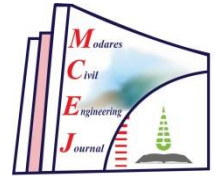




## دو ماهنامه

### مهندسی عمران مدرّس



دوره ۲۵، شماره ۳، سال ۱۴۰۴ (شماره پیاپی: ۸۳)

نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول: فرهاد دانشجو

- ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی دارای میراگرهای اصطکاکی  
رامین طباطبایی میرحسینی، عطا فلاح نژاد
- مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی ماسه بهسازی شده با نانومواد، الیاف بازالت و پلیمر  
صادق شهیدی، میثم بیات، سید علیرضا زارعی
- بررسی امکان بهبود برخی از مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در دو روش تر و خشک  
محمد حسین احمدیان خامنه حسن افشین، مهرداد امامی تبریزی، یاسر علیلو، غلامرضا قدسی شریف
- ارتباط ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن با به کارگیری آزمون "محفظه استوانه‌ای" و "Pull-off"  
محمود نادری، سردارولی دین، علی صابری ورزنده
- بررسی تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر ویژگی‌های عملکردی دمای بالا و پایین قیر  
محمد مهدی دادائی، پوریا حاجی کریمی، محمد راهی، مهدی دستوری رزاز، بهنوش طهماسبی، فریدون مقدس‌نژاد
- انتخاب بهترین عامل گیرنده اکسیژن در فرآیند حذف نیترات به منظور استفاده در دیواره‌های بیولوژیکی فعال نفوذپذیر  
محمد علی حسینیان سراجی لو، نادر مختارانی، حسین گنجی دوست
- مقاوم‌سازی و بررسی تاثیر آرایش‌های مختلف نوارهای FRP بر رفتار دیوار بنایی در برابر بار انفجار  
مهدی یزدانی، سید احمد حسینی

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:

دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول:

دکتر فرهاد دانشجو (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)

سر دبیر:

دکتر مسعود قدسیان (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)

مدیر داخلی:

زهرا خوئینی‌ها

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

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

مشورتی:

هیأت داوران این

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

شماره:

ویراستار ادبی و فنی:

زهرا عزیزی

کارشناس اجرایی:

زهرا خوئینی‌ها

ویراستار انگلیسی:

فاطمه ترابی

طرح جلد، حروف چینی و صفحه‌آرایی: 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: ۳۹۷-۱۴۱۱۵، تلفن و دورنگار: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰، رایانامه: [civiljournal@modares.ac.ir](mailto: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 ۲۵، شماره ۳، سال ۱۴۰۴

#### 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 تائید 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، سازه های هیدرولیکی، سازه های دریایی، خاک و پی، راه و ترابری، برنامه ریزی 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- یادداشت های 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 بخش های 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)، نتیجه گیری، 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 عکس ها و جدول ها، شکل ها و نمودارها به طور دقیق ضمن رعایت ترتیب آنها در متن معین شده، ارسال اصل جدول ها و شکل ها با کیفیت ۳۰۰ dpi به صورت سیاه و سفید در محیط اکسل ضروری است. برای جدول ها و شکل ها، به ترتیب عناوین فارسی و معادل انگلیسی آنها (بلافاصله) در بالا و زیر آنها قرار گیرد. در شکل ها و جدول ها از خطوط افقی و عمودی (grid) استفاده نشود. جدول ها و شکل ها بدون کادر و شکل های 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 شماره‌گذاری دستی عناوین بخش‌ها و قسمت‌ها 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 پیگیری‌های بعدی، از طریق سامانه نشریات اقدام نمایند.
- ۱۰- مقالات برگرفته از پایان‌نامه و رساله دانشجویان دکتری با نام استاد(ان) راهنما، مشاور(ان) و دانشجو به صورت تئام منتشر می‌شود؛ 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 می‌دارد.

#### 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: ۱۴۳-۱۴۱۱۵، تلفن و نمابر: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰

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


پست الکترونیکی: [civiljournal@modares.ac.ir](mailto:civiljournal@modares.ac.ir)

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

- ۷ ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی دارای میراگرهای اصطکاکی  
رامین طباطبایی میرحسینی، عطا فلاح نژاد
- ۱۹ مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی ماسه بهسازی شده با نانومواد، الیاف  
بازالت و پلیمر  
صادق شهیدی، میثم بیات، سید علیرضا زارعی
- ۳۳ بررسی امکان بهبود برخی از مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در دو روش تر و  
خشک  
محمد حسین احمدیان خامنه حسن افشین، مهرداد امامی تبریزی، یاسر عیللو، غلامرضا قدسی شریف
- ۴۷ ارتباط ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن با به کارگیری آزمون  
"محفظه استوانه‌ای" و "Pull-off"  
محمود نادری، سردارولی دین، علی صابری ورزنده
- ۶۱ بررسی تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر ویژگی‌های عملکردی دمای بالا و پایین قیر  
محمد مهدی دادائی، پوریا حاجی کریمی، محمد راهی، مهدی دستوری رزاز، بهنوش طهماسبی، فریدون مقدس‌نژاد
- ۷۳ انتخاب بهترین عامل گیرنده اکسیژن در فرآیند حذف نیترات به منظور استفاده در دیواره‌های بیولوژیکی  
فعال نفوذپذیر  
محمد علی حسینیان سراجه لو، نادر مختارانی، حسین گنجی دوست
- ۸۷ مقاوم‌سازی و بررسی تاثیر آرایش‌های مختلف نوارهای FRP بر رفتار دیوار بنایی در برابر بار انفجار  
مهدی یزدانی، سید احمد حسینی



## Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers

Ramin Tabatabaei Mirhosseini<sup>1\*</sup>, Ata Falahatnejad<sup>2</sup>

1. Associate professor, Civil Engineering Dept., Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran.
2. Ph.D. Student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran.

### Abstract

The effective design of structures resistant to seismic vibrations is one of the main concerns of structural engineers to deal with damages caused by earthquakes, which can withstand more earthquake forces with methods such as energy dissipation. Recent earthquake records show that the earthquake record characteristic of the near area differs from the earthquake records of the far area. Among these characteristics, it can be mentioned that the pulse-type state of these records, as well as the high maximum speed and ground displacements. For this reason, these types of records increase the seismic requirements of the structure compared to normal earthquakes. The map of faults and seismic zoning of Iran shows that important urban points such as Tehran, Tabriz, etc. have high seismicity and are located near the fault. Therefore, it is necessary to design and build structures that can properly withstand the features of near-fault earthquakes, this issue reveals the understanding and recognition of the behavior of structural systems and the structure's response to the special features of near-fault earthquakes. This article first investigated the seismic evaluation of three existing 4, 8, and 12-story steel structures with lateral load-resisting systems. Then the desired structure was strengthened using a friction damper, and finally, the acceleration recorder was applied to the structure in the near- and far-fault earthquake zone case study. The seismic demand of the retrofitted structure was investigated in ANSYS Workbench finite element software, which was done in the form of modal analysis, floor drift displacement, structure acceleration response, and von Mises stress. For seismic validation, a two-story, single-span steel frame has been used. The dynamic load used was 0.5g based on the north-south component of the El Centro earthquake (1940) with a maximum acceleration scaled to 50 cm/s. To validate the numerical results, the horizontal displacement of two points on the first and second floor was compared with experimental data, and an acceptable accuracy was obtained. The results of the maximum acceleration at the highest point of the building showed that in a far-fault earthquake zone, the best effect of dampers was on 8-story buildings with a 77% decrease, and in a near-fault earthquake zone, it was related to a 4-story building with a 66.4% decrease in acceleration. Stress in near- and far-fault earthquake zones, the best effect of dampers was on 4-story buildings with 83% and 84% reduction, respectively. In a far-fault earthquake zone, the best effect of dampers was on 8-story buildings with a 44% reduction in maximum displacement, and in a near-fault earthquake zone, it was related to a 4-story building with a 61% reduction in acceleration.

