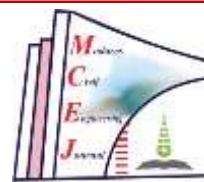




دو ماهنامه

مهندسی عمران مدرّس



دوره ۲۶، شماره ۶، سال ۱۴۰۵ (شماره پیاپی: ۹۲)

نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول: فرهاد دانشجو

- ارزیابی رفتار الگوی اتصال دیوار برشی فولادی بمنظور بهبود عملکرد لرزه‌ای
علی بیگلری فدافن، زهرا علی‌عرب
- بررسی مشخصات تراکم پذیری و مدول الاستیک مخلوط‌های حاوی مصالح بتن بازیافتی، آجرخردشده و pet برای استفاده به عنوان پرکننده خاکریزها
امین اکرامی‌فرد، علی اخترپور
- مطالعه آزمایشگاهی بررسی رفتار و بهسازی میان‌قاب‌های بلوک سفال در بارگذاری خارج از صفحه با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا
محمدجواد زارعی، جلیل شفائی، فرنوش باسلیقه
- ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک
فرآوری شده در دماهای بالا و میانی
حسن الوندی، امیر کاووسی، سینا حاتمی
- ارزیابی کارایی مدل‌های خودهمبسته در پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی در برابر نفوذ آب شور
امین زین‌العابدین، سروش شرقی
- بسط تئوری کلاسیک PFI برای رفتار خمشی در دیوارهای برشی فولادی ویژه با تحلیل‌های غیرخطی برای فولادهای با رده مقاومتی مختلف
محمدحسین اوجاق‌پورملکی، فرنوش باسلیقه، پرویزعبادی
- بررسی آماری طرح مخلوط بهینه در تولید بتن اصلاح شده با استفاده همزمان از پسماندهای مولکولاریسیو و PET
پویا امجدیان، نادر مختارانی

نشانی: تقاطع بزرگراه جلال آل احمد و شهید چمران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،

دفتر نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

نشریه علمی مهندسی عمران مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

صاحب امتیاز:
مدیر مسئول:
سر دبیر:
مدیر داخلی:

دانشگاه تربیت مدرس
دکتر فرهاد دانشجو (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر مسعود قدسیان (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)
زهرا خوئینی ها

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محمد تقی	احمدی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علی اکبر	آقا کوچک	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر بیتا	آیتی	دانشیار	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر عباسعلی	تسنیمی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر فرهاد	دانشجو	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر سید علی اکبر	صالحی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر محمود	صفارزاده	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر مسعود	قدسیان	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر امیر	کاوسی	عضو هیئت علمی	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علی	فاخر	دانشیار	دانشگاه تهران
دکتر محمد	قائمیان	استاد	دانشگاه شریف
دکتر محمد حسن	بازیار	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر غلامرضا	قدرتی امیری	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر پرویز	قدوسی	استاد	دانشگاه علم و صنعت

**اعضای هیئت تحریریه
مشورتی:**

پروفسور علی	فخیمی	استاد	دانشگاه نیومکزیکو
پروفسور جمال	رستمی	استاد	دانشگاه کلرادو
دکتر گودرز	احمدی	عضو هیئت علمی	دانشگاه کارلستون آمریکا
دکتر بهمن	غیاثی	عضو هیئت علمی	دانشگاه بیرمنگام
پروفسور ناصر	خاجی	عضو هیئت علمی	دانشگاه هیروشیما
دکتر محمد	حیدرزاده	عضو هیئت علمی	دانشگاه انگلستان

**هیأت داوران این
شماره:**

آقا کوچک، علی اکبر	دانشگاه تربیت مدرس	فخیمی، احمد	دانشگاه تربیت مدرس
احمدی، مرتضی	دانشگاه تربیت مدرس	قاری قرآن، علیرضا	دانشگاه اصفهان
پاک، علی	دانشگاه شریف	قدرتی امیری، غلامرضا	دانشگاه علم و صنعت
خاجی، ناصر	دانشگاه تربیت مدرس	قزوینیان، عبدالهادی	دانشگاه تربیت مدرس
دردایی، صادق	دانشگاه تربیت مدرس	قنبری، علی	دانشگاه خوارزمی
زهرایی، سید مهدی	دانشگاه تهران	کاوسی، امیر	دانشگاه تربیت مدرس
شاه بیگ، شریف	دانشگاه تربیت مدرس	کاهونی، شاهپور	دانشگاه امیر کبیر
شکیب، حمزه	دانشگاه تربیت مدرس	کوکبی، مهرداد	دانشگاه تربیت مدرس
عامری، محمودرضا	دانشگاه شیراز	ملکی، شروین	دانشگاه شریف
عرب زاده، ابو الفضل	دانشگاه تربیت مدرس	وائقی امیری، جواد	دانشگاه نوشیروانی بابل
عسگریان، بهروز	دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی	هادیانفرد، محمد علی	دانشگاه صنعتی شیراز
علیایی، محمد نوروز	دانشگاه تربیت مدرس	یثربی، شهاب الدین	دانشگاه تربیت مدرس

ویراستار ادبی و فنی: زهرا عزیزی
ویراستار انگلیسی: فاطمه ترابی
کارشناس اجرایی: زهرا خوئینی ها
طراح جلد، حروف چین و صفحه آرا: مسعود سروری

نشانی دفتر مجله:

تهران، تقاطع بزرگراه شهید چمران و آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دفتر مجله علمی مهندسی عمران مدرس

صندوق پستی: ۳۹۷-۱۴۱۵، تلفن و دورنگار: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰، رایانامه: civiljournal@modares.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های علمی ISC و جهاد دانشگاهی SID نمایه می‌شود.

به نام آن که جان را فکرت آموخت.



مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۶، سال ۱۴۰۵

اعتبار علمی - پژوهشی

اعتبار مجله علمی مهندسی عمران مدرس در جلسه مورخ ۱۳۸۸/۱۰/۰۹ کمیسیون نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری مورد ارزیابی قرار گرفت و با درجه علمی - پژوهشی به تأیید رسید و طی نامه شماره ۳/۱۱/۱۶۳۴ به معاونت پژوهشی این دانشگاه ابلاغ گردید. همچنین به موجب قانون مطبوعات، وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، پروانه انتشار این مجله را به شماره ۸۸/۱۴۲۹۸ در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۱۰ صادر کرده است.

راهنمای تهیه و تدوین مقالات

از مؤلفان گرامی تقاضا می‌شود در ارسال مقالات به نکات زیر توجه فرمایند:

۱- زبان رسمی مجله، فارسی است.

۲- مقالات باید پژوهشی و حاصل تحقیق نویسنده یا نویسندگان در زمینه مهندسی عمران و محیط زیست (سازه، زلزله، سازه‌های هیدرولیکی، سازه‌های دریایی، خاک و پی، راه و ترابری، برنامه‌ریزی حمل و نقل، آب و محیط زیست) بوده و قبلاً چاپ نشده یا به طور همزمان به مجلات دیگر ارسال نشده باشد.

۳- مقالات قابل چاپ در مجله به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف- مقالات کامل پژوهشی: مقالات علمی- پژوهشی با حداقل حجم ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ کلمه (یا معادل آن) حداکثر در ۱۲ صفحه (تعداد صفحات مقاله، عدد زوج باشد).

ب- یادداشت‌های کوتاه پژوهشی: مقالات علمی پژوهشی با حداکثر ۲۵۰۰ کلمه (یا معادل آن) حداکثر در ۱۰ صفحه (تعداد صفحات مقاله، عدد زوج باشد).

تبصره ۱: مقالات مروری (Review Article)، از نویسندگان مجرب و صاحب مقالات پژوهشی در زمینه مورد بحث پذیرفته خواهد شد.

تبصره ۲: مقالات ترجمه، پذیرفته نمی‌شود.

۴- مقالات ارسالی باید دارای بخش‌های زیر باشند:

الف- نام نویسنده یا نویسندگان، نام نویسنده مسئول مکاتبات با ستاره مشخص شود؛ نام مؤسسه متناظر هر یک از نویسندگان، نشانی کامل نویسنده مسئول مکاتبات شامل نشانی پستی، شماره فکس و رایانامه.

ب- عنوان کامل مقاله به فارسی، چکیده فارسی، کلید واژگان فارسی، عنوان کامل مقاله به لاتین، نام و نشانی نگارندگان به زبان انگلیسی، چکیده لاتین، کلید واژگان لاتین.

ج- مقدمه، بدنه مقاله (شامل شرح مسأله، روش حل، تفسیر، تحلیل و نتایج)، نتیجه‌گیری، سپاسگزاری، فهرست مراجع.

د- چکیده مقاله (Extended Abstract) حاوی حداکثر یک صفحه و در حداقل ۵۰۰ کلمه ارائه شود.

۵- اصلاحات خارجی با معادلی دقیق و رسا در زبان فارسی باشد و عبارات اختصاری به کار رفته در متن به زیرنویس ارجاع شود.

۶- محل ارجاع عکس‌ها و جدول‌ها، شکل‌ها و نمودارها به طور دقیق ضمن رعایت ترتیب آن‌ها در متن معین شده، ارسال اصل جدول‌ها و شکل‌ها با کیفیت ۳۰۰dpi به صورت سیاه و سفید در محیط اکسل ضروری است. برای جدول‌ها و شکل‌ها، به ترتیب عناوین فارسی و معادل انگلیسی آن‌ها (بلافاصله) در بالا و زیر آن‌ها قرار گیرد. در شکل‌ها و جدول‌ها از خطوط افقی و عمودی (grid) استفاده نشود. جدول‌ها و شکل‌ها بدون کادر و شکل‌های حاوی نمودار فقط دارای محور عمودی و افقی باشند.

- ۷- تعیین محل دقیق مراجع در متن و فهرست نمودن مراجع به ترتیب ظهور در متن مقاله ضروری است. عنوان قسمت مراجع به انگلیسی (References) نیز نوشته شود.
- ۸- شیوه نگارش مشخصات مراجع به شرح زیر است:
- الف. کتاب: نام خانوادگی، نام نویسنده یا نویسندگان، نام کتاب، نام مترجم، محل نشر، نام ناشر، تاریخ انتشار، شماره صفحات.
- ب. مقاله: نام خانوادگی، نام نویسنده یا نویسندگان، عنوان مقاله، نام نشریه، دوره (جلد)، سال انتشار، شماره صفحات.
- ۹- مقالات باید در صفحه A4 با حاشیه چپ و راست ۱/۵ cm در دو ستون با فاصله ۱ cm از هم (به جز برای تصاویر و جداول بزرگ) و با فاصله میان سطور Single با قلم B Lotus نازک ۱۲ برای محتویات فارسی و قلم Times New Roman نازک ۱۰ برای محتویات انگلیسی و استفاده از استایل Normal و شماره گذاری دستی عناوین بخش ها و قسمت ها به همراه Bold کردن سطر مرتبط، تحت نرم افزار Word ۲۰۱۰ تایپ شود؛ و نویسنده مقاله پس از ثبت نام در سامانه نشریات سایت دانشگاه تربیت مدرس به آدرس زیر این صفحه مراجعه و کلیه مراحل ثبت و ارسال مقاله را سپری و با حفظ کد مقاله خود برای پیگیری های بعدی، از طریق سامانه نشریات اقدام نمایند.
- ۱۰- مقالات برگرفته از پایان نامه و رساله دانشجویان دکتری با نام استاد(ان) راهنما، مشاور(ان) و دانشجو به صورت تئام منتشر می شود؛ لذا استاد راهنما عهده دار مسئولیت و نویسنده رابط خواهند بود.
- ۱۱- مسئولیت صحت و سقم مطالب بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود.
- ۱۲- مجله علمی مهندسی عمران مدرس حق رد یا قبول مقالات را برای خود محفوظ می دارد.

نشانی دفتر مجله:

تهران، تقاطع بزرگراه شهید چمران و آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

دفتر مجله علمی مهندسی عمران مدرس

صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۵، تلفن و نمابر: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰

آدرس سامانه نشریه: <http://civil.journals.modares.ac.ir>

پست الکترونیکی: civiljournal@modares.ac.ir

این نشریه در پایگاه های اطلاعات علمی ISC و جهاد دانشگاهی SID نمایه می شود.

عنوان مقاله و نام نویسندگان	صفحه
ارزیابی رفتار الگوی اتصال دیوار برشی فولادی بمنظور بهبود عملکرد لرزه‌ای علی بیگلری فدافن، زهرا علی‌عرب	۷
بررسی مشخصات تراکم پذیری و مدول الاستیک مخلوط‌های حاوی مصالح بتن بازیافتی، آجرخردشده و pet برای استفاده به عنوان پرکننده خاکی‌ها امین اکرامی‌فرد، علی اخترپور	۲۱
مطالعه آزمایشگاهی بررسی رفتار و بهسازی میان‌قاب‌های بلوک سفال در بارگذاری خارج از صفحه با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا محمدجواد زارعی، جلیل شفائی، فرنوش باسلیقه	۳۷
ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فرآوری شده در دماهای بالا و میانی حسن الوندی، امیر کاووسی، سینا حاتمی	۵۳
ارزیابی کارایی مدل‌های خودهمبسته در پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی در برابر نفوذ آب شور امین زین‌العابدین، سروش شرقی	۶۷
بسط تئوری کلاسیک PFI برای رفتار خمشی در دیوارهای برشی فولادی ویژه با تحلیل‌های غیرخطی برای فولادهای با رده مقاومتی مختلف محمدحسین اوجاقپورملکی، فرنوش باسلیقه، پرویزعبادی	۸۵
بررسی آماری طرح مخلوط بهینه در تولید بتن اصلاح شده با استفاده همزمان از پسماندهای مولکولاریسیو و PET پویا امجدیان، نادر مختارانی	۱۰۱

Evaluation of steel shear wall connection pattern behavior in order to improve seismic performance

Ali Biglari Fadafan^{1*}, Zahra Aliarab²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.
2. M.Sc. in Structural Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

Abstract

Steel plates are widely used in various industries, especially in civil engineering. Low cost in implementation and reduction of seismic mass are the advantage of steel shear wall system compared to other structural systems. The goal of a good design is that along with following the existing guidelines and achieving the desired seismic resistance of the structure, the structure is affordable in terms of weight and cost. Considering that according to the design, it is not possible to achieve the optimal use of the structure's capacity by force control method, the theory of uniform deformations was proposed with the assumption of a constant performance level. The subject of design based on performance increase the safety of the structure against earthquake force and design with optimal seismic performance during the useful life of the structure in seismic areas. Also, compared to the design method based on force control, it can lead to a lighter and economical design.

One of the significant ways to reduce the weight and stiffness of shear walls and boundary elements connected to them is to limit the connection of filler plates to boundary elements. In this method, limiting the length of the connection reduces the force on the beams and columns, and as a result, smaller sections can be used.

In this research, in order to achieve the optimal performance level, two concrete frames with steel shear wall resistant system are subjected to nonlinear analysis. Then, the initial evaluation of the behavior and the correctness of the used method are checked. After that, the effective factors in achieving uniform stress in the height of the structure will be investigated. For this purpose, by using the effect of the thickness parameter and the appropriate pattern of connection of the shear steel plate to the surrounding elements, the way of changing the performance and behavior of the structure will be investigated. For this purpose, 3- and 4-story concrete frames with steel shear wall systems were modeled using ABAQUSTM finite element software. The steel used in the steel shear wall system is ST37. First, the connection of steel shear plates to floor beams was considered and then the influence of the partial connection pattern on the seismic performance of the steel shear wall system was investigated. The modeled frames were subjected to dynamic analysis, linear and nonlinear buckling analysis, and cyclic analysis. Based on the obtained results, the property of energy dissipation in the frame with a steel shear wall system with partial connection has increased significantly. Changing the partial connection pattern led to changing the initial stiffness of the structure and the maximum in-plan relative displacement. Also, the surface of the stress distribution shows that in the partial connection, the stress concentration mainly occurred in the place of the steel shear plate connections. In addition, according to the results of cyclic analysis, considering the partial connection of the steel shear wall has led to a decrease in the average energy absorbed in the structure and an increase in its ductility. Also, changing the connection pattern has affected the average amount of absorbed energy in different loading cycles.

Review History

Received: Jan 25, 2024

Revised: May 9, 2024

Accepted: Aug 14, 2026

Keywords

Partial connection

Steel plate

Shear loading

Energy absorption

Finite element analysis

* Corresponding Author Email: a.biglari@gu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9616-1823



ارزیابی رفتار الگوی اتصال دیوار برشی فولادی بمنظور بهبود عملکرد لرزه‌ای

علی بیگلری فدافن^{۱*}، زهرا علی‌عرب^۲

۱. استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۲. کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این پژوهش به بررسی رفتار و عملکرد سیستم جانبی دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن الگوی اتصال جزئی پرداخته شده است. به این منظور قاب‌های بتنی ۳ و ۴ طبقه دارای سیستم دیوار برشی فولادی با بکارگیری نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شدند. ابتدا اتصال صفحات برشی فولادی به صورت سرتاسری به تیرهای طبقات در نظر گرفته شد و سپس به بررسی تاثیر الگوی اتصال به صورت جزئی روی عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی پرداخته شد. قاب‌های مدل‌سازی شده تحت تحلیل دینامیکی، تحلیل خطی و غیرخطی کماتشی و تحلیل سیکلی قرار گرفتند. براساس نتایج به دست آمده خاصیت استهلاک انرژی در قاب دارای سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال جزئی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. تغییر الگوی اتصال جزئی، منجر به تغییر سختی اولیه سازه و بیشترین جابه‌جایی نسبی درون صفحه شد. همچنین، سطح توزیع تنش‌ها نشان می‌دهد که در اتصال جزئی تمرکز تنش عمدتاً در محل اتصالات صفحه برشی فولادی رخ داده است. علاوه بر این، طبق نتایج تحلیل سیکلی، در نظر گرفتن اتصال جزئی دیوار برشی فولادی منجر به کاهش متوسط انرژی جذب شده در سازه و افزایش شکل‌پذیری آن شده است. همچنین، تغییر الگوی اتصال روی مقدار متوسط انرژی جذب شده در سیکل‌های مختلف بارگذاری تاثیرگذار بوده است.

کلمات کلیدی

اتصال جزئی

صفحه فولادی

بارگذاری برشی

جذب انرژی

تحلیل المان محدود

۱- مقدمه

توجه به مزایا و گسترش کاربردهای این سیستم سازه‌ای از گذشته تا به امروز پژوهش‌های زیادی در خصوص رفتار و عملکرد دیوارهای برشی فولادی از طریق روش‌های آزمایشگاهی، تئوری و عددی انجام شده است. پژوهشگران با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود و روش‌های عددی به مطالعه رفتار صفحات تحت بار برشی پرداخته‌اند. در نهایت با ارائه منحنی‌های تغییرشکل داخل صفحه و خارج از صفحه و منحنی‌های هیستریزس، کماتش، تسلیم، جذب انرژی و شکل‌پذیری صفحات با مصالح و ضخامت‌های متفاوت را مورد بررسی قرار داده‌اند. از جمله می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط

صفحات فولادی کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله کشتی‌سازی، هوافضا و به ویژه مهندسی سازه دارند. از موارد استفاده صفحات فولادی در مهندسی سازه می‌توان به اصول مهندسی پل، دیوارهای برشی فولادی، جان تیرهای همبند در مهاربندی واگرا، تیروورها و شاه‌تیرهای جعبه‌ای اشاره کرد [1]. هزینه کمتر در اجرا، قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری قابل توجه، مقاومت و سختی اولیه بالا، سرعت بالای اجرا و کاهش جرم لرزه‌ای از مزایای سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای می‌باشند [2, 3, 4]. با

* رایانامه نویسنده مسئول: a.biglari@gu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9616-1823

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



مرزی بر تنش‌های خمشی و الگوی تسلیم صفحات با ضخامت‌های مختلف تأثیرگذار نیست. همچنین، عکس‌العمل غشایی و خمشی صفحه با افزایش ضخامت آن، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد [22]. از پژوهشگرانی که پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف تنش کماتشی صفحات تحت بارگذاری برشی انجام داده‌اند می‌توان به اینو، ۱۹۹۶ [23]، اسمیت، ۲۰۰۳ [24] و وانگ و انگ، ۲۰۰۷ [25] اشاره کرد. علاوه بر این، مطالعاتی در خصوص پایداری المان‌های صفحه‌ای و طراحی صفحات جان، و بطور ویژه، صفحات تقویت نشده که در معرض بارهای برشی قرار می‌گیرند [26]، و به طور خلاصه در مورد المان‌های صفحه‌ای و اعضایی که در معرض کماتش موضعی قرار دارند، صورت گرفته است [27].

گرچی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [28] مطالعاتی در راستای چگونگی تأثیر ضخامت صفحه پرکننده، اتصالات تیر به ستون و مقاومت تسلیم صفحه پرکننده و المان‌های پیرامونی بر رفتار سازه و ظرفیت دیوارهای برشی فولادی انجام دادند. نتایج آنها طی بارگذاری‌های یکنواخت و سیکلی نشان داد که اتصال صلب تیر به ستون می‌تواند عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی را بهبود ببخشد و با انتخاب ابعاد مناسب المان‌های پیرامونی، به ویژه المان‌های قائم، ظرفیت نهایی دیوار برشی فولادی را ۳۵٪-۵ افزایش دهد. از طرفی پارامتر صلبیت ستون (RCP) نشان داد که $RCP \leq 1$ می‌تواند توسعه گسترده میدان کششی جان و اندرکنش مطلوب بین قاب و صفحه پرکننده را تضمین کند که در نتیجه به عملکرد بالای سیستم دیوار برشی فولادی منجر می‌شود. طبق مدل‌های رفتاری که طی مطالعات عددی و تحلیلی در آنالیز استاتیکی و دینامیکی دیوارهای برشی فولادی پیشنهاد شده است، صفحه پرکننده به عنوان فیوز در سازه عمل می‌کند و با ورود به ناحیه غیرخطی از طریق تغییرشکل‌های برشی پلاستیک سبب جذب انرژی سیستم می‌شود. علاوه بر این تنش ناشی از میدان کششی قطری در صفحه پرکننده حائز اهمیت است و می‌تواند بر المان‌های مرزی افقی و قائم (HBE و VBE) دیوارهای برشی فولادی و تعیین ابعاد مقاطع آنها تأثیرگذار باشد. برای کاهش اثر میدان کششی روش‌هایی مانند استفاده از صفحات دارای بازشو [29، 30]، صفحات دارای شکاف [31، 32] و استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین در صفحه پرکننده پیشنهاد شده است [13]. از روش‌های قابل توجه در کاهش وزن و سختی دیوارهای برشی فولادی و المان‌های مرزی متصل به آنها،

کولاک و تیملر [5]، ترامپوچ و کولاک [6]، رابرتس و صبور قومی [7]، ایلگالی و همکاران [8]، درایور و همکاران [9]، ایلگالی [10]، لوبل و همکاران [11]، ذوقی و همکاران [12]، گرجی و همکاران [13]، چن و همکاران [14]، کی آئو و همکاران [15]، ما و لیو [16] و فان و همکاران [17] اشاره کرد. براساس دستورالعمل آشتو [18] صفحات فولادی برشی با توجه به نسبت لاغری‌شان به سه دسته لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در صفحات لاغر، ظرفیت کماتش برشی صفحه (V_{cr}) کوچکتر از ظرفیت برشی حد خطی آن (V_p) است (کوماتش در محدوده الاستیک رخ می‌دهد). در صفحات متوسط، ظرفیت کماتش برشی صفحه (V_{cr}) بین ظرفیت برشی حد خطی (V_p) و ظرفیت اسمی تسلیم برشی (V_y) قرار می‌گیرد (کوماتش در محدوده غیرالاستیک رخ می‌دهد). در صفحات ضخیم نیز ظرفیت کماتش برشی صفحه (V_{cr}) بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن (V_y) است (کوماتش در محدوده پلاستیک رخ می‌دهد) [18]. طراحی مطلوب و بهینه دیوارهای برشی فولادی لاغر، که در گروه سازه‌های جدارنازک قرار می‌گیرند، منجر به مقاومت پس از کوماتش مناسبی در این نوع سیستم خواهد شد [19]. ظرفیت برشی یک دیوار پرکننده به واسطه صلبیت اعضای قاب پیرامونی تغییر می‌کند [20]. در مراحل اولیه بارگذاری صفحات پرکننده بخش قابل توجهی از برش طبقه را جذب می‌کنند. سپس با توسعه تسلیم قطری در صفحه، اعضای قاب مرزی سهم بیشتری در برش طبقه خواهند داشت [21].

علاوه بر این، طبق نتایج بدست آمده توسط علی‌نیا و همکاران، بر اساس روش غیرخطی المان محدود با تغییرشکل‌های بزرگ [22] روی صفحات برشی، مشاهده می‌شود تفاوت در تنش‌های میان‌صفحه‌ای در دو وجه صفحه پس از شروع پدیده کوماتش آغاز شده و با ادامه روند بارگذاری به طور قابل ملاحظه‌ای گسترش می‌یابد. تغییرشکل‌های خمشی خارج از صفحه علت ایجاد این اختلاف در توزیع تنش صفحه می‌باشد که از طرف دیگر می‌تواند بر عملکرد صفحه برشی در ناحیه پس از کوماتش و الگوی تسلیم آنها بسیار تأثیرگذار باشد. علی‌نیا و همکاران نشان دادند که غیرخطی شدن ناشی از تسلیم مصالح در یک وجه صفحه سریع‌تر از وجه دیگر آغاز می‌شود و در مرحله انتهایی بارگذاری، هر دو وجه صفحه به نقطه تسلیم می‌رسند. به علاوه بخش عمده‌ای از رفتار پس از کوماتش صفحات فولادی برشی لاغر ناشی از غیرخطی شدن هندسی صفحه است، در حالیکه غیرخطی شدن مصالح در آخرین مراحل بارگذاری رخ می‌دهد. نتایج آنها نشان داد که شرایط

از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین موضوعات در زمینه مهندسی سازه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله بر مبنای روش طراحی بر مبنای عملکرد می‌باشد [40]. مبحث طراحی بر مبنای عملکرد (PBD) سبب افزایش ایمنی سازه در برابر نیروی زلزله و طراحی با عملکرد لرزه‌ای مطلوب در طول عمر مفید سازه در نواحی لرزه‌خیز می‌شود. همچنین نسبت به روش طراحی براساس کنترل نیرو می‌تواند منجر به طراحی سبک‌تر و مقرون بصره‌ای از لحاظ اقتصادی باشد.

در این پژوهش به منظور دستیابی به سطح عملکرد مطلوب، دو قاب بتنی دارای سیستم مقاوم دیوار برشی فولادی تحت آنالیز غیرخطی قرار می‌گیرند. سپس ارزیابی اولیه رفتار و درستی آزمای روش استفاده شده، بررسی می‌شود. پس از آن به بررسی عوامل موثر در رسیدن به تنش یکنواخت در ارتفاع سازه پرداخته خواهد شد. به این منظور با استفاده از تاثیر پارامتر ضخامت و ارائه الگوی مناسب اتصال صفحه فولادی برشی به المان‌های پیرامونی چگونگی تغییر عملکرد و رفتار سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مدل‌سازی

در این پژوهش به بررسی تاثیر تنش یکنواخت بر عملکرد سیستم باربر دیوار برشی فولادی پرداخته شده است. منظور از تنش یکنواخت در این مقاله رسیدن دیوارهای برشی فولادی سیستم سازه‌ای به تنش نسبتاً یکسان در لحظه وقوع کماتش می‌باشد. به این منظور دو قاب بتنی ۳ طبقه و ۴ طبقه، با سیستم باربر دیوار برشی فولادی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUSTM تحت آنالیز قرار گرفته‌اند. در این بررسی صفحات برشی فولادی هیچگونه اتصالی به ستون‌های طبقات ندارند و فقط به تیرها متصل شده‌اند. ابتدا به بررسی اتصال سرتاسری صفحات فولادی دارای ضخامت‌های متغیر به تیرهای طبقات پرداخته شده است (Full Plate-FP). سپس با استفاده از نبشی‌های ۲۰ سانتی متری در ابتدا و انتهای صفحه، اتصال صفحات برشی به تیرهای طبقات محدود شده است (End Start-ES). در مرحله بعدی ضخامت صفحات برشی فولادی ثابت (۲ میلی‌متر) در نظر گرفته شده و محل قرارگیری نبشی‌های اتصال در ارتفاع سازه متغیر می‌باشد (Same Thickness-ST) (شکل ۱). تمام تلاش‌های صورت گرفته در هر سه حالت برای دستیابی به تنش ثابت در

محدود کردن اتصال صفحات پرکننده به المان‌های مرزی می‌باشد. در این روش محدود کردن طول اتصال باعث کاهش نیروی وارده به تیرها و ستون‌ها می‌شود و در نتیجه می‌توان از مقاطع کوچک‌تری استفاده کرد [33]. طی پژوهشی در سال ۱۹۸۳ عملکرد دیوارهای برشی فولادی با اتصال کامل و اتصال جزئی مورد بررسی قرار گرفت [34]. در نهایت یک مدل نواری به منظور پیش‌بینی ظرفیت دیوارهای برشی فولادی با صفحات پرکننده لاغر ارائه شد. همچنین در این بررسی مقدار زاویه میدان کششی محاسبه شد. بررسی‌های آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۱ [35] در مورد رفتار دیوارهای برشی فولادی در حالتی که صفحات پرکننده فقط به المان‌های افقی پیرامونی متصل باشند انجام شد. در این پژوهش دو سیستم دیوار برشی فولادی با مقیاس ۱:۳ تحت آزمایش قرار گرفتند. در یکی از نمونه‌ها لبه‌های ورق جان آزاد بوده و در نمونه آزمایشگاهی دیگر لبه‌های ورق پرکننده با سخت‌کننده‌ها تقویت شده بودند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که صفحات جان متصل به تیر از قابلیت شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی خوبی برخوردار هستند. ظرفیت جذب انرژی در صفحه جان تقویت شده بیشتر از صفحه جان تقویت نشده بود. با این حال، سخت‌کننده‌ها بر ظرفیت نهایی و پارامتر شکل‌پذیری موثر نبودند. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ صورت گرفت [33] با هدف کاهش آسیب ناشی از توسعه میدان کششی به المان‌های مرزی، دیوارهای برشی فولادی به صورت محدود در گوشه‌ها، به المان‌های مرزی متصل شدند. نتایج ارائه شده نشان دادند که نمونه‌های پیشنهادی عملکرد خوبی از نظر سختی اولیه، برش، شکل‌پذیری و جذب انرژی دارا می‌باشند. پژوهش‌های انجام شده در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ [36، 37] نشان داد که دیوارهای برشی فولادی با صفحات جان متصل به تیر رفتار لرزه‌ای خوبی از خود نشان دادند و می‌توان آنها را به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در مناطق با سطوح با لرزه‌خیزی متوسط و پایین بکار گرفت.

هدف از یک طراحی مطلوب آن است که در کنار رعایت ضوابط و دستورالعمل‌های موجود و در نتیجه رسیدن سازه به مقاومت لرزه‌ای مطلوب، سازه از لحاظ وزن و هزینه مقرون به صرفه باشد [38]. بر مبنای مطالعات صورت گرفته و با توجه به اینکه طبق طراحی بر اساس کنترل نیرو نمی‌توان به استفاده بهینه از ظرفیت سازه دست یافت، تئوری تغییر شکل‌های یکنواخت با فرض سطح عملکرد ثابت مطرح شد [39]. یکی

انجام شده ارتفاع طبقات ۳ متر و دهانه‌ها ۵ متر در نظر گرفته شده است. مقاطع تیر و ستون بتنی مورد استفاده به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر و با در نظر گرفتن حداقل آرماتور مجاز انتخاب شده است.

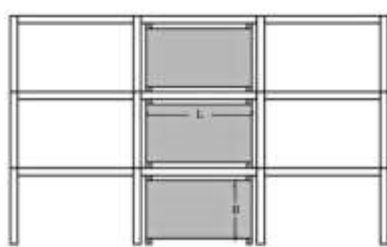
علاوه بر این هر ۴ قاب مورد بررسی تحت انواع تحلیل‌های کمناشی (خطی و غیرخطی)، دینامیکی و سیکلی قرار گرفته‌اند. جدول و شکل (۲) مشخصات فولاد استفاده شده در مدلسازی دیوارهای برشی فولادی را نشان می‌دهند. در شکل (۱) الگوی قرارگیری نبشی‌های اتصال در قاب‌های مدلسازی شده به صورت شماتیک نشان داده شده است.

صفحات برشی فولادی در ارتفاع سازه صورت گرفته است. در قاب‌های مدلسازی شده ارتفاع طبقات ۳ متر، دهانه‌ها به عرض ۵ متر می‌باشد. ضخامت دیوارهای برشی فولادی به نحوی انتخاب شده است که کمناش صفحات فولادی در طبقات مختلف سازه در تنشی یکسان رخ دهد. با توجه به ضخامت‌های انتخاب شده رفتار دیوارهای برشی فولادی در محدوده کمناش الاستیک (صفحات فولادی لاغر و بسیار لاغر) می‌باشد [41, & 18]. جدول (۱) ضخامت‌های مورد استفاده در قاب‌های بتنی و مقدار تنش را در لحظه کمناش صفحات فولادی نشان می‌دهد. در مدلسازی‌های

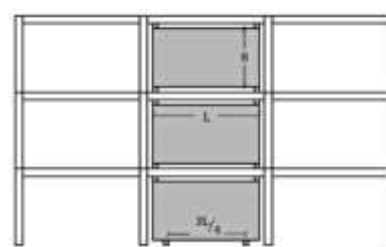
جدول ۱. ضخامت صفحات برشی فولادی استفاده شده در مدلسازی و تنش صفحات در لحظه کمناش

Table 1. Thickness of steel shear plates used in modeling and plate stress in buckling moments

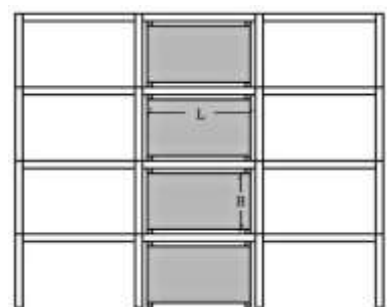
اتصال جزئی (ES)		اتصال جزئی (ST)		اتصال سراسری (FP)		شماره طبقات	t	تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)	تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)
تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)	تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)	تنش تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)						
۶۱۵/۳	۲/۰۵	۶/۰	۲	۵۴۳/۳	۲/۷	۱					
۶۵۰/۲	۲	۶/۳	۲	۵۲۸	۲/۸۶	۲					
۶۵۲/۸	۲/۱۸	۶/۴	۲	۵۳۲/۵	۱/۹۴	۳					
۶۸۳/۶	۲/۱	۶/۴	۲	۵۰۱/۱	۲/۵	۱					
۶۹۵/۲	۲	۶/۴	۲	۵۰۰/۷	۳/۲	۲					
۶۸۰/۷	۲	۶/۳	۲	۵۰۳/۶	۳/۰۵	۳					
۶۸۷/۱	۱/۷۳	۶/۱	۲	۵۰۴/۵	۱/۸	۴					



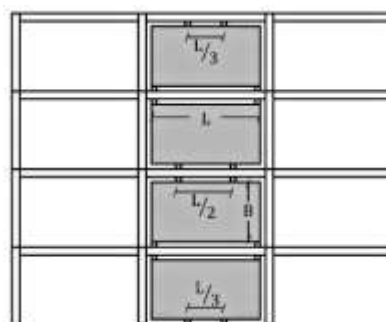
(ب) قاب ۳ طبقه، ضخامت صفحات فولادی متغیر و محل قرارگیری نبشی‌ها ثابت (ES)



(ف) قاب ۳ طبقه، ضخامت صفحات فولادی ثابت و محل قرارگیری نبشی‌ها متغیر (ST)



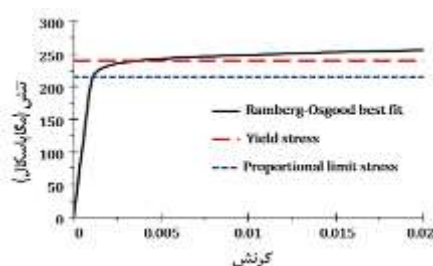
(د) قاب ۴ طبقه، ضخامت صفحات فولادی متغیر و محل قرارگیری نبشی‌ها ثابت (ES)



(ج) قاب ۴ طبقه، ضخامت صفحات فولادی ثابت و محل قرارگیری نبشی‌ها متغیر (ST)

شکل ۱. چگونگی قرارگیری نبشی‌ها در محل اتصال صفحات فولادی به تیرها

Fig. 1. How to place the corners in the place where the steel plates are connected to the beams



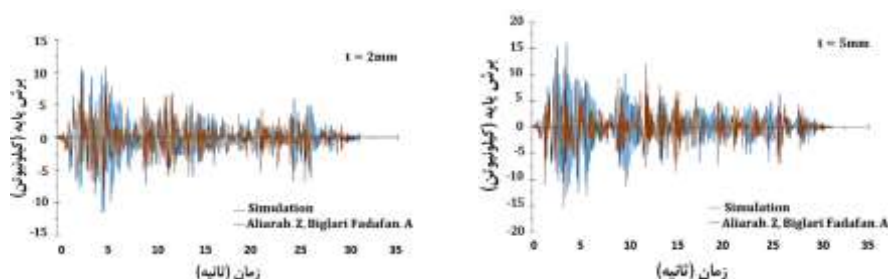
شکل ۲. منحنی تنش کرنش اسگود رامبرگ فولاد ساختمانی

Fig. 2. Ramberg-Osgood Curve

جدول ۲. مشخصات فولاد ساختمانی

Table 2. St37 characters

	E (GPa)	E_t (GPa)	σ_y (MPa)	τ_y (MPa)	σ_p (MPa)	τ_p (MPa)	ν
St 37	۲۱۰	۰/۹	۲۴۰	۱۳۸/۶	۲۱۵	۱۲۴/۱	۰/۳



شکل ۳. نتایج درستی آزمایشی شبیه سازی انجام شده [42]

Fig 3: The result of simulation verification have been done

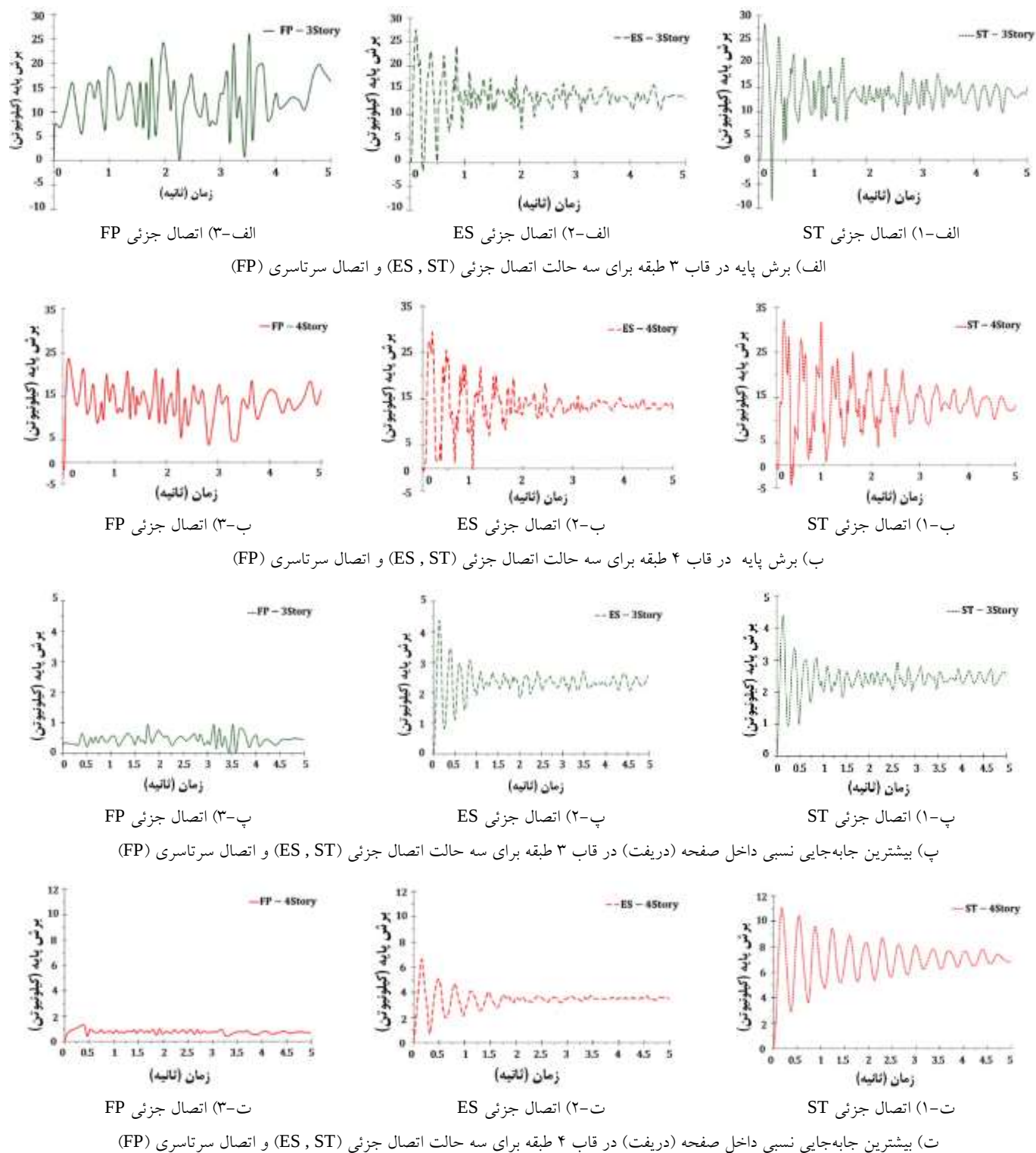
۴- ارائه نتایج

در شکل‌های (۴-الف و ۴-ب) نتایج مربوط به برش پایه و در شکل‌های (۴-پ و ۴-ت) نتایج مربوط به بیشترین جابه‌جایی داخل صفحه بر حسب زمان نشان داده شده است. مدل‌ها تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته‌اند. طبق نتایج به دست آمده، در حالت کلی هم در قاب ۳ طبقه و هم در قاب ۴ طبقه با محدود کردن اتصال دیوارهای برشی فولادی به تیرهای طبقات خاصیت میرایی و استهلاک انرژی در سازه افزایش یافته است. در شکل‌های (۴-پ و ۴-ت) با تبدیل اتصال از حالت سرتاسری به حالت جزئی مقدار جابه‌جایی نسبی داخل صفحه، هم در قاب ۳ طبقه و هم در قاب ۴ طبقه افزایش یافته است.

همچنین، در سازه ۴ طبقه شکل (۴-ت) در حالت اتصال جزئی ST نسبت به اتصال جزئی ES مقدار جابه‌جایی نسبی داخل صفحه افزایش بیشتری داشته است.

۳- ارزیابی اولیه رفتار و درستی آزمایشی مدلسازی

به منظور ارزیابی اولیه و درستی آزمایشی مدلسازی انجام شده، سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال جزئی در قاب سه طبقه بتن آرمه با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUSTM تحت آنالیز قرار گرفت. در قاب مدلسازی شده با استفاده از شتابنگاشت زمین لرزه السنترو تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی صورت گرفت. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهشی که تازگی انجام شده [42] مقایسه شد. در پژوهش قبلی [42] سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال سرتاسری و اتصال جزئی به منظور رسیدن به جابه‌جایی نسبی داخل صفحه یکنواخت تحت آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در شکل (۳) درستی مدلسازی صورت گرفته را در پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

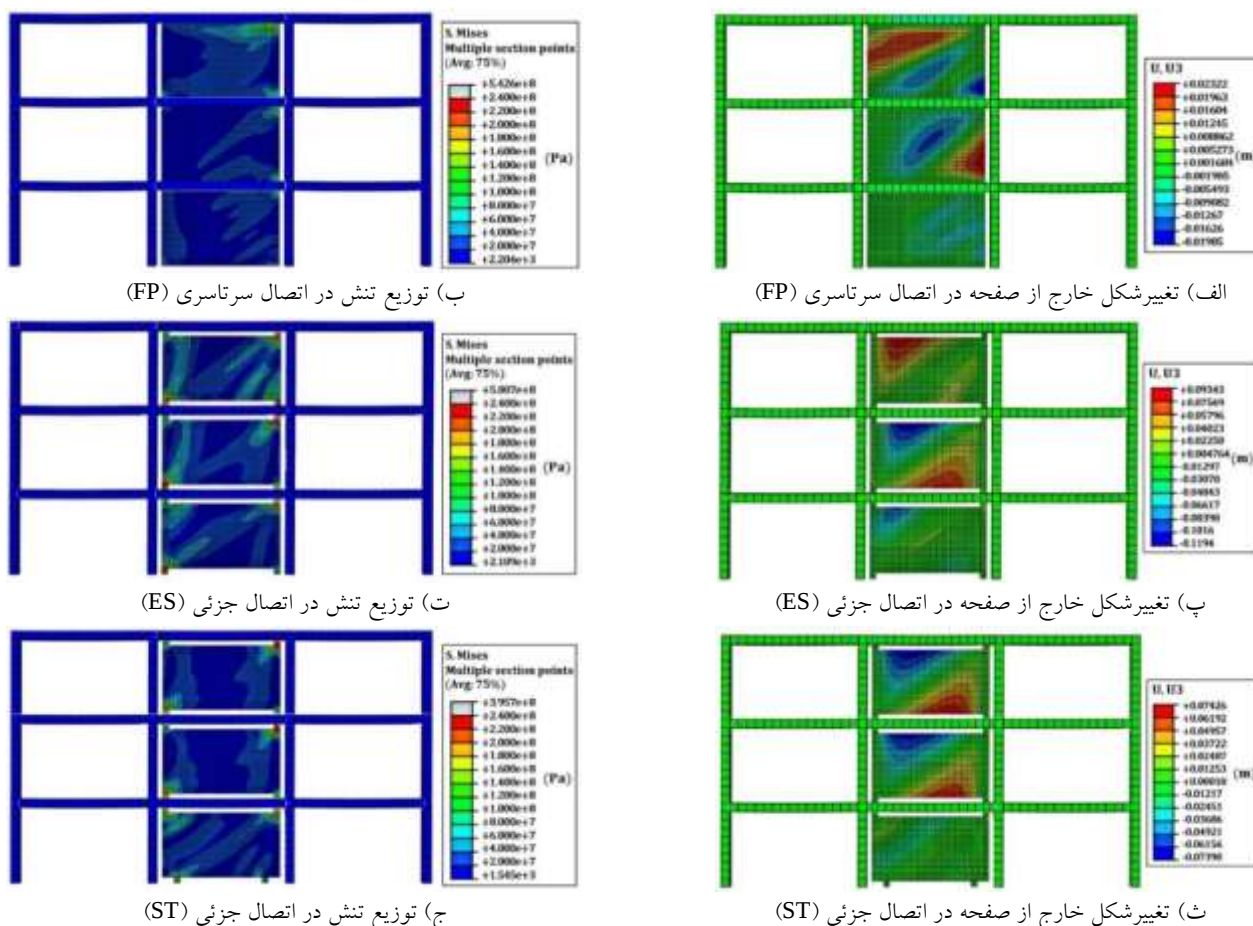


شکل ۴. مقایسه جابه‌جایی نسبی داخل صفحه (دریفت) و برش پایه در ۳ حالت اتصال جزئی (ST, ES) و اتصال سرتاسری (FP)

Fig. 4. Comparison of relative in-plane displacement and base shear in 3 modes of partial connection and end-to-end connection

گوشه‌های اتصال می‌باشد و با توجه به توسعه میدان کششی توزیع تنش قطری در ارتفاع سازه ایجاد می‌شود.

شکل (۵ و ۶)، توزیع تنش و تغییر شکل‌های خارج از صفحه را در قاب‌های ۳ طبقه و ۴ طبقه نشان می‌دهد. در حالت کلی با ایجاد اتصال جزئی دیوارهای برشی فولادی تمرکز تنش در



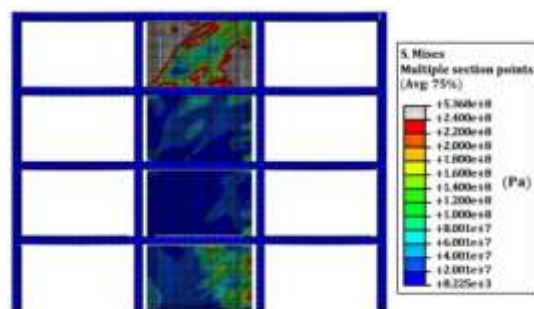
شکل ۵. نمایش توزیع تنش و تغییر شکل‌های خارج از صفحه در قاب ۳ طبقه

Fig. 5. Showing stress distribution and out-of-plane deformations in a 3 stories frame

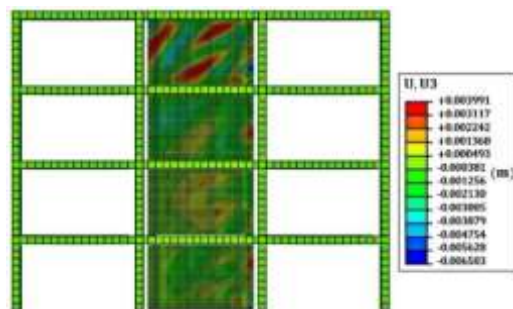
همچنین در حالت FPST در لحظه وقوع کماتش دیوار برشی فولادی در طبقات مختلف، تنش ثابتی در صفحات فولادی اتفاق نمی‌افتد. مشاهده می‌شود در قاب ۳ طبقه، در حالت FP و FPST جابه جایی نسبی داخل صفحه سازه در طبقات مختلف اختلاف قابل توجهی ندارد. از طرفی در حالت‌های ES و ST که اتصال صفحه فولادی به تیر به صورت جزئی تعریف شده است همزمان با افزایش بیشترین جابه جایی نسبی داخل صفحه سازه، اختلاف قابل توجهی در دریافت طبقات سازه با تغییر محل نبشی‌های اتصال رخ نمی‌دهد. ولی در قاب ۴ طبقه روند مشابهی دیده نمی‌شود و با تغییر محل قرارگیری نبشی‌های اتصال، بیشترین جابه جایی نسبی داخل صفحه در طبقات مختلف تغییر خواهد کرد. در دو حالت دارای اتصال سرتاسری نیز در قاب ۴ طبقه اختلاف بیشتری در مقدار بیشترین جابه جایی نسبی داخل صفحه وجود دارد.

در قاب ۴ طبقه در طبقه ۴ ام، سطح توزیع تنش نسبت به طبقات پایین تر بسیار گسترده تر می‌باشد. به علت اینکه طبق تحلیل خطی کماتشی انجام شده ضخامت صفحات بر مبنای توزیع تنش یکنواخت در لحظه وقوع کماتش انتخاب شده‌اند. با توجه به جدول (۱) نسبت لاغری صفحه برشی فولادی در این طبقه به گونه‌ای است که در صفحه فولادی در محدوده رفتاری بسیار لاغر قرار می‌گیرد [43] و تغییر توزیع تنش در این طبقه براساس مطالعاتی که در گذشته انجام شده می‌تواند ناشی از تفاوت رفتاری صفحات فولادی لاغر و بسیار لاغر باشد.

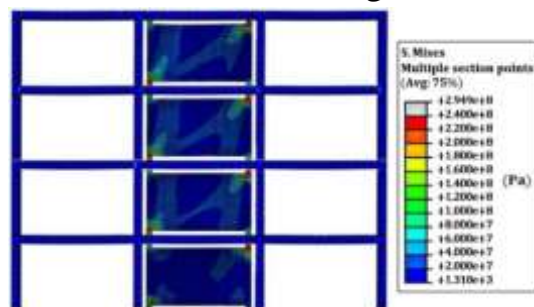
در شکل (۷) بیشترین جابه جایی نسبی داخل صفحه در طبقات مختلف در مدل‌های ۳ و ۴ طبقه نشان داده شده است. نتایج به دست آمده با حالتی که دیوار برشی فولادی با ضخامت ثابت ۲ میلی‌متر (حداقل ضخامت کاربردی قابل استفاده) به تیرهای طبقات به صورت سرتاسری متصل شده است مقایسه شده است (FPST).



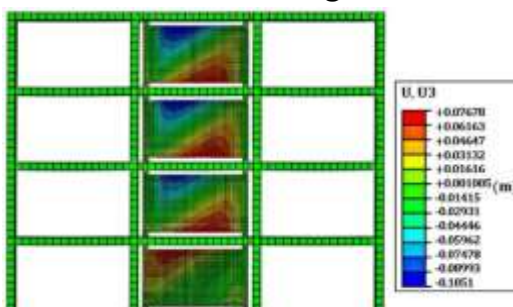
(ب) توزیع تنش در اتصال سرتاسری (FP)



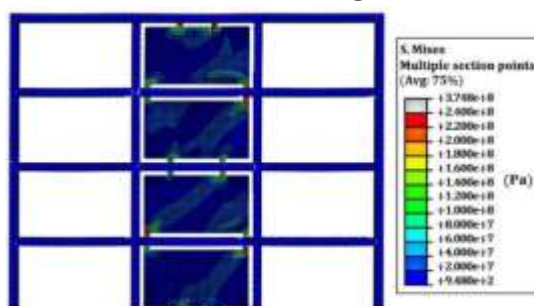
(الف) تغییرشکل خارج از صفحه در اتصال سرتاسری (FP)



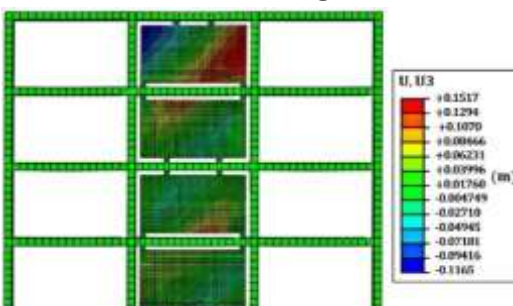
(ت) توزیع تنش در اتصال جزئی (ES)



(ب) تغییرشکل خارج از صفحه در اتصال جزئی (ES)



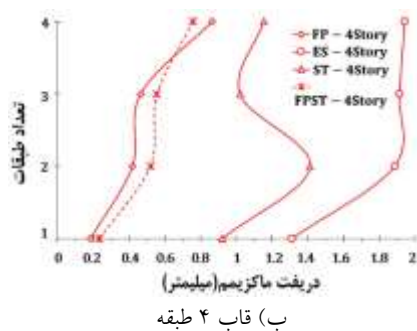
(ج) توزیع تنش در اتصال جزئی (ST)



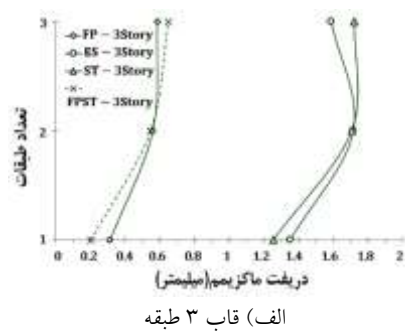
(ث) تغییرشکل خارج از صفحه در اتصال جزئی (ST)

شکل ۶. نمایش توزیع تنش و تغییرشکل‌های خارج از صفحه در قاب ۴ طبقه

Fig. 6. Showing stress distribution and out of plane deformations in a 4 stories frame



(ب) قاب ۴ طبقه



(الف) قاب ۳ طبقه

شکل ۷. بیشترین جابه‌جایی نسبی داخل صفحه در طبقات مختلف

Fig. 7. Maximum relative displacement inside the plane in different floors

و ضخامت صفحات برشی فولادی ثابت است (ST) برابر می‌باشد. نتیجه بدست آمده به این علت است که با توجه به هندسه قاب ۳ طبقه محل قرارگیری نبشی‌ها در دو حالت (ES) و (ST) تنها در طبقه اول متفاوت است و در سایر طبقات از الگوی یکسانی پیروی می‌کند.

در شکل (۸) نمودارهای برش پایه برحسب بیشترین جابه‌جایی نسبی داخل صفحه در دو حالت اتصال جزئی رسم شده است. در سازه ۳ طبقه در حالتی که محل نبشی‌های اتصال ثابت و ضخامت صفحات برشی فولادی متغیر است (ES) سختی اولیه (شیب قسمت اول نمودار) تقریباً با حالتی که محل نبشی‌های اتصال متغیر



الف) قاب ۳ طبقه

ب) قاب ۴ طبقه

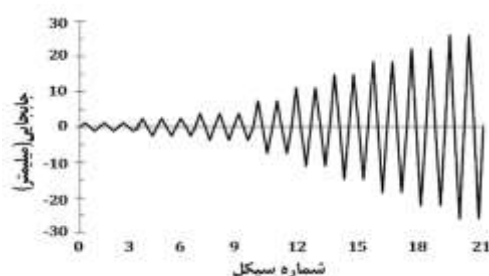
شکل ۸. نمودارهای برش پایه بر حسب بیشترین جابه‌جایی نسبی داخل صفحه برای اتصالات جزئی

Fig. 8. Base shear diagrams in terms of maximum in-plane relative displacement for partial connections

آنالیز سیکلی قرار می‌گیرد. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه منطقی و یکسان بین نتایج جذب انرژی و رفتار سیکلی صفحات مختلف با یکدیگر، از یک تاریخچه بارگذاری مشابه، که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در مدل‌های مختلف استفاده شد. با توجه به شکل (۹) بارگذاری با اعمال ۲۱ سیکل جابه‌جایی جانبی به سازه تا رسیدن به تغییر مکان نسبی جانبی حدود ۲۵/۹ میلی‌متر انجام شده است. در این راستا، جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y) تقریباً معادل با ۳/۷ میلی‌متر فرض شده است. شش سیکل ابتدایی به ترتیب مبتنی بر جابه‌جایی‌های $0.33 \times \delta_y$ و $0.67 \times \delta_y$ با سه تکرار، در جابه‌جایی $1 \times \delta_y$ نیز سه سیکل تکرار، و در هر کدام از جابه‌جایی‌های بزرگتر از آن ($2 \times \delta_y$ تا $7 \times \delta_y$) دو سیکل تکرار فرض شده است. در اعمال جابه‌جایی‌ها تقریباً مشابه با دستورالعمل آیین‌نامه آمریکا (ATC-24، ۱۹۹۲) عمل شده [۴۴]، با این تفاوت که در جابه‌جایی‌های $2 \times \delta_y$ و $3 \times \delta_y$ به جای سه تکرار، دو تکرار فرض شده است.

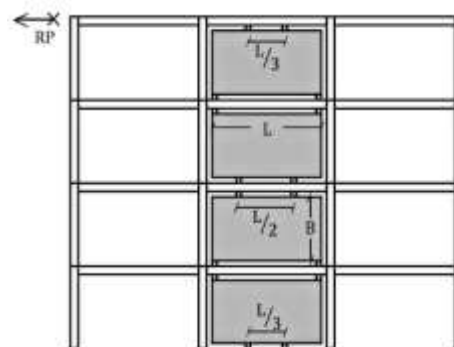
الگوی بارگذاری برشی در آنالیز سیکلی در قاب ۴ طبقه، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در قاب ۳ طبقه نیز شرایط مشابه می‌باشد.

در شکل (۱۱) منحنی هیستریزس مدل‌ها نشان داده شده است. محور قائم منحنی‌ها به نسبت ظرفیت تسلیم اسمی ورق ($V_y = \tau_y \times b \times t$) بی‌بعد شده‌اند و محور قائم منحنی‌ها جابه‌جایی نسبی درون صفحه (دریفت) در بالاترین طبقه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱ به طور کلی ظرفیت جذب انرژی در هر دو قاب با محدود کردن اتصال صفحه فولادی به تیرها کاهش پیدا کرده است. همچنین با توجه به ناحیه تنگ‌شدگی در شکل‌های (۱۱-پ و ۱۱-ج) در مواقعی که صفحات فولادی به طور پیوسته به تیرهای طبقات متصل هستند سازه شکل‌پذیری بیشتری نشان می‌دهد.



شکل ۹. تاریخچه اعمال بارگذاری سیکلی

Fig 9: Cyclic loading protocol



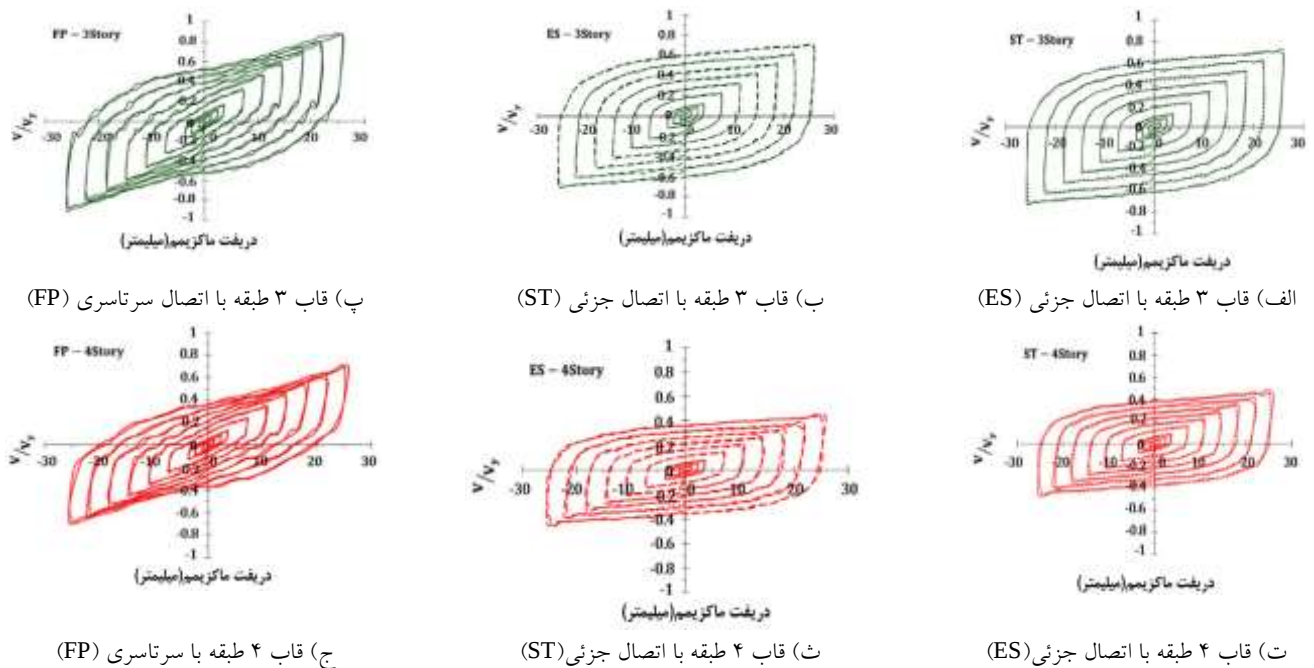
شکل ۱۰. الگوی بارگذاری برشی در آنالیز سیکلی

Fig. 10. Shear loading pattern in cyclic analysis

در قاب ۴ طبقه تفاوت بیشتری بین الگوی نبشی‌های اتصال بین مدل‌های (ES) و (ST) مشاهده می‌شود. به همین دلیل سختی اولیه در دو حالت متفاوت است. شکل (۸-الف) نشان می‌دهد شیب نمودار مربوط به مدل (ES) بیشتر است در نتیجه قاب ۴ طبقه در حالتی که محل قرارگیری نبشی‌های اتصال یکسان و ضخامت صفحات برشی فولادی متغیر است، دارای سختی اولیه بیشتری می‌باشد.

