpected Crises	14
5	Use of Turnkey Contracts	22	10	Detailed Project Planning	10

در روش ذکرشده، ابتدا برای هر شاخص، مجذور مقادیر آن در تمامی پروژه‌ها محاسبه و جمع می‌شود. سپس، جذر مجموع آن‌ها به‌عنوان مخرج مشترک در نرمال‌سازی استفاده می‌شود. نتیجه‌ی فرآیند اخیر، تولید مقادیر مقایسه‌پذیر برای هر پروژه درخصوص شاخص مرتبط خواهد بود، که امکان تحلیل تطبیقی دقیق میان پروژه‌های موفق و ناموفق را فراهم می‌سازد.

همچنین ۳ عامل کیفی، شامل: استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی (با درنظرگرفتن شاخص حضور یا عدم حضور مشاوران در دفاتر)، استفاده از قرارداد کلید در دست، و هماهنگی قبلی بین همه‌ی بخش‌های پروژه (با درنظرگرفتن شاخص وجود یا نبود مشکلات با همسایگان)، که شاخص‌های تأثیرگذار در هر کدام از عوامل مذکور براساس نظر خبرگان تعیین شده است، در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده‌اند.

شده است تا عوامل کمی انتخاب شوند تا با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از هر پروژه بتوان مقایسه‌ی تحلیلی را انجام داد. از طرفی، به‌خاطر رعایت بستر مناسب برای مقایسه، تمامی عوامل کمی نرمال شده‌اند، تا امکان مقایسه‌ی عوامل اخیر در پروژه‌های موفق و ناموفق نیز فراهم شود. برای مقایسه‌پذیرکردن شاخص‌های ذکرشده میان پروژه‌های مختلف، نرمال‌سازی داده‌ها مطابق رابطه‌ی ۲ صورت گرفته است.

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2)$$

که در آن، a_{ij} مقدار خام شاخص j در پروژه‌ی i (به‌صورت اعشاری درصدی)؛ n_{ij} مقدار نرمال‌شده‌ی همان شاخص؛ و m تعداد کل پروژه‌های بررسی‌شده هستند.

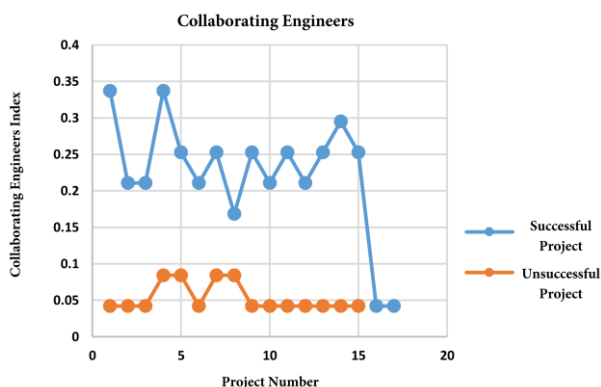
بالا تر بوده‌اند؛ که نمایانگر تأثیر مستقیم و مثبت شاخص‌های مذکور در موفقیت پروژه‌های مطالعه‌شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در پروژه‌های موفق، شرکت‌های پیمانکاری، سطح تجهیزات بالاتر و ماشین‌آلات بیشتری داشته‌اند. به همین دلیل، توانایی مالی شرکت‌های اخیر، نقشی کلیدی در موفقیت پروژه ایفا کرده است.

۲.۴. رابطه‌ی میان پشتیبانی مدیر ارشد و موفقیت پروژه

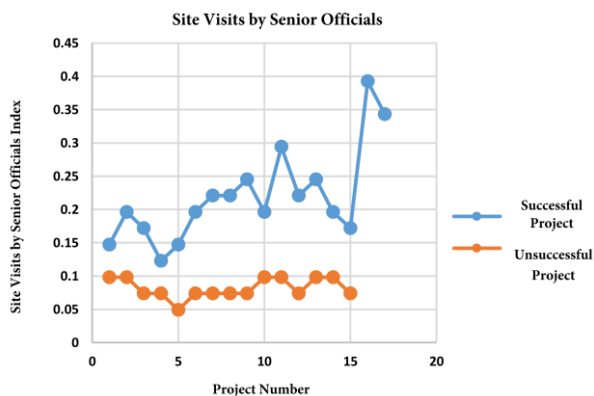
بر اساس نظر خبرگان، دو شاخص در ارزیابی حمایت مدیر ارشد، شامل تعداد مهندسان همکار و تعداد بازدیدهای مقام‌های عالی از پروژه‌ها در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده‌اند؛ که به صورت کمی برای بررسی تأثیر آن‌ها در موفقیت پروژه‌ها استفاده و مقادیر نرمال‌شده‌ی آن‌ها برای ۳۲ پروژه بررسی شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

مطابق شکل ۴، به جز دو پروژه در سایر پروژه‌های موفق، تعداد مهندسان همکار در سطح بالاتری نسبت به پروژه‌های ناموفق قرار داشته است. شایان ذکر است که دو پروژه‌ی ذکرشده با استفاده از روش قرارداد کلید در دست اجرا شده‌اند و در شیوه‌ی اخیر، نیاز به تعداد کمتری از مهندسان همکار از سوی تیم کارفرما وجود دارد.

مطابق شکل ۵، شاخص تعداد بازدیدهای پروژه توسط مقام‌های ارشد در پروژه‌های موفق به طور قابل توجهی بیشتر بوده و در پروژه‌هایی که از سیستم قراردادی کلید در دست استفاده کرده‌اند، در بالاترین سطح قرار داشته است. دلیل این امر به ماهیت این نوع قرارداد بر می‌گردد؛ زیرا در سیستم مذکور به دلیل نبود مشاور، تیم کارفرما نیاز به انجام بازدیدهای بیشتری نسبت به قراردادهای سنتی سه عاملی دارد. به طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که



شکل ۴. رابطه‌ی بین شاخص مهندسان همکار و موفقیت پروژه‌ها.



شکل ۵. رابطه‌ی بین شاخص بازدید از پروژه توسط مقام‌های عالی و موفقیت پروژه‌ها.

در مطالعه‌ی حاضر، "عدم تأخیر" به عنوان یک معیار عینی و قابل اندازه‌گیری برای ارزیابی موفقیت پروژه‌ها انتخاب شده است. با این حال، هدف اصلی پژوهش نه فقط تأیید معیار اخیر، بلکه شناسایی عواملی است که به تحقق "عدم تأخیر" و در نتیجه موفقیت پروژه منجر می‌شوند. به عبارت دیگر، معیار "عدم تأخیر"، نتیجه‌ی نهایی است و مطالعه‌ی کنونی به دنبال علل و عوامل مؤثر در آن است. عواملی، مانند توانایی مالی پیمانکار یا پشتیبانی مدیر ارشد، خود به عنوان متغیرهای مستقل بررسی شده‌اند، که می‌توانند موفقیت یا شکست پروژه را توضیح دهند. بنابراین، برای دسته‌بندی اولیه‌ی پروژه‌ها از معیار "عدم تأخیر" استفاده شده است، که به عنوان یک عامل عملکرد موفقیت پروژه به آن توجه شده است؛ لذا از میان ۳۲ پروژه‌ی بررسی‌شده، ۱۷ پروژه‌ی موفق و ۱۵ پروژه‌ی ناموفق به اتمام رسیده‌اند؛ به عبارت دیگر، ۵۳٪ از پروژه‌ها با موفقیت و ۴۷٪ باقی‌مانده با عدم موفقیت همراه بوده‌اند.

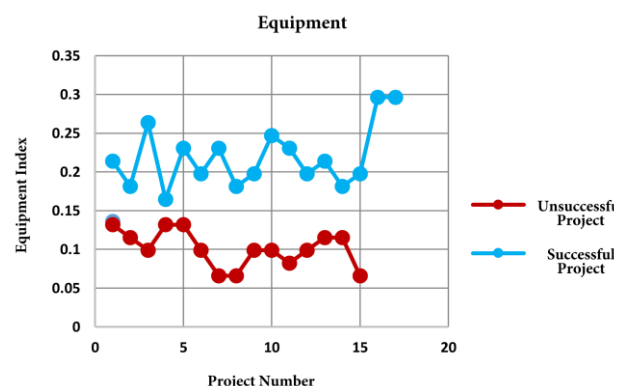
۱.۴. رابطه‌ی میان توانایی مالی شرکت پیمانکار و موفقیت پروژه

برای کمی‌سازی توانایی مالی شرکت‌های پیمانکاری از دو شاخص تجهیزات و تعداد ماشین‌آلات استفاده شده است (شکل‌های ۲ و ۳).

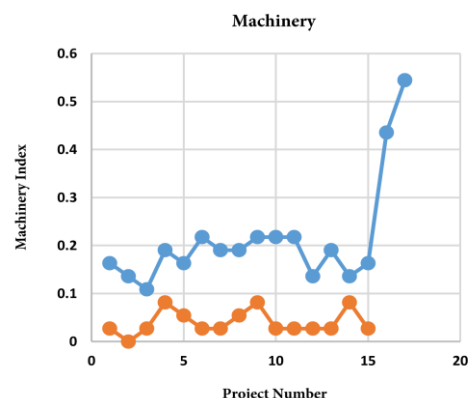
همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پروژه‌هایی موفق بوده‌اند (با مدت‌زمان تأخیر صفر به اتمام رسیده‌اند)، که شرکت‌های پیمانکاری مجری آن، سطح تجهیزات بالاتری داشته‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، شرکت‌های پیمانکاری که تعداد ماشین‌آلات بیشتری داشته‌اند، پروژه‌ها را بیشتر با موفقیت به اتمام رسانده‌اند.

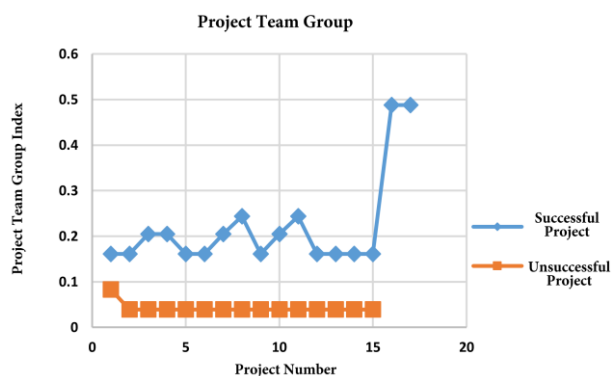
مطابق شکل‌های ۲ و ۳، مقادیر نرمال‌شده‌ی میزان درصد پیش‌پرداخت به پیمانکار و تعداد ماشین‌آلات در پروژه‌های موفق نسبت به پروژه‌های ناموفق



شکل ۲. رابطه‌ی بین شاخص تجهیزات و موفقیت پروژه‌ها.



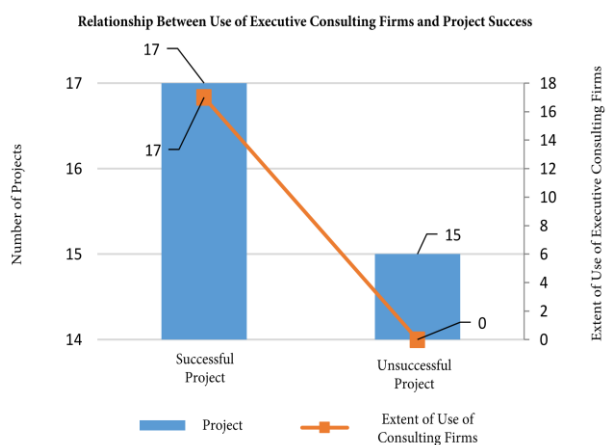
شکل ۳. رابطه‌ی بین شاخص ماشین‌آلات و موفقیت پروژه‌ها.



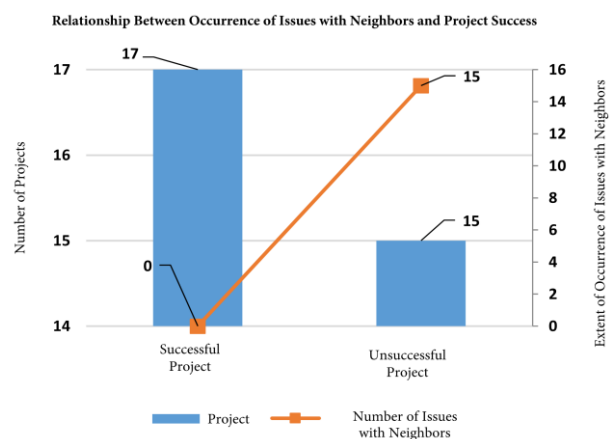
شکل ۶. رابطه‌ی بین شاخص گروه تیم پروژه و موفقیت پروژه‌ها.



شکل ۷. رابطه‌ی بین شاخص سابقه کار مشابه و موفقیت پروژه‌ها.



شکل ۸. رابطه‌ی میان استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی و موفقیت پروژه.



شکل ۹. رابطه‌ی میان وقوع مشکلات با همسایگان و موفقیت پروژه.

شاخص‌های تعداد مهندسان همکار و تعداد بازدید از پروژه توسط مقام‌های عالی، تأثیر مستقیم و مثبتی در موفقیت پروژه‌ها داشته‌اند.

۳.۴. رابطه‌ی میان ارزیابی شرکت پیمانکار و موفقیت پروژه

دو شاخص تعداد گروه تیم پروژه و تعداد سابقه کار مشابه جهت ارزیابی موفقیت یک شرکت پیمانکاری در اتمام پروژه با کمترین میزان تأخیر در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است (شکل‌های ۶ و ۷).

مطابق شکل ۶، تیم پیمانکاری با تعداد بیشتر اعضای تیم پروژه، توانایی بیشتری در اتمام موفقیت‌آمیز پروژه داشته است.

مطابق شکل ۷، به هر میزان که سابقه کار مشابه شرکت پیمانکار بیشتر بوده است، پروژه موفقیت بیشتری داشته است. در نتیجه، یافته‌های پژوهش حاضر، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت تعداد اعضای تیم پروژه و تجربه‌ی کاری مشابه در موفقیت پروژه‌هاست. به همین دلیل، عامل ارزیابی شرکت پیمانکار، ارتباط مستقیمی با موفقیت پروژه‌های موردنظر داشته و تأثیر آن نیز مثبت بوده است.

۴.۴. رابطه‌ی میان استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی و موفقیت پروژه

در شکل ۸، ارتباط میان استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی و اثربخشی آن در موفقیت پروژه مشاهده می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که خدمات دفاتر مشاوره‌ی اجرایی با مشاوران طراحی پروژه متفاوت است و مشاوران اجرایی در مرحله‌ی اجرای پروژه ایفای نقش می‌کنند.

مطابق شکل ۸، از میان ۱۷ پروژه‌ی موفق، تمامی آن‌ها از خدمات دفاتر مشاوره بهره‌مند بوده‌اند. در مقابل، هیچ‌یک از پروژه‌های ناموفق بررسی‌شده از خدمات اخیر استفاده نکرده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به کارگیری دفاتر مشاوره، تأثیر مثبت و مستقیمی در موفقیت پروژه‌های مطالعه‌شده داشته است.

۵.۴. رابطه‌ی میان هماهنگی قبلی بین تمامی بخش‌های پروژه و موفقیت پروژه

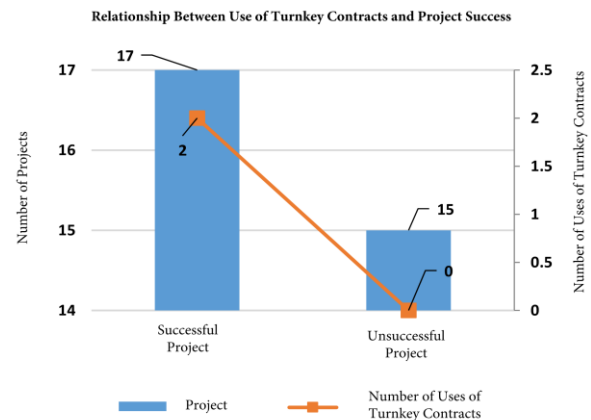
در بخش کنونی، شاخص وجود یا نبود مشکلات با همسایگان برای سنجش میزان هماهنگی قبلی بین تمامی بخش‌های پروژه براساس نظر خبرگان در نظر گرفته شده است. در شکل ۹، رابطه‌ی میان مشکلات با همسایگان و موفقیت پروژه مشاهده می‌شود، که نشانگر میزان وقوع پدیده‌ی اخیر در پروژه‌های موفق و ناموفق است.

مطابق شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که شاخص بروز مشکلات با همسایگان، رابطه‌ی معکوس با موفقیت پروژه دارد؛ و به عبارتی دیگر، به عنوان یک شاخص منفی در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عامل مشکلات با همسایگان در هیچ‌یک از پروژه‌های موفق مشاهده نشده است و تمامی پروژه‌های ناموفق با مسائل ذکرشده روبرو بوده‌اند. این تذکر لازم است که شاخص منفی مشکلات با همسایگان، برای نشان دادن تأثیر عامل هماهنگی پیشین بین بخش‌های مختلف پروژه انتخاب شده است؛ که عمدتاً با نهادهای خارجی مرتبط با پروژه، از جمله سازمان‌های شهری در ارتباط است. بنابراین، باید از بروز مشکلات و اختلافات با همسایگان، که ذینفعان خارجی محسوب می‌شوند، جلوگیری شود. به ویژه با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، موفقیت پروژه براساس میزان تأخیر کلی آن ارزیابی شده است؛ مشکلات با همسایگان ممکن است تأثیر قابل توجهی در زمان اتمام پروژه داشته باشد.

نتایج نشان داده است که موفقیت ۳۲ پروژه‌ی مدرسه‌سازی کشور عراق با ۵ عامل، شامل: توانایی مالی شرکت‌های پیمانکاری، پشتیبانی مدیریت ارشد، استفاده از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی، ارزیابی و انتخاب بهترین شرکت پیمانکاری، و هماهنگی میان بخش‌های مختلف پروژه رابطه‌ی مستقیم و مثبت دارد. بنابراین، می‌توان گفت که ۵ عامل مذکور برای سنجش موفقیت پروژه‌های مدرسه‌سازی در پژوهش حاضر مناسب بوده‌اند. با این حال، رابطه‌ی معناداری بین سیستم قراردادی کلید در دست و موفقیت پروژه مشاهده نشده است. پژوهشگران بر این باورند که برای ارزیابی اثر بخشی سیستم‌های قراردادی مختلف، نیاز به یک بانک اطلاعاتی جامع‌تر از پروژه‌ها وجود دارد، که به دلیل محدودیت جامعه‌ی آماری در پژوهش حاضر امکان‌پذیر نبوده است.

با توجه به عوامل بررسی‌شده در پژوهش انجام‌شده، این پیشنهادها برای دست‌اندرکاران صنعت ساختمان که قصد ارائه‌ی خدمات فنی و مهندسی به عراق را دارند، ارائه شده است:

- تشکیل تیم مدیریت پروژه‌ی قوی و کارآمد با تعداد کافی اعضا،
- استفاده از افراد با تجربه در سمت مدیریت پروژه،
- بهره‌گیری از شرکت‌های پیمانکاری توانمند از نظر مالی،
- افزایش نظارت و بازدید از پروژه در حین اجرا،
- تقویت توانمندی و تعداد مهندسان همکار در تیم کارفرما،
- بهره‌گیری از دفاتر مشاوره‌ی اجرایی مؤثر در مراحل اجرا،
- افزایش هماهنگی بین بخش‌ها و ذی‌نفعان داخلی پروژه،
- پیاده‌سازی مدیریت ذی‌نفعان و هماهنگی با ذی‌نفعان خارجی، مانند سازمان‌های شهری و همسایگان،
- انتخاب سیستم قراردادی مناسب براساس شرایط پروژه و امکانات کارفرما،
- بهره‌گیری از مدیریت ارتباطات در میان بخش‌های مختلف پروژه،
- ارزیابی دقیق سوابق کاری پیمانکاران در مناقصه‌های خصوصی و عمومی برای انتخاب بهترین گزینه،
- کاهش میزان بوروکراسی‌های غیرضروری در دستگاه‌های اجرایی مرتبط با پروژه‌های عمرانی.



شکل ۱۰. رابطه‌ی میان استفاده از قراردادهای کلید در دست و موفقیت پروژه.

۶.۴. رابطه‌ی میان استفاده از قرارداد کلید در دست و موفقیت پروژه

از ۳۲ پروژه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر، ۲ مورد از پروژه‌ها با استفاده از سیستم قرارداد کلید در دست باقی پروژه‌ها مطابق روش سنتی ۳ عاملی انجام شده‌اند (شکل ۱۰).

مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که از ۱۷ پروژه‌ی موفق، فقط ۲ پروژه با استفاده از قرارداد کلید در دست اجرا شده‌اند؛ در حالی که هیچ‌یک از پروژه‌های ناموفق از قرارداد کلید در دست بهره‌مند نشده‌اند. با توجه به اینکه فقط دو پروژه از بین موارد بررسی‌شده از سیستم قراردادی کلید در دست استفاده کرده‌اند، نمی‌توان نتیجه‌گیری معناداری درباره‌ی رابطه‌ی بین موفقیت پروژه و به‌کارگیری قرارداد کلید در دست انجام داد. با این حال، واضح است که دو پروژه‌ی موفق از قرارداد کلید در دست استفاده کرده و هیچ‌یک از پروژه‌های ناموفق از آن استفاده نکرده‌اند.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر، شناسایی عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌های عمرانی با تمرکز بر ۳۲ پروژه‌ی ساخت مدارس ۱۲ کلاسه در استان واسط عراق بوده است. تمامی پروژه‌های اخیر از نظر زمان قرارداد، تعداد طبقات، حجم عملیات عمرانی، و روش ساخت مشابه بوده‌اند. از میان پروژه‌های بررسی‌شده، ۱۷ پروژه به‌عنوان موفق و ۱۵ پروژه ناموفق شناخته شده‌اند؛ به عبارت دیگر، ۱۷ پروژه بدون تأخیر و سایر پروژه‌ها با تأخیر به اتمام رسیده‌اند.

References- منابع

1. A. P. C. Chan and A. P. L. Chan, 2004. Key performance indicators for measuring construction success. *Benchmarking: An International Journal*, 11, pp.203-221, <https://doi.org/10.1108/14635770410532624>.
2. H. Y. Khudhaire and H. I. Naji, 2021. Causes of abandoned construction projects: a case study in Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105, pp.012081, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1105/1/012081>.
3. A. Adil, T. Abdulmajid and S. Mahdi, 2019. Analytical study of the causes of abandoned construction projects. *Civ. Eng. J.*, 5, pp.2486-2494, <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091426>.
4. D. B. Ashley, C. S. Lurie and E. J. Jaselskis, 1987. Determinants of construction project success. *Project*

- Management Journal*, 18, pp.69-79, <https://www.pmi.org/learning/library/determinants-construction-project-success-1760>.
5. H. Kerzner, 2001. Project management maturity model. Wiley.
6. A. de Wit, 1988. Measurement of project success. *International Journal of Project Management*, 6, pp.164-170, [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(88\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0263-7863(88)90043-9).
7. M. R. Altaie and K. Onyelowe, 2024. Identifying failure factors in the implementation of residential complex projects in Iraq. *Journal of Engineering*, 30, pp.1-15, <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.02.01>.
8. L. musawi and S. Naimi, 2023. The management of construction projects in Iraq and the most important reasons for the delay. *Acta logistica*, 10, pp.61-70, <https://doi.org/10.22306/al.v10i1.351>.
9. R. Radhi, R. Halim and M. Jamal, 2021. *Exploring building & construction in Iraq, examining the sector's working nature, recent productions, and main challenges*, <https://kapita.iq/storage/app/media/Research/exploring-building-construction-in-iraq-sector-overview.pdf>.
10. P. C. Chan Albert, D. Scott and P. L. Chan Ada, 2004. Factors affecting the success of a construction project. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130, pp.153-155, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(153)).
11. I. Ruuska and I. Vartiainen, 2003. Critical project competences – a case study. *Journal of Workplace Learning*, 15, pp.307-312, <https://doi.org/10.1108/13665620310504774>.
12. A. Vahidi Arbabi and M. shahrokh, Investigation and identification of effective factors on the success of the study project (A case study on Iran's spacecraft structures projects). *Journal*, <https://civilica.com/doc/121323> [in Persian].
13. J. F. Rockart, 1979. Chief executives define their own data needs. *Harvard business review*, 57, pp.81-93, <https://hbr.org/1979/03/chief-executives-define-their-own-data-needs>.
14. J. K. Pinto and D. P. Slevin, 1987. Critical factors in successful project implementation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, EM-34, pp.22-27, <https://doi.org/10.1109/TEM.1987.6498856>.
15. C. S. Lim and M. Z. Mohamed, 1999. Criteria of project success: an exploratory re-examination. *International Journal of Project Management*, 17, pp.243-248, [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00040-4).
16. T. Chow and D.-B. Cao, 2008. A survey study of critical success factors in agile software projects. *Journal of Systems and Software*, 81, pp.961-971, <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.08.020>.
17. E. Sioki, M. Rashidinezhad and A. Khazaei, 1387. Provide an integrated model for determining factors in the The scope of success of projects in small and medium enterprises. *Journal*, <https://civilica.com/doc/43783> [in Persian].
18. S. Sandbhor, S. Choudhary, A. Arora and P. Katoch, 2014. Identification of factors leading to construction project success using Principal Component Analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9, pp.4169-4180.
19. N. Gudienė, A. Banaitis, V. Podvezko and N. Banaitienė, 2014. Identification and evaluation of the critical success factors for construction projects in Lithuania: AHP approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, pp.350-359, <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.914082>.
20. C. Bullen and J. Rockart, 1981. A primer on critical success factors. <http://hdl.handle.net/1721.1/1988>.
21. A. J. Shenhar, D. Dvir and O. Levy, 1997. Project success: a multidimensional, strategic concept. *Journal*, pp.391, <https://doi.org/10.1109/PICMET.1997.653423>.
22. A. J. Shenhar, D. Dvir, O. Levy and A. C. Maltz, 2001. Project success: a multidimensional strategic concept. *Long Range Planning*, 34, pp.699-725, [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(01\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(01)00097-8).
23. F. A. McCOY, 1986. Measuring success :establishing and maintaining a baseline. *Proceedings of 18th Annual Seminar/Symposium, Project Management Institute, Montréal, Canada*.
24. D. Baccarini, 1999. The logical framework method for defining project success. *Project Management Journal*, 30, pp.25-32, <https://doi.org/10.1177/875697289903000405>.
25. L. Stuckenbruck, 1986. Who determines project success. in *Proceedings of the 18th Annual Seminar/Symposium (Montreal/Canada)*, pp.85-93, <https://doi.org/10.5539/ijbm.v3n9p3>.
26. H. Kerzner, 1987. In search of excellence in project management. *Journal of Systems Management*, 38, pp.30-39, <https://dl.acm.org/doi/10.5555/25198.25371>.
27. S. u. R. Toor and S. O. Ogunlana, 2009. Construction professionals' perception of critical success factors for large-scale construction projects. *Construction Innovation*, 9, pp.149-167, <https://doi.org/10.1108/14714170910950803>.
28. L. Duy Nguyen, S. O. Ogunlana and D. Thi Xuan Lan, 2004. A study on project success factors in large construction projects in Vietnam. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11,

- pp.404-413,
<https://doi.org/10.1108/09699980410570166>.
29. D. R. Daniel, 1961. Management information crisis. *Harvard business review*, 39, pp.111-121.
30. J. Ram, D. Corkindale and M.-L. Wu, 2013. Implementation critical success factors (CSFs) for ERP: Do they contribute to implementation success and post-implementation performance? *International Journal of Production Economics*, 144, pp.157-174, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.032>.
31. V. Sanvido, F. Grobler, K. Parfitt, M. Guvenis and M. Coyle, 1992. Critical success factors for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118, pp.94-111, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1992\)118:1\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:1(94)).
32. C. Yap, C. Soh and K. Raman, 1992. Information systems success factors in small business. *Omega*, 20, pp.597-609, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(92\)90005-R](https://doi.org/10.1016/0305-0483(92)90005-R).
33. U. de Brentani and E. Ragot, 1996. Developing new business-to-business professional services: What factors impact performance? *Industrial Marketing Management*, 25, pp.517-530, [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(96\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(96)00066-1).
34. T. Guimaraes and M. Igbaria, 1997. Client/server system success: exploring the human side. *Decision Sciences*, 28, pp.851-876, <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01334.x>.
35. A. Moza and V. K. Paul, 2024. Critical success factors affecting project success in construction projects: A contemporary Indian perspective. *J. Proj. Manag.*, 9, pp.183-196, <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2024.5.003>.
36. M. J. Bresnen and C. O. Haslam, 1991. Construction industry clients: a survey of their attributes and project management practices. *Construction Management and Economics*, 9, pp.327-342, <https://doi.org/10.1080/01446199100000026>.
37. H. F. Hofmann and F. Lehner, 2001. Requirements engineering as a success factor in software projects. *IEEE Software*, 18, pp.58-66, <https://doi.org/10.1109/MS.2001.936219>.
38. T. Bornhorst, J. R. Brent Ritchie and L. Sheehan, 2010. Determinants of tourism success for DMOs & destinations: An empirical examination of stakeholders' perspectives. *Tourism Management*, 31, pp.572-589, <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2009.06.008>.
39. S. Albers, 2010. *PLS and success factor studies in marketing*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
40. C. J. Easingwood and C. Storey, 1991. Success factors for new consumer financial services. *International Journal of Bank Marketing*, 9, pp.3-10, <https://doi.org/10.1108/02652329110136847>.
41. A. Sparkes and B. Thomas, 2001. The use of the Internet as a critical success factor for the marketing of Welsh agri-food SMEs in the twenty-first century. *British Food Journal*, 103, pp.331-347, <https://doi.org/10.1108/00070700110395368>.
42. D. Schoder and N. Madeja, 2004. Is customer relationship management a success factor in electronic commerce? *Journal of Electronic Commerce Research*, 5, pp.38-53, http://www.jecr.org/sites/default/files/05_1_p04_0.pdf.
43. R. Müller and J. R. Turner, 2007. Matching the project manager's leadership style to project type. *International Journal of Project Management*, 25, pp.21-32, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.04.003>.
44. E. Westerveld and B. G. Walters, 2001. *Het verbeteren van uw projectorganisatie: het Project Excellence Model in de praktijk*, Kluwer.
45. E. S. Andersen, D. Birchall, S. Arne Jessen and A. H. Money, 2006. Exploring project success. *Baltic Journal of Management*, 1, pp.127-147, <https://doi.org/10.1108/17465260610663854>.
46. T. W. Yu Ann and Q. P. Shen Geoffrey, 2015. Critical success factors of the briefing process for construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 31, pp.04014045, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.000024).
47. G. Cserháti and L. Szabó, 2014. The relationship between success criteria and success factors in organisational event projects. *International Journal of Project Management*, 32, pp.613-624, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.08.008>.
48. D. M. Alafeef, 2024. Evaluation of the critical success factors for effective management of construction projects. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, 5, pp.e02864, <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe02864>.
49. C. Pollard and A. Cater-Steel, 2009. Justifications, strategies, and critical success factors in successful ITIL implementations in U.S. And Australian companies: an exploratory study. *Information Systems Management*, 26, pp.164-175, <https://doi.org/10.1080/10580530902797540>.
50. S. Chung and W. Gang, 2014. The internationalisation of UK's he in construction department-the success factors of exporting education to China. in *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, pp.1057-1068, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35548-6_108.