### Review History

Received: Jan 16, 2024  
Revised: Jun 18, 2024  
Accepted: Nov 20, 2024

### Keywords

Earthquake  
Steel Frame  
Friction damper  
Finite element method

\* Corresponding Author Email: [tabatabaei@iauk.ac.ir](mailto:tabatabaei@iauk.ac.ir) ORCID: 0000-0001-8292-8571





## ارزیابی عملکرد لرزهای قاب‌های مهاربندی دارای میراگرهای اصطکاکی

رامین طباطبایی میرحسینی<sup>\*1</sup>، عطا فلاحت نژاد<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، دانشکده فنی، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

### چکیده

### تاریخچه داوری

طراحی مؤثر سازه‌های مقاوم در مقابل ارتعاشات لرزهای یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان سازه برای مقابله با خسارات ناشی از زلزله است که با روش‌های مانند استهلاک انرژی قابلیت تحمل بیشتر نیروهای زلزله فراهم می‌شود. بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

در این مقاله ابتدا به ارزیابی لرزهای سه سازه ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه فولادی موجود با سیستم باربر جانبی قاب خمشی پرداخته و سپس اقدام به مقاوم‌سازی سازه موردنظر با استفاده از میراگر اصطکاکی کرده و در انتها شتاب‌نگاشت‌ها در دو نمونه مورد مطالعه در حوزه نزدیک و دور از گسل زلزله به سازه اعمال شده و تقاضای لرزهای سازه مقاوم‌سازی شده در نرم‌افزار المان محدود انسیس و رکن‌بج مورد بررسی قرار گرفت که به صورت تحلیل مودال، جابه‌جایی نسبی طبقات، پاسخ شتاب سازه و تنش فون میزز انجام شد. نتایج بیشینه شتاب در بالاترین نقطه ساختمان نشان داد در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۷۷٪ کاهش، بوده است و در زلزله نزدیک به گسل، مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۶٪ کاهش شتاب است. نتایج تنش در زلزله نزدیک و دور از گسل نشان داد بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۴ طبقه با ۸۳٪ و ۸۴٪ کاهش، بوده است. بیشینه جابه‌جایی نشان داد در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۴۴٪ کاهش و در زلزله نزدیک به گسل مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۱٪ کاهش شتاب است.

### کلمات کلیدی

زلزله  
قاب فولادی  
میراگر اصطکاکی  
روش المان محدود

### ۱- مقدمه

می‌شوند. نقشه گسل‌ها و پهنه‌بندی لرزهای ایران نشان‌دهنده این است که نقاط مهم شهری مانند تهران و تبریز و ... دارای لرزه‌خیزی بالا بوده و در محدوده نزدیک گسل قرار دارند [2, 3]؛ بنابراین طراحی و ساخت سازه‌هایی که به‌طور مناسب بتوانند در مقابل ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل پایدار باشد الزامی است، این موضوع درک و شناخت رفتار سیستم‌های سازه‌ای و عکس‌العمل سازه به ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل را آشکار می‌سازد. یکی از سیستم‌های متداول طراحی ساختمان‌ها در کشور

رکوردهای زلزله ثبت شده اخیر نشان‌دهنده تفاوت ویژگی‌های رکوردهای زلزله حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور است. به طوری که رکورد زلزله حوزه نزدیک دارای مشخصات متمایزی نسبت به رکوردهای زلزله حوزه دور دارد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به حالت پالس‌گونه بودن این رکوردها و همچنین بالا بودن بیشینه سرعت و جابه‌جایی‌های زمین اشاره کرد [1]. به همین دلیل این نوع رکوردها نسبت به زمین‌لرزه‌های معمولی باعث بالا رفتن نیازهای لرزه‌ای سازه

\* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - tabatabaei@iauc.ac.ir :0000-0001-8292-8571

لغزش بهینه به بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی در قاب‌های بادبندی شورون و خارج از مرکز با استفاده از روش دینامیکی غیرخطی پرداختند [12].

وائقی امیری و همکاران [13] با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی به ارزیابی عملکرد قاب‌های فولادی مهاربندی شده خارج از مرکز مجهز به میراگر اصطکاکی پرداختند. در این مطالعه از سه نوع قاب فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه که به ترتیب نمایانگر سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند هستند در سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و ۱۰ مقدار مختلف نیروی لغزش در معرض سه رکورد مختلف زلزله انجام شد و مکان مناسب میراگرهای اصطکاکی به جای ارائه آن‌ها در تمام سطوح نیز در اسکلت ۱۵ طبقه بررسی شد.

وائقی امیری و تمجید [14] به بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی پال بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتنی پرداخت. در این مقاله سه قاب بتنی ۵، ۸ و ۱۰ طبقه به صورت قاب خمشی بتن مسلح طراحی و با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تعداد طبقات روی بار لغزش بهینه میراگرها تأثیر بسزایی دارد و در این بار لغزش بهینه سطح عملکرد سازه بهبود پیدا می‌کند. میرزائی فرد و همکاران [15] با تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی و تحلیل افزایشی دینامیکی به بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی مختلف پرداختند. در این کار میراگر اصطکاکی به صورت دو استوانه توپر و توخالی در نظر گرفته شد. پاسخ سازه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی بررسی شد و نتایج بهبود رفتار سازه را با استفاده از میراگر اصطکاکی نشان داد.

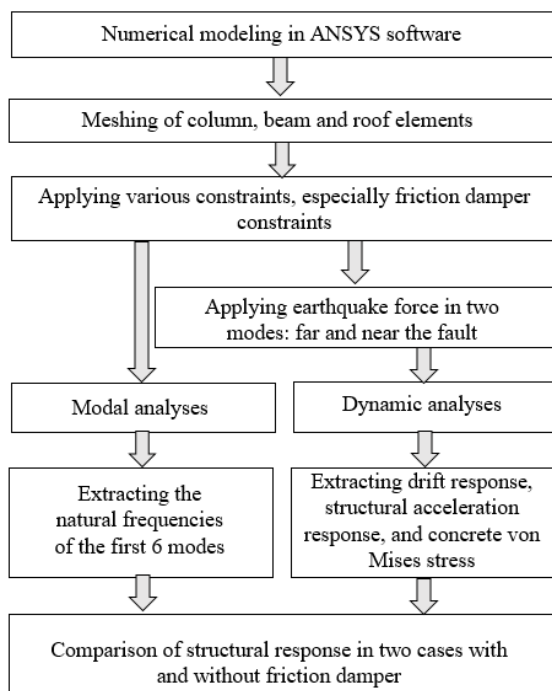
برای رفع نیاز به سختی بیشتر پس از تسلیم و اتلاف انرژی در طول زلزله‌های بزرگ، یک مهاربند میراگر اصطکاکی متغیر خودم محور جدید توسط وانگ و همکاران پیشنهاد شد [16] و به صوت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه این طرح به صورت دوگانه مورد بررسی قرار گرفته تا اثربخشی آن برای سختی بیشتر و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی تقویت شود [17]. جوادیان و کیم یک مهاربند اصطکاکی چرخشی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های قاب ارتجاعی پیشنهاد کردند [18]. غفوری نجات و همکاران بررسی پارامتریک پاسخ لرزه‌ای قاب مهاربندی شده زانویی با میراگر اصطکاکی را مورد مطالعه قرار