۵- آنالیز سیکلی و استهلاک انرژی

برای بررسی تاثیر چگونگی اتصال در خصوصیات جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی، قاب‌های مدل‌سازی شده تحت

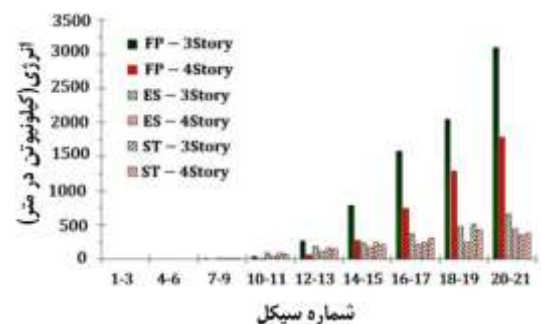


شکل ۱۱. منحنی های هیستریزیس قاب های مدل سازی شده در حالت اتصال جزئی و سرتاسری
Fig. 11. Hysteresis curves of modeled frames in partial and full connection mode

طبقه و ۴ طبقه دیده شده است. این موضوع نشان می دهد که با در نظر گرفتن صفحات برشی فولادی با ضخامت ثابت و صرفاً با تغییر محل نبشی های اتصال، تغییر ارتفاع سازه در جذب انرژی آن تاثیر ناچیزی می تواند داشته باشد.

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر تنش یکنواخت در لحظه کمایش بر عملکرد و جذب انرژی سیستم دیوار برشی فولادی با اتصال جزئی پرداخته شده است. به این منظور قاب های بتنی ۳ و ۴ طبقه با سیستم باربر دیوار برشی فولادی توسط نرم افزار المان محدود ABAQUSTM مدل سازی گردید. در این پژوهش اتصال صفحات پرکننده فولادی صرفاً به تیرهای طبقات محدود شد و به منظور رسیدن به تنش یکنواخت بر سطوح صفحات برشی فولادی در لحظه کمایش، سه روش مورد بررسی قرار گرفت. در روش اول صفحات فولادی به صورت سرتاسری به تیرهای طبقات متصل شدند و به منظور رسیدن به سطح تنش یکنواخت، ضخامت های مناسب صفحات فولادی در ارتفاع سازه در نظر گرفته شد. سپس در روش دوم با استفاده از نبشی های ۲۰×۲۰ در ابتدا و انتهای صفحات (محل قرارگیری نبشی های اتصال ثابت می باشد) با انتخاب ضخامت مناسب این هدف میسر شد و در روش سوم با در نظر گرفتن ضخامت ثابت صفحات فولادی سعی



شکل ۱۲. متوسط انرژی جذب شده در سیکل های مختلف بارگذاری
Fig. 12. Average energy absorbed in different load cycles

شکل (۱۲) متوسط انرژی جذب شده در سیکل های مختلف بارگذاری را نشان می دهد. در ۳ سیکل ابتدایی بارگذاری جذب انرژی قاب ها بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد. در سیکل های بعدی اتصال سرتاسری نسبت به اتصال جزئی باعث افزایش جذب انرژی قاب ها شده است. همانطور که در شکل (۱۱) نیز این مساله به صورت کیفی با توجه به سطح زیر نمودارها قابل استنتاج بود. علاوه بر این در شکل (۱۲) نشان داده شده است که هم در اتصال جزئی (ES) و هم در اتصال سرتاسری دیوارهای برشی فولادی، افزایش تعداد طبقات سازه می تواند باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی سازه شود. اما در اتصال جزئی (ST) در سیکل های مختلف جذب انرژی تقریباً یکسانی در قاب های ۳

بیشترین جابه جایی نسبی داخل صفحه شود.

علائم انگلیسی

B	عرض صفحه، mm
E	مدول الاستیسیته، GPa
E_t	مدول الاستیسیته مماسی، GPa
L	طول صفحه، mm
t	ضخامت صفحه، mm

علائم یونانی

ν	ضریب پواسون
σ_y	تنش تسلیم نرمال، MPa
τ_y	تنش تسلیم برشی، MPa
σ_p	تنش نرمال حد خطی، MPa
τ_p	تنش برشی حد خطی، MPa

قردانی نویسندگان

در انجام این پژوهش حمایت خاصی از شخص یا نهادی صورت نگرفته است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام میکنند که هیچ نوع تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان باهم برابر است.

منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی هیچ نهاد یا شخص دیگری استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

نویسندگان تأیید می‌کنند که در هیچ یک از مراحل پژوهش و نگارش این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

شد تا الگوی مناسب نحوه قرارگیری نبشی‌های اتصال جهت رسیدن به سطح تنش ثابت، ارائه شود. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- طبق نتایج بیشترین جابه‌جایی نسبی داخل صفحه (دریافت) و برش پایه حاصل از تحلیل دینامیکی، به طور کلی در حالت اتصالات جزئی خاصیت میرایی و استهلاک انرژی سازه افزایش می‌یابد. علاوه بر این اتصال جزئی سبب افزایش بیشترین جابه‌جایی نسبی داخل صفحه (دریافت) می‌شود.

۲- بر اساس تحلیل سیکلی انجام شده، در سازه با اتصال سرتاسری صفحات نسبت به اتصال جزئی صفحات، قابلیت جذب انرژی سازه افزایش یافته است. همچنین با توجه به نمودارهای هیستریزس و ناحیه پینچینگ شکل‌پذیری سیستم دیوار برشی دارای اتصال سرتاسری مقداری بیشتر از سیستم دیوار برشی با اتصال جزئی می‌باشد.

۳- در سیکل‌های ابتدایی بارگذاری، جذب انرژی سازه ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین، در اتصال سرتاسری دیوارهای برشی فولادی افزایش طبقات باعث کاهش جذب انرژی سیستم می‌شود. این الگو زمانی که محل قرارگیری نبشی‌های اتصال ثابت در نظر شود نیز برقرار می‌باشد. اما با تغییر محل قرارگیری اتصالات و فرض ضخامت ثابت صفحات فولادی برشی در ارتفاع سازه، در سیکل‌های مختلف بارگذاری و تغییر ارتفاع سازه تاثیر قابل توجهی در انرژی سازه نخواهد داشت.

۴- چگونگی سطح توزیع تنش و جابه‌جایی‌های عمود بر صفحه نشان می‌دهد در اتصالات جزئی عمده تمرکز تنش در محل قرارگیری نبشی‌های اتصال می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد که در اتصالات جزئی توزیع تنش قطری و الگوی کمانش در صفحات برشی فولادی می‌تواند منجر به افزایش قابلیت باربری سازه شود.

۵- ثابت بودن محل نبشی‌های اتصال و تغییر ضخامت صفحه برشی فولادی می‌تواند منجر به افزایش سختی سازه شود.

۶- ثابت در نظر گرفتن ضخامت صفحات برشی فولادی و تغییر در محل قرارگیری نبشی‌های اتصال می‌تواند باعث کنترل

References

[1] Gheitashi, A. and Alinia, M.M., 2010. Slenderness classification of unstiffened metal plates under shear loading. *Thin-Walled Structures*, 48(7), pp.508–518. doi: 10.1016/j.tws.2010.02.004.

[2] Sun, H.-J., Guo, Y.-L., Wen, C.-B. and Zuo, J.-Q., 2023. Local and global buckling prevention design of corrugated steel plate shear walls. *Journal of Building Engineering*, 68, p.106055. doi: 10.1016/j.job.2023.106055.

- [3] Khazaei-Poul, M. and Nateghi-Alahi, F., 2012. Finite-element investigation of steel plate shear walls with infill plates strengthened by GFRP laminate. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 14(3), pp.183–196.
- [4] Gorji Azandariani, M., Rousta, A.M., Mohammadi, M., Rashidi, M. and Abdolmaleki, H., 2021. Numerical and analytical study of ultimate capacity of steel plate shear walls with partial plate-column connection (SPSW-PC). *Structures*, 33, pp.3066–3080. doi: [10.1016/j.istruc.2021.06.046](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.046).
- [5] Timler, P.A. and Kulak, G.L., 1983. *Experimental study of steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 114. Edmonton, AB: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [6] Tromposch, E.W. and Kulak, G.L., 1987. *Cyclic and static behaviour of thin panel steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 145. Edmonton, AB: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [7] Roberts, T.M. and Sabouri Ghomi, S., 1991. Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels. *Thin-Walled Structures*, 12(2), pp.145–162. doi: [10.1016/0263-8231\(91\)90061-M](https://doi.org/10.1016/0263-8231(91)90061-M).
- [8] Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C., 1993. Postbuckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads. *Journal of Structural Engineering*, 119(2), pp.588–605. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:2\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(588)).
- [9] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E., 1998. Cyclic test of four-story steel plate shear wall. *Journal of Structural Engineering*, 124(2), pp.112–120. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:2\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:2(112)).
- [10] Elgaaly, M., 1998. Thin steel plate shear walls: Behaviour and analysis. *Thin-Walled Structures*, 32(1–3), pp.151–180. doi: [10.1016/S0263-8231\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00031-7).
- [11] Lubell, A.S., Prion, H.G.L., Ventura, C.E. and Rezaei, M., 2000. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 126(4), pp.453–460. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:4\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:4(453)).
- [12] Zoghi, M.A. and Mirtaheri, M., 2016. Progressive collapse analysis of steel building considering effects of infill panels. *Structural Engineering and Mechanics*, 59(1), pp.59–82. doi: [10.12989/sem.2016.59.1.059](https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.1.059).
- [13] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M.A. and Zirakian, T., 2020. Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 203, p.109866. doi: [10.1016/j.engstruct.2019.109866](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109866).
- [14] Chen, Z., Yang, Y., Yan, X., Duan, Y., Zhang, T. and Wang, J., 2023. Cyclic tests and parametric analyses of steel grid shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 200, p.107647. doi: [10.1016/j.jcsr.2022.107647](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107647).
- [15] Qiao, W., Zhang, X., Xu, Q. and Wang, G., 2023. Seismic performance of thin-walled steel and concrete composite column-corrugated steel shear wall structure. *Journal of Constructional Steel Research*, 201, p.107745. doi: [10.1016/j.jcsr.2022.107745](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107745).
- [16] Ma, X. and Liu, L., 2023. Fatigue properties of RC beams reinforced with ECC layer and steel plate. *Construction and Building Materials*, 372, p.130799. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2023.130799](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130799).
- [17] Fan, G., Men, J., Fu, Y., Lan, T. and Wang, J., 2023. Seismic behavior of steel plate wall with stiffeners and concrete slab in the box-plate steel structure. *Journal of Building Engineering*, p.106239.
- [18] AASHTO, 2012. *AASHTO LRFD bridge design specifications*. 6th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [19] Alinia, M.M. and Dastfan, M., 2006. Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, pp.730–738.
- [20] Paik, J.K. and Thayamballi, A.K., 2000. Buckling strength of steel plating with elastically restrained edges. *Thin-Walled Structures*, 37, pp.27–55.
- [21] Habashi, H.R. and Alinia, M.M., 2010. Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, pp.150–158.
- [22] Alinia, M.M., Alinia, A. and Erfani, S., 2009. Plastic shear buckling of unstiffened stocky plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8), pp.1631–1643. doi: [10.1016/j.jcsr.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.04.001).
- [23] Inoue, T., 1996. Analysis of plastic buckling of steel plates in shear based on the Tresca yield criterion. *International Journal of Solids and Structures*, 33(26), pp.3903–3923. doi: [10.1016/0020-7683\(95\)00222-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(95)00222-7).
- [24] Smith, S.T., 2003. Inelastic buckling of rectangular steel plates using a Rayleigh–Ritz method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 3(4), pp.503–521.
- [25] Wang, C.M. and Aung, T.M., 2007. Plastic buckling analysis of thick plates using p-Ritz method. *International Journal of Solids and Structures*, 44(18–19), pp.6239–6255. doi: [10.1016/j.ijsolstr.2007.02.026](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.02.026).
- [26] Maquoi, R. and Skaloud, M., 2000. Stability of plates and plated structures: General report. *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1–3), pp.45–68. doi: [10.1016/S0143-974X\(99\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00077-2).
- [27] Rhodes, J., 2003. Some observations on the post-

- buckling behaviour of thin plates and thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, 41(2-3), pp.207-226. doi: [10.1016/S0263-8231\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00088-5).
- [28] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M.A. and Zirakian, T., 2021. Study of effects of beam-column connection and column rigidity on the performance of SPSW system. *Journal of Building Engineering*, 33, p.101821. doi: [10.1016/j.jobbe.2020.101821](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101821).
- [29] Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K.C. and Lin, Y.C., 2009. Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. I: Experimental investigation. *Journal of Structural Engineering*, 135(3), pp.211-220. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:3\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:3(211)).
- [30] Sabouri-Ghomi, S., 1989. *Quasi-static and dynamic hysteretic behaviour of unstiffened steel plate shear walls*. PhD thesis. Cardiff: University of Wales College of Cardiff.
- [31] Hitaka, T. and Matsui, C., 2003. Experimental study on steel shear wall with slits. *Journal of Structural Engineering*, 129(5), pp.586-595. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:5\(586\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(586)).
- [32] Lu, J., Yu, S., Xia, J., Qiao, X. and Tang, Y., 2018. Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, pp.477-487. doi: [10.1016/j.jcsr.2018.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.002).
- [33] Wei, M.-W., Liew, J.Y.R., Yong, C.D. and Fu, X.-Y., 2017. Experimental and numerical investigation of novel partially connected steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, pp.1-15. doi: [10.1016/j.jcsr.2017.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.013).
- [34] Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J., 1983. *Analysis of steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 107. Edmonton, AB: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [35] Guo, L., Rong, Q., Ma, X. and Zhang, S., 2011. Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only. *International Journal of Steel Structures*, 11(4), pp.467-479. doi: [10.1007/s13296-011-4006-7](https://doi.org/10.1007/s13296-011-4006-7).
- [36] Ozcelik, Y. and Clayton, P.M., 2018. Seismic design and performance of SPSWs with beam-connected web plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 142, pp.55-67. doi: [10.1016/j.jcsr.2017.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.004).
- [37] Ozcelik, Y. and Clayton, P.M., 2018. Behavior of columns of steel plate shear walls with beam-connected web plates. *Engineering Structures*, 172, pp.820-832. doi: [10.1016/j.engstruct.2018.06.087](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.087).
- [38] Fathali, M.A. and Hoseini Vaez, S.R., 2020. Optimum performance-based design of eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, 202, p.109857. doi: [10.1016/j.engstruct.2019.109857](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109857).
- [39] Miri, S. and Tajmir Riahi, H., 2019. Optimal seismic design of concrete structures based on performance using durability time method. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35(2), pp.39-50.
- [40] Gholizadeh, S., Danesh, M. and Gheytratmand, C., 2020. A new Newton metaheuristic algorithm for discrete performance-based design optimization of steel moment frames. *Computers & Structures*, 234, p.106250. doi: [10.1016/j.compstruc.2020.106250](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106250).
- [41] Aliarab, Z. and Hosseinzadeh, S.A.A., 2022. Effect of buckling and yielding phenomena on the behavior of steel and aluminum shear panels. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(3), pp.981-1004. [In Persian].
- [42] Aliarab, Z. and Biglari Fadafan, A., 2022. Feasibility of guaranteed uniform deformation using steel shear wall with partial connections. *Modares Civil Engineering Journal*, 22(6), pp.165-178. [In Persian].
- [43] Aliarab, Z. and Hosseinzadeh, S.A.A., 2021. Behavioral characteristics of steel shear panels with different materials and slenderness ratios. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4), pp.1649-1670. [In Persian].
- [44] Applied Technology Council, 1992. *ATC-24: Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures*. Redwood City, CA: Applied Technology Council.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Biglari Fadafan, A. and Aliarab, Z., 2027. Evaluation of steel shear wall connection pattern behavior in order to improve seismic performance. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.7-20.



Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments

A. Ekramifard¹, A. Akhtarpour^{2*} 

1. Ph.D. Student of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2. Associate Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Abstract

Waste recycling plays a crucial role in enabling the efficient use of natural resources and mitigating the negative environmental impacts caused by mineral extraction. One significant type of waste that can be recycled is construction and demolition waste (CDW), which includes materials such as concrete, bricks, and wood from building sites. This waste can be processed and recycled for use in various construction applications, particularly in geotechnical engineering, where it serves as fill materials or base layers in foundations. The management and reuse of CDW not only help in reducing landfill waste but also contribute to the conservation of natural aggregates. When utilizing CDW as fill materials, it is essential to determine the compressibility properties of these materials. The compressibility coefficient is a key factor that influences the behavior of materials under load, which directly impacts the stability and durability of construction structures. The compressibility behavior of various types of CDW, including recycled concrete and crushed bricks, is influenced by their physical and chemical properties, such as particle size distribution and mineral composition. Consequently, understanding the compressibility characteristics of CDW requires more detailed and comprehensive studies. The authors of this study aimed to investigate the compressibility properties of CDW that had been stabilized through the addition of polyethylene terephthalate (PET), a type of plastic waste. PET is increasingly being explored as a stabilizing agent for various construction materials due to its beneficial effects on enhancing mechanical properties. The study also aimed to compare the performance of stabilized CDW with that of natural construction materials, such as natural stone aggregates, to assess their viability as substitutes in geotechnical applications. To achieve the study objectives, a series of oedometer tests were conducted using a hydraulic consolidation apparatus. These tests were performed under both saturated and optimum moisture content conditions for CDW, which included recycled concrete and crushed bricks mixed in different proportions. A reference sample (BM) made of natural stone aggregates with a similar gradation to the recycled materials was also tested for comparison. The key parameters measured in the study included compressibility coefficients, one-dimensional secant elastic modulus, and the Particle Breakage Index of the materials. The results of the study revealed that the compressibility of the materials increased with higher percentages of PET and crushed brick content. This suggests that the addition of PET and crushed brick enhances the compressibility of the materials. Additionally, the study found that with the increase in PET and crushed brick content, the hardness of the materials decreased. A key finding from the comparison between the saturated and optimum moisture content conditions was that compressibility was lower and hardness was higher under optimum moisture content. However, during the unloading and reloading phases of the test, greater crushing of the particles in the optimum moisture content condition led to a change in the gradation of the sample. As a result, the compressibility coefficient increased, and the hardness decreased, indicating that the material underwent more significant particle breakage in the optimum moisture content condition. Based on these findings, the study recommends that the percentage of crushed brick in recycled aggregates be limited to 30 percent to avoid excessive crushing and degradation of the material. Furthermore, it is suggested that when crushed brick is included in the recycled waste, 2 percent PET should be added to prevent further particle breakage and to improve the mechanical properties of the aggregates, ensuring better performance in construction applications. These recommendations provide valuable insights for engineers and practitioners looking to incorporate CDW in sustainable construction practices.

Review History

Received: Jan 02, 2025

Revised: Dec 07, 2025

Accepted: Jul 14, 2025

Keywords

Rowe cell

Recycled Concrete

Crushed Brick

PET

Compression Index

Particle Breakage index

* Corresponding Author Email: akhtarpour@um.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1654-0194



بررسی مشخصات تراکم پذیری و مدول الاستیک مخلوط‌های حاوی مصالح بتن بازیافتی، آجر خرد شده و pet برای استفاده به عنوان پرکننده خاکریزها

امین اکرامی فرد^۱، علی اخترپور^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. دانشیار، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

امروزه بازیافت زباله و استفاده مجدد از آن‌ها به عنوان یکی از مهمترین مسائل محیط زیستی مطرح است. یکی از انواع زباله‌ها، نخاله‌های ساختمانی است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای مصالح ژئوتکنیکی باشند. برای نمونه می‌توان از نخاله‌های ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزها استفاده نمود. برای این منظور لازم است ابتدا ضرایب تراکم‌پذیری و سختی مصالح تعیین شود. در این پژوهش از دستگاه تحکیم هیدرولیکی برای انجام آزمایش ادمتر در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه استفاده شده است. ضرایب تراکم‌پذیری، مدول الاستیک یک‌بعدی و خردشدگی نخاله ساختمانی در مقایسه با مصالح طبیعی ارزیابی شده و تاثیر PET بر رفتار مصالح بررسی شده است. نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه در این پژوهش شامل بتن بازیافتی و آجر خرد شده است که با نسبت‌های مختلف با یکدیگر ترکیب شده و ۱۰ نمونه مختلف تولید شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که اگر درصد آجر خرد شده و PET در مخلوط نخاله ساختمانی به ترتیب کمتر از ۳۰ و ۲ درصد باشد، می‌توان از آن‌ها به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزها استفاده نمود.

کلمات کلیدی

تحکیم هیدرولیکی

بتن بازیافتی

آجر خرد شده

PET

ضرایب فشردگی

شاخص خردشدگی

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

با افزایش جمعیت جهان و پیشرفت صنایع، تولید زباله با سرعت فزاینده‌ای در حال افزایش است. در نواحی با تراکم جمعیتی بالا و در مناطقی که دارای زمین حاصل‌خیز و با ارزش بوده، یافتن محل مناسب برای دفع زباله بسیار دشوار است. دفن غیراصولی زباله منجر به آلودگی محیط زیست خواهد شد. استخراج از منابع تجدیدنپذیر با توجه به توسعه صنعتی دنیا در حال افزایش است که قطعاً با مشکلات زیست محیطی مانند تغییرات در اکوسیستم منطقه، از بین رفتن گونه‌های جانوری و

گیاهی، تغییرات اقلیمی و غیره همراه خواهد بود. امروزه بسیاری از نهادهای دولتی (مانند سازمان ملل) و نهادهای خصوصی بر استفاده صحیح از منابع طبیعی برای توسعه پایدار تاکید دارند [1]. بنابراین بازیافت و استفاده مجدد از زباله‌ها، با توجه به افزایش جمعیت، آلودگی خاک، آب و هوا، کمبود منابع معدنی و کاهش ذخایر نفتی در سطح جهان بسیار مهم است [2]. با کمک بازیافت زباله می‌توان استفاده‌ای موثر و کارآمد از منابع طبیعی داشت و از آثار منفی زیست محیطی، ناشی از استخراج مواد معدنی جلوگیری کرد.

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - akhtarpour@um.ac.ir :0000-0003-1654-0194

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



است. اما مصالح شیشه بازیافتی با توجه به ساختار ۳ بعدی که مشابه سنگدانه‌های معدنی است و مقاومت فشاری زیاد، درصداختلاط تا ۵۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد. لی^۳ و همکاران با کمک آزمایش‌های تک محوری محدود نشده و سی‌بی‌آر کیفیت مصالح زباله ساختمانی را برای مصرف به عنوان زیراساس راهسازی بررسی نموده است [8].

آرولراجا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۱ مشخصات مصالح آجرخردشده [19] و در سال ۲۰۱۲ مشخصات مصالح بتن خردشده و عملکرد آن‌ها به عنوان مصالح زیراساس مورد ارزیابی قرار دادند [20]. آرولراجا و همکاران در سال ۲۰۱۲ استفاده از ترکیب آجرخردشده با بتن بازیافتی و سنگ خردشده به عنوان مصالح زیراساس بررسی کردند. براساس نتایج مجموعه آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود که تا ۲۵ درصد آجرخردشده را می‌توان به مصالح بازیافتی اضافه نمود، به صورتی که استفاده از این مصالح برای زیراساس مناسب باشد [21]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ مقاومت برشی نخاله‌های ساختمانی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که در مصالح بازیافتی چسبندگی بین ۱۵/۵ تا ۳۳/۶ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی بین ۳۹/۷ تا ۴۲/۶ درجه تغییر می‌کند [10].

مطالعات نشان می‌دهد که خاک‌های نرم را می‌توان با استفاده از نخاله‌های ساختمانی بهسازی نمود و پارامترهای مکانیکی آن‌را بهبود بخشید [22]. شارما^۵ و همکاران بهسازی مصالح رسی خمیری زیاد (CH) با کمک نخاله‌های ساختمانی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که استفاده از این مصالح منجر به افزایش مقاومت برشی مصالح رسی می‌شود [23]. نتایج مطالعات اوسلیمان^۶ و همکاران نشان می‌دهد که با افزودن ۲۰ درصد شیشه یا بتن بازیافتی به رس متورم شونده، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی آن، از تورم خاک نیز جلوگیری می‌کند [24]. در برخی دیگر از مطالعات نیز استفاده از بتن خردشده به عنوان مصالح دانه‌ای در ساخت بتن و آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفته است [25, 26].

خجسته و همکاران در سال ۲۰۲۴ استفاده از فیلترهای سیگار به عنوان افزودنی در ملات ماسه سیمان مورد بررسی قرار دارند. با

یکی از انواع زباله‌ها، زباله‌های ناشی از تخریب سازه^۱ است که با مدیریت صحیح و بازیافت، قابلیت استفاده به عنوان مصالح ژئوتکنیکی را دارند [3]. سالانه حجم زیادی از منابع معدنی در صنعت ساختمان مصرف می‌شود [4]. در سال ۲۰۰۴ حدود ۲ میلیارد تن زباله‌های ساختمانی در آمریکا [5] و در سال ۲۰۱۵ حدود ۲ میلیون تن زباله‌های ساختمانی در تایوان [6] تولید شده است. هم اکنون سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن زباله ساختمانی در دنیا تولید می‌شود [1]. مطالعات انجام شده در کشور مالزی نشان می‌دهد که یک سوم زباله‌های ساختمانی قابلیت بازیافت دارند [7]. بنابراین بازیافت زباله‌های ساختمانی می‌تواند نقش مهمی در حفظ و نگهداری منابع طبیعی و جلوگیری از تخریب محیط زیست ایفا کند.

زباله‌های ساختمانی مخلوط ناهمگن از مواد مختلف مانند بتن، آجر، شیشه، سرامیک، پلاستیک، چوب، فلز، خاک، سنگ، قیر، گچ و غیره است. براساس مطالعات انجام شده در کشورهای انگلستان، دانمارک، استونی، هلند، آلمان و ایرلند بیش از ۸۰ درصد زباله‌های ساختمانی بازیافت می‌شود [2, 8]. به عنوان نمونه در کشور هلند از زباله بازیافتی بتنی و مصالح بنایی به عنوان لایه اساس استفاده می‌شود [9]. همچنین از مصالح بازیافتی می‌توان به عنوان مصالح پرکننده در سدهای خاکی [10]، لایه زیراساس در صنعت راه‌آهن [11]، خاکریزی دیوارهای وزنی [12, 13] و محوطه سازی استفاده نمود.

در مطالعات گذشته روی مصالح نخاله ساختمانی، سختی و مقاومت مصالح با کمک آزمایش سه محوری [10, 14, 15, 16]، رفتار بلند مدت مصالح با آزمایش خزش [11] و ظرفیت باربری و مدول برجهندگی مصالح با آزمایش سی‌بی‌آر^۲ [15, 17] مورد بررسی قرار گرفته است.

نائینی و همکاران در ۲۰۲۱ و ۲۰۱۹ استفاده از مصالح بازیافتی شامل بتن، آجر، پلاستیک و شیشه به عنوان مصالح زیراساس راه‌آهن مورد بررسی قرار دادند و بیان شد در صورت انتخاب درصد اختلاط صحیح می‌توان از این مصالح به عنوان مصالح زیراساس استفاده نمود [15, 18]. در مقایسه مصالح پلاستیکی و شیشه‌ای، با توجه به وزن مخصوص پایین، مقاومت کم و ساختار پولکی مصالح پلاستیکی، حداکثر درصد اختلاط آن ۸ درصد وزنی

³ Li⁴ Arulrajah⁵ Sharma⁶ Ouslimane¹ Construction and Demolition Waste² CBR

توجه به مشکلات زیست محیطی ناشی از انباشته شدن فیلترهای سیگار و مواد سمی موجود در آن‌ها، این تحقیق راهکارهایی برای بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها ارائه می‌دهد. برای این منظور ۱۰ نوع ملات ماسه سیمان با ترکیب درصد‌های مختلفی از الیاف فیلترهای سیگار (حداکثر ۵ درصد) تهیه شده و مقاومت فشاری و کششی ملات ماسه سیمان تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد افزودن ۰٫۲٪ الیاف فیلتر سیگار موجب افزایش ۲۵٪ مقاومت فشاری در ۷ روز و ۱۹٪ در ۲۸ روز می‌شود. همچنین بیشترین مقاومت کششی با افزودن ۰٫۵٪ الیاف به دست می‌آید [27].

احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی استفاده از فیلترهای سیگار در تولید بتن پرداختند تا به مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید زباله این فیلترها پاسخ دهند. برای این منظور ۱۰ نوع بتن با ترکیب درصد‌های مختلفی از الیاف فیلترهای سیگار (حداکثر ۵ درصد) تهیه شده و مقاومت فشاری، خمشی و کششی آن‌ها تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن ۰٫۲٪ الیاف فیلتر سیگار به بتن منجر به افزایش ۳۴٪ در مقاومت فشاری و ۶۳٪ در مقاومت کششی می‌شود. افزایش مقادیر الیاف بالاتر از ۰٫۲٪ باعث کاهش خواص مکانیکی به دلیل تجمع الیاف شد. همچنین توانایی جذب انرژی و تحمل تغییر شکل در نمونه‌های بتنی با الیاف افزایش می‌یابد [28].

براساس جستجوهای انجام گرفته توسط نویسندگان این مقاله استاندارد و آیین نامه‌ای برای استفاده از مصالح بازیافتی در پروژه‌های ساختمانی ارائه نشده است. با توجه به تنوع نخاله‌های ساختمانی استفاده از آن‌ها نیازمند ارزیابی آزمایشگاهی است. در واقع ارزیابی کیفیت مصالح از طریق آزمایش‌های مرسوم انجام گرفته و با آیین‌نامه‌های موجود برای مصالح طبیعی مقایسه می‌شوند.

در پژوهش‌های انجام شده تاکنون، استفاده از مصالح نخاله ساختمانی برای کاربردهای خاص مانند اساس، زیراساس در راهسازی و راه آهن مورد بررسی قرار گرفته و تمرکز روی آزمایش‌های مرتبط مانند سی‌بی‌آر بوده و پارامترهای متناظر با کاربرد استخراج شده است. در صورت استفاده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده، تعیین ضرایب تراکم‌پذیری حائز اهمیت است [29] و به نظر می‌رسد که رفتار تراکم‌پذیری انواع نخاله‌های ساختمانی نیازمند مطالعات بیشتر و جامع‌تری است. به همین دلیل نویسندگان این مقاله تلاش دارند که خواص

تراکم‌پذیری انواع نخاله‌های ساختمانی که با افزودن PET^۱ بهسازی شده است، مورد بررسی قرار دهند و عملکرد آن‌ها را با مصالح طبیعی مقایسه نمایند. نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه شامل بتن بازیافتی، آجر خرد شده و PET است که با درصد‌های مختلف با یکدیگر مخلوط شده است. برای رسیدن به اهداف این پژوهش دو دسته آزمایش ادمتر روی انواع نخاله‌های ساختمانی انجام شده است: ۱. آزمایش ادمتر در حالت رطوبت بهینه؛ ۲. آزمایش ادمتر در حالت اشباع. در ادامه براساس نتایج آزمایش ادمتر معیارهای ضرایب تراکم‌پذیری، مدول الاستیک ادمتری و شاخص خردشدگی مصالح بدست آمده است.

۲- تجهیزات

در این پژوهش برای انجام آزمایش ادمتر از دستگاه تحکیم هیدرولیکی^۲ استفاده شده است. این دستگاه در سه اندازه مختلف با قطر ۳، ۶، ۱۰ و ۲۰ اینچ موجود است که با توجه به بیشترین قطر ذرات نمونه، می‌توان دستگاه با ابعاد مناسب را انتخاب نمود. در شکل (۱) نمایی از دستگاه تحکیم هیدرولیکی با قطر ۱۰ اینچ که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است. متعلقات دستگاه شامل کمپرسور برای تامین فشار، دو عدد محفظه آب-هوا، ۳ عدد فشارسنج (برای اندازه‌گیری فشار قائم، فشار آب منفذی و پس فشار^۳)، ۲ عدد تنظیم کننده فشار و ساعت اندازه‌گیری جابه‌جایی است. قطر و ارتفاع نمونه داخل دستگاه به ترتیب برابر ۱۰ و ۳/۷۵ اینچ خواهد بود [30].

همانطور که از نام دستگاه مشخص می‌شود برای اعمال تنش قائم از فشار هیدرولیکی آب استفاده می‌شود. کمپرسور هوای فشرده را به محفظه آب-هوا وارد نموده و از آنجا آب تحت فشار از طریق شیر اعمال فشار قائم وارد غشاء بالای نمونه می‌شود. با تنظیم فشار هوای ورودی به محفظه آب-هوا، مقدار فشار قائم اعمالی به نمونه تعیین می‌شود.

محفظه آب-هوا دوم برای تامین فشار پس فشار استفاده می‌شود. کمپرسور هوای فشرده را به محفظه آب-هوا وارد نموده و از آنجا آب تحت فشار از طریق شیر اعمال پس فشار از پایین به نمونه اعمال می‌شود.

¹ Poly-Ethylene Terephthalate

² Rowe Cell

³ Back Pressure

می‌کند. مقدار نشست نمونه از طریق اندازه‌گیری جابه‌جایی راد موجود در دستگاه که روی سنگ متخلخل بالا قرار گرفته، تعیین می‌شود. علاوه بر این، مسیر زهکشی آب داخل نمونه نیز از داخل راد عبور می‌کند. آب خروجی ناشی از نشست نمونه، از طریق مسیر زهکشی از بالا نمونه خارج می‌شود. با تعبیه فشارسنج در مسیر زهکش، مقدار فشار آب منفذی تعیین می‌شود. از جمله مزایا استفاده از این دستگاه برای انجام آزمایش ادمتر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [31]:

- کنترل اشباع شدن نمونه قبل از شروع آزمایش؛
- کنترل اتمام فرآیند تحکیم با اندازه‌گیری فشار آب منفذی؛
- انجام آزمایش روی مصالح درشت‌دانه؛
- اندازه‌گیری نفوذپذیری در دو راستا قائم و افق؛

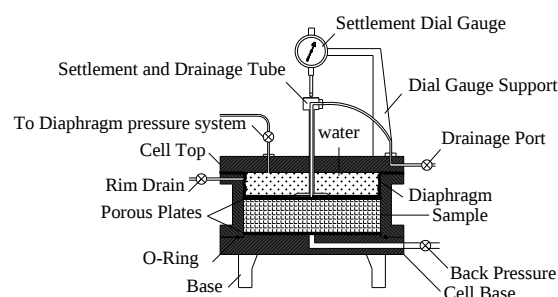
۳- مشخصات فیزیکی مصالح

هدف از پژوهش حاضر بررسی مشخصات تراکم‌پذیری مصالح بازیافتی ساختمانی است. براساس مطالعات انجام شده و نمونه‌برداری از محل دفع زباله‌های ساختمانی در شهر مشهد، بتن و آجر بیشترین حجم نخاله‌های ساختمانی را شامل می‌شود [32]. بنابراین در این پژوهش ۳ نوع مصالح بازیافتی شامل بتن بازیافتی (C)، آجر خردشده (B) و پلاستیک (PET) انتخاب شده است. برای تعیین بیشترین قطر ذرات از روش پنمن استفاده شده است. در این روش بیشترین قطر ذرات در نمونه مورد آزمایش (d) براساس کوچکترین بعد نمونه (D) تعیین می‌شود. در این حالت باید $4 < d/D < 6$ باشد [33]. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، کوچکترین بعد نمونه برابر $3/75$ اینچ است. بنابراین با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی موجود، بزرگترین بعد ذرات $2/54$ سانتی‌متر (الک ۱ اینچ) لحاظ شد.

برای تهیه بتن بازیافتی، قطعات بتنی در سنگ‌شکن خردشده است. از ۵ ناحیه مختلف مصالح خروجی سنگ شکن نمونه‌برداری انجام شده و منحنی دانه‌بندی آن‌ها بدست آمده است. متوسط منحنی‌های دانه‌بندی ۵ نمونه به عنوان معیار دانه‌بندی مصالح انتخاب شده است. در شکل (۲) منحنی دانه‌بندی مصالح بتن بازیافتی نشان داده شده است. در این شکل محدوده مجاز دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس مطابق نشریه شماره ۱۰۱ مشخصات فنی



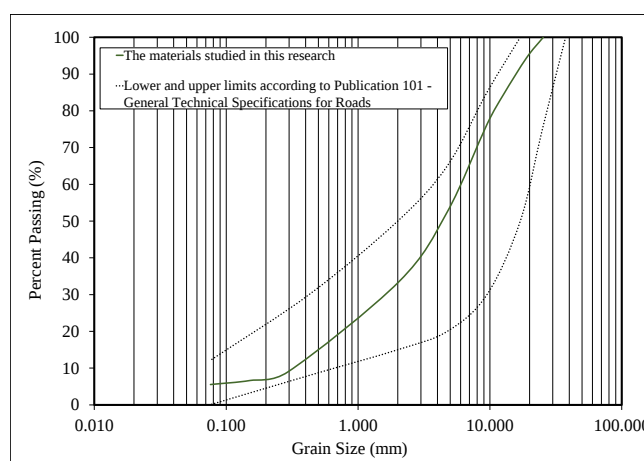
(الف)



(ب)

شکل ۱. نمایی از دستگاه تحکیم هیدرولیکی: الف. دستگاه تحکیم هیدرولیکی قطر ۱۰ اینچ، ب. ملحقات دستگاه تحکیم هیدرولیکی

Fig. 1. View of the Rowe cell: a. 10-inch Rowe cell, b. Accessories of the Rowe cell apparatus



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح بتن خردشده

Fig. 2. Grain size distribution curve of crushed concrete aggregates

در طول فرآیند آزمایش، نمونه تحت تنش اعمالی نشست

[37] در شکل (۴) منحنی تراکم اصلاح شده مصالح مورد آزمایش و در جدول (۴) خلاصه نتایج آزمایش تراکم ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی مصالح (ASTM [35])

Table 1. Grain size specifications of the materials

Value	Characteristics
25.4	$D_{max}(mm)$
4.40	$D_{50}(mm)$
17.1	C_u
1.41	C_c
5.5	FC (%)



شکل ۳. مصالح بازیافتی ساختمانی: الف. بتن، ب. آجر و ج. PET
Fig. 3. Construction and Demolition Waste: a. Concrete, b. Brick, c. PET

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی مصالح بازیافتی

Table 2. Physical properties of the CDW

Water absorption (%)	Gs	Material
6.6	2.66	Recycled Concrete
32.1	2.42	Crushed Brick
4.5	2.71	Benchmark Material

جدول ۳. درصد اختلاط مصالح بازیافتی

Table 3. Percentage of material mixture

PET	Crushed Brick	Recycled Concrete	CDW
0	0	100	100C
2	0	98	98C+2P
4	0	96	96C+4P
8	0	92	92C+8P
0	15	85	85C+15B
0	30	70	70C+30B
0	45	55	55C+45B
2	14.7	83.3	83.3C+14.7B+2P
2	29.4	68.6	68.6C+29.4B+2P
2	44.1	53.9	53.9C+44.1B+2P

عمومی راه نیز ارائه شده است [34]. نویسندگان در این مقاله سعی داشته اندازه ذرات مورد مطالعه را استاندارد و کاربردی در پروژه‌های عمرانی انتخاب نمایند. در جدول (۱) بطور خلاصه مشخصات دانه‌بندی مصالح مورد بررسی در این پژوهش شامل بیشترین بعد ذرات (D_{max})، میانگین قطر ذرات (D_{50})، ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب خمیدگی (C_c)، درصد مصالح درشت‌دانه بزرگتر از الک شماره ۴ (PCF4) و درصد ریزدانه (FC) نشان داده شده است. طبقه‌بندی مصالح بازیافتی به روش متحد GW-GM است [35].

آجر خرد شده مورد استفاده در این پژوهش از نوع آجر گری است. برای اطمینان از یکسان بودن نمونه‌ها، کلیه آجرها از یک دیوار ساختمان تخریب شده جمع‌آوری شده است. بنابراین تمامی آجرها دارای جنس یکسان هستند. برای از بین بردن تاثیر ابعاد، دانه‌بندی و بافت مصالح بر نتایج آزمایش‌ها، منحنی دانه‌بندی مصالح آجری مشابه مصالح بتنی شکل (۲) انتخاب شده است.

در این پژوهش از مواد PET به عنوان مصالح بازیافتی پلاستیکی استفاده شده است. از آنجا که PET دارای ساختار شیمیایی مشخصی است، می‌توان گفت که تمامی مصالح پلاستیکی مورد استفاده دارای رفتار مشابهی هستند. مصالح PET را می‌توان از بازیافت بطری‌های پلاستیکی بدست آورد. در شکل (۳) مصالح بازیافتی بتن، آجر و PET نشان داده شده است.

در جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی مصالح بازیافتی شامل وزن مخصوص توده جامد و درصد جذب آب که براساس ASTM C127 بدست آمده، به تفکیک ارائه شده است [36].

بعد از تهیه مصالح بازیافتی، آن‌ها را با نسبت‌های مختلف ترکیب نموده و ۱۰ نمونه مختلف تولید شده است. در جدول (۳) درصد اختلاط مصالح نشان داده شده است. در این پژوهش یک نمونه مرجع به نام BM با دانه‌بندی مشابه مصالح بازیافتی و از جنس مصالح سنگ طبیعی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از معرفی این نمونه مقایسه میان نتایج است.

برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه، روی ۱۰ نمونه معرفی شده در جدول (۳) و نمونه مرجع، آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق استاندارد ASTM1557 انجام شده است

۴- برنامه آزمون‌ها

با هدف بررسی تاثیر تغییرات رطوبت محیطی بر خواص مکانیکی و تراکم پذیری مصالح بازیافتی، آزمایش‌های ادمتر در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع انجام شده است. احداث خاکریزها به روش تراکم مصالح با رطوبت بهینه انجام می‌شود. بنابراین آزمایش‌ها با رطوبت بهینه انجام شده است. همچنین رطوبت اشباع به عنوان حالت بحرانی در نظر گرفته شده و فاز ۲ آزمایش‌ها در حالت اشباع انجام شده است.

آزمایش ادمتر در ۲ مرحله انجام می‌شود: ۱. آماده سازی نمونه در داخل دستگاه؛ ۲. بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد. برای آماده سازی و ساخت نمونه ابتدا مصالح کاملاً خشک، مطابق درصد اختلاط ارائه شده در جدول (۳) ترکیب می‌شوند. سپس رطوبت بهینه به نمونه اضافه شده و آن را به هم زده تا رطوبت به صورت یکنواخت در کل نمونه پخش شود. با توجه به وزن مخصوص هر نمونه و ابعاد قالب، وزن مورد نیاز از مصالح مشخص می‌شود و در ۴ لایه یکسان داخل قالب تحکیم هیدرولیکی کوبیده می‌شود تا ارتفاع نمونه برابر ۳/۷۵ اینچ شود. در انتها سنگ متخلخل و کاغذ صافی روی نمونه قرار گرفته، کلاهک روسل بسته می‌شود و غشاء فوقانی پر از آب می‌شود.

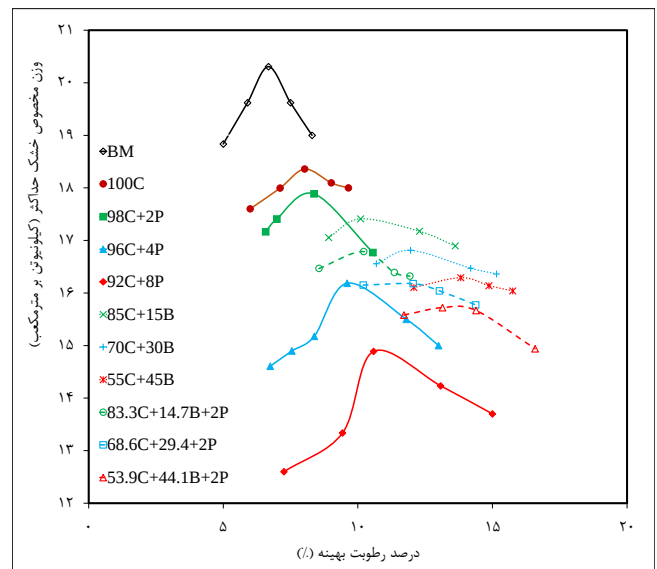
در حالت رطوبت بهینه، پس از ساخت نمونه در داخل دستگاه و بستن کلاهک آن، تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود. همزمان با اعمال تنش مقدار نشست در زمان‌های مختلف ثبت می‌شود. بعد از اتمام تحکیم در گام اول، تنش قائم به صورت پله‌ای تا حداکثر تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده و جابه‌جایی قائم ثبت می‌شود. براساس نتایج اولیه مدت زمان هر مرحله بارگذاری ۶ ساعت لحاظ شده است. در شکل (۵) چگونگی بارگذاری قائم نشان داده شده است. در فاز دوم آزمایش، باربرداری در دو مرحله تا تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام می‌شود. در فاز سوم بارگذاری مجدد تا تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود.

در حالت اشباع پس از ساخت نمونه در داخل دستگاه و بستن کلاهک آن، ابتدا آب از طریق شیر اعمال پس فشار به داخل نمونه وارد می‌شود. پس از پر شدن محفظه نمونه و خروج آب از شیر

جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش تراکم

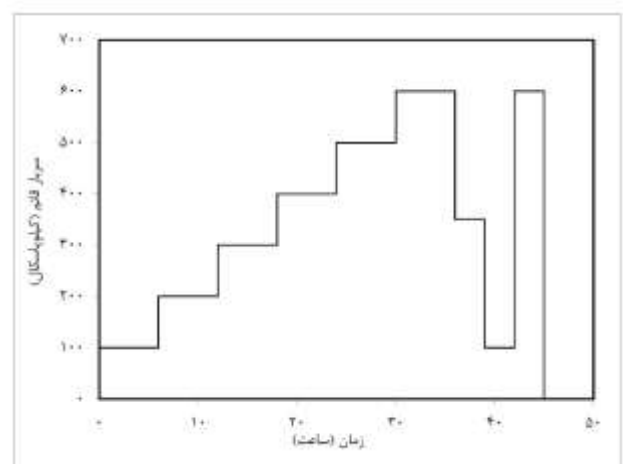
Table 4. Summary of the compaction test results

ω (%)	$\gamma_{d\max}$ ($\frac{kN}{m^3}$)	CDW
6.68	20.31	BM
8.03	18.36	100C
8.37	17.85	98C+2P
9.60	16.19	96C+4P
10.58	14.89	92C+8P
10.10	17.41	85C+15B
11.96	16.81	70C+30B
13.83	16.29	55C+45B
10.22	16.79	83.3C+14.7B+2P
12.06	16.18	68.6C+29.4B+2P
14.39	15.75	53.9C+44.1B+2P



شکل ۴: منحنی تراکم اصلاح شده مصالح مورد آزمایش

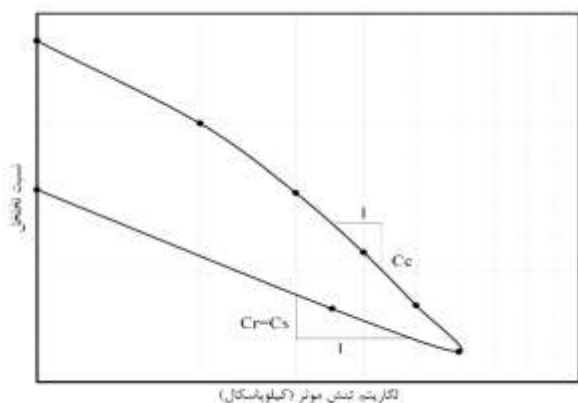
Fig. 4. Modified compaction curve of CDW



شکل ۵: چگونگی بارگذاری قائم

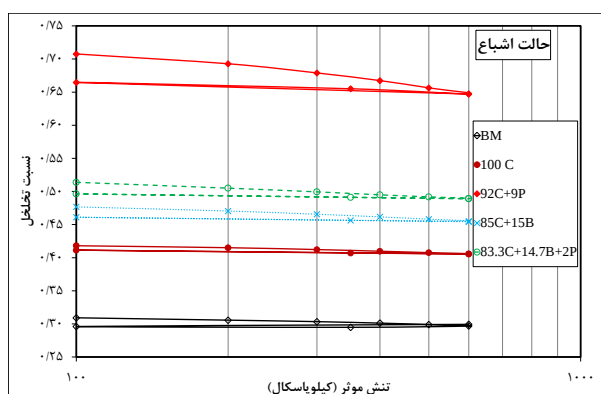
Fig. 5. Vertical loading

مربوط به حالت اشباع و رطوبت بهینه به ترتیب در شکل (۷ و ۸) نشان داده شده است.



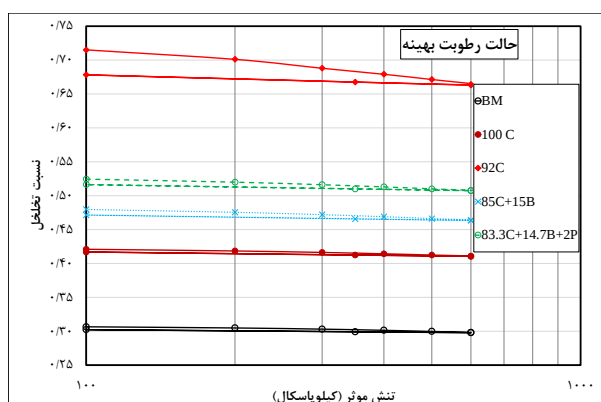
شکل ۶: تعریف ضریب فشردگی بارگذاری و ضریب فشردگی باربرداری (بارگذاری مجدد) در منحنی تحکیم

Fig. 6. Definition of the loading compressibility coefficient and the unloading compressibility coefficient (reloading) in the consolidation curve



شکل ۷: منحنی‌های تحکیم در فضای لگاریتم تنش موثر در برابر نسبت تخلخل (حالت اشباع)

Fig. 7. Consolidation curves in the logarithmic space of effective stress versus void ratio (saturated condition)



شکل ۸: منحنی‌های تحکیم در فضای لگاریتم تنش موثر در برابر نسبت تخلخل (حالت رطوبت بهینه)

Fig. 8. Consolidation curves in the logarithmic space of effective stress versus void ratio (optimum moisture state)

زهکش، گذردهی آب از داخل نمونه به میزان دو برابر حجم نمونه انجام می‌شود. سپس شیر زهکش بسته می‌شود و نمونه شروع به اشباع شدن می‌کند. در ادامه با اندازه‌گیری فشار آب در محل شیر زهکش می‌توان با محاسبه نسبت افزایش فشار قائم به فشار آب منفذی، از اشباع بودن نمونه اطمینان حاصل نمود. پس از اشباع شدن نمونه، ادامه فرآیند مشابه آزمایش حالت رطوبت بهینه است و بار قائم به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده و جابه‌جایی قائم ثبت می‌شود [30].

در پایان آزمایش نمونه از دستگاه خارج شده و پس از خشک شدن، برای تعیین مقدار خردشدگی دانه‌بندی می‌شود.

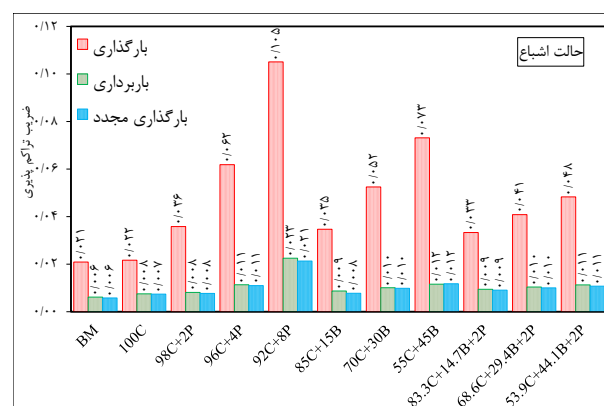
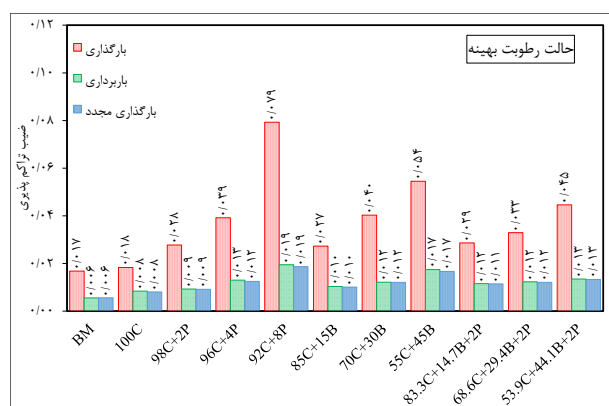
۵- ارائه نتایج و تفسیر

۵-۱- تراکم پذیری

ضرایب تراکم‌پذیری یکی از مشخصات مکانیکی خاک است که در طراحی سازه‌های مستقر روی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مصالح دانه‌ای که دارای ذرات سخت هستند، تغییر حجم ناشی از حرکت، چرخش و باز آرایش ذرات است. اما در مصالح مانند نخاله ساختمانی تغییر حجم علاوه بر سازوکارهای بالا ناشی از خردشدگی و شکست ذرات است. همچنین در مصالح نرم مانند PET به علت مدول الاستیک کم، تغییر حجم ناشی از تغییر شکل ذرات است.

ضریب تراکم‌پذیری به صورت تغییر حجم بر اثر افزایش تنش تعریف می‌شود. ضرایب تراکم‌پذیری شامل ضریب فشردگی بارگذاری (Cc)، ضریب فشردگی باربرداری (Cs) و ضریب فشردگی بارگذاری مجدد (Cr) هستند. ضرایب تراکم‌پذیری براساس منحنی تحکیم در فضای نسبت تخلخل در برابر لگاریتم تنش موثر ($e-\log \sigma'$) بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، منحنی تحکیم از دو بخش تقریباً خطی تشکیل شده است. شیب بخش اول به عنوان ضریب فشردگی بارگذاری و شیب بخش دوم ضریب فشردگی باربرداری (بارگذاری مجدد) تعریف می‌شود [38].

در این بخش نتایج آزمایش‌های آدومتر انجام شده روی نمونه‌های معرفی شده در جدول (۳) و نمونه مرجع BM ارائه شده است. منحنی‌های تحکیم مربوط به تعدادی از نمونه‌ها در فضای $e-\log \sigma'$



شکل ۹. مقادیر ضرایب تراکم پذیری نمونه های مختلف: الف- حالت اشباع، ب. حالت رطوبت بهینه

Fig. 9. Values of compressibility coefficients for different samples: a. Saturated condition, b. Optimum moisture condition

و بارگذاری مجدد، با توجه به خردشدگی بیشتر در حالت رطوبت بهینه، دانه بندی نمونه تغییر یافته و در نتیجه در مقایسه با آزمون حالت اشباع، ضریب تراکم پذیری بیشتر می شود.

به منظور مقایسه ضرایب تراکم پذیری مصالح نخاله ساختمانی و مصالح طبیعی، مقادیر نسبت به مصالح مرجع (BM) نرمال شده و در جدول (۵) ارائه شده است. براساس این جدول موارد زیر را می توان مشاهده نمود:

- در نمونه 100C ضریب تراکم پذیری نسبت به مصالح طبیعی حدود ۶ درصد افزایش یافته است.
- با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد PET به بتن بازیافتی، ضریب تراکم پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۸، ۱۶۵ و ۳۸۸ درصد افزایش یافته است. زیرا سختی مصالح PET در مقایسه با مصالح بتن بازیافتی کمتر است و با افزایش درصد آن تراکم پذیری نمونه ها افزایش می یابد.
- با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجر به بتن بازیافتی، ضریب تراکم پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۴، ۱۴۶ و ۲۳۷ درصد افزایش یافته است. زیرا سختی مصالح آجری در مقایسه با مصالح بتن بازیافتی کمتر است و با افزایش درصد آن تراکم پذیری نمونه ها افزایش می یابد.
- در نمونه های S8 الی S10 که مشابه نمونه های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به کاهش ضریب تراکم پذیری به مقدار حدود ۵۰ درصد می شود. زیرا PET مصالحی شکل پذیر و جاذب انرژی است. بنابراین وجود آن در ترکیب منجر به کاهش خردشدگی و در نتیجه کاهش تراکم پذیری می شود.

جدول ۵: مقادیر نرمال شده ضرایب تراکم پذیری در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه

Table 5. Normalized values of compressibility coefficients in two states: saturated and optimum moisture

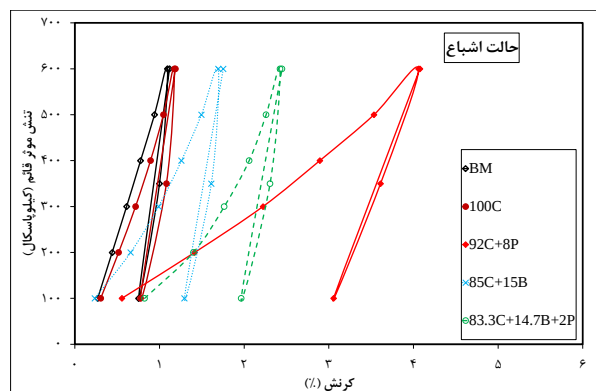
optimum moisture			Saturated			CDW
Cs	Cr	Cc	Cs	Cr	Cc	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	BM
1.44	1.51	1.09	1.29	1.23	1.04	100C
1.65	1.67	1.66	1.33	1.32	1.71	98C+2P
2.23	2.35	2.33	1.91	1.85	2.96	96C+4P
3.35	3.51	4.73	3.70	3.67	5.03	92C+8P
1.81	1.86	1.63	1.35	1.42	1.66	85C+15B
2.17	2.19	2.40	1.71	1.64	2.51	70C+30B
2.99	3.14	3.25	2.04	1.89	3.50	55C+45B
2.05	2.08	1.71	1.58	1.54	1.59	83.3C+14.7B+2P
2.17	2.22	1.96	1.74	1.70	1.95	68.6C+29.4B+2P
2.39	2.43	2.66	1.86	1.84	2.31	53.9C+44.1B+2P

در شکل (۹) مقادیر ضرایب تراکم پذیری نمونه های مختلف ارائه شده است که با نتایج مطالعات گذشته همخوانی دارد [39]. با مقایسه نتایج حالت اشباع و حالت رطوبت بهینه در مسیر بارگذاری، مشاهده می شود که تراکم پذیری در حالت رطوبت بهینه کمتر است. براساس مفاهیم مکانیک خاک غیراشباع، با کاهش درصد رطوبت به علت افزایش مکش بافتی، مقاومت و سختی خاک افزایش می یابد. بنابراین تراکم پذیری که از لحاظ مفهومی عکس سختی تعریف می شود، در نمونه های اشباع افزایش می یابد. اما در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد، تراکم پذیری نمونه های رطوبت بهینه بیشتر است. علت این پدیده با توجه به تفاوت خردشدگی نمونه ها در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع قابل تفسیر است که در بخش ۴-۳ به آن اشاره خواهد شد. در مسیر باربرداری

تنش مختلف انجام شده است. با کمک رابطه (۱) مقدار مدول الاستیک سکانتی میان هر دو سطح تنش متوالی محاسبه شده و به مقدار تنش متوسط دو گام بارگذاری متوالی، اختصاص می‌یابد. در شکل (۱۲) نمودار تغییرات مدول الاستیک یک بعدی سکانتی در برابر تنش قائم در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان داده شده است. براساس این شکل مشاهده می‌شود که:

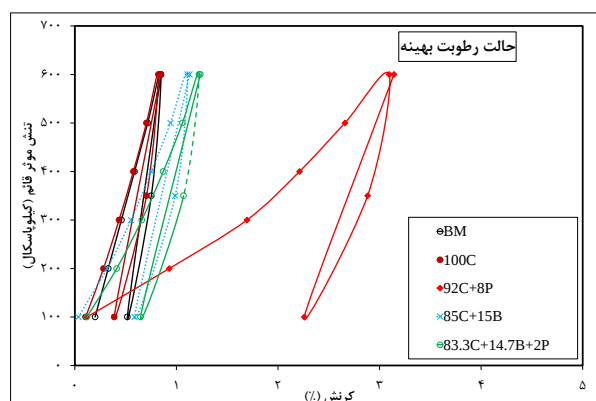
- بطور کلی با افزایش سطح تنش مقدار سختی افزایش می‌یابد.
- بیشترین سختی مربوط به نمونه S1 با بیشترین مقدار بتن بازیافتی است. سختی نمونه S1 حدود ۶ درصد کمتر از مصالح طبیعی است. درحالی‌که کمترین مقدار مربوط به نمونه S4 با بیشترین درصد PET است.
- مقدار سختی مربوط به یک نمونه منحصر به فرد در حالت رطوبت بهینه بیشتر از حالت اشباع است. زیرا در حالت رطوبت بهینه سطح مکش بافتی افزایش یافته و مقاومت خاک افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد PET مدول الاستیک کاهش می‌یابد. با افزودن ۴، ۸ و ۱۵ درصد PET به ترتیب سختی حدود ۳۹، ۵۷ و ۷۶ درصد کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد آجر خرد شده مدول الاستیک کاهش می‌یابد. با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجر خرد شده به ترتیب سختی ۳۹، ۵۹ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به افزایش ۱۵ درصد سختی می‌شود.
- همانطور که در بخش ۵-۲ به آن اشاره شد، وجود PET در ترکیب نخاله ساختمانی دارای تاثیر دوگانه است. از طرفی به علت سختی کم منجر به کاهش سختی ترکیب می‌شود. از طرف دیگر به علت شکل‌پذیر بودن از خردشدگی ذرات جلوگیری می‌کند.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در بیشتر نمونه‌ها رابطه خطی میان مدول الاستیک و سطح تنش برقرار است. در شکل (۱۳) برازش بهترین خط از میان داده‌های تجربی برای نمونه‌های S1 الی S4 نشان داده شده است. شیب خط (آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم) بیانگر میزان تاثیر سطح تنش بر مدول الاستیک است.