51. W. Lu, L. Shen and C. Yam Michael, 2008. Critical success factors for competitiveness of contractors: China study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134, pp.972-982, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:12\(972\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:12(972)).
52. C.-H. Kao, C.-H. Huang, M. S.-C. Hsu and I. H. Tsai, 2016. Success factors for Taiwanese contractors collaborating with local Chinese contractors in construction projects. *Journal of Business Economics and Management*, 17, pp.1007-1021, <https://doi.org/10.3846/16111699.2015.1137486>.
53. M. H. Zahoor and M. Ali, 2023. Assessment of critical success factors for building projects through the literature. *Engineering Proceedings*, 53, pp.45, <https://doi.org/10.3390/IOCBD2023-15988>.
54. E. G. Sinesilassie, K. K. Tripathi, S. Z. S. Tabish and K. N. Jha, 2019. Modeling success factors for public construction projects with the SEM approach: engineer's perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26, pp.2410-2431, <https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2018-0162>.
55. V. Kumar, A. Pandey and R. Singh, 2023. Project success and critical success factors of construction projects: project practitioners' perspectives. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, 15, pp.1-22, <https://doi.org/10.2478/otmcj-2023-0001>.

"پیوست ۱: توضیح اصطلاحات جدول‌های ۲ و ۴"

در پیوست ارائه‌شده، تعاریف و توضیح‌های مربوط به عوامل موفقیت پروژه‌های عمرانی مندرج در جدول‌های ۲ و ۴ ارائه شده است. عوامل و توضیحات جدول پ (۱-۱) براساس مرور ادبیات علمی و محتوای نوشتار تدوین شده‌اند، تا درک

روشنی از هر عامل برای پژوهشگران و فعالان صنعت ساخت فراهم شود. همچنین در جدول پ (۱-۲) عوامل و توضیحات براساس نظریات کارشناسان عراقی با تجربه در حوزه‌ی ساخت‌وساز و در راستای شرایط صنعت ساخت عراق شناسایی و تدوین شده‌اند.

جدول پ (۱-۱): توضیح اصطلاحات جدول ۲ در متن نوشتار.

Row	Success Factors	Description
1	Senior Management Support	Active support from senior organizational or client management through resource allocation, quick decision-making, continuous oversight, and periodic visits to resolve obstacles and accelerate project progress.
2	Communication	Establishing effective communication channels among project stakeholders (client, contractor, consultants) to exchange information, reduce misunderstandings, and improve coordination during project execution.
3	Availability of Required Technology and Expertise	Access to advanced technologies and necessary technical expertise for project execution, which directly impacts quality and speed of work.
4	Client Acceptance or Satisfaction	The extent of client or customer satisfaction with project outcomes, typically measured based on meeting quality, time, and budget expectations.
5	Competition and Project Team Capabilities	The ability of the project team to compete with others through technical skills, experience, and efficiency, contributing to improved project performance.
6	Clear and Specific Project Objectives	Defining precise, understandable, and measurable project goals that serve as a guide for all stakeholders.
7	Supervision and Timely Feedback with Comprehensive Control at Each Implementation Stage	Continuous monitoring of project progress and timely feedback to correct deviations and ensure proper execution at every stage.
8	Precise Specifications for Project Execution Stages	Detailed definition of activities, timelines, and resources required for each project stage to reduce ambiguities and improve management.
9	Capability to Manage Unexpected Crises	The ability of the project team to identify, analyze, and manage unforeseen issues to prevent negative impacts on the project.
10	Quality Control	Implementing supervisory processes to ensure compliance with quality standards across all project stages, from design to execution.
11	Commitment to Planning and Execution Control	Adherence to detailed planning and regular execution controls to ensure project goals are met within the set time and budget.
12	Realistic Objective	Setting goals that are achievable given the project's resources, timeline, and conditions to avoid unrealistic expectations.
13	Risk Management	Identifying, assessing, and controlling potential project risks to minimize their impact on time, cost, and quality.
14	Recruitment, Selection, and Training of Project Team Personnel	Selecting qualified individuals, training them, and forming a team with the necessary skills for effective project execution.
15	Cost	Precise management of project costs to ensure alignment with the set budget and prevent financial shortfalls.
16	Organization and Planning	Properly structuring project activities and resources and developing a comprehensive plan to guide execution.
17	Brand Image or Project Reputation in Financial Markets	The positive reputation of the project or executing company in the market, which can facilitate investment attraction and stakeholder trust.
18	Motivation	Creating motivation among project team members through rewards, a positive work environment, and shared goals to enhance productivity.
19	Political Connections	Leveraging political relationships to facilitate legal processes, obtain permits, and remove project obstacles.
20	Proper Understanding of Employee Needs	Recognizing the professional and personal needs of employees to improve their performance and satisfaction in the project.

ادامه جدول پ (۱-۲): توضیح اصطلاحات جدول ۲ در متن نوشتار.

Row	Success Factors	Description
21	Effective Communication	Establishing transparent and efficient communication among all stakeholders to enhance coordination and reduce conflicts.
22	Learning from Mistakes	Using past experiences and analyzing mistakes to improve processes and decision-making in the project.
23	Availability of Sufficient Resources for Project Execution	Ensuring the availability of financial, human, and material resources needed for uninterrupted project execution.
24	Various Project Leadership Styles	Applying appropriate leadership styles (e.g., transformational or participatory) to guide the project team.
25	Coordination	Creating harmony among different project sections (e.g., design, execution, supervision) to reduce delays and conflicts.
26	Team Spirit and Experience of the Contractor's Project Team	The positive morale and sufficient experience of the contractor's team members, aiding in performance improvement and issue resolution.
27	Measurable Project Objectives	Defining goals that can be assessed using quantitative and qualitative metrics to evaluate project progress.
28	Mutual Trust	Building trust among project stakeholders to enhance collaboration and reduce tensions.
29	Business Management	Applying business management principles to optimize resources, processes, and project outcomes.
30	Project Delays	Managing and minimizing time delays in project execution to ensure timely delivery.
31	Type of Contract Agreed Between Parties	Selecting an appropriate contract type (e.g., turnkey or traditional) that influences the responsibilities and risks of the parties.
32	Control of Subcontractors' Performance	Monitoring the performance of subcontractors to ensure quality and progress in their work.
33	Success in Market and Sales	Achieving positive market results through the sale of services or products related to the project.
34	Profit Margin in Jobs and Contracts	Maintaining a suitable profit margin in project contracts to ensure financial sustainability.
35	Use of Software Programs	Utilizing project management software for planning, monitoring, and analyzing project data.
36	Management and Monitoring of Cash Flow in Projects	Controlling cash flow to ensure timely funding and prevent financial issues.
37	Project Volume	The scale and size of the project, which affects its complexity, resource needs, and management.
38	Contractor Company Policies	Internal company policies in areas such as finance, human resources, safety, etc., that impact project performance.
39	Constructive Conflict Resolution	Managing conflicts among stakeholders in a way that leads to collaboration and project progress.
40	Market Selection	Choosing a suitable target market for the project to increase demand and commercial success.
41	Country's Economic Conditions	The impact of macroeconomic factors like inflation, exchange rates, and financial policies on the project.
42	Time Forecasting	The ability to accurately predict project timelines to prevent delays.
43	Change Management	Managing changes in project scope, resources, or schedule to maintain original goals.
44	Adherence to Budget	Executing the project within the allocated budget to avoid financial shortfalls.

ادامه جدول پ (۱-۳): توضیح اصطلاحات جدول ۲ در متن نوشتار.

Row	Success Factors	Description
45	Safety	Adhering to safety standards in the project to protect workers and reduce incidents.
46	Alignment with Expectations	Meeting stakeholder expectations (e.g., quality, time, cost) to gain their satisfaction.
47	Proper Equipment Maintenance	Regular maintenance of equipment and machinery to prevent breakdowns and project delays.
48	Education Level of the Project Team	The academic education and knowledge level of the project team, influencing decision-making quality.
49	Honesty	Upholding ethical principles and transparency in interactions with stakeholders to build trust.
50	Project Return on Investment Considering Environmental Indices	Achieving financial returns from the project while adhering to environmental and sustainability standards.
51	Stakeholder Participation (Local Community, Employers, Contractors, etc.)	Active collaboration of all stakeholders to achieve project goals and reduce conflicts.
52	Weather	The impact of weather conditions on project progress, especially for outdoor construction projects.
53	Having a Website	Creating a website for the project to provide information, marketing, and stakeholder engagement.
54	Proper Stakeholder Notification	Providing timely and accurate information to stakeholders to increase transparency and trust.
55	Timely Invoice Payments	Settling invoices on time to maintain cash flow and good relationships with contractors.
56	Low Interest Rates in Economy	Reducing borrowing costs due to low interest rates, increasing the financial appeal of the project.
57	Identifying General Needs	Recognizing and addressing the needs of the community and stakeholders to enhance project acceptance.
58	Suitable Sales Offices	Establishing effective sales offices to enhance marketing, attract clients, and increase sales of project services.
59	Innovative Products	Offering creative products or services in the project to gain a competitive advantage.
60	Fair Pricing	Setting fair prices for project services or products to satisfy clients.
61	Sustainability	Adhering to sustainability principles in the project, covering environmental, social, and economic aspects.
62	Maintenance and Preservation of Project's Positive Record	Maintaining the project's positive reputation through successful execution and timely delivery.
63	Electronic Marketing	Using digital and online tools to promote and market the project.

جدول پ (۴-۱): توضیح اصطلاحات جدول ۴ در متن نوشتار.

Row	Success Factors	Description
1	Prior Coordination Among All Project Sectors	Establishing effective communication and coordination among all project stakeholders (client, contractor, consultants, and external entities like neighbors or urban organizations) before and during execution to prevent issues, conflicts, and delays.
2	Financial Capability of Contractor Companies	The financial capacity of the contractor to secure necessary resources, equipment, and machinery for the project, including managing cash flow, covering operational costs, and funding initial investments.
3	Contractor Evaluation	The process of reviewing and selecting a contractor based on criteria such as similar work experience, project team size, and technical and managerial competencies to ensure the selection of a suitable contractor.
4	Use of Turnkey Contracts	A contractual system where the contractor takes full responsibility for design, material procurement, and project execution, aiming to reduce client involvement and expedite implementation.
5	Use of Executive Consulting Firms	Leveraging specialized consulting firms during the project execution phase to provide technical solutions, risk management, and quality oversight.
6	Project Management and Planning Without Political Influence	Managing and planning the project based on professional and scientific principles, free from political influences that might divert it from its goals.
7	Absence of Disputes or Chaos Across the Project Geography and Surrounding Residential Areas	Preventing disputes or disruptions in the project area and surrounding regions, particularly with external stakeholders like local residents, to avoid delays and execution issues.
8	Project Safety and Lack of Risk of Physical Incidents or Casualties	Adhering to safety standards in the project to minimize the risk of physical incidents, injuries to workers, or fatalities, thereby supporting project progress.
9	Conducting Economic and Operational Feasibility Assessments Based on Scientific and Professional Principles Without Political Influence	Conducting thorough economic and operational feasibility assessments using scientific methods, free from political influences, to ensure the project's viability and success.
10	Continuity in Contractor Funding and Timely Payment of Incurred Costs	Providing continuous financial support and timely payments to contractors to prevent interruptions in project execution and maintain cash flow.
11	Facilitating the Approval Process for Changes in Project Activity Quantities	Establishing simple and swift processes for reviewing and approving changes in the project plan, such as adjustments to activity quantities, to ensure flexibility in project management.
12	Ensuring Project Security	Guaranteeing the physical and operational security of the project against external threats like theft, vandalism, or regional unrest to maintain progress.
13	Controlling Administrative and Financial Corruption in the Project	Implementing oversight measures to prevent administrative and financial corruption, such as bribery or misuse of resources, to maintain transparency and efficiency.
14	Emphasis on Providing Similar Services for the Project by the Investor	Ensuring that the investor has experience in providing similar services in previous projects, which reduces risk and increases trust.
15	Necessity of Utilizing Services from Specialized and Experienced Companies in the Project	Engaging specialized and experienced contractor or consulting firms to enhance the quality and efficiency of project execution.
16	Suitable Legal Environment for Executing All Project Stages	Having a clear and supportive legal framework to facilitate processes like obtaining permits, contracts, and project execution without legal obstacles.
17	Increasing the Contractor's Advance Payment Ratio for the Project	Increasing the advance payment to the contractor to provide initial liquidity and reduce financial pressure in the early project stages.
18	Ensuring No Interference from Local Governments in the Technical Aspects of the Project	Preventing unnecessary interference by local authorities in the project's technical decisions to maintain independence and efficiency in execution.
19	Ensuring Investment Security	Creating conditions where investment in the project is financially and legally secure to attract investors and reduce financial risks.
20	Transparency and Clarity in Transactions	Adhering to principles of transparency in contracts, payments, and financial interactions to build stakeholder trust and reduce disputes.



Research Note

Investigating the Dynamic Stability Index of Steel Structures

Mohammadreza Gholami, Mohammadreza Shokrzadeh and Mahdi Sharifi*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

* corresponding author: (m.sharifi@qom.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 3 May 2025

Revised: 28 June 2025

Accepted: 15 July 2025

Keywords:

Stability index,
p-delta effects,
nonlinear incremental
dynamic,
moment frames.

Abstract

The stability index, defined as the ratio of moments caused by secondary P-Delta effects to those resulting from design story shear forces, serves as a critical parameter in assessing structural behavior. These P-Delta effects, arising from the interaction between axial loads and lateral displacements, can significantly influence the overall structural response. While current design codes primarily provide static relationships for calculating the stability index - typically developed for lateral loads such as wind - this study adopts an innovative approach by investigating the stability index from both dynamic and nonlinear static perspectives. To obtain reliable results, three reference structures with varying heights (3-, 9-, and 20-story buildings) were analyzed using two advanced analytical methods: Incremental Dynamic Analysis (IDA) and Nonlinear Static Analysis. The research findings reveal that for low-rise buildings, when inelastic deformations are considered, static stability index values closely approximate their dynamic counterparts. However, for medium- and high-rise structures, significant discrepancies emerge between results obtained from the two methods. A key finding demonstrates that the dynamically computed stability index exceeds code-specified threshold values (0.1 and 0.25) for all cases except those with low acceleration levels (below 0.2g). The study further establishes that dynamic stability index values differ substantially from those recommended in current design codes. These results suggest that traditional stability assessment methods may prove non-conservative for tall structures subjected to severe dynamic effects. Significant influence of building height on the relationship between static and dynamic stability indices. Critical importance of considering nonlinear effects in stability calculations for tall structures. Necessity for developing new relationships that properly incorporate dynamic effects in stability index computation. These findings provide a solid foundation for updating structural design codes and developing more precise analytical methods. Future studies should investigate a broader range of structures with various lateral load-resisting systems to establish more comprehensive relationships for stability index calculation. Implementation of height-dependent correction factors in stability evaluation. Development of dynamic amplification coefficients for P-Delta effects. Inclusion of higher-mode effects in stability assessments for tall buildings. Consideration of material nonlinearity and geometric imperfections in analytical models. The study's outcomes emphasize the need for code revisions to address stability concerns in modern tall building designs, particularly in seismic-prone regions. The proposed methodology offers a more realistic assessment of structural stability under extreme loading conditions.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

To Cite this article:

Gholami, M., Shokrzadeh, M. and Sharifi, M. 2026. Investigating the dynamic stability index of steel structures, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 103-115. <https://doi.org/10.24200/sj30.2025.66675.3424>



بررسی شاخص پایداری دینامیکی سازه‌های فولادی

محمدرضا غلامی، محمدرضا شکرزاده و مهدی شریفی*

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول (M.Sharifi@qom.ac.ir)

چکیده

شاخص پایداری، نسبت لنگرهای ناشی از آثار ثانویه P-Delta به لنگرهای ناشی از برش طراحی طبقه است. در سازه‌هایی که سطوح بالایی از غیرخطی بودن را تجربه می‌کنند، باید آثار P-Delta در نظر گرفته شود. روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها، شاخص پایداری را به صورت استاتیکی و برای بار جانبی باد ارائه کرده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر به محاسبه‌ی شاخص پایداری دینامیکی و غیرخطی استاتیکی پرداخته شده است. برای این منظور، پارامتر مذکور در سه سازه‌ی مرجع، شامل ۳، ۹، و ۲۰ طبقه با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی (IDA) و غیرخطی استاتیکی محاسبه و مطالعه شده و نتایج نشان داده‌اند که مقادیر شاخص پایداری استاتیکی با در نظر گرفتن تغییر شکل غیرارتجاعی در ساختمان‌های کوتاه به مقادیر شاخص پایداری دینامیکی نزدیک و در ساختمان‌های متوسط و بلند تفاوت دارند. شاخص پایداری به روش دینامیکی به جز در شتاب‌های پایین تا $0.2g$ فراتر از حد پوش آور است. مقادیر شاخص پایداری دینامیکی سازه نسبت به مقادیر آیین‌نامه‌ای تفاوت معناداری داشته است. همچنین، مقادیر حدی 0.1 و 0.25 در آیین‌نامه، نیاز به بازنگری دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

واژگان کلیدی:

شاخص پایداری،

آثار P-Delta،

دینامیکی غیرخطی افزایشی،

قاب‌های خمشی.

۱. مقدمه

در مهندسی زلزله، مکانیزم‌های خرابی سازه‌ای به دو دسته‌ی کلی، شامل خرابی موضعی، که محدود به المان‌های خاص تحت بارهای ثقلی یا جانبی است؛ و خرابی پیشرونده، که باعث گسترش تدریجی آسیب از المان اولیه به کل سیستم سازه‌ای می‌شود، تقسیم می‌شوند. مطالعات تجربی و تحلیلی تأثیر بسزای آثار (PΔ) را در تسریع ناپایداری سازه‌ها نشان داده‌اند. پدیده‌ی مذکور از سه مسیر اصلی در رفتار سازه، شامل: کاهش مقاومت جانبی، افزایش تغییر شکل‌های طبقات، و تسریع در تخلیه‌ی ظرفیت باربری کل سیستم تأثیر می‌گذارد. توسعه‌ی شاخص‌های پایداری جهت ارزیابی آثار (PΔ) از جمله مباحث کلیدی در مهندسی زلزله محسوب می‌شود.^[۷-۱]

پایه‌گذار مطالعات ذکر شده، روزنبلوث^۱ (۱۹۶۵) با معرفی رابطه‌ای به عنوان ضریب پایداری است.^[۸] آیین‌نامه‌ی SEAOC (۱۹۷۳)، نخستین سند معتبری است که به صورت نظام‌مند به تحلیل آثار (PΔ) پرداخته و دو الزام کلیدی را مطرح کرده است، که شامل محاسبه‌ی تغییر مکان‌های جانبی بر مبنای اصول مهندسی و ارزیابی نقش اعضاء غیرسازه‌ای در ایجاد تغییر مکان‌های اخیر است.^[۹]

در سال ۱۹۷۸، آیین‌نامه‌ی ATC نگرانی خود در مورد اثر (PΔ) را با محدود کردن گریز جانبی بیان کرده است؛ که اگر گریز جانبی طبقه به $1/10$ تا $1/5$ درصد ارتفاع طبقه محدود شود، دیگر نگرانی خاصی در مورد اخیر وجود ندارد.^[۱۰]

آیین‌نامه‌ی ACI 318-77 دستورالعمل مشخصی ارائه کرده است؛ که اگر در هر قاب، لنگر حاصل از (PΔ) که توسط بار نهایی ستون (P) ایجاد می‌شود، فراتر از 5% ظرفیت لنگر پلاستیک تیرهایی باشد که به داخل ستون وارد شده‌اند، آن‌گاه باید مقاومت ستون برای تحمل لنگر حاصل از (PΔ) افزایش یابد.^[۱۱]

آندریوس^۲ (۱۹۷۷) مشاهده کرده است که در صورت فراهم کردن ضوابط آیین‌نامه‌ی نیوزیلند، می‌توان برای همیشه اثر (PΔ) را نادیده گرفت.^[۱۲]

شاخص پایداری در آیین‌نامه‌های ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ مطابق با تحقیقات مگ گریور و هج^۳ (۱۹۷۷)، برای بار جانبی باد تعریف شده است؛^[۱۳] که براساس مطالعات دایک^۴ است، که در ادبیات فنی اطلاعات بیشتری از پژوهش مذکور وجود ندارد. در آیین‌نامه‌ها، پارامتری به نام (Q) به عنوان شاخص پایداری معرفی شده است.

³ Macgregor, J. G. & Hage, S.E.

⁴ Dicke

¹ Rosenbluth, E.

² Andrews, A.L.

مطالعات دال ماسو^۱ و همکاران (۱۹۹۹) نشان داده است که آثار (PD) می‌تواند منجر به افزایش ۴۰ درصدی در جابجایی جانبی سازه شود، به ویژه در حالتی که پاسخ غیرالاستیک قابل توجهی در سازه رخ داده باشد.^[۱۲۴]

عمدتاً مطالعات انجام شده بر روی سازه‌های با یک درجه‌ی آزادی و تأثیر آثار (PD) در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها که توسط یک میله‌ی صلب از طریق یک اتصال مفصلی و یک فنر چرخشی به پایه متصل شده‌اند، انجام شده است. در سیستم اخیر، فنر چرخشی با رفتار کاملاً الاستیک - پلاستیک مشخص و حساسیت به آثار مرتبه‌ی دوم با ضریب حساسیت گریز جانبی الاستیک اندازه‌گیری شده است.^[۱۲۵-۱۲۶]

ایبرا و کراوینکلر^۲ (۲۰۰۵)، با مطالعه بر روی سازه‌های یک و چند درجه‌ی آزادی به این نتیجه رسیده‌اند که شاخص پایداری ارائه شده برای سازه‌های یک درجه‌ی آزادی در حالت الاستیک و غیرالاستیک نیز معتبر است، ولی در سازه‌های چند درجه‌ی آزادی فقط در حالت الاستیک معتبر بوده و در حالت غیرالاستیک و به خصوص برای سازه‌هایی با دوره‌ی تناوب بالا معتبر نیست و شاخص مناسبی نخواهد بود.^[۱۲۳]

بلاک^۳ (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ی تحلیل غیرخطی استاتیکی بر روی قاب دوطبقه‌ی ۱۰ طبقه‌ی منظم فولادی، یک بار سازه را بدون اثر (PD) و بار دیگر، تحت اثر (PD) بررسی و شاخص پایداری را به دو قسمت تقسیم کرده است، که شامل شاخص پایداری در حالت الاستیک و غیر الاستیک بوده است. نتایج نشان داده‌اند که مقاومت و سختی کاهش یافته در قاب فولادی با وجود اثر (PD) و همچنین شاخص پایداری در حالت الاستیک یا در حالت غیرالاستیک ناچیز را می‌توان با شاخص پایداری الاستیک به دست آورد. اما زمانی که سازه کاملاً وارد ناحیه‌ی غیرالاستیک می‌شود، باید از هر دو رابطه‌ی شاخص پایداری الاستیک و غیرالاستیک استفاده کرد.^[۱۲۴]

حیدرپور (۲۰۱۸)، برای سازه‌های پل با ستون‌های بتن‌آرمه نشان داده است که با توجه به ماهیت پیچیده‌ی مطالعه‌ی آثار (PD) تحت بارگذاری زلزله و عدم قطعیت‌های مرتبط با گرفتن دقیق مدل سازه و ماهیت تصادفی حرکات زمین، به دست آوردن یک حالت حدی قابل اعتماد برای نادیده گرفتن آثار (PD) برای ستون‌های پل RC نیاز به مقدار زیادی تجزیه و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی برای گرفتن صحیح همه‌ی منابع عدم قطعیت دارد.^[۱۲۵]

کاپتا^۴ (۲۰۲۰)، دیوارهای برشی و میراگرها را به دو صورت تجربی و تحلیلی بررسی کرده و نتیجه گرفته است هر ساختاری که در معرض تغییرشکل جانبی باشد، اثر (PD) یک پدیده‌ی مرتبه‌ی دوم را تجربه می‌کند. دستیابی به توزیع بار عمودی کاملاً متقارن در کاربردهای دنیای واقعی، اگر گفته نشود غیرممکن، دشوار است. در مطالعه‌ی اخیر، جابجایی‌های جانبی سازه با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی اجزاء محدود ارزیابی و با روش تحلیل خطی استاندارد مقایسه و نیروهای جانبی و گرانشی داخل سازه با استفاده از دیوار برشی و دمپر کاهش داده شده‌اند.^[۱۲۶]

حسینی و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ی خود شاخص پایداری دینامیکی^۵ را

به‌عنوان یک معیار حساس و نوین برای تشخیص تغییرات ساختاری معرفی کرده‌اند؛ که از طریق تحلیل رفتار ارتعاشی سازه (مثلاً ارتعاش‌های ناشی از بارهای محیطی یا عملکرد نیروها)، امکان تشخیص آثار آسیب را فراهم می‌سازد. شاخص پایداری دینامیکی به تغییرات کوچک در پاسخ ارتعاشی سازه حساس است و می‌تواند حتی در مراحل اولیه، آسیب را شناسایی کند. روش مذکور برخلاف برخی روش‌های سنتی که به پارامترهای پیچیده یا تجهیزات گران‌قیمت نیاز دارند، با داده‌های ارتعاشی پایه و تحلیل‌های ریاضی قابل پیاده‌سازی است. همچنین شاخص پایداری دینامیکی می‌تواند به‌خوبی تفاوت بین وضعیت سالم و آسیب‌دیده‌ی سازه را نمایان سازد و با استفاده از داده‌های ارتعاشی گرفته شده در آزمایش‌های میدانی یا شبیه‌سازی شده، پایش سلامت سازه‌ها را بهبود بخشد.^[۱۲۷]

گونوان^۶ و همکاران (۲۰۲۱)، در بررسی روشی نوین برای شناسایی آسیب در سازه‌ها با استفاده از تحلیل پایداری دینامیکی، فرض کرده‌اند که هرگونه آسیب در سازه، باعث تغییر رفتار دینامیکی آن و کاهش پایداری سیستم می‌شود. سازه‌ها در شرایط نوسانی و برانگیختگی‌های مختلف، رفتار پایداری متفاوتی از خود نشان می‌دهند. آسیب ساختاری باعث می‌شود پایداری دینامیکی کاهش یابد و رفتار سیستم از حالت ثبات خارج شود یا تغییر کند. با تحلیل تغییرات پارامترهای پایداری، مانند فرکانس‌ها، ضریب دمپینگ، و پاسخ به تحریک‌های دینامیکی می‌توان به وجود و محل آسیب پی برد.^[۱۲۸]

آناستازو و مارکی^۷ (۲۰۲۳)، یک روش دینامیکی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها با استفاده از تحلیل پایداری سیستم‌های غیرخطی و تحلیل رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت تحریک‌های مختلف و شناسایی تغییرات در پایداری ناشی از وجود آسیب در سازه با استفاده از شاخص‌های پایداری دینامیکی برای تعیین محل و میزان آسیب ارائه کرده و دریافته‌اند که تحلیل پایداری دینامیکی، یک رویکرد مؤثر و کارآمد برای پایش سلامت سازه است، که می‌تواند جایگزین یا مکمل روش‌های فعلی باشد. روش اخیر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی سازه‌ها می‌شود و قابلیت کاربرد در پایش سازه‌های پیچیده و حساس را دارد.^[۱۲۹]

دی فرانچسکو و سالیوان^۸ (۲۰۲۳)، برای سیستم‌های دوطبقه با نسبت سختی پس از تسلیم برابر با $\alpha = 0.5$ ، نشان داده‌اند که پیش‌بینی دقیق‌تر ضریب تقویت جابجایی در حضور (PD)، نیاز به اثر ترکیبی ضریب پایداری (α_d)، سطح شکل‌پذیری (μ) و دوره‌ی تناوب T_0 ، باید در نظر گرفته شود. همچنین مقادیر حدی ضرایب پایداری الاستیک و غیرالاستیک برای سیستم‌هایی با مدل‌های هیسترتیک مختلف با اعمال محدودیت‌های مستقیم بر تقویت جابجایی ناشی از (PD) به دست می‌آیند.^[۱۳۰]

با توجه به مطالعات پیشین به نظر می‌رسد که نیاز به محاسبه‌ی شاخص پایداری تحت بارگذاری دینامیکی است؛ لذا در مطالعه‌ی حاضر، شاخص پایداری دینامیکی برای سه سازه‌ی مرجع کمیته‌ی (SAC) با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) انجام شده و با شاخص پایداری بیان شده در استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه صورت گرفته است. مطالعه‌ی حاضر بر روی

⁶ Gunawan

⁷ Marchesiello, S.

⁸ Sullivan, T.J. & De Francesco, G.

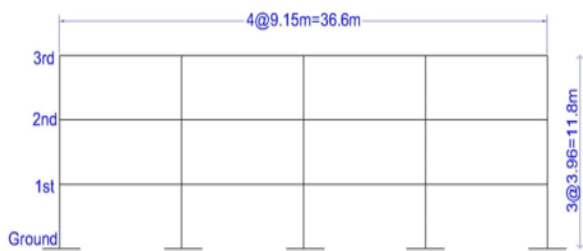
¹ Dal Maso

² Ibarra & Krawinkler

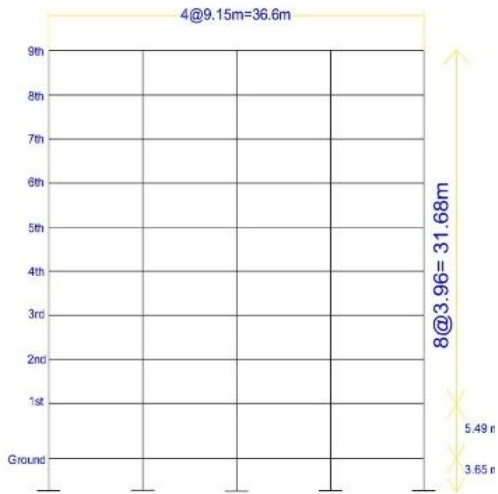
³ Black, E. F.

⁴ Gupta

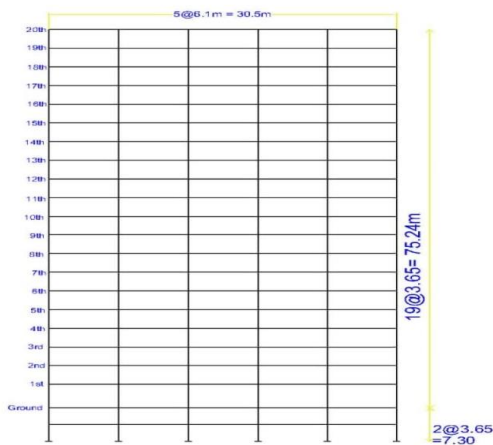
⁵ Dynamic Stability Index



شکل ۱. قاب ساختمانی مدل ۳ طبقه. [۳۴]



شکل ۲. قاب ساختمانی مدل ۹ طبقه. [۳۴]



شکل ۳. قاب ساختمانی مدل ۲۰ طبقه. [۳۴]

در پژوهش حاضر، تحلیل استاتیکی غیرخطی به منظور ارزیابی عملکرد غیرخطی قاب فولادی تحت اثر بار جانبی انجام شده است. الگوی بارگذاری جانبی مطابق با شکل پذیری مود اول نوسان قاب در نظر گرفته شده و توزیع نیروها به صورت الگوی مثلثی (اولین مود شکل پذیری سازه) اعمال شده است.