استفاده از سیستم قاب فولادی است. این سیستم به دلیل در دسترس بودن مصالح مورد نیاز و نیز اجرایی ساده‌تر به یکی از سیستم‌های متداول و مورد نظر در ایران تبدیل شده است. پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌ها پیشنهاد کردند که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و معایبی است. سازه‌های متداول انرژی زلزله را با تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای خود مستهلک می‌کنند اما یکی از روش‌های اخیر استهلاک انرژی زلزله استفاده از سیستم‌های کنترل سازه است که به شکل‌های کنترل فعال و غیرفعال و سیستم ترکیبی استفاده می‌شود [4]. از میان سیستم‌های کنترل ذکر شده ابزارهای کنترل فعال نیاز به جذب انرژی بالایی دارند و با توجه به احتمال ایجاد اشکال در منبع تأمین‌کننده انرژی در هنگام وقوع زلزله ضریب اطمینان استفاده از این ابزارها در مقابل زلزله کمتر خواهد بود و بیشتر برای سازه‌های در مقابل باد استفاده می‌شوند.

پدیده اصطکاک در مهندسی سازه نیز منجر به توسعه میراگرهای اصطکاکی شده است که قادرند انرژی قابل توجهی از سازه را در مقابل زلزله و تحریکات دینامیکی دیگر جذب کنند. در این نوع میراگر، انرژی زلزله صرف غلبه بر اصطکاک موجود در سطح تماس قطعات می‌شود. میراگرهای اصطکاکی که نوعی از سیستم‌های کنترل غیرفعال است، پتانسیل بالایی در جذب و استهلاک انرژی با هزینه پایین و سهولت در نصب و نگهداری دارد. میراگرهای اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب سازه را به طور قابل توجهی کاهش داده و آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات داخل آن را به حداقل می‌رساند [5].

سیستم‌های اصطکاکی انرژی را از طریق لغزش دو قطعه نسبت به یکدیگر مستهلک می‌کنند. استفاده از میراگرهای اصطکاکی برای مقاوم‌سازی سازه‌های زیادی در سرتاسر دنیا مرسوم شده است که می‌توان به مواردی از قبیل ساختمان‌های لاگاردنیا در هندوستان [6]، کارخانه‌های هواپیماسازی بوئینگ در واشنگتن [7]، ساختمان ایتون در مونترال [8]، منبع ذخیره آب در ساکرامنتو کالیفرنیا [9] و ساختمان دادگستری اتاوا [10] اشاره کرد.

مهدویان و همکاران [11] به بررسی کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی و روش دینامیکی غیرخطی پرداختند. برخی پژوهشگران با تمرکز بر روی نیروی



شکل ۱. فلوچارت روند تحقیق

Fig. 1. Research Methodology Flowchart

در این مطالعه ابتدا به مدل‌سازی المان محدود سه سازه ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه فولادی موجود با سیستم باربر جانبی قاب خمشی پرداخته و سپس با اعمال شبکه‌بندی مناسب و شرایط مرزی مناسب به ویژه قیود میراگر اصطکاکی اقدام به شبیه‌سازی سازه در دو بخش تحلیل مودال و تحلیل دینامیکی با اعمال بار لرزه‌ای ناشی از زلزله نزدیک و دور از گسل پرداخته شده است. در انتها نتایج جابه‌جایی نسبی طبقات، پاسخ شتاب سازه و تنش فون میزمر مربوط به دو حالت با و بدون میراگر با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

در این مقاله تنها از دو رکورد زلزله در دو حالت دور و نزدیک گسل استفاده شده است که با هدف مقایسه عملکرد میراگر اصطکاکی صورت گرفته است اگرچه برای مقایسه کامل‌تر نیازمند استفاده از رکوردهای زلزله بیشتر است که به علت حجم بالای محاسبات و نتایج در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

## ۲-۱- شرح مسئله

در شکل (۲) نمای از روبرو و نمای ایزومتریک سه ساختمان با تعداد طبقات ۴، ۸ و ۱۲ نشان داده شده است. فاصله بین دهانه‌ها ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس انجام شد و برای ستون‌ها و تیرها از المان‌های خطی Beam188 با سطح مقطع مشخص و جنس فولاد

دادند [19]. بخشایش و همکاران با استفاده از یک میراگر برشی جدید به بهبود عملکرد قاب مهاربندی شده متحدالمرکز پرداختند [20]. عملکرد لرزه‌ای قاب خودمحمور با میراگر اصطکاکی از سه جنبه آزمایش اتصال تیر به ستون، روش طراحی لرزه‌ای قاب و تاریخچه زمانی دینامیکی توسط دینگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [21]. پورزنگبار و همکاران با استفاده از روش المان محدود، آثار سیستم میراگر مهاربند ویسکوز را بر پاسخ دینامیکی قاب‌های فولادی برای رکوردهای مختلف زلزله بررسی کردند [22]. ابراهیمی و میرقادری یک میراگر مهاربند اصطکاکی- لغزشی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی‌شده پیشنهاد دادند. یافته‌های عددی با استفاده از روش اجزای محدود نشان داد که در مدل‌های مجهز به میراگر لغزشی اصطکاکی، مهاربندها فاقد کماتس سرتاسری و موضعی، آسیب و شکستگی بودند [23]. بارباگالو و همکاران یک روش طراحی سیستم میراگر مهاربندی-اصطکاکی ارائه کردند که برای یک چارچوب مطالعه موردی با در نظر گرفتن ترکیب‌های مختلف پارامترهای طراحی اعمال شد [24].

هدف این تحقیق مطالعه تأثیر مستهلک کننده‌های انرژی در هنگام وقوع زلزله است بنابراین سیستم‌های کنترل غیرفعال انتخاب شده و استفاده از میراگرها می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. چراکه این روش کمترین اضافه‌وزن را به سازه اعمال می‌کند و اجرا آن نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر است. از میان انواع مختلف ابزارهای کنترل غیرفعال میراگر مکانیکی-اصطکاکی با توجه به سادگی عملکرد و اجرای این ابزارها و صرفه اقتصادی بیشتر انتخاب می‌شود. قاب‌های مهاربندی میراگرها یکی از سیستم‌های سازه‌ای برای مقابله با بارهای جانبی از قبیل زلزله است. از طرفی نیاز به شکل‌پذیر بودن سیستم‌های سازه‌ای برای مستهلک کردن انرژی در حین زلزله، است.