شکل ۱۰. منحنی‌های تحکیم در فضای $\sigma - \epsilon$ (حالت اشباع)

Fig. 10. Consolidation curves in the $\sigma - \epsilon$ space (saturation state)



شکل ۱۱. منحنی‌های تحکیم در فضای $\sigma - \epsilon$ (حالت رطوبت بهینه)

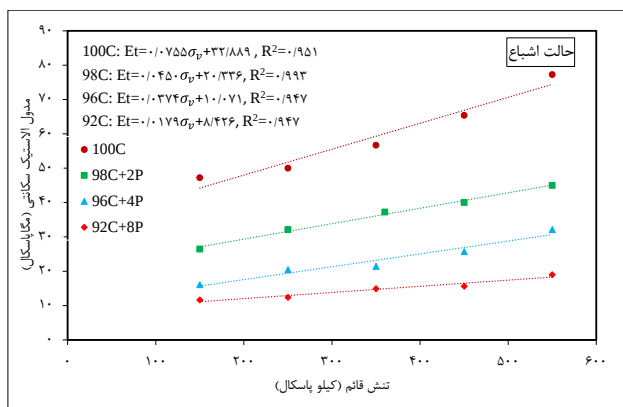
Fig. 11. Consolidation curves in $\sigma - \epsilon$ space (Optimum moisture state)

۱-۵- مدول الاستیک یک بعدی

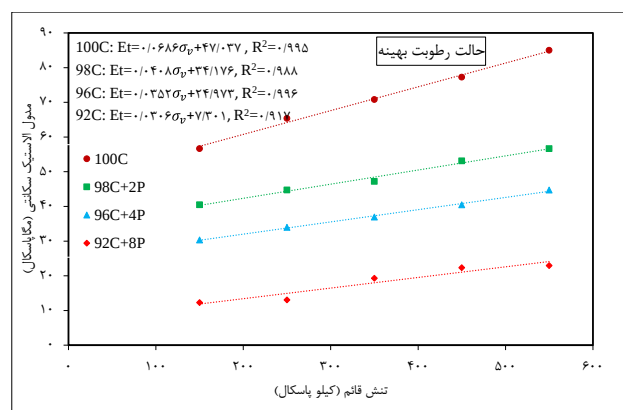
مدول الاستیک یک بعدی یکی دیگر از پارامترهای خاک است که با کمک آزمایش ادومتر بدست می‌آید. برای محاسبه این پارامتر ابتدا براساس نتایج آزمایش، منحنی تنش مؤثر قائم در برابر کرنش محوری ($\sigma - \epsilon$) رسم می‌شود. شیب خط بین هر دو نقطه از نمودار برابر مدول الاستیک یک بعدی در همان بازه است. مدول الاستیک یک بعدی درواقع مدول سکانتی بین دو نقطه مشخص از نمودار تنش-کرنش تعریف می‌شود که با رابطه زیر بدست می‌آید [39]:

$$E_t = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (۱)$$

در اشکال (۱۰ و ۱۱) نتایج تعدادی از آزمایش‌های ادومتر در فضای $\sigma - \epsilon$ در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه ارائه شده است. با هدف بررسی تاثیر سطح تنش بر سختی مصالح نخاله ساختمانی، مدول الاستیک یک بعدی سکانتی در سطوح مختلف تنش محاسبه شده است. مطابق شکل (۵)، آزمایش ادومتر در ۶



(الف)



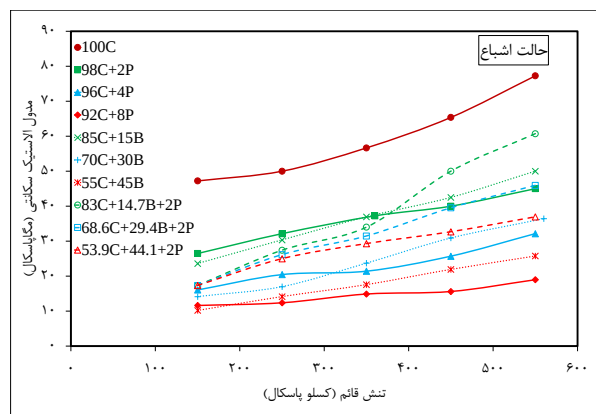
(ب)

شکل ۱۳. تعیین آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

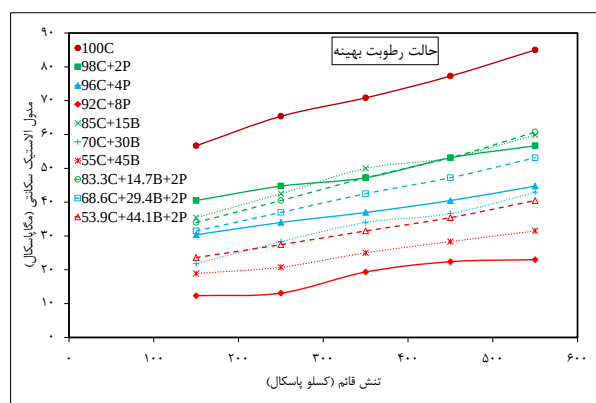
Fig. 13. determination of the rate of variation of the secant modulus against vertical stress

سختی مصالح است. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، می‌توان اشاره نمود:

- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد. سختی پایین PET منجر به کاهش تاثیر سطح تنش بر سختی نمونه می‌شود.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر، به علت افزایش خردشدگی ذرات، آهنگ تغییرات سختی نیز کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به افزایش آهنگ تغییرات سختی می‌شود. زیرا افزودن PET به نمونه، مانع از خردشدگی و تغییر دانه‌بندی با افزایش سطح تنش می‌شود.
- برای یک نمونه منحصر به فرد، آهنگ تغییرات سختی در حالت اشباع بیشتر از حالت رطوبت بهینه است. زیرا در حالت رطوبت بهینه خرد شدگی ذرات بیشتر است و منجر به تغییر



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. نمودار تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

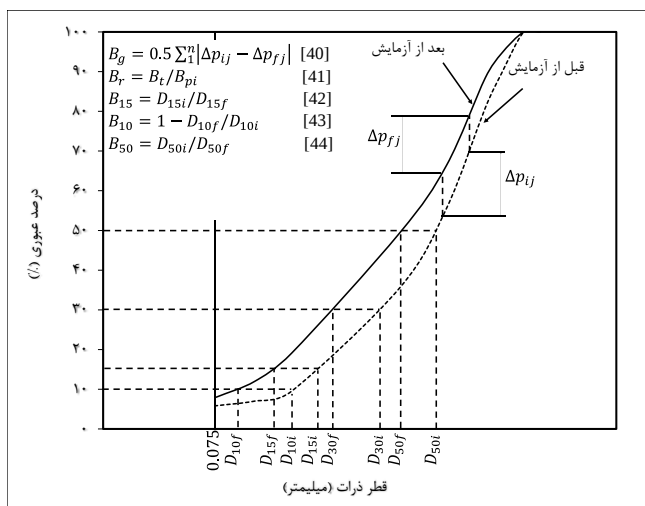
Fig. 12. Variations in the secant modulus against vertical stress

جدول ۶. آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم

Table 6. The rate of variation of the secant modulus against vertical stress

The rate of variation of the secant modulus against vertical stress		CDW
optimum moisture	Saturated	
0.0686	0.0775	100C
0.0408	0.0450	98C+2P
0.0352	0.0374	96C+4P
0.0306	0.0179	92C+8P
0.0595	0.0649	85C+15B
0.0506	0.0573	70C+30B
0.0328	0.0389	55C+45B
0.0661	0.1093	83.3C+14.7B+2P
0.0536	0.0706	68.6C+29.4B+2P
0.0417	0.0469	53.9C+44.1B+2P

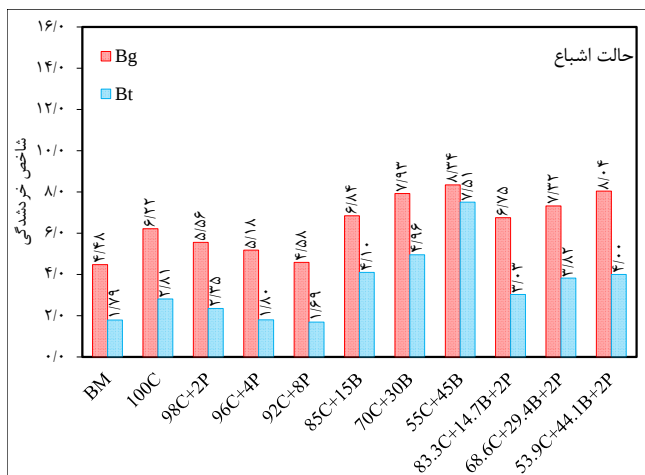
در جدول (۶) خلاصه نتایج مربوط به تعیین آهنگ تغییرات مدول الاستیک سکانتی در برابر تنش قائم، برای تمامی نمونه‌ها ارائه شده است. مقادیر این جدول بیانگر میزان تاثیر سطح تنش بر



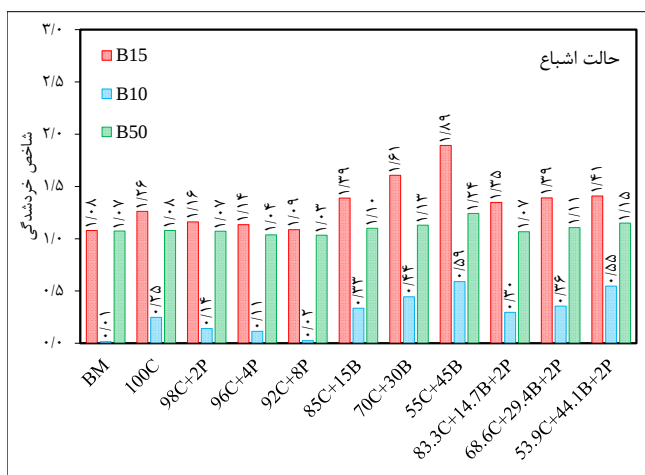
شکل ۱۴. تعریف شاخص خردشدگی بر اساس

منحنی دانه‌بندی [46، 45، 44، 43، 42]

Fig. 14. Definition of the Particle Breakage based on the distribution curve



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. مقادیر شاخص خردشدگی مربوط به آزمایش‌های اودومتر

در حالت اشباع

Fig. 15. Particle breakage values related to oedometer tests in the saturated condition

دانه‌بندی می‌شود. به عبارت دیگر در سطوح تنش بالا مصالح در حالت رطوبت بهینه دارای دانه‌بندی ریزتری نسبت به حالت اشباع است.

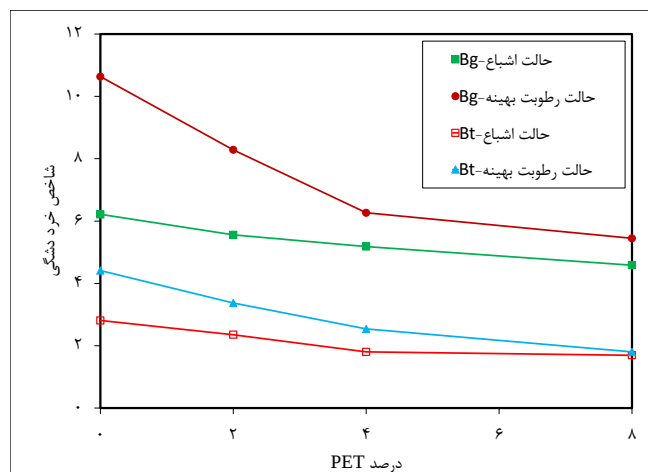
۲-۵- شاخص خردشدگی

شکست ذرات^۱، خرد شدن دانه‌های مصالح تحت تنش وارده است. برای تعیین شکست ذرات به صورت کمی شاخص‌های مختلفی معرفی شده است که با توجه به تغییر منحنی دانه‌بندی ذرات قبل و بعد از آزمایش بدست می‌آیند. مبنا شاخص‌های خردشدگی را می‌توان در ۴ دسته قرار داد: ۱. تغییر منحنی دانه‌بندی در چند اندازه ذره مشخص، ۲. تغییر در مساحت زیر منحنی دانه‌بندی، ۳. تغییر در مساحت ذرات خاک، ۴. نظریه فرکتال [40]. در شکل (۱۴) به صورت خلاصه ۵ روش مختلف برای تعیین شاخص خردشدگی نشان داده شده است [41].

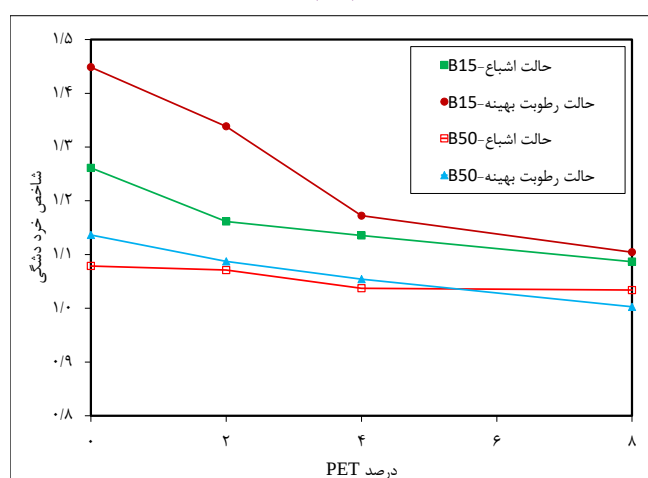
که در این روابط Δp_{ffj} و Δp_{ij} به ترتیب اختلاف درصد عبوری ریزتر در منحنی دانه‌بندی اولیه و نهایی در الک سایز B_{pi} و B_{pf} به ترتیب برابر مساحت محصور میان منحنی دانه‌بندی اولیه و نهایی با خط عبوری از قطر ذره 0.074 میلی‌متر است. در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر PET و میزان رطوبت بر خردشدگی مصالح، شاخص خردشدگی با ۵ روش مختلف محاسبه شده است. در شکل (۱۵ و ۱۶) مقادیر شاخص خردشدگی بعد از آزمایش، مربوط به آزمون‌های اودومتر در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده در این اشکال موارد زیر مشاهده می‌شود:

- کمترین و بیشترین خردشدگی به ترتیب مربوط به نمونه S4 (نمونه با بیشترین درصد آجر) است.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر خردشدگی افزایش می‌یابد. زیرا آجر نسبت به بتن مقاومت کمتری دارد. در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند با افزودن ۲ درصد PET به آن‌ها، منجر به کاهش شاخص خردشدگی به میزان حدود ۲۵ درصد شده است.

¹ Particle Breakage



(الف)



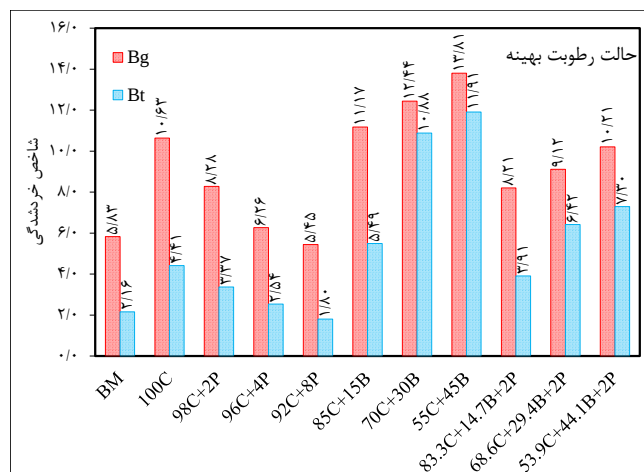
(ب)

شکل ۱۷. تغییرات شاخص خردشدگی در برابر درصد PET

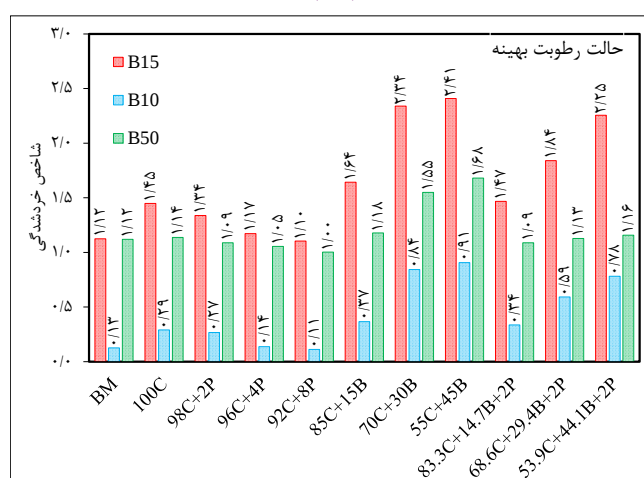
Fig. 17. Variations of the particle breakage against the PET

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش ضرایب تراکم‌پذیری و مدول الاستیک یک بعدی انواع نخاله‌های ساختمانی در مقایسه با مصالح طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته و تاثیر PET بر رفتار آنها بررسی شده است. نخاله ساختمانی مورد بررسی شامل بتن بازیافتی و آجر خردشده است. در ابتدا نخاله‌های ساختمانی با درصدهای مختلف با یکدیگر ترکیب شدند و ۱۰ نمونه با درصد اختلاط متفاوت تهیه شده است. در ادامه نمونه‌ها تحت آزمایش ادومتر در حالت اشباع و رطوبت بهینه قرار گرفته است. در طول آزمایش تنش قائم معادل ۱۰۰ الی ۶۰۰ کیلو پاسکال به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده است. در پایان فرآیند آزمایش نیز باربرداری و بارگذاری مجدد انجام می‌گیرد. به صورت خلاصه نتایج زیر بدست آمده است:



(الف)



(ب)

شکل ۱۶. مقادیر شاخص خردشدگی مربوط به آزمایش‌های ادومتر در حالت رطوبت بهینه

Fig. 16. Particle breakage values related to oedometer tests in the Optimum moisture state condition

- مقایسه شاخص خردشدگی برای هر نمونه منحصر به فرد در دو حالت اشباع و رطوبت بهینه نشان می‌دهد که در حالت اشباع خردشدگی کمتر است. زیرا وجود آب در منافذ، باعث روغن کاری سطح اتکا ذرات شده و در نتیجه تغییر شکل نمونه تحت تنش اعمالی، بیشتر ناشی از جابه جایی ذرات کنار یکدیگر است و خردشدگی کمتر می‌شود.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET شاخص خرد شدگی کاهش می‌یابد (شکل ۱۷). زیرا مصالح PET دارای شکل‌پذیری بیشتری هستند. مشاهده می‌شود با افزایش درصد PET مقادیر شاخص خردشدگی حالت اشباع و رطوبت بهینه به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

- کمترین تراکم‌پذیری مربوط به نمونه S1 می‌شود که حدود ۶ درصد بیشتر از مصالح طبیعی است. بیشترین سختی نیز مربوط به نمونه S1 می‌شود که حدود ۶ درصد کمتر از مصالح طبیعی است. درحالی‌که بیشترین تراکم‌پذیری و کمترین سختی مربوط به نمونه S4 با بیشترین درصد PET است.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET تراکم‌پذیری افزایش و سختی کاهش می‌یابد. با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد PET به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۸، ۱۶۵ و ۳۸۸ درصد افزایش یافته و سختی به ترتیب حدود ۳۹، ۵۷ و ۷۶ درصد کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر خرد شده تراکم‌پذیری افزایش و سختی کاهش می‌یابد. با افزودن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد آجر به بتن بازیافتی، ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مصالح طبیعی به ترتیب ۶۴، ۱۴۶ و ۲۳۷ درصد افزایش یافته و سختی به ترتیب ۳۹، ۵۹ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود درصد آجر خرد شده در مصالح به مقدار ۳۰ درصد محدود شود.
- در نمونه‌های S8 الی S10 که مشابه نمونه‌های S5 الی S7 هستند، افزودن ۲ درصد PET منجر به ۵۰ درصد کاهش ضریب تراکم‌پذیری و ۱۵ درصد افزایش سختی می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود در صورتی که در مصالح بازیافتی نخاله ساختمانی آجر خرد وجود دارد، ۲ درصد PET برای جلوگیری از خردشدگی و بهبود خواص مکانیکی مصالح افزوده شود.
- با مقایسه نتایج حالت اشباع و حالت رطوبت بهینه در مسیر بارگذاری، مشاهده می‌شود که در حالت رطوبت بهینه تراکم‌پذیری کمتر و سختی بیشتر است. اما در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد، با توجه به خردشدگی بیشتر در حالت رطوبت بهینه، دانه‌بندی نمونه تغییر یافته و در نتیجه در مقایسه با آزمون حالت اشباع، ضریب تراکم‌پذیری بیشتر و سختی کمتر می‌شود.
- در نمونه‌های S1 الی S4 با افزایش درصد PET آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد و در نمونه‌های S1 و S5 الی S7 با افزایش درصد آجر خرد شده، آهنگ تغییرات سختی کاهش می‌یابد.
- برای یک نمونه منحصر به فرد، آهنگ تغییرات سختی در حالت اشباع بیشتر از حالت رطوبت بهینه است. زیرا در حالت رطوبت بهینه خرد شدگی ذرات بیشتر است. به عبارت دیگر در سطوح تنش بالا مصالح در حالت رطوبت بهینه دارای دانه‌بندی ریزتری نسبت به حالت اشباع است.
- براساس نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت با انتخاب درصد اختلاط صحیح، می‌توان از نخاله ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده در خاکریزی‌ها استفاده نمود.

قدردانی

از داوران محترم مقاله جهت بررسی آن سپاس‌گزاری می‌شود.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله با انتشار آن تعارض منافی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

سهم نویسندگان در این مقاله برابر است.

منابع مالی

در این پژوهش از منابع مالی شخص یا نهادی استفاده نشده است.

هوش مصنوعی

در این پژوهش از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

- [1] Aslam, M.S., Huang, B. and Cui, L., 2020. Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264, 110445. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110445.
- [2] Vieira, C.S. and Pereira, P.M., 2015. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, pp.192–204. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023.
- [3] Yang, C.-P., 2009. Composition of demolition wastes from Chi-Chi earthquake-damaged structures and the properties of their inert materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, pp.470–481. doi: 10.1139/T08-131.
- [4] Roque, A.J., Rodrigues, G.M. and da Silva, P.F., 2020.

- Re-cycling of construction and demolition waste and steel slag: characterization of the durability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, pp.1699–1711. doi: [10.1007/s10163-020-01061-y](https://doi.org/10.1007/s10163-020-01061-y).
- [5] Federal Highway Administration, 2004. *Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate: FHWA State of the Practice National Review*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- [6] Lai, Y.-Y., Yeh, L.-H., Chen, P.-F., Sung, P.-H. and Lee, Y.-M., 2016. Management and recycling of construction waste in Taiwan. *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp.723–730. doi: [10.1016/j.proenv.2016.07.077](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.077).
- [7] Umar, U.A., Shafiq, N. and Ahmad, F.A., 2021. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), pp.283–291. doi: [10.1016/j.asej.2020.07.005](https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.005).
- [8] Li, Y., Zhou, H., Su, L., Hou, H. and Dang, L., 2017. Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 9510212. doi: [10.1155/2017/9510212](https://doi.org/10.1155/2017/9510212).
- [9] Herrador, R., Pérez, P., Garach, L. and Ordóñez, J., 2012. Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138(2), pp.182–190. doi: [10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000320).
- [10] Li, L., Qin, L., Xiao, H., Hu, Z., Xu, G. and Ma, Q., 2020. The triaxial test of construction and demolition (C&D) materials with different particle sizes and sand contents. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp.1–22. doi: [10.1080/19648189.2020.1820908](https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1820908).
- [11] Li, Z., Yan, S., Liu, L. and Yang, J., 2020. Investigation into creep characteristics and model of recycled construction and demolition waste used in embankment filler. *Sustainability*, 12(5), 1924. doi: [10.3390/su12051924](https://doi.org/10.3390/su12051924).
- [12] Anita, A. and Divya, P.V., 2024. Construction and demolition waste as a sustainable backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10, 36, pp.1–14. doi: [10.1007/s40891-024-00539-1](https://doi.org/10.1007/s40891-024-00539-1).
- [13] Cheshomi, A., Sabzi, Z. and Ramezannejad, R.S., 2020. Stabilization of a deep excavation using demolition and construction waste materials. *Engineering Geology*, 13, pp.47–59. (In Persian).
- [14] Gabrys, K., Radzevičius, A., Szymański, A. and Šadzevičius, R., 2021. Shear strength characteristics of recycled concrete aggregate and recycled tire waste mixtures from monotonic triaxial tests. *Materials*, 14(23), 7400. doi: [10.3390/ma14237400](https://doi.org/10.3390/ma14237400).
- [15] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S., 2021. Recycled glass blends with recycled concrete aggregates in sustainable railway geotechnics. *Sustainability*, 13(5), 2463. doi: [10.3390/su13052463](https://doi.org/10.3390/su13052463).
- [16] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S., 2021. Stress-dilatancy responses of recovered plastics and demolition waste blends as a construction material. *Construction and Building Materials*, 297, 123762. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123762](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123762).
- [17] Sharma, A. and Sharma, R.K., 2020. Strength and drainage characteristics of poor soils stabilized with construction demolition waste. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, pp.4753–4760. doi: [10.1007/s10706-020-01324-3](https://doi.org/10.1007/s10706-020-01324-3).
- [18] Naeini, M., Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. and Leong, M., 2019. Stiffness and strength characteristics of demolition waste, glass and plastics in railway capping layers. *Soils and Foundations*, 59, pp.2238–2253. doi: [10.1016/j.sandf.2019.12.009](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.12.009).
- [19] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T. and Bo, M., 2011. Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, pp.1444–1452. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000319).
- [20] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M.M. and Bo, M., 2012. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 35, pp.743–751. doi: [10.1520/GTJ103402](https://doi.org/10.1520/GTJ103402).
- [21] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. and Sivakugan, N., 2012. Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, pp.796–811. doi: [10.1139/t2012-041](https://doi.org/10.1139/t2012-041).
- [22] Moreira, E.B., Baldovino, J.A. and Izzo, R.L.S., 2023. Transforming construction and demolition waste into soft-soil treatment for paving design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp.4321–4334. doi: [10.1007/s10706-023-02503-8](https://doi.org/10.1007/s10706-023-02503-8).
- [23] Sharma, A. and Sharma, R., 2019. Effect of addition of construction–demolition waste on strength characteristics of high plastic clays. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4, pp.1–11. doi: [10.1007/s41062-019-0216-1](https://doi.org/10.1007/s41062-019-0216-1).
- [24] Ouslimane, N., Barebita, H. and Belfaquir, M., 2023. Recovery and valorization of crushed concrete and glass waste in road construction in Morocco. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8, 239. doi: [10.1007/s41062-023-01198-3](https://doi.org/10.1007/s41062-023-01198-3).
- [25] Puthussery, J.V., Kumar, R. and Garg, A., 2017. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: an experimental study. *Waste Management*, 60, pp.270–276. doi: [10.1016/j.wasman.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008).
- [26] Cho, Y.-H. and Yeo, S.-H., 2004. Application of recycled waste aggregate to lean concrete subbase in

- highway pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, pp.1101–1108. doi: [10.1139/104-088](https://doi.org/10.1139/104-088).
- [27] Khojasteh Zinjanab, T., Ahmadi, H.R. and Rezaie, M., 2024. Production of green sand-cement mortar: a new strategy to reduce environmental pollution caused by cigarette butts. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9, 342. doi: [10.1007/s41062-024-01643-x](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01643-x).
- [28] Ahmadi, H.R., Rezaie, M. and Khojasteh Zinjanab, T., 2024. Using cellulose acetate fibers to product eco-friendly concrete: a new strategy to reduce environmental pollution. *Structural Engineering and Mechanics*, 92(1), pp.89–97. doi: [10.12989/sem.2024.92.1.089](https://doi.org/10.12989/sem.2024.92.1.089).
- [29] Soleimanbeigi, A. and Edil, T.B., 2015. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 04015011. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285).
- [30] Rowe, P.W. and Barden, L., 1966. A new consolidation cell. *Géotechnique*, 16(2), pp.162–170. doi: [10.1680/geot.1966.16.2.162](https://doi.org/10.1680/geot.1966.16.2.162).
- [31] Ata, A., Mashhour, M. and Aly, A., 2007. The use of Rowe cell test results in predicting collapse settlement of soils. In: *Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, China: Science Press, pp.169–172.
- [32] Bolouri Bazaz, J. and Khayati, M., 2012. Properties and performance of concrete made with recycled low-quality crushed brick. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(4), pp.330–338. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000385](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000385).
- [33] KomakPanah, A. and Majidi, M.A., 2010. Creep of gravel materials in a large-scale oedometer device with an approach to particle breakage phenomenon and Los Angeles test. *Omran Modares*, 10. (In Persian).
- [34] *General Technical Specifications of the Road, No. 101*. (In Persian).
- [35] ASTM, 2006. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. C136-06. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [36] ASTM, 2015. *ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [37] ASTM, 2012. *ASTM D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [38] ASTM, 2011. *ASTM D2435: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [39] Gabryś, K., 2023. Experimental research on compressibility characteristics of recycled concrete aggregate: recycled tire waste mixtures. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp.1–12. doi: [10.1007/s10163-023-01694-9](https://doi.org/10.1007/s10163-023-01694-9).
- [40] Yu, F., 2021. Particle breakage in granular soils: a review. *Particulate Science and Technology*, 39, pp.91–100. doi: [10.1080/02726351.2019.1666946](https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1666946).
- [41] Khonji, A., Bagherzadeh-Khalkhali, A. and Aghaei-Araei, A., 2020. Experimental investigation of rockfill particle breakage under large-scale triaxial tests using five different breakage factors. *Powder Technology*, 363, pp.473–487. doi: [10.1016/j.powtec.2020.01.032](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.032).
- [42] John, N.J., Khan, I., Kandalai, S. and Patel, A., 2023. Particle breakage in construction materials: a geotechnical perspective. *Construction and Building Materials*, 381, 131308. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131308](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131308).
- [43] Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A., 1996. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), pp.309–316. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:4\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309)).
- [44] Marsal, R.J., 1967. Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), pp.27–43. doi: [10.1061/JSFEAQ.0000958](https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000958).
- [45] Xiao, Y., Liu, H., Chen, Y. and Jiang, J., 2014. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: Influences of density and pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(12), 04014070. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001176).
- [46] Lee, K.L. and Farhoomand, I., 1967. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 4, pp.68–86. doi: [10.1139/t67-012](https://doi.org/10.1139/t67-012).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ekramifard, A. and Akhtarpour, A., 2027. Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.21-36.



Experimental Study on the Behavior and Retrofit of Clay Block Infill Frames under Out-of-Plane Loading Using Alkali-Resistant Glass Fiber

Mohammad Javad Zarei¹, Jalil Shafaei^{2*} , Farnoosh Basaliqeh³

1. M.Sc. Student, department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Associate Professor, Department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
3. Assistant Professor, Department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Performance assessment of reinforced concrete frames with clay block infills during recent earthquakes, particularly the devastating 2017 Kermanshah (Sarpol-e Zahab) earthquake, demonstrates the significant vulnerability of these common structural systems. Analysis of the resulting damage indicates that most failures stem from inadequate anchoring or complete lack of proper restraint in the infills. This structural weakness has led to extensive economic damage and in some cases, loss of life. Considering the widespread use of this structural system in existing buildings, developing efficient, economical, and implementable retrofitting solutions to enhance their seismic performance is of high importance. The present research aims to develop and evaluate a novel method for retrofitting clay block infills using alkali-resistant glass fiber technology. The effectiveness of this strengthening technique has been assessed through precise out-of-plane loading tests. The proposed retrofitting approach relies on alkali-resistant glass fibers, selected for their favorable durability characteristics in concrete's alkaline environment, appropriate mechanical properties, and optimal cost-to-performance ratio. In this experimental study, three 1:2 scale reinforced concrete frame specimens were designed, constructed, and subjected to standard loading protocols, consisting of: A concrete frame with clay block infill having a two-centimeter gap from columns on each side (representing typical construction practice), A concrete frame with separator wall posts and clay block infill placed two centimeters from columns (representing an improved conventional method) A concrete, frame with wall posts where the infill section is strengthened with alkali-resistant glass fibers (representing the proposed method), For specimen construction, steel formwork with 2mm thick metal sheets was designed and fabricated in the structural laboratory. All construction phases including cutting, bending, and welding were performed with high precision at 1:2 scale proportional to actual specimens at the Shahrood University of Technology's structural laboratory. Importantly, the specimens were constructed according to common building practices, with concrete pouring sequenced from foundation to columns and finally beams to simulate real construction conditions. Standard perforated clay blocks measuring 25×20×10 centimeters were used without scaling to eliminate potential scale effects on mechanical behavior. All structural design and construction details for the reinforced concrete frame complied with Chapter 9 of the Iranian National Building Code. The main innovation of this study, beyond the strengthening method itself, lies in the approach to specimen construction following actual industry practices, making the results more applicable to real-world conditions. An advanced measurement system including high-precision linear variable displacement transducers (LVDTs) was employed to record the complete response of specimens throughout testing. Analysis of test results demonstrated that the specimen reinforced with alkali-resistant glass fibers showed significant improvement in seismic performance compared to the other two specimens. Specifically, this strengthening system provided: Increased lateral load-bearing capacity by up to 110% compared to specimens with infill with boundary conditions and infill with wall posts Enhanced ductility (displacement capacity) by up to 150% compared to non-strengthened specimens, Transformation of failure behavior from brittle and sudden to soft and ductile failure, Progressive and gradual material deterioration instead of sudden collapse. the proposed strengthening method, given its ease of implementation, reasonable cost, and desirable performance, can serve as an effective solution for retrofitting existing buildings with reinforced concrete frame systems with clay block infills in seismic regions.

Review History

Received: May 3, 2025

Revised: Oct 8, 2025

Accepted: Jun 21, 2026

Keywords

Reinforced concrete frame
Clay block
Out-of-plane loading
Infill
Glass fiber
Clay block

* Corresponding Author Email: jshafaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7590-4042



مطالعه آزمایشگاهی بررسی رفتار و بهسازی میانقاب‌های بلوک سفال در بارگذاری خارج از صفحه با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا

محمدجواد زارعی^۱، جلیل شفائی^{۲*}، فرنوش باسلیقه^۳

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

عملکرد قاب‌های بتن مسلح با میانقاب بلوک سفال در زلزله‌های اخیر، به‌ویژه زلزله سال ۱۳۹۶ کرمانشاه (سرپل ذهاب)، نشان‌دهنده خسارات قابل توجهی بوده که بیشتر ناشی از مهار نامناسب یا فقدان مهار مناسب در میانقاب‌ها است. برای رفع این مشکل، بهسازی میانقاب‌ها با استفاده از مش ضروری می‌باشد. کارایی این روش تقویتی از طریق آزمایش‌های بارگذاری خارج از صفحه قابل ارزیابی است. مطالعه حاضر با هدف ارائه راهکاری برای بهسازی میانقاب‌های بلوک سفال با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا انجام شده است. در این مطالعه، سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ مورد آزمایش قرار گرفتند: سه نوع قاب بتنی بررسی شد: اول، قاب میان‌پر با بلوک سفال که دارای فاصله دو سانتی‌متری از ستون است؛ دوم، قاب بتنی مجهز به والپست جداکننده همراه با میانقاب بلوک سفال که همچنین دارای فاصله دو سانتی‌متری از ستون می‌باشد؛ و سوم، قاب بتنی با والپست که بخش میانقاب آن با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا تقویت شده است. بلوک‌های سفال سوراخ‌دار مورد استفاده در ابعاد استاندارد ۲۵×۲۰×۱۰ الیاف شیشه سانتی‌متر بوده. برای تقویت سازه، از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا در مقایسه با نمونه‌های میانقاب با شرایط مرزی و میانقاب با والپست، مقاومت در برابر نیروهای خارج از صفحه را تا ۱۱۰ درصد و جابه‌جایی تا ۱۵۰٪ افزایش می‌دهد. این روش علاوه بر تغییر رفتار میانقاب از شکست ترد به شکست نرم باعث تخریب تدریجی مصالح خواهد شد.

کلمات کلیدی

قاب بتن مسلح
بلوک سفال
بارگذاری خارج از صفحه
میانقاب
الیاف شیشه

۱- مقدمه

راهکارهای مؤثری در برابر کنترل فروریزش و منهدم شدن میانقاب در سازه هستند. شبکه الیاف با حفظ یکپارچگی دیوار از ترک‌خوردگی ناگهانی جلوگیری می‌کند. درحالی‌که لایه شاتکریت مقاومت فشاری و برشی را افزایش می‌دهد [1]. دستاورد اولیه تحقیقات در سال (۱۹۵۱) نشان داد که شکست دیوارهای بنایی به جای خمش، از نوع فشاری و

زلزله ۷/۳ ریشتری سرپل ذهاب (۱۳۹۶) نشان داد بیشتر خسارات و تلفات از فروریزش اجزای غیرسازه‌ای، به ویژه میانقاب‌های راه‌پله، رخ داده است. مسدود شدن راه‌های خروج اضطراری توسط آوار، اهمیت طراحی، اجرا و تقویت این بخش‌ها را آشکار می‌کند. روش‌های نوین تقویت مانند سیستم الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا،

* رایانامه نویسنده مسئول: jshafaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7590-4042

ناشی از عملکرد قوسی است. پنج سال بعد، مک‌داول و همکاران^۱ بیان کردند که مقاومت بالای دیوارهای بنایی (شش برابر دال‌های ساده) ناشی از نیروهای فشاری عملکرد قوسی است و اولین معادله محاسبه مقاومت نهایی خارج از صفحه را با لحاظ این اثر ارائه دادند [2].

استاد و همکاران^۲ (۲۰۲۵) رفتار برشی قطری دیوارهای پرکننده ساخته شده از بلوک‌های سفالی توخالی با سوراخ‌های افقی، مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ۲۱ نمونه نشان داد که پوشش‌های دوطرفه گچی تا ۵۳ درصد و پوشش‌های دوطرفه سیمانی تا ۴۲۴ درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های مرجع ایجاد می‌کنند [3]. استاد و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی آزمایشگاهی شامل ۳۳ آزمایش کشش قطری مطابق استاندارد ASTM E519 رفتار برشی دیوارهای میان‌قاب بنایی ساخته شده از بلوک‌های سفالی توخالی در سه حالت شاهد، تقویت شده با پوشش سیمان و گچ، و تقویت شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا موجب بهبود قابل توجه ظرفیت باربری و خصوصیات تغییرشکل شده و افزایش تا ۵۱۲ درصدی مقاومت برشی را به همراه داشت. این نتایج اهمیت سیستم‌های تقویتی الیافی در ارتقای عملکرد سازه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای دیوارهای میان‌قاب بنایی را تأیید نمود [4].

استاد و شفائی (۲۰۲۴)، آثار اندرکنشی داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌های پر و دارای بازشو با روش دستک فشاری بررسی شد. نتایج نشان داد که لحاظ کردن این اندرکنش‌ها موجب کاهش ۳۰ درصدی سختی میان‌قاب می‌شود. پژوهشگران پس از اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس، شرایط مختلف تماس بین میان‌قاب و قاب بتنی پیرامونی را ارزیابی کردند. این پژوهش ضریبی را برای مهندسان طراح ارائه می‌دهد تا آثار اندرکنشی را در مدل‌سازی خود منظور کنند [5]. رازقی و همکاران^۳ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با هدف تحلیل سازوکار تخریب سازه‌ای دیوارهای بنایی تحت اثر بارهای لرزه‌ای، گسیختگی اتصالات میان دیوار و اعضای قاب به عنوان عامل غالب ناپایداری خارج از صفحه شناسایی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اعمال سیستم تقویتی خارج از صفحه منجر به ارتقای قابل ملاحظه ظرفیت

باربری و مقاومت سازه‌ای دیوارها می‌شود. این پژوهش بر اهمیت تقویت پیوندهای سازه‌ای خارج از صفحه در سیستم‌های دیواری بنایی تأکید نموده است. نتایج مطالعه چارچوب نظری مناسبی برای توسعه رویکردهای نوآورانه بهسازی لرزه‌ای با بهره‌گیری از مصالح کامپوزیتی پیشرفته ارائه داده است [6]. هلیچی و همکاران^۴ (۲۰۲۳) با آزمایش چهار دیوار میانی^۵ (AAC) قاب‌های بتن مسلح، رفتار لرزه‌ای آنها را تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های تقویت مانند اتصالات سیمی، عملکرد لرزه‌ای دیوارها را بهبود می‌بخشد و منجر به کاهش پهنای ترک‌ها و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود [7]. استاد و شفائی^۶ (۲۰۲۱) با مطالعات عددی نشان دادند افزایش نیروی محوری باعث بالا رفتن مقاومت نهایی سازه، افزایش سختی مؤثر و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. همچنین نشان دادند ضخامت دیوار میان‌قاب باعث افزایش مقاومت نهایی و سختی مؤثر می‌شود [8].

کلاین و همکاران^۷ (۲۰۲۱) با آزمایش ۱۱ دیوار جداکننده غیرسازه‌ای، تکنیک‌های مختلف تقویت از جمله مش و الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج نشان داد سیستم‌های تقویت ساده و کم‌هزینه می‌توانند به عنوان اقدامات اصلاحی مؤثر عمل کرده و خطرات و خسارات را کاهش دهند [9].

دومینکو و همکاران^۸ (۲۰۲۱) با آزمایش سه نمونه دیوار میان‌قاب مربعی، اثر آسیب داخل صفحه بر پاسخ خارج از صفحه را بررسی کردند. نتایج نشان داد آسیب داخل صفحه باعث کاهش قابل توجه مقاومت خارج از صفحه شده و دیوارهای مربعی کمتر تحت تأثیر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه قرار می‌گیرند [10].

مینوتو و همکاران^۹ (۲۰۲۰) با آزمایش هشت نمونه تمام مقیاس، رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه دیوارهای میان‌قاب را با استفاده از راهکارهای تقویتی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از ملات‌های تقویت شده با الیاف و توری بازالتی باعث بهبود قابل توجه رفتار سازه‌ای می‌شود [11]. حمودالوشالی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۹) روی سه قاب بتنی یک طبقه آزمایشاتی را

⁴ Omer Faruk Halici, et.al

⁵ Autoclaved Aerated Concrete

⁶ Ostad & Shafaei

⁷ Martin Klun, et.al

⁸ Mariano Di Domenico, et.al

⁹ Massimiliano Minotto, et.al

¹⁰ Hamood Al Washali, et.al

¹ McDowell, et.al

² Ostad, et.al

³ Razaqi, et.al

واقعی، کارایی سیستم‌های GFRP^۹ در بهبود مقاومت خارج از صفحه دیوارهای میانقاب را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نبشی‌های فولادی برای مهار FRP^{۱۰} بسیار موثر بوده و باعث افزایش مقاومت تا سه برابر فشار طراحی شد [18].

این مطالعه روش‌های بهسازی میانقاب در برابر نیروهای خارج از صفحه را بررسی می‌کند. سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ (شامل میانقاب با (شرایط مرزی) دو سانتی متر فاصله از ستون، میانقاب با والپست جداکننده و میانقاب تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا) تحت آزمایش بارگذاری شبه استاتیکی خارج از صفحه قرار گرفتند، هدف از این مطالعه با توجه به ماهیت ترد میانقاب مصالح بنایی، رسیدن به رفتاری نرم و شکل‌پذیر خواهد بود.

۲- مشخصات و جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه آزمایشگاهی، سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ مورد بررسی قرار گرفتند. این نمونه‌ها مطابق با ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برای قاب‌های با شکل‌پذیری زیاد (ویژه) طراحی و اجرا شدند. قاب آزمایشی دارای دهانه ۲۰۰۰ میلی‌متری و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی‌متری از فونداسیون تا زیر تیر بود. در ساخت والپست‌ها از نبشی‌های شماره چهار استفاده شد، و برای نصب مناسب الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا، اتصالات مناسبی بین قاب و میانقاب ایجاد شد. پیکربندی و مشخصات میانقاب‌ها و نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

Table 1: Specifications and parameters of experimental specimen.

Specimen	Details	Configuration
^{۱۱} (IC-OOP)	First Specimen (Figure 2-a)	Infill frame with connections only at top and bottom and 2 cm gap from columns
^{۱۲} (IW-OOP)	Second Specimen (Figure 2-b)	Infill frame with lateral wallposts and connection details similar to existing buildings
^{۱۳} (IWR-OOP)	Third Specimen (Figure 2-c)	Infill frame with lateral wallposts where the infill section is reinforced with alkali-resistant glass fibers

انجام دادند که نشان داد افزایش مقاومت قاب پیرامونی، مقاومت برشی دیوار میانقابی را افزایش می‌دهد. همچنین برتری مقاومت جانبی قاب نسبت به دیوار، موجب بهبود مقاومت کلی و شکل‌پذیری سیستم می‌شود [12].

نجیف و همکاران^۱ (۲۰۱۸) با آزمایش نه قاب و میانقاب، اثربخشی روش‌های مختلف FRCM را بررسی کردند. نتایج نشان داد FRCM^۲ باعث افزایش ۲۰ تا ۱۰۰ درصدی مقاومت نهایی شده و بازالت FRCM بهترین راه‌حل مقاوم‌سازی در مقایسه با کربن و شیشه بود [13]. کاریو و همکاران^۳ (۲۰۱۸) با انجام آزمایش روی ۱۸ نمونه دیوار، روش TRM^۴ را برای تقویت دیوارهای ساختمانی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که این روش به طور قابل توجهی ظرفیت باربری دیوارها را افزایش می‌دهد و میزان الیاف مصرفی تأثیر مستقیمی بر مقاومت، تغییر شکل و الگوی شکست دارد [14].

تریانتافیلو و همکاران^۵ (۲۰۱۷) با آزمایش ۱۷ دیوار بنایی، سیستم جدیدی متشکل از ملات مسلح شده با منسوجات TRM و مواد عایق حرارتی را برای مقاوم‌سازی سازه‌ای و بهسازی حرارتی دیوارها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این سیستم در بهبود عملکرد حرارتی و سازه‌ای دیوارها موثر است [15]. پاتریک بیشف و رنه سوتر^۶ (۲۰۱۴) با آزمایش پنج نمونه دیوار بنایی، کارایی سیستم ملات تقویت شده با شبکه‌های مش (کربن، شیشه) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این سیستم مقاومتی مشابه سیستم‌های متعارف و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به ورق‌های CFRP دارد [16]. کوتاس و همکاران^۷ (۲۰۱۴) روشی نوآورانه برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با استفاده از پوشش‌های مشی TRM ارائه دادند. نتایج نشان داد مهارهای مشی طراحی شده قابلیت انتقال نیروهای کششی قابل توجهی بین سطح مشترک دیوار آجری و بتن دارند [17].

لونا و همکاران^۸ (۲۰۱۱) با آزمایش ۱۴ نمونه در مقیاس

¹ Najif. Ismail, et.al

² Fiber Reinforced Cementitious Matrix

³ F. A. Kariou, et.al

⁴ Textile Reinforced Mortar

⁵ Thanasis C. Triantafillou, et.al

⁶ Bischof, P. and R. Suter

⁷ L. Koutas.et.al

⁸ Dillon S. Lunn, et.al

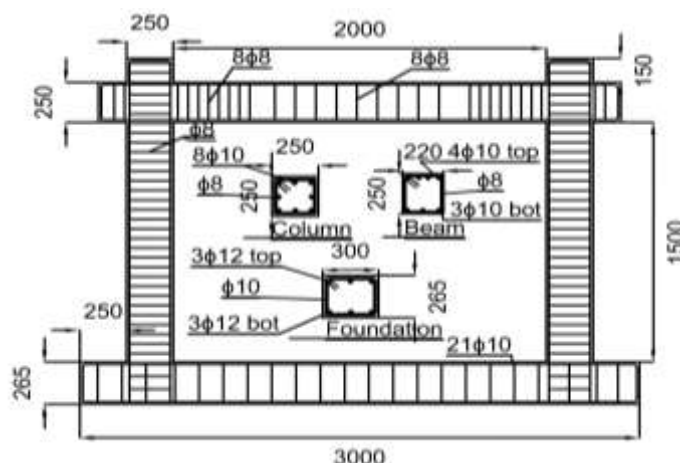
⁹ Glass Fiber Reinforced Polymer

¹⁰ Fiber Reinforced Polymer

¹¹ Infilled Control Out Of Plane

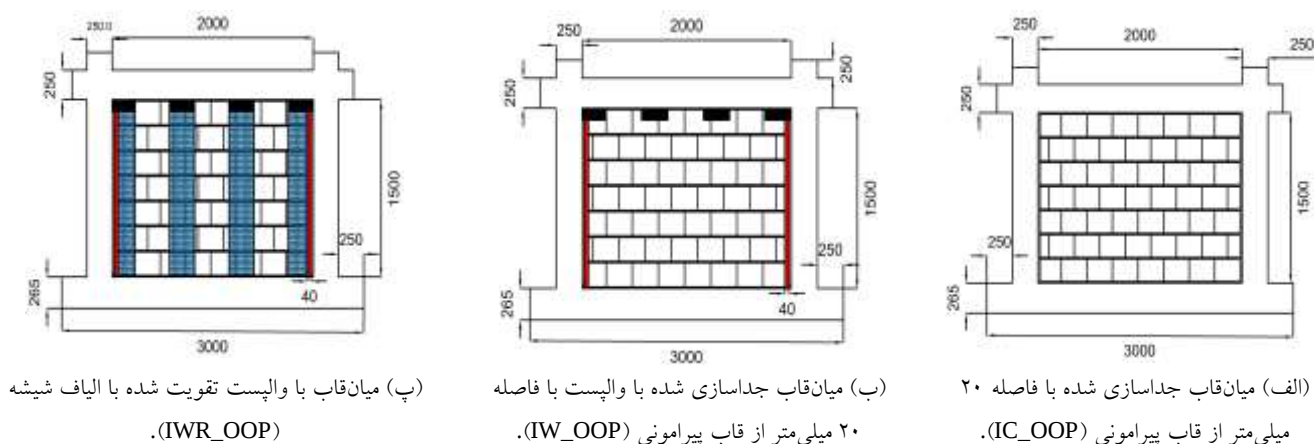
¹² Infilled Wallpost Out Of Plane

¹³ Infilled Wallpost Out Of Plane



شکل ۱. جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح، (اندازه برحسب میلی متر).

Fig. 1. Geometry and reinforcing details of reinforced concrete frame (dimensions in millimetre).



شکل ۲. شمای جزئیات اتصال میان قاب به قاب بتن مسلح، (اندازه گیری برحسب میلی متر).

Fig. 2. Schematic of Connection Infil Reinforced Concrete Frame and Intermediate Frame (Measurements in Millimeters).

که پس از انجام عملیات اندازه گیری، برش کاری، خم کاری و جوشکاری، اجزای مختلف قاب شامل فونداسیون، ستون ها و تیر به صورت مجزا ساخته شدند، که در شکل (۳) نشان داده شده است. اتصال قطعات مختلف هنگام بتن ریزی به یکدیگر با استفاده از سیستم پیچ و مهره تأمین شد.

به منظور جلوگیری از خیز تیر در حین بتن ریزی و عمل آوری، پایه های اطمینان تعبیه شد. همچنین برای اطمینان از شاقول بودن ستون ها، یک قوطی فلزی با مقطع ۲۰×۲۰ میلی متر و طول ۲۰۰۰ میلی متر در بین دو دهانه قالب ستون نصب شد. فرآیند ساخت قاب بتن مسلح به صورت مرحله ای و منطبق بر روش های متداول در ساخت سازه های واقعی انجام پذیرفت و در شکل (۳) قابل مشاهده است.

جزئیات سازه ای تمامی نمونه های قاب بتن مسلح یکسان و مطابق با شکل (۱) بود، همچنین شمای جزئیات اتصال میان قاب به قاب و شرایط مرزی در شکل (۲) نشان داده شده است. جابه جایی نمونه ها با استفاده از جرثقیل ۳/۳ تنی انجام گرفت. برای تأمین اتصال محکم نمونه ها به کف صلب آزمایشگاه و جلوگیری از بلند شدن آن ها هنگام بارگذاری، از ۲۰ عدد پیچ ۸/۸ فولادی با قطر ۱۶ میلی متر، طول ۳۳۰ میلی متر با مقاومت کششی ۸۰۰-۹۰۰ مگاپاسکال استفاده شد.

۱-۲- ساخت و آماده سازی نمونه های آزمایشگاهی

در این مطالعه، سه نمونه قاب بتن مسلح ویژه با استفاده از قالب های فلزی مقیاس شده در آزمایشگاه سازه و مصالح ساختمانی دانشکده عمران_ دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شد. قالب های مزبور از صفحات فلزی با ضخامت ۲ میلی متر تشکیل شده بودند



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳. شمای نهایی نمونه‌های ساخته شده: (الف، ب، پ) مراحل قالب بندی و بتن‌ریزی قاب بتن مسلح.

Fig. 3. Final Configuration of Constructed Specimens: (a, b, c) Formwork and Concrete Casting Stages of Reinforced Concrete Frame.

کمک رول‌بالت شماره ۸ کاشته شده در قاب، محکم شد. جزئیات مربوط به چگونگی اجرای نبشی و تسمه در شکل (۴) نشان داده شده است. الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا در میانقاب نیازمند مهارکردن مناسب از بالا و پایین بود، پس برای مهار بالایی از نبشی‌های مقطع با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد $250 \times 100 \times 40$ میلی‌متر (طول $\times$ ارتفاع $\times$ عرض) و برای مهار پایینی از تسمه با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد 250×20 میلی‌متر (طول $\times$ عرض) استفاده شد که این نبشی‌ها توسط پیچ و پلاک به قاب بتنی متصل شده و در نهایت عملیات شاتکریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر روی الیاف اجرا شد. از کاربرد دیگه نبشی منطقه در زیر تیر همپوشانی تا ۱۰۰ میلی‌متر روی بلوک سفال در ردیف آخر می‌توان اشاره کرد. جزئیات کامل در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۲-۲- مشخصات مصالح

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح.

Table 2. Mechanical properties of materials.

Material name	Average compressive strength (MPa)	Poisson's coefficient	Elasticity modulus (Mpa)
Concrete	27	0.2	25743
Reinforcements	420	0.3	200000
Clay Block	1	0.1	----



(ب) نمونه با والپست



(الف) نمونه کنترل



(پ) نمونه با والپست، تقویت شده با الیاف شیشه

شکل ۴. شمای نهایی نمونه‌های ساخته شده:

(الف) نمونه (IC-OOP)، (ب) نمونه (IW-OOP)، (پ) نمونه (IWR-OOP).

Fig. 4. Final Configuration of Constructed Specimens:

(a) Specimen IC-OOP, (b) Specimen IW-OOP, (c) Specimen IWR-OOP.

میانقاب‌های مورد استفاده در این مطالعه از بلوک سفال سوراخ‌دار با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده همچنین ارتفاع نهایی میانقاب ۱۵۰۰ میلی‌متر تعیین شد. برای مهار مناسب بلوک‌های ردیف آخر، از سیستم نبشی و تسمه استفاده شد که با

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بلوک سفال استفاده شده در ساخت میان قاب.

Table 3. Compressive Strength Test Results of Clay Hollow Blocks Used in Infill Construction.

Specimen	Number of samples					Average	Standard deviation	covariance
	S1	S2	S3	S4	S5			
Clay Brick-horizontal	0.682	0.876	0.803	0.846	0.807	0.802	0.065	8%
Clay Brick-vertical	2.9	3.42	5.9	5.42	4.3	4.38	3.30	11%

جدول ۴. طرح اختلاط قاب بتن مسلح (برحسب کیلو گرم بر متر مکعب).

Table 4. Mix Design of Reinforced Concrete Frame (kg/m³).

Materials	Foundation	Column& Beam
Portland Cement Type II (kg/m ³)	450	380
Coarse Aggregate (Medium) (kg/m ³)	340	350
Coarse Aggregate (Large) (kg/m ³)	340	350
Fine Aggregate (Sand) (kg/m ³)	1000	1040
Water (L/m ³)	210	200
Water to cement ratio	0.47	0.53

۲-۲-۱- بلوک سفال

نهایی، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی بتن طبق استاندارد ASTM C39 در محل بتن‌ریزی تهیه شدند. این نمونه‌ها همزمان با انجام آزمایش قاب و میان قاب، مورد آزمایش قرار گرفتند، نتایج مربوط به انحراف معیار و کواریانس نمونه‌های استوانه‌ای محاسبه شد. این نتایج در جداول (۵ و ۶) ارائه شده‌اند [22].

۲-۲-۲- آرماتورهای قاب بتن مسلح

نتایج آزمایش کشش آرماتورهای فولادی در جدول (۷) انجام گرفته است. اتصال پیچ‌های ۸/۸ خشکه به کف صلب با رعایت الزامات استانداردهای ISO و ASTM انجام گرفته است. پیروی از این استانداردها اطمینان حاصل می‌کند که فرآیند آزمایش به شکلی اصولی و یکپارچه صورت پذیرفته است. در این میان، دستورالعمل ASTM A370 برای آزمایش کشش، به عنوان یکی از جامع‌ترین مراجع برای ارزیابی خواص کششی آرماتورها مورد استفاده قرار گرفته است [23].

بلوک‌های سفال سوراخ‌دار مورد استفاده در این مطالعه، دارای ابعاد استاندارد ۲۵۰×۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر (طول، عرض، ضخامت) بوده و از کارخانه شاهرود سفال تهیه گردیده است. آزمایش فشاری روی ۱۰ نمونه بلوک سفال انجام شد که شامل پنج عدد در جهت عمود بر سوراخ و پنج عدد در جهت افقی سوراخ‌ها بود. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM C67 صورت گرفت و نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است [19].

۲-۲-۲- بتن

پس از انتخاب مصالح استاندارد از شرکت شن و ماسه سیدون شاهرود و سیمان پرتلند تیپ دو شاهرود، طرح اختلاط بتن مطابق با طرح اختلاط ملی جدول (۴) و با رعایت استانداردهای ASTM C136 و C33 تهیه شد [20, 21]. به منظور انجام ارزیابی

جدول ۵. نتایج آزمایش فشاری بتن.

Table 5. Concrete Compressive Test Results

specimen		Cubic: Test day (MPa)			Cylindrical: Test day (MPa)			Average		Standard deviation	covariance
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	Cubic	Cylindrical		
IC-OOP	Foundation	44.26	41.02	43.73	35.41	32.81	34.98	38.77	31.02	0.940	3%
	Column	37.35	37.50	33.63	29.88	30.00	26.90	43.00	34.40	0.655	1.9%
	Beam	49.55	53.20	46.88	39.64	42.56	37.51	36.16	28.93	0.827	2.8%
(IW-OOP) (IWR-OOP)	Foundation	44.75	36.42	41.31	35.80	29.14	33.04	49.88	39.90	1.19	3%
	Column	39.8	41.57	40.38	31.84	33.26	32.30	40.83	32.66	1.57	4.82%
	Beam	40.67	69.39	35.95	32.54	31.76	28.76	40.58	32.46	0.33	1%

جدول ۶. نتایج آزمایش فشاری درز ملات و شاتکریت.

Table 6. Compressive Test Results of Mortar Joints and Shotcrete

Specimen	Configuration	Cubic: Test day (MPa)			Average	Standard deviation	covariance
		S1	S2	S3			
IC-OOP	Specimen Mortar joint	25.30	22.63	20.22	22.71	1.2	5%
IW-OOP	Specimen Mortar joint	8.2	8.9	9.42	8.84	0.288	3%
IWR-OOP	Specimen Mortar joint	18.62	17.28	19.60	18.52	0.54	3%
	Shatcrte Specimen	11.87	12.26	9.08	11.07	0.81	7%

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی آرماتور.

Table 7. Tensile Strength Test Results of Reinforcement Bars.

Material	Average Yield Stress (MPa)	Average Ultimate Stress (MPa)	Yield Strain (%)	Ultimate Strain (%)
Reinforcements No 12	494.38	614	0.0024	0.03
Reinforcements No 10	343	561	0.0016	0.05
Reinforcements No 8	355	514	0.0016	0.05

سرتاسری ۵۰ گرم بر مترمربع (در هر دو سمت دیوار) لازم است، آزمایش کشش الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا نیز طبق ASTM E2098 انجام گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش، در جدول (۸) قابل مشاهده است [24, 25].

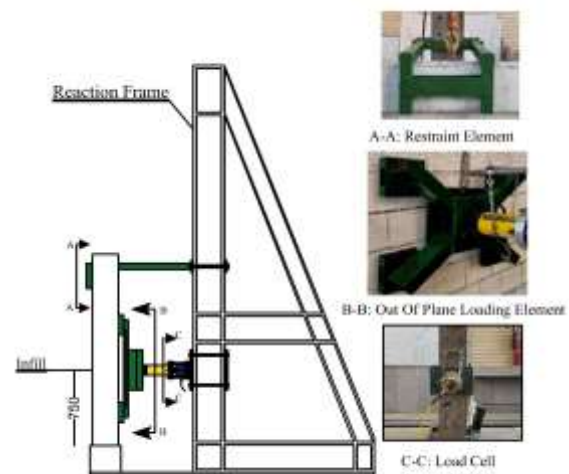
۳- برپایش آزمایشگاهی، شرایط بارگذاری و آماده سازی نمونه

برپایش آزمایشگاهی برای بارگذاری خارج از صفحه نمونه‌های IC-OOP، IW-OOP و IWR-OOP در شکل (۵) نشان داده شده است. در این آزمایش از یک جک استاتیکی هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن و حداکثر جابه‌جایی ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد که به خرپای متصل به کف صلب مهار شد. المان انتقال دهنده آزمایشگاهی خارج از صفحه توسط جرثقیل ۳/۵ تنی در ارتفاع مناسب معلق نگه داشته شد. سپس با اعمال بار خارج از صفحه، المان انتقال دهنده به میانقاب چسبیده و تراز شد. به منظور کاهش تنش و بهینه‌سازی توزیع نیرو در محل اتصال کفشک و میانقاب، از پدهای پلیمری با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. کفشک‌ها با فواصل یکسان در چهار نقطه از طول و ارتفاع میانقاب نصب شده و المان در تمامی جهات تراز شد. آزمایش بارگذاری خارج از صفحه با روش کنترل تغییر مکان و به‌صورت چرخه‌ای اجرا شد. انتقال نیرو از جک به میانقاب، از طریق المان انتقال‌دهنده آزمایشگاهی و کفشک‌ها صورت پذیرفت. جابه‌جایی‌های نمونه توسط تغییر مکان‌سنج‌های خطی (LVDT) ثبت شد که موقعیت هرکدام در جدول (۹) و شکل (۶) به آن اشاره شده است. پروتکل

جدول ۸. نتایج و مشخصات هندسی الیاف شیشه.

Table 8. Results and Geometric Specifications of Alkali-Resistant Glass Fibers.

Mean Tensile Strength (MPa)	Mesh Interval	Number of Fibers
918	5×5	9



شکل ۵. برپایش آزمایشگاهی برای بارگذاری خارج از صفحه.

Fig. 5. Laboratory Setup for Out-of-Plane Loading.

۲-۲-۴- الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا

به دلیل اینکه خمش دیوار یک طرفه و در راستای قائم است، نیازی به والپست نیست و محدودیتی در طول دیوار وجود ندارد. اگر حداقل ۵۰ میلی‌متر کف‌سازی در پایین دیوار ایجاد شود، که دیوار درون آن قرار گیرد، دیگر نیازی به اجرای نبشی پایینی نیست. در حالت نواری حداقل ۱۰۰ گرم بر مترمربع و در حالت

می‌شود. این آسیب‌های داخل صفحه‌ای، احتمال فروریزش خارج از صفحه در زلزله‌های بعدی را افزایش می‌دهد. با این وجود، میان‌قاب‌های با نسبت ابعادی مناسب و محصورشده در قاب‌های سخت می‌توانند ظرفیت قابل توجهی در برابر نیروهای داخل صفحه از خود نشان دهند. سازوکار قوسی در دیوارهای محصورشده، ظرفیت جانبی فراتر از نقطه اولین ترک‌خوردگی ایجاد می‌کند. آسیب‌های قبلی موجب کاهش تماس بین میان‌قاب و قاب پیرامونی شده و باعث تأخیر در فعال‌سازی سازوکار قوسی می‌شود که در شکل (۷) به آن اشاره شده است. الگوی فروریزش میان‌قاب متناسب با شرایط اتصال به قاب پیرامونی به دو صورت سازوکار قوسی دوطرفه یا یک‌طرفه تغییر می‌کند؛ اتصال مناسب در بالای قاب منجر به سازوکار دوطرفه می‌شود، در غیر این صورت سازوکار یک‌طرفه با مقاومت کمتر شکل می‌گیرد.

و روش بارگذاری به صورت شبه استاتیکی و پیشنهادی بود، یعنی در هر دامنه دوسیکل انجام گرفت، در هر سیکل با اعمال بار توسط جک هیدرولیکی پس از رسیدن به جابه‌جایی مدنظر نیرو خالی شده و سپس اعمال بار صورت می‌گیرد و این چرخه تا جایی که میان‌قاب به حد گسیختگی برسد ادامه خواهد یافت. عملکرد نمونه‌ها با تحلیل پارامترهای متعدد شامل سختی، الگوهای ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی ارزیابی شد. این مطالعه، امکان بررسی جامع کارایی روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی را تحت شرایط مختلف بارگذاری فراهم آورد.