پس از اعمال تدریجی بار جانبی و دستیابی به جابجایی هدف، منحنی ظرفیت سازه به صورت نمودار نیروی پایه- تغییر مکان بام (BaseShear-Roof Displacement) استخراج شده است. براساس ضوابط ارائه شده در استاندارد ATC-40، ابتدا طیف پاسخ متناظر با هر شتاب‌نگاشت در مقیاس g ۱/۰ محاسبه و در ادامه، تغییر مکان هدف سازه برای مقادیر مختلف PGA تعیین شده است. سپس با استخراج نیروهای محوری ستون‌ها (P) و نیروهای برشی

سازه‌های قاب‌های خمشی ۳، ۹، و ۲۰ طبقه به منظور پوشش دادن سازه‌های کوتاه، متوسط، و بلندمرتبه تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف و با استفاده از تحلیل (IDA) صورت گرفته و در نهایت، شاخص پایداری دینامیکی بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. روش انجام کار

در مطالعه‌ی حاضر، سه سازه‌ی قاب خمشی فولادی منظم به منظور ارزیابی و بررسی شاخص پایداری دینامیکی انتخاب شده‌اند. به منظور بررسی رفتار غیرخطی سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای، از دو نوع تحلیل عددی، شامل تحلیل پوش‌آور و تحلیل (IDA) با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و تعیین شاخص پایداری استفاده شده است. مدل‌های بررسی‌شده شامل قاب‌های ۳، ۹، و ۲۰ طبقه‌ی منظم بوده‌اند، که برای فاز II پروژه SAC طراحی شده‌اند. [۳۱] ارتفاع کلی سازه‌ها به ترتیب برابر ۱۱/۸۸، ۳۵/۶۴ و ۷۹/۲۰ متر بوده است. سیستم سازه‌ای سازه‌های مذکور از قاب خمشی پیرامونی به منظور تحمل بارهای لرزه‌ای و قاب‌های ساده‌ی میانی برای تحمل بارهای ثقلی تشکیل شده است. از آنجایی که سازه‌های اخیر در پلان و ارتفاع منظم بوده‌اند، تحلیل‌ها به صورت دو بُعدی بر روی یک قاب خمشی در جهت شمالی- جنوبی از هر سازه صورت گرفته است؛ که در ادامه، برای هر یک از آن‌ها نشان داده شده است. در سال‌های اخیر، سازه‌های ذکر شده در اغلب پژوهش‌ها به عنوان سازه‌ی مبنا استفاده شده‌اند. [۳۲] تحلیل‌های غیرخطی پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده است؛ [۳۳] که یک محیط متن‌باز (Open-Source) برای مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی سازه‌ها و سیستم‌های ژئوتکنیکی است، که توسط دانشگاه برکلی توسعه یافته است و قابلیت بالایی در تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی دارد.

در تمامی تحلیل‌ها، اتصال ستون‌ها به فونداسیون گیردار فرض شده است. مدل ساخته شده، دربرگیرنده‌ی رفتار غیرالاستیک مصالح است. غیرالاستیک بودن مصالح به طور صریح و به وسیله‌ی روش المان فایبری، که امکان تخمین دقیقی از توزیع غیرالاستیک بودن مصالح در مقطع و در طول عضو را فراهم می‌کند، صورت گرفته است. قاب ساختمانی سازه‌های مذکور به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شوند.

برای در نظر گرفتن اثر ثانویه یا اثر ($P\Delta$) در تحلیل غیرخطی قاب فولادی، از روش ستون‌های لاغر لین کالمن^۹ استفاده شده است؛ که از طریق افزودن المان‌هایی عمودی با سختی خمشی ناچیز، ولی دارای ظرفیت محوری، امکان شبیه‌سازی جابجایی‌های ثانویه ناشی از نیروی ثقلی را فراهم می‌سازد. در مدل مذکور، ستون‌های لین کالمن به صورت المان‌های قائم، نزدیک به ستون‌های اصلی قاب قرار گرفته‌اند و بار ثقلی معادل وزن طبقات بر آن‌ها اعمال شده است. از آنجایی که ستون‌های ذکر شده در برابر خمش ضعیف هستند و فقط به صورت محوری رفتار می‌کنند، هنگام جابجایی افقی سازه، پدیده‌ی ($P\Delta$) به صورت واقعی در تحلیل لحاظ شده است؛ که یکی از راهکارهای توصیه شده در دستورالعمل‌هایی نظیر FEMA-۳۵۶ و ATC-۷۲ برای لحاظ کردن آثار هندسی مرتبه‌ی دوم در تحلیل غیرخطی سازه‌ها به شمار می‌آید و ضمن دقت بالا، سبب اجتناب از نیاز به فعال‌سازی تحلیل هندسی غیرخطی کامل در مدل می‌شود.

⁹ Lean Column

جدول ۱. زمین‌لرزه های گسل دور در مطالعه‌ی حاضر.

Earthquake	Station	Magnitude	R(km)	PGA(g)	PGV(cm/s)
Northridge	Canyon Country-WLC	6.7	12.4	0.48	45
Duzce, Turkey	Bolu	7.1	12.0	0.82	62
Kobe, Japan	Nishi-Akashi	6.9	7.1	0.51	37
Kobe, Japan	Shin-Osaka	6.9	19.2	0.24	38
Landers	Yermo Fire Statio	7.3	23.6	0.24	52
Hector Mine	Hector	7.1	11.7	0.34	42
Imperial Vally	Delta	6.5	22.0	0.35	33
SanFernando	LA-Hollywood Sto	6.6	22.8	0.21	19
Landers	Cool water	7.3	19.7	0.42	42
Kocaeli, Turkey	Arcelik	7.5	15.4	0.36	59

جدول ۲. ویژگی‌های زمین‌لرزه‌ها.

Distance R	R>10km
Large Magnitude Events	M>6.5
Strong Ground Shaking	PGA > 0.2g /PGV > 15 cm/sec
Site Conditions	Rock or Stiff Soil Sites, Vs > 180 m/s
Record Quality	Lowest Useable Frequency < 0.25 Hz

جدول ۳. دوره تناوب سازه های مورد بررسی.

Frames	3St	9St	20St
Ta(1) _{study}	1.01	2.26	3.86
Ta(1) _{Reference}	1.03	2.34	3.98
Ta(2) _{study}	0.33	0.84	1.30
Ta(2) _{Reference}	0.36	0.87	1.35
Ta(3) _{study}	0.17	0.49	0.78
Ta(3) _{Reference}	0.19	0.53	0.81

مختلف (۰/۱g تا ۰/۲g با گام ۰/۱) انجام شده است. طبق مطالعات صورت‌گرفته، مجموعه‌ی اخیر شامل حرکت‌های انتخاب‌شده‌ی قوی زمین بوده است، که می‌توانند باعث فروپاشی سازه‌ها شوند.^[۳۸]

۳. یافته‌ها و بحث

۳.۱. راستی‌آزمایی

سه قاب خمشی فولادی مرجع انتخاب‌شده،^[۳۴] با استفاده از نرم‌افزار آپنسیس مدل‌سازی شده‌اند. راستی‌آزمایی مدل‌ها با مقایسه‌ی مقدار دوره‌ی تناوب و منحنی پوش آن‌ها با مرجع اصلی انجام شده است. سپس تحت ۱۰ شتاب نگاشت مختلف، تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت گرفته و شاخص پایداری در حالت‌های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

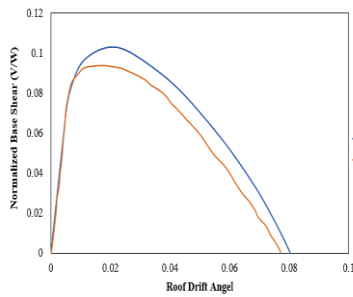
در جدول ۳، نتایج دوره‌ی تناوب سازه‌ی ۳ مود اول برای قاب‌های مختلف ارائه شده است. در قاب ۳ طبقه، در مد اول اختلاف کمتر از ۵٪ مشاهده می‌شود و در مدهای بالاتر، اختلاف مذکور به کمتر از ۱۰٪ می‌رسد. در قاب ۹ طبقه، اختلاف مدها در مدهای اول و دوم، کمتر از ۵٪ بوده و در مد بالاتر، این اختلاف به کمتر از ۸٪ افزایش یافته است. در قاب ۲۰ طبقه، اختلاف در سه مد اول،

افقی در هر طبقه (V) از نتایج تحلیل، مقادیر لازم برای محاسبه‌ی شاخص پایداری طبقه (Stability Index) به‌دست آمده است؛ که به‌عنوان معیاری برای سنجش حساسیت سازه نسبت به آثار هندسی مرتبه‌ی دوم (Δ), برای هر طبقه و در حالت‌های بحرانی محاسبه شده و مبنای ارزیابی پایداری کلی سازه قرار گرفته است.

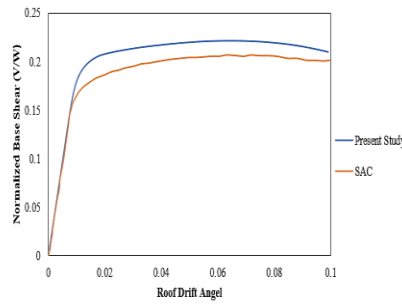
۲.۲. تحلیل IDA

نمودار تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) پارامترهای تقاضای مهندسی در برابر شدت لرزه‌ای زلزله است. مفهوم IDA توسط کرنل^۱ و همکاران (۲۰۰۲) معرفی شده است؛ که شامل انجام تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی در یک مدل سازه‌ای، تحت مجموعه‌ای از رکوردهای شتاب‌نگاشت حرکت زمین بوده است، که در سطوح مختلف لرزه‌ای مقیاس شده‌اند. سطوح مقیاس‌شده به‌طور مناسب انتخاب شده‌اند تا سازه طیف وسیعی از رفتار الاستیک تا غیرالاستیک و در نهایت ناپایداری دینامیکی کلی در جایی که سازه به‌طور کلی دچار فروریزش می‌شود، را شامل شود.^[۳۵] در روش IDA، رکوردهای مناسب لرزه‌خیزی منطقه، به‌منظور تعیین منحنی احتمالی برای حالت حدی خاص انتخاب می‌شود. پس از انتخاب پارامتر شدت لرزه‌ای مناسب مطابق با هدف موردنظر، رکوردهای انتخابی براساس ضرایب مقیاس فزاینده مقیاس می‌شوند. با استفاده از تحلیل دینامیکی، مدل سازه‌ی موردنظر تحت اثر رکوردهای مقیاس‌شده، پارامتر موردنیاز مهندسی مانند (گریز جانبی، دوران مفاصل پلاستیک، برش پایه و غیره) تحت رکوردهای مختلف و با ضرایب متعدد به‌دست می‌آید. منحنی‌های رسم‌شده در نمودار (IM-EDP) نشان‌دهنده‌ی تغییرات پاسخ سازه در شدت‌های لرزه‌ای مختلف است.^[۳۶]

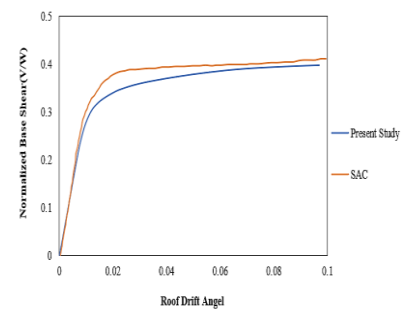
برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با شتاب‌نگاشت‌های FEMA-P ۶۹۵ انتخاب شده است؛^[۳۷] که شامل ۱۰ رکورد زلزله‌ی استفاده‌شده‌ی دور از گسل هستند، که جزئیات آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. برای هر رکورد، تحلیل با ضرایب مقیاس



(c) 20-story frame

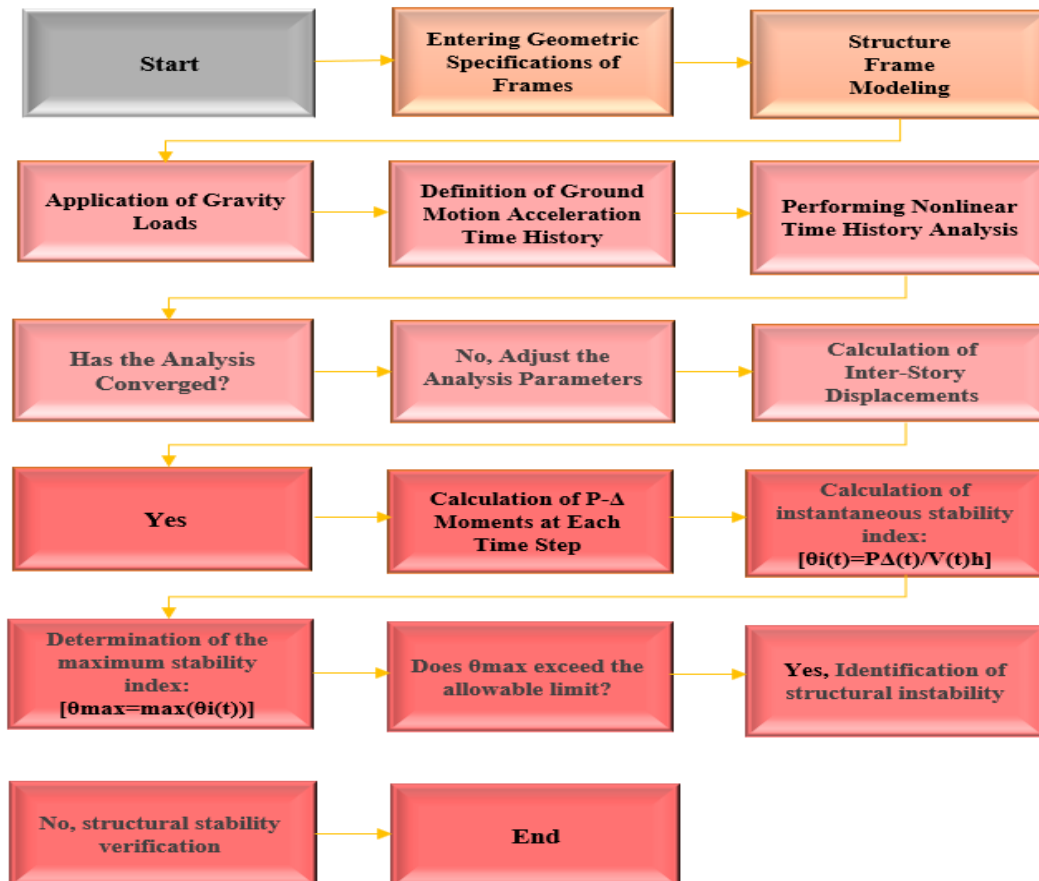


(b) 9-story frame



(a) 3-story frame

شکل ۴. اعتبارسنجی پوش آور.



شکل ۵. فلوچارت پیشنهادی.

اثر ثانویه یا $P\Delta$ معروف است. اثر ثانویه، در مواردی که شاخص پایداری (θ_i) در رابطه‌ی ۱ کمتر از ۱۰٪ باشد، ناچیز است و می‌تواند نادیده گرفته شود. ولی اگر θ_i بیشتر از ۱۰٪ باشد، رابطه‌ی ۱ باید در محاسبات منظور شود:

$$\theta_i = \left[\frac{P_{ui} \Delta_{eu}}{V_{ui} h} \right]_i \quad (1)$$

که در آن،

P_{ui} = مجموع بارهای مرده و زنده در طبقه‌های i تا n (طبقه‌ی آخر)، در حد مقاومت.

Δ_{eu} = تغییرمکان جانبی نسبی اولیه در طبقه‌ی i حاصل از تحلیل خطی.

V_{ui} = مجموع نیروهای برشی وارد بر طبقه‌ی i .

h_i = ارتفاع طبقه‌ی i .

کمتر از ۵٪ بوده است، که نشان می‌دهد مدل‌سازی صحیح بوده و تطبیق مناسبی با سازه‌های مرجع انتخاب‌شده داشته است. در شکل ۴، با استفاده از تحلیل پوش‌آور به بررسی و راستی‌آزمایی نمودارهای پوش‌آور برای قاب‌های ۳ تا ۲۰ طبقه پرداخته شده است. با توجه به نمودارهای پوش‌آور می‌توان از درستی مدل‌سازی اطمینان یافت. در ادامه، فلوچارت مراحل کار در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۲.۳. تحلیل نتایج

در بخش حاضر، نتایج مدل‌سازی و تحلیل قاب‌های بررسی‌شده در برابر شتاب‌نگاشت‌ها ارائه شده است. استاندارد ۲۸۰۰، آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، بیان می‌کند در کلیه‌ی سازه‌ها، بار محوری در عناصر قائم بر روی تغییرمکان‌های جانبی آن‌ها، برش‌ها، و لنگرهای خمشی موجود در اعضا و نیز تغییرمکان جانبی طبقات تأثیر می‌گذارد. این افزایش به

جدول ۴. شاخص پایداری استاتیکی قاب‌ها.

Zone	1	2A	2B	3	4	2800
PGA	0.075	0.15	0.2	0.3	0.4	0.3
Elastic deformation (3st)	0.021	0.022	0.030	0.039	0.035	0.033
Inelastic deformation (3st)	0.080	0.086	0.116	0.127	0.136	0.135
Elastic deformation (9st)	0.042	0.034	0.056	0.059	0.060	0.046
Inelastic deformation (9st)	0.13	0.15	0.21	0.23	0.24	0.19
Elastic deformation(20st)	0.034	0.049	0.055	0.059	0.078	0.064
Inelastic deformation(20st)	0.13	0.19	0.21	0.23	0.30	0.26

برای شاخص پایداری در حالت غیرخطی می‌توان از تغییرمکان غیرخطی ذکر شده استفاده کرد. نتایج شاخص پایداری براساس تحلیل پوش‌آور برای سازه‌های ۳ تا ۲۰ طبقه در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همچنین، شاخص پایداری

نتایج نشان داده شده، شامل شاخص پایداری محاسبه شده در تحلیل پوش‌آور و تحلیل‌های تاریخی زمانی است. برای محاسبه‌ی شاخص پایداری دینامیکی ناشی از تحلیل‌های IDA، شتاب‌نگاشت‌ها در PGA های مختلف همپایه‌سازی شده و در نقاط بیشینه‌ی منحنی چرخه‌ای سازه، محاسبه‌ی مقادیر شاخص دینامیکی صورت گرفته است.

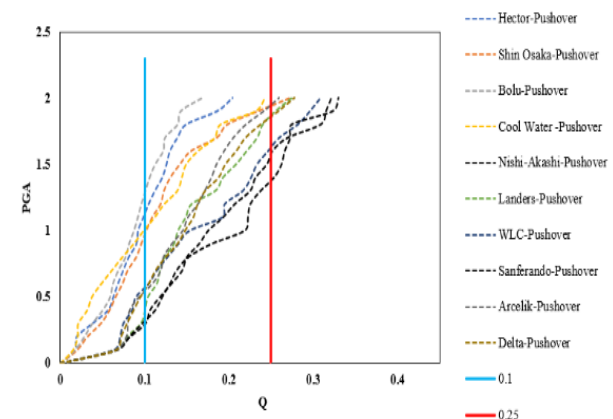
لازم به توضیح است که در بسیاری از مطالعات پیشین، از جمله دستورالعمل‌های FEMA و PEER، شاخص‌هایی نظیر $Sa(T1)$ به‌عنوان شاخص شدت (IM) با پراکندگی کمتر در نتایج تحلیل IDA معرفی شده‌اند. با این حال، در پژوهش حاضر، به این دلایل از PGA به‌عنوان شاخص شدت استفاده شده است:

۱. **سادگی و در دسترس بودن:** شاخص PGA یکی از پارامترهای اولیه و ثبت شده در اغلب شتاب‌نگاشت‌هاست و استخراج آن مستقل از خصوصیات سازه است.

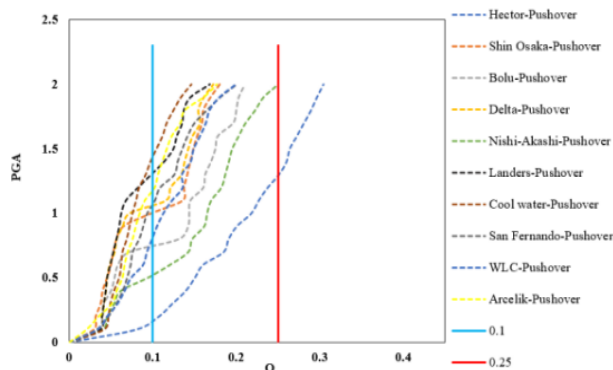
۲. **هدف مقایسه‌ای پژوهش:** از آنجا که هدف اصلی پژوهش، بررسی روند کلی پایداری سازه در برابر شدت‌های مختلف زلزله و نه محاسبه‌ی دقیق پارامترهای آسیب‌پذیری یا تابع خسارت بوده است، استفاده از PGA به‌عنوان IM قابل توجیه است.

۳. **کاهش پیچیدگی مدل‌سازی:** در پژوهش حاضر، تلاش شده است تا با کاهش پیچیدگی‌های مرتبط با تخمین Sa و وابستگی آن به دوره‌ی تناوب سازه‌ای در هر مرحله از رفتار غیرخطی، تمرکز بر روی تحلیل پایداری باقی بماند.

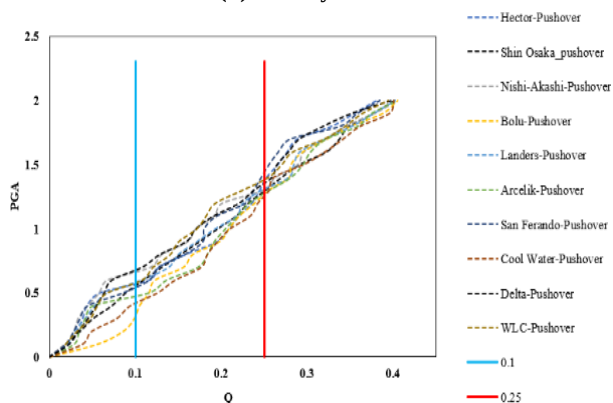
برای مقایسه‌ی بهتر بین شاخص پایداری‌های محاسبه شده با مقادیر آیین‌نامه‌ای، در دو حالت مختلف شامل: تغییرمکان ناشی از نیروهای جانبی مطابق با آیین‌نامه، تغییرمکان واقعی با استفاده از ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان، شاخص پایداری آیین‌نامه در سطوح مختلف طراحی لرزه‌ای محاسبه و در نمودارها ارائه شده است. نتایج شاخص پایداری در حالت استاتیکی براساس تغییرشکل ارتجاعی و غیرارتجاعی برای سازه‌های ۳ تا ۲۰ طبقه به ترتیب در جدول ۴ ارائه شده است؛ که در آن، شاخص پایداری استاتیکی در ۴ ناحیه (Zone) براساس استاندارد UBC-۱۹۹۷ و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم محاسبه شده است. مقادیر به‌دست آمده با احتساب تغییرشکل‌های ارتجاعی نزدیک به حد پایین آیین‌نامه و فقط در ساختمان ۲۰ طبقه در نزدیکی مقدار ۰/۱ بوده است. از طرفی دیگر، مقدار شاخص پایداری با احتساب تغییرشکل‌های واقعی (تغییرشکل‌های غیرارتجاعی)، مقادیر قابل توجهی به دست می‌آید. برای به‌دست آوردن شاخص پایداری تحلیل غیرخطی باید از تغییرمکان غیرخطی استفاده شود. طبق رابطه‌ی (۳-۱۱) استاندارد ۲۸۰۰ می‌توان تغییرمکان غیرخطی (Δ_M) را از ضرب ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان (G_d) در تغییرمکان خطی (Δ_{eu}) به‌دست آورد. پس



(a) 3- story frame

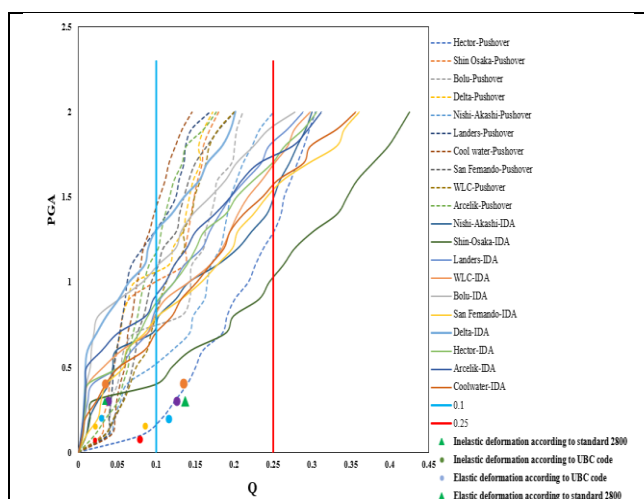


(b) 9- story frame

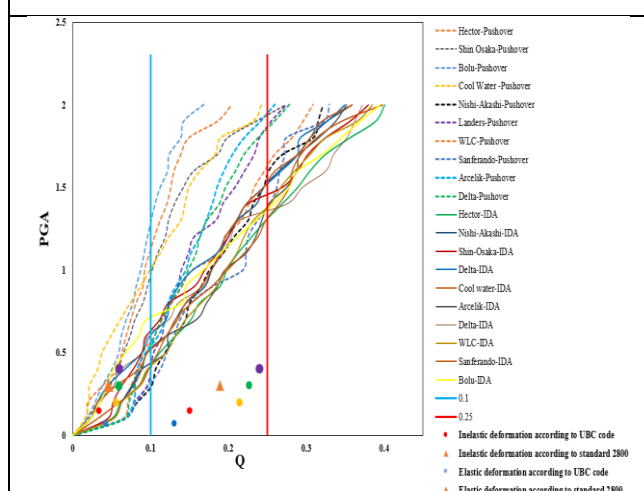


(c) 20- story frame

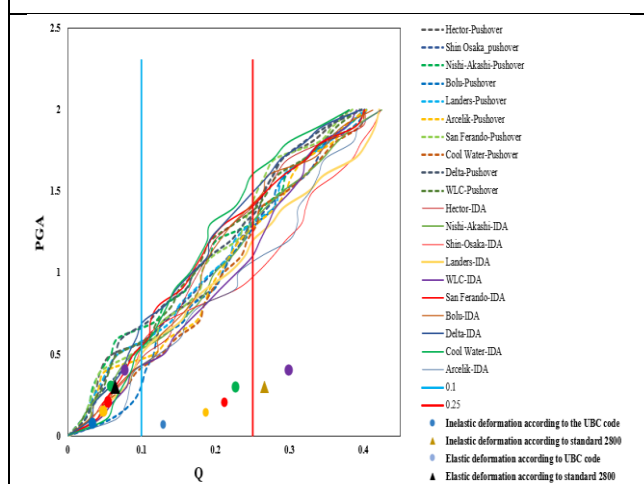
شکل ۶. شاخص پایداری حاصل از تحلیل پوش‌آور.



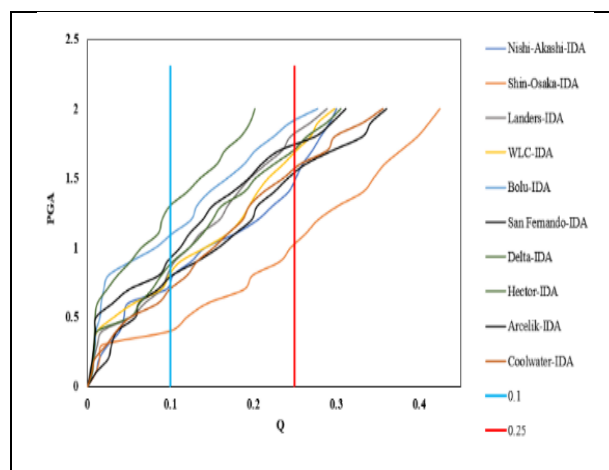
(a) 3-story frame



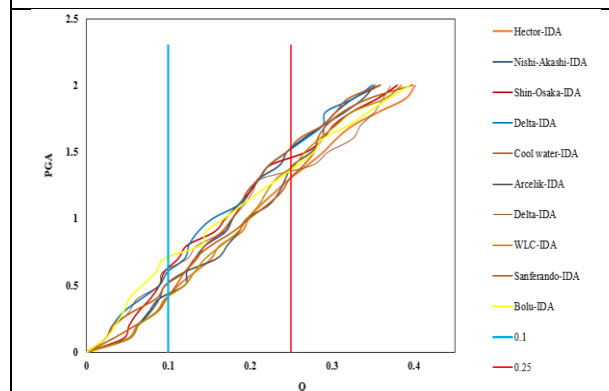
(b) 9-story frame



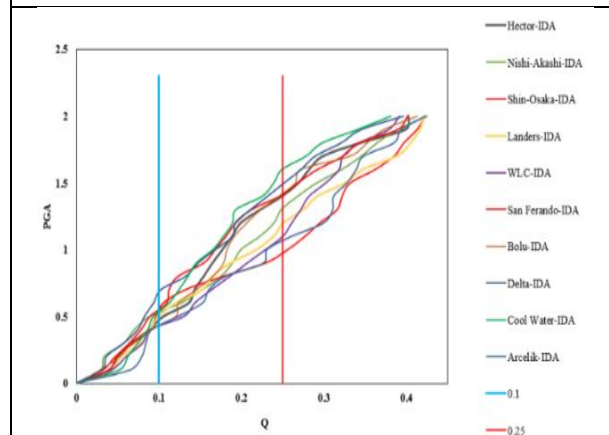
(c) 3-story frame



(a) 3-story frame



(b) 9-story frame



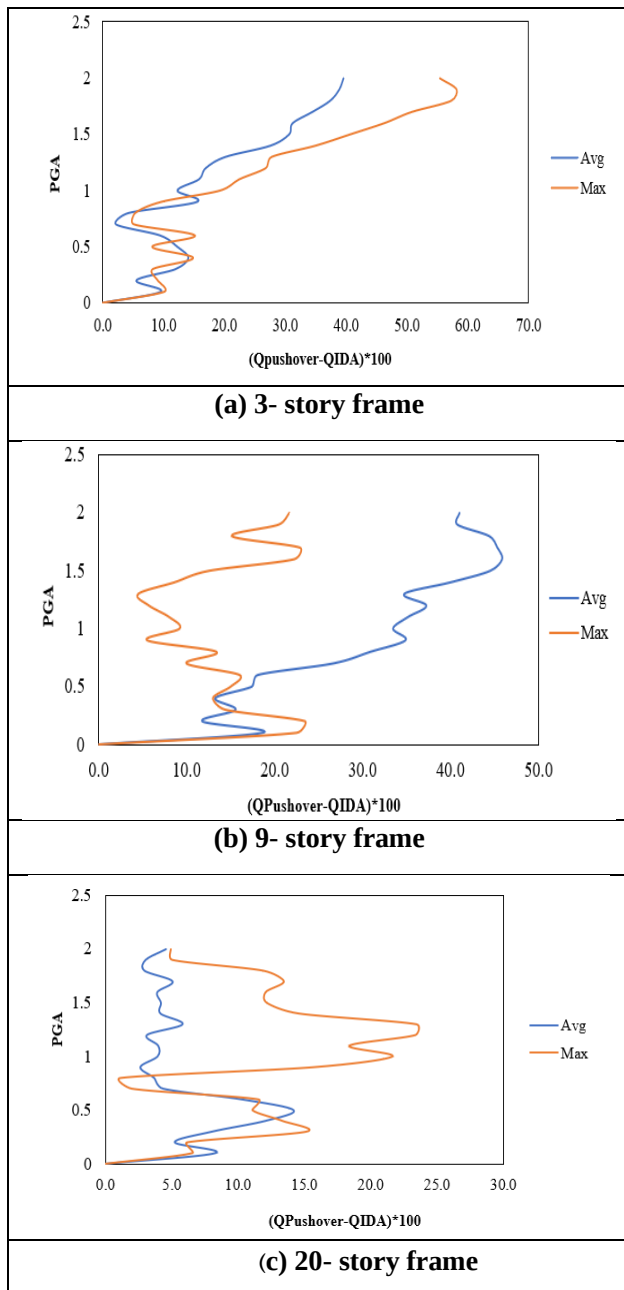
(c) 20-story frame

شکل ۷. شاخص پایداری حاصل از تحلیل IDA.