نوآوری این مقاله استفاده از میراگر اصطکاکی از طریق روش المان محدود برای محاسبه عملکرد این نوع میراگر در ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در حالت بارگذاری زلزله دور و نزدیک به گسل است.

## ۲- روش تحقیق

در شکل (۱) فلوچارت روند تحقیق نمایش داده شده است.

## ۲-۲- درستی آزمایشی

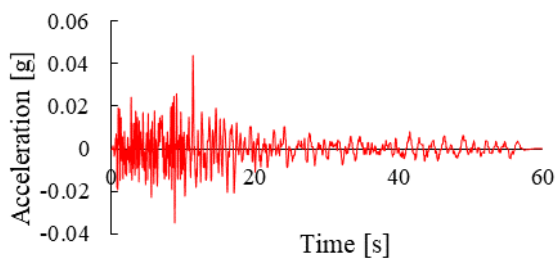
مدل تجربی تسای و همکاران [26] که یک قاب فولادی دوطبقه تک دهانه است برای اعتبارسنجی لرزه‌ای قاب‌های فولادی انتخاب شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

در این آزمایش از فولاد کلاس ASTM A36 با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۶ و استحکام تسلیم و مقاومت نهایی به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۴۰۰-۵۵۰ مگا

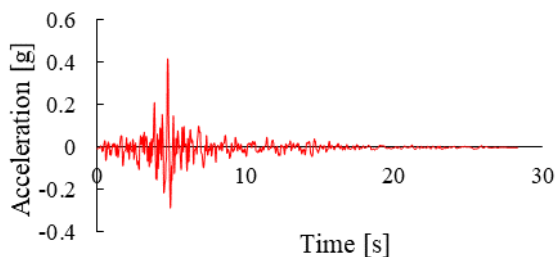
جدول ۱. ابعاد ستون، بادبند و تیر (برحسب میلی‌متر)

Table 1. Column, beam and brace dimensions (Unit: mm)

Beam ( $b_f * h_w * t_f * t_w$ )	Brace ( $b_b * t_b$ )	Column	Story level
110*200*10*8	80*8	C400-8	1-2
100*200*8*6	60*6	C350-8	3-4
140*300*12*8	120*12	C450-12	1-2
140*300*10*8	100*10	C450-10	3-4
120*240*10*8	80*8	C350-8	5-6
100*200*8*6	80*8	C300-8	7-8
170*360*12*10	160*14	C550-12	1-3
160*340*12*10	140*12	C500-12	4-6
150*320*12*8	120*12	C450-12	7-8
120*260*10*8	100*10	C350-12	9-10
100*220*10*6	80*8	C300-10	11-12



(الف) نزدیک به گسل



(ب) دور از گسل

شکل ۳. رکورد زلزله مورگان هیل ۱۹۹۴.

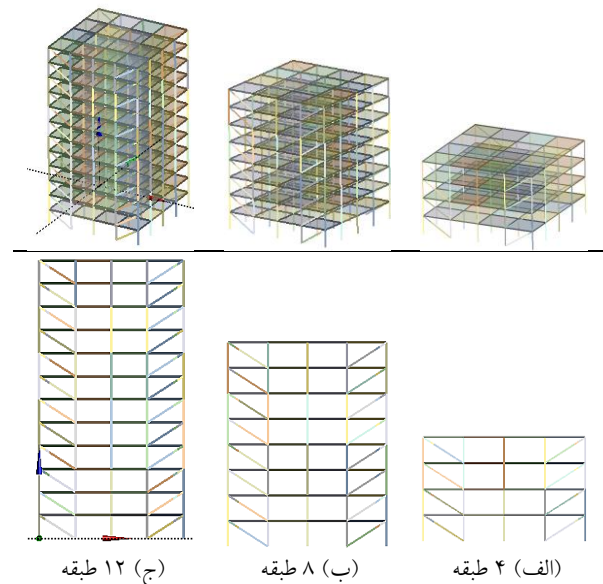
Fig. 3. Morgan Hill earthquake record 1994.

و برای سقف از المان‌های سطحی Shell 181 با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و جنس بتن استفاده شده است.

در جدول (۱) مقاطع ستون‌ها، تیرها و بادبندها بر اساس مرجع [25] به تفکیک هر یک از سه طرح در نظر گرفته شده لیست شده است.

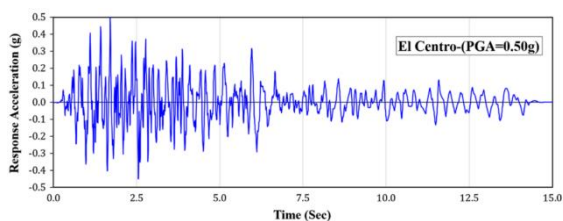
عبارات  $b$ ،  $h$  و  $t$  به ترتیب طول بال ( $f$ )، جان ( $w$ ) و ضخامت تیر I شکل است. برای مهاربند ( $b$ ) از دو مشخصه طول  $b$  و ضخامت  $t$  استفاده شده و برای ستون ( $C$ ) مربعی شکل ابتدا طول و سپس ضخامت آورده شده است.

به منظور اعمال نیروهای زلزله به ساختمان، با دو بار مشتق‌گیری از اطلاعات تاریخیچه زمانی رکورد شتاب زلزله، تاریخیچه زمانی جابه‌جایی به دست آمد و سپس جابه‌جایی اجباری به پایه‌های تمام ستون‌های ساختمان وارد شد که در دو حالت دور و نزدیک به گسل انجام شده است. برای تسهیل و تسریع در حل مسئله، تنها جابه‌جایی‌ها در راستای محور X استفاده شد. قابل ذکر است این روش متفاوت از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی یا پوش‌اور است و به صورت دینامیکی انجام می‌شود. در شکل (۳) رکورد زلزله در موقعیت نزدیک و دور از گسل برای زلزله مورگان هیل در سال ۱۹۸۴، ارائه شده است.



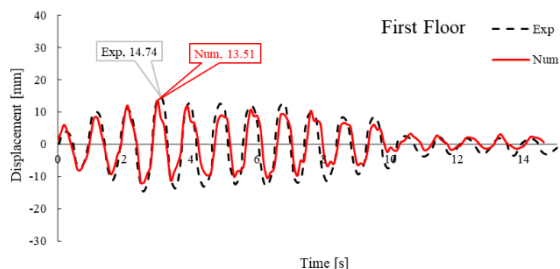
شکل ۲. نمای ایزومتریک و روبرو از ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با بادبند قطری

Fig. 2. Isometric and front view of 4, 8, and 12-story with diagonal braces

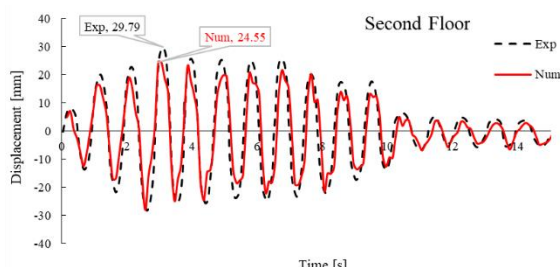


شکل ۶. رکورد شتاب زلزله ال سنترو.