۴- نتایج و بررسی داده‌ها و مشاهده آزمایشگاهی

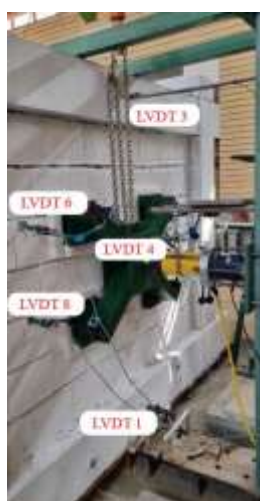
۴-۱- عملکرد قوسی

میان‌قاب‌های ساختمانی پس از زلزله‌های متوسط دچار ترک‌خوردگی مقاطع می‌شوند که منجر به کاهش مقاومت آنها

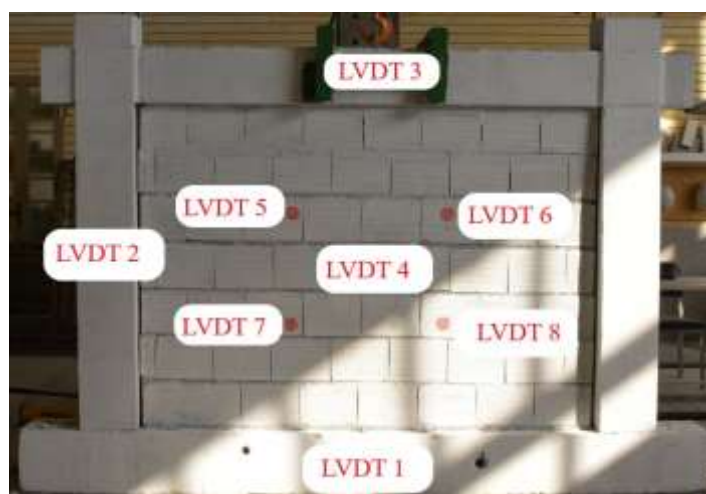
جدول ۹. مشخصات و جزئیات قرارگیری جابه‌جایی سنج‌ها.

Table 9. LVDT Specifications and Installation Details.

Sensor Number	Installation Details	Measurement Purpose	Measurement Range (mm)
LVDT1	Foundation	Out-of-plane displacement of foundation	50
LVDT2	Column	Out-of-plane displacement of column	50
LVDT3	Center of beam	Out-of-plane displacement of beam	10
LVDT4	End of jack	Jack displacement	100
LVDT5	Upper right support	Out-of-plane displacement of infill	50
LVDT6	Upper left support	Out-of-plane displacement of infill	50
LVDT7	Lower right support	Out-of-plane displacement of infill	25
LVDT8	Lower left support	Out-of-plane displacement of infill	25



(پ)



(ب)



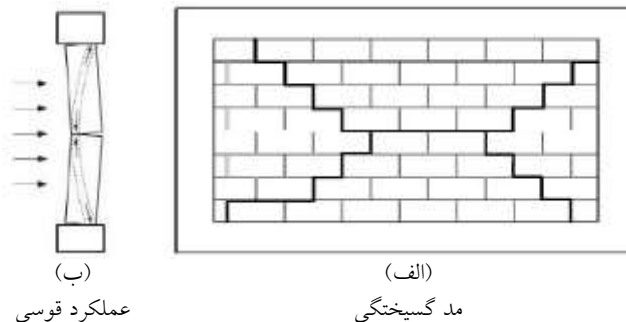
(الف)

شکل ۶. نصب المان خارج از صفحه و جایگذاری تغییر مکان سنج‌ها (LVDTs).

Fig. 6. Installation of Out-of-Plane Setup and Positioning of Displacement Transducers (LVDTs).

گسترش یافت و نیرو به $11/2$ کیلونیوتن رسید. در جابه‌جایی $18/89$ میلی‌متر، یک ترک افقی سرتاسری در رج دوم نمونه شکل گرفت که نیروی متناظر با آن $15/33$ کیلونیوتن ثبت شد، که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌کنید. با افزایش جابه‌جایی به $20/25$ میلی‌متر، بلوک سفال در قسمت پایین نمونه جدا شد و نیرو به $8/24$ کیلونیوتن کاهش یافت، که مطابق شکل (۸-ب) قابل مشاهده است. نهایتاً، تخریب کامل در جابه‌جایی $21/29$ میلی‌متر اتفاق افتاد که منجر به ریزش کامل میانقاب شد، در شکل (۸-پ) به آن اشاره شده است.

بیشترین نیروی ثبت شده در طول آزمایش $15/65$ کیلونیوتن بود که در جابه‌جایی $18/81$ میلی‌متر رخ داد. رفتار نمونه پس از ایجاد اولین ترک در حدود جابه‌جایی $15/5$ میلی‌متر از حالت الاستیک خارج شد و وارد مرحله پلاستیک شد. سازوکار خرابی نهایی از طریق گسترش ترک‌های افقی در پایین نمونه شکل گرفت که در نهایت به ریزش بخش بالایی میانقاب منجر شد. همان‌گونه که در شکل (۸) و جدول (۱۰) نمایش داده شده است، الگوی گسیختگی مشاهده شده بیانگر تأثیر بحرانی محل اتصال تیر به میانقاب و همچنین درزهای افقی بستر ملات بر رفتار لرزه‌ای کلی سیستم قاب‌های میان‌پر با فاصله می‌باشد. این نتایج نواحی با پتانسیل بالا برای مداخلات تقویتی در پیکربندی‌های سازه‌ای مشابه را مشخص می‌نماید. برای تحلیل جامع‌تر و بررسی دقیق‌تر داده‌های آزمایشگاهی، از نمودارهای موجود در شکل (۹) استفاده شد که اطلاعات تکمیلی مورد نیاز را ارائه می‌دهد.



شکل ۷. سازوکار میانقاب در خارج از صفحه [26].

Fig. 7. Out-of-Plane Mechanism of Infill [26].

خمش دوطرفه خارج از صفحه و قید مرزی ناشی از قاب، ظرفیت باربری میانقاب‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به خمش یک‌طرفه عمودی بهبود می‌بخشد. با توجه به محدودیت داده‌های موجود، بررسی اندرکنش رفتار داخل‌صفحه و خارج از صفحه میانقاب‌ها همچنان موضوعی باز در تحقیقات مهندسی زلزله است [26, 27].

۲-۴- آزمایش نمونه قاب بتنی میان‌پر لرزه‌ای با شرایط مرزی (IC-OOP)

نمونه میانقاب با فاصله 20 میلی‌متری از ستون‌ها، مراحل مشخصی از خرابی پیشرونده را در طول آزمایش نشان داد. در ابتدا، نمونه تا جابه‌جایی 12 میلی‌متر رفتاری کاملاً الاستیک و بدون آسیب از خود نشان داد. اولین نشانه‌های آسیب در جابه‌جایی $15/50$ میلی‌متر (با نیروی اعمالی $11/02$ کیلونیوتن) به صورت ترک افقی در محل اتصال تیر و میانقاب مشاهده شد. با افزایش جابه‌جایی به $15/59$ میلی‌متر، این ترک در زیر تیر و در درز ملات



(پ) فروریزش میانقاب بصورت لغزشی (جابه‌جایی $21/29$ میلی‌متر)



(ب) ترک ایجاد شده در پشت نمونه (جابه‌جایی $21/25$ میلی‌متر)



(الف) محل ترک ایجاد شده در پایین نمونه (جابه‌جایی $18/89$ میلی‌متر)

شکل ۸. (الف، ب، پ) روند کلی آزمایش.

Fig. 8. (a, b, c) General Testing Procedure.

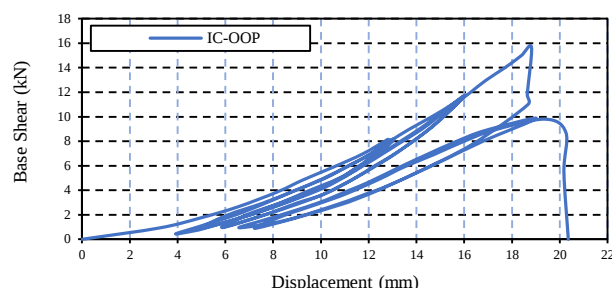
۳-۴- آزمایش نمونه قاب بتنی میان‌پر با والپست بدون تقویت (IW-OOP)

در آزمایش انجام شده، میان‌قاب مراحل مشخصی از تغییر رفتار را نشان داد. در مرحله اول، با اعمال جابه‌جایی پنج میلی‌متر طی دو سیکل، نمونه رفتاری کاملاً الاستیک از خود نشان داد و هیچ ترک مشاهده نشد. در جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر نیز رفتار همچنان الاستیک باقی ماند، با حداکثر نیروی ۷/۴ کیلونیوتن در سیکل اول و ۷/۱ کیلونیوتن در سیکل دوم به ثبت رسید. اولین نشانه‌های آسیب در جابه‌جایی ۱۴ میلی‌متر با نیروی ۱۱/۶۷ کیلونیوتن ظاهر شد که شامل ترک افقی در وسط میان‌قاب و ترک در محل اتصال به فونداسیون بود همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌کنید. در سیکل دوم این بازه، نیرو به ۱۲ کیلونیوتن افزایش یافت و رفتار نمونه از حالت الاستیک به پلاستیک تغییر پیدا کرد. حداکثر ظرفیت باربری میان‌قاب در جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متر با نیروی ۱۳/۹۱ کیلونیوتن ثبت شد که با شکل‌گیری ترک‌های افقی، مورب و قطری گسترده همراه بود. پس از این نقطه، افت قابل توجهی در ظرفیت باربری مشاهده شد، به طوری که در جابه‌جایی ۱۷ میلی‌متر، نیرو به ۷/۴ کیلونیوتن کاهش یافت، که در (شکل ۱۰-ب) نشان داده شده است. در جابه‌جایی‌های بیشتر (۲۰ تا ۳۸ میلی‌متر)، زوال تدریجی مصالح، گسترش ترک‌ها و جدا شدن قطعات بلوک‌سفال رخ داد و نیرو به محدوده ۱/۲ تا ۱/۶ کیلونیوتن کاهش پیدا کرد. ویژگی قابل توجه در رفتار این میان‌قاب، تخریب تدریجی و شکل‌پذیری آن بود که به جای گسیختگی ناگهانی یا شکست ترد، با زوال تدریجی مصالح و تغییر شکل قوسی همراه بود، در (شکل ۱۰-ب) به آن اشاره شده است. شکل (۱۱) همراه با داده‌های ارائه شده در جدول (۱۱)، به طور مبسوط نمودار پوش آزمایشگاهی، منحنی‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای و همچنین نمودار جابه‌جایی ثبت شده توسط تغییر مکان سنج‌ها را به نمایش می‌گذارد که مجموعه این اطلاعات در راستای تحلیل رفتار سازه‌ای نمونه‌های مورد مطالعه، قابل مشاهده و ارزیابی می‌باشد.

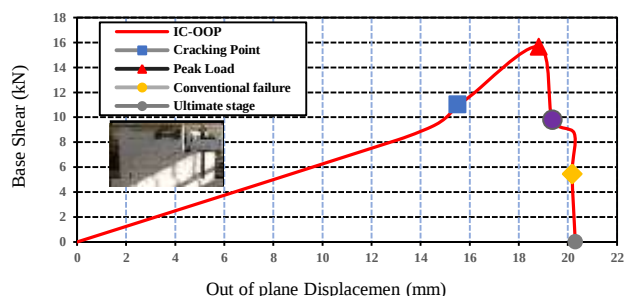
جدول ۱۰: نتایج آزمایش نمونه.

Table 10. Specimen Test Results.

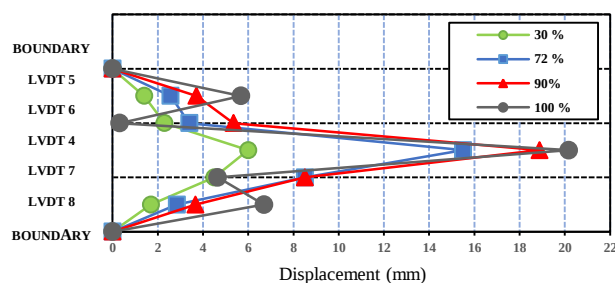
(IC-OOP)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak load	15.65	18.81
Minimum load	8.24	20.20



(الف) نمودار چرخه ای آزمایش خارج از صفحه میان‌قاب با شرایط مرزی



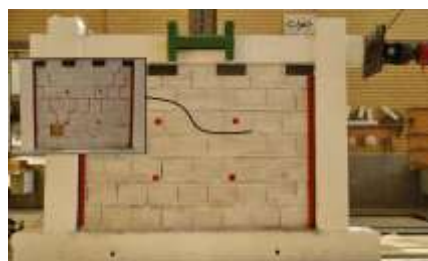
(ب) نمودار بار تغییر مکان با شرایط مرزی



(پ) نمودار جابه‌جایی آزمایش خارج از صفحه میان‌قاب با شرایط مرزی

شکل ۹. (الف، ب، پ) نمودارهای مربوط به آزمایش خارج از صفحه میان‌قاب نمونه (IC-OOP).

Fig. 9. (a, b, c) Out-of-Plane Test Diagrams for Infill Specimen IC-OOP.



(پ) ترک‌های مورب در میان‌قاب (جابه‌جایی ۱۷ میلی‌متر)



(ب) عملکرد قوسی (جابه‌جایی ۳۸ میلی‌متر)



(الف) ترک افقی در وسط میان‌قاب (جابه‌جایی ۱۴ میلی‌متر)

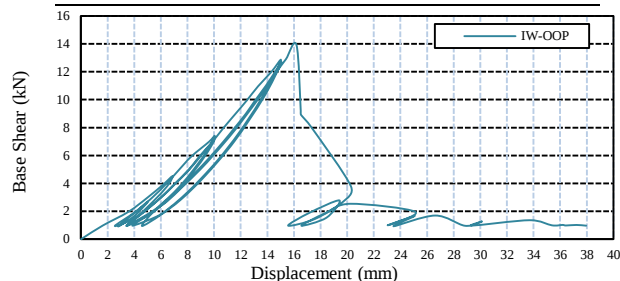
شکل ۱۰. (الف، ب، پ) روند کلی آزمایش.

Fig. 10. (a, b, c, d) General Testing Procedure.

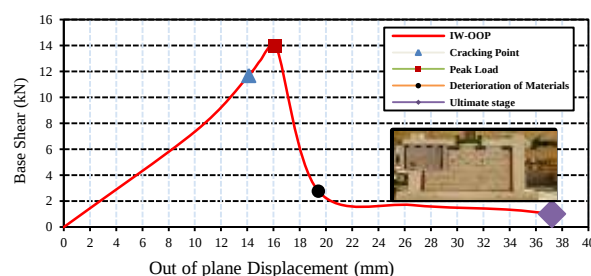
جدول ۱۱. نتایج آزمایش نمونه.

Table 11. Specimen Test Results.

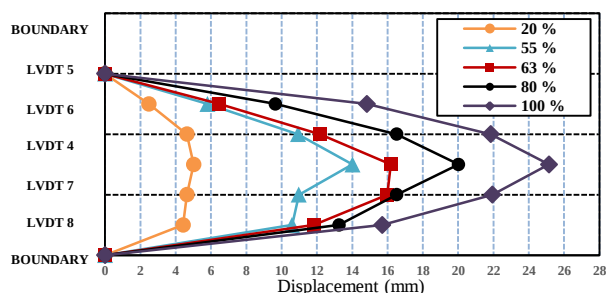
(IW-OOP)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak load	13.91	16
Minimum load	1.6	38



(الف) نمودار چرخه ای آزمایش خارج از صفحه میانقاب با شرایط مرزی



(ب) نمودار بار تغییر مکان با شرایط مرزی



(پ) نمودار جابه‌جایی خارج از صفحه میانقاب با شرایط مرزی

شکل ۱۱. نمودارهای مربوط به آزمایش خارج از صفحه میانقاب (IW-OOP).

Fig. 11. Diagrams Related to Out-of-Plane Testing of Infill Specimen IW-OOP.

۴-۴- آزمایش نمونه قاب بتنی میان پر با والپست تقویت شده با

الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (IWR-OOP)



(پ) شمای نمونه تقویت شده پشت نمونه بعد از بارگذاری (جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر)



(ب) شمای نمونه بعد از بارگذاری (جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر)



(الف) شمای نمونه قبل بارگذاری

شکل ۱۲. نمای کلی از قبل و بعد از آزمایش میانقاب با والپست تقویت شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا.

Fig. 12. General View Before and After Testing of Infill with Wall post Reinforced with Alkali-Resistant Glass Fiber.

۴-۵- مقایسه نمونه‌های خارج از صفحه

در این بخش، به مقایسه جامع رفتار نمونه‌های آزمایش شده می‌پردازیم. نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۴ و ۱۵)، امکان تحلیل مقایسه‌ای دقیق را فراهم می‌سازد. شکل (۱۴) نمودار پوش نمونه‌ها را نمایش می‌دهد که به وضوح تفاوت‌های رفتاری آن‌ها را آشکار می‌سازد. در شکل (۱۵)، مقایسه نیرو و جابه‌جایی متناظر با آن در دو وضعیت کلیدی ارائه شده است: وضعیت اول مربوط به بیشینه نیرو در هر نمونه، و وضعیت دوم مربوط به کمترین نیرو یا حد نهایی نمونه‌ها است. این مقایسه دوگانه، امکان ارزیابی عملکرد نمونه‌ها را هم در نقطه اوج مقاومت و هم در مرحله نهایی تخریب فراهم می‌کند.

با توجه به نمودارهای اشاره شده در شکل (۱۴) می‌توان عملکرد نمونه‌ها را بررسی کرد، در مقایسه نمونه (IWR-OOP) با نمونه (IC-OOP)، کاهش مقاومت به میزان ۱۱٪ و کاهش جابه‌جایی متناظر به میزان ۱۵٪ مشاهده می‌شود. تا نقطه پیک نیرو، نمونه (IC-OOP) عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. پس از نقطه پیک، نمونه (IWR-OOP) در مقایسه با نمونه (IC-OOP)، کاهش ۸۰٪ در نیرو و افزایش ۸٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که نمونه (IWR-OOP) در نهایت عملکرد بهتری داشته است، در حالی که نمونه (IC-OOP) در جابه‌جایی نهایی دچار تخریب و فروریزش شد.

نمونه تقویت شده (IWR-OOP) در مقایسه با نمونه (IWR-OOP)، افزایش ۳۷٪ در مقاومت و ۳۲٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. پس از نقطه پیک، نمونه (IWR-OOP) نسبت به نمونه (IWR-OOP)، افزایش ۱۰۶٪ در نیرو و ۳۱٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. همچنین در مقایسه با نمونه (IC-OOP)، نمونه تقویت شده (IWR-OOP) افزایش ۱۱۰٪ در نیرو و ۱۲٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. پس از نقطه پیک، کاهش ۶۰٪ در نیرو و افزایش ۱۵۰٪ در جابه‌جایی مشاهده می‌شود، در حالی که در نمونه (IC-OOP) پس از جابه‌جایی نهایی دچار فروریزش شده و شکست تدریجی را تجربه کرد.

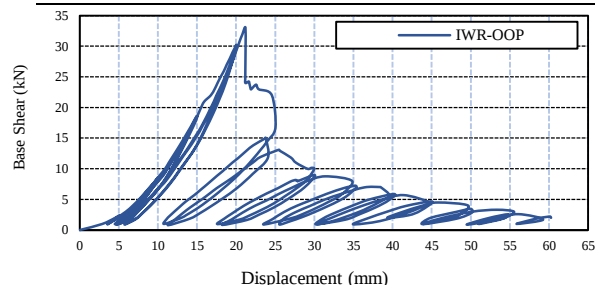
۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی و مقایسه رفتار سه نوع میان‌قاب بلوک سفال تحت بارگذاری خارج از صفحه می‌پردازد. نمونه‌های مورد مطالعه شامل میان‌قاب معمولی با شرایط مرزی (IC-OOP)، میان‌قاب با والپست (IWR-OOP) در ساختمان‌های موجود و بهسازی میان‌قاب با والپست تقویت‌شده با الیاف شیشه (IWR-OOP) است. تمامی نمونه‌ها در مراحل اولیه بارگذاری رفتاری الاستیک از خود نشان دادند.

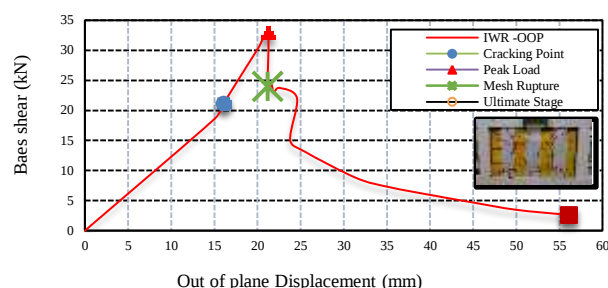
جدول ۱۲. نتایج آزمایش نمونه

Table 12. Specimen Test Results.

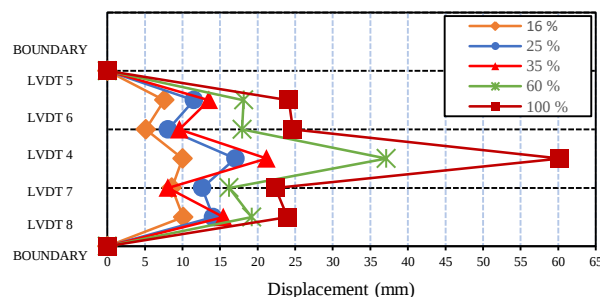
(IWR-OOP)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak Load	32.98	21.19
Minimum Load	3.30	50



(الف) نمودار چرخه‌ای میان‌قاب با الیاف شیشه



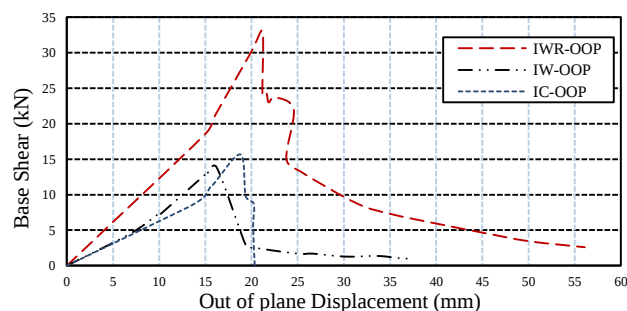
(ب) نمودار بار تغییر مکان میان‌قاب با الیاف شیشه



(پ) نمودار تغییر مکان سنج (LVDT) در طول بارگذاری

شکل ۱۳. (الف، ب، پ) نمودارهای خارج از صفحه میان‌قاب نمونه (IWR-OOP).

Fig. 13. (a, b, c) Out-of-Plane Diagrams of Infill Specimen IWR-OOP.



شکل ۱۴. مقایسه نمودار پوش رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های نمونه‌های آزمایشگاهی

Fig. 14. Comparison of Out-of-Plane Behavior Pushover Curves of Laboratory Infill Specimens.

جدول ۱۳. نتایج و مقایسه نیرو، جابه‌جایی نمونه‌های آزمایشگاهی.

Table 13. Results and Comparison of Force and Displacement for Laboratory Specimens.

Properties	Control Infill Frame with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IC-OOP)		Infill Frame with Wallpost, with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IW-OOP)		Glass Fiber Reinforced Infill Frame with Wallpost, with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IWR-OOP)	
	Force (kN)	Displacement (mm)	Force (kN)	Displacement (mm)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak Load	15.65	18.81	13.91	16	32.98	21.19
Minimum Load	8.24	20.20	1.6	38	3.31	50

از خود نشان داد، وجود ترکیب الیاف شیشه و شاتکریت باعث بالا بردن مقاومت برشی و کششی در میانقاب شد. زیرا مقاومت نسبت به سایر نمونه‌ها تا ۱۰۰٪ و جابه‌جایی تا ۱۵۰٪ افزایش داشت، حتی در جابه‌جایی‌های بزرگ، این سیستم تقویتی از ریزش مصالح جلوگیری کرد و یکپارچگی کلی سازه را حفظ نمود که باعث تغییر در رفتار میانقاب از حالت شکست ترد به شکست نرم شد.

قدردانی نویسندگان

از مسئولین آزمایشگاه سازه و تکنولوژی بتن، جناب آقای ابوالفضل محمدی، سیداحمد نظامی، خانوم دکتر دلارام استاد، آقای محمدجواد اسماعیلی، آقای میلاد فرجی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله جهت انتشار آن تعارض منافی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

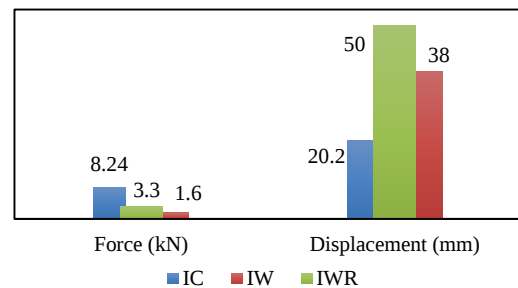
جلیل شفائی: نظارت، گردآوری داده‌ها، مفهوم‌سازی. فرنوش باسلیقه: نظارت، مدیریت پروژه، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی. محمدجواد زارعی: نگارش - بازبینی و ویرایش، نگارش - پیش‌نویس اصلی، تصویرسازی، اعتبارسنجی، نرم‌افزار، روش‌شناسی، پژوهش، تحلیل رسمی، مفهوم‌سازی.

منابع مالی

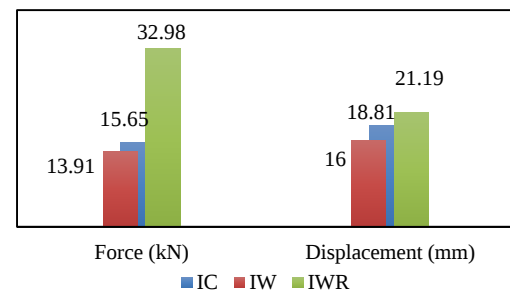
نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که می‌توانسته بر کار گزارش‌شده در این مقاله تأثیرگذار باشد، ندارند.

هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.



(الف) نمودار کمترین نیرو متناظر با جابه‌جایی در سه نمونه



(ب) نمودار بیشترین نیرو متناظر با جابه‌جایی در سه نمونه

شکل ۱۴. نمودار میله‌ای مقایسه نمونه‌ها در نیرو و جابه‌جایی‌های متناظر باهم.

Fig. 15. Bar Chart Comparison of Specimens at Corresponding Force and Displacement Values.

۱- نمونه (IC-OOP) که با شرایط مرزی ساخته شد عملکردی قوسی را از خود نشان داد، که قبل از اینکه به مقاومت نهایی خود برسد یک ظرفیت مضاعف تحت اثر عملکرد قوسی نیز به وجود آمد نیرو افزایش شد، ولی در نهایت رفتار میانقاب رفتاری نامطلوب و شکستی ترد و فروریزش صورت گرفت.

۲- نمونه (IW-OOP) با والپست طبق ساختمان‌های موجود ساخته شد، عملکرد این نمونه عملکردی مطلوب ارائه داد، زیرا نه تنها اثر عملکرد قوسی دوجته را از خود نشان داد بلکه باعث شکست تدریجی مصالح و زوال در میانقاب و شکل پذیری میانقاب بودیم.

۳- نمونه (IWR-OOP) که با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و شاتکریت تقویت شده بود عملکردی بسیار عالی و کارآمد را

References

- [1] Khanmohammadi, M., Eshraghi, M., Sayadi, S. and Mashhadinezhad, M.G., 2023. Post-earthquake seismic assessment of residential buildings following Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake (Mw7.3) part 1: Damage types and damage states. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, p.108121. doi: [10.1016/j.soildyn.2023.108121](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108121).
- [2] McDowell, E.L., McKee, K.E. and Sevin, E., 1956. Arching action theory of masonry walls. *Journal of the Structural Division*, 82(2), pp.915-1-915-18. doi: [10.1061/JSDEAG.0000019](https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000019).
- [3] Ostad, D., Shafaei, J. and Alaei, F.J., 2025. Experimental evaluation of diagonal tension test on hollow clay block wallttes with different configurations of non-structural materials (cement and plaster). *Structures*, 79, p.109418. doi: [10.1016/j.istruc.2025.109418](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109418).
- [4] Ostad, D., Shafaei, J. and Alaei, F.J., 2025. Experimental evaluation of the diagonal tension test of hollow clay blocks strengthening with (AR) glass fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 23, p.e05151. doi: [10.1016/j.cscm.2025.e05151](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05151).
- [5] Ostad, D. and Shafaei, J., 2024. Investigating the seismic performance of masonry infills with opening and non-opening by considering the interaction of in-plane and out-of-plane behavior and providing the reduction factor of effective stiffness and ultimate strength. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(114), pp.56-83.
- [6] Razeghi, V., Zargarani, M., Nikhoo, A., Attari Kha, A. et al., 2024. Experimental investigation of the cyclic behavior of non-load-bearing masonry walls strengthened using bed-joint reinforcement and fiber mesh. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39(4), pp.89-99.
- [7] Halici, O.F., Demir, U., Zabbar, Y. and Ilki, A., 2023. Out-of-plane seismic performance of bed-joint reinforced autoclaved aerated concrete (AAC) infill walls damaged under cyclic in-plane displacement reversals. *Engineering Structures*, 286, p.116077. doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116077](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116077).
- [8] Ostad, D. and Shafaei, J., 2021. Analytical investigation of the seismic performance of unreinforced masonry walls strengthened using steel strips. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12), pp.3161-3182.
- [9] Klun, M., Antolinc, D. and Bosiljkov, V., 2021. Out-of-plane experimental study of strengthening slender non-structural masonry walls. *Applied Sciences*, 11(19), p.9098. doi: [10.3390/app111909098](https://doi.org/10.3390/app111909098).
- [10] Di Domenico, M., De Risi, M.T., Ricci, P., Verderame, G.M. and Manfredi, G., 2021. Empirical prediction of the in-plane/out-of-plane interaction effects in clay brick unreinforced masonry infill walls. *Engineering Structures*, 227, p.111438. doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111438](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111438).
- [11] Minotto, M., Verlato, N., Donà, M. and da Porto, F., 2020. Strengthening of in-plane and out-of-plane capacity of thin clay masonry infills using textile- and fiber-reinforced mortar. *Journal of Composites for Construction*, 24(6), p.04020059. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001067).
- [12] Alwashali, H., Sen, D., Jin, K. and Maeda, M., 2019. Experimental investigation of influences of several parameters on seismic capacity of masonry infilled reinforced concrete frame. *Engineering Structures*, 189, pp.11-24. doi: [10.1016/j.engstruct.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.020).
- [13] Ismail, N., El-Maaddawy, T. and Khattak, N., 2018. Quasi-static in-plane testing of FRCM strengthened non-ductile reinforced concrete frames with masonry infills. *Construction and Building Materials*, 186, pp.1286-1298. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.230](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.230).
- [14] Kariou, F., Triantafyllou, S.P., Bournas, D. and Koutas, L., 2018. Out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. *Construction and Building Materials*, 165, pp.769-781. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026).
- [15] Triantafillou, T.C., Karlos, K., Kefalou, K. and Argyropoulou, E., 2017. An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior. *Construction and Building Materials*, 133, pp.1-13. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032).
- [16] Bischof, P. and Suter, R., 2014. Retrofitting masonry walls with carbon mesh. *Polymers*, 6(2), pp.280-299. doi: [10.3390/polym6020280](https://doi.org/10.3390/polym6020280).
- [17] Koutas, L., Pitytzogia, A., Triantafillou, T.C. and Bousias, S.N., 2014. Strengthening of infilled reinforced concrete frames with TRM: Study on the development and testing of textile-based anchors. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), p.A4013015. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000390](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000390).
- [18] Lunn, D.S. and Rizkalla, S.H., 2011. Strengthening of infill masonry walls with FRP materials. *Journal of Composites for Construction*, 15(2), pp.206-214. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000088).
- [19] ASTM, 2021. *Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile*.
- [20] ASTM, 2023. *ASTM C33/C33M-23: Standard specification for concrete aggregates*.
- [21] ASTM, 2019. *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*.
- [22] ASTM, 2021. *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- [23] ASTM, 2016. *ASTM A370: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*.

- [24] BHRC, 2013. *Standard No. 2800: Seismic design of buildings*, 4th ed. Appendix 6: Seismic design and construction of architectural nonstructural components.
- [25] ASTM, 2018. *Standard test method for determining tensile breaking strength of glass fiber reinforcing mesh for use in Class PB exterior insulation and finish systems (EIFS), after exposure to a sodium hydroxide solution*.
- [26] Ostad, D. and Shafaei, J., 2024. Investigating the seismic performance of masonry infills with opening and non-opening by considering the interaction of in-plane and out-of-plane behavior and providing the reduction factor of effective stiffness and ultimate strength.
- [27] Asteris, P., Cavaleri, L., Di Trapani, F. and Tsaris, A., 2017. Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels. *Engineering Structures*, 132, pp.110–122. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Zarei, M., Shafaei, J. and Basaligheh, F., 2027. Experimental Study on the Behavior and Retrofit of Clay Block Infill Frames under Out-of-Plane Loading Using Alkali-Resistant Glass Fiber. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.37-52.



Experimental Investigation on the Rheological Performance of Asphalt Binders Modified with Montmorillonite Nanoclay and RAR at Intermediate and High Temperatures

Hassan Alvandi¹, Amir Kavussi^{2*} , Sina Hatami³

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. MS.c. Graduated, Bandar Abbas Refinery, Jey Oil Refining Company, Bandar Abbas, Iran.

Abstract

The growing demand for durable and environmentally sustainable pavement materials has directed significant research efforts toward modifying asphalt binders with advanced additives. Among the various options available, montmorillonite nanoclay and reacted and activated rubber (RAR) have attracted particular attention due to their complementary characteristics. Nanoclay, with its layered silicate structure and exceptionally high surface area, is known to enhance the thermal stability, stiffness, and aging resistance of asphalt binders. On the other hand, RAR (derived from recycled waste tire rubber) improves elasticity and fatigue resistance while simultaneously addressing critical environmental concerns related to the disposal of end-of-life tires. The combined use of these two modifiers offers the potential for a synergistic effect, resulting in improved rheological behavior and long-term performance of asphalt binders under varying service conditions. This study was systematically designed to analyze the rheological behavior of asphalt binders modified with different proportions of montmorillonite nanoclay (2, 4, and 5% by weight) and RAR (15, 20, and 25% by weight) under a range of temperature conditions. The modified binders were subjected to a comprehensive testing program using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), and Linear Amplitude Sweep (LAS) tests. Permanent deformation (rutting resistance) was evaluated using DSR at high temperatures ranging from 58 to 82°C (specifically at 58, 64, 70, 76, and 82°C) under a frequency of 1.59 Hz (10 rad/s) and a constant strain of 12%. These tests were conducted on binders both before and after short-term aging with the Rolling Thin Film Oven (RTFO). Fatigue performance was assessed using the DSR in the intermediate temperature range of 16°C to 22°C (16, 19, and 22°C), also at 1.59 Hz, under a constant strain of 1.01%, applied on binders aged with the Pressure Aging Vessel (PAV) to simulate long-term service life. Following these assessments, MSCR tests were performed on short-term aged binders, and LAS tests were conducted on long-term aged binders to provide a holistic evaluation of rutting and fatigue resistance. The experimental results demonstrated that the optimal performance was achieved in binders containing 4% nanoclay and 25% RAR. From an engineering perspective, this composition resulted in substantial enhancements of both rutting and fatigue resistance. Specifically, the parameter $G^*/\sin\delta$, a measure of rutting resistance, improved by 115% compared with the base binder, while $G^*\sin\delta$, indicative of fatigue resistance, increased by 87%. These improvements highlight the effectiveness of the nanoclay–RAR system in addressing the critical challenges of permanent deformation at high temperatures and fatigue cracking at intermediate temperatures. Furthermore, the MSCR results confirmed the significant reduction in non-recoverable creep compliance, while LAS outcomes demonstrated enhanced fatigue life, providing robust evidence of the synergistic effects between nanoclay and RAR. The findings of this research emphasize the potential of incorporating nanoclay and RAR as a hybrid modification strategy for asphalt binders, particularly in hot climate regions where pavements are exposed to severe thermal stresses and high traffic loads. Beyond the technical benefits, the use of RAR also offers an environmentally responsible solution by recycling waste tires into value-added infrastructure materials. The integration of advanced nanomaterials and recycled polymers therefore represents a promising approach to designing high-performance, cost-effective, and sustainable asphalt binders capable of extending pavement service life and reducing maintenance costs. This study contributes valuable insights for pavement engineers and researchers, demonstrating that the combined modification with nanoclay and RAR provides a balanced improvement of stiffness, elasticity, and durability, making it a viable candidate for next-generation asphalt technologies.

Review History

Received: Jul 14, 2025

Revised: Sep 9, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Nanoclay Montmorillonite
Reacted and Activated
Rubber (RAR)
DSR

* Corresponding Author Email: kavussia@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3195-7329

ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فرآوری شده در دماهای بالا و میانی

حسن الوندی^۱، امیر کاووسی^{۲*} , سینا حاتمی^۳

۱. دانشجوی مقطع دکتری تخصصی مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲. استاد تمام گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳. مسئول آزمایشگاه شرکت پالایش نفت جی سایت بندرعباس مهندسی شیمی، بندرعباس، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با مقادیر مختلف نانورس مونت موریلونیت (۲، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر) و پودر لاستیک فرآوری شده (RAR) (۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) تحت تاثیر شرایط مختلف دمای میانی و بالا انجام شده است. بررسی تغییر شکل دائمی قیر با آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR) در محدوده دمایی ۵۸ تا ۸۲ درجه سانتی گراد و در فرکانس ۱/۵۹ هرتز با اعمال کرنش ثابت ۱۲٪ روی قیر قبل و بعد از پیرشدگی انجام شد. ارزیابی خستگی قیر نیز در دماهای ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی گراد و در همان فرکانس و با اعمال کرنش ۱/۱۰٪ روی قیر پیر شده تحت فشار انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه نانورس و RAR موجب بهبود قابل توجه پارامترهای عملکردی قیر می‌شود. نیز افزایش معنادار مدول برشی مختلط (G^*) و کاهش محسوس زاویه فاز (δ) در تمامی دماها مشاهده شد، به طوری که بیشترین بهبود در نمونه‌های حاوی ۴٪ نانورس و ۲۵٪ RAR مشاهده شد، که حاکی از رفتار الاستیک تر و مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل‌های دائمی بود. از دید فنی، این ترکیب موجب ارتقای پارامترهای مقاومت شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) و مقاومت خستگی ($G^*\cdot\sin\delta$) به ترتیب به میزان ۱۱۵٪ و ۸۷٪ در مقایسه با قیر پایه شد. در مراحل بعدی آزمایش‌های MSCR و LAS انجام شد که موجب کاهش ۹۲٪ در مقدار مدول غیرقابل برگشت و افزایش ۱۰۷ برابر عمر خستگی نسبت به قیر پایه شد. این یافته‌ها حاکی از آن است که استفاده همزمان از نانورس و RAR ضمن هم افزایی مناسب می‌تواند راهکار مناسبی برای تولید قیرهای اصلاح شده مقاوم در شرایط دماهای میانی و بالای محیط باشد.

کلمات کلیدی

نانورس مونت موریلونیت
پودر لاستیک فرآوری شده
رئومتر برش دینامیکی
بهبود خواص رئولوژیکی

۱- مقدمه

حیاتی در دوام و عملکرد آن دارد. با این حال، قیر خالص به دلیل محدودیت‌های ذاتی خود در برابر تنش‌های محیطی و ترافیکی مانند تغییرات دما، بارهای ترافیکی و عوامل جوی، غالباً قادر به برآورده کردن نیازهای مهندسی مدرن نیست. از این رو، اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پیشرفته به یکی از محورهای اصلی

با افزایش تقاضا برای زیرساخت‌های حمل و نقل بادوام و پایدار، به‌ویژه جاده‌ها، نیاز به بهبود کیفیت و عملکرد مصالح مورد استفاده در ساخت و نگهداری آن‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود. قیر به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای روسازی، نقش

* رایانامه نویسنده مسئول: kavussia@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3195-7329

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



پژوهش در مهندسی راه تبدیل شده است [1]. در میان مواد مختلف، نانورس مونت موریلونیوم و پودر لاستیک فرآوری شده (RAR) به دلیل آثار قابل توجه بر رفتار رئولوژیکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. نانورس با ساختار لایه‌ای و ویژگی‌های نانومتری خود، موجب بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی قیر می‌شود [2]، در حالی که RAR، که از بازیافت تایرهای فرسوده به دست می‌آید، علاوه بر مزایای زیست محیطی، مقاومت قیر در برابر تنش‌های دینامیکی و حرارتی را افزایش می‌دهد [3]. ترکیب این دو افزودنی به عنوان یک استراتژی نوین، ظرفیت ارتقای عملکرد قیر در شرایط بارگذاری و محیطی متنوع را دارد [4].

ارزیابی عملکرد رئولوژیکی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پیشرفته، گام مهمی در بهینه‌سازی فرمولاسیون قیر اصلاح شده است. آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) یکی از روش‌های رایج برای این منظور است که امکان بررسی مدول برشی، زاویه فاز و رفتار ویسکوالاستیک قیر تحت شرایط مختلف بارگذاری و دمایی را فراهم می‌کند [5]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن نانورس موجب افزایش مدول برشی و بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی می‌شود [6]، در حالی که استفاده از RAR به طور معناداری مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی و پیرشدگی را بهبود می‌بخشد [7]. با این حال، پژوهش‌های مربوط به استفاده همزمان از این دو ماده هنوز محدود است [8، 9]. نانورس مونت موریلونیوم به دلیل سطح ویژه بالا و توانایی ایجاد شبکه‌های نانوساختاری در ماتریس قیر، به عنوان یک اصلاح کننده مؤثر شناخته می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزودن ۳٪ نانورس می‌تواند مقاومت شیارشدگی را تا ۴۰٪ افزایش دهد [13]. همچنین نانورس با کاهش زاویه فاز و افزایش مدول برشی مختلط، عملکرد قیر را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد [12، 14]. افزون بر این، نانورس با ایجاد شبکه نانوساختاری در ماتریس قیر، نرخ اکسیداسیون و پیرشدگی قیر را کاهش می‌دهد. با این حال، یکی از چالش‌ها، تجمع ذرات نانورس در ماتریس قیر است که برای رفع آن روش‌هایی مانند استفاده از فعال کننده‌های سطحی پیشنهاد شده است [15].

پودر لاستیک فرآوری شده نیز علاوه بر کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از انباشت تایرهای فرسوده، با بهبود پراکندگی و پیوند با ماتریس قیر، خواص الاستیسیته و مقاومت خستگی آن

را ارتقا می‌دهد [16]. با وجود عملکرد مثبت روش‌های سنتی استفاده از لاستیک در قیر، مشکلاتی مانند نیاز به دماهای بالا و زمان اختلاط طولانی، محدودیت‌هایی ایجاد کرده‌اند. تولید RAR با روش اختلاط گرم کوتاه مدت و دانه‌های ریز لاستیکی این مشکلات را تا حد زیادی برطرف کرده است [17]. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن ۱۵٪ RAR، ویسکوزیته قیر را تا سه برابر افزایش داده و مقاومت در برابر شیارشدگی را در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد بهبود می‌بخشد [18]، همچنین با جذب اجزای سبک قیر، از پیرشدگی اکسیداتیو جلوگیری می‌کند [19].

ترکیب نانورس و RAR به عنوان رویکردی هم افزا، پتانسیل غلبه بر محدودیت‌های هر ماده را دارد. نانورس با بهبود پراکندگی ذرات لاستیک، از تجمع آن‌ها جلوگیری کرده و پیوند بین فازها را تقویت می‌کند [20]. همچنین این ترکیب نرخ اکسیداسیون قیر را کاهش داده و پس از پیرشدگی، افت کمتری در انعطاف پذیری و افزایش کمتری در سختی نشان داده است [11، 23]. به طور کلی، نانورس و RAR هر یک به تنهایی قادر به بهبود خواص رئولوژیکی، مکانیکی و مقاومت در برابر پیرشدگی قیر هستند و ترکیب آن‌ها آثار هم افزایی معناداری ایجاد می‌کند که می‌تواند نسل جدیدی از قیرهای اصلاح شده با عملکرد برتر را معرفی کند.

اگرچه در مطالعات پیشین اصلاح قیر با استفاده از نانورس یا پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. اما درک جامعی از اثر هم افزایی این دو ماده توأمان به طور کامل حاصل نشده است. با توجه به مشکلات استفاده از پودر لاستیک در قیر از جمله تمایل به جدایش فازی، افزایش بیش از حد ویسکوزیته و کاهش پایداری ذخیره سازی مطالعات به سمت استفاده از پودر لاستیک فرآوری شده سوق پیدا کرده که با فعال سازی سطحی و تعامل بهتر با فاز قیر و در نتیجه یکنواختی پخش و افزایش دوام مخلوط آسفالتی همراه بوده است [25-29]. در این پژوهش خواص رئولوژیکی ترکیب دو ماده نانو رس مونت موریلونیوم و پودر لاستیک فرآوری شده با قیر در دماهای میانی و بالا مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- مواد، مصالح و روش‌های آزمایش

در تهیه تمام نمونه‌ها از قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ شرکت نفت جی استفاده شد که مشخصات فنی آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر خالص ۸۵/۱۰۰ نفت جی

Table 1. Properties of Neat 85/100 Penetration Grade Asphalt Binder from Jey Oil Refinery

Test Description	Standard	Unit	Result
Penetration at 25 °C	ASTM D5	dmm	85
Softening Point	ASTM D36	°C	42
Kinematic Viscosity at 135 °C	AASHTO T 316	cSt	254
Specific Gravity	ASTM D-70	g/cm ³	1.025
Ductility	ASTM D113	cm	100>

حاوی آلومینیوم یا منیزیم) و دو لایه چهاروجهی سیلیس قرار گرفته‌اند. این ساختار باعث می‌شود که مونت موریلونیت توانایی جذب آب و تورم‌پذیری بالا داشته باشد. همچنین، سطح ویژه زیاد و امکان اصلاح شیمیایی آن، این ماده را برای استفاده در نانو تکنولوژی ایده آل می‌کند. در این مطالعه از ۲، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر، نانورس مونت موریلونیت شرکت فاین نانو که عناصر آن توسط آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) که در جدول (۲) و تصویر حاصل از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) آن در شکل (۱) قابل مشاهده است، در اصلاح قیر استفاده شد.

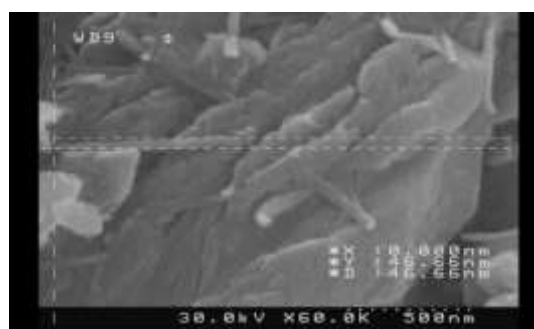
۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

برای افزودن پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس مونت موریلونیت به قیر از دستگاه همزن برشی با دور بالا استفاده شد. ابتدا قیر تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد تا به صورت یکنواخت درآید. سپس پودر لاستیک فرآوری شده در مقادیر ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به قیر اضافه شد و در نهایت نانورس مونت موریلونیت به آرامی به میزان ۲، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر در دمای ۱۶۳ درجه سانتی گراد با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به ترکیب اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه اختلاط انجام شد. سپس برای ارزیابی پیرشدگی قیر اصلاح شده آزمایش پیرشدگی کوتاه مدت^۱ (RTFO) و پیرشدگی بلندمدت^۲ (PAV) انجام گرفت. جدول (۳) معرف نمونه‌های ساخته شده و کدگذاری آنها است. (MMT) نماد نانورس و RAR نماد پودر لاستیک فرآوری شده است به عنوان نمونه: 2MMT0RAR نمونه دارای ۲٪ نانورس مونت موریلونیت و ۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده است).

جدول ۲. نتایج آزمایش XRD نانورس مونت موریلونیت مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. XRD test results of Montmorillonite Nanoclay used in this study

Content (%)	Substance	NO.
0.98	Na ₂ O	1
3.29	MgO	2
19.60	Al ₂ O ₃	3
50.95	SiO ₂	4
0.86	K ₂ O	5
1.97	CaO	6
0.62	TiO ₂	7
5.62	Fe ₂ O ₃	8
15.45	LOI	9



شکل ۱. نتیجه آزمایش میکروسکوپ الکترونی نانورس مونت موریلونیت

Fig. 1. Scanning Microscope Electron (SEM) picture of Montmorillonite Nanoclay

RAR در این پژوهش بر اساس روش سوسا و همکاران تولید شده است [24]. این ماده از لاستیک‌های خرد شده با اندازه عبوری از الک ۳۰ میلی‌متر تهیه و با قیر نرم، پایدارکننده معدنی فعال سطحی (AMBS) و آهک هیدراته در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد مخلوط شده است. پایدارکننده فعال سطحی با ایجاد سازگاری بین قیر و سنگدانه‌ها، چسبندگی و پایداری مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

نانورس مونت موریلونیت از لایه‌های سیلیکات آلومینیوم تشکیل شده که به صورت ساندویچی با یک لایه مرکزی (عمدتاً

¹ Rolling Thin-Film Oven test (RTFO)² Pressured Aging Vessel (PAV)

جدول ۳. کدگذاری نمونه‌ها

Table 3. Sample Coding

Sample Code	RAR content (%)	Nanoclay content (%)	No.
2MMT0RAR	0	2	1
4MMT0RAR	0	4	2
5MMT0RAR	0	5	3
0MMT15RAR	15	0	4
2MMT15RAR	15	2	5
4MMT15RAR	15	4	6
5MMT15RAR	15	5	7
0MMT20RAR	20	0	8
2MMT20RAR	20	2	9
4MMT20RAR	20	4	10
5MMT20RAR	20	5	11
0MMT25RAR	25	0	12
2MMT25RAR	25	2	13
4MMT25RAR	25	4	14
5MMT25RAR	25	5	15

برای شبیه‌سازی پیرشدگی قیر در طول ساخت مخلوط آسفالتی طبق AASHTO T 240 برای شبیه‌سازی پیرشدگی هنگام اختلاط قیر در مراحل تولید آسفالت در کارخانه انجام شد.

۲-۲-۳- آزمایش پایداری ذخیره سازی

برای ارزیابی جدایش فازی و پایداری حرارتی قیرهای اصلاح شده، آزمایش پایداری ذخیره سازی (stability storage) بر اساس استاندارد استرالیایی AG:PT/T108 که به آزمایش Tube Test شناخته می‌شود انجام شد [31]. این آزمایش یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی سازگاری فازی بین قیر و اصلاح کننده‌ها است و معیاری از پایداری سیستم در دمای بالا ارائه می‌دهد.

در این آزمون، حدود ۵۰ میلی‌لیتر از قیر اصلاح شده در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد درون لوله‌های آلومینیومی با قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۱۴۰ میلی‌متر ریخته شد. سپس لوله‌ها بلافاصله در حالت عمودی درون کوره حرارتی به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شدند تا شرایط مدنظر شبیه سازی شود (شکل ۲)

پس از پایان زمان نگهداری، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای محیط سرد شدند و سپس به سه قسمت مساوی (بالا، میانه و پایین) تقسیم شدند. سپس برای بخش بالا و پایین نقطه نرمی بر اساس روش ASTM D1525 اندازه‌گیری شد. شاخص پایداری ذخیره سازی از طریق رابطه (۱) تعیین شد:

$$\text{Storage Stability Index (SSI)} = 200 \times \frac{T_{top} - T_{bottom}}{T_{top} + T_{bottom}} \quad (1)$$

که در آن SSI شاخص پایداری ذخیره‌سازی (%)، T_{top} نقطه نرمی بخش بالا و T_{bottom} نقطه نرمی بخش پایین نمونه است که برحسب درجه سانتی‌گراد در رابطه (۱) قرار داده می‌شود. بر اساس چارچوب مشخصات استاندارد استرالیایی برای قیرهای اصلاح شده، حداکثر مقدار مجاز شاخص پایداری ذخیره سازی برابر با ۸٪ در نظر گرفته شده است [32].

۲-۲-۴- مشخصات رئولوژی قیر

برای بررسی عملکرد دمای بالای قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده با نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی روی نمونه‌های خام و پیرشده در آزمایش لعاب نازک دوار به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. این آزمایش از دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن



شکل ۲. نمونه‌های آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

Fig. 2. Storage stability test specimen

۲-۲-۲- مراحل آزمایش

۲-۲-۱- آزمایش‌های استاندارد قیر

آزمایش درجه نفوذ بر اساس استاندارد ASTM D5، آزمایش نقطه نرمی بر اساس استاندارد ASTM D36 و کندروانی کینماتیکی و دینامیکی به ترتیب در دماهای ۶۰ و ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد بر اساس استاندارد AASHTO T 316 روی قیر اصلاح شده انجام شد.

۲-۲-۲- پیرشدگی قیر

از آنجایی که خواص رئولوژیکی قیر به طور مداوم در طول زمان به دلیل فرآیندهای پیرشدگی مانند اکسیداسیون و تبخیر تکامل می‌یابند. پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر با استفاده از روش RTFO

$$R = \frac{(\varepsilon_{10} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (3)$$

$$J_{nr} = ave \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (4)$$

در این روابط ε_0 ، ε_c و ε_1 به ترتیب کرنش اولیه در شروع بارگذاری برشی در هر چرخه، مقدار کرنش در انتهای هر چرخه و اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی و τ سطح تنش و پارامتر γ_u مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری است. حساسیت نسبت به تنش برشی نمونه‌های قیر به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت ($J_{nr,diff}$) می‌باشد. این پارامتر افزایش در مقدار پارامتر J_{nr} را وقتی تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر میزان حساسیت قیر به تغییر شکل دائمی در مقادیر تغییر بار ترافیکی یا تغییر دمای سطح روسازی را نشان می‌دهد.

۲-۲-۶- آزمایش جاروب دامنه کرنش خطی (LAS)

این آزمایش روی نمونه‌های پیرشده قیر تحت فشار با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت استاندارد ۲ میلی‌متر انجام شده است. این آزمایش در دو بخش جاروب فرکانس و جاروب دامنه انجام شد. جاروب فرکانس برای تعیین مقدار پارامتر رئولوژیک غیرمخرب قیر (α) انجام شد. این پارامتر از نسبت معکوس $1+m$ که در آن m حداکثر شیب نمودار مدول مختلط به زمان در مقیاس لگاریتمی است محاسبه می‌شود. در این حالت در دمای اشاره شده و با بارگذاری با مقدار کرنش ۰/۱ درصد، در فرکانس‌های مختلف از ۰/۲ تا ۳۰ هرتز مقدار G^* و δ که به ترتیب نشان دهنده مدول برشی مختلط و زاویه فاز توسط دستگاه رئومتر برشی دینامیکی تعیین و ترسیم می‌شود. در بخش جاروب دامنه نیز آزمایش در دمای موردنظر و در فرکانس ۱۰ هرتز انجام می‌شود. بارگذاری به صورت خطی از کرنش ۰ تا ۳۰ درصد اعمال می‌شود. مقدار حداکثر تنش برشی، حداکثر کرنش برشی و زاویه فاز در هر ثانیه خوانده می‌شود. سپس مقدار خرابی ($D(t)$) به صورت رابطه (۵) در هر زمان محاسبه می‌شود:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n (\pi(\gamma_i)^2 (C_{i-1} - C_i))^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (5)$$

که در آن $C(t)$ نسبت مقدار G^* در زمان t به مقدار G^* اولیه، γ_i درصد کرنش برشی در زمان مورد نظر، α پارامتر ثابت نوع مصالح در بخش جاروب فرکانس و t زمان بر حسب ثانیه است.

پارامتر تغییر شکل دائمی ($G^*/\sin\delta$)، برای قیرهای خالص به بیشتر از ۱ کیلوپاسکال و برای قیرهای اصلاح شده به ۲/۲ کیلوپاسکال برای قیرهای پیرشده ادامه داشت و دمای آزمایش با گام ۶ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد. این آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۵۸ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد (شامل ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتی‌گراد) و در فرکانس ۱/۵۹ هرتز (۱۰ رادیان بر ثانیه) با اعمال کرنش ثابت ۱۲٪ انجام شد.

پس از انجام آزمایش پیرشدگی تحت فشار (PAV) در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت تحت فشار ۲/۱ مگاپاسکال مطابق استاندارد ASTM D6521، به منظور تعیین دمای عملکردی میانی از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی در دماهای ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد تا زمانی ادامه یافت که پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ به بیش از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال برسد ادامه یافت. نمونه‌ها دارای ضخامت ۲ میلی‌متر و قطر ۸ میلی‌متر انجام گرفت. بر اساس لزوم اصلاحیه AASHTO T315 مقدار این پارامتر در دمای عملکردی باید حداکثر ۶۰۰۰ کیلوپاسکال باشد تا احتمال ترک خوردگی ناشی از خستگی به حداقل برسد.

۲-۲-۵- آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش

(MSCR)

این آزمایش برای سنجش برگشت پذیری قیر تحت سطوح مختلف تنش طبق استاندارد AASHTO TP70 در دماهای بالای عملکردی قیر روی نمونه‌های پیرشده کوتاه مدت انجام شد. این آزمایش در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد روی نمونه‌های قیر با قطر ۲۵ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر انجام گرفت. در این آزمایش بار ۱ ثانیه بر نمونه اعمال و ۹ ثانیه حالت استراحت قرار گرفت. ابتدا ۱۰ سیکل بارگذاری تحت تنش برشی ۰/۱ کیلوپاسکال بر نمونه وارد و سپس تنش برشی ۳/۲ کیلوپاسکال برای ۱۰ چرخه بر نمونه وارد شد. پارامترهایی که از آزمون خزش و بازیابی در چند سطح تنش به دست می‌آید شامل مدول غیرقابل بازگشت (J_{nr}) و درصد بازیابی (R) می‌باشد که به ترتیب نمایانگر پتانسیل شیارشدگی یا کرنش باقیمانده در یک نمونه بعد از چرخه‌های بارگذاری و باربرداری در قیر و پاسخ‌های الاستیک در قیر می‌باشد. این پارامترها از رابطه‌های (۲)، (۳) و (۴) قابل محاسبه است:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (2)$$

با استفاده از روابط ویسکوالاستیک مکانیک محیط‌های پیوسته عمر خستگی قیر مطابق رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$N_f = A\gamma^{-B} \quad (6)$$

که در آن γ حداکثر کرنش برشی، N_f عمر خستگی و ضرایب A و B ثابت‌های تجربی رابطه هستند که بر اساس AASHTO TP 101-14 از رابطه بین کرنش و عمر خستگی به دست می‌آیند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش‌های استاندارد قیر

انجام آزمایش‌های استاندارد قیر برای بررسی مقدماتی آثار مواد اصلاح کننده بر قیر بود که مطابق جدول (۴) افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ و افزایش ویسکوزیته قیر را نتیجه داد که به دلیل ایجاد ساختار بین لایه‌ای پیچیده بین ترکیب نانورس و پودر لاستیک با مولکول‌های قیر و برهمکنش سینرژیستی بین اجزاء بود همچنین افزایش ویسکوزیته قیر موجب بهبود رفتار نیوتونی در محدوده دمایی گسترده تر شد. ویسکوزیته کینماتیکی و دینامیکی قیر ۲۱ برابر نسبت به قیر شاهد شده است که موجب کاهش روانی قیر شده و در نتیجه دمای اختلاط و انرژی تراکم مخلوط آسفالتی برای رسیدن به درصد فضای خالی مطلوب افزایش می‌یابد.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی قیرهای پژوهش

Table 4. Physical Properties of research asphalt binders

Tests	Penetration Grade (@25 °C, dmm)	Softening Point (°C)	Viscosity (@60 °C, Pa.s)	Viscosity (@135 °C, cSt)
No.				
Control	90	46.2	111	276
1	90	46.4	111	269
2	89	46.6	114	277
3	88	46.8	121	278
4	55	54.6	388	852
5	52	56.2	592	1060
6	52	56.2	589	1026
7	53	56	555	999
8	50	58.4	824	1765
9	47	59.6	1015	2103
10	47	60	1013	2203
11	48	59.2	992	2226
12	45	63.7	2181	4959
13	43	65	2397	5852
14	43	65.2	2589	5968
15	43	65.8	2532	5936

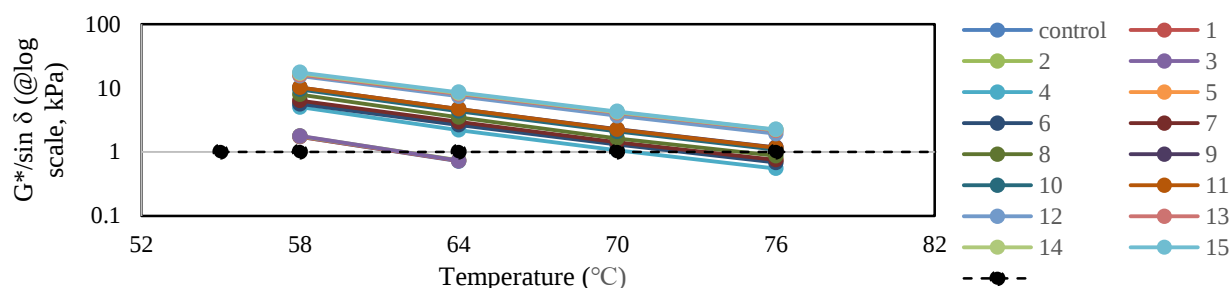
۳-۲- تحلیل جدایش فازی

پایداری قیر اصلاح شده با پودر لاستیک فراوری شده و نانورس به توانایی قیر و ذرات اصلاح کننده در حفظ توزیع یکنواخت و جلوگیری از بروز جدایش فازی در شرایط دمایی بالا و دوره‌های نگهداری طولانی اشاره دارد. تفاوت در چگالی و کندروانی میان قیر و ذرات اصلاح کننده منجر به ناپایداری و در نهایت جدایش بین دو فاز می‌شود.

نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی نشان داد که به دلیل وزن مخصوص بالاتر ذرات نسبت به قیر، نقطه نرمی بخش پایین در تمام نمونه‌ها بیشتر از بخش بالا است که حاکی از حرکت ذرات به سمت پایین نمونه است. در این پژوهش نمونه اصلاح شده با پودر لاستیک بیشترین (۱۴٪) و نمونه اصلاح شده با پودر لاستیک فراوری شده و نانورس مونت موریلونیت کمترین (۷٪) جدایش را نتیجه داد. همانطور که مشخص است هم افزایش و تشکیل شبکه پایدار بین نانورس و RAR باعث بهبود پایداری و کاهش خطر جدایش فازی شده است.

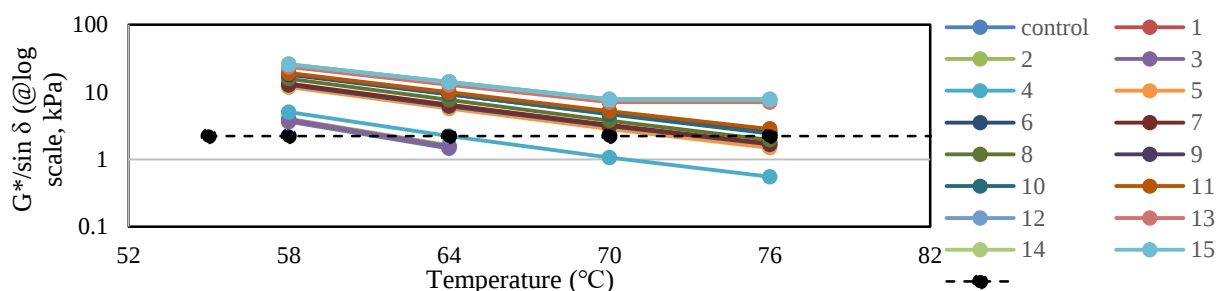
۳-۳- پارامتر تغییر شکل دائمی قیر

در مشخصات روسازی ممتاز پارامتر $G^*/\sin\delta$ برای مشخص کردن مقاومت در برابر شیارشدگی بتن آسفالتی انتخاب شده است. هرچه این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت در برابر مشخصه تغییر شکل دائمی بهتر است. در این بخش به بررسی نتایج پارامترهای شیارشدگی نمونه‌های قیر اصلاح شده با ۲، ۴ و ۵ درصد نانورس مونت موریلونیت و ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پودر لاستیک فراوری شده پرداخته شده است و امکان سنجی این پارامتر برای ارزیابی عملکرد دمای بالای قیر اصلاح شده با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای شیارشدگی انواع قیرها در دماهای مختلف در دو حالت قبل از پیرشدگی و بعد از پیرشدگی به ترتیب در شکل (۳ و ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. تاثیر دما بر پارامتر تغییر شکل دائمی قبل از پیرشدگی قیر

Fig. 3. Effect of temperature on the permanent deformation parameter before asphalt binder aging



شکل ۴. تاثیر دما بر پارامتر تغییر شکل دائمی بعد از پیرشدگی قیر

Fig. 4. Effect of temperature on the permanent deformation parameter after asphalt binder aging

تر از تابع سینوس است، به ویژه هنگامی که به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود.