محاسبه‌شده با تحلیل IDA، در شکل ۷ برای سازه‌های ۳ تا ۲۰ طبقه و در شکل ۸، هم‌پوشانی و اختلاف مقادیر شاخص پایداری تحت تحلیل‌های پوش‌آور، IDA و استاتیکی به ترتیب برای سازه‌های ۳ تا ۲۰ طبقه مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها در شتاب‌های کمتر از $0.1g$ ، شاخص‌های محاسبه‌شده در تحلیل پوش‌آور و دینامیکی کمتر از حد پایین استاندارد ۲۸۰۰ است و در تقریباً تا شتاب‌های $0.15g$ ، شاخص‌های دینامیکی بین حدود مجاز آیین‌نامه‌ای است. در واقع، در میزان سطح شتاب مذکور طبق آیین‌نامه لازم است آثار P-Delta در آن دیده شود. در سطوح بالای شتاب $0.1g$ ، مقادیر شاخص پایداری از مقدار بیشینه‌ی آیین‌نامه که 0.25 است، فراتر رفته است؛ اما تحلیل‌ها حالت پایداری خود را حفظ کرده‌اند؛ اما پایداری مذکور در تحلیل‌ها

شکل ۸. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شاخص پایداری شتاب‌نگاشت‌ها تحت تحلیل IDA، پوش‌آور و استاتیکی.

و کسب شاخص‌های بالاتر از 0.25 با یکدیگر مغایرت داشته‌اند. در حالت کلی، مقادیر حاصل از تحلیل پوش‌آور نسبت به تحلیل IDA کمتر است. البته در حدود شتاب کمتر از $0.05g$ ، این دو تحلیل اخیر نسبتاً با یکدیگر تطابق دارند و در مقادیر بیشتر شتاب، اختلاف بین نتایج تحلیل IDA و پوش‌آور بیشتر شده است.

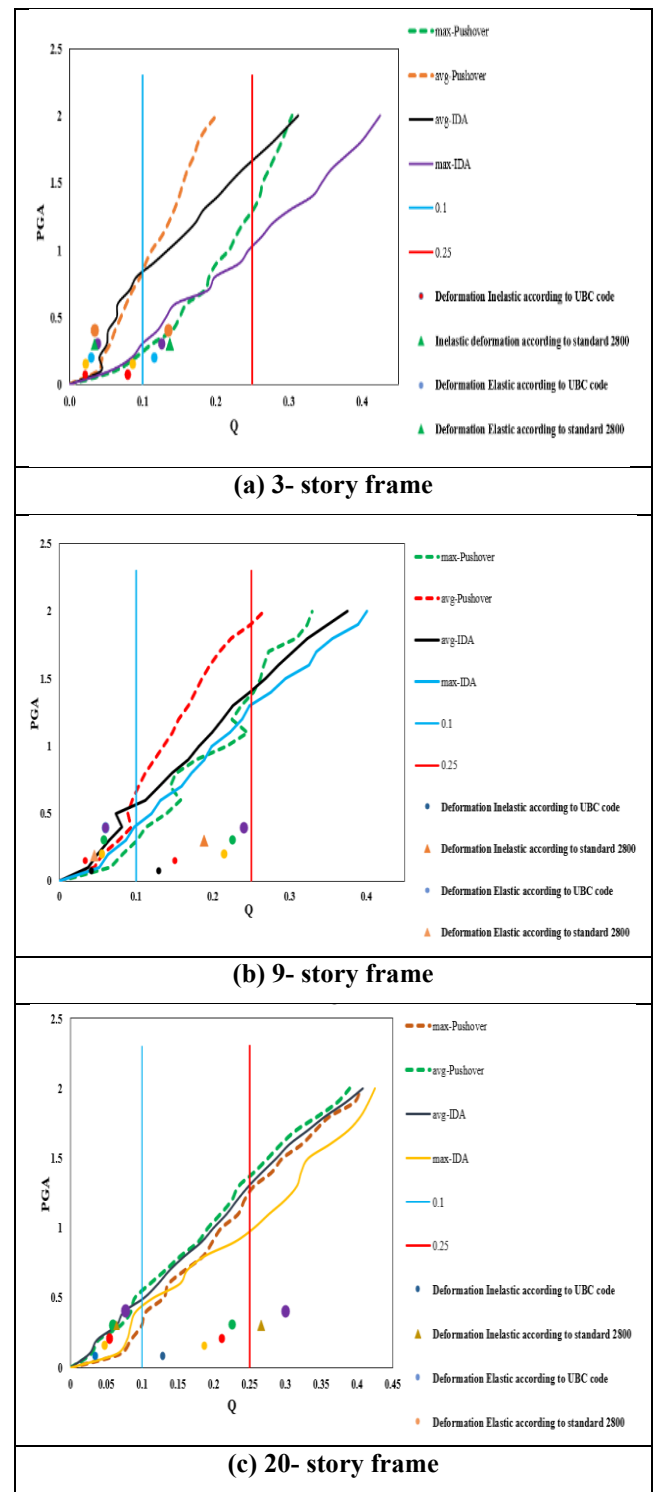


شکل ۱۰. اختلاف شاخص پایداری غیرخطی استاتیکی و دینامیکی بر حسب درصد.

اگرچه تحلیل پوش‌آور، یکی از روش‌های رایج و مؤثر برای ارزیابی عملکرد غیرخطی سازه‌هاست، اما در محاسبه‌ی شاخص پایداری (θ) محدودیت‌هایی وجود دارد که می‌تواند دقت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد؛ که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- **ماهیت استاتیکی تحلیل:** تحلیل پوش‌آور یک روش استاتیکی است که آثار دینامیکی ناشی از زلزله‌ی واقعی را مستقیماً لحاظ نمی‌کند. در نتیجه، تغییر مکان‌های نسبی بین طبقات و پاسخ‌های غیرخطی، که در یک زلزله‌ی واقعی رخ می‌دهد، ممکن است به‌صورت کامل شبیه‌سازی نشود و این می‌تواند در دقت محاسبه‌ی شاخص پایداری تأثیر بگذارد.

۲- **وابستگی به الگوی بارگذاری:** نتایج تحلیل پوش‌آور به‌شدت به نوع الگوی بار جانبی اعمال‌شده (مثلاً مثلثی یا یکنواخت) وابسته است. این وابستگی ممکن است موجب خطا در برآورد تغییر مکان‌های نسبی بین طبقات (story drift) شود، که مستقیماً در محاسبه‌ی (θ) دخیل است.



شکل ۹. بیشینه و میانگین شاخص پایداری تحلیل IDA و پوش‌آور و مقایسه با شاخص پایداری استاتیکی.

در شکل ۹، نتایج بین شاخص پایداری بیشینه و میانگین، تحت تحلیل‌های متفاوت و میزان اختلاف ذکرشده در جدول ۵ ارائه شده‌اند. قدرمطلق اختلاف اعداد جدول ۵، به ترتیب در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. تفاوت در شتاب‌های بالاتر و مخصوصاً در سازه‌های بلندتر می‌تواند ناشی از آثار مودهای مرتبه‌ی دوم باشد. نتایج اخیر نشان می‌دهند که شاخص‌های پایداری محاسبه‌شده در آیین‌نامه، که براساس تحلیل‌های ارتجاعی محاسبه می‌شود، نمی‌تواند بیانگر میزان و برآورد حدود آیین‌نامه‌ای باشد. همچنین مقایسه‌ی بین نتایج شاخص دینامیکی و شاخص استاتیکی نیز بیانگر افتراق روابط با شرایط واقعی است.

جدول ۵. تفاضل شاخص پایداری غیرخطی استاتیکی و دینامیکی.

PGA	Difference between Pushover Average Stability Index and IDA (3st)	Difference between Pushover maximum Stability Index and IDA(3st)	Difference between Pushover Average Stability Index and IDA (9st)	Difference between Pushover maximum Stability Index and IDA(9st)	Difference between Pushover Average Stability Index and IDA (20st)	Difference between Pushover maximum Stability Index and IDA(20st)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	10.20	9.60	18.50	22.50	8.30	6.55
0.2	9.10	5.60	11.70	23.50	5.00	6.20
0.3	8.25	11.90	15.50	14.50	8.00	15.15
0.4	14.90	14.10	13.20	13.00	12.00	13.30
0.5	8.20	12.30	17.00	15.00	15.00	11.00
0.6	15.20	9.50	-18.00	-16.00	-10.30	-11.50
0.7	5.20	-2.20	-26.60	-10.00	-5.00	-2.00
0.8	5.40	-4.30	-30.80	-13.50	-3.70	-1.00
0.9	-9.70	-15.50	-34.80	-5.50	-2.70	-15.65
1.0	-19.30	-12.30	-33.50	9.20	-4.00	-21.60
1.1	-22.50	-15.80	-35.10	8.00	-4.00	-18.50
1.2	-26.80	-17.00	-37.20	-5.70	-3.20	-23.40
1.3	-27.80	-20.20	-34.70	-4.50	-5.80	-23.50
1.4	-35.0	-27.60	-40.00	-8.60	-4.00	-14.60
1.5	-40.70	-30.60	-44.60	-12.50	-3.00	-12.50
1.6	-46.30	-31.00	-45.80	-22.30	-4.00	-12.00
1.7	-50.80	-34.50	-45.30	-22.10	-5.00	-13.50
1.8	-57.30	-37.50	-44.40	-15.15	-3.00	-12.00
1.9	-58.20	-39.00	-40.70	-20.50	-3.00	-5.00
2.0	-55.50	-39.60	-41.00	-21.70	-4.5	-5.00

و تدقیق بیشتر قرار گیرد. همان گونه که در مقدمه اشاره شده است، رابطه‌ی اخیر بیشتر برای بحث بار جانبی باد ارائه شده است و نیاز است با انجام مطالعات بیشتر درخصوص انواع ساختمان‌ها و شرایط مختلف برای شرایط لرزه‌ای بررسی و در صورت نیاز مورد بازنگری قرار گیرد. بررسی نتایج حاصل از جدول ۵ و شکل ۱۰، نشان می‌دهد که مقادیر اختلاف بین شاخص پایداری پوش‌آور دینامیکی در حدود اولیه‌ی شتاب $g/5$ اختلافی کمتر از ۱۵٪ داشته و این اختلاف در شتاب‌های بالاتر، مقادیر بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. به نظر می‌رسد در روابط موجود نیاز است که تغییرشکل‌های غیرارتجاعی وارد شوند و درخصوص حدود مجاز آیین‌نامه‌ای نیز بررسی‌های بیشتری صورت گیرد.

۳.۳. تفسیر یافته‌ها

با توجه به نمودارهای شاخص پایداری در سازه‌های مرجع که تحلیل شده‌اند، این نتایج به‌دست آمده است:

۱- نمودارهای شاخص پایداری دینامیکی و استاتیکی غیرخطی به سه ناحیه تقسیم شده‌اند، که ناحیه‌ی اول بر طبق استاندارد ۲۸۰۰، اگر شاخص پایداری کمتر از ۱۰٪ باشد، می‌توان آثار ($P\Delta$) را نادیده گرفت و ناحیه‌ی دوم بین ۱۰

۳- **عدم لحاظ تغییر مشخصات دینامیکی:** در طول پاسخ غیرخطی، مشخصات دینامیکی سازه (از جمله فرکانس و مودهای ارتعاشی) تغییر می‌کنند، اما تحلیل پوش‌آور عموماً از مود اول نوسان برای تعیین بارگذاری استفاده می‌کند. این ساده‌سازی ممکن است منجر به دقت کمتر در محاسبه‌ی آثار ($P\Delta$) شود.

۴- **تقریب در مدل‌سازی آثار مرتبه‌ی دوم:** در بسیاری از مدل‌های پوش‌آور، آثار هندسی مرتبه‌ی دوم مانند ($P\Delta$) به‌صورت تقریبی مدل می‌شود؛ یا از طریق افزودن المان‌های جانبی مانند ستون‌های (Lean) شبیه‌سازی می‌شود. روش‌های ذکرشده ممکن است نتوانند تغییرات پیچیده در توزیع نیروی محوری در طول تحلیل را به‌درستی نشان دهند.

۵- **محدودیت در ارزیابی پایداری در سازه‌های بلند یا با نامنظمی زیاد:** در سازه‌های بلندمرتبه یا با رفتار پیچیده، وابستگی به مودهای بالاتر اهمیت می‌یابد و تحلیل پوش‌آور مبتنی بر مود اول ممکن است نتواند رفتار واقعی پایداری جانبی را به‌درستی شبیه‌سازی کند.

در حالت کلی می‌توان گفت برای محاسبه‌ی شاخص پایداری ساختمان نیاز است در مطالعاتی دیگر رابطه‌ی آیین‌نامه و همچنین حدود مجاز مورد بررسی

و قابل توجهی در ساختمان‌های کوتاه مرتبه نشان داده است؛ که برای ساختمان‌های متوسط و بلند با مقادیر شاخص حاصل از پوش‌آور نزدیک بوده است.

۲- شاخص پایداری به‌دست‌آمده به روش پوش‌آور نسبتاً با آیین‌نامه تطابق داشته است.

۳- شاخص پایداری به روش دینامیکی به جز در شتاب‌های پایین تا $0.2g$ فراتر از حد پوش‌آور بوده است.

۴- مقادیر حاصل از شاخص پایداری استاتیکی با در نظر گرفتن تغییر شکل غیرارتجاعی در ساختمان‌های کوتاه به مقادیر شاخص پایداری دینامیکی نزدیک بوده و ساختمان‌های متوسط و بلند تفاوت داشته‌اند.

۵- به نظر می‌رسد مقادیر حدی 0.1 و 0.25 در آیین‌نامه نیاز به بازنگری دارد.

برای مطالعات آینده می‌توان شاخص پایداری برای سازه‌های بتنی را محاسبه کرد. شاخص پایداری دینامیکی فقط بر روی سازه‌های منظم در ارتفاع و پلان ارزیابی شده‌اند. مطالعه‌ی سازه‌های دارای بی‌نظمی در پلان‌ها به دلیل ناهمترایی مرکز جرم و مرکز سختی و عدم تقارن هندسی توصیه می‌شود. همچنین می‌توان برای زلزله‌های نزدیک گسل نیز شاخص پایداری دینامیکی را بررسی کرد. به منظور افزایش دقت در مقایسه پاسخ‌های تحلیلی، استفاده از روش‌های پوش‌آور اصلاح‌شده نظیر روش MMC یا بارگذاری تطبیقی در نوشتارهای آتی می‌تواند به بهبود تطابق نتایج استاتیکی و دینامیکی کمک کند. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از شاخص‌هایی مانند $Sa(T1)$ یا IM های مشتق‌شده از پاسخ مودال برای کاهش پراکندگی نتایج استفاده شود.

تا ۲۵ درصد است، که باید آثار $(P\Delta)$ را در نظر گرفت؛ و وقتی شاخص پایداری بیشتر از ۲۵٪ باشد، احتمال ناپایداری سازه وجود دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، شاخص پایداری دینامیکی (شاخص مذکور براساس فرمول استاندارد ۲۸۰۰ در نقاط بیشینه‌ی پوش‌آور به‌دست آمده است) از مقدار ۲۵٪ بیشتر بوده است.

۲- مقادیر شاخص پایداری براساس تحلیل پوش‌آور در مقایسه با تحلیل دینامیکی کمتر شده است.

۳- شاخص پایداری استاتیکی اگر براساس تغییرمکان‌های واقعی به‌دست آید، طبق جدول ۴، به ترتیب برای سازه‌های ۳ تا ۲۰ طبقه، آنگاه در شتاب‌های کم، مقادیر شاخص پایداری متفاوتی را نشان می‌دهد؛ که در این حالت شاخص پایداری دینامیکی و استاتیکی غیرخطی از مقادیر شاخص پایداری استاتیکی کمتر بوده و طبق رابطه‌ی استاندارد ۲۸۰۰، شاخص پایداری‌های بزرگ‌تری به‌دست آمده است؛ که یک رابطه‌ی محافظه‌کارانه است.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور بررسی شاخص پایداری در حالت دینامیکی در سازه‌های فولادی سه سازه‌ی مرجع مطالعه شده است. برای این منظور، یک سازه‌ی ۳ طبقه به عنوان کم‌مرتبه و یک ساختمان ۹ طبقه به عنوان میان‌مرتبه، و یک سازه‌ی ۲۰ طبقه به عنوان بلندمرتبه مطالعه شده‌اند؛ که در پلان و ارتفاع منظم بوده‌اند. سازه‌ها تحت زلزله‌های دور گسل و با استفاده از تحلیل غیرخطی دینامیکی افزایشی (IDA) تحلیل شده‌اند. سپس شاخص پایداری براساس تحلیل غیرخطی استاتیکی (Pushover) محاسبه و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱- شاخص پایداری به روش دینامیکی نسبت به مقادیر آیین‌نامه، مقدار بیشتر

References- منابع

- Gupta, A. and Krawinkler, H., 2000. Dynamic p-delta effects for flexible inelastic steel structures. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), pp.145-154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:1\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(145)).
- Adam, C. and Jäger, C., 2012. Simplified collapse capacity assessment of earthquake excited regular frame structures vulnerable to p-delta. *Engineering Structures*, 44, pp.159-173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.036>.
- Adam, C. and Ibarra, L.F., 2015. Seismic collapse assessment. *Earthquake Engineering Encyclopedia*, 3, pp. 2729-2752. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4_248.
- López, S.E., Ayala, A.G. and Adam, C., 2015. A novel displacement-based seismic design method for framed structures considering p-delta induced dynamic instability. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, pp.1227-1247. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9688-8>.
- Hoseini Vaez, S.R., Karimi, F., 2019. Optimal design of steel flexural frames based on performance levels with roof target displacement criterion. *Sharif Civil Engineering Journal*, 35(3.2), pp.71-82. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/J30.2018.5196.2212>.
- Asadi, P., Abbasi, H., 2024. Fragility curves production for steel structures by seismic improvement of the high-dimensional model representation method. *Sharif Civil Engineering Journal*, 40(1), pp.65-76. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/J30.2023.62038.3203>.
- Pachideh, G., Gholhaki, M. and Daryan, A.S., 2019.

- Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis. *In Structures*, 20, pp.437-451. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.005>
8. Rosenblueth, E., 1965. Slenderness effects in buildings. *J. of the Structural Division*, 91(1), pp.229-252. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001207>.
9. Sun, C.K., Berg, G.V. and Hanson, R.D., 1973. Gravity effect on single-degree inelastic system. *J. of the Engineering Mechanics Division*, 99(1), pp.183-200. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001720>.
10. Applied technology council and structural engineers association of california, 1978. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings: *A Cooperative Effort with the Design Professions, Building Code Interests, and the Research Community* 3 (6).
11. ACI committee, 1977. Commentary on building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-77). *American Concrete Institute*.
12. Andrews, A.L., 1977. Slenderness effects in earthquake resisting frames. *Bulletin of the Newzealand Society for Earthquake Engineering*, 10(3), pp.154-158. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.10.3.154-158>.
13. MacGregor, J.G. and Hage, S.E., 1977. Stability analysis and design of concrete frames. *J. of the Structural Division*, 103(10), pp.1953-1970. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004745>.
14. Dal Maso, G., Murat, F., Orsina, L. and Prignet, A., 1999. Renormalized solutions of elliptic equations with general measure data. *Annali Della Scuola Normale Superiore di Pisa-Classe di Scienze*, 28(4), pp.741-808.
15. Bernal, D., 1987. Amplification factors for inelastic dynamic $p-\Delta$ effects in earthquake analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 15(5), pp.635-651. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290150508>.
16. Barbagallo, F., Bosco, M., Florida, A., Marino, E.M. and Rossi, P.P., 2023. Effectiveness of design procedures in counteracting second order effects in steel moment resisting frames. *Metals*, 13(2), p.321. <https://doi.org/10.3390/met13020321>.
17. Fenwick, R.C., Davidson, B.J. and Chung, B.T., 1992. P-delta actions in seismic resistant structures. *Bulletin of the Newzealand Society for Earthquake Engineering*, 25(1), pp.56-69. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.25.1.56-69>.
18. MacRae, G.A., 1994. P- Δ effects on single-degree-of-freedom structures in earthquakes. *Earthquake spectra*, 10(3), pp.539-568. <https://doi.org/10.1193/1.1585788>.
19. Tremblay, R., Duval, C. and Léger, P., 1998. Effects of viscous damping models, hysteretic models and ground motion characteristics on seismic p-delta strength amplification factors. *In Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'97)* pp. 103-118. <https://doi.org/10.1016/B978-008043320-2/50011-3>.
20. Williamson, E.B., 2003. Evaluation of damage and p-delta effects for systems under earthquake excitation. *Journal of Structural Engineering*, 129(8), pp.1036-1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:8\(1036\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:8(1036)).
21. Amara, F., Bosco, M., Marino, E.M. and Rossi, P.P., 2014. Accurate strength amplification factor for the design of SDOF systems with p-delta effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(4), pp.589-611. <https://doi.org/10.1002/eqe.2361>.
22. De Francesco, G. and Sullivan, T.J., 2022. P-delta effects on short-period systems subjected to earthquake excitation. *Engineering Structures*, 254, p.113642. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113642>.
23. Ibarra, L.F., Medina, R.A. and Krawinkler, H., 2005. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(12), pp.1489-1511. <https://doi.org/10.1002/eqe.495>.
24. Black, E.F., 2011. Use of stability coefficients for evaluating the p-delta effect in regular steel moment resisting frames. *Engineering Structures*, 33(4), pp.1205-1216. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.042>.
25. Heydarpour, P., Silva, P.F. and Burgueño, R., 2018. Investigation on ignoring p-delta effects based on stability index. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 7(2).
26. Gupta, K., 2020. P-delta analysis of flat slab and RC framed buildings.
27. Hassani, S., Mousavi, M. and Gandomi, A.H., 2021. Structural health monitoring in composite structures: A comprehensive review. *Sensors*, 22(1), p.153. <https://doi.org/10.3390/s22010153>.
28. Gunawan, F.E., Nhan, T.H., Asrol, M., Kanto, Y. and Kamil, I., 2021. A new damage index for structural health monitoring: a comparison of time and frequency domains. *Procedia Computer Science*, 179, pp.930-935. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.082>.
29. Anastasio, D. and Marchesiello, S., 2023. Nonlinear frequency response curves estimation and stability analysis of randomly excited systems in the subspace framework. *Nonlinear Dynamics*, 111(9), pp.8115-8133. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08280-6>.
30. De Francesco, G. and Sullivan, T.J., 2023.

- Accounting for hysteretic characteristics in p-delta analysis of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(15), pp.4919-4938. <https://doi.org/10.1002/eqe.3994>.
31. Khorasani, N.E., Garlock, M.E. and Quiel, S.E., 2015. Modeling steel structures in OpenSees: Enhancements for fire and multi-hazard probabilistic analyses. *Computers & Structures*, 157, pp.218-231. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.025>.
 32. Rooshenas, A., 2020. Comparing pushover methods for irregular high-rise structures, partially infilled with masonry panels. *In Structures*, 28, pp.337-353. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.073>
 33. McKenna, F., 2011. A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), pp.58-66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>.
 34. Gupta, A., 1999. Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures.
 35. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A., 2002. Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), pp.491-514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>.
 36. Chopra, A.K., 2012. Dynamics of structures ,pp. 174-196.
 37. Zareian, F., Lignos, D.G. and Krawinkler, H., 2010. Evaluation of seismic collapse performance of steel special moment resisting frames using FEMA P695 (ATC-63) methodology. *In Structures Congress 2010*, pp.1275-1286. [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)116](https://doi.org/10.1061/41130(369)116).
 38. Iervolino, I. and Cornell, C.A., 2005. Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, 21(3), pp.685-713. <https://doi.org/10.1193/1.1990199>.

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.



Research Note

Investigation of Parameters Affecting Bond Strength and Pull-Out Behavior of Polyethylene Terephthalate Ropes in Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites

Reza Akbarifar, Alireza Mortezaei* and Ali Babaei

Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* corresponding author: (al.mortezaei@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 29 June 2025

Revised: 29 October 2025

Accepted: 3 November 2025

Keywords:

Recycled pet rope,
fiber-reinforced cementitious
composites (FRCC),
pull-out test,
bond behavior,
steel fiber,
ductility,
sustainable reinforcement.

Abstract

This study investigates the bond behavior of braided ropes made from recycled polyethylene terephthalate (PET) as a potential alternative to conventional steel reinforcement in fiber-reinforced cementitious composites (FRCC). Pull-out tests were conducted according to RILEM RC6 standards on FRCC specimens containing different volume fractions of steel fibers, using steel rebars and PET ropes with equal diameters (14 mm). The experimental results revealed that the maximum pull-out force was approximately 30 kN for steel bars and 7.6 kN for PET ropes, indicating a 75% reduction in bond strength for PET compared to steel. However, the displacement corresponding to the peak load was about 23.5 mm for PET ropes and only 0.6 mm for steel bars, representing a 40-fold increase in ductility for PET.

In all experiments, PET ropes failed internally without being pulled out from the matrix, while steel bars exhibited bond-slip failure.

The inclusion of steel fibers in the matrix significantly enhanced the bond performance, especially in terms of energy absorption and post-peak ductility.

For instance, in specimens containing 1% steel fibers, the maximum pull-out load of the PET ropes reached 7.6 kN at a displacement of 9.3 mm, showing a clear improvement over fiberless samples.

The experimental observations were further analyzed by comparing the bond-slip responses of PET and steel reinforcements, which demonstrated that PET exhibits a gradual softening after peak load instead of a brittle bond loss. This characteristic suggests a more stable and energy-dissipating interfacial mechanism. In addition, the use of recycled PET not only provides a sustainable and eco-friendly reinforcement option but also contributes to reducing construction waste and CO₂ emissions. Such properties make PET ropes particularly suitable for structures requiring high ductility and seismic resilience. The findings of this study can serve as a reference for future modeling of PET-concrete interface behavior and for developing design guidelines for sustainable fiber-reinforced composites.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Akbarifar, R., Mortezaei, A. and Babaei, A. 2026. Investigation of parameters affecting bond strength and pull-out behavior of polyethylene terephthalate ropes in steel fiber-reinforced cementitious composites, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 117-126. <https://doi.org/10.24200/sjce.2025.67085.3436>



بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون کشیدگی طناب‌های پلی اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی

رضا اکبری فر، علیرضا مرتضایی* و علی بابایی

گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول (al.mortezaei@iau.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، رفتار پیوستگی طناب‌های بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات (PET) بازیافتی به عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در کامپوزیت‌های الیافی (FRCC) بررسی شده است. برای این منظور، بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی FRCC با درصدهای مختلف الیاف فولادی، آزمون‌های بیرون کشیدگی مطابق با استاندارد RILEM RC6 بر روی میلگرد فولادی و طناب PET با قطر یکسان انجام شده و نتایج نشان داده است که نیروی بیرون کشیدگی برای میلگرد، حدود ۳۰ کیلونیوتن و برای PET، حدود ۷/۶ کیلونیوتن بوده است، که بیانگر کاهش ۷۵ درصدی مقاومت چسبندگی PET است. با این حال، میزان جابجایی متناظر با بیشینه بار در PET حدود ۲۳/۵ میلی متر و در میلگرد فولادی، ۰/۶ میلی متر بوده است؛ که نشان دهنده ۴۰ برابری افزایش شکل پذیری PET در مقایسه با میلگرد است. در تمامی نمونه‌ها، PET دچار گسیختگی شده و از بتن خارج نشده است، در حالی که میلگردها با لغزش از بتن جدا شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که با وجود مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشش، رفتار پیوستگی آن به ویژه در نواحی با نیاز به شکل پذیری بالا، می تواند در طراحی های خاص استفاده شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

واژگان کلیدی:

کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی (FRCC)، پلی اتیلن ترفتالات (PET)، طناب پلیمری بازیافتی، رفتار بیرون کشیدگی، پیوستگی بتن و میلگرد.

۱. مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون علم و تکنولوژی، نیاز به سازه‌هایی با عملکرد بهتر و مقاومت بالاتر در برابر بارهای مختلف، به ویژه در شرایط بارگذاری شدید، مانند: زلزله یا بارهای دینامیکی، به استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته در صنعت ساخت و ساز به عنوان یک راهکار مؤثر توجه شده است. در این میان، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده با الیاف (FRCC)^۱ به دلیل بهبود رفتار مکانیکی، افزایش شکل پذیری، و کنترل ترک خوردگی جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند.^[۱ و ۲]

یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، بررسی پیوستگی بین مصالح تقویت کننده و ماتریس سیمانی است، که نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد کلی سازه دارد.^[۳] در این راستا، استفاده از طناب‌های پلیمری بازیافتی مانند پلی اتیلن ترفتالات (PET)^۲ به عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی سنتی، به دلیل مزایایی

همچون: وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی، و قابلیت بازیافت بررسی شده است. با این حال، شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی و مکانیزم‌های گسیختگی طناب‌های پلیمری بازیافتی در ماتریس‌های سیمانی همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است.^[۴ و ۵]

به کامپوزیت‌های پایه سیمانی در سال‌های اخیر، توجه گسترده‌ای شده است. داسیلوا^۳ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۱] در یک مرور جامع نشان داده‌اند که افزودن الیاف به ماتریس سیمانی، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، از قبیل مقاومت خمشی و کششی، باعث افزایش چقرمگی، کنترل ترک خوردگی، و دوام طولانی مدت سازه می شود.^[۶] طراحی بهینه ترکیب سیمان، مواد افزودنی معدنی (مثل خاکستر بادی یا میکروسیلیس) و نوع فیبر (فولادی، پلی پروپیلن، بازالت یا کربن) می تواند عملکرد نهایی کامپوزیت را در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به طور چشمگیری ارتقا بخشد. کامپوزیت‌های پایه سیمانی با داشتن خصوصیات منحصربه فرد خود، مانند: در دسترس بودن منابع

³ da Silva

¹ Fiber-Reinforced Cementitious Composites

² Poly Ethylene Terephthalate

استناد به این مقاله:

اکبری فر، رضا، مرتضایی، علیرضا و بابایی، علی، ۱۴۰۵. بررسی پارامترهای مؤثر در پیوستگی و رفتار بیرون کشیدگی طناب‌های پلی اتیلن ترفتالات از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص. ۱۱۷-۱۲۶. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.67085.3436>



تقویت‌کننده‌ی بتن مؤثر بوده و آغشته‌سازی منقطع با اپوکسی به‌روزی سازه را تا ۵۰٪ ارتقاء داده است.

حج فروش و همکارانش (۲۰۲۰)^[۱۶] با استفاده از آزمون بیرون کشیدن میلگرد از داخل نمونه‌ی استوانه‌ای بتن حاوی ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را در نمونه‌های بتنی، که مدت ۲ دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند، را مطالعه کرده و دریافته‌اند که شکست ناشی از آزمون بیرون کشیدگی برای همه‌ی نمونه‌ها رخ داده است. علاوه بر این، مقاومت پیوستگی نمونه‌های مربوط به میلگردهای شماره ۱۴ و ۲۰ به ترتیب حدود ۸۳ و ۵۱ درصد افزایش یافته است. در مطالعه‌ی مذکور بیان شده است که اعمال میدان مغناطیسی بر بتن تازه باعث افزایش مقاومت فشاری آن بیش از ۲۱٪ شده و مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی به ترتیب تا ۹ و ۱۳ درصد افزایش یافته است، که این امر به دلیل بهبود تراکم بتن و کاهش منافذ است.

ولنگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۷] رفتار بیرون کشیدگی میله‌های BFRP از کامپوزیت پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف بازالت را به‌صورت تجربی بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که قطر میله نسبت به میزان الیاف، تأثیر بسیار کمی در مقاومت چسبندگی و لغزش میانگین داشته است.

لین و آسترگ^۳ (۲۰۲۱)^[۱۸] اندرکنش بین میلگردهای فولادی و کامپوزیت پایه سیمانی را با استفاده از الیاف هیبریدی متشکل از الیاف فولادی و PVA با طول‌ها و قطرهای مختلف مطالعه کرده و دریافته‌اند که بسته به میزان الیاف، انواع مختلف شکست شامل شکست لغزشی و رشد ترک در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. ژائو و گیائو^۴ (۲۰۱۸)^[۱۹] رفتار چسبندگی میلگرد پوشش داده‌شده با اپوکسی و بتن توانمند الیافی را بررسی و یک مدل تحلیلی به‌منظور تخمین منحنی‌های نیرو - جابجایی ارائه کرده‌اند. خاک سفید و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۰] رفتار چسبندگی بین میلگرد با بتن معمولی و بتن فوق توانمند الیافی را مطالعه کرده و با استفاده از آزمون بیرون کشیدگی، منحنی‌های نیرو - جابجایی را برای نمونه‌های مختلف استخراج کرده و به مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف در نیروی بیرون کشیدگی پرداخته‌اند.