Fig. 6. El Centro earthquake acceleration record.



Time [s]  
(الف) طبقه اول



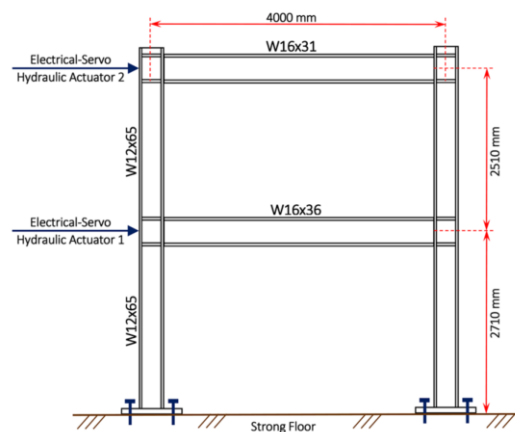
Time [s]  
(ب) طبقه دوم

شکل ۷. مقایسه داده‌های تجربی و نتایج عددی جابه‌جایی نسبی طبقه اول و دوم.

Fig. 7. Comparison of experimental data and numerical results of story first and second drift.

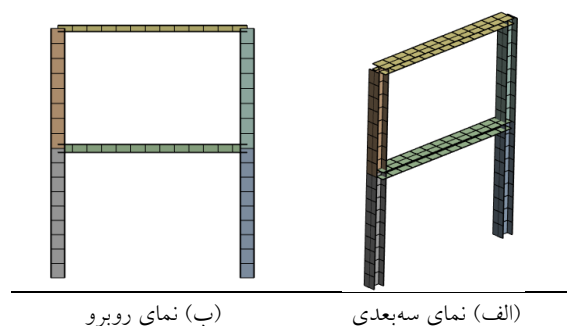
نسبت بیشترین جابه‌جایی نسبی به دست آمده از روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس به نتایج تجربی برای طبقه اول و دوم به ترتیب  $1/0.9$  و  $1/0.21$  است که منجر به مدل‌سازی دقت رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی در نرم‌افزار انسیس می‌شود. بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقه اول در روش تجربی و عددی به ترتیب برابر با  $14/74$  و  $13/51$  است و برای طبقه دوم نیز به ترتیب  $29/79$  و  $24/55$  میلی‌متر به دست آمده است؛ بنابراین خطای روش عددی در طبقه اول ۹ درصد و در طبقه دوم ۲۱ درصد به دست آمده است.

در ادامه برای بررسی کفایت روش پیاده‌سازی میراگر اصطکاکی از قاب ارائه شده در شکل (۴) استفاده شد با این تفاوت که مدل در دو حالت مختلف شامل اضافه کردن بادبند و اضافه کردن میراگر اصطکاکی شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل



شکل ۴. مقاطع و ابعاد هندسی قاب دوطبقه [26].

Fig. 4. Sections and geometric dimensions of the two-story frame [26].



شکل ۵. شبکه‌بندی مدل عددی دوطبقه

Fig. 5. Meshing of the two-story numerical model

پاسکال استفاده شده است. شکل (۴) جزئیات مقاطع و ابعاد هندسی اسکلت فولادی را نشان می‌دهد. مقاطع تیر و ستون‌های پروفیل I wide-flange شکل طبق استاندارد آمریکا (class W) استفاده شد.

در شکل (۵) شبکه‌بندی سازه در نرم‌افزار المان محدود انسیس نشان داده شده است. در این تحلیل از اندازه شبکه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد.

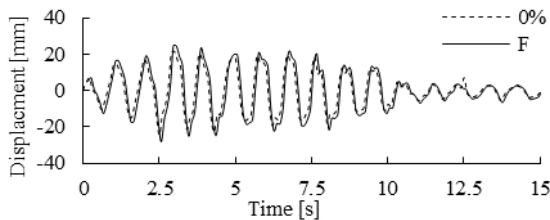
بار دینامیکی مورد استفاده مطابق با شکل ۶ مؤلفه شمال-جنوب زلزله ال سنترو (۱۹۴۰) با بیشترین شتاب مقیاس شده تا ۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه  $0.5g$  است.

برای اعتبارسنجی نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار انسیس جابه‌جایی افقی دو نقطه روی طبقه اول و دوم با داده‌های تجربی مقایسه شد. در نهایت، نمودارهای زمانی جابه‌جایی نسبی به دست آمده از نرم‌افزار انسیس و داده‌های تجربی در شکل (۷) نشان داده شده است.

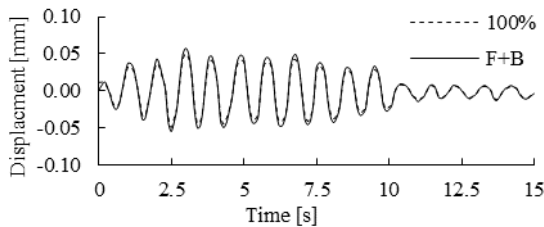
داده شده است.

فرکانس طبیعی ساختمان ۴ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

به طور کلی افزودن میراگر اصطکاکی موجب افزایش فرکانس طبیعی سازه در مودهای ارتعاشی اول تا ششم شده است. تحلیل



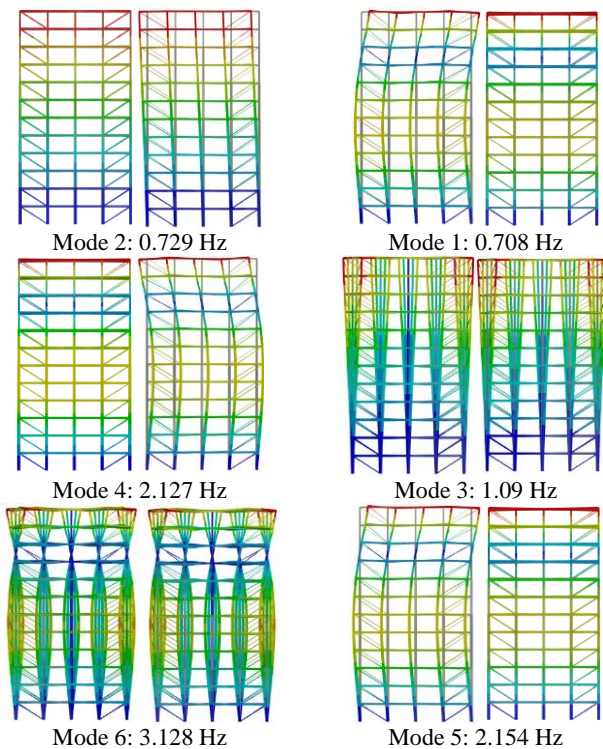
(الف) ضریب لغزش صفر-بدون بادبند (F)



(ب) ضریب لغزش ۱۰۰٪- دارای بادبند (F+B)

شکل ۸. مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان یک قاب دو طبقه.

**Fig. 8.** Comparison of the displacement time history for a two-story frame.



شکل ۹. فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه در حالت استفاده از میراگر از نمای روبرو و جانب.