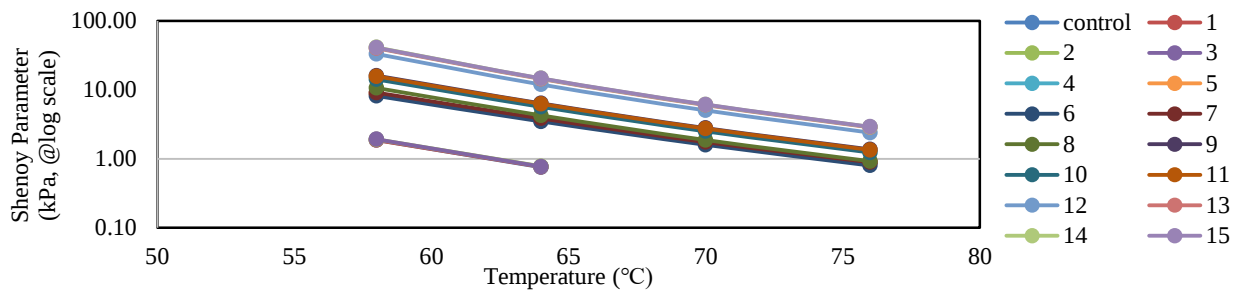
این پارامتر که نماینده معکوس کرنش برگشت ناپذیر است، از ارتباط بین پاسخ کرنش در آزمون خزش و مدول برشی مختلط حاصل از آزمایش‌های برشی نوسانی در بازه‌های زمانی متناظر به دست می‌آید. در مقایسه با پارامتر Superpave، این پارامتر حساسیت بیشتری به زاویه فاز دارد پس شاخص بهتری برای تغییرات خواص الاستیک در حضور افزودنی‌های لاستیکی فراهم می‌کند.

$$\text{Shenoy's rutting parameter} = \frac{G^*}{[1 - (\sin \delta \cdot \tan \delta)^{-1}]} \quad (7)$$

شکل (۵) رابطه بین این پارامتر و دما را نشان می‌دهد. تغییرات در بین نمونه‌ها با روند تغییرات مدول برشی مختلط همخوانی دارد. مقدار این پارامتر در نمونه‌های حاوی نانورس و RAR از مقادیر مربوط به نمونه‌های دیگر بالاتر است که نشان دهنده بهبود عملکرد قیر در دمای بالا با این افزودنی‌ها است.

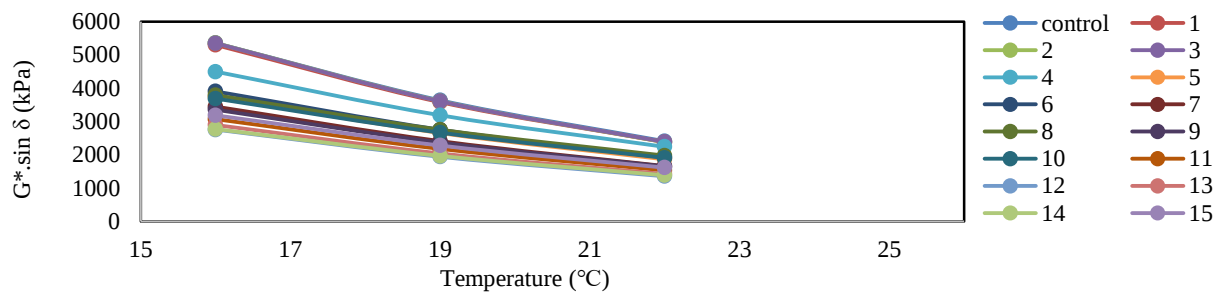
افزون بر این، قیرهای اصلاح شده با RAR در مقایسه با قیرهای حاوی نانورس بهبود قابل توجهی نشان دادند که حاکی از آن است که ترکیب نانورس و RAR موجب افزایش پایداری حرارتی و مقاومت شیارشدگی در دمای بالا می‌شود.

همانطور که نشان داده شده است، افزودن نانورس به تنهایی تغییر چشم گیری در مقدار پارامتر شیارشدگی ایجاد نکرده است اما زمانی که پودر لاستیک همراه نانورس استفاده می‌شود به دلایل ترمودینامیکی، بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا به دلیل ایجاد شبکه پیوسته مواد افزودنی در فاز پیوسته قیر و ارتباط سه گانه پیوندهای شیمیایی کانی رس، ذرات لاستیک و مولکول‌های قیر این پارامتر افزایش می‌یابد و نرخ کاهش این پارامتر در قیر اصلاح شده با افزایش دما نسبت به قیر شاهد کمتر است. اتصال قوی بین ذرات نانورس و پودر لاستیک در فاز پیوسته قیر باعث می‌شود تا ویژگی‌های الاستیک قیر اصلاح شده نسبت به قیر خالص افزایش یابد که این موضوع دلیل آن است که اختلاف فاز بین تنش و کرنش در قیرهای اصلاح شده کاهش یابد و رفتار قیر به رفتار ماده الاستیک خالص نزدیک‌تر شود. این امر نشان می‌دهد افزودن ترکیب نانورس و پودر لاستیک می‌تواند حساسیت دمایی قیر را بهبود بخشد که نقش مثبتی در بهبود عملکرد دمای بالا ایفا می‌کند. برای بررسی بهتر عملکرد شیارشدگی قیرهای اصلاح شده Shenoy و همکاران رابطه (۷) را پیشنهاد دادند [30]. این رابطه به صورت نیمه تجربی و با در نظر گرفتن ضریب میرایی ($\tan \delta$) توسعه یافته است؛ ضریبی که نسبت به تغییرات زاویه فاز حساس



شکل ۵. نتایج پارامتر Shenoy

Fig. 5. Shenoy Parameter results



شکل ۶. تاثیر دما بر پارامتر خستگی بعد از پیرشدگی قیر

Fig. 6. Effect of temperature on the fatigue parameter after asphalt binder aging

بهتری در برابر ترک‌های دمای میانی دارند بنابراین با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که نمونه قیر با ۲۵ درصد پودر لاستیک بهترین نتیجه را نشان داد اما نمونه قیر با ۲۵ درصد پودر لاستیک و ۴ درصد نانورس نیز نتیجه نزدیک به این مقدار را ارائه نمود.

استفاده از ترکیب نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده موجب کاهش نرخ پیرشدگی در قیر می‌شود. دلیل این پدیده نیز این است که این مواد مانعی در برابر تبخیر ذرات سبک قیر و تغییر در نسبت مالتن به آسفالتن کلویید قیر است این موضوع سبب کاهش پتانسیل ترک خوردگی در قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای خالص می‌شود. همچنین پیوند خوب بین نانورس و پودر لاستیک در فاز پیوسته قیر سبب می‌شود تا فاصله زمانی بین اعمال تنش و ایجاد کرنش کاهش یافته و ویژگی الاستیک قیر افزایش یابد.

۳-۶- نتایج آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش

بر اساس استاندارد (AASHTO M332 (2014)، قیرها بر مبنای نتایج آزمایش MSCR و به ویژه مقدار $J_{nr} 3.2$ ، در چهار سطح عملکرد ترافیکی طبقه بندی می‌شوند:

- S (Standard) برای ترافیک معمولی با $J_{nr} 3.2 \leq 4.0 \text{ kPa}^{-1}$
- H (Heavy) برای ترافیک سنگین با $J_{nr} 3.2 \leq 2.0 \text{ kPa}^{-1}$
- V (Very Heavy) برای ترافیک بسیار سنگین با

۳-۴- تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت بر شیارشدگی قیر

با توجه به شکل (۴) عمر شیارشدگی در نتیجه پیرشدگی کوتاه مدت افزایش می‌یابد. دلیل این امر نیز افزایش نسبت آسفالتن به مالتن در مولکول‌های قیر در اثر حرارت و گردش هوا در طی آزمایش است که نمودی از پیرشدگی قیر در هنگام تهیه مخلوط آسفالتی را دارد. در سطوح کرنش کم، شدت افزایش عمر شیارشدگی ناشی از پیرشدگی در قیرهای مختلف تقریباً یکسان است، اما در سطوح کرنش بالا به دلایل خرابی‌های ناشی از بارهای ترافیکی و تغییر شکل دائمی شدت کاهش عمر شیارشدگی ناشی از پیرشدگی در قیرهای حاوی پودر لاستیک و نانورس موننت موریلونیت نسبت به قیر پایه کمتر است.

۳-۵- پارامتر خستگی قیر

طبق روش روسازی ممتاز پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ نمود خوبی از خستگی قیر به دست می‌دهد. بیشترین مقدار مجاز این پارامتر مطابق آیین‌نامه AASHTO M332 عددی مابین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مشخص شده است. مطابق شکل (۶) در تمام نمونه‌ها این مقدار رعایت شده و با افزودن نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده در محدوده دمایی ۱۶ الی ۲۲ درجه سانتی‌گراد این پارامتر به کمتر از ۶۰۰۰ رسیده است. قیرهای دارای پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ کمتر مقاومت

حساسیت کمتر مواد به تنش است. استاندارد AASHTO T283 مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل برگشت را به ۷۵ درصد محدود کرده است. این معیار می‌تواند استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات بار ترافیکی یا دمایی حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد محدود نماید.

با توجه به جداول (۵ تا ۷) مشخص است که استفاده از قیرهای حاوی صرفاً نانورس از لحاظ این بند از آیین نامه بلامانع است اما اضافه شدن پودر لاستیک به قیر به طور قابل ملاحظه‌ای معیار $J_{nr,diff}$ را افزایش می‌دهد. به طور کلی استفاده از اصلاح کننده‌ها نسبت به حساسیت قیرها به تغییر شکل دائمی در شرایط دمایی غیرقابل پیش بینی و یا شرایط بارگذاری مختلف بحرانی است.

جدول ۵. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی نانورس

Table 5. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with Nanoclay

Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
Control	0.92	8.4	23	2.64	2.14
1	0.78	7.9	21.48	2.69	2.20
2	1.06	8.24	22.3	2.42	1.98
3	0.85	8	23	2.50	2.05

جدول ۶. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی پودر لاستیک فرآوری شده

Table 6. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with RAR

Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
4	16.29	63.69	1.24	1.24	0.45
5	20.2	57.15	0.8	0.8	0.369
6	57.44	91.79	0.161	0.161	0.027

جدول ۷. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده

Table 7. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with Nanoclay and RAR

Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
7	24.67	67.56	173.01	1.024	0.0375
8	24.14	67.54	175.9	0.922	0.339
9	23.54	66.21	165.96	0.915	0.344
10	29.31	73.87	220.02	0.581	0.182
11	25.9	63.61	132.55	0.628	0.27
12	35.34	82.35	333.23	0.422	0.097
13	50.32	86.08	306.08	0.243	0.060
14	48.69	90.14	514.51	0.225	0.037
15	53.84	87.26	309.48	0.194	0.047

$$J_{nr} 3.2 \leq 1.0 \text{ kPa}^{-1}$$

• E (Extreme Heavy) برای ترافیک فوق سنگین با

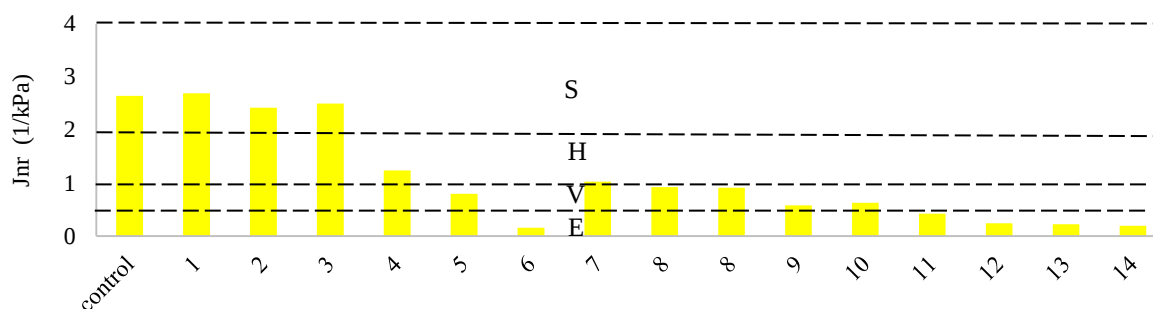
$$J_{nr} 3.2 \leq 0.5 \text{ kPa}^{-1}$$

در این پژوهش، از مقادیر $J_{nr} 3.2$ و درصد بازیابی کرنش (R%) به منظور تعیین سطح عملکردی قیر و تحلیل اثر افزودنی‌ها بر مقاومت در برابر شیارشدگی استفاده شده است (شکل ۱۰).

با توجه به جداول (۵ تا ۷) نتایج حاکی از این است که استفاده از افزودنی نانورس تغییر زیادی در رفتار قیر در دماهای بالا ندارد اما زمانی که پودر لاستیک در قیر استفاده می‌شود نتایج بهتر شده و درصد بازگشت کرنش که نشان دهنده قدرت قیر در بازگشت بعد از باربرداری است افزایش یافته است. قیرهای اصلاح شده با نانورس، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده در دو سطح تنش می‌باشد. این موضوع ناشی از سختی و رفتار الاستیک کمتر این نمونه‌ها دارد. قیر اصلاح شده با ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده و ۴ درصد نانورس بیشترین درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که نشان دهنده این موضوع است که این نوع نمونه‌ها دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائمی می‌باشند.

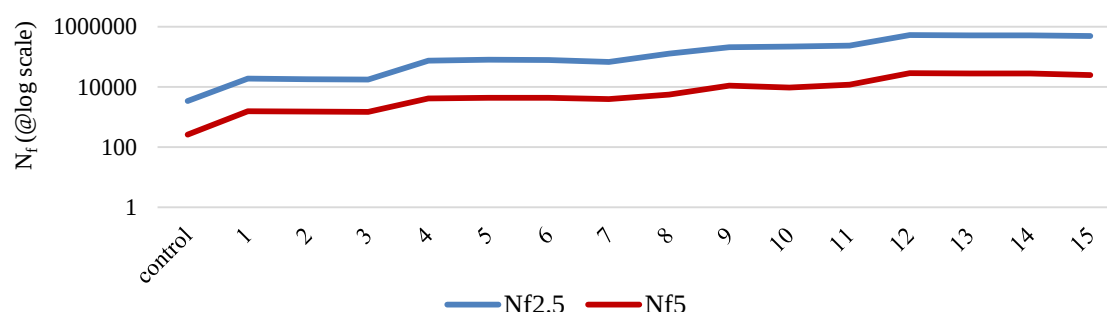
مقادیر مدول غیرقابل برگشت (J_{nr}) در جدول‌های (۵ تا ۷) در سطوح کرنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال آورده شده است. نتایج حاکی از این است که این پارامتر با افزودن اصلاح کننده کاهش پیدا کرده است. اما این پارامتر برای قیر حاوی نانورس تفاوت زیادی با قیر خالص ندارد. مقادیر کمتر این پارامتر نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط به تغییر شکل دائمی قیر است. نتایج مقادیر بهتری را برای ترکیب پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس به دست داد. نمونه دارای ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده بهترین نتیجه را در این پارامتر داشته است. این مورد نشان دهنده این است افزودن پودر لاستیک فرآوری شده به قیر حساسیت آن نسبت به تغییر شکل دائمی را به طور چشمگیری (حدود ۸۰ برابر) کاهش می‌دهد.

حساسیت قیر نسبت به تنش‌های وارد شده که از تغییر ترافیک یا تغییر دمای سطح روسازی ایجاد می‌شود در جداول (۵ تا ۷) با پارامتر $J_{nr,diff}$ آورده شده است. درصد اختلاف نشان دهنده حساسیت قیر به افزایش سطح تنش می‌باشد. بنابراین مقادیر کمتر نشان دهنده



شکل ۷. نمودار مقایسه عملکردی بر اساس سطوح ترافیکی استاندارد AASHTO M332 در دمای ۵۸ درجه سانتی گراد

Fig. 7. Performance comparison diagram based on AASHTO M332 standard traffic levels at 58 °C



شکل ۸. عمر خستگی قیر در سطح کرنش ۲.۵ و ۵ درصد

Fig. 8. Fatigue life of asphalt binders at 2.5 and 5% strain level

۳-۷- نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی

در این بخش نتایج عمر خستگی نمونه‌های قیر بر اساس تحلیل VCED ارائه شده است. دو پارامتر A و B خروجی اصلی آزمایش جاروب دامنه خطی می‌باشند. مقدار A هر چقدر بیشتر باشد به این معناست که مصالح مقاومت بیشتری در برابر تجمع خرابی دارند. بنابراین عمر خستگی نمونه‌های قیر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر پارامتر B مرتبط با حساسیت نمونه‌های قیر در برابر تغییرات سطح کرنش است. مقدار B هر چقدر بیشتر باشد به این معناست که با افزایش سطح کرنش عمر خستگی کاهش بیشتری دارد. نتایج آزمایش بر اساس شکل (۸) نشان داد که قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه مقاومت خستگی بالاتری دارند، به طوری که تعداد سیکل شکست در سطوح مختلف کرنش افزایش یافته است. از آنجایی که رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی تا حد زیادی توسط قیر تعیین می‌شود، این نتایج نشان دهنده پتانسیل افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این قیر است. با این حال رابطه دقیق بین مقاومت خستگی قیر و عمر خستگی مخلوط به ترکیب آن، درصد قیر، تراکم و شرایط بارگذاری بستگی دارد و برای تایید کمی این تاثیر نیاز به آزمایش‌های خستگی روی

شایان ذکر است که آزمایش MSCR اساساً برای قیرهای پلیمری همگن طراحی شده است و کاربرد آن برای قیرهای اصلاح شده با نانورس و پودر لاستیک با محدودیت‌هایی روبرو است. مقادیر بالای $J_{nr,diff}$ در این نمونه‌ها ممکن است بازتاب دقیقی از حساسیت واقعی به تغییر شکل دائمی نباشد. بنابراین نتایج MSCR برای چنین قیرهایی باید با احتیاط تفسیر شوند و محدودیت‌ها و پیامدهای آن در تحلیل نتایج مدنظر قرار گرفته است.

برای تفسیر بهتر روند تغییرات J_{nr} و R نتایج در قالب نمودار مقایسه‌ای سطح عملکردی قیر (S, H, V, E) نیز تحلیل شدند. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، افزودن نانورس باعث عدم کاهش محسوس مقدار $J_{nr,3.2}$ و ثبات سطح عملکردی قیر در S شده است. در مقابل RAR ضمن افزایش خاصیت بازیابی کرنشی، سبب شده قیر اصلاح شده در محدوده H تا V طبقه بندی شود. اما ترکیب نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده موجب ارتقای چشمگیری شده که به بالاترین سطح عملکردی قیر رسیده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب نانورس و RAR می‌توانند عملکرد رئولوژیکی قیر را در برابر بارگذاری‌های سنگین به طور چشمگیری بهبود دهند.

نمونه‌های مخلوط آسفالتی وجود دارد.

نسبت به قیر پایه افزایش یافته است که منجر به افزایش دوام مخلوط آسفالتی در دوره بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود.

برای پژوهش‌های آتی بررسی عملکرد دمای پایین در مقیاس ماکروسکوپی، مدلسازی رئولوژیکی دقیق تر و تحلیل انرژی شکست می‌تواند به درک عمیق تری از سازوکارهای بهبود عملکرد منجر شود.

قدردانی و تشکر

بدین وسیله از شرکت نفت جی و جناب آقای مهندس سیروان اوسطی به دلیل فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌ها کمال تشکر را داریم.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله با انتشار آن تعارض منافی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

در این پژوهش تهیه مصالح، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر عهده سینا حاتمی، تحلیل نتایج، روش شناسی و نگارش مقاله بر عهده حسن الوندی و نظارت بر تحلیل نتایج، مرور و بازبینی و ارزیابی کیفیت مقاله توسط امیر کاووسی انجام شده است.

منابع مالی

در نگارش این مقاله از منابع مالی شرکت نفت جی استفاده شده است.

هوش مصنوعی

در این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

افزودن نانورس به تنهایی عمر خستگی قیر را به صورت چشمگیری در هر دو سطح کرنش افزایش نداده است اما قرارگیری نانورس در کنار پودر لاستیک فراوری شده به خصوص در درصد‌های بیشتر پودر لاستیک موجب تقویت عمر خستگی قیر شده و بهینه‌ترین نمونه از لحاظ خستگی نمونه قیر حاوی ۲۵ درصد پودر لاستیک و ۴ درصد نانورس می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی اثر هم افزایی نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فراوری شده بر عملکرد رئولوژیکی قیر در دماهای بالا و میانی انجام شد. نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- ترکیب بهینه شامل ۴٪ نانورس و ۲۵٪ پودر لاستیک فراوری شده، بیشترین اثر هم افزایی را نشان داد. افزایش مدول برشی و کاهش زاویه فاز در این ترکیب، بیانگر تقویت رفتار الاستیک قیر و بهبود پایداری آن در شرایط بارگذاری و دمای بالا است.
- ۲- از منظر فنی، حضور همزمان نانورس و RAR، موجب تشکیل شبکه‌های نانو ساختاری پایدار در ماتریس قیر شده که علاوه بر بهبود چسبندگی داخلی، از جدایش فازی و افت عملکرد در طی ذخیره سازی جلوگیری می‌کند.
- ۳- افزودن نانورس به ترکیب پودر لاستیک و قیر سبب افزایش بازگشت کرنش و کاهش چشمگیر مدول غیرقابل بازگشت شد که در عمل منجر به افزایش طول عمر روسازی تحت بارهای ترافیکی متغیر خواهد شد. همچنین قیرهای اصلاح شده موجب بهبود سطح ترافیکی معمولی به سطح فوق سنگین شد.
- ۴- یافته‌های آزمایش‌ها نشان داد که عمر خستگی قیر اصلاح شده

References

- [1] Zhang, H. and Yu, J., 2010. Rheological properties of asphalt modified with nanoclay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), pp.689–694.
- [2] Sousa, J.B., Vorobiev, A., Rowe, G.M. and Ishai, I., 2013. Reacted and activated rubber: Elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record*, 2371(1), pp.32–40. doi: 10.3141/2371-04.
- [3] Xiao, F. and Amirkhanian, S.N., 2009. Rheology of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), pp.758–764.
- [4] Aflaki, S. and Tabatabaee, N., 2009. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Construction and Building Materials*, 23(6), pp.2141–2150. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.014.
- [5] Anderson, R.M. and Goetz, W.H., 1973. Mechanical properties of bituminous mixtures at low temperatures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 42, pp.1–25.
- [6] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S., 2011. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.1072–1078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070.
- [7] Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F.J. and Gallegos, C., 2007. Influence of processing conditions on the rheological behavior of crumb tire rubber-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(3),

- pp.1683–1691. doi: 10.1002/app.25800.
- [8] Liang, M., Xin, X., Fan, W., Wang, H. and Jiang, H., 2014. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 64, pp.316–323. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.082.
- [9] Behnood, A. and Olek, J., 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 151, pp.464–478. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115.
- [10] Zhang, Y. et al., 2022. Enhancement of asphalt binder rheology using nanoclay: A DSR-based study. *Construction and Building Materials*, 340, p.127832.
- [11] Golestani, B. et al., 2021. Nanoclay-modified asphalt: Intercalation effects and rheological behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), p.0402112.
- [12] Wang, L. et al., 2023. Chemical treatment of crumb rubber for enhanced asphalt performance. *Materials & Design*, 225, p.11547.
- [13] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S., 2011. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.1072–1078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070.
- [14] Jahromi, S.G. and Khodaii, A., 2009. Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23(8), pp.2894–2904. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.027.
- [15] Ouyang, C. et al., 2018. Improving the dispersion of nanoclay in asphalt binder by surface modification. *Journal of Materials Science*, 53(12), pp.8976–8988.
- [16] Norouzi, M. et al., 2020. Aging resistance of rubberized asphalt binders: A DSR analysis. *Fuel*, 278, p.118365.
- [17] Ishai, I., Amit, M., Kesler, T. and Peled, R., 2015. New advancements in rubberized asphalt using an elastomeric asphalt extender: Three case studies. *6th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2015)*, Las Vegas, 4–7 October 2015.
- [18] Chen, X. et al., 2021. Synergistic effects of nanoclay and crumb rubber on asphalt binder properties. *Applied Sciences*, 11(15), p.7043.
- [19] Al-Mansoori, T. et al., 2022. Dynamic shear rheometer evaluation of hybrid modified asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 23(4), pp.923–941.
- [20] Kök, B.V. et al., 2023. UV aging resistance of nanoclay-rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 367, p.130321.
- [21] Mirsepahi, M. et al., 2023. Frequency-dependent behavior of hybrid modified asphalt binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10(2), pp.245–256.
- [22] Sun, D. et al., 2017. Laboratory evaluation of nanocomposite-modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), p.04017181.
- [23] Farouk, A.I.B. et al., 2022. Aging resistance of hybrid-modified bitumen with nanoclay and crumb rubber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), p.04021489.
- [24] Sousa, J.B., Vorobiev, A., Rowe, G.M. and Ishai, I., 2013. Reacted and activated rubber: Elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record*, 2371(1), pp.32–40. doi: 10.3141/2371-04.
- [25] Fang, C., Zhang, M., Chen, Z., Yu, R., Liu, Q. and Xie, J., 2020. Recycling waste tire rubber in asphalt using dry process: A review of best practices and perspectives. *Materials*, 13(21), p.4864. doi: 10.3390/ma13214864.
- [26] Wang, T., Liu, H., Li, N. and Zhang, Y., 2022. Improving compatibility and storage stability of crumb rubber modified asphalt by chemical activation. *Construction and Building Materials*, 329, p.127157. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127157.
- [27] Zhang, H., Liu, G. and Wu, S., 2023. Effect of desulfurized crumb rubber powder on the rheological properties and microstructure of modified bitumen. *Coatings*, 13(5), p.607.
- [28] Liu, Y., Zhang, C. and Chen, J., 2024. Performance evaluation of asphalt binder modified with processed rubber powder under different aging conditions. *Materials*, 17(3), p.512.
- [29] Genan A/S, 2024. *Rubber modifier for asphalt applications: Technical report on processed rubber powders*. Technical Bulletin. Viborg, Denmark: Genan A/S.
- [30] Shenoy, A., 2002. Model-fitting the master curves of the dynamic shear rheometer data to extract a rut-controlling term for asphalt pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 30, pp.95–102.
- [31] B. Surfacing and A. Group, n.d. *Commentary to AG: Pt/T108 – Segregation of polymer modified binders*, pp.1–6.
- [32] Austroads, 2019. *Specification framework for polymer modified binders*. Sydney, NSW: Austroads.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Alvandi, H., Kavussi, A. and Hatami, S., 2027. Experimental Investigation on the Rheological Performance of Asphalt Binders Modified with Montmorillonite Nanoclay and RAR at Intermediate and High Temperatures. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.53-65



Evaluating the efficiency of autoregressive models in predicting the vulnerability of coastal aquifers to seawater intrusion

Amin Zeynolabedin^{1*} , Soroush Sharghi¹

1. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

The management of coastal aquifers presents a significant global challenge, primarily due to the threat of seawater intrusion (SWI). This phenomenon, often exacerbated by excessive groundwater extraction, sea-level rise, and climate change, leads to the salinization of freshwater resources, rendering them unsuitable for agricultural, industrial, and domestic use. Consequently, monitoring and predicting the vulnerability of these aquifers is critical for sustainable water resource management and the development of effective mitigation strategies. A key approach for assessing the status of coastal aquifers involves the use of specialized classification indices that quantify their susceptibility to salinization. This study focuses on assessing the vulnerability of a coastal aquifer system to seawater intrusion by employing the Seawater Intrusion Vulnerability Index (SIVI). The SIVI framework was selected for its comprehensive nature, as it distinctively integrates both inherent (static) and dynamic (temporal) characteristics of the aquifer. Inherent parameters, such as hydraulic conductivity and aquifer thickness, define the aquifer's natural buffer capacity, while dynamic parameters, including groundwater level reflect the seasonal and anthropogenic stresses acting upon the system. This dual consideration provides a more holistic and realistic assessment of vulnerability compared to indices that rely on a single category of parameters. The application of the SIVI index to the study area revealed that a substantial portion, approximately 60%, is classified as vulnerable to seawater intrusion. This finding indicates a pressing need for immediate attention and proactive management in these zones to prevent further degradation of water quality. To transition from a static assessment to a predictive outlook, a general sensitivity analysis was conducted to identify the most influential variable governing salinity changes. From a set of potential hydrogeological factors, the concentration of Chloride (Cl⁻) ions was determined to be the most effective and sensitive indicator for tracking the progression of seawater intrusion, given its role as a primary constituent of seawater. Subsequently, a time series forecasting approach was adopted using the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model. The historical chloride concentration data from 59 observation wells were used to build and calibrate the forecasting model based on sensitivity analysis results. After a rigorous process of model identification, parameter estimation, and diagnostic checking, the ARIMA(2,1,1) model was identified as the most appropriate and robust model for predicting future chloride levels in the region. This specific model configuration implies that the forecast relies on two previous time-lagged values (autoregressive component), one degree of differencing to make the data stationary, and one lagged forecast error (moving average component). The results from the ARIMA(2,1,1) model forecast a concerning trend for the short-term, one-year outlook. The model predicts that the overall vulnerability of the region to seawater intrusion is projected to increase by approximately 8%. The performance of the ARIMA model for this one-year forecasting horizon was evaluated as favorable, demonstrating a Mean Absolute Error (MAE) of 25 mg/L, which is considered acceptable given the context of the study and the variability inherent in hydrogeological data. In conclusion, the integrated methodology of SIVI and ARIMA provides a powerful toolset for both diagnosing current vulnerability and anticipating future risks. The study successfully establishes that the aquifer is not only currently vulnerable but that this vulnerability is on a trajectory to worsen in the immediate future. The insights gained from this research offer a scientifically-grounded basis for implementing targeted monitoring programs, designing controlled extraction policies, and planning strategic interventions to safeguard the long-term sustainability of the coastal aquifer's groundwater resources.

Review History

Received: Sep 30, 2025
Revised: March 9, 2026
Accepted: June 3, 2026

Keywords

SIVI index
Coastal aquifer
Vulnerability
Prediction
Seawater intrusion
ARIMA

* Corresponding Author Email: a_zeynolabedin@sbu.ac.ir - ORCID: 0009-0004-3512-6399



ارزیابی کارایی مدل‌های خودهمبسته در پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی در برابر نفوذ آب شور

امین زین العابدین^{۱*}، سروش شرقی^۱

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های ساحلی، بحث پیشروی و نفوذ آب شور دریا در ساحل است که کیفیت منابع آب زیرزمینی را به خطر می‌اندازد. یکی از روش‌های مهم برای تعیین وضعیت آبخوان‌های ساحلی استفاده از شاخص‌های طبقه‌بندی می‌باشد. در همین راستا، در این پژوهش با استفاده از شاخص SIVI (Seawater Intrusion Vulnerability Index)، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی در برابر نفوذ آب شور دریا پرداخته شده است. مزیت شاخص SIVI نسبت به شاخص‌های دیگر آن است که هر دو ویژگی پویایی و ذاتی منطقه را برای ارزیابی آسیب‌پذیری در نظر می‌گیرد. نتایج نشان داد، ۶۰ درصد منطقه مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب شور است. در ادامه، برای پیش‌بینی وضعیت آینده، یک تحلیل حساسیت کلی انجام شد و تغییرات غلظت یون کلر به عنوان متغیر مؤثر انتخاب شد. با توجه به این متغیر و با استفاده از مدل پیش‌بینی ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) وضعیت آسیب‌پذیری برای وضعیت کوتاه‌مدت یک ساله برای ۵۹ چاه مشاهداتی پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد مدل $ARIMA(2,1,1)$ بهترین مدل برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری در برابر شوری در منطقه است. با استفاده از نتایج مدل مشخص شد میزان آسیب‌پذیری منطقه حدود ۸ درصد افزایش خواهد داشت. به طور کلی عملکرد مدل ARIMA برای پیش‌بینی کوتاه مدت یک ساله با مقدار خطای مطلق متوسط ۲۵ میلی‌گرم در لیتر مطلوب ارزیابی شد.

کلمات کلیدی

شاخص SIVI

آبخوان ساحلی

آسیب‌پذیری

پیش‌بینی

نفوذ آب شور

مدل ARIMA

می‌کنند. نفوذ آب شور نه تنها منابع آب شرب و کشاورزی را تهدید می‌کند، بلکه می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در برابر این پدیده و پیش‌بینی روند آن در آینده، از ضروریات مدیریت پایدار منابع آب در مناطق ساحلی محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی در برابر نفوذ آب شور انجام شده

۱- مقدمه

مناطق ساحلی به دلیل مجاورت با دریا و دسترسی به منابع آبی، از اهمیت بالایی در توسعه اقتصادی و اجتماعی برخوردارند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در این مناطق، مسئله نفوذ آب شور به سفره‌های آب زیرزمینی است که منجر به کاهش کیفیت آب و محدودیت در بهره‌برداری از این منابع می‌شود. افزایش برداشت از آبخوان‌های ساحلی، کاهش بارندگی‌ها و تغییرات اقلیمی، از جمله عواملی هستند که این پدیده را تشدید

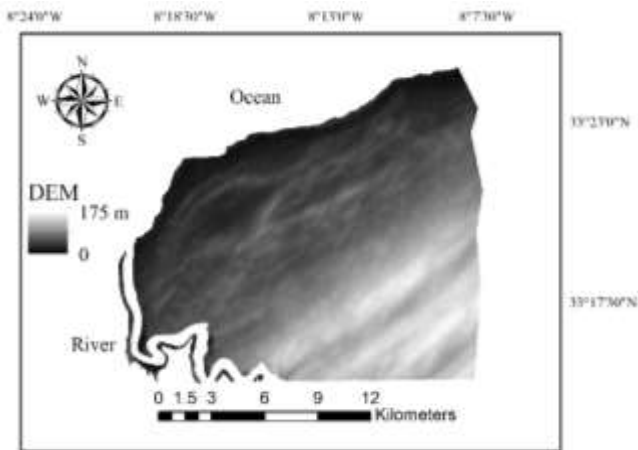
* رایانامه نویسنده مسئول: a_zeynolabedin@sbu.ac.ir - ORCID: 0009-0004-3512-6399

ARIMA از دقت بالایی در پیش‌بینی متغیرهای کیفیت آب برخوردار است [6]. گواو و همکاران یک روش جدید داده‌محور مبتنی بر ترکیب تحلیل سری‌های زمانی و یک روش یادگیری ماشین (ML) برای پیش‌بینی دقیق تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان ساحلی تحت تأثیر بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی ارائه دادند. ایشان از تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) برای تجزیه و تحلیل داده‌های پایش سطح آب‌های زیرزمینی در سه چاه استفاده نمودند که نشان داد داده‌های پایش‌شده تاریخی و مجموعه داده‌های بارش می‌توانند به عنوان متغیرهای ورودی برای ساخت مدل هیدرولوژیکی در نظر گرفته شوند [7]. بن مخاشن و بن آفی یک روش یادگیری ماشین را به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی نفوذ آب دریا در مناطق ساحلی با استفاده از پارامترهای شیمیایی آب‌های زیرزمینی توسعه دادند. ایشان ۹۹ داده نمونه آب از دریای سرخ و ۴۲ داده از سواحل شرقی عربستان سعودی را برای ۱۳ پارامتر شیمیایی تجزیه و تحلیل کردند. ایشان از روش‌های درخت‌های تصمیم‌گیری (decision tree)، یادگیری ماشین، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، پرسپترون‌های چندلایه (MLP) و خودهمبسته (AR) استفاده نمودند. ضریب R^2 روش پرسپترون چندلایه برابر ۹۸/۷ درصد شد اما به زمان آموزش طولانی‌تری نیاز داشت [8]. تای و همکاران به پیش‌بینی نفوذ آب شور در رودخانه‌ای در ویتنام برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی محصولات کشاورزی با استفاده از مدل ARIMA پرداختند. نتایج نشان داد شوری تا فاصله ۴۰ کیلومتری از ساحل ادامه پیدا خواهد کرد [9].

بررسی مطالعات پیشین دو خلأ مطالعاتی مهم را نشان می‌دهد: (۱) بسیاری از پژوهش‌ها از شاخص‌هایی استفاده نمودند که تنها بر یک جنبه از آسیب‌پذیری (مانند عوامل ذاتی یا پویایی) تمرکز داشته‌اند و ترکیب این دو جنبه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. (۲) در اغلب تحقیقات، پیش‌بینی تغییرات شوری آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های پیچیده و داده‌بر مانند شبکه‌های عصبی پیچیده صورت گرفته که گاهی با محدودیت‌های اجرایی همراه و نیاز به فرایند آموزشی قوی دارد. استفاده از مدل‌های خودهمبسته به طور تخصصی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری در مطالعات گذشته کمتر استفاده شده و قابلیت کارایی آن نیاز به بررسی دارد. در این راستا و در جهت تکمیل خلأهای مطالعات پیشین، از شاخص SIVI به عنوان یک شاخص جدید که هر دو ویژگی ذاتی (از جمله ضریب نفوذپذیری) و پویایی

است. بسیاری از این پژوهش‌ها بر پایه شاخص‌های کیفی و کمی بوده‌اند که هر کدام با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی، سعی در تعیین مناطق بحرانی داشته‌اند. برای نمونه، شاخص Galdit به عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد، عوامل مختلفی مانند عمق سطح آب، فاصله از دریا و تغییرات هدایت الکتریکی را برای ارزیابی آسیب‌پذیری در نظر می‌گیرد [1]. کیم و همکاران با استفاده از شاخص Galdit اصلاح شده آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی در برابر نفوذ آب شور دریا را در سواحل کره جنوبی ارزیابی کردند. شاخص اصلاح شده نشان داد عملکرد بهتری نسبت به شاخص معمولی دارد و مطابق آن آسیب‌پذیرترین ماه، سپتامبر است [2]. چاندراجیت و همکاران آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی در شمال سریلانکا را با شاخص کیفیت آب ارزیابی (WQI) کردند. ایشان در مجموع ۳۴ نمونه آب زیرزمینی جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمودند. این رویکرد نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، ۵۸ درصد آبخوان تحت تأثیر نفوذ آب دریا قرار دارد [3]. ایماز و همکاران یک شاخص شامل پارامترهای اجتماعی، زیست‌محیطی و هیدروژئولوژیکی همراه با داده‌های مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب دریا در یک آبخوان ساحلی در مکزیک ارائه دادند. نتایج نشان داد در سال ۲۰۱۹ شرایط آسیب‌پذیری بالایی در منطقه ساحلی وجود دارد. تا سال ۲۰۴۰، مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا به داخل کشور گسترش خواهند یافت [4]. گاتدولا و بلانکو یک شاخص با استفاده از پارامترهای فیزیکی، کشاورزی-اکولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی ارائه داده و وزن هر پارامتر را از طریق فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی تعیین نمودند. شاخص ارائه شده در منطقه ساحلی فیلیپین مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نشان داد بیش از ۵۰ درصد مناطق آسیب‌پذیر بوده و محصولات کشاورزی در معرض حمله شوری قرار دارند [5].

در کنار ارزیابی آسیب‌پذیری، پیش‌بینی روند تغییرات شوری آب زیرزمینی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌های ریاضی و آماری مختلفی همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، مدل‌های رگرسیونی و روش‌های سری زمانی برای پیش‌بینی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده شده‌اند. برای نمونه، ژنگ و زین از مدل ARIMA برای تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی غلظت NH_4 در رودخانه زویی در چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در آبخوان شایوه و توپوگرافی آن

Fig. 1. Case study of Chaouia coastal aquifer and topography

۲-۲- شاخص SIVI

در این پژوهش، از شاخص پیشنهادی توسط زین‌العابدین و غیائی [12] برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان در برابر نفوذ آب شور دریا که SIVI نام دارد، استفاده شد. مزیت اصلی این شاخص این است که در آن سعی شده است تا به طور همزمان مهم‌ترین جنبه‌های آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب دریا در نظر گرفته شود که عبارتند از وسعت منطقه آسیب دیده، شدت نفوذ، فصلی و پویا بودن آن، وضعیت جغرافیایی منطقه و ویژگی‌های ذاتی منطقه. در شاخص پیشنهادی از سه مفهوم اصلی استفاده شده است که عبارتند از مقدار مرجع (V_r (reference value)؛ وضعیت فعلی (CS (current situation) و وضعیت گذشته PS (preceding situation). پارامتر مقدار مرجع V_r به غلظت یون کلرید رایج در آبخوان‌های زیرزمینی سواحل اشاره دارد، به طوری که مقادیر بیشتر از V_r نشان‌دهنده وجود آب شور در منطقه است. اندازه‌گیری این پارامتر به دلیل سازوکار هیدرولوژیکی پیچیده طبیعی مانند نفوذ آب سطحی، تبخیر از آبخوان‌های کم عمق، کیفیت جریان‌های تغذیه‌ای از آبخوان‌های مجاور، روان شدن سازندهای نمکی و گردش مجدد آب آبیاری، امری بسیار دشوار است. بنابراین پیشنهاد شده است که مقدار ۲۵۰ میلی گرم در لیتر که آستانه مصرف انسان است در نظر گرفته شود [13]. تعریف وضعیت فعلی نفوذ در یک سفره آبخوان ساحلی نیز می‌تواند به دلیل تغییرات مکانی و زمانی در غلظت یون کلرید ناشی از فرآیندهای طبیعی و انسانی کاملاً پیچیده باشد. لذا در شاخص SIVI دو بازه زمانی تعریف شده است.

(از جمله تغییرات زمانی شوری) آبخوان را در نظر می‌گیرد جهت ارزیابی جامع‌تر آسیب‌پذیری منطقه استفاده شد. همچنین این شاخص با استفاده از مدل ARIMA به عنوان یک روش کم‌هزینه و کارآمد، بدون نیاز به داده‌های ورودی زیاد، پیش‌بینی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ناحیه ساحلی شایوه (Chaouia)، منطقه‌ای در شمال غربی کشور مراکش در کنار اقیانوس اطلس که حدود ۶۰ کیلومتری جنوب غربی شهر کازابلانکا (Casablanca) قرار دارد به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۱). علت انتخاب این منطقه در دسترس بودن اطلاعات و اهمیت بحث نفوذ آب شور در آبخوان است زیرا آب زیرزمینی تنها منبع آب موجود برای تأمین نیازهای خانگی و کشاورزی در این منطقه است. اطلاعات آبخوان شایوه از آزمایشگاه ژئولوژیکی دانشگاه شعیب مراکش دریافت شده است [10]. آبخوان ساحلی شایوه، یک واحد مهم هیدروژئولوژیکی در کشور مراکش محسوب می‌گردد. تنها منبع آب موجود در این منطقه، یک آبخوان آزاد است، در نتیجه از آب‌های زیرزمینی برای فعالیت‌های کشاورزی و تأمین نیاز مردم استفاده می‌گردد. این آبخوان به علت بهره‌برداری غیر مجاز برای آبیاری کشاورزی و مصارف صنعتی به طور فزاینده‌ای در معرض شور شدن توسط نفوذ آب دریا قرار گرفته است. به صورت کلی جریان آب زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی و به سمت دریا می‌باشد. یک منحنی پیزومتريک به سمت مناطق داخلی نیز مشاهده می‌شود که می‌تواند نشانگر نفوذ احتمالی آب شور دریا باشد. علاوه بر این، شیب هیدرولیکی در قسمت شمال شرقی مقدار بالایی دارد (۰/۰۰۱۶) در حالی که به علت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و تغییرات میزان نفوذ پذیری آبخوان در قسمت جنوب غربی، این مقدار بسیار پایین (۰/۰۰۰۳) است [11]. آب و هوای منطقه عمدتاً نیمه خشک بوده و متوسط سالانه بارش و دما در منطقه به ترتیب ۲۸۰ میلی‌متر و ۱۷ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. بیشترین و کمترین میزان بارش در ماه‌های مارس و جولای است. همچنین، بیشترین و کمترین دما در ماه‌های اوت و ژانویه گزارش شده است [11]. اطلاعات کیفی در یک بازه ۱۰ ساله به صورت ماهانه جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱. دسته‌بندی نمایه S مساحت آب زیرزمینی شور شده [12]

Table 1. Surface area of groundwater affected by salination (S variable) categories [12]

S variable range	Status	Assigned value
0.00-0.10	Very low	0
0.11-0.25	Low	1
0.26-0.50	Moderate	2
0.51-0.75	High	3
0.76-1.00	Extreme	4

جدول ۱. دسته‌بندی نمایه شدت نفوذ شوری (I) [12]

Table 2. Intensity of intrusion (I variable) categories [12]

I variable range(mg/l)	Status	Assigned value
≤250	Very low	0
251-500	Low	1
501-1000	Moderate	2
1001-2000	High	3
>2000	Extreme	4

۲-۲-۳- نمایه ویژگی زمانی و فصلی (T)

پویایی آب‌های زیرزمینی می‌تواند تغییرات زمانی و یا فصلی خاصی را در میزان غلظت یون کلرید آبخوان‌های زیرزمینی ساحلی ایجاد کند که در این شاخص به عنوان نمایه ویژگی زمانی و فصلی (temporality and seasonality) T در نظر گرفته شده است. نمایه T، انعطاف‌پذیری و توانایی برگشت‌پذیری سیستم به کیفیت آب اولیه را برجسته می‌کند. مقادیر کوچک این نمایه، نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالا در برابر نفوذ است که در این حالت بازیابی کیفیت آب بسیار دشوار خواهد بود. برای محاسبه این نمایه، دو نمونه در سال برای هر چاه مشاهداتی مورد نیاز است که در بهترین و بدترین فصل سال از نظر کیفیت آب برداشت شده است. نمایه T اختلاف میانگین بین این دو سری زمانی است و به صورت معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (f(x)_{\max} - f(x)_{\min})}{f_{\max}} \quad (3)$$

که در آن، n تعداد سال در نظر گرفته شده به عنوان وضعیت فعلی CS (در این پژوهش این مقدار ۴ سال در نظر گرفته شده است) می‌باشد. $f(x)_{\max}$ و $f(x)_{\min}$ به ترتیب برابر بیشترین و کمترین غلظت یون کلرید در سال x است. به طور نمونه در سال اول مقدار بیشترین و کمترین یون کلرید در منطقه را استخراج کرده و اختلاف آنها را حساب می‌کنیم و این کار را تا سال آخر

وضعیت فعلی CS برای چهار سال تعریف شده است تا تأثیر سال‌های خشک و مرطوب نیز در نظر گرفته شود. همچنین محاسبات CS شامل میانگین مقادیر سالانه برای هر نقطه در طول دوره ۴ ساله است. وضعیت گذشته PS همانند CS تعریف می‌شود با این تفاوت که در آن، دوره ۴ ساله قبل از CS در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۱- نمایه مساحت آب زیرزمینی شور شده (S)

نمایه S (surface area of groundwater affected by salination) به عنوان مساحتی از آبخوان تعریف می‌شود که غلظت یون کلرید در آن از مقدار مرجع V_r بیشتر باشد. به عبارت دیگر نمایه S می‌تواند به عنوان مساحتی از آبخوان تعریف شود که تحت نفوذ آب شور، مستقل از شدت آن، قرار دارد. برای محاسبه این نمایه، ابتدا باید نقشه توزیع یون کلرید منطقه برای وضعیت فعلی CS تهیه شود. سپس مقدار نمایه S با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{S_a}{S_t} \quad (1)$$

که در آن، S_t مساحت کل آبخوان (km^2) و S_a مساحتی است که در آن غلظت یون کلرید بیشتر از مقدار مرجع V_r است (km^2). مقدار متغیر S به ۵ دسته تقسیم می‌شود که در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۲-۲- نمایه شدت نفوذ شوری (I)

از نمایه I (intensity of intrusion) برای نشان دادن میانگین شوری آبخوان در شرایط فعلی CS استفاده می‌شود. برای تعیین این پارامتر از نقشه ایزوکلرید منطقه استفاده می‌شود و با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آید:

$$I = \frac{\sum S_i(>V_r) Cl_i(>V_r)}{S_a} \quad (2)$$

که در آن، S_i مساحت بین خط هم‌تراز i (با مقدار بزرگتر مساوی V_r) و خط هم‌تراز بالای آن (km^2) و Cl_i میانگین غلظت یون کلرید (mg/l) در هر بخش است. طبق قرارداد، مقدار اختصاص داده شده به مساحت بالای بزرگترین مقدار خط هم‌تراز برابر است با میزان آن خط به علاوه تفاوت این خط و خط پایین آن. نمایه I به پنج دسته تقسیم شده که در جدول (۲) ارائه شده است.

بیشتر آب دریا شود. آبخوان‌های با مقادیر هدایت هیدرولیکی بیش از ۴۰ متر در روز در برابر نفوذ آب دریا آسیب‌پذیر هستند [14] از این رو، مقدار هدایت هیدرولیکی برابر با ۴۰ متر در روز به عنوان مقدار مرجع برای تقسیم‌بندی نمایه (C Conductivity) در نظر گرفته شده است. نمایه C از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$C = \frac{S_b}{S_t} \quad (5)$$

که در آن، S_b مساحتی از آبخوان است که در آن ضریب هدایت هیدرولیکی بیش از مقدار مرجع باشد. دسته‌بندی نمایه C در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۲. دسته‌بندی نمایه ویژگی زمانی و فصلی (T) [12]

Table 3- Temporality and seasonality (T variable) categories [12]

T variable range	Status	Assigned value
0.00-0.10	Very low	0
0.11-0.20	Low	1
0.21-0.30	Moderate	2
0.31-0.40	High	3
>0.40	Extreme	4

جدول ۳. دسته‌بندی نمایه تکامل نفوذ آب شور (E) [12]

Table 4. Evolution (E variable) categories [12]

E variable range	Status	Assigned Value
≤0.85	Significant recovery	-2
0.85-0.97	Moderate recovery	-1
0.98-1.02	Stable	0
1.03-1.15	Moderate deterioration	1
>1.15	Significant deterioration	2

جدول ۴. دسته‌بندی نمایه نوع آبخوان (A) [12,14]

Table 5. Aquifer type (A variable) categories [12, 14]

A variable range	Status	Assigned value
Bounded aquifer	Low	1
Leaky aquifer	Moderate	2
Unconfined aquifer	High	3
Confined aquifer	Extreme	4

جدول ۵. دسته‌بندی نمایه هدایت هیدرولیکی (C) [12,14]

Table 6. Conductivity (C variable) categories [12, 14]

C variable range	Status	Assigned value
0.00-0.10	Very low	0
0.11-0.25	Low	1
0.26-0.50	Moderate	2
0.51-0.75	High	3
0.76-1.00	Extreme	4

مطالعه انجام داده و در نهایت میانگین این اختلافات را تعیین می‌کنیم که برابر صورت کسر خواهد بود. $\overline{fmax}$ میانگین ماکزیمم غلظت یون کلرید در کل زمان مطالعاتی است. بدین معنی که مقدار ماکزیمم هر سال را استخراج کرده و متوسط همه آنها را می‌یابیم. جدول (۳) تقسیم‌بندی نمایه T را نشان می‌دهد.

۲-۲-۴- نمایه تکامل نفوذ آب شور (E)

نمایه E (Evolution) برای طبقه‌بندی روند فعلی نفوذ استفاده می‌شود که عبارت است از نفوذ پایدار، در حال پیشرفت و در حال کاهش. برای تخمین این نمایه، باید متوسط غلظت یون کلرید در وضعیت فعلی CS و گذشته PS محاسبه گردد. معادله (۴) نحوه تعیین این نمایه را نشان می‌دهد:

$$E = \frac{\overline{Cl}_n}{\overline{Cl}_{n-1}} \quad (4)$$

که در آن، $\overline{Cl}_n$ غلظت یون کلرید در وضعیت فعلی CS و $\overline{Cl}_{n-1}$ غلظت یون کلرید در وضعیت گذشته PS است. دسته‌بندی مربوط به نمایه E در جدول (۴) ارائه شده است.

۲-۲-۵- نمایه نوع آبخوان (A)

در طبیعت، آب‌های زیرزمینی به طور کلی در لایه‌های زمین‌شناسی و در قالب آبخوان قرار می‌گیرند. این آبخوان‌ها ممکن است به صورت تحت فشار، آزاد، نشتی و یا محدود شده توسط یک یا چند شرط مرزی (مانند تغذیه یا تخلیه) باشند. میزان نفوذ آب شور دریا به این ویژگی اساسی و ذاتی منطقه بستگی دارد. بنابراین، در اختصاص عدد برای محاسبه نمایه A (Aquifer type) در شاخص SIVI باید نوع آبخوان زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را تعیین نمود. جدول (۵) دسته‌بندی نمایه A را برای شرایط مختلف هیدروژئولوژی ارائه می‌دهد.

۲-۲-۶- نمایه هدایت هیدرولیکی (C)

هدایت هیدرولیکی آبخوان برای اندازه‌گیری میزان دبی جریان در آبخوان استفاده می‌شود. میزان بزرگی حرکت جبهه آب شور تحت تأثیر هدایت هیدرولیکی آبخوان است. مقدار زیاد هدایت هیدرولیکی یک آبخوان منجر به حرکت داخلی سریع‌تر و راحت‌تر جبهه آب شور دریا می‌شود. همچنین، هدایت هیدرولیکی بالا منجر به ایجاد مخروط افت گسترده‌تر در هنگام پمپاژ می‌شود و اگر آبخوان نزدیک به ساحل باشد این امر ممکن است باعث نفوذ

این نمایه از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{S_c}{S_t} \quad (۶)$$

که در آن، S_c مساحتی است که در آن ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سطح دریا کمتر از مقدار مرجع است. S_t همان‌طور که پیشتر معرفی شد، مساحت کل را نشان می‌دهد. جدول (۷) طبقه‌بندی نمایه H را نشان می‌دهد.

۲-۲-۸- نمایه فاصله از ساحل (D)

به طور کلی، میزان نفوذ آب شور در نواحی مرزی ساحل ماکزیمم و هر چه از مرز ساحل و دریا دورتر شده و به داخل خشکی حرکت کنیم میزان آن کاهش می‌یابد. فاصله ۱ کیلومتری از ساحل به عنوان مرجع لحاظ شده است [14]. نمایه D از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{S_d}{S_t} \quad (۷)$$

که در آن، S_d مساحتی است که در آن فاصله نقاط از ساحل کمتر از مقدار مرجع باشد. طبقه‌بندی نمایه D در جدول (۸) ارائه شده است.

۲-۲-۹- محاسبه شاخص SIVI

در نهایت بعد از محاسبه متغیرهای ورودی، شاخص SIVI به صورت معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$SIVI = \frac{\sum_{i=1}^n P_{avi}}{28} \quad (۸)$$

که در آن، P_{avi} مقدار اختصاص داده شده به نمایه i ام است. مقدار P_{avi} در واقع ستون آخر جدول (۱ تا ۸) می‌باشد. بیشترین مقدار این شاخص ۲۸ است پس برای استانداردسازی، کل شاخص بر ۲۸ تقسیم شده است. طبقه‌بندی شاخص SIVI در جدول (۹) ارائه شده است.

۲-۳- تحلیل حساسیت

برای تعیین بازه تغییرات SIVI و همچنین انتخاب متغیر مناسب برای استفاده در مدل پیش‌بینی، یک تحلیل حساسیت کلی GSA (Global sensitivity analysis) روی ورودی‌های شاخص SIVI انجام شد. روش GSA تأثیر همه متغیرها را روی خروجی بررسی می‌کند بدون این که لازم باشد یک متغیر تغییر کند و بقیه

جدول ۶. دسته‌بندی نمایه اختلاف تراز آب زیرزمینی و تراز آب دریا (H) [12,14]

Table 7. Height difference between groundwater and seawater (H variable) categories [12,14]

H variable range	Status	Assigned value
0.00-0.10	Very low	0
0.11-0.25	Low	1
0.26-0.50	Moderate	2
0.51-0.75	High	3
0.76-1.00	Extreme	4

جدول ۷. دسته‌بندی نمایه فاصله از ساحل (D) [12,14]

Table 8. Distance from shore (D variable) categories [12,14]

D variable range	Status	Assigned value
0.00-0.10	Very small	-2
0.11-0.25	Small	-1
0.26-0.50	Medium	0
0.51-0.75	Far	1
0.76-1.00	Very far	2

جدول ۸. دسته‌بندی شاخص SIVI [12]

Table 9. SIVI index categories [12]

SIVI	Vulnerability
≤ 0.19	Very low
0.20-0.39	Low
0.40-0.59	Moderate
0.60-0.79	High
0.80-1.00	Extreme

۲-۲-۷- نمایه اختلاف تراز آب زیرزمینی و تراز آب دریا (H)

اختلاف سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح متوسط دریا، یکی از مهم‌ترین عوامل در ارزیابی نفوذ آب دریا در منطقه است. زیرا این متغیر، میزان فشار هیدرولیکی موجود را برای عقب نگه‌داشتن جبهه آب شور دریا تعیین می‌کند. خطر نفوذ آب دریا به ویژه هنگامی که سطح آب زیرزمینی کمتر از ۱ متر از سطح دریا باشد، بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود [14] پس این مقدار به عنوان مقدار مرجع در ارزیابی نمایه H در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ذکر شد اگر سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سطح آب دریا باشد، گرا دیان هیدرولیکی از دریا به سمت آبخوان ساحلی خواهد بود که منجر به شوری می‌شود. برای محاسبه این نمایه، نقشه اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با تراز آب دریا را تهیه کرده و مساحتی از آبخوان که در آن ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سطح دریا کمتر از مقدار مرجع باشد را محاسبه می‌کنیم.

ماتریس ترکیبی مجزا برای محاسبه شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل نیاز است [17]. (۴) مدل با استفاده از مقادیر واقعی همه پارامترها اجرا می‌شود. (۵) شاخص حساسیت مرتبه اول، دوم و کل محاسبه شده و رتبه‌بندی هر پارامتر با استفاده از توصیه‌های تنگ و همکاران انجام می‌شود [16]. (۶) بازه اطمینان ۹۵ درصد برای همه شاخص‌های حساسیت محاسبه می‌شود و در نهایت (۷) رتبه‌بندی پارامترها به دست می‌آید.

۲-۴- مدل پیش‌بینی

در این پژوهش، برای پیش‌بینی شاخص SIVI برای بازه کوتاه‌مدت یک ساله از مدل‌های سری زمانی استفاده شده است. مدل‌سازی سری‌های زمانی شامل تکنیک‌هایی است که داده‌های سری زمانی را به عنوان متغیرهای وابسته، به پیش‌بینی‌کننده‌ها مرتبط می‌کند که همه تابعی از زمان هستند. مدل ARIMA در سال ۱۹۷۶ توسط باکس و جنکینز ارائه شد [18]. مدل ARIMA یک مدل تصادفی و یکی از مشهورترین مدل‌های خطی در پیش‌بینی سری‌های زمانی است. این مدل قادر به شبیه‌سازی متغیرهای وابسته‌ای است که پیش‌بینی‌کننده‌های زیادی دارند و دارای درجاتی از نایستایی هستند. از مزایای مدل ARIMA می‌توان به قابلیت پیش‌بینی و قابلیت بهتر و غنی‌تر در ارتباط با تغییرات زمانی نام برد [19]. در بیشتر سری‌های زمانی، بین داده‌های مشاهداتی، همبستگی وجود دارد که توسط ARIMA در نظر گرفته می‌شود [20]. مدل ساده ARIMA برای سری زمانی x_t از برازش مدل ARIMA روی سری تفاضلی u_t به دست می‌آید که در معادله (۱۱) نشان داده شده است:

$$ARIMA(p,d,q): u_t = \sum_{i=1}^p \phi_i u_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (11)$$

که در آن، u_t سری حاصل از تفاضل‌گیری d ام سری اصلی، p و q مرتبه مدل، ϕ_i و θ_j ضرایب مدل و ε_{t-j} خطای مدل است.

برای تعیین پارامتر d باید ابتدا ایستا بودن یا نبودن یک سری زمانی را تعیین نمود. ایستا بودن یا نبودن یک سری زمانی توسط آزمون من-کندال (Mann-Kendall) تعیین می‌شود. برای ارزیابی آزمون من-کندال ابتدا پارامتر S به صورت معادله (۱۲) محاسبه می‌شود [21]:

ثابت باقی بماند (محدودیت روش تک متغیره OAT). یکی از روش‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرد روش سوبول (Sobol) است که یک روش کلی تحلیل حساسیت محسوب می‌شود [15]. روش سوبول با وجود پیچیده بودن و حجم زیاد محاسبات، در این پژوهش استفاده شده است زیرا این امکان را می‌دهد که آثار مرتبه اول، دوم و بالاتر هر پارامتر یا جفت پارامتر از طریق محاسبه شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل مشخص شوند. واریانس کل (D) خروجی‌های مدل، از معادله (۹) تعیین می‌شود [16]:

$$D = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + \dots + D_{12\dots p} \quad (9)$$

که در آن، p تعداد پارامترها، D_i واریانس خروجی ناشی از پارامتر i ام و D_{ij} واریانس خروجی ناشی از تعامل بین پارامترهای i ام و j ام است و به شاخص حساسیت بستگی دارند. شاخص حساسیت مرتبه اول S_i نشان‌دهنده درصد تغییراتی است که پارامتر i ام در خروجی ایجاد می‌کند، شاخص حساسیت مرتبه دوم S_{ij} نشان‌دهنده اثر تعاملات بین پارامتر i ام و j ام در واریانس کل و شاخص حساسیت کل ST_i بیان‌کننده درصد تغییراتی است که پارامتر i ام با تعامل با هر پارامتر دیگری بر خروجی مدل می‌گذارد. این شاخص‌ها با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$S_i = \frac{D_i}{D}, S_{ij} = \frac{D_{ij}}{D}, ST_i = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (10)$$

به طور کلی، گام‌های اصلی روش سوبول به شرح زیر است. (۱) مقادیر واقعی، ماکزیمم و مینیمم هر پارامتر مشخص می‌شود. (۲) با استفاده از روش مونت کارلو (Monte Carlo) n_2 نمونه پارامتر تصادفی ایجاد می‌شود. (۳) با استفاده از مدل سالتلی (Saltelli) پارامترها برای روش سوبول آماده‌سازی شوند [17]. این کار با تولید تصادفی $n(2p+2)$ دسته پارامتر انجام می‌شود. در این روش استاندارد، برای محاسبه هم‌زمان شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل به ازای هر پارامتر p ، به دو ماتریس ترکیبی مجزا نیاز است. به همین دلیل تعداد کل ارزیابی‌های مدل به صورت $n+n+2np$ یا $n(2p+2)$ محاسبه می‌شود. در این رابطه n تعداد نمونه‌های مونت کارلو و p تعداد پارامترهای ورودی مدل است. ضریب دو، نشان می‌دهد در این روش، به ازای هر پارامتر p به دو

برابر باشند نشان می‌دهد فاکتور دیگری در همبستگی x و y تأثیرگذار نیست. اما اگر این دو عدد با هم برابر نشوند نشان می‌دهد یک عامل سوم نیز در همبستگی بین x و y اثر دارد (به طور مثال تأخیر سوم در میزان همبستگی تأخیر چهارم اثرگذار است). میزان خودهمبستگی جزئی توسط معادله (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\rho_{x,y,z} = \frac{\rho_{x,y} - \rho_{x,z}\rho_{y,z}}{\sqrt{1 - \rho_{x,z}^2} \times \sqrt{1 - \rho_{y,z}^2}} \quad (14)$$

که در آن، x و y و z سری زمانی و $\rho_{x,y}$ ضریب پیرسون بین x و y است.