احمد و علی (۲۰۲۵)^[۲] رفتار بیرون کشیدگی و برشی میلگردهای پلاستیکی بازیافتی (HDPE) در بتن را برای ساخت مسکن بدون ملات با پیکربندی‌های مختلف قطر، محل قرارگیری، مخلوط بتن، و نوع میلگرد بررسی و ملاحظه کرده‌اند که میلگردهای آجدار عملکرد بهتری نسبت به میلگردهای بازیافتی در بیرون کشیدگی دارند. همچنین اشاره کرده‌اند که رفتار کرنشی بلندمدت میلگرد پلاستیکی بازیافتی باید در آینده برای پیامدهای واقعی در ساخت‌وساز در نظر گرفته شود.

اورهاگه^۵ و همکاران (۲۰۲۴)^[۳] رفتار پیوستگی الیاف کربن بازیافتی در بتن فوق توانمند را مطالعه کرده و نشان داده‌اند که الیاف پیرولیز شده تا ۱۵۰-۲۵۰ درصد، مقاومت برشی ظاهری بالاتری نسبت به الیاف بکر داشته‌اند، که اهمیت فرایند بازیافت در بهبود پیوستگی را برجسته می‌سازد. همچنین، بای^۶ و همکاران (۲۰۲۴)^[۵] عملکرد برشی تیرهای RC بدون خاموت تقویت‌شده با PET FRP را در دو حالت کاملاً پیچ و U شکل بررسی کرده و نشان داده‌اند

تولید آن در طبیعت، سازگار بودن در بسیاری از شرایط اقلیمی، و وزن نسبتاً پایین باعث شده است تا کامپوزیت‌های پایه سیمانی به‌عنوان یکی از مصالح اصلی مورد استفاده در صنعت ساختمان باشد.^[۷ و ۸] یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی کامپوزیت‌های پایه سیمان، توسعه‌ی استفاده از انواع مختلف الیاف در آن است.^[۹ و ۱۰] در این میان، پیوستگی FRCC و آرماتور، نقش کلیدی را در رفتار اعضاء سازه‌ای در هنگام قرارگیری تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی ایفا می‌کند. لذا، با توجه به کمبود اطلاعات در خصوص رفتار چسبندگی میلگردهای در تماس با بتن‌های الیافی، بررسی مورد اخیر حائز اهمیت بسیاری بوده است. استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی، موارد: شکل‌پذیری، مقاومت به ضربه، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، و استحکام آن در برابر بارهای دینامیکی و گسیختگی نرم را افزایش می‌دهد.^[۱۱ و ۱۲] علاوه بر آن، استفاده از انواع مختلف الیاف، امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن بتن را کاهش می‌دهد و از انتشار ترک جلوگیری می‌کند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی رفتار پیوستگی مصالح غیرفلزی مشابه FRP در ماتریس سیمانی پرداخته‌اند، تا با بهبود درگیری مکانیکی، چقرمگی و شکل‌پذیری نهایی سازه را ارتقا بخشند. تاکاساگو^۱ و همکاران (۲۰۲۳)^[۱۰] از میلگردهای بافته‌شده پلیمری (AFRP) در ماتریس FRCC تقویت‌شده با الیاف PVA استفاده کرده‌اند، تا رفتار پیوستگی و شکل‌پذیری کامپوزیت در زیر بارهای کششی - فشاری اندازه‌گیری شود. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که با افزایش درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت پیوستگی بین میلگرد AFRP و بتن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و الگوی ترک‌خوردگی نیز به ناحیه‌ی شکل‌پذیرتر منتقل می‌شود؛ بنابراین، استفاده از الیاف PVA علاوه بر افزایش چقرمگی، باعث بهبود درگیری مکانیکی الیاف بافته‌شده پلیمری در بتن می‌شود، که مبنای مناسبی برای طراحی FRCC های با مصالح بازیافتی همچون طناب PET فراهم می‌آورد. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۳] با ارائه‌ی یک روش بافت جدید برای میلگردهای کربنی نشان داده‌اند که افزایش درگیری مکانیکی سطح بافته تا بیش از ۴۰٪ مقاومت پیوستگی را ارتقا می‌دهد. این امر اهمیت طراحی سطح طناب‌های PET را برجسته می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که بهینه‌سازی الگوی بافت می‌تواند جلوی گسیختگی زودرس و کاهش مقاومت را بگیرد.

اکبری‌فر و همکاران (۲۰۲۴)^[۱۴] با موضوع ارزیابی پارامترهای مؤثر در رفتار پیوستگی بین میلگرد فولادی آجدار و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی فولادی به روش آزمون بیرون کشیدگی و مدل‌سازی المان محدود نشان داده‌اند که افزودن الیاف فولادی، رفتار پیوستگی میلگرد با کامپوزیت را بهبود می‌بخشد و مانع از گسیختگی تدریجی بتن می‌شود. همچنین چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی بتن با افزایش در صد الیاف فولادی تا ۲٪ افزایش می‌یابد، که در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله بسیار حائز اهمیت است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش اخیر، آثار قابل توجه الیاف فولادی، پارامترهای هندسی، و نوع مواد در رفتار چسبندگی و مقاومت پیوستگی را نشان می‌دهد. کمانی و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۵] نیز آثار استفاده از الیاف در تقویت بتن را به‌صورت تجربی مطالعه کرده و دریافته‌اند که آغشته‌سازی جزئی اپوکسی در کارایی منسوج

⁴ Zhou & Qiao

⁵ Overhage

⁶ Bai

¹ Takasago

² Wang

³ Lin & Ostertag

میکروسیلیس با اندازه‌ی متوسط ذرات ۰/۵ میکرومتر با چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌بندی قطر ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر، فوق‌روان‌کننده‌ی Structuro ۳۵۵ بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات، آب، و الیاف فولادی تشکیل شده است.

نسبت‌های وزنی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی طرح اختلاط نسبت به سیمان به ترتیب شامل ۲/۰ برای خاکستر بادی، ۱/۰۰ برای ماسه‌ی سیلیسی، ۰/۰۷ برای میکروسیلیس، ۰/۰۴ برای فوق‌روان‌کننده، و ۰/۲۶ برای آب بوده است. خاکستر بادی کلاس F از منابع خارجی وارد و در مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است، هر چند دسترسی محدود آن ممکن است جنبه‌های عملی را تحت تأثیر قرار دهد، اما جایگزین‌هایی مانند پوزولان محلی می‌تواند در کاربردهای عملی بررسی شود.

برای ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی، ابتدا مصالح خشک، شامل سیمان، خاکستر بادی، و میکروسیلیس در سرعت ۸۰ دور بر دقیقه و برای ۴ دقیقه مخلوط شده است. فوق‌روان‌کننده^۹ در آب حل و سپس به مخلوط اضافه و در سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شده است. نهایتاً، الیاف فولادی اضافه و در ۱۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده‌اند. مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی بدون الیاف بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در هر وجه و در سن ۲۸ روزه برابر ۷۲ مگاپاسکال به‌دست آمده است.

الیاف فولادی با قطر ۰/۶ و طول ۱۴ میلی‌متر بوده است، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. الیاف دارای مقاومت کششی ۲۴۰۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۴۳۰ مگاپاسکال و نیز مدول ینگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۲۰۸ گیگاپاسکال و ۰/۲۸ بوده است.

افزودن الیاف فولادی به بتن باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش روانی آن می‌شود، زیرا الیاف مقاومت در برابر جریان را بالا می‌برد و ممکن است منجر به درهم‌تنیدگی یا تشکیل گره (balling) شود. برای حفظ کارایی مطلوب بتن، با افزایش درصد الیاف، باید مقدار فوق‌روان‌کننده به‌تدریج افزایش یابد تا روانی و گسترش‌پذیری بتن جبران شود.

۲.۲. طناب‌های پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

مدیریت زباله به‌ویژه زباله‌های پلاستیکی، یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی در دنیای امروز است. مصرف گسترده‌ی محصولات پلاستیکی، از جمله بطری‌های نوشیدنی ساخته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، سهم



شکل ۱. میکروالیاف فولادی استفاده‌شده.

که استفاده از روش تمام‌پیچیده می‌تواند ظرفیت برشی و تغییرشکل را به ترتیب تا ۱۲۳ و ۴۲/۵ درصد افزایش دهد.

علاوه بر این، زنگ^۷ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۶] رفتار پیوستگی میلگردهای ترموپلاستیک GFRP با بتن را با استفاده از شیوه‌ی نوآورانه‌ی سطحی بررسی کرده و نشان داده‌اند که روش مذکور، مقاومت پیوستگی را تا بیش از ۷/۶ مگاپاسکال در طول پیوند سه برابر قطر افزایش می‌دهد. همچنین درمان سطحی می‌تواند مقاومت پیوستگی را بیش از ۶/۷ مگاپاسکال افزایش دهد. ایشان اشاره کرده‌اند که میله‌های GFRP ترموپلاستیک مزایای متمایزی ارائه می‌دهند، که مهم‌ترین آن‌ها قابلیت بازیافت و توانایی تغییرشکل آن‌ها تحت گرما و نیروهای خارجی است.

پیوستگی میان مصالح تقویتی و ماتریس سیمانی، یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد نهایی سازه‌های بتن مسلح است. در حالی که رفتار بیرون‌کشیدگی میلگردهای فولادی در بتن به‌طور گسترده مطالعه شده است، درباره‌ی طناب‌های PET، به‌ویژه در ساختارهای FRCC، دانش محدودی وجود دارد. تفاوت در خواص مکانیکی دو ماده‌ی اخیر، از جمله انعطاف‌پذیری بالا، تنش تسلیم پایین، و نداشتن آج مکانیکی در طناب PET، سبب می‌شود تا مکانیزم‌های انتقال تنش، موده‌های شکست، و رفتار پیوستگی آن‌ها با بتن، تفاوت اساسی با میلگردهای فولادی داشته باشد. از سوی دیگر، تاکنون کمتر پژوهشی به مقایسه‌ی مستقیم عملکرد چسبندگی و مقاومت بیرون‌کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بستر کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی پرداخته است. به همین دلیل، بررسی دقیق رفتار بیرون‌کشیدگی طناب PET و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی می‌تواند به درک بهتر ویژگی‌های مصالح نوین ذکرشده کمک کند و زمینه‌ساز کاربرد گسترده‌تر آن در پروژه‌های عمرانی شود.

پژوهش حاضر، در پاسخ به خلأ علمی مذکور، به بررسی آزمایشگاهی و مقایسه‌ای رفتار بیرون‌کشیدگی طناب PET و میلگرد فولادی در بتن FRCC پرداخته و اثر الیاف فولادی در رفتار چسبندگی آن‌ها را نیز مطالعه کرده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر برای اولین بار، طناب PET به‌عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در بتن FRCC بررسی شده است. طناب PET به‌دلیل ویژگی‌های خاصی چون انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت کششی مناسب، در مقایسه با میلگرد فولادی، رفتار متفاوتی در چسبندگی با بتن نشان داده است.

۲. آزمون‌های تجربی

۱.۲. مشخصات مصالح، طرح اختلاط، و مواد استفاده‌شده

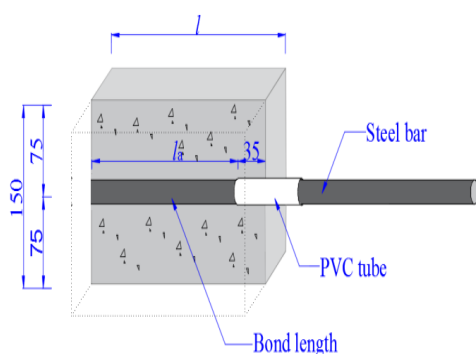
در بخش کنونی، به نحوه‌ی ساخت FRCC و همچنین مشخصات مواد استفاده‌شده پرداخته شده است. طرح اختلاط کامپوزیت پایه سیمانی توسعه داده‌شده در مطالعه‌ی چاوو^۸ و همکاران (۲۰۰۶)،^[۲۱] جهت بررسی رفتار بیرون‌کشیدگی میلگرد استفاده شده است.

برای اختلاط از سیمان پرتلند نوع III با مساحت سطح مخصوص ۳۴۱۳ سانتی‌مترمربع بر گرم استفاده شده است. همچنین از خاکستر بادی کلاس F با چگالی ۲۲۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و اندازه‌ی ذرات متوسط ۱۰ میکرومتر،

^۹ superplasticizer

^۷ Zeng

^۸ Chao



شکل ۳. مشخصات هندسی نمونه‌ی بیرون کشیدگی و نمونه‌ی ساخته‌شده.

(۱۹۸۳).^[۲۲] به جهت امکان مقایسه و تطبیق داده‌ها برای کشش مستقیم نمونه‌های طناب PET نیز از همین روش آزمایش استفاده شده و بخش مدفون طناب پلیمری در ناحیه‌ی میانی نمونه‌ی بتنی قرار گرفته است. براساس مطالعات کاروالهو^{۱۰} (۲۰۱۷)، برای جلوگیری از گسیختگی زودرس و شبیه‌سازی شرایط واقعی حضور میلگرد در بتن و حذف کردن آثار فشار موضعی سطح بارگذاری‌شده از دو غلاف PVC در بالا و پایین نمونه‌ها مطابق شکل ۳ استفاده شده است.^[۲۳] طول ناحیه‌ی چسبنده $l_a = 5d$ ، ابعاد نمونه‌ی بتنی برابر $150 \times 150 \text{ (mm}^2\text{)}$ ، و طول $l_a + 35$ انتخاب شده است، که طول لوله‌ی PVC برابر ۳۵ میلی‌متر بوده است.

به‌منظور انجام آزمون‌های تجربی، از دستگاه کشش یونیورسال با ظرفیت بیشینه‌ی نیروی ۲۰ کیلو نیوتن و نرخ جابجایی ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. این نرخ جابجایی براساس استاندارد RILEM برای مواد حساس به نرخ بارگذاری مانند طناب PET و FRCC انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی نسبی (slip) در آزمایش بیرون کشیدگی، از حسگر LVDT با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. در چیدمان اخیر (شکل ۴)، LVDT به انتهای آزاد میلگرد یا طناب متصل بوده و با استفاده از یک گیره‌ی قابل تنظیم به فریم مستقل پیچ‌شده به بلوک بتنی فیکس شده است. اختلاف جابجایی‌های نسبی ثبت‌شده توسط LVDT، نشان‌دهنده‌ی لغزش بین میلگرد یا طناب و بتن است. درنهایت، آزمون‌های تجربی بر روی ۱۵ نمونه‌ی ساخته‌شده انجام شده است، که شامل ۳ تکرار برای هر سطح درصد الیاف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۲ درصد) بوده است. از داده‌های ذکرشده، منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های FRCC با درصدهای مختلف الیاف به‌دست آمده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات.

قابل توجهی در انباشت زباله‌های پلاستیکی دارد. تجزیه‌ی طولانی‌مدت مواد مذکور در طبیعت، پژوهشگران را به جستجوی راهکارهای نوین برای بازسازی و استفاده‌ی مجدد از آن‌ها ترغیب کرده است؛ که یکی از راهکارهای مذکور، بازیافت و به‌کارگیری مجدد آن‌ها در پروژه‌های عمرانی است.

در این راستا، تبدیل بطری‌های پلاستیکی به طناب‌های PET به‌عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی در سازه‌های بتن مسلح، توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است. مهم‌ترین مزیت طناب‌های PET، افزایش شکل‌پذیری سازه است، که به سازه‌ها اجازه می‌دهد تحت بارهای مختلف، تغییرشکل بیشتری را بدون شکست تجربه کنند. طناب PET استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر، دارای قطر ۱۴ میلی‌متر، مقاومت کششی حدود ۴۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته‌ی ۳ گیگاپاسکال، چگالی ۱۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و کشیدگی شکست ۳۰٪ بوده است.^[۴] در شکل ۲، نمونه‌ای از طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات مشاهده می‌شود.

۳.۲. مشخصات نمونه‌ها، آماده‌سازی نمونه‌ها، و نام‌گذاری

در پژوهش حاضر، برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی بین میلگرد و ماتریس سیمانی، آزمایش بیرون کشیدگی مرکزی ترتیب داده شده است. آزمون بیرون کشیدگی شامل خارج کردن میلگرد از داخل بتن است. نیروی بیرون کشیدگی از یک طرف و جابجایی نیز از انتهای دیگر میلگرد اندازه‌گیری شده است.

نمونه‌ها، شامل مکعب‌های 150×150 میلی‌متر با طناب یا میلگرد جای‌گذاری‌شده در مرکز بوده‌اند. آماده‌سازی، شامل اختلاط مواد، ریختن کامپوزیت سیمانی الیافی در قالب، و برهه برای تراکم، و عمل‌آوری ۲۸ روزه در شرایط استاندارد (دما ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، رطوبت ۹۵٪) بوده است. نام‌گذاری نمونه‌ها براساس درصد الیاف تا ۲ درصد به این صورت انجام شده است:

FRCC-Pullout-0.0

FRCC-Pullout-0.5

FRCC-Pullout-1.0

FRCC-Pullout-1.5

FRCC-Pullout-2.0

۴.۲. روش آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و طناب پلیمری

در پژوهش حاضر، ساخت نمونه‌های لازم جهت آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن براساس استاندارد RILEM-RC۶ انجام شده است



(الف)



(ب)

شکل ۶. (a) مسیر ترک و شکافته شدن بتن برای نمونه‌ی کامپوزیت سیمانی بدون الیاف؛ (b) خرابی از نوع بیرون کشیدگی برای نمونه‌ی کامپوزیت سیمانی دارای ۱٪ وزنی الیاف.

مختلف درصد الیاف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ درصد) ارائه شده است. نمودارهای اخیر، تأثیر استفاده از میکروالیاف فولادی در رفتار چسبندگی میلگرد با بتن را نشان می‌دهند؛ که با استفاده از آن‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله بیشینه‌ی نیروی پیوستگی، لغزش متناظر با بیشینه‌ی نیروی پیوستگی، متوسط تنش پیوستگی، و مقدار جذب انرژی یا چقرمگی به‌دست آورد.

افزایش درصد الیاف فولادی باعث بهبود چسبندگی میلگرد به ماتریس بتن می‌شود، زیرا الیاف با تقویت شبکه‌ی بتن و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها، مقاومت کششی و برشی بتن را افزایش می‌دهند. در میلگردهای فولادی آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، چفت‌وبست مکانیکی بین بتن و آج‌ها نقش مهمی در بالابردن مقاومت پیوستگی ایفا می‌کنند. مکانیزم چسبندگی برشی که از طریق درگیری آج‌ها و کلیدهای بتنی بین آن‌ها نیرو را منتقل می‌کند، بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند.

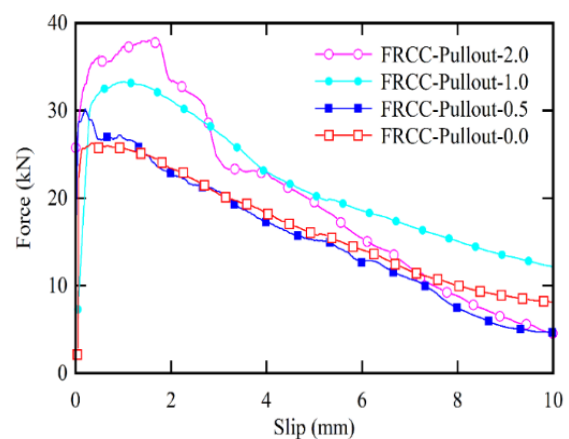
در شکل ۶، دو نوع شکست متفاوت مشاهده می‌شود:

شکل (a): نمونه‌های بدون الیاف با ترک طولی و شکافتگی بتن؛ شکل (b): نمونه‌های دارای ۱٪ وزنی الیاف با بیرون کشیدگی بدون شکافت عمده، که نشانگر کنترل ترک توسط الیاف است.

در ادامه، رفتار بیرون کشیدگی طناب PET بررسی شده است. در شکل‌های ۷ الی ۱۰، منحنی‌های نیرو-تغییرمکان و همچنین مود خرابی به‌ترتیب برای



شکل ۴. آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و نحوه‌ی قرارگیری حسگر جابجایی سنج.

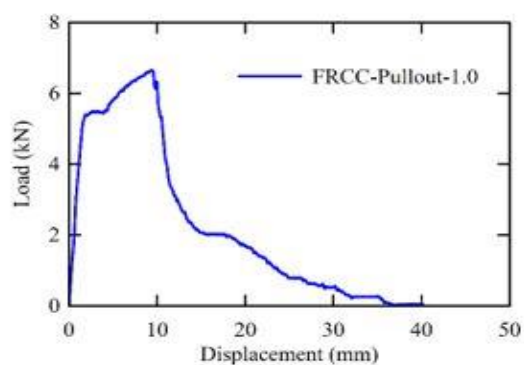


شکل ۵. تأثیر کسر حجمی الیاف فولادی در منحنی نیرو- لغزش به‌دست آمده از آزمون کشیدگی در میلگرد فولادی آجدار با قطر ۱۴ میلی‌متر.

۳. نتایج

آزمون بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات و همچنین میلگرد فولادی بر روی ۱۵ نمونه‌ی آزمایشی حاوی طناب پت به قطرهای ۱۴ و ۱۵ حالت برای میلگرد با قطر ۱۴ ساخته‌شده در سن ۲۸ روزه انجام شده است (با ۳ تکرار برای هر حالت برای اطمینان از تکرارپذیری، ضریب تغییرات کمتر از ۱۰٪). نتایج آزمایش، توسط رایانه‌ی متصل به دستگاه، به‌صورت منحنی نیرو- لغزش ترسیم شده و اطلاعاتی از قبیل: نیروی بیشینه، جابجایی متناظر با نیروی بیشینه، جابجایی نهایی میلگرد، و نیروی متناظر با آن، که در پژوهش حاضر نیروی باقیمانده نامیده شده و سایر اطلاعات مربوط به آزمایش برای هر نمونه توسط دستگاه آزمون کشش ارائه شده است.

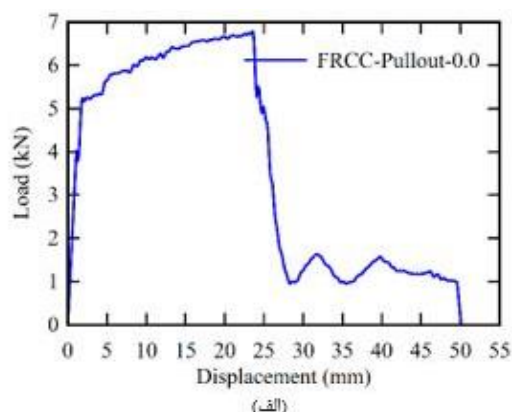
نمودارهای بار- تغییرمکان به‌دست‌آمده از آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد فولادی آجدار برای نمونه‌های بتن FRCC بدون الیاف و بتن FRCC دارای میکرو الیاف فولادی در شکل ۵ برای میلگردهای با قطر ۱۴ میلی‌متر و مقادیر



(الف)



(ب)



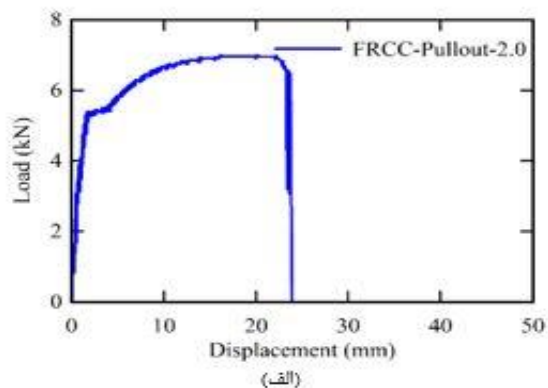
(الف)



(ب)

شکل ۷. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۰/۰ FRCC-Pullout-

شکل ۹. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۱/۰ FRCC-Pullout-

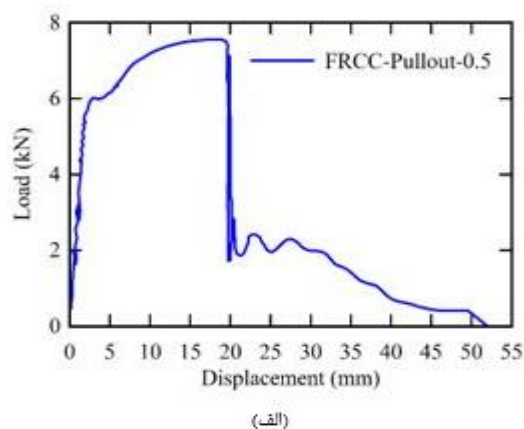


(الف)



(ب)

شکل ۱۰. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده PET از بتن نمونه‌ی ۲/۰ FRCC-Pullout



(الف)



(ب)

شکل ۸. (a) منحنی نیرو-جابجایی، و (b) مکانیزم خرابی برای بیرون کشیدگی طناب بافته‌شده از پلی‌اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۰/۵ FRCC-Pullout-

کوچک شدن سطح مقطع و افزایش بعد به دلیل سفت شدن ریزتارها در یکدیگر و درهم تنیدگی الیاف و سفت شدن طناب بوده است. بازیابی طناب PET پس از انجام آزمایش نمونه‌ی مذکور، نشان می‌دهد که نمونه از لبه‌ی بیرونی دچار پارگی شده است، که بیانگر تشکیل یک پیوستگی مناسب بین طناب با بتن و همچنین چسبندگی مناسب الیاف نیز است. بدیهی است با افزایش طول جایگذاری، میزان چسبندگی نمونه به بتن افزایش یافته است.

نتایج بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات از بتن نمونه‌ی ۱/۰- FRCC-Pullout، که در شکل ۹ ارائه شده است، نشان می‌دهد که در این حالت بیشینه‌ی نیرو برابر ۶/۷ کیلونیوتن در جابجایی ۹/۳ میلی متر است. پس از نیرو، کاهش تدریجی در نیروی تحمل شده توسط طناب مشاهده می‌شود که نشان از پاره شدن تدریجی رشته‌های طناب است. همان طور که مد خرابی بیرون کشیدگی نمونه‌ی مذکور در شکل ۹ (b) مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که پارگی طناب به صورت تدریجی و رشته به رشته است.

با مقایسه‌ی رفتار بیرون کشیدگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات با میلگرد فولادی (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود که الیاف PET انعطاف پذیری بیشتر و تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند. همچنین با مقایسه‌ی تنش چسبندگی به دست آمده با نتایج حاصل از طرح‌های ساخته شده با میلگرد فولادی و طناب PET، این نتیجه حاصل شده است که تنش‌ها در نمونه‌ی PET کاهش یافته‌اند، که به دلیل نیروی کمتر طناب PET نسبت به میلگرد فولادی نیز است.

همچنین، نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که میزان نیروی بیشینه در طناب PET حدود ۴ برابر کمتر از میلگرد فولادی و مقدار جابجایی در نمونه‌ی PET بیش از ۴۰ برابر بیشتر از نمونه‌ی فولادی بوده است. همچنین الیاف PET انعطاف پذیری بیشتر و تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند و با مقایسه‌ی تنش چسبندگی به دست آمده از روابط نظری با نتایج حاصل از طرح‌های ساخته شده با میلگرد فولادی و طناب PET، این نتیجه به دست آمده است که تنش‌ها در نمونه‌ی PET کاهش یافته‌اند.

۴. نتیجه گیری

۱- بیشینه‌ی نیروی بیرون کشیدگی در نمونه‌های دارای میلگرد فولادی به طور میانگین حدود ۳۰ کیلونیوتن و در نمونه‌های دارای طناب PET حدود ۷/۶ کیلونیوتن بوده است، که بیانگر کاهش قابل ملاحظه‌ای (حدود ۷۵٪) در مقاومت چسبندگی طناب PET نسبت به میلگرد فولادی است.

۲- مقدار جابجایی متناظر با نیروی پیک در طناب PET به طور میانگین بیش از ۲۳ میلی متر و در میلگرد فولادی کمتر از ۱ میلی متر گزارش شده است، که نمایانگر افزایش قابل توجه در شکل پذیری طناب PET است.

۳- بررسی نمودارهای نیرو- جابجایی نشان داد که رفتار چسبندگی طناب PET متشکل از سه ناحیه‌ی مشخص (سختی اولیه‌ی خطی، افزایش غیر خطی تا پیک، و افت نیرو پس از گسیختگی) است. برخلاف میلگردهای فولادی، که عمدتاً با لغزش و افت پیوستگی از ماتریس جدا شده‌اند، طناب‌های PET در هیچ یک از نمونه‌ها از بستر سیمانی خارج نشده و شکست همگی به صورت گسیختگی داخلی الیاف و بافت طناب رخ داده است؛ که نشانگر یک پیوستگی مکانیکی و اصطکاکی مؤثر میان رشته‌های طناب و خمیر سیمان است.

۴- از سوی دیگر، نقش الیاف فولادی در بهبود عملکرد نمونه‌ها به ویژه در حالت

بتن معمولی و بتن تقویت شده با ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲ درصد الیاف فولادی مشاهده می‌شود. آزمون بیرون کشیدگی تا جابجایی حدود ۵۵ میلی متر میلگرد ادامه یافته است. با توجه به شکل عمومی منحنی، منحنی نیرو- جابجایی را می‌توان به سه ناحیه‌ی متمایز تقسیم بندی کرد:

ناحیه‌ی اول به صورت خطی و با سختی نسبتاً بالاست، که نشان می‌دهد جابجایی اولیه، مستلزم اعمال تغییرات نیروی بیشتری است. ناحیه‌ی دوم، محدوده‌ی قبل از رسیدن به نیروی اوج است، که پس از مرحله‌ی اول و به صورت تغییرات غیر خطی تا رسیدن به نیروی اوج ادامه دارد. ناحیه‌ی سوم، مربوط به بعد از نیروی پیک است، که در آن با افزایش جابجایی، مقدار نیرو کاهش می‌یابد.

در بررسی رفتار پیوستگی بین بتن FRCC و طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات به قطر ۱۴ میلی متر مشاهده شده است که طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات با طول درگیری ۸ سانتی متر با بتن FRCC، در هیچ یک از نمونه‌های بیرون کشیدگی از داخل بتن خارج نشده و در همه‌ی موارد، طناب دچار گسیختگی شده است. در هر چهار نمونه‌ی موجود با افزایش بارگذاری، جابجایی نیز افزایش یافته است؛ ولی نیروی مذکور نتوانسته است باعث استهلاک پیوستگی بتن و طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات شود و در نتیجه به جای لغزش و خروج طناب از داخل نمونه‌ی مکعبی، افزایش نیرو باعث گسیختگی طناب بافته شده از پلی اتیلن ترفتالات شده است.

طناب PET به عنوان یک جایگزین برای میلگرد فولادی، رفتار متفاوتی در چسبندگی و مقاومت کششی نشان داده است. طناب PET به دلیل انعطاف پذیری بیشتر و مقاومت کششی پایین تر نسبت به میلگرد فولادی، در مراحل اولیه‌ی بارگذاری، چسبندگی خوبی به ماتریس بتن ایجاد کرده است؛ اما در مراحل بارگذاری بالاتر، دچار گسیختگی سریع تر شده است. مشاهده‌های انجام شده به دلیل مقاومت کمتر طناب PET در برابر کشیدگی‌های زیاد و ناتوانی در تحمل بارهای بالاتر در مقایسه با میلگرد فولادی است. نمودار بار- تغییر مکان آزمایش بیرون کشیدگی طناب پلاستیکی از بتن بدون الیاف در شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشینه‌ی بار تحمل شده برابر با ۶/۷ کیلونیوتن در تغییر مکان حدود ۲۳/۵ میلی متر بوده است. پس از رسیدن به نقطه‌ی اوج مذکور، بار به سرعت کاهش یافته و در حدود ۳۰ میلی متر تغییر مکان به مقدار ۱ کیلونیوتن رسیده است، که نشان دهنده‌ی شکست چسبندگی و اتمام پارگی طناب در بتن است.