**Fig. 9.** The natural frequency of a 12-story building in the case of using a damper from the front and side views.

(۸) نشان داده شده است نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان طبقه دوم در قاب‌های با بار لغزشی ۰٪ با قابل خمشی بدون بادبند مقایسه و در حالت قاب‌های با نیروی لغزش ۱۰۰٪ با قاب مهاربندی شده مقایسه شده است.

بر اساس نتایج هنگامی که بار لغزش میراگر صفر باشد قاب مدل شده رفتاری شبیه قاب بدون بادبند دارد و در صورت استفاده از بار لغزشی ۱۰۰٪ رفتار قاب شبیه قاب دارای بادبند است بنابراین با توجه به نزدیکی پاسخ‌ها می‌توان کفایت مدل میراگر به‌کاررفته را تأیید کرد.

### ۳- نتایج و بحث

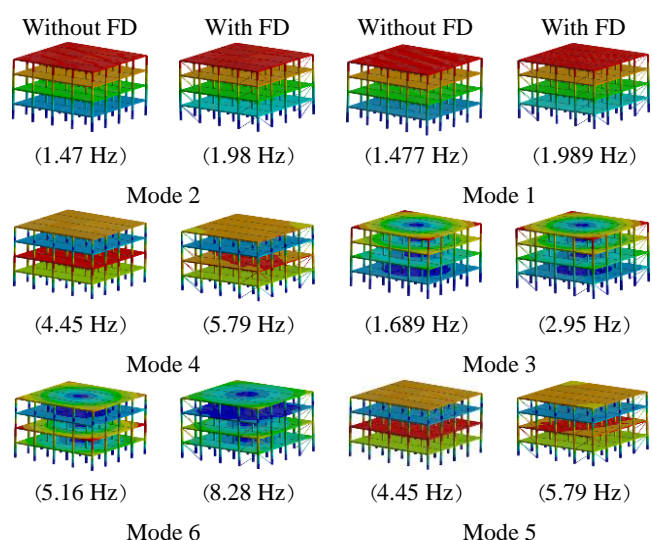
تحلیل مودال ساختمان یک روش تحلیلی است که در طراحی و تحلیل سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، رفتار دینامیکی ساختمان بر اساس مودهای طبیعی آن بررسی می‌شود. مودهای طبیعی، حالت‌های ارتعاشی اصلی یا رفتارهای دینامیکی مستقل ساختمان هستند که در زمان عدم اعمال نیروهای خارجی، ساختمان به این حالت‌ها ارتعاش می‌کند. در شکل (۹) فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه در حالت استفاده از میراگر از نمای روبرو و جانب آورده شده است.

مودهای اول تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده شش حالت ارتعاشی اصلی ساختمان هستند که با فرکانس‌های طبیعی متفاوت ارتعاش می‌کنند. مود اول دارای کمترین فرکانس طبیعی و برابر با ۰/۷۰۸ هرتز است و مود ششم دارای بیشترین فرکانس طبیعی است. هر مود نشان‌دهنده یک الگوی ارتعاشی مشخص است که ساختمان در آن ارتعاش می‌کند.

در شکل (۱۰) مقایسه پاسخ فرکانس طبیعی یک ساختمان ۱۲ طبقه بین دو حالت با و بدون میراگر نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است افزودن میراگر باعث افزایش فرکانس طبیعی سازه در تمامی مودهای اول تا ششم شده است. این تغییر به دلیل اضافه شدن سختی کلی سازه ناشی از میراگر اصطکاکی است که در هنگام تحریک ساختمان با اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین قطعات مختلف میراگر موجب افزایش سختی و در نتیجه افزایش فرکانس طبیعی شده است.

در شکل (۱۱) مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی اول تا ششم ساختمان ۸ طبقه بین دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی نشان



شکل ۱۲. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۴ طبقه

Fig. 12. Effect of damper on natural frequency of 4-story building

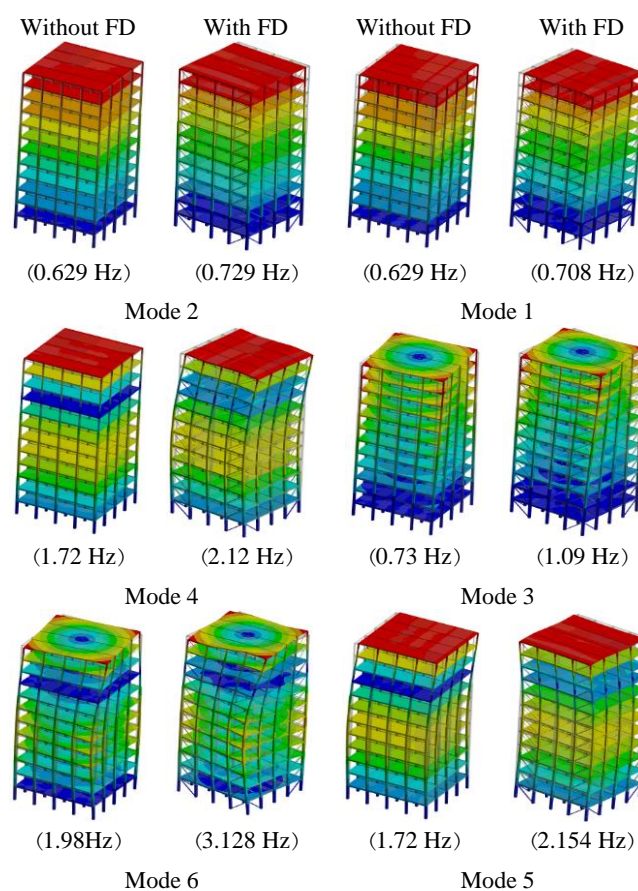
جدول ۲. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه

Table 2. Effect of damper on natural frequency of 4- 8- and 12-story building

12 Story		8 Story		4 Story		Mode No.
without FD	with FD	without FD	with FD	without FD	with FD	
0.708	0.629	0.89	0.824	1.989	1.477	1
0.729	0.629	0.919	0.824	1.989	1.477	2
1.09	0.736	1.27	0.95	2.95	1.689	3
2.127	1.72	2.77	2.26	5.79	4.45	4
2.154	1.72	2.79	2.26	5.79	4.45	5
3.128	1.98	3.96	2.6	8.28	5.16	6