بعد از تعیین پارامترهای p ، d و q باید آزمون کفایت پارامترهای مدل اجرا شود. این امر توسط معیار اطلاعات آکائیکه AIC به صورت معادله (۱۵) انجام می‌شود [23]:

$$AIC = N \ln \sigma_e^2 + 2p \quad (15)$$

که در آن، N تعداد داده‌های سری زمانی، σ_e^2 واریانس باقیمانده‌های سری زمانی و p مرتبه خودهمبستگی است. برای انجام این آزمون مقادیر $AIC(p+1)$ ، $AIC(p-1)$ و $AIC(p)$ محاسبه می‌گردد. هرگاه معیار اطلاعات آکائیکه برای مدل با مرتبه p انتخابی از هر دو مقدار $AIC(p+1)$ و $AIC(p-1)$ کوچکتر باشد آن‌گاه مرتبه مدل مناسب انتخاب شده و کفایت پارامترهای مدل محرز می‌شود. عملکرد مدل ARIMA در این پژوهش، با استفاده از سه معیار نش-سوتکلیف NS، میانگین خطای مطلق MAE و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE ارزیابی شد.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین آسیب‌پذیری

با توجه به توپوگرافی منطقه، ضخامت سفره آب زیرزمینی در بیشتر قسمت‌ها، تقریباً بین ۱۰ تا ۳۰ متر متغیر است. با در نظرگیری میزان در دسترس بودن داده‌ها، وضعیت فعلی (CS) برای دوره زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و وضعیت گذشته (PS) برای دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ در نظر گرفته شده است. شکل (۲) توزیع غلظت کلرید و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای را در منطقه نشان می‌دهد.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (12)$$

که در آن، n تعداد داده و sgn تابع علامت است. تابع علامت مشخص می‌کند که اختلاف بین دو داده مثبت، منفی یا صفر است. تابع علامت اگر اختلاف زوج داده مثبت باشد مقدار $(+1)$ ، اگر منفی باشد (-1) و صفر باشد مقدار (0) را برمی‌گرداند. در آزمون من-کندال مجموع این مقادیر علامت برای تمام زوج‌های ممکن محاسبه شده و پارامتر S به دست می‌آید. علامت مثبت S نشان‌دهنده روند افزایشی و علامت منفی نشان‌دهنده روند کاهشی در سری زمانی است.

برای برآورد اولیه پارامترهای p و q از توابع همبستگی خودکار ACF و همبستگی جزئی PACF استفاده می‌شود. بررسی هم‌زمان این دو نمودار با هم می‌تواند ایده‌ای مناسب برای پیدا کردن مقادیر مناسب برای پارامترهای p و q به دست دهد. تابع همبستگی خودکار در واقع همبستگی یک سری زمانی را محاسبه و ترسیم می‌کند. همبستگی، به صورت همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای یک سری زمانی با خودش در حالی که k واحد زمانی تأخیر داده شده باشد. میزان خودهمبستگی توسط ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه می‌شود [22].

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (r_t - \bar{r})(r_{t-k} - \bar{r})}{\sum_{t=1}^T (r_t - \bar{r})^2} \quad (13)$$

که در آن، ρ_k ضریب همبستگی پیرسون، r میانگین سری زمانی اصلی، r_t سری زمانی و r_{t-k} سری زمانی با k مرتبه تأخیر است. ضریب همبستگی پیرسون (Pearson) بین -1 و 1 متغیر است. هرچه این ضریب به 1 یا -1 نزدیکتر باشد بیانگر همبستگی زیاد مدل با خودش است.

به طور مشابه، همبستگی جزئی، اثر فاکتورهای دیگر از جمله اثر دخالت تأخیرها در میزان همبستگی پیرسون را بیان می‌کند. به عنوان مثال، همبستگی جزئی خودکار در تأخیر چهارم، در واقع همبستگی پیرسون در تأخیر چهارم است در صورتی که اثر تأخیرهای اول، دوم و سوم در آن حذف شود. به عبارت دیگر اگر ضریب همبستگی پیرسون بین دو سری زمانی x و y برابر a و همبستگی جزئی بین x و y برابر b باشد و دو مقدار a و b با هم

جدول ۹. محاسبات مربوط به نمایه S

Table 10. S variable calculation

CI range (mg/l)	0-250	>250
S_i (km ²)	104.53	187.11
Variable	Value	
S_a (km ²)	187.11	
S_i (km ²)	291.64	
S	0.641	

جدول ۱۰. محاسبات مربوط به نمایه I

Table 11. I variable calculation

CI range (mg/l)	250-500	500-1000	1000-2000	2000-4000
S_i (km ²)	81.91	52.36	30.85	22
$\bar{CI}$ (mg/l)	375	750	1500	3000
$S_i \times \bar{CI}$	30716.25	39270	46275	66000
Variable	Value			
$\sum S_i \times \bar{CI}$	182261.25			
S_a (km ²)	187.11			
I	974.09			

جدول ۱۱. محاسبات مربوط به نمایه T

Table 12. T variable calculation

Maximum annual CI concentration (mg/l)	Minimum annual CI concentration (mg/l)	T
3579	50	0.214

جدول ۱۲. محاسبات مربوط به نمایه E

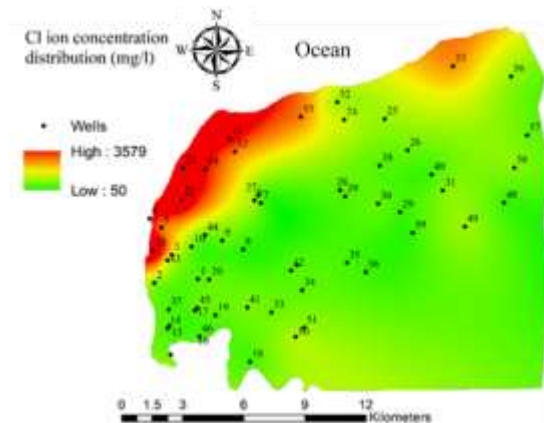
Table 13. E variable calculation

CI concentration in CS	CI concentration in PS	E
694	650	1.07

نمایه‌های S و I بر اساس مساحت مناطقی که غلظت یون کلرید بیش از V_r دارند محاسبه می‌شوند. داده‌ها و محاسبات مربوط به این دو نمایه در جداول (۱۰ و ۱۱) ارائه شده است.

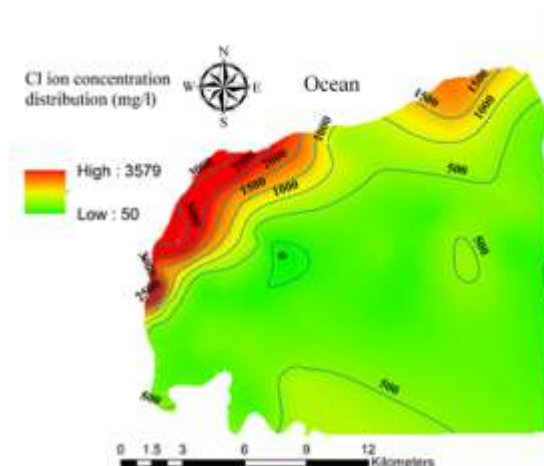
نمایه‌های T و E نیز براساس میزان غلظت کل در دوره زمانی CS و PS محاسبه می‌شوند. داده‌ها و محاسبات مربوط به این دو نمایه در جداول (۱۲ و ۱۳) ارائه شده است.

داده‌های هدایت هیدرولیکی (K) از چاه‌های مشاهده‌ای حاصل شده و سپس با استفاده از روش کریجینگ و نرم‌افزار ArcGIS برای کل آبخوان مورد نظر درون‌یابی و تخمین زده شد. مقادیر نشان می‌دهد که ضریب هدایت هیدرولیکی بین ۱۵ تا ۱۹۲ متر در روز در



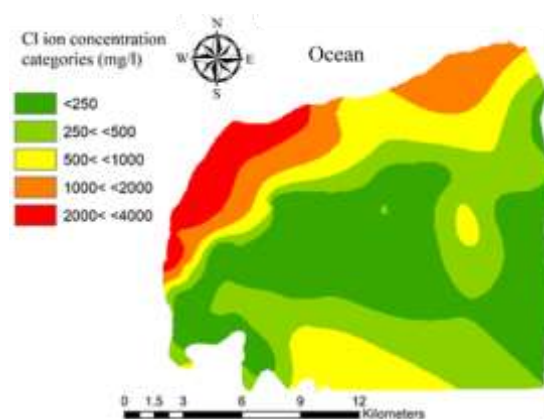
شکل ۲. توزیع غلظت یون کلرید و موقعیت چاه‌ها

Fig. 2. Cl⁻ concentration distribution and wells' location



شکل ۳. خطوط هم‌تراز غلظت یون کلرید

Fig. 3. Cl⁻ concentration isolines

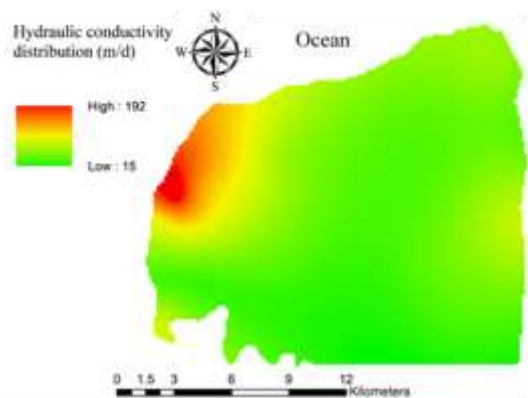


شکل ۴. دسته‌بندی غلظت یون کلرید

Fig. 4. Cl⁻ concentration categories

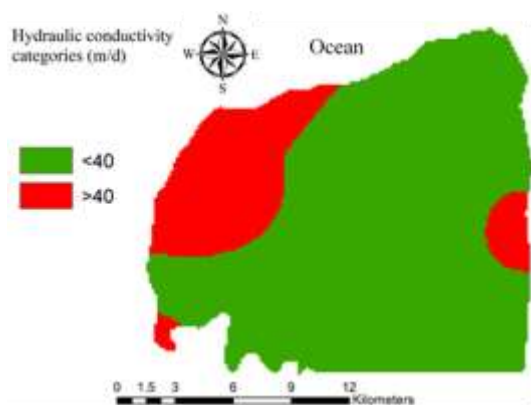
برای استفاده از شاخص SIVI لازم است یک نقشه ایزوکلرید برای این دوره‌های زمانی تهیه شود که در شکل (۳) ارائه شده است. توزیع غلظت Cl⁻ و دسته‌بندی آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

برای تعیین متغیر A باید توجه شود که آبخوان شاویه یک آبخوان آزاد است پس با توجه به مقادیر معرفی شده، به این نمایه، مقدار ۳ اختصاص داده شده است. در نهایت با استفاده از هشت نمایه پیشنهادی برای شاخص SIVI، آسیب‌پذیری نهایی برای منطقه مورد نظر، تعیین شد (شکل ۸). خلاصه نتایج در جدول (۱۷) ارائه شده است.



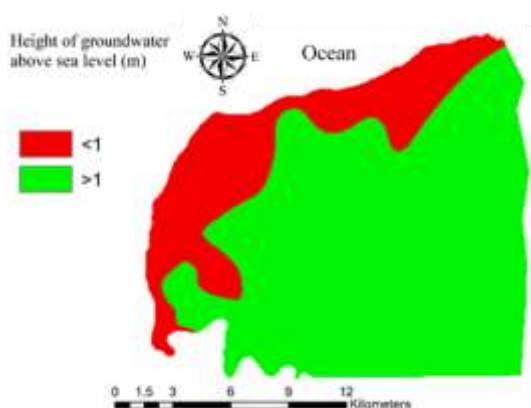
شکل ۵. توزیع هدایت هیدرولیکی

Fig. 5. Hydraulic conductivity distribution



شکل ۶. دسته‌بندی هدایت هیدرولیکی

Fig. 6. Hydraulic conductivity categories



شکل ۷. دسته‌بندی اختلاف سطح آب زیرزمینی و تراز دریا

Fig. 7. Height of groundwater above sea level categories

منطقه متغیر است (شکل ۵). نتایج طبقه‌بندی نشان می‌دهد که بیشتر مساحت منطقه (۲۱۵/۳۲ کیلومتر مربع) دارای ضریب هدایت هیدرولیکی کمتر از ۴۰ متر در روز است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری کم در برابر نفوذ آب دریا است. از طرف دیگر، ۷۶/۳۲ کیلومتر مربع از منطقه دارای مقدار K بیش از ۴۰ متر در روز بوده که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد می‌باشد. قسمت‌هایی در مرکز و ساحل شمال غربی دارای مقادیر بالای ضریب هدایت هیدرولیکی هستند. این تقسیم‌بندی در شکل (۶) نشان داده شده است. داده‌ها و چگونگی محاسبات نمایه C نیز در جدول (۱۴) ارائه شده است.

ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از تراز سطح دریا در قالب یک نقشه در شکل (۷) نشان داده شده است. داده‌ها و محاسبات نمایه H در جدول (۱۵) ارائه شده است. حدود ۹۹ کیلومتر مربع از آبخوان شاویه فاصله‌ای کمتر از ۱/۵ کیلومتر از خط ساحلی دارد که با توجه به دسته‌بندی ارائه شده به عنوان آبخوان (فاصله متوسط) طبقه‌بندی می‌شود. نتایج نمایه D در جدول (۱۶) ارائه شده است.

جدول ۱۳. محاسبات مربوط به نمایه C

Table 14. C variable calculation

Hydraulic conductivity range (m/d)	<40	>40
S_i (km ²)	146.56	145.08
Variable	Value	
S_b (km ²)	145.08	
S_t (km ²)	291.64	
C	0.51	

جدول ۱۴. محاسبات مربوط به نمایه H

Table 15. H variable calculation

Height range (m)	<1	>1
S_i (km ²)	149.6	142.04
Variable	Value	
S_c (km ²)	149.6	
S_t (km ²)	291.64	
H	0.51	

جدول ۱۵. محاسبات مربوط به نمایه D

Table 16. D variable calculation

Distance from shore (m)	S_d (km ²)	S_t (km ²)	D
>1.5	99	291.64	0.34

جدول ۱۶. محاسبات شاخص SIVI

Table 17. SIVI index calculation

Variables	S	I	T	E	A	C	H	D	SIVI index
Calculated values	0.641	974.09	0.214	1.071	Unconfined	0.51	0.51	0.34	
Assigned values	3	2	2	1	3	2	3	0	0.61
Status	High	Moderate	Moderate	Moderate deterioration	High	High	High	Medium	High

غلظت یون کلرید در آب‌های زیرزمینی در طول سال، از این نظر منطقه در وضعیت آسیب‌پذیری "متوسط" قرار دارد. همچنین، نمایه E با مقدار ۱/۰۷۱ نشان‌دهنده قابلیت "زوال متوسط" منطقه از منظر بازگشت به حالت اولیه در برابر نفوذ آب دریا است. ویژگی‌های ذاتی منطقه نشان می‌دهند که این منطقه به دلیل ویژگی‌های آبخوان از جمله پایین بودن سطح آب زیرزمینی نسبت به تراز آب دریا، هدایت هیدرولیکی بالا و آزاد بودن آبخوان، پتانسیل ذاتی برای نفوذ آب شور دریا را دارد. با این حال، فاصله از خط ساحلی نسبتاً زیاد این محدوده تا حدودی آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب دریا را کاهش می‌دهد. مقدار آسیب‌پذیری کل آبخوان از ۰/۴۳ تا ۰/۹۲ متغیر است. ساحل شمالی و شمال غربی آسیب‌پذیرترین منطقه هستند در حالی که مناطق جنوبی تحت تأثیر نفوذ آب دریا نیستند.

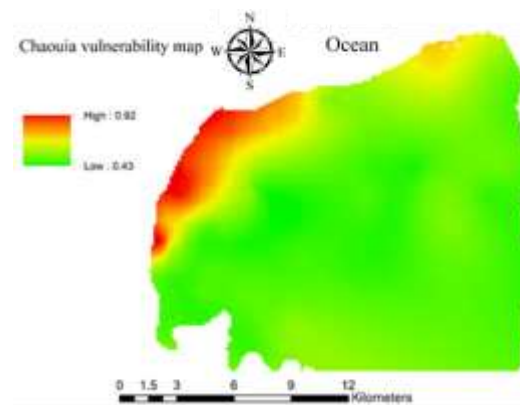
۳-۲- تحلیل حساسیت

نتایج روش کلی GSA نشان می‌دهد که متغیر E بیشترین اهمیت را دارد. در مقابل، نمایه‌های S و I کمترین اهمیت را داشته‌اند. خلاصه رتبه‌بندی حاصل از تحلیل حساسیت GSA در جدول (۱۸) نشان داده شده است.

همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد میزان شاخص SIVI تا ۱۵ درصد قابل تغییر است پس بازه تغییرات آن بین ۰/۵۲ تا ۰/۷ متغیر خواهد بود.

۳-۳- پیش‌بینی

در این پژوهش، برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب دریا، از مدل ARIMA استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف، با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته، متغیر E که دربرگیرنده غلظت یون کلر است برای مدلسازی انتخاب شد. غلظت یون کلرید برای سال ۲۰۱۱ بر اساس مقادیر ثبت شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برای هر چاه مشاهده‌ای پیش‌بینی شده و



شکل ۸. نقشه آسیب‌پذیری

Fig. 8. Vulnerability map

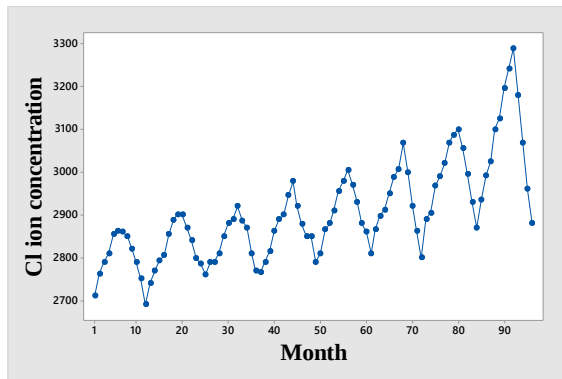
جدول ۱۷. رتبه‌بندی اهمیت هر متغیر در روش GSA

Table 18. Variable ranks in GSA method

Rank	Variable	GSA coefficient
1	E	4.82×10^{-3}
2	H	5.1×10^{-4}
3	D	4×10^{-4}
4	C	2.43×10^{-4}
5	T	1.4×10^{-4}
6	S	7.24×10^{-5}
7	I	4.41×10^{-5}

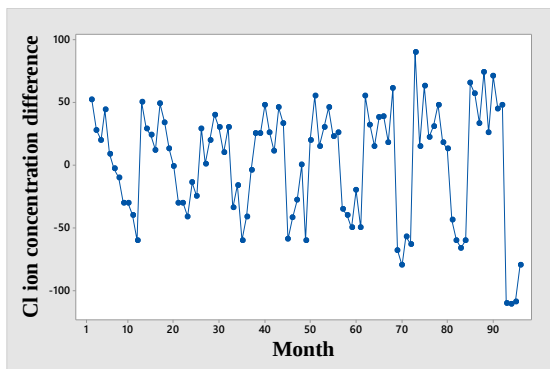
همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان شاخص SIVI حدود ۰/۶۱ به دست آمده که نشان می‌دهد آبخوان شایه از نظر آسیب‌پذیری در دسته‌بندی "زیاد" قرار می‌گیرد پس آسیب‌پذیری بالایی در برابر نفوذ آب شور دریا دارد. نمایه S با مقدار ۰/۶۴۱ در دسته‌بندی ارائه شده، وضعیت "زیاد" را دارد که نشان می‌دهد منطقه تحت تأثیر نفوذ گسترده و در معرض خطر گسترش آب شور است. نمایه شدت نفوذ (I) با مقدار ۹۷۳/۹۵ در دسته "متوسط" قرار دارد و نشان می‌دهد میزان نفوذ قبلی در منطقه وجود داشته است.

نمایه T با مقدار ۰/۲۱۴ نشان می‌دهد به دلیل تغییرات در



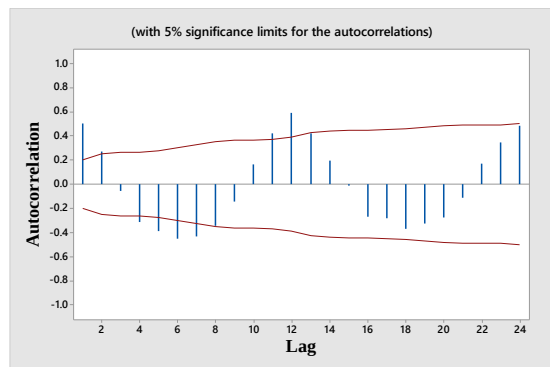
شکل ۹. سری زمانی ماهانه غلظت کلرید

Fig. 9. Cl concentration time series



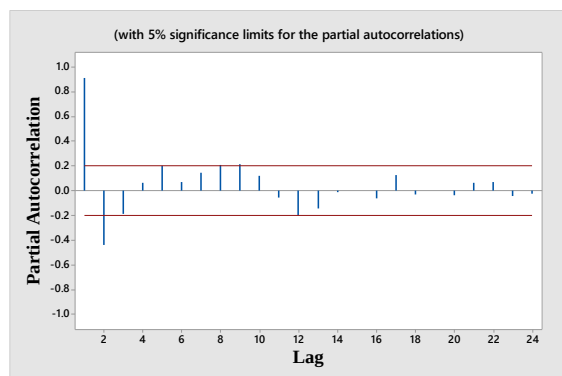
شکل ۱۰. اعمال یک گام تأخیر زمانی به سری زمانی غلظت کلر و تفاضل گیری برای بررسی ایستایی

Fig. 10. Applying a time lag to the Cl concentration time series and to check for stationarity



شکل ۱۱. تابع ACF برای سری زمانی غلظت کلر

Fig. 11. ACF function for Cl concentration time series



شکل ۱۲. تابع PACF برای سری زمانی غلظت کلر

Fig. 12. PACF function for Cl concentration time series

به وسیله آن شاخص SIVI برای بازه کوتاه مدت یک ساله ۲۰۱۱ محاسبه و پیش‌بینی شده است. در کل، میزان غلظت یون کلرید برای ۵۹ چاه مشاهده‌ای برای سال ۲۰۱۱ توسط مدل ARIMA پیش‌بینی و به منظور اعتبارسنجی نتایج، مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. در ادامه جزییات محاسبات برای چاه شماره ۲۱ (مشخص شده در شکل ۲) آورده شده و در انتها خلاصه نتایج برای هر ۵۹ چاه ارائه شده است. چاه شماره ۲۱ به دلیل قرارگیری در بخش آسیب‌پذیری شدید و نزدیکی زیاد به ساحل برای ارائه ریز محاسبات انتخاب شده است. مدل ARIMA دارای سه پارامتر p ، d و q است که به ترتیب مرتبه تأخیر، مرتبه تفاضل‌گیری و درجه میانگین متحرک هستند. برای محاسبه d ، ابتدا سری زمانی غلظت یون Cl در شکل ۹ رسم شده است. نقاط نمودار بیانگر غلظت یون کلرید در هر ماه هستند. این نقاط با خط به یکدیگر متصل شده‌اند تا روند افزایش یا کاهش سری زمانی به خوبی مشخص شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سری زمانی روند مثبتی (افزایشی) وجود دارد. این موضوع با آزمون من-کندال نیز تأیید می‌شود. براساس آزمون من-کندال میزان شاخص Z بیش از $3/5$ به دست آمده که بزرگتر از $1/96$ بوده و نشان‌دهنده روند مثبت در سری زمانی است (با فرض ۵ درصد خطا).

برای حذف روند، یک گام تأخیر زمانی اعمال و عمل تفاضل‌گیری انجام می‌شود. با این کار میزان شاخص Z به $-0/93$ تغییر می‌کند. با در نظر گرفتن فاصله اطمینان ۹۵ درصد، سری زمانی ایستا می‌شود و روند آن حذف می‌شود. این مورد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند مثبت از بین رفته و سری زمانی ایستا شده است. با توجه به این که با یک مرتبه تفاضل‌گیری سری زمانی ایستا شده پس پارامتر d برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

مطابق با روش استاندارد باکس و جنکینز، برآورد اولیه مرتبه p از روی نمودار PACF و مرتبه q از نمودار ACF تعیین می‌گردد. در نمودار ACF (شکل ۱۱)، الگوی کاهش تدریجی با یک مقدار معنی‌دار در مرتبه اول رخ داده است. این رفتار نشان می‌دهد $q=1$ می‌تواند برآورد اولیه مناسبی باشد. در نمودار PACF (شکل ۱۲)، از مرتبه سوم به بعد مقدار نمودار به طور ناگهانی درون محدوده اطمینان قرار می‌گیرد. پس $p=3$ در نظر گرفته شد.

۳-۳-۱- اعتبارسنجی مدل

شکل (۱۳) مقایسه بین غلظت یون کلرید مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل $ARIMA(3,1,1)$ را برای چاه مشاهده‌ای ۲۱ نشان می‌دهد. این چاه یکی از چاه‌های مشاهده شده است که غلظت یون کلرید در آن بالاتر از V_r بوده و نزدیک به خط ساحلی می‌باشد. میانگین خطای مطلق (MAE) و مقدار نش-سوتکلیف (NS) به ترتیب $36/42$ میلی‌گرم در لیتر و $0/89$ به دست آمد که مقادیر قابل قبولی می‌باشند. تفاضل داده‌های مشاهداتی و داده‌های برازش داده شده توسط مدل $ARIMA$ به داده‌های مشاهداتی به عنوان خطای باقی‌مانده معرفی می‌شود. توابع خطای باقی‌مانده و چگالی احتمال خطای باقیمانده به ترتیب در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نشان داده شده است.

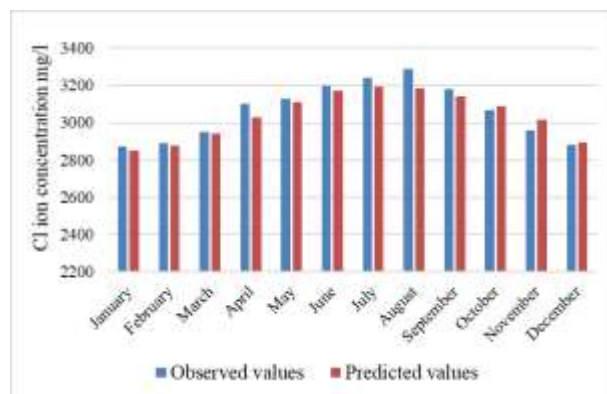
با توجه به مقادیر NS و MAE می‌توان نتیجه گرفت که مدل $ARIMA(3,1,1)$ به خوبی غلظت کلر را در چاه‌های مشاهداتی پیش‌بینی می‌نماید. فرآیند تشخیص بهترین مدل پیش‌بینی برای هر ۵۹ چاه مورد مطالعه اجرا شد. مدل‌های برگزیده برای هر چاه در جدول (۱۹) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است مدل $ARIMA(2,1,1)$ در بیشتر چاه‌ها به عنوان بهترین مدل انتخاب شده و بعد از آن مدل $ARIMA(1,1,1)$ مدل منتخب می‌باشد.

۳-۳-۲- پیش‌بینی آسیب‌پذیری

در ادامه، با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده غلظت یون کلر برای هر ۵۹ چاه مشاهداتی، نقشه ایزوکلرید جدید برای سال ۲۰۱۱ ترسیم و شاخص SIVI محاسبه و پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد مقدار شاخص SIVI از $0/61$ به $0/66$ افزایش یافته است (حدود ۸ درصد افزایش آسیب‌پذیری) که نشان می‌دهد مناطق بیشتری از سفره‌های زیرزمینی در حال تغییر وضعیت به سطح بالای آسیب‌پذیری هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی نفوذ آب شور دریا در سواحل از یک شاخص جدید استفاده شد که علاوه بر در نظرگیری ویژگی‌های فصلی و پویایی منطقه، ویژگی‌های ذاتی آبخوان از جمله نوع آبخوان و ضریب هدایت هیدرولیکی را لحاظ می‌کند. با توجه به این که متغیرهای به کار رفته در شاخص SIVI مستقل از منطقه مطالعاتی هستند، از این شاخص می‌توان در سایر



شکل ۱۲. مقایسه غلظت یون کلرید پیش‌بینی شده توسط مدل $ARIMA(3,1,1)$ و مشاهداتی در چاه ۲۱ برای سال ۲۰۱۱

Fig. 13. Comparison of Cl concentrations predicted by the $ARIMA(3,1,1)$ and observations in Well #21 for 2011



شکل ۱۳. تابع خطای باقیمانده داده‌های برازش داده شده توسط مدل $ARIMA$

Fig. 14. Residual error function of data fitted by $ARIMA$ model



شکل ۱۴. تابع چگالی احتمال خطای باقیمانده داده‌های برازش داده شده توسط مدل $ARIMA$

Fig. 15. Probability density function of the error of the data fitted by the $ARIMA$ model

بعد از برآورد اولیه هر سه پارامتر p ، d و q برای بررسی کفایت پارامترهای مدل از آزمون AIC استفاده شد. بر اساس این معیار، مقادیر مختلف p و q برای شبیه‌سازی مدل‌های مختلف در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که مدل $ARIMA(3,1,1)$ بهترین مدل پیش‌بینی غلظت یون کلرید در چاه شماره ۲۱ است به طوری که کمترین میزان AIC و بیشترین مقدار NS را داشت.

جدول ۱۸. مدل ARIMA نهایی برای همه چاه‌های مشاهداتی

Table 19. Final ARIMA model for all wells

Well	ARIMA	NS	MAE	NRMSE	Well	ARIMA	NS	MAE	NRMSE	Well	ARIMA	NS	MAE	NRMSE
1	(2,1,1)	0.91	18	0.09	21	(3,1,1)	0.89	20	0.11	41	(1,1,1)	0.85	26	0.14
2	(2,1,1)	0.85	26	0.14	22	(1,1,1)	0.83	27	0.15	42	(2,1,1)	0.9	19	0.10
3	(1,1,1)	0.79	32	0.18	23	(1,2,1)	0.77	35	0.21	43	(1,0,1)	0.76	35	0.21
4	(1,1,1)	0.82	28	0.16	24	(1,2,1)	0.76	35	0.21	44	(2,1,2)	0.78	33	0.18
5	(1,1,1)	0.81	29	0.16	25	(2,1,2)	0.75	36	0.20	45	(2,1,1)	0.89	20	0.11
6	(2,1,1)	0.86	24	0.13	26	(2,1,1)	0.86	24	0.13	46	(3,1,1)	0.86	24	0.13
7	(1,1,1)	0.77	34	0.19	27	(1,1,1)	0.83	27	0.15	47	(1,2,1)	0.79	32	0.18
8	(2,2,1)	0.75	36	0.20	28	(3,1,1)	0.81	29	0.16	48	(2,2,1)	0.75	36	0.20
9	(3,1,1)	0.85	26	0.14	29	(2,1,2)	0.82	28	0.16	49	(1,1,1)	0.86	24	0.13
10	(1,1,1)	0.86	24	0.13	30	(1,1,1)	0.84	27	0.15	50	(2,1,1)	0.89	20	0.11
11	(3,1,1)	0.88	22	0.12	31	(1,2,1)	0.78	33	0.18	51	(1,1,1)	0.86	24	0.13
12	(2,1,2)	0.68	42	0.28	32	(2,1,1)	0.83	27	0.15	52	(1,1,1)	0.87	23	0.12
13	(2,2,1)	0.75	36	0.20	33	(1,1,1)	0.88	22	0.12	53	(2,2,1)	0.79	32	0.18
14	(2,1,1)	0.89	20	0.11	34	(2,1,1)	0.89	20	0.11	54	(2,1,1)	0.88	22	0.12
15	(1,1,1)	0.9	19	0.10	35	(1,0,1)	0.65	45	0.32	55	(3,1,1)	0.88	22	0.12
16	(2,1,2)	0.75	36	0.20	36	(1,0,1)	0.71	40	0.26	56	(2,2,1)	0.89	20	0.11
17	(3,1,1)	0.86	24	0.13	37	(2,1,2)	0.75	36	0.20	57	(2,1,1)	0.91	18	0.09
18	(2,1,2)	0.85	26	0.14	38	(2,1,1)	0.81	29	0.16	58	(2,1,1)	0.85	26	0.14
19	(1,1,1)	0.89	20	0.11	39	(1,1,1)	0.86	24	0.13	59	(1,1,1)	0.86	24	0.13
20	(2,2,1)	0.77	34	0.19	40	(2,1,1)	0.89	20	0.11					

پی‌نوشت‌ها

SIVI: Seawater Intrusion Vulnerability Index

ARIMA: Autoregressive Integrated Moving Average

GALDIT: Groundwater occurrence, Aquifer hydraulic conductivity, height of groundwater Level of above sea level, Distance from shoreline, Impact of present status of seawater intrusion, Thickness of aquifer

WQI: Water Quality Index

ANN: Artificial Neural Network

ML: Machine Learning

PACF: Partial Auto Correlation Function

SVM: Support Vector Machine

MLP: Multi Layer Perception

AR: Auto Regressive

GSA: Global Sensitivity Analysis

OAT: One factor At a Time

AIC: Akaike Information Criterion

NS: Nash Sutcliffe

MAE: Mean Absolute Error

ACF: Auto Correlation Function

NRMSE: Normalized Root Mean Square Error

آبخوان‌های ساحلی نیز استفاده نمود. برای بررسی کاربرد آن، این شاخص روی آبخوان ساحلی شایه اعمال شد. نتایج نشان داد شاخص SIVI قابلیت بالایی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر دارد. در انتها مدل‌سازی سری زمانی برای پیش‌بینی نشان داد مدل $ARIMA(2,1,1)$ بهترین مدل برای پیش‌بینی غلظت یون کلر در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های خودهمبسته با میانگین خطای مطلق ۲۵ میلی گرم در لیتر و ضریب نش-ساتکلیف بالای ۰.۸۵، برای بیشتر چاه‌ها عملکرد بسیار مناسبی در پیش‌بینی کوتاه مدت غلظت یون کلر و به تبع آن شاخص SIVI در آبخوان‌های ساحلی دارد. بنابراین مدل ARIMA می‌تواند به عنوان یک ابزار کم هزینه، در دسترس و با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی کوتاه مدت روند نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی قرار گیرد. برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود (۱) کارکرد مدل‌های سری زمانی با مدل‌های ماشین لرنینگ مقایسه و کارایی آنها ارزیابی شود و (۲) از شاخص پیشنهادی و مدل ARIMA در آبخوان‌های ساحلی ایران استفاده شود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی عزیزانی که ما را در راستای انجام این پژوهش یاری رساندند و به ویژه داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافعی برای نویسنده این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

نقش نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

در انجام این پژوهش، از هیچ منبع مالی کمک گرفته نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

- [1] Lobo-Ferreira, J.P., Chachadi, A.G., Diamantino, C. and Henriques, M.J., 2005. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 application to the Portuguese aquifer of Monte Gordo. *Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrogeology and Management of Water Resources*, Portugal, 11–14 July 2005, CD of Proceedings.
- [2] Kim, I.H., Chung, I.-M. and Chang, S.W., 2021. Development of seawater intrusion vulnerability assessment for averaged seasonality of using modified GALDIT method. *Water*, 13(13), p.1820. doi: 10.3390/w13131820
- [3] Chandrajith, R., Bandara, U.G.C., Diyabalanage, S., Senaratne, S. and Barth, J.A., 2022. Application of Water Quality Index as a vulnerability indicator to determine seawater intrusion in unconsolidated sedimentary aquifers in a tropical coastal region of Sri Lanka. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100831. doi: 10.1016/j.gsd.2022.100831.
- [4] Imaz-Lamadrid, M.A., Wurl, J., Ramos-Velázquez, E. and Gutiérrez-González, M.V.G., 2023. SWIVI: A climate change-oriented multi-parametric framework to enhance saltwater intrusion vulnerability assessment. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 101027. doi: 10.1016/j.gsd.2023.101027.
- [5] Gatdula, N. and Blanco, A., 2024. Assessment of the vulnerability of coastal agriculture to seawater intrusion using remote sensing, GIS, and Multi-Criteria Decision Analysis. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2367733. doi: 10.1080/17538947.2024.2367733.
- [6] Zhang, L. and Xin, F., 2016. Prediction model of river water quality time series based on ARIMA model. In: *Geo-informatics in Sustainable Ecosystem and Society*, pp.127–133. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-7025-0_13.
- [7] Guo, B., Zhang, S., Liu, K., Yang, P., Xing, H., Feng, Q., Zhu, W., Zhang, Y. and Jia, W., 2023. Prediction of groundwater level under the influence of groundwater exploitation using a data-driven method with the combination of time series analysis and long short-term memory: a case study of a coastal aquifer in Rizhao City, Northern China. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1253949. doi: 10.3389/fenvs.2023.1253949.
- [8] BinMakhashen, G.M. and Benaafi, M., 2024. Predicting seawater intrusion in coastal areas using machine learning: A case study of arid coastal aquifers, Saudi Arabia. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101300. doi: 10.1016/j.gsd.2024.101300.
- [9] Thai, T.T., Liem, N.D., Luu, P.T., Yen, N.T.M., Yen, T.T.H., Quang, N.X., Van Tan, L. and Hoai, P.N., 2022. Performance evaluation of Auto-Regressive Integrated Moving Average models for forecasting saltwater intrusion into Mekong river estuaries of Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(1), pp.18–32. doi: 10.15625/2615-9783/16440.
- [10] Younsi, A., Mania, J., Lhadi, E.K. and Mudry, J., 2001. Incidences de pluies exceptionnelles sur un aquifère libre côtier en zone semi-aride (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 14(2), pp.115–130. doi: 10.7202/705412ar.
- [11] Najib, S., Fadili, A., Mehdi, K., Riss, J. and Makan, A., 2017. Contribution of hydrochemical and geoelectrical approaches to investigate salinization process and seawater intrusion in the coastal aquifers of Chaouia, Morocco. *Journal of Contaminant Hydrology*, 198, pp.24–36. doi: 10.1016/j.jconhyd.2017.01.003.
- [12] Zeynolabedin, A. and Ghiassi, R., 2019. The SIVI index: a comprehensive approach for investigating seawater intrusion vulnerability for island and coastal aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 78(24), p.666. doi: 10.1007/s12665-019-8651-z.
- [13] Ballesteros, B.J., Morell, I., García-Menéndez, O. and Renau-Pruñonosa, A., 2016. A standardized index for assessing seawater intrusion in coastal aquifers: the SITE index. *Water Resources Management*, 30(13), pp.4513–4527. doi: 10.1007/s11269-016-1433-4.
- [14] Chachadi, A.G., 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model: a case study

- in Goa. *Jalvigyan Sameeksha*, 20, pp.29–45.
- [15] Sobol, I.M., 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1–3), pp.271–280. doi: [10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- [16] Tang, Y., Reed, P., Wagener, T. and van Werkhoven, K., 2007. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), pp.793–817. doi: [10.5194/hess-11-793-2007](https://doi.org/10.5194/hess-11-793-2007).
- [17] Saltelli, A., 2002. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, 145(2), pp.280–297. doi: [10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1).
- [18] Box, G.E. and Jenkins, G.M., 1976. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, CA: Holden-Day.
- [19] Mishra, A.K. and Desai, V.R., 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), pp.326–339. doi: [10.1007/s00477-005-0238-4](https://doi.org/10.1007/s00477-005-0238-4).
- [20] Zeynolabedin, A., Ghiassi, R. and Dolatshahi Pirooz, M., 2021. Seawater intrusion vulnerability evaluation and prediction: a case study of Qeshm Island, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1), pp.265–277. doi: [10.2166/wcc.2020.220](https://doi.org/10.2166/wcc.2020.220).
- [21] Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th ed. London: Charles Griffin.
- [22] Pearson, K., 1895. VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), pp.240–242.
- [23] Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), pp.716–723. doi: [10.1109/TAC.1974.1100705](https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Zeynolabedin, A. and Sharghi, S., 2027. Evaluating the efficiency of autoregressive models in predicting the vulnerability of coastal aquifers to seawater intrusion. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.67-83



Extension of Classical PFI theory for Bending Behavior in Special Steel Plate Shear Walls using Nonlinear Analyses for Different Steel Grades

MohammadHossein OjaqpourMalki¹; Farnoosh Basaligheh^{2*} , Parviz Ebadi³

1. PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
3. Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Shahr-e-Ghods Branch, Shahr-e-Ghods, Iran.

Abstract

Steel Plate Shear Walls (SPSWs) have emerged as one of the most efficient and dependable lateral force-resisting systems in contemporary earthquake engineering. Their notable post-yield stability, high initial and cyclic stiffness, and exceptional capacity for hysteretic energy dissipation distinguish them from many conventional structural systems, making them especially attractive for deployment in regions characterized by elevated seismic hazard. Since their introduction into modern structural design practice in the early 1970s, SPSWs have witnessed a steady rise in application, particularly in mid- and high-rise buildings where rigorous performance objectives and stringent serviceability requirements demand structural mechanisms that exhibit both robustness and predictability under extreme loading conditions. In this study, an extensive analytical and numerical investigation is undertaken to evaluate the seismic performance of Special Steel Plate Shear Walls (SSPSWs) across a diverse range of structural heights, including 1, 3, 5, 8, 10, 15, 18, 20, and 30-story configurations. Each model is developed within the framework of performance-based seismic design, enabling a direct assessment of system behavior under varying levels of seismic demand. Two steel grades—conventional structural steel and low-grade steel (LGS)—are incorporated to explore the extent to which material strength and ductility influence both global system response and localized behavioral phenomena such as yielding patterns, shear band formation, and boundary-frame interaction. A suite of nonlinear static and dynamic analyses is performed to capture the evolution of inelastic deformation, progression of local and global damage, stiffness degradation trajectories, and cumulative energy dissipation mechanisms. Complementing these numerical simulations, the classical Plastic Flexural Interaction (PFI) theory is adopted to analytically characterize the flexural response of the SPSW systems. A systematic comparison between analytical predictions and detailed numerical results is conducted to evaluate the applicability, accuracy, and inherent limitations of the PFI framework when extended to steel grades with varying mechanical properties. This integrated analytical-numerical methodology provides a comprehensive perspective on the interplay between material nonlinearity, geometric effects, and system-level seismic behavior. The findings of this research clearly demonstrate that the application of LGS steel significantly enhances the overall seismic performance of SPSWs. Notable improvements include meaningful reductions in lateral displacement demands, increased initial and post-yield stiffness, substantial gains in load-bearing and lateral resistance capacity, and more uniform distribution of inelastic deformation throughout the wall height. The enhanced ductility and reduced yield strength associated with LGS steel facilitate earlier activation of energy-dissipating mechanisms, delay the onset of local or global instabilities, and ultimately contribute to a measurable enhancement in collapse-prevention capacity. Additionally, reductions in performance-point displacements and global seismic demand highlight the potential of LGS steel as a viable and advantageous alternative to conventional grades in high-performance seismic applications. Building on these observations, the study proposes an extended formulation of the PFI theory that more accurately captures the flexural response of SPSWs across steel grades of differing strengths. This refined model enables practical prediction of critical response parameters without relying on computationally intensive simulations, thus offering a valuable tool for preliminary design, rapid assessment, and performance-oriented decision-making. Collectively, the outcomes of this research advance current understanding of SPSW behavior, particularly with regard to material-dependent response mechanisms, and provide a strong foundation for future refinement of design provisions and next-generation seismic standards incorporating low-grade steel systems.

Review History

Received: Dec 7, 2025
Revised: March 18, 2026
Accepted: June 3, 2026

Keywords

Special steel shear wall
mild steel
classical PFI theory
bending behavior
height increase

* Corresponding Author Email: f_basaligheh@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6967-5290



بسط تئوری کلاسیک PFI برای رفتار خمشی در دیوارهای برشی فولادی ویژه با تحلیل‌های غیرخطی برای فولادهای با رده مقاومتی مختلف

محمدحسین اوجاقپورملکی^۱، فرنوش باسلیقه^{۲*} ID، پرویزعبادی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
۳. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، شهرقدس، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دیوارهای برشی فولادی (SPSW) به عنوان سیستم کارآمد در مقاومت جانبی سازه‌ها، طی دهه‌های اخیر جایگاهی ویژه در مهندسی زلزله یافته‌اند. این سیستم‌ها با برخورداری از سختی اولیه بالا، پایداری مناسب پس از تسلیم و ظرفیت چشمگیر در اتلاف انرژی، گزینه‌ای قابل اعتماد برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه محسوب می‌شوند. توسعه کاربرد SPSW از دهه ۱۹۷۰ تاکنون، به ویژه در مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد، نتیجه نیاز روزافزون به سیستم‌هایی است که عملکردی مطمئن و قابل پیش‌بینی فراهم سازند. در این پژوهش، مجموعه‌ای از دیوارهای برشی فولادی ویژه در ارتفاع‌های مختلف، در چارچوب طراحی مبتنی بر عملکرد مدل‌سازی و تحت تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و تاریخچه زمانی ارزیابی شده‌اند. به منظور بررسی نقش ویژگی‌های مصالح، دو نوع فولاد شامل فولاد ساختمانی متداول و فولاد کم‌مقاومت (LGS) در مدل‌ها به کار گرفته شد. نتایج تحلیل‌ها امکان شناخت دقیق رفتار غیرالاستیک، الگوی توزیع تغییرشکل‌ها، افت سختی و ظرفیت اتلاف انرژی را فراهم ساخت. هم‌زمان، نظریه برهم‌کنش خمشی پلاستیک (PFI) برای تبیین رفتار خمشی سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفت و با نتایج عددی مقایسه شد. استفاده از فولاد LGS موجب کاهش جابه‌جایی‌ها، بهبود سختی مؤثر، ارتقای ظرفیت باربری و توزیع مطلوب‌تر تغییرشکل‌های غیرخطی می‌شود. همچنین، این فولاد با تأخیر در بروز ناپایداری و کاهش احتمال فروریزش، عملکرد لرزه‌ای کل سامانه را ارتقا می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، نسخه‌ای اصلاح‌شده از نظریه PFI پیشنهاد می‌شود که قادر است رفتار خمشی SPSW را با دقت مناسب و بدون نیاز به تحلیل‌های عددی پیچیده پیش‌بینی کند؛ موضوعی که می‌تواند در توسعه آیین‌نامه‌های لرزه‌ای آینده مؤثر باشد.

کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی ویژه
فولاد نرم
تئوری کلاسیک PFI
رفتار خمشی
افزایش ارتفاع

۱- مقدمه

عملکرد و ایمنی ساختمان در برابر زلزله انجام شده است. عوامل مؤثر در انتخاب سیستم مقاوم در برابر بار جانبی شامل هندسه سازه، مقدار بارهای جانبی، چگونگی رفتار سازه، محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، میزان تغییرمکان، محدودیت‌های معماری و مسائل

از مهم‌ترین پارامترهای مربوط به طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌توان به تغییرشکل‌های جانبی ساختمان اشاره نمود، به همین منظور در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در راستای افزایش

* رایانامه نویسنده مسئول: f_basaligheh@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6967-5290

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



اقتصادی می باشد [1].

با مطالعات صورت گرفته روی زلزله های گوناگونی مانند زلزله نورتریج و زلزله کوبه رفتار دیوار برشی فولادی در برابر بارهای جانبی زیاد، مناسب بوده باتوجه به مطالعات پیشین رفتار دیوار برشی فولادی در برابر بارهای جانبی زیاد، مناسب بوده و ظرفیت دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با خطرانی مانند زلزله، طوفان و انفجار (نیروهای جانبی) در مقایسه با سایر سیستم های مقاوم مانند قاب های خمشی ویژه، حداقل ۲۵٪ بیشتر می باشد. همچنین از مزایای این سیستم می توان به اجرای آسان، وزن کم نسبت به سیستم های مشابه، اقتصادی بودن، شکل پذیری زیاد، نصب سریع و جذب انرژی بالا اشاره کرد [1].

اثر استفاده از فولاد با رده پایین بر رفتار و پارامترهای لرزه ای سیستم دیوار برشی فولادی با طراحی مدل هایی با تعداد طبقات مختلف و استفاده از رده های مختلف فولاد، در نظر گرفتن شیب سختی ثانویه فولاد و استفاده از تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش با استفاده از ۲۷ مدل، نمونه ها تحت تحلیل غیرخطی قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر آن است که برای بهبود رفتار لرزه ای، کاهش نیروی وارد به المان های مرزی، افزایش سختی سیستم و کاهش جابه جایی های نمونه ها، نیاز به استفاده از فولاد با مقاومت پایین می باشد.

مزایای استفاده از فولاد با رده مقاومتی پایین به عنوان جایگزین فولاد ساختمانی شامل بهبود پایداری کلی، افزایش شکل پذیری، افزایش سختی و جذب انرژی بالاتر می باشد که به همین علت بررسی های بیشتری روی رفتار سازه ای ساختمان های طراحی شده با استفاده از فولاد نرم، شکل پذیری و جذب انرژی آن در حال انجام است.

فولاد با رده مقاومتی پایین (نرم) در سیستم دیوار برشی فولادی ویژه، به دلیل تنش تسلیم کمتر نسبت به قاب فولادی خود در برابر بارهای جانبی و لرزه ای زودتر تسلیم شده و وارد ناحیه پلاستیک می شود. این رفتار موجب افزایش جذب انرژی و در نتیجه کاهش قابل توجه نیروهای وارد بر المان های مرزی (تیر و ستون) دارای این سیستم می باشد. علاوه بر بررسی رفتار خمشی سازه های بلند مرتبه دارای سیستم دیوار برشی فولادی ویژه و بسط تئوری کلاسیک PFI آن، یکی دیگر از اهداف این پژوهش استفاده

از فولاد با رده مقاومتی پایین (نرم) که فولادی با درصد کربن و آلیاژهای دیگر پایین بوده و تنش حد جاری شدن اسمی آن برابر است با ۹۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال می باشد.

هدف از انجام این پژوهش موارد زیر می باشد:

- بررسی اثر استفاده از فولاد با رده پایین تر روی پارامترهای برش پایه، سختی، جابه جایی، میرایی، ضریب شکل پذیری و ضریب رفتار
 - بررسی روش طراحی دیوارهای برشی فولادی بیان شده در آیین نامه آمریکا
 - بررسی اثر شیب سختی ثانویه فولاد روی برش پایه و جابه جایی
 - بررسی رفتار خمشی در دیوارهای برشی فولادی ویژه در ساختمان های بلند مرتبه
- رفتار خمشی ساختمان های با سیستم دیوار برشی فولادی ویژه که با استفاده از فولاد نرم و فولاد معمولی طراحی شده است، با استفاده از آنالیز استاتیکی و دینامیکی بررسی شده و پارامترهای لرزه ای آن با یکدیگر مورد قیاس قرار گرفته است.
- در این مقاله سعی بر آن شده است که تئوری کلاسیک کاربرد فولاد با رده مقاومتی مختلف در طراحی رفتار خمشی سیستم دیوار برشی فولادی ویژه با گرایش و اتکا بر منحنی های نیاز و تقاضا و با استفاده از روابط تئوری و کلاسیک توسعه داده شود. به همین منظور ساختمان هایی با ارتفاعات مختلف و سیستم دیوار برشی فولادی ویژه با استفاده از فولاد با رده های مختلف طراحی می شوند تا با انجام تحلیل های غیرخطی روی نمونه های مدل سازی شده، زمان اعمال خمش بر رفتار سیستم دیوار برشی فولادی ویژه مشخص شده و میزان و رفتار آن با استفاده از بسط تئوری کلاسیک موجود قابل پیش بینی شود. همچنین با استفاده از نرم افزار تحلیلی SeismoStruct و تحلیل های غیرخطی، منحنی های تقاضا به دست می آید که می توان آن ها را با تئوری کلاسیک PFI بیان شده (موجود) مقایسه کرد و پارامترهای لرزه ای سیستم های طراحی شده با فولاد با رده های مختلف را به همراه نقش خمش در این رفتار با یکدیگر مورد قیاس قرار داد. سپس با توسعه این تئوری و اعمال خمش حاصل از ارتفاع در سازه، تئوری کلاسیک کاملی برای پیش بینی رفتار سازه بدون نیاز به مدل سازی آن ارائه شود.

با انجام مطالعه بر تحقیقات پیشین می‌توان گفت تاکاهاشی و همکاران وی (۱۹۷۳) [2] و میومورا به همراه آکیاما (۱۹۷۷) [3] جزو اولین افرادی بودند که روی سیستم دیوار برشی فولادی مطالعاتی را انجام دادند. تاکاهاشی تعداد دو نمونه ۲ طبقه با ابعاد واقعی که یکی از آن‌ها دارای بازشو با ورق ۶ میلی‌متر و دیگری فاقد بازشو و با ورق ۴/۵ میلی‌متر وجود داشت، برای بررسی عملکرد طراحی‌های انجام‌شده در ساختمان‌های بلندمرتبه مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاصل از مقاومت برشی نمونه‌های مورد آزمایش با معیار فون میزس هماهنگی خوبی داشتند. این نتایج بیانگر آن است که روابط مرسوم برای بررسی رفتار تیر ورق‌ها می‌تواند برای محاسبه مقاومت سخت‌کننده‌ها و سختی سیستم دیوار برشی فولادی استفاده شود.

تحلیل‌های صورت گرفته روی دو مدل توسط توربرن و همکاران در سال ۱۹۸۳ [4] بیانگر آن است که ورق‌های نازک بدون سخت‌شونده، در برابر بارهای جانبی با تشکیل میدان کششی قطری، مقاومت می‌کنند. آن‌ها تحقیقات خود را روی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق‌های نازک متمرکز کرده و برای انجام آزمایش‌هایی برای محاسبه ظرفیت نهایی مدل‌ها، یکسری میله‌های نازک مورب را به عنوان جایگزین صفحه‌ی نازک جان معرفی نمودند. این پژوهشگران مدل نواری را به منظور طراحی دیوار برشی فولادی ارائه کرده که به عنوان ضمیمه آیین‌نامه ملی ساختمان کانادا پذیرفته شده است. با بررسی مقاومت، شکل‌پذیری و رفتار هیستریزس سیستم دیوار برشی فولادی توسط تیملر و کولاک در سال ۱۹۸۳ [5]، قابلیت جذب انرژی چشمگیر آن‌ها و همچنین مزایای اقتصادی منحصربه‌فرد در آن‌ها تعیین می‌شود.

آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای انجمن استانداردهای کانادا (CAN/CSA S16 01)، اولین آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای بود که سیستم دیوار برشی فولادی را به عنوان یک سیستم برابر جانبی پذیرفت. در این آیین‌نامه سیستم دیوار برشی فولادی به این صورت است که ابتدا بر طبق روش‌های متداول، نیروهای افقی زلزله در ارتفاع ساختمان توزیع می‌شوند و سپس به‌جای هر صفحه‌ی فولادی، یک مهاربند معادل در نظر گرفته می‌شود [6].

در سال ۱۹۸۷ رفتار دیوارهای برشی در برابر بارهای سیکلیک توسط ترومپوچ و کولاک مورد مطالعه قرار گرفت که در آن، این سیستم از خود پایداری و جذب انرژی بالایی نشان می‌دهد [7].

صبوری و رابرتز در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ مطالعاتی روی اثر بازشو و موقعیت بازشو در مقاومت و سختی سیستم دیوار برشی فولادی انجام دادند که نتیجه آن ارائه تئوری اندرکنش قاب-ورق (PFI) بود [8-9]. در سال ۱۹۹۳ گکسیس و همکاران نیز مطالعاتی را روی آثار لاغری پانل‌ها و نوع اتصالات تیر به ستون انجام دادند که بیانگر آن است که اتصالات گیردار و ساده‌ی تیر به ستون، اثر ناچیزی در رفتار سیستم دارند [10-11].

لویل و همکاران تحقیقاتی روی اثر استفاده از تیر فوقانی با مقاومت بالا در سیستم دیوار برشی فولادی را در سال ۲۰۰۰ انجام دادند که در آن به تأثیر بالای تیر فوقانی در مقاومت نهایی سیستم اشاره شده است [12].

برونو و برمن نیز با تعیین ظرفیت برشی نهایی سیستم دیوار برشی فولادی برای دو نوع اتصال ساده و گیردار تیر به ستون در سال ۲۰۰۳ مدل میله‌ای معادل را کامل‌تر نمودند [13].

تحقیقاتی روی تأثیر استفاده از فولاد نرم به جای فولاد ساختمانی در سال ۲۰۱۵ توسط زیرکیان و ژانگ تحقیقاتی صورت پذیرفت که کنترل جابه‌جایی و بهبود سختی سیستم از مهم‌ترین نتایج این مطالعات بودند [14].

برای پیش‌بینی رفتار سازه تحت نیروهای جانبی ناشی از زلزله با استفاده از آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی، با اطمینان قابل‌قبولی به اطلاعات زمین‌لرزه نیاز است تا بیانگر ویژگی‌های لرزه‌ای متفاوت شامل دامنه، محتوای فرکانسی، مدت دوام و غیره باشد. بنابراین آنالیز مذکور پیچیده، زمان‌بر و در بیشتر موارد غیرعملی است. برای رفع این محدودیت‌ها لازم است یک روش ارزیابی فراهم شود که نسبتاً ساده ولی بیانگر ویژگی‌های اصلی زمین‌لرزه و سایر سازه باید.

تحلیل استاتیکی افزایشی غیرخطی (PUSH-OVER) روشی برای تعیین اضافه مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌ها می‌باشد. در این روش نیروی جانبی زلزله، توسط نیروی استاتیکی که به طبقات ساختمان اثر می‌کند، شبیه‌سازی می‌شود. این نیروها آن‌قدر افزایش می‌یابند تا به بار نهایی یا تغییر مکان نهایی که از قبل مشخص است، برسند. در این حالت رفتار و عملکرد سازه قابل ارزیابی می‌باشد.

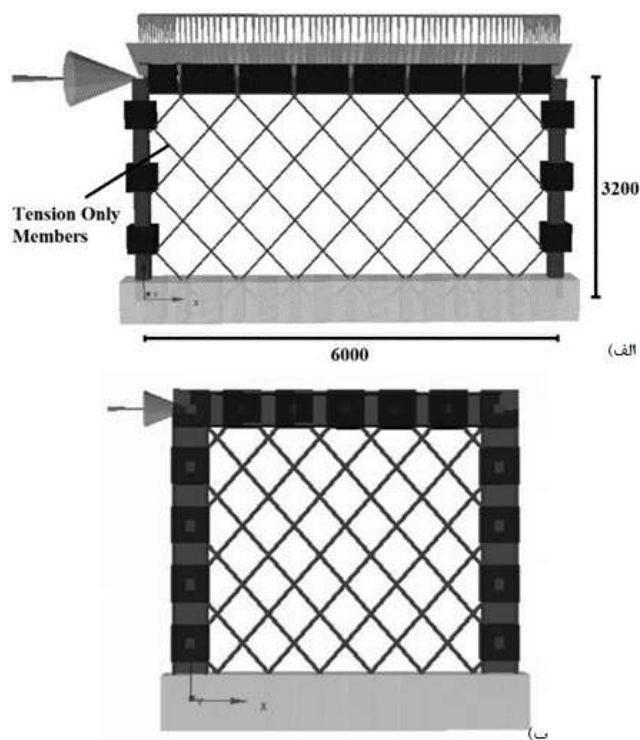
۲- مدل سازی نرم افزاری نمونه ها

در این پژوهش برای مدل سازی نمونه ها از نرم افزار تحلیلی SEISMOSTRUCT استفاده شده است. برای مدل سازی سیستم دیوار برشی فولادی در این نرم افزار، از روش میله های معادل استفاده شده است. آیین نامه های مختلف، حداقل تعداد میله های معادل را برابر ۱۰ عدد در نظر گرفته اند. برای معادل سازی میله ها به عنوان جایگزین ورق دیوار برشی فولادی، ورق را در راستای زاویه میدان کشش به تعداد مورد نظر تقسیم و به اندازه سطح مقطع هر قسمت، میله ای با همان سطح مقطع قرار داده شده است. به منظور آنکه میله های معادل سازی شده فقط نیروی کششی را تحمل نمایند، در انتهای هر میله المان لینکی با رفتار فقط کششی تعریف شده است. نمونه ای از مدل سازی قاب SPSW-SS1 در نرم افزار SEISMOSTRUCT در شکل (۱ الف) ستون و ستون به فونداسیون گیردار می باشد.

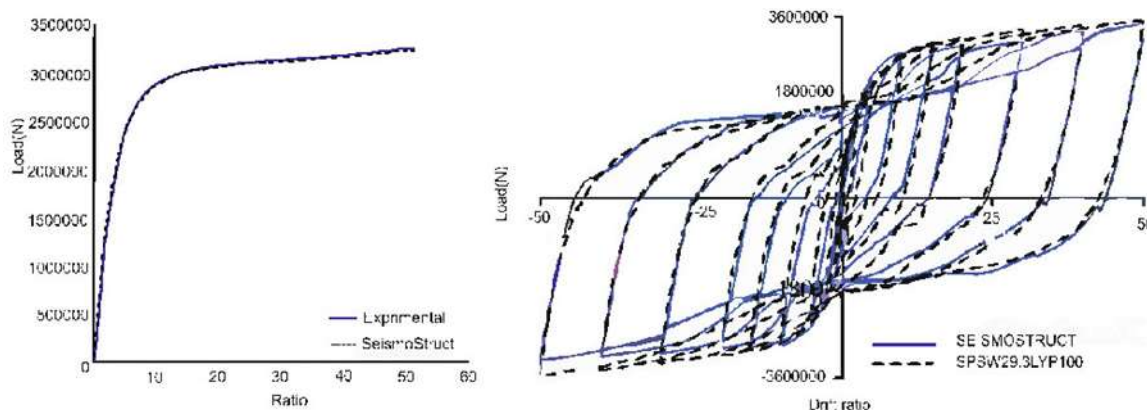
نمونه های مورد بررسی توسط این محققان شامل نمونه های ۱ طبقه با دهانه های مختلف و ضخامت های مختلف ورق می باشد. نمونه انتخاب شده برای درستی آزمایشی نرم افزار دارای ورق با ابعاد $3000 \times 3000 \times 4/7$ میلی متر و اعضای مرزی قائم (ستون) دارای مقطع $W14 \times 132$ و عضو مرزی افقی (تیر) دارای مقطع $W14 \times 120$ می باشند. اعضای مرزی به کار رفته در این آزمایش از فولاد A572 با تنش تسلیم 50000 Psi (معادل ۳۴۴ نیوتن بر میلی متر مربع) و ورق به کار رفته از فولاد A36 با تنش تسلیم 36000 Psi (معادل ۲۴۸ نیوتن بر میلی متر مربع) می باشند. همچنین نرم افزار استفاده شده در این تحقیق، انسیس می باشد [15].