در ادامه، نمودار، نوسان‌های کوچکی داشته است، که ناشی از گسیختگی تدریجی رشته‌های باقیمانده‌ی طناب بوده و در نهایت، در تغییر مکان حدود ۵۰ میلی متر بار به صفر کاهش یافته است، که نشان دهنده‌ی شکست کامل و پارگی طناب است. نتایج اخیر حاکی از مقاومت چسبندگی مطلوب اولیه‌ی طناب به بتن است، اما کاهش سریع بار پس از اوج، نشان دهنده‌ی گسیختگی سریع پس از لغزش اولیه است.

با توجه به اینکه طناب در نمونه‌ی شاهد دچار پارگی شده است، بنابراین در نمونه‌های دیگر نیز به طور حتم مود خرابی به صورت گسیختگی طناب خواهد بود، که نتایج تجربی نیز نتیجه‌ی مذکور را تأیید می‌کنند. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در نمونه با ۵/۰٪ الیاف فولادی نیرو تا مقدار ۶/۱ کیلونیوتن در جابجایی ۲/۴۰ میلی متر افزایش و سپس تا حدودی ثابت مانده و مجدداً افزایش یافته است. کاهش اولیه مربوط به کشیده شدن بافت طناب و

دارد، از جمله سازه‌های مقاوم در برابر زلزله یا نواحی غیرسازه‌ای با عملکرد شکل‌پذیر.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از طناب‌های بازیافتی در بتن FRCC، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، پتانسیل مکانیکی قابل‌قبولی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه‌ی مکمل یا جایگزین در طراحی‌های خاص مدنظر قرار گیرد. بررسی بیشتر در خصوص بهینه‌سازی سطح تماس، نحوه‌ی درهم‌تنیدگی، و هندسه‌ی سطحی طناب می‌تواند به افزایش عملکرد پیوستگی و کاربرد عملی این مصالح نوین منجر شود.

طناب PET، کاملاً مشهود است. افزایش درصد الیاف فولادی موجب افزایش نیروی پیک و پایداری منحنی نیرو-جابجایی در ناحیه‌ی پس از پیک شده است. در نمونه دارای ۱٪ وزنی الیاف، نیروی پیک طناب PET به مقدار ۷/۶ کیلونیوتن در جابجایی ۹/۳ میلی‌متر رسیده است، که نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف، افزایش در مقاومت و پایداری شکست را نشان می‌دهد.

۵- تحلیل نهایی داده‌ها نشان می‌دهد که اگرچه مقاومت نهایی طناب PET کمتر از میلگرد فولادی است، اما قابلیت جذب انرژی بیشتر (چقرمگی)، شکل‌پذیری بالا، و رفتار تدریجی در شکست، می‌تواند آن را به گزینه‌ای مناسب برای سازه‌هایی تبدیل کند که در آن‌ها انعطاف‌پذیری و جذب انرژی اهمیت

References- منابع

1. da Silva Neto, J. T., Soares Junior, P. R. R., Reis, E. D., Maciel, P. S. S., Gomes, P. C. C., Gouveia, A. M. C. and Bezerra, A. C. S., 2025. Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives on key properties for high-performance design. *Discover Civil Engineering*, 2(1), pp.1-20. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00209-9>
2. Ahmed, S. and Ali, M., 2025. Investigation on pullout and shear behavior of recycled plastic rebar-concrete connection for mortar-free housing. *Journal of Building Engineering*, 114, 114266. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114266>.
3. Overhage, V., Heins, K., Kimm, M., Ryu, G., You, Y. J., Kim, H.-Y. and Gries, T., 2024. Investigation of pull-out and mechanical performance of fibre reinforced concrete with recycled carbon fibres. *Materials and Structures*, 57, 140. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02453-4>.
4. Jouyandeh, R. T., Hemmati, A. and Mortezaei, A., 2023. Using woven recycled plastic fibers in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 404, 133262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133262>.
5. Bai, Y.-L., Tang, Z.-K. and Mei, S.-J., 2024. Experimental study on shear performance of PET FRP-strengthened RC beams without stirrups. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03272. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03272>.
6. Zeng, J.-J., Sun, H.-Q., Xia, J.-R., Zhao, S., Feng, Z., Zhao, B. and Zhou, J.-K., 2025. Bond behavior between concrete and thermoplastic GFRP bars with novel surface features. *Engineering Structures*, 343, 121161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121161>
7. Makul, N., 2021. *Principles of cement and concrete composites*. Springer Nature, Cham, Switzerland.
8. Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H. and Bilir, T., 2021. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, pp.34-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>.
9. Yuan, Z. and Jia, Y., 2021. Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 266, pp.12-35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>.
10. Takasago, S., Kanakubo, T., Kobayashi, H. and Sasaki, H., 2023. Bond and cracking characteristics of PVA-fiber-reinforced cementitious composite reinforced with braided AFRP bars. *Fibers*, 11(12), pp.107. <https://doi.org/10.3390/fib11120107>
11. Ashrafiyan, A., Berenjian, J. and Asghari Tilaki, F., 2020. Optimization of mixture proportions of self-compacted fiber reinforced concrete incorporating polypropylene using genetic and crow search algorithms. *Modares Civil Engineering Journal*, 20(3), pp.1-12 [In Persian]. <https://20.1001.1.24766763.1399.20.3.11.1>
12. Gholhaki, M., Pachideh, G. and Rezayfar, O., 2017. An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), pp.167-179 [In Persian]. <https://doi.org/10.22065/jsce.2017.77392.1072>
13. Esmaeili, J., Sharifi, I., Andalibi, K. and Kasaei, J., 2017. Effect of different matrix compositions and micro steel fibers on tensile behavior of textile

- reinforced concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 246, 012031.
[doi:10.1088/1757-899X/246/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/246/1/012031)
14. Akbarifar, R., Mortezaei, A. and Babaei, A., 2024. Meso-scale study of bond behavior between ribbed steel rebar and fiber-reinforced cementitious composite considering rebar rib geometry. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*, 68(4), pp.1350-1366.
<https://doi.org/10.3311/PPci.28772>
15. Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asghharian Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., 2019. Increasing the efficiency of carbon fiber bundles in reinforcing fine grained concrete: An experimental study of flexural bearing capacity. *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(2), pp.310-318 [In Persian].
[10.22068/jstc.2018.85673.1441](https://doi.org/10.22068/jstc.2018.85673.1441)
16. Hajforoush, M., Kheyroddin, A. and Rezaifar, O., 2020. The effect of magnetic field on bond strength between reinforcing steel bar and steel fiber reinforced concrete by means of pull-out test. *Concrete Research*, 13(4), pp.5-16 [In Persian].
<https://doi.org/10.22124/jcr.2020.17734.1448>
17. Wang, Y., Li, Z., Zhang, C., Wang, X., Li, J., Liang, Y. and Chu, S., 2021. Bond behavior of BFRP bars with basalt-fiber reinforced cement-based composite materials. *Structural Concrete*, 22(1), pp.154-167.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900548>
18. Lin, A. and Ostertag, C. P., 2021. Interaction between high performance fiber reinforced cement-based composites and steel reinforcement. *Engineering Structures*, 247, pp.113-123.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113173>
19. Zhou, Z. and Qiao, P., 2018. Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 182, pp.406-417.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.113>
20. Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M. and de Brito, J., 2021. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Building Engineering*, 33, pp.34-57.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101592>
21. Chao, S.-H., Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J., 2006. Bond behavior of strand embedded in fiber reinforced cementitious composites. *Strain*, 50(2), pp.56-71.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00562.x>
22. RILEM-CEB-FIP-RC6, 1983. Recommendation RC 6: Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. Georgi Publishing Company, Paris, France.
23. Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., Cunha, J. C. d., Rodrigues, C. S. and Maia, N. S., 2017. Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(11), pp.1932-1951.
<https://doi.org/10.1590/1679-78254116>



Research Note

Study of Unsaturated Behavior of Stabilized Gypsum Sand Soil from Iraq with Cement and CKD

Ahmed Kamil Abraheim Alkinani¹, Ali Akhtarpour^{1*}, Mustafa M. Abdalhusein²

¹Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

²Department of Civil Engineering, University of Kufa, Al-Najaf, Iraq.

* corresponding author: (akhtarpour@um.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 20 October 2025

Revised: 6 December 2025

Accepted: 10 February 2026

Keywords:

SWRC (Soil Water Retention Curve),
Iraqi gypsum sand,
cementitious additives,
Cement Kiln Dust (CKD),
unsaturated soil mechanics.

Abstract

This research explores the compaction behaviour of Iraqi gypsum-sand soils stabilized with cement and cement kiln dust (CKD) at varying additive percentages (1%, 3%, 5%, and 7%) under different compaction levels (90% and 95%). Laboratory experiments were conducted using a modified oedometer to obtain Soil Water Retention Curves (SWRC) and assess the impact of matric suction on soil compressibility and water retention. The study reveals that both cement (3%) and CKD (5%) significantly improve the water retention capacity of the soil, reduce hysteresis effects, and enhance its resistance to compaction and swelling. These additives positively influence the soil's water-holding capacity, thereby improving its performance in both saturated and unsaturated conditions. The Van Genuchten model was effectively used to describe the SWRC, demonstrating that cement outperforms CKD in terms of hydraulic behaviour due to the formation of stronger cementitious bonds, which contribute to better soil structure and stability. Additionally, the improvement analysis highlights that stabilization at higher compaction levels (95%) and under conditions of increased matric suction results in greater effectiveness, with cement-treated soils showing the most significant performance improvement. This is particularly critical for applications in environments where soil behaviour under varying moisture content is a key factor. Furthermore, Scanning Electron Microscope (SEM) analysis confirmed the microstructural enhancements caused by cement hydration and the pozzolanic reactions of CKD, which help form a more stable and cohesive structure at the particle level. The results showed that adding 3% cement and 5% CKD reduced hysteresis and improved the SWRC curve, especially at 95% density. Also, at 95% density and 60 kPa suction, cement reached an improvement factor of 83% and CKD reached 33%. The findings underline the importance of both the type of stabilizing agent and the compaction level in improving the hydraulic properties and long-term stability of Iraqi gypsum-rich sandy soils. This research emphasizes the potential of using cement and CKD for soil stabilization, particularly in regions where moisture variability and soil behaviour are significant challenges. These insights contribute to the development of more durable and sustainable soil stabilization techniques in geotechnical engineering.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Kamil Abraheim Alkinani, A., Akhtarpour, A. and M. Abdalhusein, M. 2026. Study of unsaturated behavior of stabilized gypsum sand soil from Iraq with cement and CKD, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 127-141
<https://doi.org/10.24200/ij30.2026.68033.3473>



مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده

احمد کامل ابراهیم الکنانی^۱، علی اخترپور^{۱*} و مصطفی م. عبدالحسین^۲

^۱گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

^۲گروه مهندسی عمران، دانشگاه کوفه، نجف، عراق.

*نویسنده مسئول (akhtarpour@um.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و گرد کوره‌ی سیمان (CKD) تحت تراکم‌های ۹۰ و ۹۵ درصد پرداخته شده است. آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از تحکیم غیراشباع برای به‌دست‌آوردن منحنی‌های SWRC و ارزیابی نقش مکش در تراکم‌پذیری و نگهداری آب خاک انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که هر دو عامل سیمان و CKD ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش و آثار هیستریزس را کاهش می‌دهند و مقاومت آن در برابر تراکم و تورم را بهبود می‌بخشند. مدل وان‌گنوختن، تطبیق خوبی با منحنی‌های SWRC قبل و پس از تثبیت با سیمان و CKD نشان داده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ CKD به ترتیب موجب کاهش هیستریزس و بهبود منحنی SWRC به‌ویژه در تراکم ۹۵٪ شده است. همچنین، در تراکم ۹۵٪ و مکش ۶۰ کیلوپاسکال، سیمان به ضریب بهبود ۸۳٪ و CKD به ۳۳٪ رسیده است. تجزیه و تحلیل SEM بهبود میکروساختاری ناشی از هیدراسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی CKD را تأیید کرده است. یافته‌های اخیر بر اهمیت تثبیت‌کننده‌ها در بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی و پایداری بلندمدت خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق در محیط‌های مرطوب تأکید می‌کنند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ واژگان کلیدی: تثبیت خاک گچی، منحنی مشخصه‌ی SWRC، ماسه‌ی گچ‌دار عراق، افزودنی‌های سیمانی، گرد کوره‌ی سیمان (CKD)، مکانیک خاک غیراشباع.

۱. مقدمه

خاک‌های غنی از گچ در مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج هستند و نوسان‌های رطوبتی در مناطق مذکور، مشکلات ژئوتکنیکی، مانند: از دست‌دادن چسبندگی، نشست بیش از حد، و ناپایداری سازه‌ها ایجاد می‌کند. [۱-۳] خاک‌های ذکرشده هنگام خیس‌شدن رفتاری فروریخته دارند، که آن‌ها را برای پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها و بنادر مشکل‌ساز می‌کند. [۴] انحلال گچ باعث تغییرات حجمی ناگهانی و تغییر شکل‌های شدید می‌شود، که خطرهایی برای سازه‌ها ایجاد می‌کند.

تثبیت خاک به‌عنوان راه‌حلی مؤثر شناخته می‌شود و سیمان، رایج‌ترین ماده‌ی افزودنی است. [۵-۹] با این حال، هزینه‌ی بالای سیمان، پژوهشگران را به جستجوی جایگزین‌های اقتصادی‌تر، مانند غبار کوره‌ی سیمان (CKD) سوق داده است؛ که به‌دلیل وجود آهک زیاد، می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد، هر چند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است. [۱۰-۱۲]

در سال‌های اخیر، استفاده از سیمان و CKD به‌عنوان افزودنی‌های تثبیت‌کننده‌ی خاک، به‌ویژه خاک‌های غیراشباع، توجه بسیاری از پژوهشگران

و مهندسان را به خود جلب کرده است. ترکیب دو ماده‌ی اخیر می‌تواند آثار چشمگیری در ویژگی‌های مکانیکی خاک داشته باشد. [۱۳ و ۱۴] مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن سیمان و CKD به خاک‌های رسی و غیراشباع، به‌ویژه در شرایط محیطی خشک، منجر به افزایش قابل‌توجهی در مقاومت فشاری بدون محصوریت (UCS) و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. [۱۵-۱۸] تغییرات اخیر به‌ویژه در افزایش پایداری خاک در برابر بارهای ترافیکی و چرخه‌های تر و خشک اهمیت زیادی دارند. [۱۹-۲۴] یکی از نتایج مهم پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سیمان به‌تنهایی می‌تواند موجب تشکیل هیدرات‌های سیمانی شود، [۲۵] که ساختار خاک را تقویت می‌کنند؛ در حالی که CKD نیز به‌واسطه‌ی ویژگی‌های پوزولانی خود، در واکنش با سیلیس و آلومینوم خاک، ترکیب‌های سیمانی جدیدی تشکیل می‌دهد، که علاوه‌بر افزایش مقاومت خاک، آن را در برابر تورم و انقباض مقاوم‌تر می‌سازد. [۲۶-۲۹]

نتایج مطالعات نشان می‌دهند که تأثیر مثبت ترکیب سیمان و CKD در بهبود ویژگی‌های فنی و زیست‌محیطی خاک‌های تثبیت‌شده است. [۳۰-۳۴] بررسی‌ها نشان داده‌اند که در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، علاوه‌بر افزایش

استناد به این مقاله:

کامل ابراهیم الکنانی، احمد، اخترپور، علی و م. عبدالحسین، مصطفی، ۱۴۰۵. مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص. ۱۲۷-۱۴۱. <https://doi.org/10.24200/j30.2026.68033.3473>



مکانیکی دارند. همچنین، چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تخمین مکش بافتی در خاک‌های غیراشباع ارائه شده‌اند، که امکان برآورد غیرمستقیم مکش را از طریق داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی فراهم می‌سازند.^[۴۷]

از سوی دیگر، مدل‌های مبتنی بر منطق فازی نیز در مسائل ژئوتکنیکی و مهندسی روسازی برای پیش‌بینی عمق آلودگی در خاک‌های ماسه‌ای و ارزیابی عملکرد مدول ارتجاعی مصالح آسفالتی استفاده شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت رویکردهای ذکرشده در مدیریت عدم قطعیت و پیچیدگی رفتار مواد ژئوتکنیکی است. در حوزه‌ی بهسازی خاک، پژوهش‌هایی نیز به استفاده از افزودنی‌های نوین، نظیر الیاف بازیافتی و نانوذرات برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها بر اهمیت ترکیب اصلاح فیزیکی- شیمیایی و مدل‌سازی پیشرفته تأکید داشته است. در ارتباط مستقیم با خاک‌های گچ‌دار، برخی مطالعات به بررسی رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و بهبود آن‌ها با استفاده از CKD پرداخته و نقش ابزارهای آزمایشگاهی اصلاح‌شده در تحلیل خاک‌های غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار را نشان داده‌اند. همچنین، پژوهش‌هایی درباره اثر pH و کانی‌شناسی گچ در فرایندهای شیمیایی و زیست‌محیطی انجام شده است، که بر حساسیت بالای خاک‌های گچ‌دار نسبت به شرایط محیطی دلالت دارند.^[۴۸-۵۰]

با وجود پیشرفت‌های اخیر، اغلب مطالعات انجام‌شده یا بر مدل‌سازی داده‌محور بدون استخراج شاخص‌های هیدرومکانیکی آزمایشگاهی تمرکز داشته‌اند، یا به بررسی رفتار آزمایشگاهی بدون اتصال نظام‌مند به چارچوب‌های مدل‌سازی هوشمند بسنده کرده‌اند. لذا، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی دقیق، چندسطحی، و مبتنی بر مکش کنترل‌شده برای پشتیبانی و توسعه‌ی مدل‌های جدید همچنان احساس می‌شود. پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک مجموعه داده‌های هیدرومکانیکی جامع، شامل: منحنی‌های SWRC، هیستریزیس، شاخص‌های تراکم‌پذیری، و ضریب بهبود تحت اثر هم‌زمان تراکم و مکش می‌تواند به‌عنوان بستر تجربی قابل اتکا برای توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های پیشرفته در مطالعات آبی استفاده شود.^[۴۴-۵۰]

اهمیت پژوهش حاضر در بررسی تأثیر تثبیت خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD، به‌ویژه در شرایط غیراشباع، قابل توجه است. خاک‌های گچی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عراق، که تاکنون مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است، با مشکلاتی همچون کاهش ظرفیت نگهداری آب، حساسیت بالا به تغییرات رطوبتی، و آسیب‌پذیری در برابر تورم، و انقباض مواجه هستند. تثبیت خاک‌های مذکور با سیمان و CKD می‌تواند به‌طور چشمگیری ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی آن‌ها را بهبود بخشد و در نتیجه، پایداری بلندمدت سازه‌ها و زیرساخت‌ها را افزایش دهد. از این رو، پژوهش حاضر به‌عنوان یک گام اساسی در زمینه‌ی بهبود رفتار خاک‌های غیراشباع تثبیت‌شده با افزودنی‌های سیمانی، به‌ویژه در مناطق با شرایط اقلیمی مشابه، اهمیت زیادی دارد.

با وجود پژوهش‌های انجام‌شده درباره‌ی رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و نیز تلاش برای بهبود آن‌ها با افزودنی‌های سیمانی، هنوز یک چالش کلیدی در ادبیات موضوع باقی است: ابهام در تمایز روش‌های ارزیابی هیدرومکانیکی و محدودبودن دامنه‌ی ارزیابی‌ها به مجموعه‌ای از شرایط آزمایشگاهی خاص.

برخی مطالعات پیشین، که به بهبود خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار در شرایط غیراشباع با استفاده از CKD پرداخته‌اند (از جمله پژوهش‌هایی با عناوینی

مقاومت‌های مکانیکی، تغییرات قابل‌توجهی در کاهش میزان تورم و بهبود ویژگی‌های انقباضی و کششی خاک‌ها مشاهده می‌شود. به‌ویژه در پروژه‌های جاده‌سازی و ساخت‌وسازهای بزرگ، ترکیب اخیر باعث کاهش هزینه‌های پروژه و افزایش دوام ساختارهای خاکی می‌شود. علاوه بر مزایای فنی، استفاده از CKD، که یک محصول جانبی صنعت سیمان است، به‌عنوان یک ماده‌ی تثبیت‌کننده می‌تواند آثار زیست‌محیطی مثبتی نیز داشته باشد.^[۳۵] استفاده از این ماده‌ی زائد به‌جای دفع آن به محیط‌زیست، منجر به کاهش آلودگی و بهره‌برداری بهینه از منابع صنعتی می‌شود. به‌طور کلی، روش اخیر می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی با کارایی بالا مطرح شود، که هم از نظر فنی و هم زیست‌محیطی و اقتصادی مزایای زیادی دارد.^[۳۶]

و^[۳۷]

فراتر از نقش افزودنی‌ها، تراکم و مکش بافتی از عوامل کلیدی در رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع به‌شمار می‌روند. تراکم با کاهش فضای خالی باعث افزایش سختی خاک می‌شود، در حالی که مکش بافتی ظرفیت نگهداری آب، تراکم‌پذیری، و مقاومت برشی خاک را در شرایط غیراشباع کنترل می‌کند.^[۳۸] منحنی مشخصه‌ی رطوبتی (SWRC)، ابزاری بنیادی برای توصیف روابط ذکرشده است که ارتباط بین مکش بافتی و میزان آب موجود در خاک را برقرار می‌کند و امکان ارزیابی کمی رفتار خاک در شرایط نوسان‌های رطوبتی را فراهم می‌آورد.^[۳۹]

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تثبیت خاک باعث تغییر در منحنی SWRC می‌شود، ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد، و آثار پسماند (هیستریزیس) را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه دوام خاک‌های گچی در کاربردهای مهندسی بهبود می‌یابد.^[۴۰-۴۳] با وجود این، همچنان نیاز به پژوهشی جامع احساس می‌شود، که آثار سیمان، CKD، تراکم، و مکش بافتی را در رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای- گچی ارزیابی کند.

برای توسعه‌ی مدل‌های جدید در ارزیابی رفتار غیراشباع خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، استفاده از روش‌های پیشرفته‌ی هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق و مدل‌های مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد می‌شود؛ که به‌ویژه در تحلیل ویژگی‌های پیچیده‌ی خاک‌های غیراشباع در شرایط مختلف مکش بافتی و تثبیت می‌توانند دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. روش‌های مذکور قادرند روابط غیرخطی پیچیده میان ویژگی‌های خاک و شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کنند و به این ترتیب، ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار خاک تحت شرایط مختلف فراهم آورند. استفاده از مدل‌های پیشرفته‌ی مذکور می‌تواند به‌ویژه در ارزیابی عملکرد بلندمدت خاک‌های تثبیت‌شده و بهبود شرایط فنی آن‌ها در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی مفید واقع شود. بنابراین، مطالعات آبی باید بر روی استفاده از روش‌های اخیر برای گسترش مدل‌های موجود و ارزیابی دقیق‌تر رفتار خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD تمرکز داشته باشند.^[۴۴-۴۶]

در سال‌های اخیر، علاوه بر رویکردهای آزمایشگاهی کلاسیک، استفاده از مدل‌های داده‌محور و هوشمند برای تحلیل رفتار خاک‌های غیراشباع و پیش‌بینی پاسخ‌های ژئوتکنیکی گسترش یافته است. برخی مطالعات با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق (DNN) به پیش‌بینی نشست خاک‌های گچ‌دار تحت بارگذاری پرداخته و نشان داده‌اند که مدل‌های مذکور توانایی مناسبی در بازتولید روابط غیرخطی پیچیده میان پارامترهای خاک و پاسخ

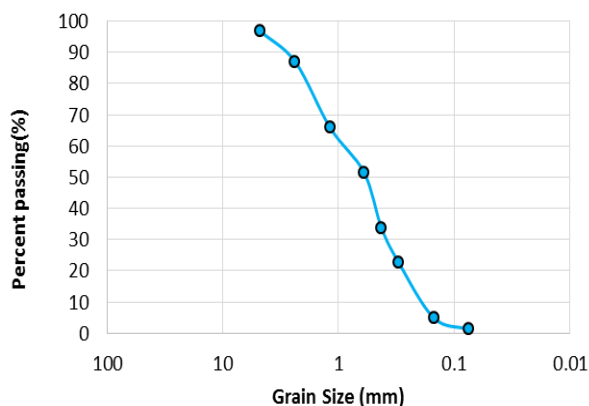
ویژگی‌های خاصی دارند، که به‌طور قابل‌توجهی در رفتار آن‌ها در پروژه‌های عمرانی تأثیر می‌گذارد. خاک‌های رسی گچ‌دار تقریباً ۱۵ تا ۳۰ درصد از مساحت خاک‌های عراق را تشکیل می‌دهند و به‌طور عمده از ترکیب ذرات رسی و بلورهای گچ (کلسیم سولفات) به‌وجود آمده‌اند. گچ موجود در خاک‌های مذکور باعث کاهش خاصیت نفوذپذیری و تراکم بالا می‌شود. درصد بالای گچ، که ممکن است در برخی نواحی تا ۳۰٪ بیشتر برسد، ساختار خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند به مشکلاتی نظیر کاهش ظرفیت باربری خاک و پدیده‌های انقباض و انبساط دما در هنگام تغییرات رطوبت منجر شود.

ساختار خاک‌های رسی گچ‌دار معمولاً به‌صورت دانه‌های رسی ریز و بلورهای گچ به‌صورت منشوری یا ورقه‌ای است که در برخی موارد به‌صورت لایه‌های ضخیم در سطح خاک ظاهر می‌شود. بلورهای گچی معمولاً در محیط‌های خشک و با تبخیر بالا به‌وجود می‌آیند و می‌توانند تأثیر زیادی در خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها داشته باشند. ویژگی‌های خاک‌های رسی گچ‌دار عراق، شامل افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری، و حساسیت به تغییرات رطوبتی است، که موجب مشکلاتی در تثبیت و پایداری سازه‌های عمرانی می‌شود.

خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر از منطقه‌ی بندر ام‌القصر در جنوب عراق برداشت شده است؛ منطقه‌ای که با خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار شناخته می‌شود. براساس سیستم یکپارچه‌ی طبقه‌بندی خاک‌ها (USCS)، خاک مذکور در گروه SP (ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده) قرار دارد. در جدول ۱، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه شده است. همچنین، در شکل ۱، منحنی توزیع اندازه‌ی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی خاک.

Test	Properties	unit	Value
Proctor test	Dry density	gr/cm ³	1.83
	Wet density	gr/cm ³	2.05
	Optimal water content	%	12
Field density	Dry density	gr/cm ³	1.817
	Wet density	gr/cm ³	1.86
Contaminant	SO ₃	%	3.78
	CaSO ₄ 2H ₂ O	%	8.127
Physical properties	G _s		2.45



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک.

مشابه «Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and The Its Improvement with CKD Material»
Improvement of Gypsum Sand Soils in Unsaturated Conditions Using a Modified Oedometer Device»
کاربرد دستگاه اصلاح‌شده در یک چارچوب ارزیابی محدود تمرکز داشته و در بسیاری موارد، مقایسه‌ی جامع هم‌زمان اثر سطوح تراکم و مکش بافتی در پاسخ‌های هیدرولیکی- مکانیکی خاک (مانند تغییرات منحنی نگهداری آب، هیستریزیس، و شاخص‌های تراکم‌پذیری/ تورم) به‌صورت یکپارچه و کمی ارائه نشده است.

نوآوری روش‌شناختی پژوهش حاضر در این است که ارزیابی رفتار غیراشباع و بهبود خاک ماسه‌ای گچ‌دار عراق را از حالت تک‌بعدی خارج کرده و آن را در یک چارچوب هیدرومکانیکی یکپارچه توسعه داده است؛ به‌گونه‌ای که:

- ۱) اثر تثبیت‌کننده‌ها نه فقط با CKD، بلکه با مقایسه‌ی مستقیم سیمان و CKD در شرایط یکسان آزمایشگاهی بررسی شده است،
- ۲) نقش دو سطح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) به‌عنوان یک متغیر تعیین‌کننده در کارایی تثبیت به‌صورت صریح وارد تحلیل شده است،
- ۳) پاسخ خاک تحت چند سطح مکش کنترل‌شده تحلیل شده است، تا وابستگی عملکرد تثبیت به شرایط غیراشباع به‌صورت کمی آشکار شود.

در این راستا، علاوه بر استخراج منحنی‌های SWRC در مسیرهای خشک‌اندازی و ترشوندگی و تحلیل هیستریزیس، شاخص‌های Cc و Cs و نیز ضریب بهبود (I) به‌عنوان معیار کمی اثربخشی تثبیت تحت مکش‌های مختلف ارائه و نتایج ماکروسکوپی با شواهد ریزساختاری SEM پشتیبانی شده است.

بنابراین، مطالعه‌ی حاضر، ضمن هم‌راستابودن با مسیر کلی برخی مطالعات پیشین در استفاده از ابزار آدومتر اصلاح‌شده برای خاک‌های گچ‌دار غیراشباع، چارچوب ارزیابی را توسعه داده و با واردکردن هم‌زمان متغیرهای کلیدی (تراکم- مکش- نوع افزودنی) و ارائه‌ی شاخص‌های کمی مکمل، تمایز روشن و قابل دفاعی در روش ارزیابی و تبیین نوآوری نسبت به مطالعات پیشین فراهم کرده است.

لذا، هدف پژوهش حاضر، ارائه‌ی یک چارچوب ارزیابی توسعه‌یافته و کمی برای رفتار غیراشباع خاک ماسه‌ای گچ‌دار تثبیت‌شده با سیمان و CKD، تحت اثر هم‌زمان تراکم و مکش کنترل‌شده و تبیین تمایز روش‌شناختی آن نسبت به مطالعات پیشین بوده است.

ساختار پژوهش حاضر شامل انجام آزمایش‌های تحکیم غیراشباع برای بررسی رفتار خاک تحت شرایط مکش بافتی مختلف بوده است؛ که به‌منظور ارزیابی تأثیر افزودنی‌های سیمان و CKD در ویژگی‌های خاک، مانند ظرفیت نگهداری آب، تغییرات ساختاری و مکانیکی، و ضریب بهبود خاک انجام شده‌اند. علاوه بر این، مدل‌سازی منحنی‌های SWRC و تحلیل میکروسکوپی (SEM) ساختار خاک تحت تثبیت با سیمان و CKD، به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک، بخش دیگری از پژوهش حاضر را تشکیل داده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. ویژگی‌های خاک

خاک‌های رسی گچ‌دار عراق، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور عراق،

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD).

Chemical Content	Cement	CKD
CaO	60-67	40-50
SiO ₂	17-25	10-20
Al ₂ O ₃	3-8	2-6
Fe ₂ O ₃	0.5-6	1-4
MgO	0.5-4	1-4
SO ₃	≤ 3	30.1
LOI	≤ 5	10-30
Na ₂ O	≤ 1	<1
K ₂ O	≤ 1	<1
Cl ⁻	-	<1

جدول ۳. افزودنی‌های نمونه و طرح اختلاط استفاده‌شده در پژوهش حاضر.

Sample	compaction	Addition	Additive
PS+1%C		1%	
PS+3%C		3%	Cement
PS+5%C	90%	5%	
PS+3%CKD	95%	3%	
PS+5%CKD		5%	CKD
PS+7%CKD		7%	

شرایط مشابه تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفته‌اند، تا آثار مواد تثبیت‌کننده در شرایط مختلف مکش و تراکم ارزیابی شود.