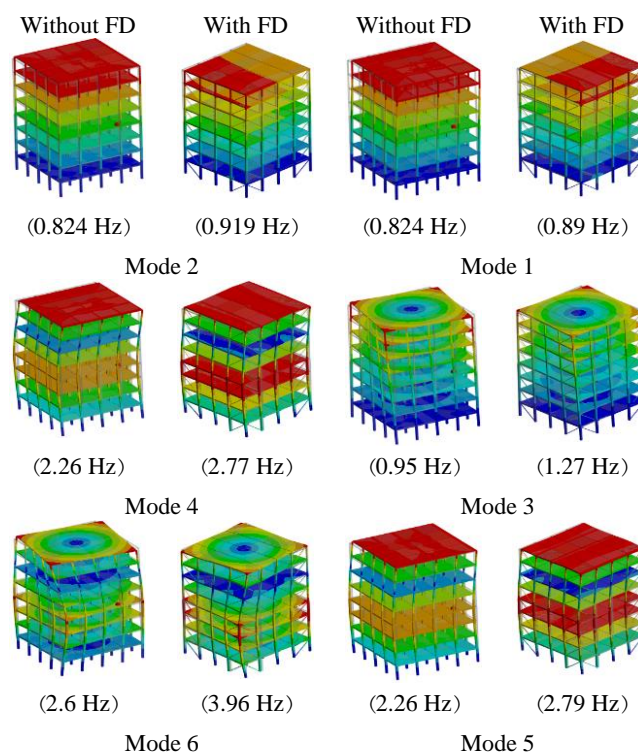
مودال این امکان را می‌دهد تا فرکانس‌های طبیعی ساختمان تعیین شود. فرکانس طبیعی یک ساختمان وابسته به ویژگی‌های مکانیکی و هندسی آن است و نشان می‌دهد که ساختمان در چه فرکانس‌هایی به صورت طبیعی ارتعاش می‌کند. اطلاعات در خصوص فرکانس‌های طبیعی ساختمان به طراحان کمک می‌کند تا از ارتعاشات ناخواسته و تشدیدهای ممکن در ساختمان پیشگیری کنند. در جدول ۲ فرکانس طبیعی ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است تأثیر میراگر در مودهای بالاتر بیشتر از مودهای پایین‌تر است با این حال مود سوم و ششم بیشترین تأثیرپذیری میراگر را نشان داده است. همچنین نتایج نشان از تغییرات قابل ملاحظه‌تر ساختمان ۴ طبقه نسبت به ۸ طبقه و سپس ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد که به معنای غالب بودن سختی کلی ساختمان نسبت به حالت اضافه نمودن میراگر است.



شکل ۱۰. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه

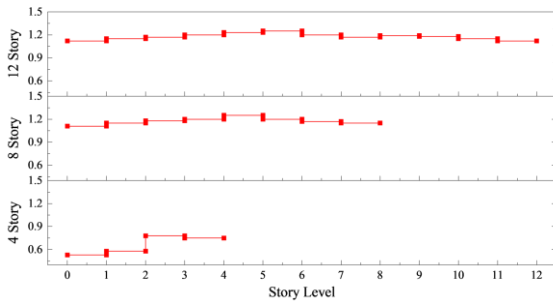
Fig. 10. Effect of damper on natural frequency of 12-story building.



شکل ۱۱. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۸ طبقه

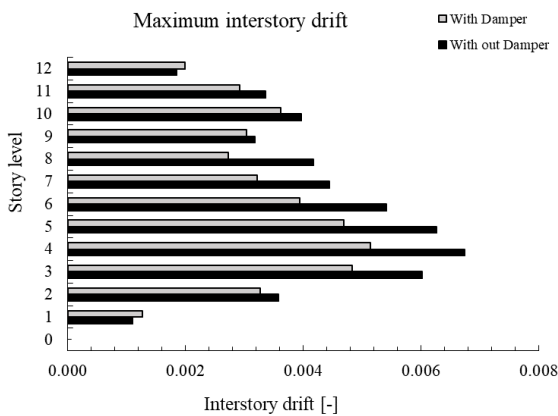
Fig. 11. Effect of damper on natural frequency of 8-story building

ساختمان در حالت با میراگر نشان داده شده است. اختلاف بین تنش برشی در جابه جایی های اولیه کمتر است و با افزایش جابه جایی اختلاف تنش برشی قابل ملاحظه تر می شود بیشترین میزان تنش برشی متعلق به ساختمان ۱۲ طبقه است و کمترین میزان تنش برشی نیز مربوط به ساختمان ۴ طبقه است که مقدار آن پس از جابه جایی ۴۰ سانتیمتر افت شدیدی پیدا کرده است.



شکل ۱۳. نسبت جابه جایی نسبی طبقات در ساختمان های مختلف

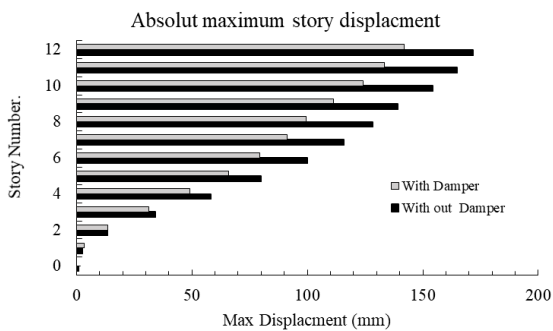
Fig. 13. The story drift ratio in different buildings



شکل ۱۴. مقایسه بیشینه جابه جایی نسبی داخلی ساختمان ۱۲ طبقه در دو

حالت با و بدون میراگر اصطکاکی

Fig. 14. Comparison of maximum interstory drift of 12-story building in both with and without friction damper



شکل ۱۵. مقایسه بیشینه جابه جایی در ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و

بدون میراگر اصطکاکی.

Fig. 15. Comparison of absolute maximum displacement of 12-story building in both with and without friction damper

تحلیل مودال ساختمان این امکان را می دهد تا رفتار دینامیکی ساختمان را در برابر نیروهای دینامیکی مختلف، مانند نیروی زلزله یا بارهای دینامیکی دیگر، بررسی کرد. با مدل کردن ساختمان بر اساس مودهای طبیعی، می توان نیروهای دینامیکی را به صورت دقیق تری در ساختمان تحلیل کرد و اثر آن ها روی ساختمان را پیش بینی کرد.

### ۱-۳- جابه جایی نسبی ساختمان

نمودار جابه جایی نسبی طبقات مختلف ساختمان های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه برای ساختمان با میراگر اصطکاکی در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می شود در ساختمان ۴ طبقه مقادیر جابه جایی نسبی طبقه دوم چند برابر از طبقه اول بیشتر شده است و در طبقه سوم و چهارم با کاهش جابه جایی نسبی مواجه شده است. در ساختمان های ۸ طبقه مشاهده می شود که افزایش ارتفاع تا طبقه پنجم با افزایش جابه جایی نسبی و سپس با کاهش جابه جایی نسبی تا طبقه ۸ مواجه شده است. در ساختمان ۱۲ طبقه نیز از طبقه اول تا ۵ روند افزایش و سپس یک کاهش جزئی در طبقه ۶ و ۷ وجود دارد سپس یک افزایش در طبقه ۸ و در ادامه تنها روند کاهشی جابه جایی نسبی مشاهده می شود.

در شکل (۱۲) مقایسه جابه جایی نسبی داخلی ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی نشان داده شده است.

بر اساس نتایج جابه جایی نسبی در بخش میانی ساختمان می توان دریافت که بیشینه جابه جایی نسبی طبقات ۴ و ۵ رخ داده است و سپس مقدار جابه جایی نسبی میانی روند کاهش داشته است. با این حال در طبقات ۹ و ۱۰ این روند با افزایش محلی مواجه شده است که پس از آن دوباره با کاهش جابه جایی نسبی مواجه شده است.

نتایج شکل ۱۵ نشان می دهد که با افزایش ارتفاع ساختمان مقدار جابه جایی نسبی روند افزایش داشته است با این حال استفاده از میراگر موجب کاهش زیاد جابه جایی نسبی خصوصاً در طبقات بالاتر شده است.