۲-۱- درستی سنجش نرم افزار

به منظور درستی آزمایشی مدل سازی نمونه سیستم دیوار برشی فولادی در نرم افزار، نتایج مقاله تاده زیرکیان و جیان ژانگ [15] برای درستی آزمایشی آنالیز پوش اور و هیستریزس استفاده شده است. نمونه مدل سازی شده برای درستی آزمایشی نمونه زیرکیان در شکل (۱ ب) مشاهده می شود. نتایج آنالیز پوش اور و هیستریزس روی این نمونه در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۱. الف) مدل سازی نمونه ی SPSW-SS1 در نرم افزار SEISMOSTRUCT ب) نمونه ی مدل سازی شده در نرم افزار SEISMOSTRUCT



شکل ۲. مقایسه نتایج تحقیقاتی و نرم افزار آنالیزهای پوش اور و هیستریزس

Fig. 2. Comparison of research results and software for pushover and hysteresis analyses

غیرخطی، نمودار برش پایه در مقابل تغییرشکل (معمولاً تغییر مکان بام) می‌باشد که منحنی ظرفیت سازه نامیده می‌شود. این منحنی، ظرفیت سازه را به نمایش می‌گذارد و بیانگر اطلاعات مهمی از قبیل سختی الاستیک اولیه، اولین جاری شدن، زوال سختی و مقاومت نهایی می‌باشد. بنابراین با استفاده از این نمودار نقاط ضعف و ویژگی‌های نامطلوب سازه مانند طبقه نرم، ناپیوستگی‌های سختی و مقاومت را می‌توان محاسبه نمود [18].

۲-۳- توزیع بار جانبی

چگونگی توزیع بار جانبی به کار رفته در آنالیز استاتیکی افزایشی خطی می‌تواند بر درستی نتایج تأثیر بگذارد، در حقیقت این توزیع باید بیانگر توزیع نیروی ناشی از زلزله باشد که باعث شدیدترین پاسخ‌ها در سازه می‌شود. به طور کلی دو نوع توزیع بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. توزیع بار ثابت و توزیع بار متغیر [19].

۳-۳- توزیع بار ثابت

در این حالت، توزیع بار از پیش تعیین شده در حین آنالیز استاتیکی افزایشی غیرخطی بدون تغییر باقی می‌ماند. تعدادی از توزیع‌های ثابت مورد استفاده عبارتند از:

- نیروی افقی متمرکز منفرد در بالاترین طبقه
- توزیع بار یکنواخت در تمام طبقات
- توزیع بار مثلثی مطابق پیشنهاد آیین‌نامه استاندارد
- توزیع بار متناسب با بردار جرم و شکل مود اصلی [19]

۴-۳- توزیع بار متغیر

به منظور لحاظ کردن تغییر نیروهای جانبی در سطوح مختلف تغییرشکل غیرالاستیک، تعدادی از پژوهشگران الگوهای بار متغیر برای استفاده در آنالیز افزایشی غیرخطی ارائه داده‌اند که توزیع بار در حین تغییرشکل سازه تغییر می‌کند [20]. تعدادی از توزیع‌های بار متغیر عبارتند از:

- ابتدا از توزیع متناسب با بردار جرم و شکل مود اصلی استفاده می‌شود تا اولین مفصل در سازه شکل گیرد. سپس با افزایش بار، نیروها طوری تنظیم می‌شوند که با وضعیت تغییرشکل

جدول ۱. حد تغییر مکان نسبی طبقات برای سطوح عملکرد مختلف در FEMA 273 [10]

Table 1. Relative displacement limit of stories for different performance levels in FEMA 273 [10]

Performance Level Structural System	Immediate Occupancy Performance Level	Life Safety Performance Level	Collapse Prevention Performance Level
Steel Moment-Resisting Frame System	0.07%	2.5%	5%
Steel Braced Frame System	0.5%	1.5%	2%

۳- آنالیز استاتیکی غیرخطی (PUSH-OVER)

آنالیز استاتیکی افزایشی یک روش آنالیز ساده شده برای ارزیابی عملکرد سازه هنگام زلزله می‌باشد. در این روش سازه طرح شده، تحت الگوی بارگذاری مشخص (تقریباً معادل نیروی اینرسی نسبی) که به همراه بارهای ثقیلی بر سازه اثر می‌کند، قرار گرفته تا در یکی از نقاط سازه مفصل پلاستیک تشکیل شود. حالت نهایی به گونه‌های مختلف تعریف شده‌اند که به چند نمونه از آن‌ها می‌پردازیم:

۱- حالت نهایی مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران: حالت نهایی طبق این آیین‌نامه متناظر با رسیدن جابه‌جایی نسبی هر طبقه برابر با ۲/۵ درصد ارتفاع طبقه برای سازه‌های تا ۵ طبقه و ۲ درصد برای سایر ساختمان‌ها می‌باشد [16].

۲- دستورالعمل FEMA 273: مقادیر تغییر مکان نسبی مجاز طبقات برحسب سطح عملکرد و سیستم سازه‌ای مورد نظر برحسب درصد ارتفاع طبقه در جدول (۱) آورده شده است [17].

۳- بارگذاری و تحلیل سازه تا حد سازوکار: پس از آن‌که سازه به حالت نهایی مورد نظر ما (که می‌تواند یکی از حالات بالا باشد) برسد، بارگذاری افزایشی متوقف شده و می‌توان مقادیر تقاضای لرزه‌ای را محاسبه نمود.

با انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی روی نمونه‌ها، منحنی برش پایه-تغییر مکان بام از شروع بارگذاری تا رسیدن به حالت نهایی مورد نظر قابل ترسیم است.

۳-۱- منحنی ظرفیت

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای آنالیز استاتیکی افزایشی

یافته سازه سازگار باشد.

- توزیع متناسب با برش طبقه در هر مرحله: این توزیع‌های بار نیاز به تلاش محاسباتی بیشتری دارند و برتری آن‌ها نسبت به توزیع‌های بار ثابت ساده اثبات نشده است [21]. بنابراین مبحث الگوی بار در این زمان یکی از نقاط ضعف آنالیز استاتیکی افزایشی غیرخطی می‌باشد [22].
- بارگذاری صورت گرفته روی نمونه‌های مدل‌سازی شده از نوع ثابت و مثلی شکل در نظر گرفته شده است. محاسبه بار مثلی اعمال شده روی نمونه‌ها، بر اساس بار جانبی محاسبه شده از روش استاتیکی معادل صورت گرفته است.

۴- تئوری کلاسیک PFI

پس از انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی روی تمام نمونه‌ها، در این قسمت به مقایسه و بررسی نتایج حاصل از تئوری PFI و آنالیز پوش‌آور در نمونه‌های طراحی شده به روش دوم (طراحی برای درصدی از برش طبقه) پرداخته شده است. برای مقایسه‌ی مناسب بین نیروهای حاصل از آنالیز پوش‌آور، اندرکنش ورق-قاب و نیروهای حاصل از تحلیل دستی بر مبنای آیین‌نامه، سختی ثانویه‌ی فولاد صفر در نظر گرفته شده است و همچنین از نیروی فشاری در میله‌ها صرف نظر شده است.

در این قسمت به بررسی نتایج آنالیز پوش‌آور نمونه‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود. در شکل (۳) برش پایه، برش حاصل از آنالیز استاتیکی خطی و نمودار اندرکنش ورق-قاب (PFI) برای نمونه‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ طبقه و در شکل (۴) برای نمونه‌های ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه رسم شده است.

بنابراین با بررسی نمونه‌های ۱ تا ۸ طبقه مشخص شد، تئوری PFI برای نمونه‌های ۱ طبقه تطابق کامل از لحاظ مقاومت نهایی ورق، قاب و کل سیستم دیوار برشی فولادی دارد. در نمونه‌های با طبقات بیشتر از ۱، این تئوری توانایی پیش‌بینی رفتار ورق را به خوبی دارد، اما توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار قاب را ندارد، و به نظر می‌رسد روابط مربوط به پیش‌بینی رفتار قاب در این تئوری احتیاج به اصلاح دارد.

با توجه به اینکه با افزایش تعداد طبقات و در نتیجه افزایش

ارتفاع سازه میزان اختلاف بین نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی نرم‌افزاری با نتایج حاصل از طراحی به روش PFI افزایش پیدا می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع عاملی بر رفتار قاب سازه تأثیرگذار خواهد بود که تئوری کلاسیک PFI توانایی تشخیص و محاسبه آن را ندارد.

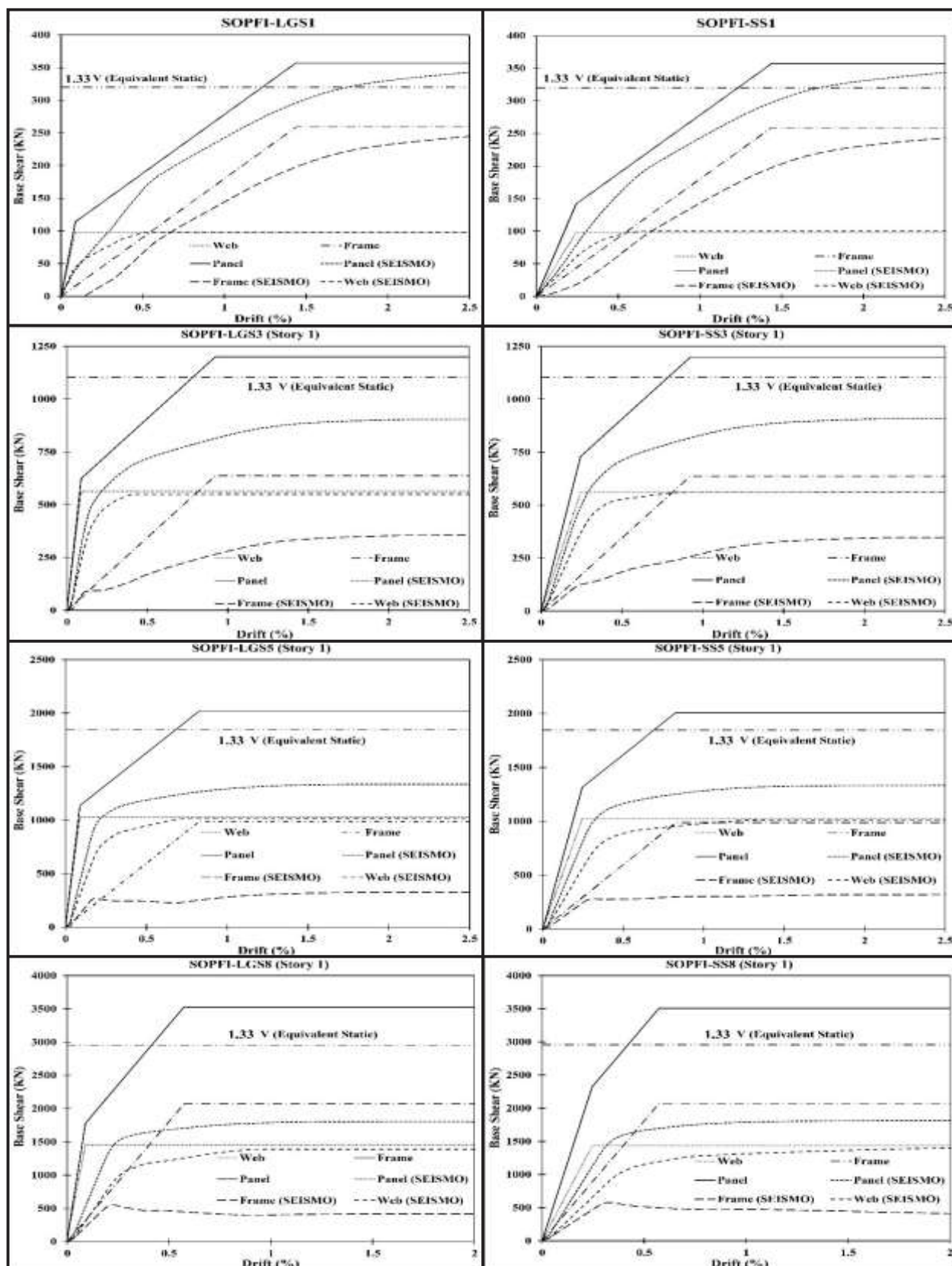
همانطور که از نتایج حاصل از مدلسازی نمونه‌ها در نرم‌افزار مشاهده شد، سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از فولاد ساختمانی و فولاد نرم، برای ساختمان‌ها تا ده طبقه رفتار مناسبی از خود نشان دادند.

اما برای ساختمان‌های بلند مرتبه (بیش از ۱۰ طبقه)، این اصل حاکم نبوده و سیستم دیوار برشی فولادی رفتار مناسبی از خود نشان نمی‌دهد که علت عدم موفقیت رفتار سیستم دیوار برشی فولادی برای فیوز سازه‌های بلند مرتبه در مقابل بار جانبی، حاکم شدن نیروی خمشی (لنگر خمشی) بر سازه و کاهش اثر برش در نیروی قالب آن می‌باشد. به شرح دیگر، هنگامیکه ارتفاع ساختمان از ۱۰ طبقه بیشتر شود، آنگاه به هنگام اعمال بار جانبی به سازه، المان‌های سازه دچار عملکرد خمشی می‌شوند. به همین منظور برای پیش‌بینی صحیح رفتار سازه‌های بلند مرتبه بدون نیاز به مدلسازی آن در نرم‌افزار، به بسط تئوری کلاسیک PFI موجود پرداخته و عملکرد خمش را در این تئوری که تاکنون لحاظ نشده است، اعمال می‌کنیم و آن را از این پس تئوری کلاسیک MPFI می‌نامیم.

۵- عملکرد خمشی

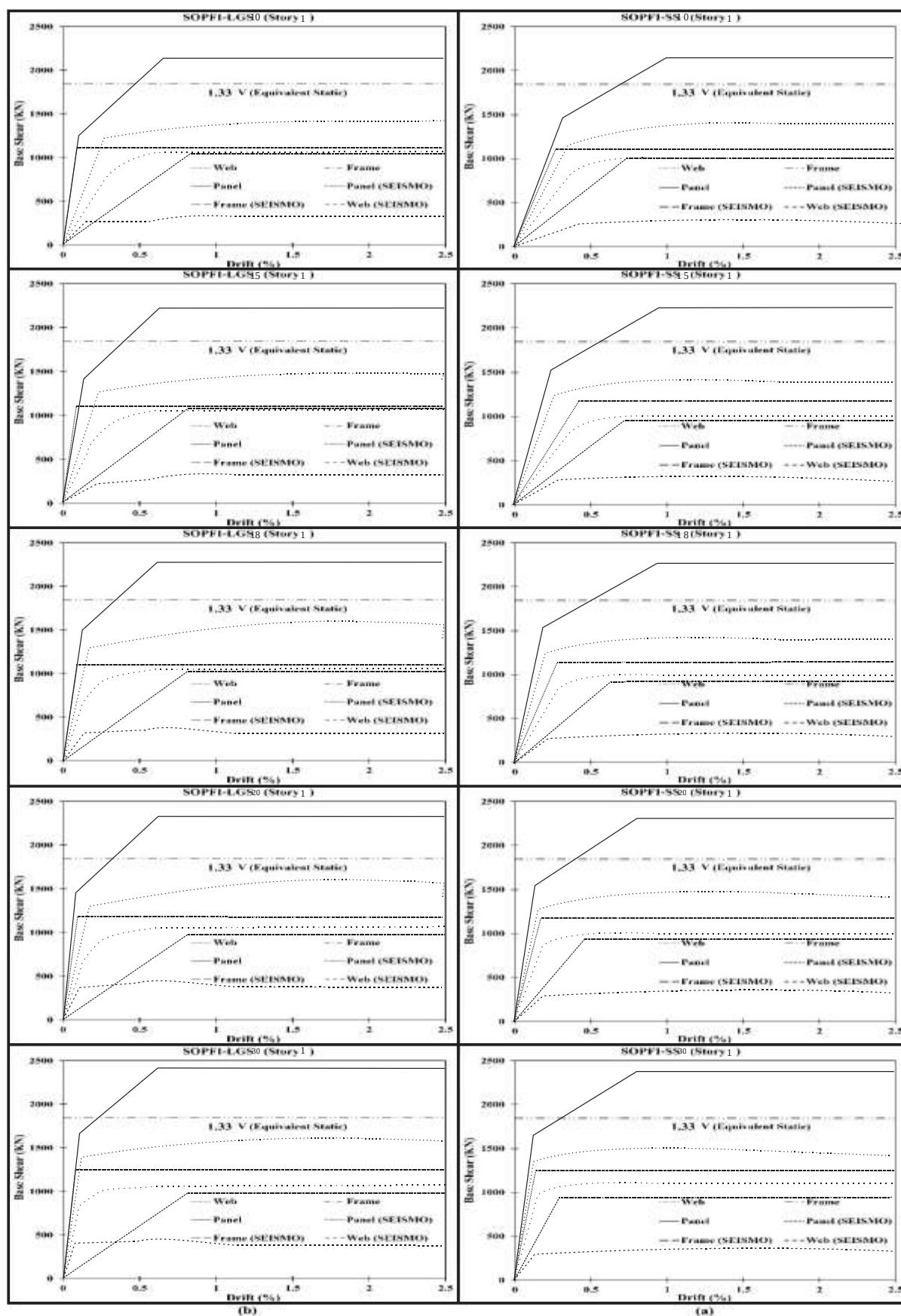
در بخش قبل به بررسی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی ویژه برای نمونه‌های ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه، با استفاده از تئوری کلاسیک PFI و مدلسازی این سیستم در نرم‌افزار SeismoStruct پرداخته شد. با استفاده از نتایج حاصل از نرم‌افزار برای سازه‌های بلندتر از ۱۰ طبقه اختلاف بین نتایج حاصل از نرم‌افزار و تئوری کلاسیک به وجود آمد.

با افزایش تعداد طبقات، این اختلاف نیز افزایش پیدا کرد، تا آن‌جا که مشخص شد هنگامیکه تعداد طبقات یک سازه افزایش پیدا می‌کند، یک تغییری در چگونگی اعمال بار در آن به وجود می‌آید که در تئوری کلاسیک PFI دیده نشده است.



شکل ۳. مقایسه برش طراحی و برش پایه در نمونه‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ طبقه با فولاد معمولی و فولاد نرم

Fig. 3. Comparison of design shear and base shear in 1, 3, 5, and 8-story specimens with normal steel and mild steel



شکل ۴. مقایسه برش طراحی و برش پایه در نمونه‌های ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه با فولاد معمولی و فولاد نرم

Fig. 4. Comparison of design shear and base shear in 10, 15, 18, 20, and 30-story specimens with normal steel and mild steel

زاویه شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است.

$$F_{wu} = (\tau_{cr} + 0.5 \cdot \sigma_{ty} \cdot \sin 2\theta) \cdot b \cdot t \quad (1)$$

$$U_{we} = U_{wcr} + U_{wpb} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، U_{wcr} جابه‌جایی برشی بحرانی صفحه و U_{wpb} جابه‌جایی برشی مؤلفه پس از کمانش نیروی برشی می‌باشد که به ترتیب از رابطه (۳ و ۴) محاسبه می‌شود.

$$U_{wcr} = (\tau_{cr}/G) d \quad (3)$$

$$U_{wpb} = ((2 \cdot \sigma_{ty}) / (E \cdot \sin 2\theta)) \cdot d \quad (4)$$

از رابطه (۵) برای نمودار جابه‌جایی-بار برش قاب قسمت ج شکل (۳) استفاده می‌شود.

$$F_{fu} = 4 M_{fp}/d \quad (5)$$

$$U_{fe} = (M_{fp} \cdot d^2) / (6 \cdot E \cdot I_f \cdot (12 \cdot \rho + 4) / (12 \cdot \rho + 1)) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $\rho = \sum(E I_b/b) / \sum E I_f / d$ می‌باشد.

نمودار جابه‌جایی-بار برشی پنل را با روی هم قرار دادن نمودار جابه‌جایی-بار برشی صفحه و نمودار جابه‌جایی-بار برشی قاب، که به صورت افزایشی در نظر گرفته می‌شود، به دست می‌آید.

۲- محاسبه نمودارهای بار خمشی و جابه‌جایی

با استفاده از روابط (۷ تا ۱۰) می‌توان نمودار بار خمشی-جابه‌جایی سیستم را رسم کرد.

$$M_y = \sigma_b S_{eff} = \sigma_b I_{eff} / ((1-j)b) \quad (7)$$

$$U_{my} = \varphi_{my} d \quad (8)$$

$$M_P = \sigma_0 Z_P \quad (9)$$

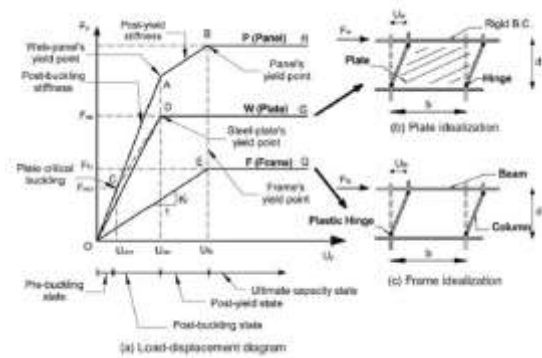
$$U_{mp} = \varphi_{mp} d \quad (10)$$

با استفاده از نمودار جابه‌جایی-عملکرد خمشی (شکل ۷)، جابه‌جایی خمشی پنل ناشی از نیروی خمشی اعمال شده را محاسبه می‌شود.

۳- اصلاح نمودار جابه‌جایی-بار برشی برای گشتاورهای واژگونی

از روابط (۱۱ تا ۱۴) برای اصلاح نمودار جابه‌جایی-بار برشی استفاده می‌شود.

$$F_{mwu} = F'_{wu} + K_f \cdot U_{we} \quad (11)$$



شکل ۵. اجزای مدل MPFI (الف) جابه‌جایی بار برشی: فقط قاب، فقط صفحه، و

آثار ترکیبی در پنل؛ (ب) جزء ایده‌آل صفحه ج) جزء ایده‌آل قاب. [24]

Fig. 5. Components of the MPFI model a) Shear load displacement: frame only, plate only, and combined effects in the panel; b) Ideal plate component c) Ideal frame component. [24]

همانطور که در قسمت تصریح تئوری کلاسیک PFI مشاهده شد، این تئوری هیچ عامل خمشی در آن دیده نشده و با استفاده از تئوری کلاسیک موجود امکان پیش‌بینی رفتار سازه‌های بلند مرتبه وجود ندارد. به همین منظور در این بخش با توجه به اختلاف موجود بین تئوری کلاسیک و مدلسازی نرم‌افزار و تعیین نسبت خمش موجود در سازه، به بسط تئوری کلاسیک PFI برای رفتار خمشی سیستم دیوار برشی فولادی می‌پردازیم که آن را تئوری کلاسیک MPFI می‌نامیم.

۶- طراحی سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از روش MPFI

۶-۱- فرآیند طراحی سیستم دیوار برشی فولادی

در آیین‌نامه کانادا (NBCC)، ضوابط حالت حدی برای طراحی لرزه‌ای به طور خاص برای رسیدگی به طراحی مقاومتی نوشته شده است. برای رعایت این ضوابط، ظرفیت نهایی سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان وسیله‌ای برای تعیین مقاومت طراحی آن در نظر گرفته نشده است. در عوض، تصمیم گرفته شد که مقاومت طراحی پس از وقوع تسلیم در سیستم تعیین شود.

با توجه به رابطه‌های موجود در تحلیل و طراحی دیوارهای صفحه‌ای فولادی که با استفاده از ارزیابی تجربی [23] بیان شده است، به بررسی روش پیشنهادی MPFI برای طراحی یک سیستم دیوار برشی فولادی پرداخته شده است.

۱- محاسبه و رسم نمودارهای جابه‌جایی بار برشی

برای این کار از رابطه (۱) و (۲) برای نمودار جابه‌جایی-بار برشی صفحه استفاده می‌شود. شکل (۶-الف و ۶-ب) همچنین

ظرفیت ستون از گشتاورهای خمشی ایجاد شده توسط بارهای برشی اعمال شده و تنش‌های مرزی نرمال مرتبط با میدان کشش بزرگتر است. (به عبارت دیگر، از رابطه (۱۵ و ۱۶)، بارهایی را که ستون باید در برابر آن‌ها مقاومت کند، ارائه می‌دهد). برای بارهای محوری ایجاد شده توسط بار مرده و گشتاورهای واژگونی می‌تان از رابطه (۱۷) استفاده کرد.

$$M_{fp} \geq (\sigma_{ty} \cdot t \cdot d^2 \cdot \cos^2 \theta) / 8 \quad (15)$$

$$M_{fp} \geq (\sigma_{ty} \cdot t \cdot d^2 \cdot \cos^2 \theta) / 12 + K_f U'_{we} \cdot d / 4 \quad (16)$$

$$P_{cf} \geq C_f + M/b + 1/2 \cdot \sigma_{ty} t \cdot b \cdot \sin^2 \theta \quad (17)$$

۵- محاسبه ظرفیت فشاری محوری و خمشی ترکیبی تیرها

با استفاده از رابطه (۱۸ و ۱۹) می‌توان اطمینان حاصل کرد که ظرفیت تیر، بزرگتر از گشتاورهای ناشی از بارهای برشی و تنش‌های مرزی نرمال مرتبط با میدان کشش است.

$$M_{fp} \geq (\sigma_{ty} \cdot \Delta t \cdot b^2 \cdot \sin^2 \theta) / 8 \quad (18)$$

$$M_{fp} \geq (\sigma_{ty} \cdot \Delta t \cdot b^2 \cdot \sin^2 \theta) / 12 + Z_c \sigma'_{yc} \quad (19)$$

همچنین با استفاده از رابطه (۲۰) نیز می‌توان اطمینان حاصل کرد که ظرفیت تیر بزرگتر از تنش‌های مرزی نرمال مرتبط با میدان کشش اعمال شده بر ستون‌ها است.

$$P_{cf} \geq 0.5 \cdot \sigma_{ty}(t_1 + t_2) \cdot d \cdot \cos^2 \theta \quad (20)$$

۶- مطابقت ورق با روش طراحی ظرفیت

با استفاده از رابطه (۲۱) می‌توان اطمینان حاصل کرد که صفحه فولادی انرژی بیشتری نسبت به قاب اتلاف می‌کند و ورق سیستم دیوار برشی فولادی با روش طراحی ظرفیت که هدف آن شکست ورق به عنوان فیوز سیستم است، مطابقت دارد.

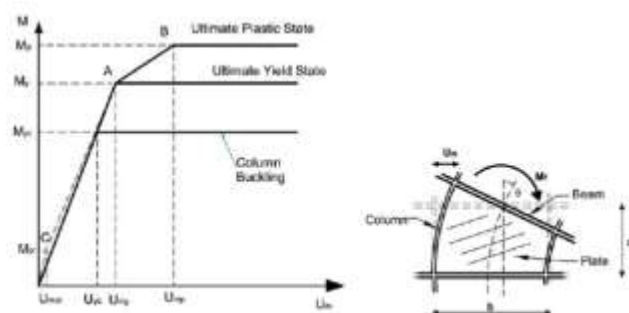
$$U_{fe} > U_{we} \quad (21)$$

۷- بررسی اثر P-Delta

اثر P-Delta ناشی از بار مرده را که باید در فرآیند طراحی در نظر گرفته شود، با استفاده از مفاد پیشنهادی آیین‌نامه طراحی، بررسی می‌شود.

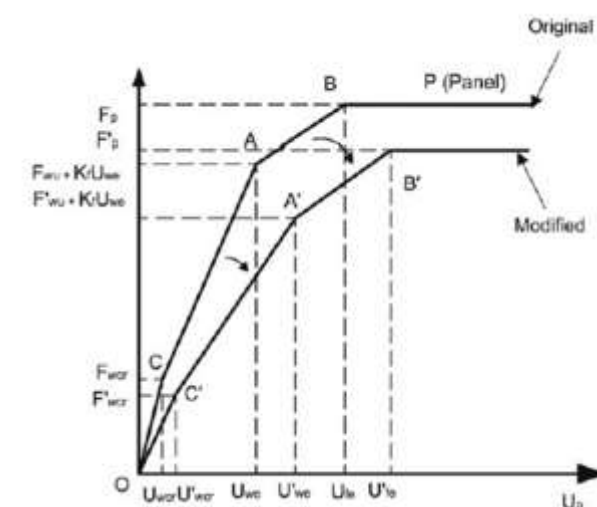
۸- این روش را تا زمانی که بتوان به یک طراحی بهینه (با نسبت تقاضا به ظرفیت بالا) دست یافت، تکرار می‌شود.

توجه داشته باشید که روابط (۱۱ تا ۲۰) از تنش تسلیم به جای مقدار تنش واقعی میدان کشش استفاده می‌کنند، زیرا مقاطع تیر یا



شکل ۶. جابه‌جایی بار مدل خمشی MPFI پنل (ترکیبی از صفحه جان و قاب) ایده‌آل‌سازی صفحه مدل MPFI برای تغییر شکل خمشی. [24]

Fig. 6. Load transfer of the MPFI panel flexural model (combination of web and frame) Idealization of the MPFI panel model for flexural deformation. [24]



شکل ۷. نمودار بار-جابه‌جایی اصلاح‌شده برای مقاومت برشی سیستم دیوار برشی فولادی [24]

Fig. 7. Modified load-displacement diagram for shear resistance of steel shear wall system [24]

$$U'_{we} = U_{we}(\sigma'_{ty}) + U_{we}(M_f) = U_{we} + \phi_{my}(M_f) \quad (12)$$

$$F_P = F_{wu} + F_{fu} - N \quad (13)$$

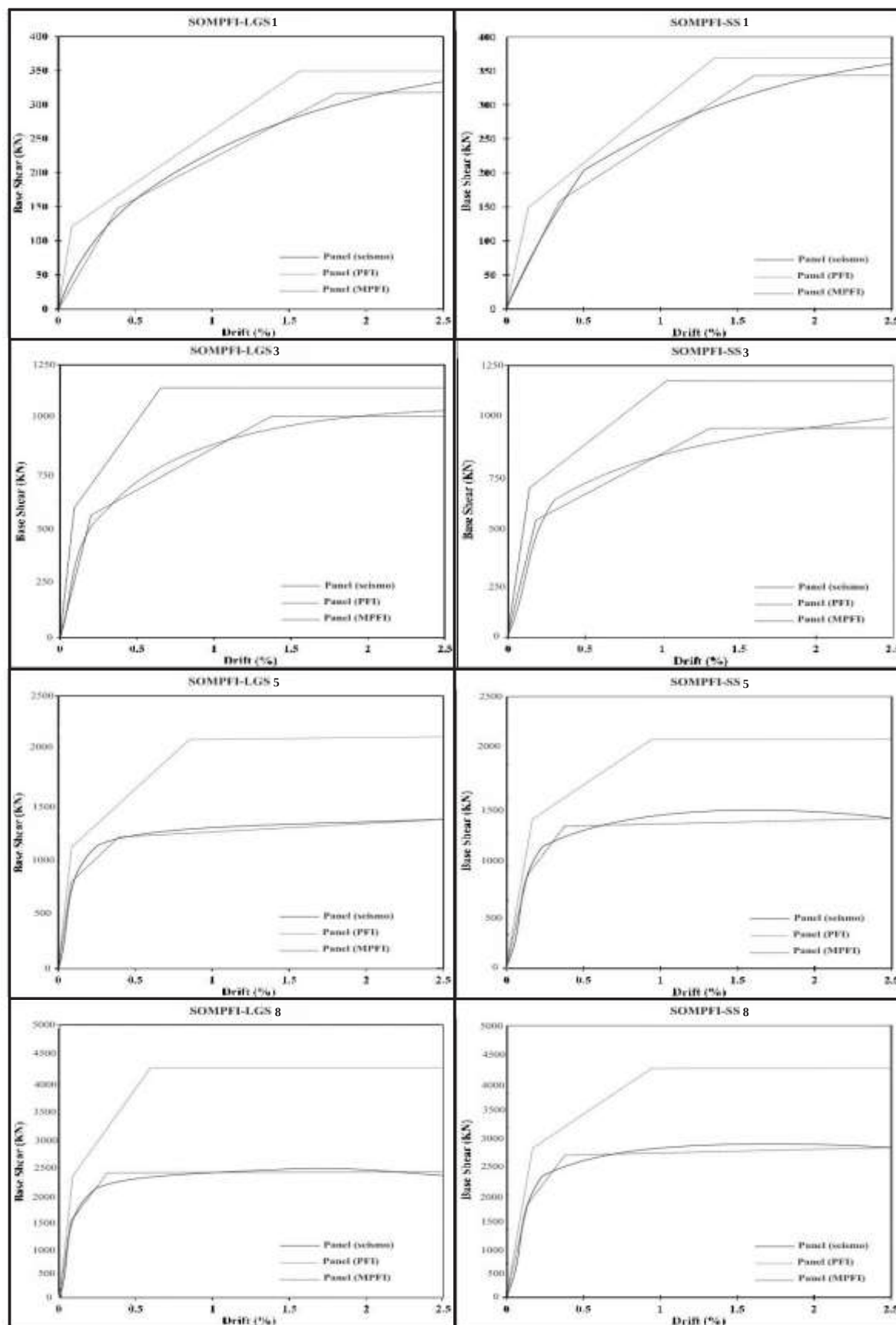
$$U'_{fe} = U_{fe} + \phi_{mp}(M) \cdot d \quad (14)$$

نمودار جابه‌جایی-بار برشی پنل قسمت الف شکل (۶)، با استفاده از گشتاور کل ایجاد شده توسط بارهای واژگونی اعمال شده اصلاح می‌شود که در شکل (۷) مشاهده می‌شود.

از نمودار جابه‌جایی-بار برشی اصلاح‌شده شکل (۸) برای محاسبه جابه‌جایی برشی اصلاح‌شده برای پنل حاصل از بار برشی اعمال‌شده و گشتاورهای واژگونی استفاده می‌شود.

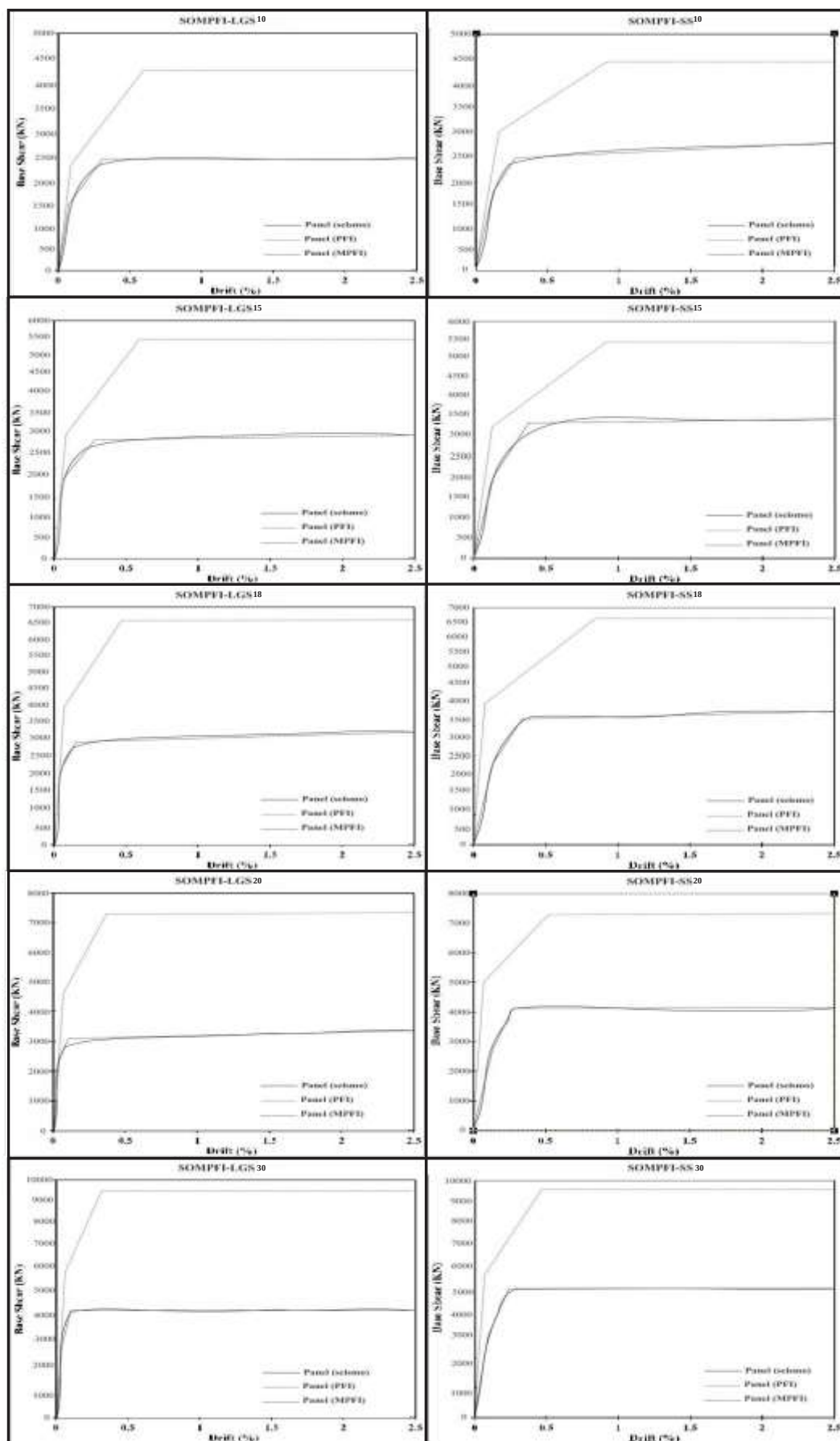
۴- بررسی ظرفیت فشاری و خمشی محوری ترکیبی ستون‌ها

با استفاده از رابطه (۱۵ و ۱۶)، می‌توان اطمینان حاصل کرد که



شکل ۸ مقایسه برش طراحی و برش پایه در نمونه‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ طبقه با فولاد معمولی و فولاد نرم

Fig. 8. Comparison of design shear and base shear in 1, 3, 5, and 8-story specimens with normal steel and mild steel



شکل ۹. مقایسه برش طراحی و برش پایه در نمونه‌های ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه با فولاد معمولی و فولاد نرم

Fig. 9. Comparison of design shear and base shear in 10, 15, 18, 20 and 30-story specimens with normal steel and mild steel

از روش میله‌های معادل در نرم‌افزار SEISMOSTRUCT مدل گردیدند. نتایج حاصل از نرم‌افزار SEISMOSTRUCT با نتایج نرم‌افزار مطابقت کامل داشتند. زمان تناوب نمونه‌هایی که در آن فولاد نرم به کار رفته بود، به دلیل سختی بیشتر این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با فولاد معمولی کوچک‌تر بودند. هرچه تعداد طبقات نمونه‌ها افزایش یافتند، اختلاف زمان تناوب نمونه‌های با فولاد معمولی و نرم کوچک‌تر شد.

به منظور مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ای، نمونه‌ها تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) قرار گرفتند. با مقایسه‌ی نیروهای عملکردی و نرم‌افزاری مشاهده گردید که در تمام نمونه‌ها، نیروی محوری ستون با استفاده از روش عملکردی به صورت دست‌بالا محاسبه می‌گردد.

نکته‌ی قابل توجه در نمونه‌های پنج و هشت طبقه تسلیم نشدن تمام میله‌ها تا دریفت مجاز آیین‌نامه بود. معیار آیین‌نامه در طراحی عملکردی، تسلیم تمام میله‌ها می‌باشد. با توجه به تسلیم نشدن تمام میله‌ها در نمونه‌های پنج و هشت طبقه تا دریفت مجاز آیین‌نامه، پیشنهاد می‌گردد.

همچنین با مقایسه‌ی نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی و تئوری PFI، مشخص گردید که نتایج این تئوری در نمونه‌های ۱ طبقه با نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی تطبیق کامل دارد. اما در نمونه‌های بیش از ۱ طبقه، به نظر می‌رسد روابط مربوط به ظرفیت قاب از دقت کافی برخوردار نبوده و احتیاج به اصلاح دارند. با مقایسه‌ی نمودار ظرفیت دو خطی شده مشخص گردید، در تمام روش‌های طراحی نمونه‌ی با فولاد نرم در جابه‌جایی و برش کوچک‌تری تسلیم شده و سریعتر وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌گردد. تسلیم ورق در جابه‌جایی‌های کوچکتر باعث آسیب کمتر به اعضای اصلی سازه می‌گردد. در مرحله‌ی بعد پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌های دیوار برشی فولادی با استفاده از نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی محاسبه گردیدند. برای محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای، نقطه‌ی انتهایی نمودار ظرفیت، یک بار برابر نقطه‌ی عملکرد و بار دیگر برابر دریفت ۲/۵ درصد در نظر گرفته شد.

اگر معیار محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای نقطه‌ی عملکرد باشد، در تمام نمونه‌های طراحی شده و تمام روش‌های طراحی استفاده از فولاد نرم باعث بهبود پارامترهای لرزه‌ای از قبیل ضریب کاهش شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار گردید.

ستون باید در برابر تنش‌های مرزی نرمال مرتبط با میدان کشش، بسیار فراتر از تسلیم صفحه پرکننده (که نقش فیوز را دارد) مقاومت کنند. در نتیجه با استفاده از روابط (۲۲ تا ۲۷) می‌توان تئوری کلاسیک MPFI را تکمیل نمود.

$$F'_{wcr} = [(M_f / M_{fc} V_f)^2 + 1 / F_{wcr}^2]^{-1/2} \quad (22)$$

$$U'_{wcr} = \tau'_{cr} d / G + \phi_{mcr} d \quad (23)$$

$$F_{wcr} = \tau_{cr} b t \quad (24)$$

$$U_{wcr} = \tau_{cr} d / G \quad (25)$$

$$M_{cr} = \sigma_{cr} S_t \quad (26)$$

$$U_{mcr} = \phi_{mcr} d \quad (27)$$

با توجه به روابط بیان شده، تئوری کلاسیک PFI که قابلیت در نظر گرفتن خمش در سیستم دیوار برشی فولادی را نداشت به تئوری کلاسیک MPFI تبدیل می‌شود.

۲-۶- طراحی و مقایسه نمونه‌ها

با توجه به فرمول‌های ارائه شده برای تئوری کلاسیک MPFI می‌توان نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش را با روابط بسط داده شده، طراحی نمود. در این قسمت نمونه‌های مورد مطالعه را با استفاده از روابط جدید طراحی کرده و با نتایج حاصل از طراحی PFI و مدل‌سازی نرم‌افزاری مقایسه می‌شود. در شکل (۸) برش پایه، برش حاصل از آنالیز غیرخطی و نمودار اندرکنش بسط داده شده برای خمش ورق-قاب (MPFI) برای نمونه‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ طبقه و در شکل (۹) برای نمونه‌های ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه رسم شده است.

در این پژوهش نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که نمودار حاصل از اندرکنش بسط داده شده برای خمش ورق-قاب (MPFI) با نمودار حاصل از اندرکنش ورق-قاب (PFI) و نتایج حاصل از مدل‌سازی نرم‌افزاری رسم شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از فولاد با رده مقاومتی پایین بر روی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی پرداخته شده است. بدین منظور ۲۷ مدل با تعداد طبقات مختلف (۱، ۳، ۵، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ طبقه) با استفاده از فولاد معمولی و فولاد در نظر گرفته شد. برای طراحی نمونه‌ها از روابط راهنمای شماره‌ی ۲۰ آیین‌نامه‌ی AISC استفاده گردید. پس از طراحی، نمونه‌ها با استفاده

تئوری کلاسیک PFI برای رفتار خمشی سازه‌های بلند مرتبه پرداخته شد و نام آن تئوری کلاسیک MPFI قرار گرفت.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم برای داوری این مقاله کمال تشکر را داریم.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسنده این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

نقش نویسندگان

سهم هریک از نویسندگان در این مقاله برابر می‌باشد.

منابع مالی

در این تحقیق از هیچ منابع مالی کمک گرفته نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در این تحقیق از هیچ یک از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

در صورتی که معیار محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای در ۲/۵ درصد باشد، در نمونه‌های ۱ طبقه، ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری در نمونه‌ای بزرگ‌تر می‌باشد که برای درصد بزرگ‌تری از برش پایه طراحی گردیده است. اما در مورد ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار، هرچه نمونه برای درصد کوچک‌تری از برش پایه طراحی گردد، دارای ضریب اضافه مقاومت بزرگ‌تری است.

شایان ذکر است در تمام روش‌های طراحی، استفاده از فولاد با رده مقاومتی پایین، باعث افزایش ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار گردید.

استفاده از فولاد نرم در نمونه‌ها با ارتفاع کم (تا ۱۰ طبقه) منطقی بوده و موجب بهبود رفتار سازه می‌شود اما در سازه‌های بلند مانند ۱۵ و بالاتر طبقه به دلیل حاکم شدن خمش در نمونه، نمونه با فولاد ساختمانی رفتار مناسب‌تری نسبت به فولاد نرم از خود نشان می‌دهد. باتوجه به حاکم شدن خمش در ساختمان‌های بلند مرتبه، تئوری کلاسیک PFI موجود به دلیل عدم اعمال خمش در فرمول‌های خود امکان پیش‌بینی صحیح رفتار سازه در مقابل بارهای جانبی را ندارد؛ به همین علت در این پژوهش به بسط

References

- [1] Sabouri, S., 2001. *An introduction to steel plate shear walls*. Angizeh Publishing.
- [2] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T. and Takagi, M., 1973. Experimental study on thin steel shear walls and particular bracings under alternative horizontal load. In: *IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, Lisbon, Portugal, pp. 185–191. doi: 10.5169/seals-13766.
- [3] Mimura, H. and Akiyama, H., 1977. Load-deflection relationship on earthquake-resistant steel shear walls developed diagonal tension field. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 260, pp. 109–114. doi: 10.3130/aijsaxx.260.0_109.
- [4] Thorburn, L.J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J., 1983. *Analysis of steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 107. Edmonton, Alberta, Canada: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [5] Timler, P.A. and Kulak, G.L., 1983. *Experimental study of steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 114. Edmonton, Alberta, Canada: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [6] Canadian Standards Association, 2001. *CAN/CSA-S16.1: Limit states design of steel structures*. Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association.
- [7] Tromposch, E.W. and Kulak, G.L., 1987. *Cyclic and static behaviour of thin panel steel plate shear walls*. Structural Engineering Report No. 145. Edmonton, Alberta, Canada: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [8] Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S., 1991. Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels. *Thin-Walled Structures*, 12(2), pp. 145–162. doi: 10.1016/0263-8231(91)90061-M.
- [9] Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S., 1992. Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel shear panels. *Thin-Walled Structures*, 14(2), pp. 139–151. doi: 10.1016/0263-8231(92)90047-Z.
- [10] Caccese, V., Elgaaly, M. and Chen, R., 1993. Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load. *Journal of Structural Engineering*, 119(2), pp. 573–587. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(573).
- [11] Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C., 1993. Postbuckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads. *Journal of Structural Engineering*, 119(2), pp. 588–605. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(588).
- [12] Rezai, M., Ventura, C.E. and Prion, H.G.L., 2000. Numerical investigation of thin unstiffened steel plate

- shear walls. In: *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- [13] Berman, J.W. and Bruneau, M., 2003. Plastic analysis and design of steel plate shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 129(11), pp. 1448–1456. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1448).
- [14] Zirakian, T. and Zhang, J., 2015. Buckling and yielding behavior of unstiffened slender, moderate, and stocky low yield point steel plates. *Thin-Walled Structures*, 88, pp. 105–118. doi: 10.1016/j.tws.2014.11.022.
- [15] Arezoomand Langarudi, P., Adibramezani, M., Hojatkashani, A. and Farokhizadeh, S., 2024. Effect of design optimality and overstrength on the seismic performance of steel plate shear walls. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. doi: 10.1007/s40996-024-01513-7.
- [16] Building and Housing Research Center, 2013. *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings: Standard No. 2800*. 4th ed. Tehran: Building and Housing Research Center Publications.
- [17] Chen, Z. and Mo, L., 2024. Seismic performance of concrete-filled double corrugated-steel-plate shear wall with T-section. *Journal of Constructional Steel Research*, 219, 108758. doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108758.
- [18] Du, Y., Amer, M., Chen, Z., Al-Haaj, M. and Huang, J., 2024. Seismic behaviors of CFT-column frame-four-corner bolted connected buckling-restrained steel plate shear walls using ALC/RAC panels. *Thin-Walled Structures*, 195, 111365. doi: 10.1016/j.tws.2023.111365.
- [19] Du, Y., et al., Degradation of Seismic Performance of Thin Steel Plate Shear Walls in Earthquakes. *Buildings*, 2024. 14(4): p. 888.
- [20] Du, Y., Zhang, M., Cao, Y. and Xue, L., 2024. Degradation of seismic performance of thin steel plate shear walls in earthquakes. *Buildings*, 14(4), 888. doi: 10.3390/buildings14040888.
- [21] Feng, L., Yang, H. and Ou, J., 2024. Experimental study on the seismic performance of GFRP-stiffened steel plate shear walls. *Structures*, 64, 106514. doi: 10.1016/j.istruc.2024.106514.
- [22] Feng, L., Yang, H. and Ou, J., 2024. Experimental and numerical study on vertically-placed stiffened corrugated steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 219, 108765. doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108765.
- [23] Kharrazi, M.H.K., Ventura, C.E. and Prion, H.G.L., 2011. Analysis and design of steel plate walls: experimental evaluation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(1), pp. 60–70. doi: 10.1139/L10-096.
- [24] Kharrazi, M.H.K., Prion, H.G.L. and Ventura, C.E., 2008. Implementation of M-PFI method in design of steel plate walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(4), pp. 465–479. doi: 10.1016/j.jcsr.2007.09.005.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ojaghpur Maleki, M.H., Basaligheh, F. and Ebadi, P., 2027. Extension of Classical PFI theory for Bending Behavior in Special Steel Plate Shear Walls using Nonlinear Analyses for Different Steel Grades. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.85-100.



Statistical Analysis of the Optimal Mix Design in the Production of Modified Concrete Using the Concurrent Incorporation of Molecular Sieve and PET Waste

Pouya Amjadyan¹, Nader Mokhtarani^{2*} 

1. Master's in Civil Engineering [Environmental Engineering specialization], Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor in Civil Engineering [Environmental Engineering specialization], Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

The increase in the production of industrial and plastic waste, especially molecular sieve waste and polyethylene terephthalate (PET), has created a serious challenge in the field of environmental waste management. On the other hand, the current management method for some of this waste is to bury it, which clearly shows that this approach is not appropriate for environmental standards. Molecular sieves, which mainly have a zeolitic and porous structure and are used in the oil, gas, and petrochemical industries for the absorption and separation of molecules, are classified as industrial waste after their efficiency decreases due to saturation of the pores. This research aimed to investigate the feasibility of simultaneously using molecular sieve waste and PET in the production of sustainable concrete and to evaluate their impact on the mechanical, physical, and environmental properties of concrete. The simultaneous use of molecular sieve and PET waste in concrete is an innovative approach in civil engineering. Due to its porous crystalline structure and high ability to absorb moisture, molecular sieve can increase density, adhesion, and reduce water absorption in concrete; however, its excessive use may lead to a decrease in compressive strength. On the other hand, using recycled PET waste as a partial replacement for natural aggregates helps reduce the density of concrete, reduce the weight of the structure, and optimize material consumption and transportation costs. Molecular sieve waste (synthesized HYG03C) after mechanical crushing and sieving was used as a partial replacement for cement in the range of 5 to 30% by weight, and PET after washing, grinding, and sieving was used as a partial replacement for sand in the range of 2 to 10% by weight. The experiments were designed using response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD) in Design Expert software. In this design, four variable parameters were defined including cement content (200 to 400 g), molecular sieve to cement ratio, water to cement ratio (40 to 60 %), and PET to sand ratio. It should be noted that the amount of sand and gravel in concrete mixtures is determined to be 42 and 33 percent by weight of the total concrete, respectively. Cubic specimens with dimensions of 10×10×10 cm were made in accordance with the requirements of the Iranian Concrete Code and were subjected to porosity and compressive strength tests (Standard 1608-3). Considering the research objectives of producing sustainable concrete, the optimal composition included 393 grams of cement, 21.56% molecular sieve, 2.85% PET, and a water-to-cement ratio of 0.515, which resulted in a porosity of 4.34% and a compressive strength of 34.29 MPa. The results of the slump test showed that the concrete flowability in the optimal sample was 75 mm and in all samples it was within the allowable range of 50 to 100 mm. Increasing the water-cement ratio increased the slump and increasing the amount of cement, molecular sieve waste, and PET decreased the concrete flowability. Porosity and compressive strength prediction models had high accuracy and generalizability with high coefficients of determination (R^2 equal to 0.9978 and 0.9970, respectively) and significance level (P-value less than 0.05). This research demonstrated the effectiveness of simultaneously utilizing molecular sieve and PET waste as a sustainable method for producing concrete with improved properties and reduced environmental impacts, which has widespread application in construction projects.

Review History

Received: Jan 21, 2026
Revised: May 18, 2026
Accepted: June 7, 2026

Keywords

Concrete
Molecular sieve waste
PET waste
Response Surface
Methodology
Multi-Objective
Optimization
Central composite design

* Corresponding Author Email: mokhtarani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6121-019X



بررسی آماری طرح مخلوط بهینه در تولید بتن اصلاح شده با استفاده همزمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET

پویا امجدیان^۱، نادر مختارانی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

افزایش انباشت پسماندهای صنعتی مولکولارسیو و ضایعات پلاستیکی PET به یکی از چالش‌های جدی مدیریت پسماند در جهان تبدیل شده است. در این پژوهش، برای نخستین بار امکان استفاده همزمان این دو نوع پسماند در تولید بتن پایدار مورد بررسی قرار گرفت. پسماند مولکولارسیو HYG03C پس از خردایش به عنوان جایگزین جزئی سیمان در بازه ۵ تا ۳۰ درصد وزنی و PET آسیاب شده به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در محدوده ۲ تا ۱۰ درصد وزنی به کار گرفته شد. بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی (CCD) در نرم‌افزار Design Expert انجام شد. چهار متغیر مستقل شامل مقدار سیمان، نسبت مولکولارسیو به سیمان، نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان تعریف شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که ترکیب بهینه شامل ۳۹۳ گرم سیمان، ۲۱/۵۶ درصد مولکولارسیو، ۲/۸۵ درصد PET و نسبت آب به سیمان ۰/۵۱۵ است که منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۳۴/۲۹ مگاپاسکال، تخلخل ۴/۳۴ درصد و اسلامپ ۷۵ میلی‌متر شد. مدل‌های آماری توسعه یافته برای پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری از دقت بالایی برخوردار بودند، به گونه‌ای که مقادیر ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹۸ و مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان پسماندهای مولکولارسیو و PET می‌تواند منجر به تولید بتنی مقاوم و سازگار با محیط‌زیست شود که از نظر عملکرد فنی، قابلیت کاربرد در اعضای سازه‌ای مانند تیر، ستون و دال را دارد.

کلمات کلیدی

بتن

پسماند مولکولارسیو

پسماند PET

روش سطح پاسخ

بهینه‌سازی چند هدفه

طراحی مرکب مرکزی

۱- مقدمه

طبیعی یا سنتزی (مصنوعی) تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر یکنواختی منافذ، انتخاب‌پذیری بالا و پایداری شیمیایی و حرارتی، کاربرد گسترده‌ای در فرایندهای صنعتی دارند. مولکولارسیوها نقش مهمی در جداسازی، خشک‌سازی و خالص‌سازی گازها و مایعات ایفا می‌کنند و در صنایعی مانند پتروشیمی و پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [1 & 2]. در همین راستا، پسماند مولکولارسیو به موادی اطلاق می‌شود که پس

رشد فزاینده تولید پسماندهای صنعتی و پلیمری، به ویژه مواد آلومینوسیلیکاتی مانند مولکولارسیو (Molecular Sieve) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، چالش‌های جدی در مدیریت پسماند ایجاد کرده است. مولکولارسیو ماده‌ای متخلخل با منافذ یکنواخت است که امکان جداسازی مولکول‌ها را بر اساس ابعاد و شکل آن‌ها فراهم می‌سازد. این ساختارهای بلوری، که معمولاً از زئولیت‌های

* رایانامه نویسنده مسئول: mokhtarani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6121-019X

از استفاده مکرر در فرایندهای جذب، اشباع شده و کارایی اولیه خود را از دست داده‌اند. این پسماندها معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین و سایر ناخالصی‌ها بوده و در رده پسماندهای ویژه و خطرناک قرار می‌گیرند. در همین راستا دفع این پسماندها نیازمند رعایت استانداردهای محیط‌زیستی است و مدیریت صحیح این پسماندها از طریق بازیافت یا انهدام کنترل‌شده، می‌تواند آثار محیط‌زیستی را به حداقل برساند [3] از سوی دیگر، PET به واسطه ساختار شیمیایی منحصر به فرد خود، از جمله پیوندهای استری بسیار پایدار، به عنوان یکی از مقاوم‌ترین پلیمرها در برابر تجزیه زیستی و طبیعی شناخته می‌شود. این ویژگی موجب می‌شود که PET برای مدت‌های طولانی در محیط باقی بماند و تجزیه کامل آن تحت شرایط طبیعی ممکن است صدها سال به طول انجامد [4] همچنین پسماند PET به عنوان یکی از متداول‌ترین پلیمرهای مصرفی در جهان، عمدتاً به دلیل کاربرد وسیع PET در صنایع بسته‌بندی، به ویژه بطری‌های نوشیدنی، منجر به تولید حجم بالایی از پسماند می‌شود، در سطح صنعتی، حساسیت بالای PET به شرایط فرایند مانند دما، زمان ماند و نرخ برش، می‌تواند باعث تبلور ناقص، تخریب حرارتی و ایجاد پسماندهای غیرقابل استفاده شود در حالی که نرخ بازیافت این پسماند به دلیل ضعف در تفکیک و جمع‌آوری پایین باقی مانده است [4-8] تحقیقات نشان داده است که سالانه بیش از ۸۲ میلیون تن PET در سراسر جهان تولید می‌شود و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ تنها ۲۷ درصد آن قابل بازیافت باشد [9]. رویکردهای متداول دفع این پسماندها، مانند دفن و سوزاندن، علاوه بر ایجاد آلودگی خاک، آب و هوا، موجب اتلاف منابع ارزشمند می‌شود [10 & 11].

در همین راستا، کاربرد استفاده هم‌زمان پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن، رویکردی نوآورانه در مهندسی عمران به شمار می‌رود. صنعت بتن ظرفیت بالایی برای پذیرش پسماندهای مختلف دارد و این رویکرد می‌تواند بستری برای کاهش مصرف سیمان و سنگدانه طبیعی، تثبیت آلاینده‌ها و افزایش ارزش افزوده پسماندهای صنعتی را فراهم آورد. به عبارتی مولکولارسیو به دلیل ساختار بلوری متخلخل و توانایی بالا در جذب رطوبت، می‌تواند موجب افزایش تراکم، چسبندگی و کاهش تخلخل در بتن شود؛ با این حال، مصرف بیش از اندازه آن ممکن

است به کاهش مقاومت فشاری بینجامد. همچنین، مولکولارسیو مصرف‌شده به دلیل ترکیبات آلومینوسیلیکاتی و ویژگی‌های پوزولانی، قابلیت مشارکت در تشکیل فازهای C-S-H را دارد [2]. به موازات آن، استفاده از پسماند PET به عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های طبیعی، ضمن کاهش چگالی بتن، به کاهش وزن سازه نیز کمک می‌کند. PET خردشده می‌تواند به عنوان سنگدانه سبک و پایدار در ترکیبات بتن مؤثر باشد [9, 12 & 13] با این حال، تأثیر PET بر ویژگی‌های مکانیکی بتن وابسته به عواملی همچون درصد جایگزینی، اندازه و شکل ذرات و شرایط عمل‌آوری است [14].

از جمله مزایای دیگر این رویکرد می‌توان به کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده مجدد از مواد پلیمری و معدنی زائد، و افزایش عمر مفید سازه‌ها اشاره کرد. با این حال، چالش‌هایی مانند ارزیابی دقیق سازگاری این مواد با سایر اجزای مخلوط بتن، احتمال افت مقاومت فشاری بتن، و تأثیر احتمالی بر ویژگی‌های رئولوژیکی نظیر روانی بتن، از ملاحظات کلیدی این روش به شمار می‌روند [15].

لازم به ذکر است که با وجود مطالعات متعدد در زمینه استفاده جداگانه از مولکولارسیو یا PET، بررسی هم‌زمان این دو جریان بزرگ پسماند در بتن بسیار محدود است. تاکنون پژوهش‌های جامعی که آثار توأم این دو ماده را بر تخلخل، مقاومت فشاری و ریزساختار بتن تحلیل کند، انجام نشده است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات گذشته فاقد رویکردهای آماری مبتنی بر طراحی آزمایش هستند و از روش‌های نوینی همچون روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology-RSM) و طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design-CCD) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه طرح مخلوط بهره نبرده‌اند. این خلأ علمی، ضرورت انجام پژوهشی جامع را برای تحلیل برهم‌کنش متغیرها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده معتبر برجسته می‌سازد، پس در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی رفتار سیستم، بهینه‌سازی فرایند، صرفه‌جویی در منابع و زمان، و دستیابی به نتایجی دقیق و مبتنی بر شواهد علمی، از مدل‌سازی و طراحی آزمایش استفاده شده است. طراحی دقیق آزمایش‌ها و فرایند مدل‌سازی، مستلزم در اختیار داشتن داده‌های معتبر درباره رفتار مواد و تعاملات احتمالی آن‌ها درون سیستم است. اطلاعات گردآوری‌شده باید امکان شناسایی تغییرات ناشی از عوامل مؤثر و تحلیل تأثیر آن‌ها بر مقادیر

پاسخ (RSM) مبتنی بر طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. در مجموع، ۳۰ آزمایش طراحی شد که شامل ۶ تکرار در نقطه مرکزی بود. به منظور افزایش دقت و کاهش خطای آزمایشگاهی، هر یک از طرح‌های مخلوط، سه بار به صورت مستقل اجرا شد.

در فرایند ساخت، مقادیر تعیین‌شده پسماند مولکولارسیو و PET به ترتیب جایگزین سیمان و ماسه شده و با سایر اجزا مخلوط شد. قالب‌ها پیش از بتن‌ریزی روغن‌کاری شدند. بتن در سه لایه در قالب ریخته شد و هر لایه مطابق لزوم ASTM C192 با ۲۰ ضربه میله کوبنده متراکم شد. استفاده از میله کوبنده، مطابق با استاندارد ASTM C192 برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بتن، روشی استاندارد برای تراکم یکنواخت و حذف هوای اضافی در حجم‌های کوچک بتن است. در ادامه، فرایند آزمون اسلامپ روی خمیر بتنی مطابق با استاندارد ملی ایران (ISIRI 3203-2) انجام شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت و اطمینان از گیرش اولیه، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج و به مرحله‌ی عمل‌آوری منتقل شدند. در این مرحله، نمونه‌ها به منظور حفظ رطوبت کافی و تداوم واکنش‌های هیدراتاسیون، به مدت ۲۸ روز در ظروف پلاستیکی در دمای آزمایشگاه ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) نگهداری شدند. انتخاب این رویکرد (مطابق با الزامات استانداردهای ASTM C192 و ASTM C511)، با هدف پیشگیری از تبخیر سریع آب و کنترل فرآیندهای تبادل یونی بین محیط عمل‌آوری و ترکیبات شیمیایی موجود در پسماندها صورت پذیرفت. این رویکرد تضمین‌کننده پایداری ترکیب شیمیایی خمیر سیمان در طول دوره عمل‌آوری بوده و امکان حصول نتایج دقیق‌تر در آزمون‌های بعدی را فراهم می‌آورد. در ادامه، نمونه‌های بتنی با هدف ارزیابی تأثیر شرایط مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن در شرایط مختلف از جمله وزن اولیه نمونه‌ها پس از خارج‌سازی از پوشش پلاستیکی و اندازه‌گیری وزن خشک پس از قرارگیری در کوره با دمای 105 ± 5 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت توزین شدند. پس از انجام این مراحل، نمونه‌ها برای تعیین مقاومت فشاری تحت بارگذاری قرار گرفتند. داده‌های حاصل برای تحلیل آماری، ارزیابی دقیق تأثیر متغیرهای طراحی و استخراج طرح مخلوط بهینه با بهره‌گیری از ابزار تابع مطلوبیت به نرم‌افزار منتقل شده و مورد پردازش قرار گرفت.