۴.۲. آزمایش تحکیم غیراشباع

در برخی مطالعات پیشین، از دستگاه آدومتر اصلاح‌شده برای بررسی رفتار خاک‌های گچ‌دار در شرایط غیراشباع و نیز ارزیابی بهبود با CKD استفاده شده است. با این حال، کاربرد دستگاه مذکور در پژوهش حاضر به‌صورت هدفمند توسعه یافته است، تا امکان یک ارزیابی هیدرومکانیکی جامع فراهم شود؛ بدین معنا که آزمایش‌ها به‌طور هم‌زمان برای دو سطح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) و تحت سطوح مکش کنترل‌شده اجرا شده است. همچنین، علاوه بر استخراج SWRC در دو مسیر ترشوندگی و خشکاندازی، شاخص‌های مکانیکی شامل Cc و Cs و معیار کمی ضریب بهبود (I) نیز به‌منظور سنجش اثربخشی تثبیت در شرایط غیراشباع گزارش شده‌اند. توسعه‌ی مذکور در پروتکل ارزیابی، امکان مقایسه‌ی نظام‌مند اثر نوع افزودنی (سیمان و CKD) شرایط تراکم و مکش را فراهم می‌سازد.

از دستگاه تحکیم غیراشباع، که امکان تنظیم مستقل فشار هوا و فشار آب را فراهم می‌کند، برای بررسی تراکم‌پذیری خاک، پتانسیل فروریزش، و پاسخ هیدرومکانیکی تحت شرایط مکش بافتی کنترل‌شده استفاده شده است (شکل ۲).^[۲۲ و ۲۳] همچنین، شرایط غیراشباع مشابه میدان واقعی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳).

ذرات مشاهده می‌شود. وجود مقدار نسبتاً بالای گچ در ترکیب خاک باعث حساسیت آن در برابر تغییرات رطوبتی می‌شود و انتخاب آن را برای مطالعات تثبیت خاک توجیه می‌کند.^[۴۷-۵۶]

۲.۲. مواد افزودنی

دو عامل تثبیت‌کننده در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند: سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD). سیمان به‌دلیل فرآیند هیدراسیون خود، که منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می‌شود، به‌طور گسترده برای تثبیت خاک استفاده می‌شود. ترکیب‌های مذکور، ذرات خاک را به یکدیگر پیوند می‌دهند و به‌طور قابل توجهی، سبب افزایش مقاومت خاک می‌شوند.^[۵۲]

غبار کوره‌ی سیمان (CKD)، که محصول جانبی فرآیند تولید سیمان است، به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه مطرح می‌شود. ماده‌ی CKD، حاوی آهک و ترکیب‌های واکنش‌پذیر است، که می‌توانند در واکنش‌های پوزولانی شرکت کنند، موجب کاهش تخلخل شوند، و مقاومت خاک را بهبود بخشند؛ هر چند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است. در جدول ۲، ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD) استفاده‌شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.^[۴۹]

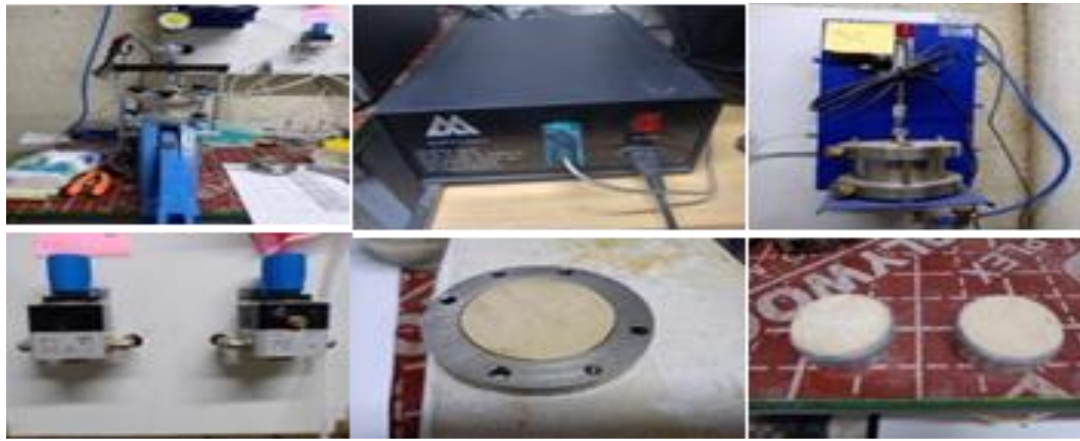
۳.۲. آماده‌سازی نمونه و تراکم

نمونه‌های خاک از الک شماره‌ی ۴ (با اندازه‌ی چشمه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر) عبور داده شده‌اند، تا ذرات درشت حذف شوند. عملیات تراکم در دو سطح ۹۰ و ۹۵ درصد از بیشینه‌ی چگالی خشک (MDD)، که براساس آزمایش پروکتور استاندارد و طبق استاندارد ASTM D ۶۹۸ تعیین شده است، صورت گرفته است. مواد افزودنی با مقادیر: ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان و ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد غبار کوره‌ی سیمان (CKD) بر حسب وزن خشک خاک در دو حالت جداگانه به خاک اضافه شده‌اند. در جدول ۳، خلاصه‌ی ترکیب‌های مختلف آماده‌شده برای آزمایش ارائه شده است. شایان ذکر است منظور از PS، نمونه‌ی خاک بدون افزودنی است.

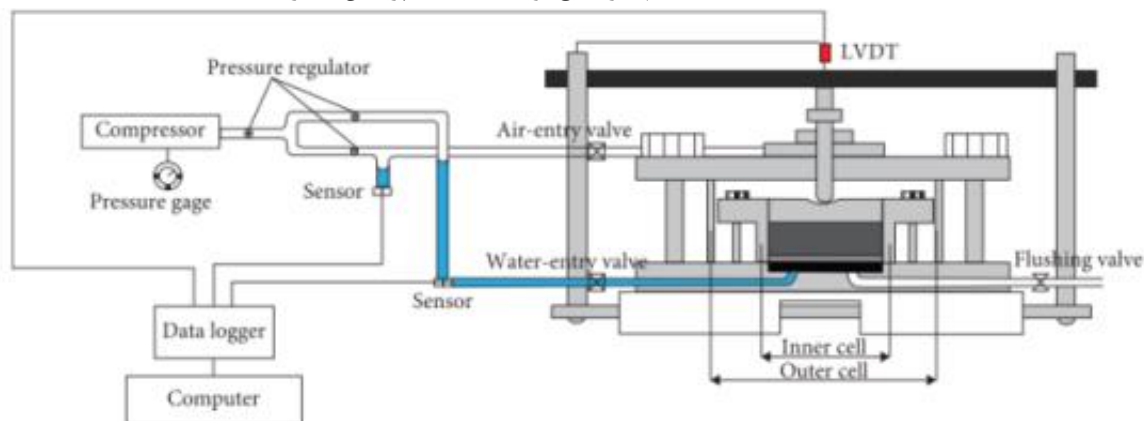
در پژوهش حاضر، خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار به‌منظور تثبیت با سیمان و CKD تحت فرآیند اختلاط و عمل‌آوری قرار گرفته‌اند. ابتدا، مواد خشک شامل خاک، سیمان، و CKD به‌طور یکنواخت در یک مخلوط‌کننده‌ی آزمایشگاهی تمیز و خشک آماده شده‌اند. پس از آن، سیمان و CKD به نسبت‌های مشخص به خاک افزوده شده‌اند. ترکیب مواد به‌صورت تدریجی انجام شده است، به‌طوری‌که ابتدا سیمان و سپس CKD به خاک افزوده شده‌اند. ترتیب اخیر، برای بهبود واکنش‌های پوزولانی و ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات خاک و مواد تثبیت‌کننده در نظر گرفته شده است. پس از اتمام مرحله‌ی اخیر، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت پایین به‌طور کامل مخلوط شده است، تا ترکیب یکنواخت حاصل شود.

در مرحله‌ی بعد، پس از اختلاط، نمونه‌ها به مدت ۷ روز، به‌منظور اطمینان از تثبیت مناسب سیمان و CKD و تأثیر کامل آن‌ها در ویژگی‌های خاک، تحت عمل‌آوری در شرایط دمای محیطی قرار گرفته‌اند. این شرایط و مدت زمان عمل‌آوری به‌طور ویژه برای ارزیابی آثار سیمان و CKD در خواص خاک در شرایط غیراشباع و به‌منظور دستیابی به بهترین نتیجه در بهبود خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی خاک انتخاب شده است.

فرآیند اخیر برای هر نمونه به‌طور جداگانه انجام شده و تمامی نمونه‌ها در



شکل ۲. دستگاه تحکیم غیراشباع مورد استفاده در پژوهش حاضر.



شکل ۳. نمای شماتیک از دستگاه آدومتر با کنترل مکش.

۵.۲. منحنی مشخصه‌ی آب- خاک (SWRC)

منحنی‌های SWRC با اعمال مکش در بازه‌ی ۲ تا ۹۰ کیلوپاسکال و با استفاده از روش انتقال محور در داخل آدومتر به‌دست آمده‌اند. در هر سطح مکش، میزان تعادل محتوای آب حجمی در مسیرهای خشک‌اندازی و ترشدگی اندازه‌گیری شده است.

۶.۲. برازش مدل ون‌گنوختن

برازش داده‌های آزمایشگاهی منحنی SWRC با استفاده از معادله‌ی ون‌گنوختن صورت گرفته و پارامترهای هیدرولیکی برازش شامل (m, n, α) استخراج شده‌اند. پارامترهای اخیر، امکان مقایسه‌ی کمی تأثیر تراکم و افزودنی‌ها در رفتار نگهداری آب را فراهم کرده‌اند.

۷.۲. تراکم‌پذیری و ضریب بهبود

آزمایش‌های تکمیلی تحکیم غیراشباع در سطوح مکش مختلف (۱۵۳۰، ۶۰ و کیلوپاسکال) برای تعیین شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) انجام شده‌اند. همچنین، معادله‌ی ضریب بهبود (I) برای ارزیابی میزان اثربخشی تثبیت تحت شرایط مختلف تنش و مکش استفاده شده است. [۱۴، ۱۷، ۲۴] ضریب بهبود (I) یک ابزار تحلیلی شناخته‌شده است، که در مطالعات ژئوتکنیکی برای اندازه‌گیری اثربخشی عملیات اصلاح خاک استفاده می‌شود و به وضوح درصد کاهش نشست حاصل از روش‌های تثبیت خاک را نشان می‌دهد، و نقش افزودنی‌ها را در افزایش عملکرد خاک برجسته می‌کند. ضریب بهبود را می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه کرد:

$$I = \frac{S_{Natural} - S_{Treated}}{S_{Natural}} \times 100 \quad (1)$$

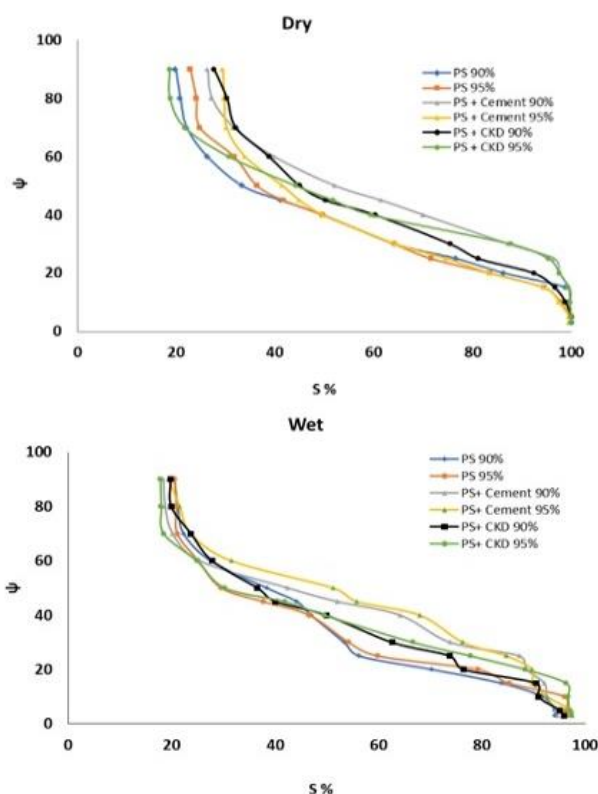
که در آن، $S_{Natural}$ نشست خاک طبیعی (اصلاح‌نشده) تحت تنش اعمال شده، و $S_{Treated}$ نشست خاک اصلاح‌شده با افزودنی‌های خاص تحت شرایط مشابه هستند.

معادله‌ی اخیر براساس مفهوم شناخته‌شده‌ی نسبت بهبود در ادبیات مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک بوده و ایده‌ی اصلی آن، مقایسه‌ی عملکرد خاک‌های اصلاح‌شده در مقابل خاک‌های اصلاح‌نشده است. همچنین، ضریب بهبود به‌صورت کمی، کاهش نشست حاصل از تثبیت را اندازه‌گیری می‌کند. رویکرد ذکرشده، چارچوبی قوی برای مقایسه‌ی اثربخشی نسبی افزودنی‌های مختلف تحت شرایط آزمایشگاهی مشابه فراهم می‌کند.

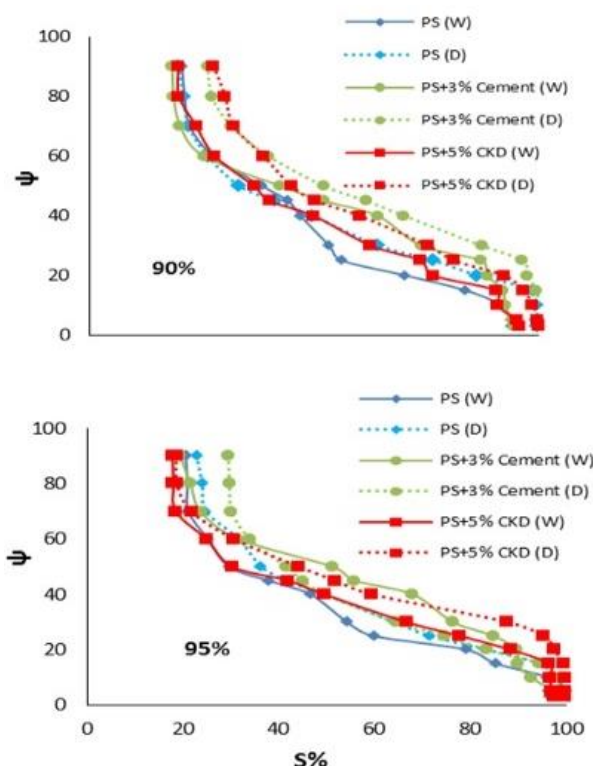
۸.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای تحلیل ریزساختاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. تصاویر SEM برای مشاهده‌ی تغییرات میکروسکوپی و بررسی تأثیر افزودنی‌ها (سیمان و CKD) در ساختار ذرات خاک در شرایط غیراشباع گرفته شده‌اند. نمونه‌های خاک قبل و بعد از تثبیت تحت شرایط مشابه (مکش بافتی مختلف) دقیقاً آماده‌سازی و به میکروسکوپ ارسال شده‌اند. شرایط عکس‌برداری، شامل تنظیم‌های ولتاژ شتاب‌دهنده به میزان ۲۰ کیلوولت، تنظیم‌های شدت نور و کنتراست برای افزایش وضوح تصاویر، و جلوگیری از تداخل رطوبت بر نتایج بوده است. تصاویر گرفته‌شده در مقیاس‌های مختلف، به‌ویژه در نواحی‌یی که تغییرات ساختاری واضحی مشاهده می‌شد، ثبت شده‌اند. تصاویر مذکور، امکان مقایسه‌ی دقیق بین نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD و نمونه‌های غیرتثبیت‌شده را فراهم می‌سازد.

مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده- احمد کامل ابراهیم ال‌کینانی و همکاران



شکل ۵. منحنی SWRC برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده (مسیرهای ترشدگی و خشک‌اندازی).



شکل ۶. منحنی SWRC در سطوح تراکم مختلف برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده.

در تراکم ۹۵٪، خاک‌های تثبیت‌شده ظرفیت نگهداری آب بالاتر و هیستریزیس کمتری میان مسیرهای خشک‌شدن و ترشدن نشان داده‌اند. در مقابل، در تراکم ۹۰٪، اندازه‌ی بزرگ‌تر حفره‌ها موجب محدودیت در اثربخشی تثبیت، به‌ویژه در حالت استفاده از CKD شده است. این نتایج تأیید می‌کنند که تثبیت در ۱۳۳



شکل ۴. فلوچارت روند پژوهش حاضر.

به‌طورکلی می‌توان بیان داشت، تصویربرداری SEM بر روی خاک بدون افزودنی، خاک تثبیت‌شده با سیمان و خاک تثبیت‌شده با CKD انجام شده است، تا تغییرات ریزساختاری بررسی شود. تصاویر SEM، بینشی دقیق در مورد پُرشدگی حفره‌ها، پیوندهای سیمانی، و آرایش ذرات از خود ارائه می‌دهند و می‌توانند مستقیماً از نتایج آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی پشتیبانی کنند.^[۲۵] روش پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت فلوچارت مطابق شکل ۴ نشان داد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. منحنی‌های نگهداری آب- خاک (SWRC)

در شکل‌های ۵ و ۶، منحنی‌های نگهداری آب- خاک (SWRC) برای خاک‌های بدون تثبیت و تثبیت‌شده تحت سطوح تراکم ۹۰ و ۹۵ درصد مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ غبار کوره‌ی سیمان (CKD) موجب بهبود قابل‌توجه ظرفیت نگهداری آب در مقایسه با خاک بدون تثبیت شده است. بهبودی اخیر، به کاهش اندازه‌ی حفره‌ها و افزایش یکنواختی ساختار خاک ناشی از اثر ترکیبی افزودنی‌ها و تراکم نسبت داده می‌شود. این امر با نتایج مطالعات پیشین در توافق خوبی است.^[۴۵-۴۳] این تذکر لازم است که (S%) در شکل ۵، به معنای درصد اشباع است.

تصفیه‌نشده، که در آن‌ها تغییرپذیری در اندازه‌ی منافذ بیشتر است، بارزتر است. در خاک‌های تصفیه‌شده، توزیع اندازه‌ی منافذ یکنواخت‌تر است و منجر به بهبود احتباس آب و کاهش فروپاشی سازه می‌شود.

یافته‌های اخیر بر اهمیت افزودنی‌های تثبیت‌کننده، مانند سیمان و CKD، در ترکیب با سطوح تراکم بالاتر برای بهینه‌سازی عملکرد خاک تأکید می‌کنند. با انجام این کار، می‌توان آثار نامطلوب هیستریزیس در خاک‌های گچی را به میزان کمینه رساند و منجر به زیرساخت‌های پایدارتر و قابل اعتمادتر در محیط‌های با رطوبت متغیر شد.

۲.۳. تحلیل مدل ون گنوختن

برازش داده‌های منحنی SWRC با استفاده از مدل ون گنوختن (۱۹۸۰) صورت گرفته و پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در شکل ۷، منحنی‌های برازش‌شده مشاهده می‌شوند؛ که براساس آن، خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر، ظرفیت نگهداری آب بهتری نسبت به

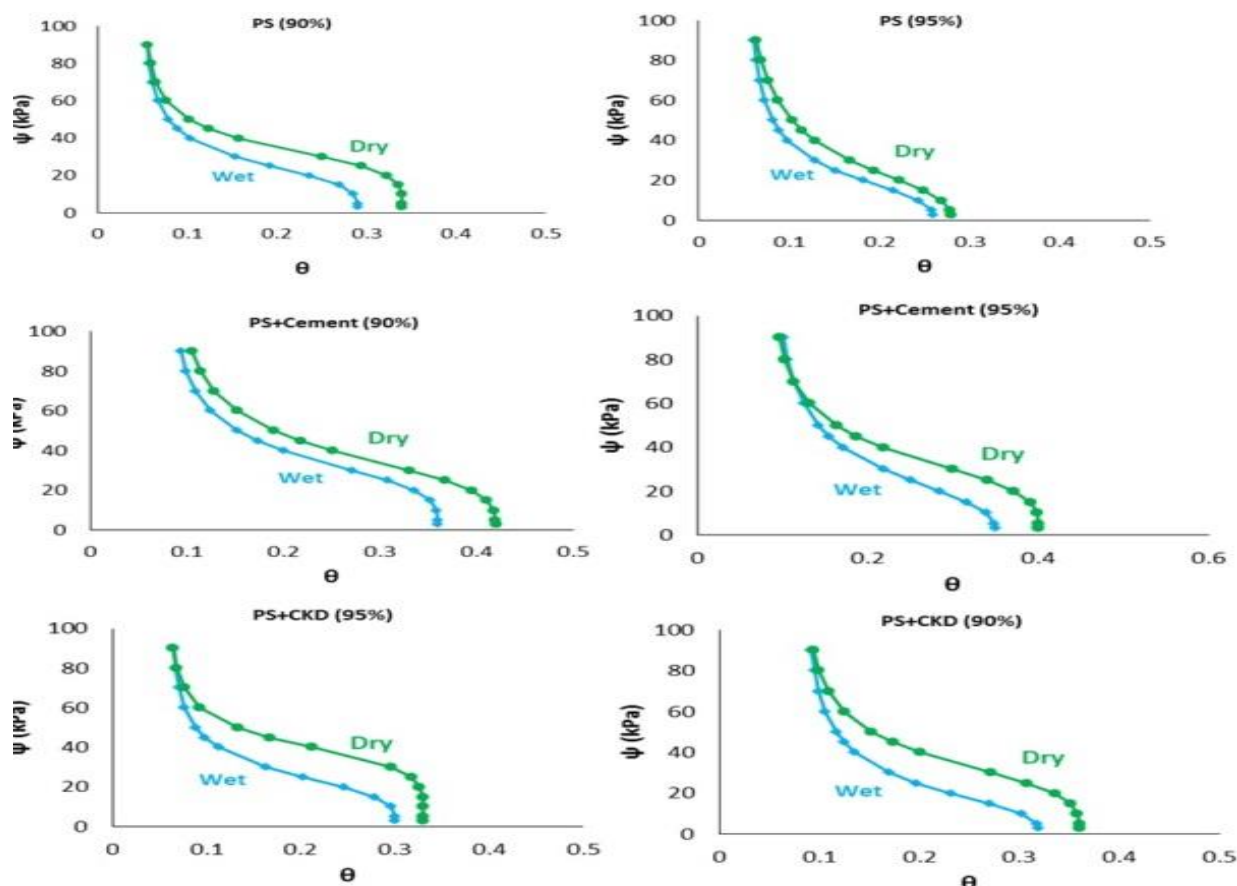
ترکیب با تراکم بالاتر، عملکرد هیدرومکانیکی خاک‌های گچی را بهبود می‌بخشد.^[۱۹] شایان ذکر است (S%) در شکل ۶، به معنای درصد اشباع است. همچنین منحنی‌های W به معنای تراندازی و منحنی‌های D به معنای خشک‌شدن هستند.

اثر Ink Bottle در خاک به پدیده‌ای اشاره دارد که در آن، رفتار فیزیکی یا مکانیکی خاک به دلیل وجود حفره‌ها یا فضاهای بزرگ در درون خاک تغییر می‌کند؛ که معمولاً به‌ویژه در خاک‌های رسی و خاک‌های با دانه‌بندی نامنظم یا خاک‌های با لایه‌های رسی غنی از آب مشاهده می‌شود. اصطلاح Ink Bottle به این دلیل انتخاب شده است که شکل ظاهری حفره‌های مذکور شبیه به یک بطری جوهر (Ink Bottle) است که در آن فضاهای بزرگ (مانند گردن بطری) در میان ذرات خاک وجود دارند.

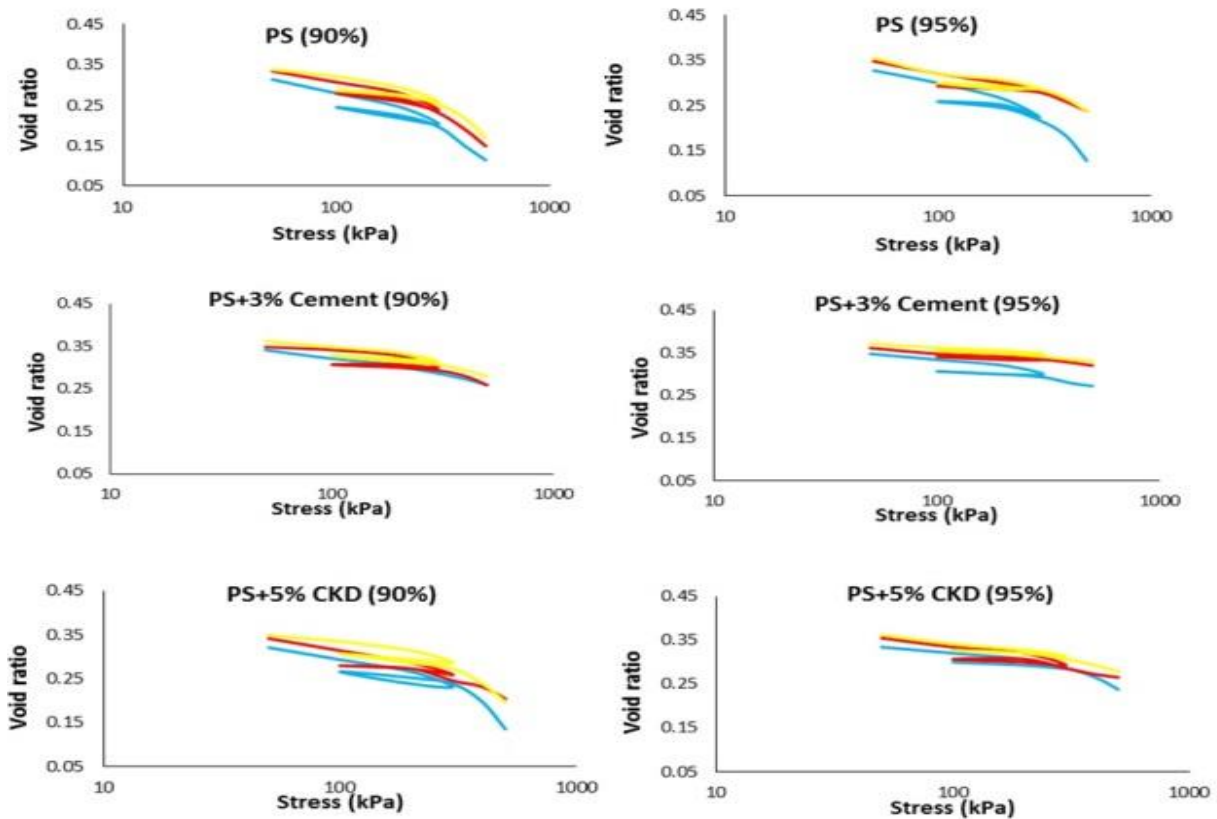
با توجه به نتایج شکل‌های ۵ و ۶، بطری جوهر با حفره‌های بزرگ‌تر، که هیستریزیس را افزایش می‌دهند، مشخص شده است؛ و در خاک‌های

جدول ۴. پارامترهای برازش α , n , m برای مسیرهای ترشدگی و خشک‌اندازی.

Sample	Compaction(%)	Wet			Dry		
		a	n	m	a	n	m
PS	90	0.04	4	0.75	0.03	5	0.8
	95	0.05	3	0.66	0.04	2.8	0.64
PS+Cement	90	0.03	4	0.75	0.028	3.8	0.73
	95	0.04	3	0.66	0.03	4	0.75
PS+CKD	90	0.05	3	0.66	0.03	4	0.75
	95	0.04	4	0.75	0.025	6	0.83



شکل ۷. منحنی‌های ون گنوختن برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده.



شکل ۸. تأثیر مکش بافتی در شاخص‌های تراکم‌پذیری (مکش بافتی خط آبی = ۱۵ کیلوپاسکال، مکش بافتی خط قرمز = ۳۰ کیلوپاسکال، و مکش بافتی خط زرد = ۶۰ کیلوپاسکال).

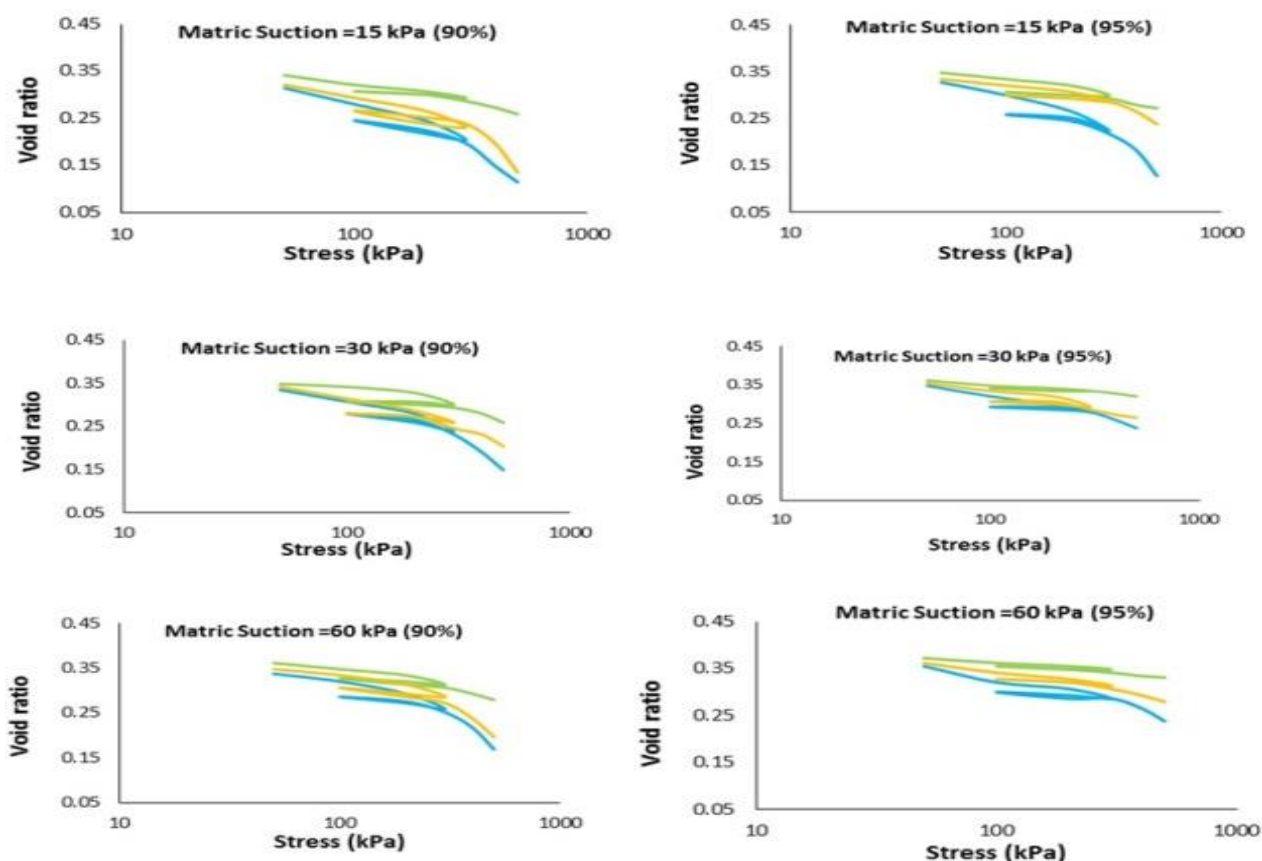
آزمایش مذکور چگونگی تأثیر مکش بافتی در تراکم‌پذیری خاک گچی، اثر بخشی سیمان، و گرد سیمان را در افزایش مقاومت در برابر فشردگی و تورم، و تأثیر سطوح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) را در رفتار خاک تحت شرایط مکش مختلف ارزیابی کرده و نشان داده است که افزایش مکش بافتی منجر به کاهش C_c و C_s می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی بهبود مقاومت خاک در برابر فشردگی و تورم است (جدول ۵). این اثر در تراکم ۹۵٪ در مقایسه با تراکم ۹۰٪ بارزتر بوده است. با افزودن ۳٪ سیمان، C_c در تراکم ۹۰٪ به ۰/۰۵۷ و در تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۴۵ کاهش یافته است؛ در حالی که C_s در تراکم ۹۰٪ از ۰/۰۸ به ۰/۰۲۸ و در تراکم ۹۵٪ از ۰/۰۷ به ۰/۰۱۴ کاهش یافته است، که نشانگر بهبود قابل‌توجه در پایداری خاک است. در سطوح مکش بالاتر از ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال، کاهش C_c و C_s ادامه یافته و نقش مکش بافتی در افزایش سختی خاک را تقویت کرده است.^[۹] برای نمونه‌های تیمار شده با ۵٪ CKD، مقادیر C_c و C_s نیز به میزان کمتری نسبت به تیمار سیمان بهبود یافته‌اند. در مکش ۱۵ کیلوپاسکال، مقدار C_c برای ۹۰٪ تراکم ۰/۰۹۱ بوده است، که کمتر از خاک تیمار نشده (۰/۱۱)، اما بیشتر از خاک تیمار شده با سیمان (۰/۰۵۷) بوده است. در تراکم ۹۵٪، مقدار C_c برابر ۰/۰۴۵ بوده است، که نشانگر بهبود محدود در مقایسه با تیمار سیمان است. این امر نقش پیوند شیمیایی در کاهش تراکم‌پذیری هنگام استفاده از سیمان را در مقایسه با اثر پُر کردن حفره‌ی فیزیکی CKD برجسته می‌کند. در مکش ۶۰ کیلوپاسکال، مقدار C_c برای خاک تیمار شده با سیمان ۳٪ در تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۲۸ کاهش یافته است؛ در حالی که برای خاک تیمار شده با CKD، مقدار C_c ۰/۰۵۷ و برای خاک تیمار نشده ۰/۰۷ بوده است، که تأیید می‌کند سیمان مؤثرترین عامل در بهبود سختی خاک و کاهش تغییر شکل است. علاوه بر این، ترکیب ۹۵٪

خاک‌های تثبیت‌شده با CKD از خود نشان داده‌اند. این تذکر لازم است که این امر در برخی مطالعات پیشین نیز اشاره شده است.^[۱۵، ۲۱، ۴۳ و ۴۹]

در مورد خاک خالص، پارامتر α نشان‌دهنده‌ی نفوذپذیری بالا و ظرفیت پایین نگهداری آب است؛ در حالی که افزودن سیمان موجب کاهش قابل‌توجه مقدار α شده است، که بیانگر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت است. افزودن CKD نیز موجب بهبود نگهداری، اما در سطحی کمتر از سیمان شده است. نتایج به‌دست‌آمده، کارایی و دقت مدل ون‌گنوختن را در شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای گچی تثبیت‌شده تأیید کرده‌اند.^[۵، ۹، ۲۶، ۲۸، ۳۳ و ۴۱]

۳.۳. تأثیر مکش و افزودنی‌ها در تراکم‌پذیری

مکش‌ها، یکی از عوامل کلیدی مؤثر در رفتار خاک‌های غیراشباع هستند، که نشان‌دهنده‌ی نیروهای کششی هستند، که آب را در منافذ خاک نگه می‌دارند.^[۲۳] نیروهای کششی، نقش مهمی در تعیین خواص تراکم‌پذیری خاک‌ها، به ویژه در خاک‌های گچی، که مستعد تغییرات رطوبت هستند، ایفا می‌کنند. در شکل ۸، رابطه‌ی بین تنش و تغییر نسبت خلل و فرج مشاهده می‌شود، که از آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با استفاده از دستگاه تحکیم غیراشباع به‌دست آمده است. آزمایش‌های اخیر با هدف نشان دادن تأثیر مکش بافتی و درجه‌ی تراکم خاک در خواص تراکم‌پذیری خاک انجام شده‌اند. علاوه بر این، آزمایش‌های بیشتری برای بررسی تأثیر مواد افزودنی در خواص تراکم‌پذیری خاک تحت مکش بافتی ثابت (مطابق شکل ۹) انجام شده‌اند. شایان ذکر است که در نتایج شکل‌های ۸ و ۹، آزمایش‌های تحکیم برای مطالعه‌ی اثر تثبیت، ابتدا بر روی خاک تثبیت‌نشده (خاک طبیعی ماسه‌ای گچ‌دار) انجام شده‌اند.



شکل ۹. تأثیر افزودنی‌های مختلف بر شاخص تراکم‌پذیری (C_c) و شاخص تورم (C_s) (خط آبی = خاک خالص، خط سبز = خاک خالص + سیمان و خط نارنجی = خاک خالص + CKD).

جدول ۵. مقادیر شاخص تراکم‌پذیری (C_c) و شاخص تورم (C_s) در سطوح مختلف مکش و شرایط تثبیت.

Sample	Compaction (%)	Suction 15 kPa		Suction 30 kPa		Suction 60 kPa	
		C_c	C_s	C_c	C_s	C_c	C_s
PS	90	0.11	0.08	0.091	0.08	0.07	0.05
	95	0.1	0.07	0.079	0.014	0.079	0.028
PS+3% Cement	90	0.057	0.028	0.034	0.014	0.045	0.028
	95	0.046	0.014	0.034	0.014	0.028	0.014
PS+5% CKD	90	0.091	0.072	0.091	0.043	0.057	0.043
	95	0.046	0.028	0.057	0.028	0.057	0.028

جدول ۶. مقادیر ضریب بهبود برای سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) در مکش‌ها و سطوح تراکم مختلف.

Suction (kPa)	Stress (kPa)	90%		95%	
		Compaction		Compaction	
		3% Cement	5% CKD	3% Cement	5% CKD
15	100	44	11	42.8	14
	600	39	7.8	58	44
30	100	33	16.6	50	25
	600	48	24	60	20
60	100	63.6	27	83	33
	600	53	13	67.5	30

تراکم و افزودنی‌ها به‌طور قابل‌توجهی عملکرد خاک را افزایش داده و آن را در برابر تغییرات فشار و رطوبت مقاوم‌تر کرده است.^[۲۹] براساس نتایج اخیر، توصیه می‌شود برای کاهش خطرهای ژئوتکنیکی، دست‌کم ۹۵٪ تراکم در خاک‌های گچی شنی استفاده شود. در پروژه‌های بهسازی خاک نیز، که نیاز به پایداری طولانی مدت دارند، ۳٪ سیمان اضافه شود، و از ۵٪ گرد سیمان به‌عنوان یک جایگزین مقرون به صرفه استفاده شود، در حالی که راندمان پایین‌تر آن در مقایسه با سیمان نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مطالعات بیشتری در مورد تأثیر مکش بافتی در طراحی پی برای خاک‌های غیراشباع باید انجام شود، تا ارزیابی دقیقی از آثار رطوبت طولانی‌مدت در پایداری سازه حاصل شود.

۴.۳. ضریب بهبود

ضریب بهبود (I) در جدول ۶ خلاصه شده است. نتایج نشان می‌دهند که سیمان به‌طور پیوسته مقادیر بالاتری از ضریب بهبود نسبت به CKD به‌دست آورده است، به‌ویژه در شرایطی که تراکم ۹۵٪ بوده است. در مکش ۶۰

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تغییرات ساختاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD را در مقایسه با خاک‌های غیرتثبیت‌شده به‌طور واضح نشان داده است. در تصاویر SEM، خاک‌های تثبیت‌شده، تشکیل پیوندهای سیمانی C-S-H، و کاهش تخلخل‌های خاک به‌وضوح قابل مشاهده است. تغییرات مذکور، نشان‌دهنده‌ی بهبود ساختار ذرات خاک و تقویت پیوندهای داخلی آن‌هاست، که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت خاک در برابر تراکم و تورم شود. همچنین، واکنش‌های پوزولانی CKD باعث تشکیل ترکیب‌های سیمانی جدید در سطح ذرات خاک شده است، که این امر به‌ویژه در خاک‌هایی که تحت تأثیر تثبیت با سیمان قرار گرفته‌اند، مشهود است. این تغییرات ساختاری تأثیر مستقیم در ظرفیت نگهداری آب، مقاومت به فشار، و پایداری بلندمدت خاک در شرایط غیراشباع داشته‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD) تحت شرایط کنترل‌شده‌ی مکش بافتی و سطوح مختلف تراکم بررسی شده است. یافته‌های اصلی به این صورت جمع‌بندی شده‌اند:

(۱) دو حالت افزودن ۳٪ سیمان و همچنین ۵٪ CKD موجب بهبود منحنی نگهداری آب- خاک (SWRC) از طریق کاهش اندازه‌ی حفره‌ها و بهبود یکنواختی ساختاری شده است. سیمان کارایی بیشتری نشان داده است، به‌ویژه در تراکم ۹۵٪، که آثار هیستریزیس به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

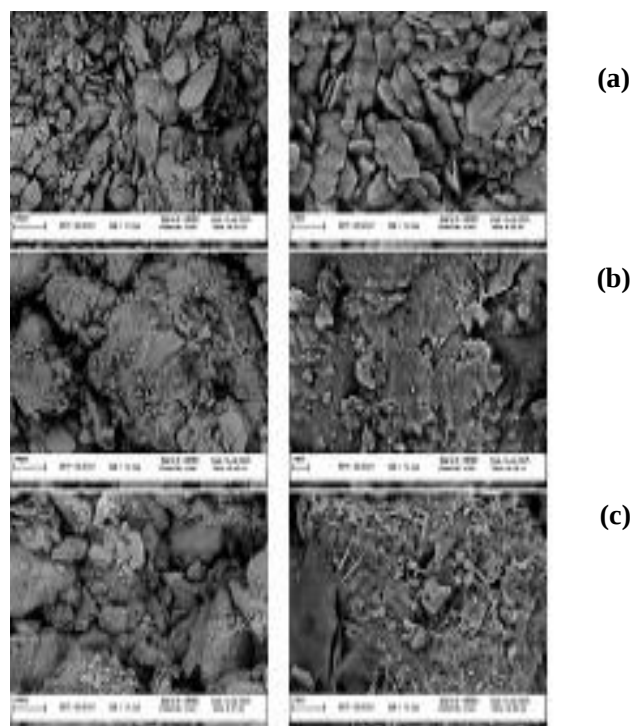
(۲) داده‌های آزمایشگاهی SWRC با موفقیت با مدل ون‌گونوختن برازش شده‌اند. پارامترهای به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر توانایی نگهداری آب بیشتری نسبت به خاک‌های تثبیت‌شده با CKD دارند و این امر کارایی مدل را برای خاک‌های گچی تثبیت‌شده تأیید می‌کند.

(۳) افزایش مکش بافتی از ۱۵ تا ۶۰ کیلوپاسکال به‌طور پیوسته موجب کاهش شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) شده است. تیمار با سیمان بیشترین کاهش را ایجاد کرده است، به‌طوری‌که مقدار Cc در مکش ۶۰ کیلوپاسکال و تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۲۸ رسیده است؛ در حالی که CKD فقط بهبودی متوسط حاصل کرده است.

(۴) تحلیل ضریب بهبود نشان داده است که سیمان در تمامی سطوح تراکم و مکش عملکردی برتر نسبت به CKD داشته است. در تراکم ۹۵٪ و مکش ۶۰ کیلوپاسکال، سیمان به ضریب بهبود ۸۳٪ دست یافته است، در حالی که این مقدار برای CKD فقط ۳۳٪ بوده است.

(۵) تصاویر SEM تأیید کرده‌اند که فرآیند هیدراسیون سیمان منجر به تشکیل ژل‌های متراکم C-S-H شده است، که حفره‌های خاک را پر کرده و موجب بهبود چشمگیر ریزساختار شده است. در مقابل، CKD واکنش‌های پوزولانی ناقص‌تری نشان داده است، که نتیجه‌ی آن تقویت متوسط بوده است.

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که سیمان مؤثرترین ماده‌ی تثبیت‌کننده برای خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق است و به‌طور قابل‌توجهی خواص هیدرولیکی و



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از (الف) خاک بدون تثبیت، (ب) خاک با ۳٪ سیمان، و (ج) خاک با ۵٪ غبار کوره سیمان (CKD).

کیلوپاسکال و تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال، ضریب بهبود سیمان به ۸۳٪ رسیده است، در حالی‌که این مقدار برای CKD فقط ۳۳٪ بوده است. CKD نسبت به افزایش تنش، حساسیت بیشتری از خود نشان داده و در تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال، مقادیر پایین‌تری از ضریب بهبود را ثبت کرده است.

این یافته‌ها سیمان را به‌عنوان تثبیت‌کننده‌ی کارآمدتر معرفی می‌کنند، در حالی‌که CKD هر چند جایگزینی اقتصادی و قابل استفاده است، اما پایداری و اثربخشی کمتری دارد. تحلیل ضریب بهبود همچنین نقش کلیدی مکش بافتی و تراکم را در میزان کارایی فرایند تثبیت، تأیید می‌کند.

۵.۳. تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (شکل ۱۰)، شواهد ریزساختاری را در تأیید نتایج آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی ارائه داده‌اند:

– **خاک بدون تثبیت:** آرایش سست ذرات با حفره‌های بزرگ که منجر به تخلخل زیاد و مقاومت برشی پایین شده است (شکل ۱۰-ا).

– **خاک تثبیت‌شده با سیمان:** تشکیل ژل متراکم C-S-H، که حفره‌ها را پر کرده و باعث کاهش تخلخل و افزایش پیوند ذرات شده است (شکل ۱۰-ب).

– **خاک تثبیت‌شده با CKD:** بهبود نسبی ناشی از واکنش‌های پوزولانی کندتر، همراه با ذرات واکنش‌نداده‌ی باقی‌مانده، و پیوندهای یکنواخت کمتر صورت گرفته است. مشاهده‌های اخیر تأیید می‌کنند که سیمان به‌دلیل واکنش‌های هیدراسیون سریع و گسترده، تثبیت برتری را فراهم می‌آورد؛ در حالی که CKD فقط بهبود متوسطی ایجاد می‌کند، که عمدتاً ناشی از پُرسدگی فیزیکی حفره‌ها و پیوند شیمیایی محدود است (شکل ۱۰-ج).

شاخص‌های هیدرومکانیکی قابل اعتماد و تفسیر فیزیکی رفتار خاک انجام شده است.

دوم، اگرچه داده‌های حاصل از آزمایش‌های تحکیم غیراشباع و منحنی‌های SWRC اطلاعات جامعی درباره اثر تراکم و مکش ارائه می‌دهند، تعمیم مستقیم نتایج به مقیاس میدانی نیازمند توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های صحرایی است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه‌ی حاضر به‌عنوان ورودی برای توسعه‌ی مدل‌های هوشمند (نظیر DNN)، سیستم‌های فازی و مدل‌های ترکیبی (به‌منظور پیش‌بینی نشست، تغییرشکل، و رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های گچ‌دار در شرایط واقعی استفاده شود.

مکانیکی را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه زمانی که با تراکم بالاتر ترکیب شود. اگرچه CKD جایگزینی اقتصادی‌تر است، اما کارایی کمتری نسبت به سیمان دارد. آثار ترکیبی تثبیت، تراکم و مکش بافتی برای ارتقاء دوام خاک در محیط‌های دارای نوسان‌های رطوبتی حیاتی است.

با وجود نتایج قابل‌توجه پژوهش حاضر، برخی محدودیت‌ها وجود دارند، که می‌توانند مسیر پژوهش‌های آینده را روشن‌تر سازند. نخست، مطالعه‌ی حاضر بر تحلیل آزمایشگاهی رفتار غیراشباع خاک ماسه‌ای گچ‌دار تثبیت‌شده با سیمان و CKD مبتنی بوده و از مدل‌های داده‌محور نظیر شبکه‌های عصبی عمیق، منطق فازی یا سایر روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی پاسخ خاک استفاده نشده است. این انتخاب آگاهانه با هدف تمرکز بر استخراج

References- منابع

1. Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. 2023. Study of soil reinforcement in the east of mashhad using glass granule. *Materials research express*, 10(5), 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
2. Bazaz, H.B., Akhtarpour, A. and Baradaran, M.S., 2025, October. High-rise buildings sitting on clayey soils: how the top-down construction style affects their seismic behavior. In *Structures*, 80, p. 109861. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109861>
3. Mahmood, M. S., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. 2020, February. Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), p. 012080). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012080>
4. Abdalhusein, M., & Akhtarpour, A. 2019. Effect of wetting process with presence of matric suction on unsaturated gypseous sand soils. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54.
5. Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. 2019. Effect of soaking on unsaturated gypseous sand soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(5), pp.550-558.
6. Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. 2022. Unsaturated behaviour of gypseous sand soils using a modified triaxial test apparatus. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(6), pp.743-758. <https://doi.org/10.1080/19386362.2022.2033483>
7. Alsamia, S., Mahmood, M. S., & Akhtarpour, A. 2020. Estimation of capillary rise in unsaturated gypseous sand soils. *Pollack Periodica*, 15(2), pp.118-129. <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.2.11>
8. Akhtarpour, A., Mahmood, M. S., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. 2018, November. Settlement of gypseous sand upon short-term wetting. In *Proceedings of the International Congress on Engineering and Architecture* pp. 1807-1820.
9. Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Mahmood, M. S. 2022, May. Investigation of shear strength parameters for gypseous soils using a modified apparatus of triaxial test. In *International Conference on Geotechnical Engineering-IRAQ* (pp. 317-330). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7358-1_27
10. Abdulameer AlNaddaf, H. Q., Kouzegaran, S., Fattah, M. Y., & Akhtarpour, A. 2024. Effects of cement treatment on water retention behavior and collapse potential of gypseous soils: experimental investigation and prediction models. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), 6637911. <https://doi.org/10.1155/2024/6637911>
11. Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. 2020. Behavior study of the gypsiferous sand soil of alnajaf city with presence of matric suction using unsaturated triaxial device. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10), pp.2435-2450. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16339.6194>

12. AlNaddaf, H. Q. A., Kouzegaran, S., Akhtarpour, A., & Fattah, M. Y. 2025. Effects of cement treatment on the behavior of unsaturated gypseous soils. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5), pp.1-33. <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00602-y>
13. Tareghian, B., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. 2024. The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00014-4>
14. Pargar, J., Akhtarpour, A., & Baradaran, M. S. 2024. An unsaturated soil mechanics-based numerical and experimental method to assess soil settlement due to ground water level rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.1-26. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00422-6>
15. Al-Obaidi, Q. A., Karim, H. H., & Al-Shamoosi, A. A. 2020, February. Collapsibility of gypseous soil under suction control. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 737(1), p. 012103). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012103>
16. Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhussein, M. M., & Baradaran, M. S. 2023. Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.1-24. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00315-0>
17. Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. 2024. Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case studies in construction materials*, 20, e02740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>
18. Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. 2024. Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and building materials*, 449, 138426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426>
19. Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. 2022. A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(110), pp.57-86. <https://doi.org/10.22034/ROAD.2021.295635.1969>
20. Baradaran, S., & Ameri, M. 2023. Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(114), pp.53-70. <https://doi.org/10.22034/road.2022.337945.2041>
21. Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. 2025. Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering*, 25, 103734. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103734>
22. Baradaran, S., & Ziaee, S. A. 2025. Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering. *Road*.
23. Yeganeh, N., Akhtarpour, A., Bazaz, J. B., & Baradaran, M. S. 2024. Analysis of the soil-structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 17(1).
24. Balighi, M., Akhtarpour, A., Baradaran, M. S., Abdallah, M., & RiyahiKhoo, A. 2024. Numerical and experimental study of the interaction between surface swelling soil and gas well casing, based on unsaturated soil mechanics. *Results in Engineering*, 24, 103646. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103646>
25. Balighi, M., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. 2024. Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(7), pp.5-5. <https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22616.8006>
26. Abdolvand, Y., & Sadeghiamirshahidi, M. 2024. Soil stabilization with gypsum: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.007>
27. Zhan, B. J., Li, J. S., Xuan, D. X., & Poon, C. S. 2020. Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: physicochemical interactions between sludge and cement. *Journal of hazardous materials*, 381, 121034. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121034>
28. Zhang, F., Zhu, H., Wu, Q., Yin, Z., Zhu, Z., & Hua, S. 2024. Research on the strength reduction mechanism of Cement Kiln Dust (CKD)-Portland cement systems from macroscale and nanoscale. *Construction and Building Materials*, 425, 135997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135997>

29. Ogila, W. A. M. 2021. Effectiveness of fresh cement kiln dust as a soil stabilizer and stabilization mechanism of high swelling clays. *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 283. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09589-4>
30. Niri, S. R., Akhtarpour, A., Daliri, F., & Baradaran, M. S. 2024. Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja). <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0069>
31. Jarjusey, A., Hayano, K., Kassa, A. A., Raihan, S., & Mochizuki, Y. 2024. Insights into potential of banana leaf powder as a mud soil stabilizer. *Results in Engineering*, 24, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103166>
32. Yang, J., Niu, X., Guo, Q., Wen, Z., & Cao, H. 2023. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy. *Results in Engineering*, 20, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101637>
33. Razouki, S. S., & Kuttah, D. 2024. Improving Strength by Increased Compaction of Gypsum—Enriched Soil under Long-Term Soaking Conditions. *Geotechnics*, 4(2), pp.415-429. <https://doi.org/10.3390/geotechnics4020023>
34. Wu, J., Liu, L., Deng, Y., Zhang, G., Zhou, A., & Xiao, H. 2022. Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3), pp.909-921. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.002>
35. Wan, Q., Wang, Z., Huang, T., & Wang, R. 2021. Water retention mechanism of cellulose ethers in calcium sulfoaluminate cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 301, 124118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124118>
36. Shah, M. M., Shahzad, H. M., Khalid, U., Farooq, K., & Ur Rehman, Z. 2023. Experimental study on sustainable utilization of CKD for improvement of collapsible soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), pp.5667-5682. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07565-z>
37. Abdalhusein, M. M., Abdullah, F. A., Al-Badran, Y. M., Almahmodi, R. H., & Mahmood, M. S. 2024. Investigation of the collapse potential of gypsum sand soil in unsaturation conditions using a modified oedometer. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 7(1).
38. Mansoori, M., & Akhtarpour, A. 2024. the effect of matric suction changes on the behavior of Anchored excavations in expansive soil. *Modares Civil Engineering journal*, 24(2), pp.139-156. <http://dx.doi.org/A-10-11849-4>
39. Akhtarpour, A., Soleimanian, N., Ekramifard, A., & Riyahikhoo, A. 2022. Matrix suction effect on the soil stability in unsaturated soil. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(2), pp.1-17.
40. Akhtarpour, A., & Mansoori, M. 2024. Numerical study of building damage with surface foundation located on expansive soil caused by matric suction changes. *Modares Civil Engineering journal*, 24(5), pp.85-100. <http://dx.doi.org/10.22034/24.5.85>
41. Almahmodi, R., Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. 2022. Characterization of collapsible gypsum sand soil with the presence of matric suction using a modified odometer apparatus. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10146-x>
42. Al-Kawam, F. Q., & Mahmood, R. A. 2022. The Effect of Geotechnical Factors in Road of Basrah, Southern Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, pp.157-169.
43. Al-Jubair, H. S., & Al-Battat, J. M. 2021. Studying the effects of pile load on negative skin friction in basrah governorate. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 18, pp.2-33.
44. Álvarez-Ayuso, E., Giménez, A., & Ballesteros, J. C. 2025. Soil ph and mineralogy govern fluoride leaching from flue gas desulfurization gypsum in acidic soils. *Soil & Environmental Health*, 100178.
45. Shallal, H. H., & Aljanabi, Q. A. 2024, January. Predict settlement of gypseous soil under load by deep neural network. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2864, No. 1, p. 030005). AIP Publishing LLC.
46. Wang, J., & Vanapalli, S. 2024. A framework for estimating the matric suction in unsaturated soils using multiple artificial intelligence techniques. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 48(11), 2854-2879.
47. Sarli, J.M., Hadadi, F. and Bagheri, R.A., 2020. Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO₂. *Geotechnical and Geological*

- Engineering*, 38(2), pp.1151-1163.
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01078-7>
48. Himed, K.A., Bolouri, J. and Abdalhusein, M.M., 2024, April. Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and Its Improvement with CKD Material. In *International Conference on Geotechnical Engineering Iraq* (pp. 3-16). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9364-8_1
 49. Alsamia, S., Albedran, H. and Mahmood, M.S., 2023. Contamination depth prediction in sandy soils using fuzzy rule-based expert system. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 14(1), pp.87-99. <https://doi.org/10.1556/1848.2022.00445>
 50. SHIRMOHAMMADI, H. and HADADI, F., 2017. Application of fuzzy logic for evaluation of resilient modulus performance of stone mastic asphalt. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 95(13).
 51. Elbaz, A. A., Aboulfotoh, A. M., Dohdoh, A. M., & Wahba, A. M. 2019. Review of beneficial uses of cement kiln dust (CKD), fly ash (FA) and their mixture. *J. Mater. Environ. Sci*, 10(11), pp.1062-1073.
 52. Al-Bakri, A. Y., Ahmed, H. M., & Hefni, M. A. 2022. Cement kiln dust (CKD): potential beneficial applications and eco-sustainable solutions. *Sustainability*, 14(12), pp.7022. <https://doi.org/10.3390/su14127022>
 53. Chen, K., He, X., Liang, F., & Sheng, D. 2024. Influences of ink-bottle effect evolution on water retention hysteresis of unsaturated soils: An experimental investigation. *Engineering Geology*, 330, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107409>
 54. Chen, K., Zhou, A., & Liang, F. 2024. Modelling the evolution of water retention hysteresis loops during soil deformation based on the ink-bottle effect. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 48(5), pp.1309-1322. <https://doi.org/10.1002/nag.3683>
 55. Schaap, M. G., & Leij, F. J. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), pp.843-851. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643843x>
 56. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Genuchten, M. T. V. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), pp.795-820. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>

این صفحه عملی خالی گذاشته شده است.

- ❖ مقاله به صورت دو ستونی در قالب نرم افزار Word با قلم B Nazanin سایز ۱۰/۵ با فاصله سطر ۱/۵ ارائه شود.
- ❖ اجزای اصلی مقاله، شامل مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی، زیربخش‌ها و نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد.
- ❖ تعداد کلمات عنوان مقاله حداکثر ۱۲۰ حرف نوشته شود.
- ❖ مقاله حداکثر ۲۰ صفحه باشد، با احتساب نمودارها و جداول، حداکثر ۱۵ شکل و خلاصه مقاله به زبان انگلیسی.
- ❖ چکیده فارسی مقاله ۱۵۰ تا ۲۰۰ کلمه باشد.
- ❖ صفحات عنوان فارسی و انگلیسی شامل عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج مرتبه علمی و آدرس سازمانی همه نویسندگان و رایانامه ایشان ذکر باشد.
- ❖ مقاله توسط اساتید دانشگاه یا محققین صنعتی با ایمیل سازمانی ارسال شود (در صورت ارسال مقاله توسط دانشجو، ضروری است معرفی نامه از طرف استاد راهنما مبنی بر تایید ارسال مقاله توسط دانشجو همراه با مقاله ارسال شود).
- ❖ لازم و ضروری است همه شکل‌ها از کیفیت و وضوح بالایی برخوردار باشند.
- ❖ از آنجا که مجله با فرمتی مشخص آراسته می‌شود جهت یکسان سازی شکل‌ها، همه مطالب شکل‌های مقاله در محیط ورد به صورت یکدست با فونت Times و سایز یکسان حتماً به زبان انگلیسی آورده شود.
- ❖ عنوان جداول در بالای آنها و عنوان شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها نوشته شود.
- ❖ همه مطالب داخل شکل‌ها، نمودارها، تصاویر و جداول به زبان انگلیسی آورده شود.
- ❖ شکل‌ها به صورت JPG در محیط ورد آورده شود و از رسم شکل در محیط ورد خودداری شود.
- ❖ شکل‌های چند قسمتی در قالب یک شکل آورده شود.
- ❖ در شکلهای چند قسمتی که هر کدام از قسمت‌های شکل الف، ب، ... دارند، هم در فایل شکل هم در متن به صورت a، b و ... آورده شوند.
- ❖ اشاره به شکل‌ها، جداول، نمودارها و پیوست در متن به زبان فارسی و به صورت ساده (بدون استفاده از هیچ فرمتی همچون ارجاع دهی در بخش Cross-reference و ...) آورده شود.
- ❖ شکل‌ها خارج از جدول در متن آورده شود.
- ❖ کلمات انگلیسی آورده شده در شکل‌ها، نمودارها، تصاویر و جداول حتماً به صورت پانویس در متن مقاله ذکر شوند.
- ❖ همه فرمول‌ها در محیط Mathtype با سایز ۱۰-۱۱ آورده شوند.
- ❖ همه روابط و علائم ریاضی استفاده شده در متن به صورت equation و با فونت همراه با متن آورده شوند.
- ❖ علائم ریاضی استفاده شده در فرمول‌ها و متن سازگار باشند (از نظر ایتالیک غیر ایتالیک و همینطور بولد و غیربولد بودن).
- ❖ اعداد پارامترها و فرمول‌های استفاده شده در متن به زبان انگلیسی درج شود.
- ❖ کلیه فرمول‌ها و علائم ریاضی در متن با سایز ۱۰-۱۱ در محیط Mathtype آورده شود.
- ❖ شماره تمامی فرمول‌ها خارج از محیط Mathtype، روبه روی فرمول در ورد با اعداد انگلیسی نوشته شود.
- ❖ همه مطالب داخل جداول با فونت ۱۰-۱۱ و تیترا جداول با فونت ۱۲ نوشته شود.
- ❖ خلاصه مقاله به زبان انگلیسی (بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ کلمه) با سایز ۱۱ و فونت Times و فاصله سطر ۱ ارائه شود.

یادآوری مهم و ضروری:

- ❖ کلیه‌ی مراجع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی و با فرمت Harvard باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی [In Persian] داخل براکت قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند.
- ❖ در انتهای مقاله در بخش مراجع، اعداد هر مرجع به صورت مثال های آورده شده ذکر شود (2, 1,),
- ❖ تمامی DOI ها در مراجع به صورت لینک آبی رنگ آورده شود.
- ❖ براساس بخشنامه وزارت علوم و قوانین مجله حتما مراجع به صورت (Harvard) دقیقا طبق نمونه آورده شده (اعم از آوردن نقطه و کاما بعد از هر اسم، پرهیز از آوردن et al سال انتشار بدون پرانتز، ابتدای اولین حرف از اولین کلمه عنوان به صورت بزرگ، اسم ژورنال ایتالیک و ابتدای هر کلمه حرف بزرگ آورده شود. شماره والیوم ایتالیک، شماره دوره ساده آورده می‌شود. شماره گذاری مراجع طبق مثال‌های زیر در انتهای مقاله درج شود.
- ❖ شماره مراجع در متن به زبان فارسی در براکت درج شود.

Examples:

❖ Journals:

1. Sabzevari, S. and Shahabian, F., 2018. Optimum selection of corrugated sandwich panels shape and materials subjected to blast loading .
J. of Structural and Construction Engineering, 5(17), pp.39-52 [In Persian] .
<https://doi.org/10.22065/isce.2018.126299.1531>.

❖ Conference:

2. Pandhare,V., Singh, J. and Lee, J., 2019. Convolutional neural network based rolling-element bearing fault diagnosis for naturally occurring and progressing defects using time-frequency domain features .*In 2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*, pp. 320-326. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/PHM-Paris.2019.00061>

❖ Book:

3. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2002. *Digital Image Processing*, Second Edn., Prentice-Hall., Inc. Newjersey.