اندازه‌گیری‌شده را فراهم سازند. نکته کلیدی در این مسیر، تشخیص معناداری این تغییرات و تفسیر دقیق داده‌ها برای دستیابی به نتایج علمی و قابل اعتماد است [16].

در همین راستا هدف اصلی این پژوهش، بررسی امکان‌سنجی استفاده همزمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن و بهینه‌سازی طرح مخلوط با رویکرد چندهدفه و آماری است.

۲- مواد و روش انجام کار

۲-۱- روش انجام کار

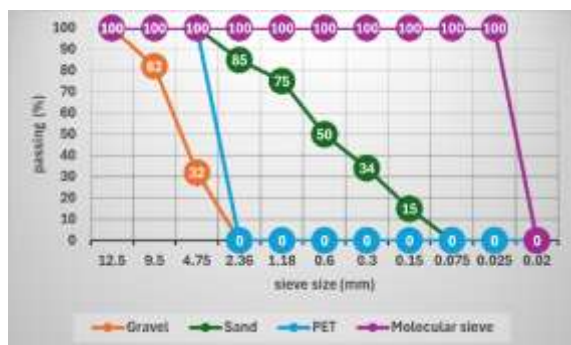
پسماند بطری‌های PET به منظور استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی، پس از شستشوی ۱۵ دقیقه‌ای با آب داغ ($90-100^\circ\text{C}$) درجه سانتی‌گراد) و خشک‌سازی، در بازه دانه‌بندی ۲/۳۶ تا ۴/۷۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه خردکن صنعتی شرکت الیاف کاوه آسیاب و آماده‌سازی شد. انتخاب این محدوده بر اساس لزوم آب و ACI و با هدف جایگزینی مناسب با ماسه انجام گرفت. در ادامه، این ذرات به طرح مخلوط افزوده شدند. به‌طور همزمان، فرآیند خردایش پسماند مولکولارسیو با آسیاب گلوله‌ای به مدت ۵۰ دقیقه صورت گرفت. این زمان‌بندی، حاصل تکرار آزمایش‌ها و دستیابی به مشخصات دانه‌بندی مطلوب بود که هدف از آن، افزایش ریزدانی و فراهم‌سازی امکان جایگزینی جزئی با سیمان بود. پسماند اولیه با ابعاد اولیه ۲ میلی‌متر قطر و ۲ تا ۷ میلی‌متر طول، پس از آسیاب‌کاری به دانه‌بندی ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر رسید. این نتیجه از طریق عبور مواد از الک شماره ۵۰۰ و باقی ماندن آن‌ها روی الک شماره ۶۲۵ (مش) به دست آمد. این دانه‌بندی نهایی، از نظر ابعادی، با ذرات سیمان پرتلند تپ ۲ همخوانی داشته و امکان اختلاط و برهم‌کنش مؤثر با فاز خمیری سیمان را میسر می‌سازد. در طول فرآیند خردایش، پدیده‌ی گلوله‌شدگی مشاهده نشد. چگالی این پسماند با استفاده از روش بالن لوشاتلیه تعیین شد.

به منظور تولید نمونه‌های بتنی در قالب‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر، پارامترهای مستقل مؤثر بر خواص بتن، شامل عوامل و حدود مصرف آن‌ها، با استناد به مبانی آیین‌نامه بتن ایران (مطابق با استانداردهای بین‌المللی ACI و BS) و نتایج حاصل از مطالعات مقدماتی (آزمون‌های اولیه به‌کارگیری جداگانه پسماندها)، تعیین و مشخص شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert (نسخه ۱۳) و با به‌کارگیری روش سطح

بهینه‌سازی هستند. هر یک از این متغیرها در پنج سطح کدگذاری شده ($-\alpha$ ، -1 ، 0 ، $+1$ و $+\alpha$) مورد بررسی قرار گرفتند. مقادیر کمی سطوح متغیرهای مستقل در جدول (۱) ارائه شده است. در همین راستا، تعداد ۳۰ آزمایش که شامل ۶ تکرار در نقطه مرکزی بود، تنظیم، طراحی و اجرا شد.

۲-۳- ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

به منظور محاسبات طرح مخلوط و ارزیابی اثر پسماندها بر مشخصه‌های بتن، چگالی پسماند مولکولاریسیو با استفاده از بالن لوشاتلیه اندازه‌گیری شد که برابر با $2/43 \text{ g/cm}^3$ به‌دست آمد. چگالی پسماند PET نیز $1/40 \text{ g/cm}^3$ تعیین شد. مقادیر چگالی سیمان پرتلند ($3/15 \text{ g/cm}^3$) و ماسه طبیعی ($2/25 \text{ g/cm}^3$) مطابق با استانداردهای رایج در نظر گرفته شد. پارامترهای طرح مخلوط بر اساس طرح‌های پیشنهادی نرم‌افزار Design Expert تنظیم شد. در این طرح‌ها، سهم سنگدانه‌های درشت (شن با دانه‌بندی ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر) و سنگدانه‌های ریز (ماسه با اندازه کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) به ترتیب ۴۲ و ۳۳ درصد از کل وزن بتن تعیین شد. شکل (۱)، منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی بر مبنای روش ملی طرح مخلوط ایران را نشان می‌دهد. در این نمودار، درصد عبوری و مانده ترکیبات بر اساس الک‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، برای سنگدانه‌های درشت (شن)، مقادیر کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر به دلیل عدم حضور در ترکیب واقعی بتن، صفر لحاظ شده‌اند. در ادامه، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در ظروف پلاستیکی، نمونه‌ها در حالت‌های مختلف از قبیل وزن اولیه پس از خروج از پوشش پلاستیکی و وزن اشباع پس از غوطه‌وری در آب توزین شدند. این مقادیر مبنای محاسبه شاخص‌های فیزیکی بتن قرار گرفتند.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها و پسماندهای مولکولاریسیو و PET
Fig. 1. Gradation Curve of Aggregates and Molecular Sieve & PET Wastes

جدول ۱. سطوح تغییرات پارامترها

Table 1. Parameter change levels

Factor	Unit	+ α	Level (-1)	Level (0)	Level (+1)	+ α
Cement content (A)	g	200	250	300	350	400
Molecular sieve / Cement ratio (B)	%	5	11.25	17.5	23.75	30
PET / Sand ratio (C)	%	2	4	6	8	10
Water-to-cement ratio (D)	%	40	45	50	55	60

۲-۲- مدل سازی و طراحی آزمایش

فرایند طراحی آزمایش‌ها با شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر اساس مطالعات پیشین، داده‌های تجربی و آزمون‌های مقدماتی و تعیین فضای طراحی مناسب آغاز شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش RSM و طرح CCD در نرم‌افزار Design Expert (نسخه ۱۳) انجام شد. در این طرح، مقدار پارامتر α برابر با ۲ در نظر گرفته شد؛ این انتخاب، مطابق با راهنمای نرم‌افزار و استاندارد طرح‌های CCD چهارعاملی، ضمن حفظ محدوده عملی متغیرها، امکان برآزش دقیق مدل درجه دوم را فراهم می‌آورد و بررسی آثار خطی، درجه دوم و متقابل عوامل مستقل را میسر می‌سازد. چهار متغیر مستقل شامل مقدار سیمان (A)، نسبت مولکولاریسیو به سیمان (B)، نسبت PET به ماسه (C) و نسبت آب به سیمان (D) و دو پاسخ مقدار تخلخل و مقاومت فشاری به‌عنوان عوامل اصلی طراحی انتخاب شدند.

مقدار سیمان در محدوده ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم بر اساس دامنه متداول مصرف سیمان در بتن‌های مشابه و نیز ارزیابی‌های زیست‌محیطی پژوهش تعیین شد. برای نسبت مولکولاریسیو، با وجود آنکه آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بازه ۵ تا ۱۵ درصد را برای مواد پوزولانی مشابه توصیه می‌کند، محدوده ۵ تا ۳۰ درصد انتخاب شد تا امکان بررسی آثار فراتر از حدود آیین‌نامه‌ای و ارزیابی ظرفیت پوزولانی این ماده فراهم شود. محدوده ۲ تا ۱۰ درصد برای جایگزینی PET نیز بر مبنای مطالعات گذشته و نتایج آزمون‌های اولیه انتخاب شد؛ به‌طوری‌که مقادیر کمتر از ۲ درصد اثر محسوسی بر خواص بتن ندارند و مقادیر بیش از ۱۰ درصد موجب افت شدید مقاومت فشاری به دلیل افزایش حفرات و کاهش چسبندگی در ماتریس سیمانی می‌شوند [9, 12 & 13]. همچنین نسبت آب به سیمان در دامنه ۴۰ تا ۶۰ درصد بر مبنای محدوده رایج در بتن‌های سازه‌ای و به منظور بررسی هم‌زمان تأثیر این نسبت بر مقاومت و دوام انتخاب شد. این بازه‌ها از نظر علمی معتبر بوده و پوشش‌دهنده دامنه رفتاری مطلوب برای فرایند

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان

Table 2. Chemical characteristics of cement

Chemical composition	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Content (%)	0.54	0.22	1.71	1.96	63.1	3.56	3.38	21.25

شود. پس از رسیدن نمونه‌ها به دمای محیط، وزن خشک آن‌ها (W_d) با ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، نمونه‌های خشک‌شده به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شدند تا منافذ باز موجود در ساختار بتن به‌طور کامل اشباع شود. پس از خروج از آب، رطوبت سطحی نمونه‌ها حذف شده و وزن اشباع (W_s) ثبت شد. حجم کل نمونه (V_t) با توجه به شکل هندسی مکعبی آن و مطابق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$V_t = a^3 = 10^3 = 1000 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

حجم منافذ (V_v)، که معادل حجم آب جذب‌شده توسط نمونه است، از اختلاف وزن نمونه در حالت اشباع و خشک و بر اساس چگالی آب، مطابق رابطه (۲) به‌دست آمد:

$$V_v = \frac{(W_s - W_d)}{\rho_w} \quad (2)$$

که در آن، چگالی آب (ρ_w) برابر با ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد.

در نهایت، درصد تخلخل نمونه‌های بتنی (P) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (3)$$

۲-۵- مواد اولیه

در این پژوهش، مواد مصرفی مختلفی به کار گرفته شد که شامل پسماند مولکولارسیو نوع A با نام تجاری HYG03C تهیه شده از پتروشیمی مروارید، پسماند بطری‌های PET، سیمان استاندارد پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان فیروزکوه (ترکیب شیمیایی آن در جدول (۲) ارائه شده است)، شن و ماسه طبیعی و روغن (به منظور عایق‌کاری قالب‌ها) بود. آب و آب مقطر نیز به‌عنوان اجزای دیگر این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۵-۱- پسماند مولکولارسیو HYG03C

پسماند مورد استفاده در این پژوهش، Molecular Sieve HYG03C است که پیشتر به عنوان زئولیت سنتزی نوع A با پایه

۲-۴- آزمایشات انجام شده

۲-۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوره

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره مطابق با استاندارد ۳-۱۶۰۸ آیین‌نامه بتن ایران با هدف بررسی ظرفیت نمونه‌ها در تحمل تنش‌های فشاری و ارزیابی عملکرد آن‌ها در فرایند تثبیت و جامدسازی مواد زائد انجام شد. در این پژوهش، به دلیل استفاده از پسماند خطرناک مولکولارسیو که حاوی مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین بوده است، ملاک ارزیابی بر اساس دستورالعمل‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) انتخاب شد. بر اساس معیارهای EPA، حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای مواد تثبیت و جامدسازی شده که به‌منظور دفن ایمن در محل‌های دفع پسماند استفاده می‌شوند، برابر با ۰/۳۵ مگاپاسکال است.

۲-۴-۲- تعیین اسلامپ نمونه‌های بتنی

آزمون اسلامپ (Slump Test) بتن به عنوان روشی استاندارد برای ارزیابی کارایی بتن تازه پیش از استفاده در سازه‌های بتنی مطابق با استاندارد ملی ایران (ISIRI 3203-2) انجام شد. قالب اسلامپ با ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و قطرهای دهانه بالایی ۱۰۰ میلی‌متر و پایینی ۲۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا، بتن در سه لایه متوالی داخل قالب اسلامپ ریخته شد و هر لایه با اعمال ۲۵ ضربه یکنواخت توسط کوبنده متراکم شد. پس از تکمیل فرایند تراکم، قالب در بازه زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه به‌صورت عمودی برداشته شد و مقدار افت اسلامپ با دقت ۱۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

۲-۴-۳- تعیین تخلخل نمونه‌های بتنی

تخلخل نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام، مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری بتن دارد. در این پژوهش، درصد تخلخل نمونه‌های بتنی با استفاده از روش اشباع-خشک تعیین شد. بدین منظور، نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای 105 ± 5 درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا تمامی رطوبت آزاد و جذب‌شده حذف

فرآیندهای پس از آن، خاصیت جذب رطوبت خود را به شدت از دست داده بود. این یافته در بررسی‌های اولیه، از جمله آزمون الک تر که به دلیل جذب ناکافی آب نتایج دقیقی ارائه نداد، تأیید شد. این کاهش جذب آب به این معنی است که پسماند، آب آزاد مخلوط بتن را به میزان ناچیزی مصرف کرده است. بنابراین، مقادیر اسلامپ مشاهده شده منطقی بوده و روانی کافی برای تراکم مؤثر را تضمین می‌کند. این وضعیت، نیاز به افزودنی‌های روان‌کننده را مرتفع ساخته و ضمن اطمینان از تکمیل واکنش‌های هیدراسیون سیمان، دستیابی به تراکم مناسب را تسهیل می‌نماید. مهم‌تر از آن، از بروز مشکلات احتمالی ناشی از جذب آب بیش از حد پسماند (مانند کاهش شدید اسلامپ، دشواری تراکم، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری) جلوگیری می‌کند.

نتایج آزمون‌های تخلخل و مقاومت فشاری (که جزئیات آن‌ها در بخش‌های پیشین و جدول (۳) ارائه شده است) عملکرد مطلوب نمونه‌ها را تأیید می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که پسماند مولکولارسیو HYG03C، با وجود کاهش ظرفیت جذب آب، بدون ایجاد اختلال در کارایی (اسلامپ) یا تضعیف خواص مکانیکی نهایی، با موفقیت در بتن مورد استفاده قرار گرفته و پتانسیل بهبود خواص بلندمدت را از طریق افزایش سطح مؤثر ذرات برای واکنش‌های هیدراسیون فراهم می‌آورد.

۳-۲- تجزیه و تحلیل مدل و داده‌های آماری

در مدلسازی این پژوهش، تخلخل و مقاومت فشاری به عنوان پاسخ‌های اصلی نرم‌افزار در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به احتمال همبستگی بالا بین چگالی و تخلخل، بررسی تخلخل به عنوان شاخصی مؤثر در دوام بلند مدت بتن در اولویت قرار گرفته است. جدول (۳) نتایج برخی از آزمایش‌هایی را که روی نمونه‌های بتنی و با بهره‌گیری از روش RSM انجام شده‌اند را ارائه می‌کند.

۳-۲-۱- بررسی اعتبار مدل‌ها با استفاده از ضرایب تعیین

اعتبار مدل‌های پیشنهادی با استفاده از ضرایب تعیین و شاخص‌های رگرسیونی ارزیابی شده است تا میزان تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده بررسی شود. جدول ۴، آمار برازش و مقادیر ضرایب تعیین مربوط به مدل‌های پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری را ارائه می‌دهد.

پتاسیم-سدیم در واحد خشک‌سازی گاز در پتروشیمی مروارید عسلویه به کار گرفته می‌شد. این ماده پس از پایان عمر مفید خود جمع‌آوری شد. بر اساس اطلاعات فنی ارائه شده توسط سازنده، مولکولارسیو HYG03C دارای مشخصات زیر است:

- نوع: ژئولیت سنتزی نوع A
- ساختار کریستالی: پتاسیم-سدیم
- کاربرد اصلی: آبیگری (جذب رطوبت) جریان‌های هیدروکربنی غیراشباع در واحدهای صنعتی.
- اندازه ذرات (قطر): ۲ mm (برای کاربرد اصلی جذب رطوبت)
- چگالی حجمی فشرده (Bulk Density): $\leq 0.66 \text{ g/ml}$ (مطابق با ASTM D 4164)
- مقاومت در برابر خرد شدن (Crush Strength): $\leq 40 \text{ N}$ (مطابق با ASTM D 4179)
- ظرفیت جذب آب در حالت تعادل (Equilibrium Water Uptake): $\leq 20\%$ درصد وزنی (در ۵۰ درصد رطوبت نسبی و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، مطابق با ASTM E 104)
- محتوای رطوبت (Moisture Content): $\geq 1\%$ درصد وزنی (پس از حرارت‌دهی به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد، مطابق با BS 3482-2)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایشات مکانیکی

در ابتدا، کارایی مخلوط‌های بتنی با انجام آزمون اسلامپ ارزیابی شد. مقدار اسلامپ تمامی نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر مطابق جدول (۳) قرار گرفتند که نشان‌دهنده روانی مناسب برای دستیابی به تراکم مطلوب و یکنواخت است. افزایش نسبت آب به سیمان، مطابق انتظار، منجر به افزایش روانی و اسلامپ شد. همچنین، افزودن پسماند مولکولارسیو تا ۱۵ درصد وزنی سیمان و ۴ درصد وزنی PET (نسبت به ماسه)، ضمن تأثیر بر سایر خواص، اسلامپ را در محدوده قابل قبولی حفظ کرد و حتی در مواردی نسبت به نمونه‌های شاهد، بهبود بخشید. یک مشاهده دارای اهمیت در خصوص پسماند مولکولارسیو، کاهش قابل توجه ظرفیت جذب آب آن بود. این پسماند صنعتی، با وجود ماهیت جاذب رطوبت مولکولارسیو، به دلیل کاربرد قبلی در صنایع پتروشیمی و

جدول ۳. نتایج آزمایشات انجام شده به روش سطح پاسخ

Table 3. Results of tests conducted using the response surface method

Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Response 1	Response 2	Slump mm
	A:Cement gr	B:Molecular sieve/Cement %	C:PET/Sand %	D:Water/Cement %	porosity %	Compressive strength MPa	
1	250	11.25	4	55	5.65	21.9	90
2	250	11.25	8	45	6.4	19.94	81
3	350	23.75	4	55	5.25	29.5	85
4	300	17.5	6	50	4.8	25.8	86
5	350	23.75	8	45	6.1	25.5	73
6	350	11.25	8	55	5.72	27.5	94
7	250	23.75	4	45	5.8	22.5	85
8	350	11.25	4	45	4.39	31.1	50
9	250	23.75	8	55	7.47	16.5	100
10	300	17.5	6	50	4.8	25.5	85
11	350	11.25	8	45	5.37	27.57	66
12	250	11.25	8	55	6.52	18.34	96
13	300	17.5	6	50	4.6	26.4	87
14	350	23.75	8	55	6.3	26.6	90
15	350	11.25	4	55	4.25	33.3	70
16	250	11.25	4	45	5	23.7	75
17	350	23.75	4	45	4.7	28.8	64
18	250	23.75	4	55	6.38	21.79	98
19	250	23.75	8	45	6.8	20.9	91
20	300	17.5	6	50	4.5	26.6	85
21	400	17.5	6	50	4.45	33.8	72
22	200	17.5	6	50	6.3	16.41	85
23	300	17.5	6	40	6.5	25.4	83
24	300	17.5	2	50	4.2	28	75
25	300	17.5	6	60	7.2	24.5	99
26	300	17.5	6	50	4.71	26	84
27	300	5	6	50	5	26.12	75
28	300	17.5	6	50	4.75	26.2	88
29	300	30	6	50	6.5	23.4	97
30	300	17.5	10	50	6.68	20	95

جدول ۴. آمار برازش

Table 4. Fit Statistics

Factor	Porosity	Compressive strength
R ²	0.9978	0.9970
Adjusted R ²	0.9954	0.9937
Predicted R ²	0.9845	0.9764
C.V. %	1.2700	1.1400
Adeq Precision	65.3228	63.0023

رگرسیون را در پیش بینی تخلخل و مقاومت فشاری تأیید می کند. مقدار نزدیک به عدد یک R^2 ، Adjusted R^2 و Predicted R^2 برای پاسخ ها، به ترتیب نشان دهنده تطابق بالای مدل ها با داده های آزمایشگاهی و توانایی آن ها در توضیح واریانس موجود در داده ها، بیش برازش (Overfitting) نشدن مدل ها و برخورداری از قابلیت مدل ها در پیش بینی داده های جدید می باشد. مقادیر پایین ضریب تغییرات (Coefficient of Variation-C.V.) نشان دهنده ی پراکندگی کم داده ها و دقت بالای مدل ها در برآورد پاسخ های

نتایج ارائه شده در جدول (۴)، عملکرد دقیق و کارآمد مدل های

آزمایشی است. علاوه بر این، مقدار شاخص کفایت سیگنال (Adeq Precision) نشان‌دهنده قدرت بالای مدل‌ها در تفکیک سیگنال از نویز و قابلیت اعتماد آن‌ها در تحلیل داده‌ها است. در همین راستا بررسی آنالیز نرمالیتی باقی‌مانده‌ها نشان داد که نقاط داده در امتداد خط نرمال قرار گرفته‌اند و این موضوع بیانگر نرمال بودن خطاها و رعایت الزامات مدل رگرسیونی است. انطباق نزدیک مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نیز نشان داد که مدل RSM توانایی بالایی در پیش‌بینی رفتار بتن دارد و پراکندگی اندک نقاط حول خط ۴۵ درجه (شکل آن در متن آورده نشده است) مؤید دقت مدل است. علاوه بر این، الگوی پراکندگی باقی‌مانده‌ها حاکی از آن بود که خطاها فاقد الگوی سیستماتیک بوده و مدل در کل محدوده متغیرها پایدار است.

۲-۲-۳- بررسی اعتبار مدل‌ها به کمک آنالیز واریانس‌ها (ANOVA)

آنالیز واریانس (Analysis of Variance-ANOVA) به منظور بررسی معناداری مدل‌ها و ارزیابی میزان اثرگذاری متغیرهای

مستقل بر پاسخ‌ها انجام شد. این روش، میزان تطابق مدل با داده‌های آزمایشگاهی را مشخص کرده و اعتبار پیش‌بینی‌های انجام شده را ارزیابی می‌کند. مهم‌ترین شاخص در آنالیز واریانس، مقدار احتمال P-value (Probability value) است که احتمال رخداد یک داده تحت فرضیه باطل را نشان می‌دهد. در مدل‌هایی با اطمینان بالا (از جمله مدل پژوهش حاضر)، مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ است که به معنای تأثیر معنادار پارامترهای مربوطه بر پاسخ‌های مدل با سطح اطمینان بالاتر از ۹۵ درصد است. نتایج ANOVA مربوط به مدل‌های پیش‌بینی تخلخل و مقاومت فشاری در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

مطابق این جدول، مدل به خوبی داده‌ها را برازش کرده و هیچ مشکل معناداری در تطابق مدل با داده‌های تجربی وجود ندارد. به عبارتی مدل‌ها از نظر آماری معنادار بوده و مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵ و F-Value بالا نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل‌ها و تأثیر معنادار فاکتورها بر پاسخ‌ها است. تمامی فاکتورهای اصلی A، B، C و D تأثیر معناداری بر پاسخ‌ها دارند و علاوه بر آن، آثار درجه دوم

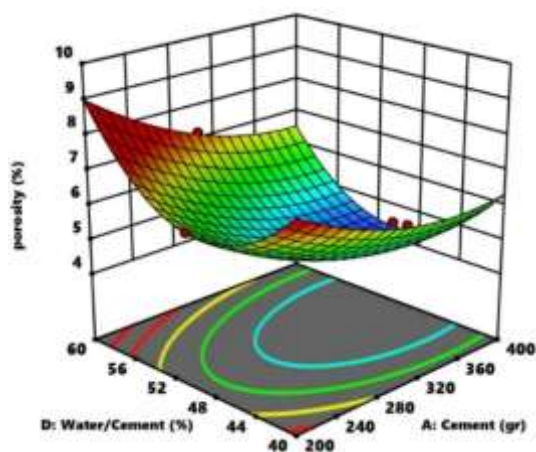
جدول ۵. آنالیز واریانس جهت بررسی تخلخل و مقاومت فشاری به روش سطح پاسخ

Table 5. Analysis of variance to investigate porosity and compressive strength using the response surface method

Source	Porosity					Compressive strength				
	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value
Block	0.2449	2	0.1224			3.41	2	1.71		
Model	26.61	14	1.90	420.95	< 0.0001	535.59	14	38.26	306.12	< 0.0001
A-Cement	5.65	1	5.65	1250.15	< 0.0001	409.04	1	409.04	3272.98	< 0.0001
B-Molecular sieve/Cement	3.01	1	3.01	666.65	< 0.0001	11.62	1	11.62	92.98	< 0.0001
C-PET/Sand	8.43	1	8.43	1865.76	< 0.0001	87.17	1	87.17	697.53	< 0.0001
D-Water/Cement	0.7993	1	0.7993	177.01	< 0.0001	1.70	1	1.70	13.57	0.0028
AB	0.0042	1	0.0042	0.9356	0.3511	2.96	1	2.96	23.67	0.0003
AC	0.0182	1	0.0182	4.04	0.0658	0.1089	1	0.1089	0.8714	0.3676
AD	0.0702	1	0.0702	15.55	0.0017	9.67	1	9.67	77.39	< 0.0001
BC	0.0020	1	0.0020	0.4484	0.5148	0.7921	1	0.7921	6.34	0.0257
BD	0.0650	1	0.0650	14.40	0.0022	0.2601	1	0.2601	2.08	0.1728
CD	0.0056	1	0.0056	1.25	0.2846	1.80	1	1.80	14.37	0.0022
A ²	0.6519	1	0.6519	144.36	< 0.0001	1.62	1	1.62	12.93	0.0033
B ²	1.69	1	1.69	373.32	< 0.0001	2.97	1	2.97	23.75	0.0003
C ²	0.7966	1	0.7966	176.40	< 0.0001	7.39	1	7.39	59.11	< 0.0001
D ²	7.50	1	7.50	1660.87	< 0.0001	2.17	1	2.17	17.39	0.0011
Residual	0.0587	13	0.0045			1.62	13	0.1250		
Lack of Fit	0.0529	10	0.0053	2.74	0.2205	1.54	10	0.1540	5.43	0.0952
Pure Error	0.0058	3	0.0019			0.0850	3	0.0283		
Cor Total	26.92	29				540.62	29			

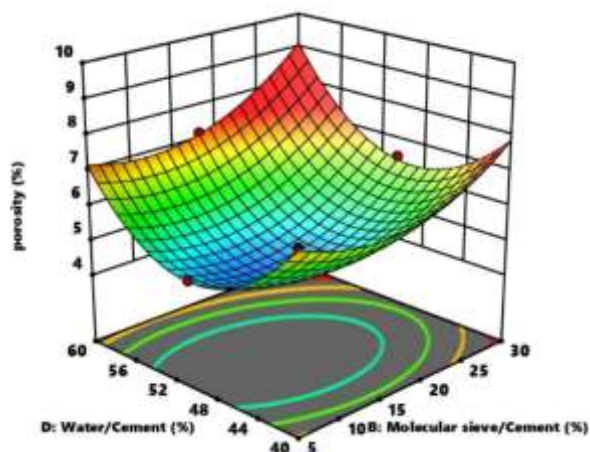
کاهش یافته و ساختار بتن متراکم و کم تخلخل می‌شود. این رفتار با یافته‌های LeBow در سال 2018 همخوانی دارد، که نشان داد افزایش سیمان در محدوده بهینه موجب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که نسبت بالای آب به سیمان تخلخل را افزایش داده و عملکرد مکانیکی بتن را کاهش می‌دهد [17].

شکل (۳) اثر برهم‌کنش نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب به سیمان بر تخلخل بتن را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که تخلخل بتن به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر مقدار مولکولارسیو و نسبت آب به سیمان قرار دارد و کمینه تخلخل تنها در یک ناحیه بهینه از فضای طراحی حاصل می‌شود. در این ناحیه، که متناظر با



شکل ۲. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت آب به سیمان بر تخلخل

Fig. 2. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and water-to-cement ratio on porosity



شکل ۳. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب

به سیمان بر تخلخل

Fig. 3. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and water to cement ratio on porosity

(A^2 , B^2 , C^2 , D^2) و برخی تعاملات مانند AD نیز معنادار هستند. این موضوع نشان‌دهنده وجود تعاملات غیرخطی میان فاکتورها است که می‌تواند نقش مهمی در تغییرات تخلخل و مقاومت فشاری ایفا کند. مقدار Residual برای تخلخل و مقاومت فشاری پراکندگی کم داده‌های باقی‌مانده را نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که مدل برازش دقیقی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. مقدار Lack of Fit با F-Value معادل ۲/۷۴ برای تخلخل و ۵/۴۳ برای مقاومت فشاری و P-value برابر با ۰/۲۲۰۵ برای تخلخل و ۰/۰۹۵۲ برای مقاومت فشاری نیز نشان می‌دهد که مدل از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است.

در همین راستا، مدل نهایی حاصل از تحلیل رگرسیون بر پایه مقادیر کد شده عوامل آزمایشگاهی، پس از اعمال تحلیل معناداری آماری و حذف متغیرهای فاقد اثر معنادار، به صورت رابطه ۴ و ۵ به دست آمد.

$$\text{Porosity} = 4.69 - 0.485A + 0.354B + 0.593C + 0.183D - 0.066AD + 0.064BD + 0.154A^2 + 0.248B^2 + 0.170C^2 + 0.523D^2 \quad (4)$$

$$\text{Compressive Strength} = 26.08 + 4.13A - 0.70B - 1.91C - 0.27D - 0.43AB + 0.78AD + 0.22BC - 0.34CD - 0.24A^2 - 0.33B^2 - 0.52C^2 - 0.28D^2 \quad (5)$$

تحلیل این روابط نشان می‌دهد که با افزایش یا کاهش مقدار متغیرهای طراحی، هرکدام از پاسخ‌ها به صورت معناداری افزایش و یا کاهش می‌یابند. به عبارتی، ضرایب مثبت متغیرها حاکی از اثر افزایشی و ضرایب منفی آن‌ها حاکی از اثر کاهش‌ی بر پاسخ‌ها هستند.

۳-۳- تحلیل برهم‌کنش پارامترهای اثرگذار بر تخلخل بتن

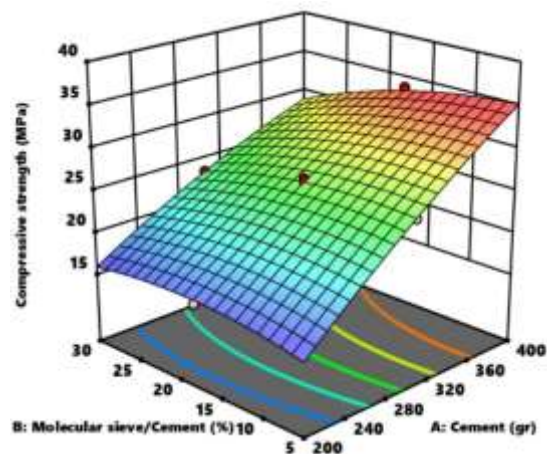
شکل (۲) اثر متقابل مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان را بر تخلخل بتن نشان می‌دهد. در مقادیر پایین سیمان (۲۰۰-۲۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان بالا (۰/۵۶-۰/۶۰)، تخلخل به بیشترین مقدار خود می‌رسد که ناشی از عدم وجود خمیر سیمان کافی برای پر کردن خلل و فرج و تبخیر آب اضافی پس از گیرش اولیه است و در امتداد آن چالش‌هایی برای هیدراتاسیون مؤثر سیمان و تشکیل فازهای چسبنده C-S-H و بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی را به همراه دارد. در مقابل، در مقادیر بالای سیمان (۳۲۰-۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و نسبت آب به سیمان پایین (۰/۴۰-۰/۴۸)، تخلخل به کمترین مقدار خود

۳-۴- رفتار مقاومت فشاری

تحلیل نتایج شکل (۴) نشان‌دهنده تأثیر غالب مقدار سیمان بر مقاومت فشاری بتن است؛ افزایش میزان سیمان به طور مستقیم با افزایش شدت واکنش‌های هیدراسیون، تشکیل فازهای C-S-H، بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی و کاهش تخلخل همراه بوده و منجر به افزایش قابل توجه مقاومت می‌شود. در مقابل، نسبت جایگزینی سیمان با پسماند مولکولارسیو اثر غیرخطی از خود بروز می‌دهد. درصدهای جایگزینی تا ۱۰-۱۵ درصد، تغییر محسوسی در مقاومت ایجاد نکرده و حتی پتانسیل اثر پوزولانی (Pozzolanic effect) این ماده را با تشکیل فازهای C-S-H ثانویه و بهبود ریزساختار خمیر سیمان، نمایان می‌سازد. این رفتار تا حدودی با یافته‌های (Shi و همکاران (۲۰۲۲)، Farzaneh و همکاران (۲۰۱۹) و Golshan و همکاران (۲۰۲۴)) مطابقت دارد [19, 20, &21]. با این حال، افزایش نسبت مولکولارسیو به بیش از ۱۵-۲۰ درصد منجر به کاهش معنادار مقاومت فشاری می‌شود. این افت عملکرد به عواملی چون کاهش سهم فازهای فعال سیمانی، محدودیت در تشکیل محصولات هیدراتاسیون و افزایش تخلخل ذاتی ذرات مولکولارسیو و ضعف در فصل مشترک (Interfacial Transition Zone - ITZ) نسبت داده می‌شود. تشدید این کاهش مقاومت با نسبت آب به سیمان بالا شکل (۹) مؤید اهمیت کنترل تخلخل و کیفیت ITZ است.

در همین راستا، بهینه‌سازی طرح مخلوط، که در بخش ۵-۳ تشریح شده، کمینه‌سازی تخلخل را به عنوان یک معیار کلیدی برای تضمین مقاومت فشاری و پایداری بلندمدت بتن در نظر گرفته است. نتایج نشان داد که بیشینه مقاومت فشاری بتن در محدوده مصرف ۳۰۰ تا ۴۰۰ گرم سیمان و با جایگزینی کمتر از ۱۵ درصد پسماند مولکولارسیو حاصل می‌شود. با وجود کاهش مقاومت در درصدهای بالاتر جایگزینی، ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از کاهش مصرف سیمان، استفاده از مقادیر بالاتر مولکولارسیو را در کاربردهای غیرسازه‌ای یا بتن سبک توجیه‌پذیر می‌سازد.

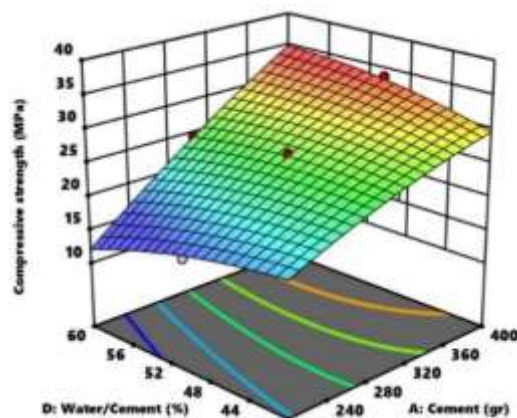
نتایج شکل (۵) بیانگر آن است که افزایش نسبت آب به سیمان موجب کاهش محسوس مقاومت فشاری می‌شود؛ به طوری که در نسبت‌های بالای آب به سیمان، آب آزاد اضافی پس از تبخیر منجر به افزایش تخلخل، کاهش تراکم ژل C-S-H و تضعیف پیوستگی



شکل ۴. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت مولکولارسیو به سیمان بر

مقاومت فشاری

Fig. 4. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and molecular sieve to cement ratio on compressive strength

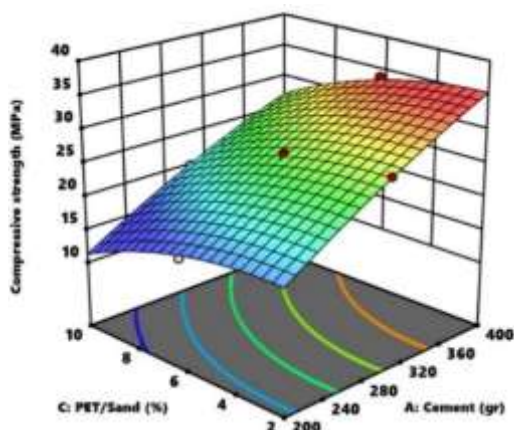


شکل ۵. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت

فشاری

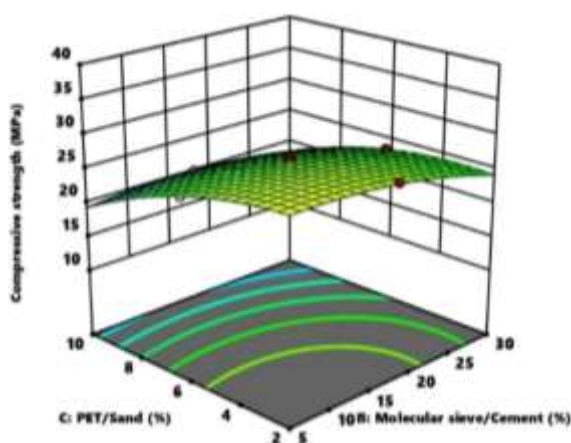
Fig. 5. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and water-to-cement ratio on compressive strength

مقادیر نسبتاً پایین مولکولارسیو (حدود ۱۰-۱۵ درصد) و نسبت آب به سیمان در بازه ۰/۴۸-۰/۵۲ است، ساختار بتن متراکم‌تر بوده و پیوستگی ماتریس سیمانی در وضعیت مطلوبی قرار دارد. در این شرایط، حضور محدود ماده متخلخل در کنار کنترل آب آزاد موجب کاهش فضاهای خالی، بهبود هیدراتاسیون مؤثر سیمان و در نتیجه کاهش تخلخل کل می‌شود. این رفتار با نتایج گزارش‌شده توسط Jierula و همکاران (۲۰۲۴)، Shi و همکاران (۲۰۲۲) و Zheng و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد که کاهش تخلخل را به تعادل مناسب میان مواد متخلخل و خمیر سیمان نسبت داده‌اند [16, 18, &19].



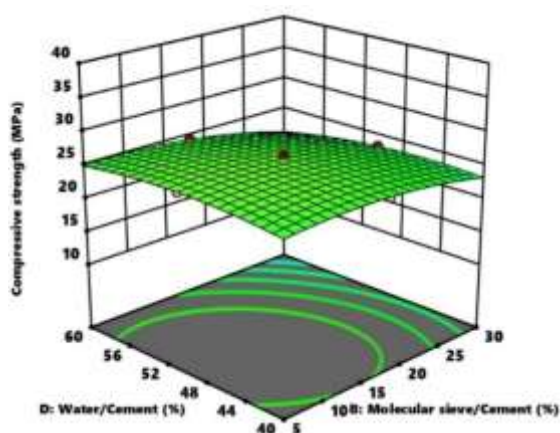
شکل ۶. نمودار سه بعدی اثر متقابل سیمان و نسبت PET به ماسه بر مقاومت فشاری

Fig. 6. Three-dimensional diagram of the interaction effect of cement and PET to sand ratio on compressive strength



شکل ۷. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت PET به ماسه بر مقاومت فشاری

Fig. 7. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and PET to sand ratio on compressive strength



شکل ۸. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت مولکولارسیو به سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری

Fig. 8. Three-dimensional diagram of the interaction effect of molecular sieve to cement ratio and water to cement ratio on compressive strength

ماتریس سیمانی می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب مقدار سیمان بالا و نسبت آب به سیمان پایین مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین مقاومت مربوط به مقادیر پایین سیمان همراه با نسبت‌های بالای آب به سیمان است. این نتایج با یافته‌های Lebow (۲۰۱۸)، Jierula و همکاران (۲۰۲۴) و Zheng و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد؛ در این مطالعات نیز گزارش شده است که کنترل نسبت آب به سیمان و تأمین مقدار بهینه سیمان، موجب کاهش تخلخل، بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [18-16].

نتایج شکل (۶) بیانگر آن است که با افزایش نسبت PET به بیش از حدود ۶ تا ۸ درصد، مقاومت فشاری بتن به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این کاهش به ضعف چسبندگی ذرات PET با ماتریس سیمانی و ایجاد ناپیوستگی در ناحیه انتقالی بین فازهای آلی و معدنی نسبت داده می‌شود. افزایش مقدار سیمان اثر غالب و تقویت‌کننده‌ای بر مقاومت فشاری دارد. بیشترین مقاومت فشاری در ترکیب مقدار سیمان ۳۶۰ تا ۴۰۰ گرم و نسبت PET کمتر از ۶ درصد حاصل می‌شود، در حالی که کمترین مقاومت مربوط به مقادیر پایین سیمان همراه با درصد‌های بالای PET است. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ Qaidi و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که جایگزینی بالای PET موجب افزایش تخلخل و افت قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که مقادیر محدود آن بدون آسیب جدی به عملکرد مکانیکی قابل استفاده است [14-16]. همچنین، مرور جامع Chong و Shi (۲۰۲۳) بیان می‌کند که کاهش مقاومت بتن در حضور PET اجتناب‌ناپذیر است، اما در سطوح پایین جایگزینی، مقاومت قابل قبول باقی می‌ماند [15].

بررسی شکل (۷) بیانگر آن است که بیشینه مقاومت فشاری در محدوده مولکولارسیو ۱۰-۱۵ درصد و نسبت PET کمتر از ۵ درصد حاصل می‌شود که نشان‌دهنده امکان استفاده کنترل‌شده از این افزودنی‌ها بدون تضعیف ماتریس سیمانی است. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین در رابطه با اثر افزودنی‌ها در بتن همخوانی دارد [14, 15, & 17].

شکل (۸) نشان می‌دهد که اثر نسبت مولکولارسیو به سیمان غیرخطی است؛ جایگزینی در محدوده ۱۵ درصد، باعث بهبود نسبی مقاومت می‌شود که به واکنش پوزولانی و تشکیل C-S-H ثانویه مربوط است، اما مقادیر بالاتر مقاومت را کاهش می‌دهند.

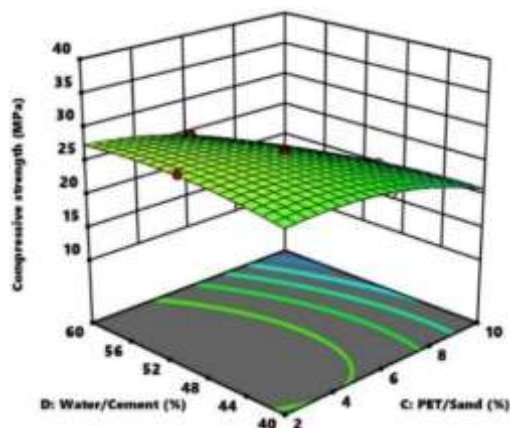
۳-۵- بهینه‌سازی

طرح مخلوط بتن با استفاده از تابع مطلوبیت، با هدف کمینه‌سازی تخلخل و بیشینه‌سازی مقاومت فشاری بهینه‌سازی شد. تخلخل نقش کلیدی در دوام، پایداری بلندمدت بتن و تثبیت آلاینده‌های پسماند مولکولارسیو دارد. در این فرآیند، چهار متغیر مستقل ذکر شده در بخش‌های پیشین در بازه‌های طراحی شده مورد بررسی قرار گرفتند. در تابع مطلوبیت، کمینه‌سازی تخلخل با درجه اهمیت ۴ و بیشینه‌سازی مقاومت فشاری با درجه اهمیت ۳ به عنوان اهداف اصلی در نرم افزار Design Expert تعریف شدند. از میان ترکیبات پیشنهادی مدل، ترکیب بهینه بر اساس دستیابی هم‌زمان به حداقل مقدار تخلخل و بیشترین مقدار مقاومت فشاری انتخاب شد؛ به گونه‌ای که ضمن حفظ عملکرد مکانیکی مناسب، مصرف سیمان کاهش یابد و کمترین نسبت آب به سیمان با بیشینه استفاده از پسماندهای مولکولارسیو و PET حاصل شود. این رویکرد چندهدفه امکان دستیابی به طرح مخلوطی متعادل از نظر خواص مکانیکی، دوام و ملاحظات زیست‌محیطی را فراهم ساخت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که ترکیب بهینه با مطلوبیت بالا شامل ۳۹۳ گرم سیمان، ۲۱/۵۶ درصد مولکولارسیو، ۲/۸۵ درصد PET و نسبت آب به سیمان ۰/۵۱۵ است. نمونه بهینه در سه تکرار ساخته شد و تحت آزمون‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برابر با ۷۵ میلی‌متر به دست آمد. نتایج آزمایشگاهی مربوط به تخلخل و مقاومت فشاری (۲۸ روزه) نمونه مذکور در جدول (۶) ارائه شده است. مقایسه مقادیر تجربی با نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار، تطابق قابل‌قبولی را نشان داد که درستی فرآیند بهینه‌سازی و دقت مدل آماری را تأیید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش برای نخستین بار نشان داد که استفاده هم‌زمان پسماندهای مولکولارسیو و PET نه تنها بتنی با مقاومت سازه‌ای و کارایی مطلوب تولید می‌کند، بلکه:

- قابلیت استفاده هم‌زمان از پسماندهای مولکولارسیو و PET در بتن به عنوان مصالح جایگزین، از نظر عملی و اجرایی قابل تحقق بوده و در شرایط بهینه، هیچ اختلال ساختاری در بتن ایجاد نمی‌کند.
- بهبود خواص فیزیکی نمونه‌های بتن در ترکیب بهینه مشهود



شکل ۹. نمودار سه بعدی اثر متقابل نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری

Fig. 9. Three-dimensional diagram of the interaction effect of PET to sand ratio and water to cement ratio on compressive strength

جدول ۶. نتایج ارزیابی معیارهای اصلی در نمونه‌های بهینه

Table 6- Results of evaluation of main criteria in optimal samples

Porosity (%)	Compressive strength (MPa)
4.38	33.95
4.35	34.26
4.31	34.68

نتایج این بخش با پژوهش‌های پیشین همسو است. Shi و همکاران (۲۰۲۲) افزایش مقاومت و کاهش جمع‌شدگی خشک با حدود ۱۰ درصد مولکولارسیو را نشان دادند [19]. Farzaneh و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند که مصرف محدود پسماندهای مولکولارسیو خواص مکانیکی بتن را بدون آثار منفی محیط‌زیستی بهبود می‌دهد [20]. همچنین، Golshan و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند ترکیب ژئولیت و مواد مشابه مولکولارسیو دوام و مقاومت بتن خودتراکم را افزایش می‌دهد [21].

شکل (۹) اثر متقابل نسبت PET به ماسه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش مقاومت زمانی رخ می‌دهد که مقادیر بالای PET با نسبت آب به سیمان زیاد همراه شوند، که ناشی از افزایش تخلخل، کاهش پیوستگی خمیر سیمان و ضعف چسبندگی PET است. افزایش هر یک از این نسبت‌ها به‌طور مستقل یا هم‌زمان باعث افت مقاومت می‌شود. در همین راستا، Qaidi و همکاران (۲۰۲۳) و Chong و Shi (۲۰۲۳) گزارش کردند که جایگزینی درصد بالای PET مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد، اما مقادیر پایین آن اثر قابل توجهی ندارد [14, 15].

سیمان، امکان کاهش بیش از ۲۰ درصد مصرف سیمان را با حفظ مقاومت فشاری و دوام بتن فراهم کرد و در عین حال مصرف منابع و انتشار CO₂ را کاهش داد.

قدردانی

نویسندگان از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نظرات سازنده، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

در این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع وجود ندارد.

نقش نویسندگان

پویا امجدیان: انجام آزمایش‌ها، گردآوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها، مدل‌سازی و تحلیل آماری، نگارش پیش‌نویس اولیه و ویرایش مقاله.

نادر مختارانی: ایده و مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نظارت و مدیریت پژوهش، نگارش پیش‌نویس اولیه و ویرایش مقاله.

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی اختصاصی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

هوش مصنوعی

در انجام این پژوهش، نگارش متن و ویرایش مقاله از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بود؛ به طوری که با کاهش تخلخل، مقاومت فشاری در سطح بالایی حفظ شد.

- جایگزینی بخشی از ماسه با PET باعث کاهش وزن مخصوص بتن شد که می‌تواند در سازه‌های سبک، مورد توجه قرار گیرد.
- افزودن درصد‌های مناسب مولکولارسیو، به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی این ماده، منجر به اصلاح ساختار ماتریس سیمانی و کاهش تخلخل شد.
- اسلامپ بتن در محدوده مطلوب قرار داشته و کارایی آن برای استفاده در کاربردهای رایج سازه‌ای مانند تیر، ستون و دال مناسب بوده است.
- مدل‌سازی آماری و طراحی آزمایش با نرم‌افزار Design Expert، پیش‌بینی قابل‌اعتمادی از رفتار نمونه‌ها ارائه داد (مقادیر R² و P-value در بیشتر پاسخ‌ها در محدوده مطلوب بودند).
- از نظر شاخص‌های مهندسی و محیط‌زیستی، ترکیب بهینه توانست بهترین تعادل میان عملکرد فنی و پایداری محیط‌زیستی را ارائه دهند.
- افزودن جداگانه هر یک از پسماندهای مولکولارسیو و PET در نسبت‌های پایین (تا ۱۵ درصد مولکولارسیو و تا ۴ درصد PET) موجب حفظ خواص مکانیکی در محدوده معیارهای مطلوب شد.
- استفاده از پسماند مولکولارسیو به عنوان جایگزین جزئی

References

- [1] Encyclopaedia Britannica, n.d. Molecular sieve. *Encyclopaedia Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/molecular-sieve> (Accessed: 15 April 2025).
- [2] Sherman, J.D., 1999. Synthetic zeolites and other microporous oxide molecular sieves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), pp.3471–3478. doi: 10.1073/pnas.96.7.3471.
- [3] Mokhtarani, B., Alavi Moghaddam, M.R., Mokhtarani, N. and Jomeh Khaledi, H., 2006. Report: Future industrial solid waste management in Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ), Iran. *Waste Management & Research*, 24(3), pp.283–288. doi: 10.1177/0734242X06063641.
- [4] Jadaun, J.S., Bansal, S., Sonthalia, A., Rai, A.K. and Singh, S.P., 2022. Biodegradation of plastics for sustainable environment. *Bioresource Technology*, 347, 126697. doi: 10.1016/j.biortech.2022.126697.
- [5] Cooper, T.A., 2013. Developments in plastic materials and recycling systems for packaging food, beverages and other fast-moving consumer goods. In: Fitzgerald, R.W., ed. *Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)*. Woodhead Publishing, pp.58–107. doi: 10.1533/9780857098979.58.
- [6] Di Lorenzo, M.L., 2024. Crystallization of poly(ethylene terephthalate): A review. *Polymers*, 16(14), 1975. doi: 10.3390/polym16141975.
- [7] Fried, J.R., 2014. *Polymer Science and Technology*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- [8] Sperling, L.H., 2006. *Introduction to Physical Polymer Science*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [9] Bharadwaj, C., Purbey, R., Bora, D., Chetia, P., Maheswari R, U., Duarah, R., Dutta, K., Sadiku, E.R., Varaprasad, K. and Jayaramudu, J., 2024. A review on sustainable PET recycling: Strategies and trends. *Materials Today Sustainability*, 27, 100936. doi:

- 10.1016/j.mtsust.2024.100936.
- [10] Hoornweg, D. and Bhada-Tata, P., 2012. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Washington, DC: World Bank.
- [11] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. and Van Woerden, F., 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [12] Qaidi, S., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A.F., Özkılıç, Y., Sabri, M. and Sergeev, V., 2023. Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 10, 1101146. doi: 10.3389/fmats.2023.1101146.
- [13] Chong, B.W. and Shi, X., 2023. Meta-analysis on PET plastic as concrete aggregate using response surface methodology and regression analysis. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 2. doi: 10.1186/s43065-022-00069-y.
- [14] Akkouri, N., Bourzik, O., Baba, K. and Tayeh, B.A., 2022. Thermophysical characteristics of eco-friendly mortars containing recycled PET as partial sand replacement in dry and wet conditions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 238. doi: 10.1007/s41062-022-00838-4.
- [15] Resende, D.M., de Carvalho, J.M.F., Paiva, B.O., Gonçalves, G.d.R., Costa, L.C.B. and Peixoto, R.A.F., 2024. Sustainable structural lightweight concrete with recycled polyethylene terephthalate waste aggregate. *Buildings*, 14(3), 609. doi: 10.3390/buildings14030609.
- [16] Zheng, R., Xia, J., Liu, E., Zhou, Q. and Wang, H., 2025. A high water-cement ratio aerated concrete using carbon dioxide as the foaming agent: Mix design, pore structure and hydration products. *Journal of Building Engineering*, 108, 112926. doi: 10.1016/j.jobbe.2025.112926.
- [17] LeBow, C.J., 2018. *Effect of Cement Content on Concrete Performance*. Master's thesis. University of Arkansas, Fayetteville.
- [18] Jierula, A., Li, H., Chen, Y., Wu, C., Wu, X. and Yin, H., 2024. Study on the influence of density and water-cement ratio on the cement utilization, fluidity, mechanical properties, and water absorption of foam concrete. *Buildings*, 14(11), 3550. doi: 10.3390/buildings14113550.
- [19] Shi, P., Li, Z., Chen, X., Zeng, L. and Hu, R., 2022. Effect of industrial waste molecular sieves on internally cured cement-based materials. *Frontiers in Materials*, 9, 1003556. doi: 10.3389/fmats.2022.1003556.
- [20] Farzaneh, A., Mirabi, M., Jalili Ghazizadeh, M. and Abbasi, M., 2019. Identification and classification of molecular sieve waste and catalyst waste produced in petrochemical complexes and feasibility of their recycling capability. *Environmental Sciences Quarterly*, 17(1), pp.25–40. doi: 10.29252/envs.17.1.25.
- [21] Golshan, M., Avaznezhad, F. and Bazaei, A., 2024. Investigating the composition of zeolite and ceramic waste on the resistance and durability of SCC concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(2), pp.104–124. doi: 10.22065/jsce.2023.396699.3112.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Amjadyan, P. and Mokhtarani, N., 2027. Statistical Analysis of the Optimal Mix Design in the Production of Modified Concrete Using the Concurrent Incorporation of Molecular Sieve and PET Waste. *Modares Civil Engineering journal*, 26(6), pp.101-115.



Content

Article Title and Authors Names	Page
Evaluation of steel shear wall connection pattern behavior in order to improve seismic performance 7 <i>Ali Biglari Fadafan, Zahra Aliarab</i>	7
Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments..... 21 <i>Amin Ekramifard, Ali Akhtarpour</i>	21
Experimental Study on the Behavior and Retrofit of Clay Block Infill Frames under Out-of-Plane Loading Using Alkali-Resistant Glass Fiber 37 <i>Mohammad Javad Zarei, Jalil Shafaei, Farnoosh Basaliqeh</i>	37
Experimental Investigation on the Rheological Performance of Asphalt Binders Modified with Montmorillonite Nanoclay and RAR at Intermediate and High Temperatures 53 <i>Hassan Alvandi, Amir Kavussi, Sina Hatami</i>	53
Evaluating the efficiency of autoregressive models in predicting the vulnerability of coastal aquifers to seawater intrusion 67 <i>Amin Zeynolabedin, Soroush Sharghi</i>	67
Extension of Classical PFI theory for Bending Behavior in Special Steel Plate Shear Walls using Nonlinear Analyses for Different Steel Grades 85 <i>MohammadHossein OjaqpourMalki; Farnoosh Basaliqeh, Parviz Ebadi</i>	85
Statistical Analysis of the Optimal Mix Design in the Production of Modified Concrete Using the Concurrent Incorporation of Molecular Sieve and PET Waste 101 <i>Pouya Amjadyan, Nader Mokhtarani</i>	101

Guide for authors

Authors are requested to follow the instructions below in the submitted manuscripts.

- 1- It must be noticed that Modares civil journal is officially a Persian journal and manuscripts must be provided in Farsi.
- 2- Manuscripts to be submitted in Modares civil journal include the research papers expressing the authors investigations in civil engineering branches (Structural Engineering, Earthquake Engineering, Hydraulic Structures, Water resource and coastal engineering, Geotechnical Engineering Road construction Transportation Management, water and environmental engineering). The journal is indexed in scientific database of ISC and SID.
- 3- Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint) or is not under review by another journal. Authors are responsible for the points which are mentioned through the text and the journal has the official right for accepting or rejecting the manuscripts.
- 4- Manuscripts to be published in this journal are of two types:
 - a. Original research papers: preferably no more than 12 pages of journal format including tables and illustrations with minimum and maximum of 2500 and 3500 words, respectively.
 - b. Short communications: no more than 10 pages of journal format including tables and illustrations with maximum of 2500 words.

Note 1: Review papers are accepted if written by experienced authors having special publications on the reviewed topics.

Note 2: Translated papers are not considered in review process.

- 5- Ensure that the following items are provided in your manuscript:
 - a. Title, Abstract, Keywords (4 words), all in Farsi Authors Names. They must be introduced by their full name and their affiliation. One author has been designated as the corresponding author with contact details: E mail address, Full postal address, Telephone and Fax number.
 - b. Body of the manuscript including introduction, description of the applied or proposed research approach, analysis and discussion, conclusion, acknowledgment and references.
 - c. Title, Keywords (4 words), Author names and addresses all in English. English Extended Abstract (maximum of one page and 500 words).
- 6- Please check the following notes in the body of your manuscript:
 - a. Fundamental expressions and terms must be represented by best phrases in Farsi. Abbreviations are to be referenced in footnotes.
 - b. Figures, graphs and tables must be represented by their referred order. Figures are to be sent individually with the resolution of 300 dpi in black and white format. Title of the figures and tables must be presented in both Farsi and English, at the lines up and bottom of the objects, respectively.
 - c. Using grid and border lines are not accepted for tables and graphs.
- 7- Under the "Reference" section, referred publications must be sorted by their appearance through the text. The way in which the references are introduced is as below:
 - a. Books: Last name, First name of the author(s), Title, Translator's name, Publication country (city), Publication company, Year of publication, Number of pages.
 - b. Papers: Last name, First name of the author(s), Title, Journal Name, Series (Volume), Year of publication, page numbers.

- 8- Journal format contains single line, double column (with 1 cm space between) manuscripts written by Narrow B Lotus font (12pt) for Persian contents and Times New Roman (10pt) for English contents in Microsoft Word 2010 and A4 Paper with 1.5cm margins from left and right.
- 9- Papers extracted from the PhD or MSc dissertations, are published with the names of student, supervisor and advisors. In this case, the supervisor is introduced as corresponding author.
- 10- To submit the paper, an author have to:
 - a. Register in journal's web page.
 - b. Follow the step by step procedure of uploading the required information.
 - c. Upload the manuscript and related files.
 - d. Obtain the submission code and save it for further use.

Editorial office of Journal:

Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Jalal e al e Ahmad highway,
Tehran.

Post box: 14115-143

Phone and Fax: +98 21 82884950

Website: <http://civil.journals.modares.ac.ir>

Email: civiljournal@modares.ac.ir

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Scientific Research Quarterly

Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)

Founder and Publisher: Tarbiat Modares University
Executive Manager: Farhad Daneshjoo (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Editor-in-Chief: Masoud Ghodsian (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Assistant Director: Zahra khoiniha

Editorial Board:

Dr. Abas	Afshar	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Ali Akbar	Aghakochak	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Mohammad Taghi	Ahmadi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hamid	Behbahani	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Farhad	Daneshjoo	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hossein	Ganjidoust	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. GholamReza	Ghodrati Amiri	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Masoud	Ghodsian	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Aboalfazl	Hassani	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Shahrokh	Malek	Assist.Prof. of Civil Eng. University of Tehran
Dr. Shervin	Maleki	Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Seyed Ahmad	MirBagheri	Assoc.Prof. of Civil Eng. K.N.Toosi University of Science and Tech.
Dr. MajdAldin	Hosseini	Assoc.Prof. of Civil Eng. Amirkabir University of Technology
Dr. Mahmood	Safarzadeh	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Ali Akbar	Salehi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Masoud	Tajrishi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Shahaboddin	Yasrobi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University

Editorial Arbitrators Board:

A.A.	Aghakouchek , Tarbiat Modares University	A.	Fakhimi , Tarbiat Modares University
M.	Ahmadi , Tarbiat Modares University	A.R.	Ghari , Quran University of Isfahan
A.	Pak , Sharif University	Gh.R.	Ghodrati Amiri , Elm O San'at University
N.	Khaji , Tarbiat Modares University	A.H.	Ghazviniyan , Tarbiat Modares University
S.	Dordaei , Tarbiat Modares University	A.	Ghanbari , Kharazmi Univesity
S.M.	Zahraei , Tehran University	A.	Kadousi , Tarbiat Modares University
Sh.	Shahbeik , Tarbiat Modares University	Sh.P.	Kahouni , Amir Kabir University
H.	Shakib , Tarbiat Modares University	M.	Kokabi , Tarbiat Modares University
M.R.	Ameri , University of Shiraz	Sh.	Maleki , Sharif University
A.	Arabzadeh , Tarbiat Modares University	J.	Vaseghi Amiri , Babol Noshirvani University
B.	Asgariyan , Khajeh Nasir Toosi University	M.A.	Hadiyanfard , Shiraz University of Technology
M.N.	Ouliyaei , Tarbiat Modares University	Sh.D.	Yasrebi , Tarbiat Modares University

Technical Editor: Zahra Azizi
English Editor: Fateme Torabi

Executive Expert: Zahra khoiniha
Type and Layout: Masoud Sarvari

Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Post Box: 14117-13116.

Tel & Fax: +98 (21) 82884950

Email: civiljournal@modares.ac.ir

This Journal is indexed in the ISC and Scientific Information Database.

www.ISC.ir & www.SID.ir



Modares Civil Engineering Journal



Scientific Journal

Volume 26, Issue 6, 2027 (Serial: 92)

Executive Manager: Farhad Daneshjoo

Owner and Publisher: Tarbiat Modares University

- **Evaluation of steel shear wall connection pattern behavior in order to improve seismic performance**
Ali Biglari Fadafan, Zahra Aliarab
- **Investigation of the characteristics of compressibility and Elastic modulus of the mixtures containing recycled concrete, crushed bricks, and PET for use as fill in embankments**
Amin Ekramifard, Ali Akhtarpour
- **Experimentral Study on the Behavior and Retrofit of Clay Block Infill Frames under Out-of-Plane Loading Using Alkali-Resistant Glass Fiber**
Mohammad Javad Zarei, Jalil Shafaei, Farnoosh Basaliqeh
- **Experimental Investigation on the Rheological Performance of Asphalt Binders Modified with Montmorillonite Nanocaly and RAR at Intermediate and High Temperatures**
Hassan Alvandi, Amir Kavussi, Sina Hatami
- **Evaluating the efficiency of autoregressive models in predicting the vulnerability of coastal aquifers to seawater intrusion**
Amin Zeynolabedin, Soroush Sharghi
- **Extension of Classical PFI theory for Bending Behavior in Special Steel Plate Shear Walls using Nonlinear Analyses for Different Steel Grades**
MohammadHossein OjaqpourMalki; Farnoosh Basaligheh, Parviz Ebadi
- **Statistical Analysis of the Optimal Mix Design in the Production of Modified Concrete Using the Concurrent Incorporation of Molecular Sieve and PET Waste**
Pouya Amjadyan, Nader Mokhtarani

Journal Address: Tarbiat Modares University, Shahid Chamran and Jalal-e-Alahmad highways intersection, Tehran, Iran. PO Box 14117-13116.