در شکل ۱۵ بیشینه جابه جایی در ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل ۱۶ تأثیر تعداد طبقه در نمودار جابه جایی برش پایه



به پایه‌های سازه اعمال شد. سازه‌ها تحت بار زمانی زلزله تحریک شدند. این کار برای دو حالت با میراگر و بدون میراگر انجام شد. همچنین هر سازه، تحت بارگذاری ۲ رکورد زلزله، شامل رکورد نزدیک به گسل و رکورد دور از گسل، قرار گرفتند. با اعمال میراگر اصطکاکی، نتایج زیر حاصل شد:

۱- از آنجاکه در بارگذاری زلزله نیرو وارد شده به سازه از پی وارد می‌شود، پس میراگرهای مستقر در طبقات اول و دوم نقش بسزایی در میرا کردن نیروهای وارد شده به کل سازه را دارند؛ اما در سازه‌های بلند چون میراگرهای پایین تنها مقداری از نیرو را میرا می‌کنند و برای کنترل حرکت و شتاب طبقات بالا، میراگرهای طبقات میانی بسیار مؤثر هستند. به همین خاطر است که کاهش درصد شتاب بالایی در سازه ۱۲ طبقه نسبت به سازه ۸ طبقه بیشتر است.

۲- از آنجایی که در این شبیه‌سازی از میراگرهای مشابه برای همه طبقات و همه ساختمان‌ها استفاده شده است، با افزایش وزن سازه نسبت توان میرایی افزایش نیافته، پس تنش‌های میانگین (فون میزز) و برشی کمتر کاهش یافته است.

۳- با بررسی بیشینه جابه‌جایی در کل سازه، می‌توان دریافت که استفاده از میراگرهای اصطکاکی در ساختمان ۴ طبقه تحت زلزله‌های نزدیک و دور از گسل کاملاً مؤثر بوده است.

۴- با بررسی نیروی برشی بیشینه در ساختمان‌ها، مشخص است که نوسانات تغییرات کاهش یافته و میرا شده است و در کل چه در کلیه سازه‌ها به ویژه سازه ۴ طبقه و به خصوص تحت زلزله‌های نزدیک به گسل، این میراگرها مثر ثمر بوده است.

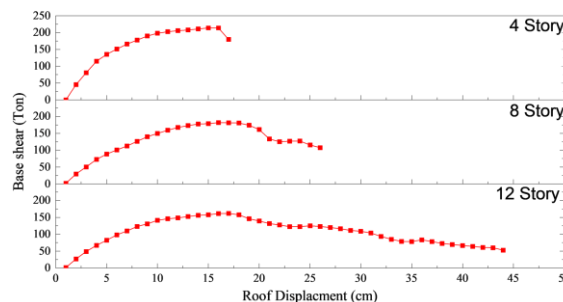
در انتها می‌توان گفت به علت هزینه بسیار زیاد خرید و اجرای میراگرهای بزرگ ساختمانیچگونگی چیدمان و تعداد آن در طبقات مختلف بسیار مهم است.

### قدردانی

در انجام این پژوهش حمایتی از سوی مراکز یا دانشگاه‌ها نشده است.

### تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن وجود ندارد.



شکل ۱۶. تأثیر تعداد طبقه در نمودار جابه‌جایی-برش پایه ساختمان در حالت با میراگر.

Fig. 16. The effect of the story number on the displacement-shear diagram of the foundation of the building in the case with dampers.

جدول ۳. درصد کاهش بیشینه پارامترهای مورد بررسی

Table 3. The percentage of the maximum reduction of the studied parameters

Acceleration	Equivalent Stress	Deformation	Shear Force	Cases
Damping Percent				
58%	83%	30%	32%	4S-Far
66%	84%	40%	61%	4S-Near
77%	62%	44%	57%	8S-Far
40%	27%	25%	28%	8S-Near
31%	20%	18%	23%	12S-Far
27%	27%	17%	25%	12S-Near

در جدول (۳) درصد کاهش بیشینه پارامترهای مورد ارزیابی برای سازه با میراگر نسبت به سازه بدون میراگر در دو حالت دور و نزدیک به گسل نشان داده شده است.

بر اساس نتایج مربوط به شتاب بیشینه در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۷۷٪ کاهش، بوده است؛ و در زلزله‌های نزدیک به گسل مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۶٪ کاهش است. همچنین در زلزله‌های نزدیک و دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی معادل فون میزز مربوط به ساختمان‌های ۴ طبقه با ۸۳٪ و ۸۴٪ کاهش، بوده است. در زلزله‌های دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی جابه‌جایی مربوط به ساختمان ۸ طبقه با ۴۴٪ کاهش، بوده است. همچنین تنش برشی نشان می‌دهد که در زلزله‌های نزدیک به گسل بیشترین تأثیر میراگر مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۱٪ کاهش است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بررسی آثار میراگرها روی سازه‌های اسکلت فلزی تحت نیروی زلزله، سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مدل‌سازی و سپس شبیه‌سازی شد. نیروی زلزله به صورت جابه‌جایی اجباری

## سهم نویسندگان

## منابع مالی

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است (۵۰٪ برای هر نویسنده).

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

## References

- [1] Luo, Q., Dai, F., Liu, Y., Gao, M., Li, Z. and Jiang, R., 2021. Seismic performance assessment of velocity pulse-like ground motions under near-field earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(8), pp.3799-3816.
- [2] Kamranzad, F., Memarian, H. and Zare, M., 2020. Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), p.430.
- [3] Karimzadeh, S., Miyajima, M., Hassanzadeh, R., Amiraslazadeh, R. and Kamel, B., 2014. A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, pp.263-280.
- [4] Soong, T.T. and Spencer Jr, B.F., 2002. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering structures*, 24(3), pp.243-259.
- [5] Bhaskararao, A.V. and Jangid, R.S., 2006. Seismic analysis of structures connected with friction dampers. *Engineering structures*, 28(5), pp.690-703.
- [6] Chandra, R., Masand, M., Nandi, S.K., Tripathi, C.P., Pall, R. and Pall, A., 2000, January. Friction-dampers for seismic control of La Gardenia towers south city, Gurgaon, India. In *12 th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand*.
- [7] Vail, C., Hubbell, J., O'Connor, B., King, J. and Pall, A., 2004, August. Seismic upgrade of the Boeing commercial airplane factory at Everett, WA, USA. In *The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada*.
- [8] Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R.T. and Pall, A., 2004, August. Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal. In *13th world conference on earthquake engineering* (pp. 1-2).
- [9] Hale, T. and Pall, R., 2000, January. Seismic upgrade of the Freeport water reservoir, Sacramento, California. In *Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- [10] Balazic, J., Guruswamy, G., Elliot, J., Pall, R. and Pall, A., 2000. Seismic Rehabilitation of Justice Headquarters Building, Ottawa, Canada. In *Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- [11] Mahdavian, S., et al. 2007. Using friction dampers for vibration control of buildings. In *International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, -5), 0-0. SID. <https://sid.ir/paper/447227/fa>. [In Persian]
- [12] Jalali, S. G. and Vaseghi, J., 2009. Performance of Steel Frames Equipped with Rotational Friction Dampers (RFD). *Structure and Steel*, 5(6), 93-105. SID. <https://sid.ir/paper/136617/fa>. [In Persian]
- [13] Vaseghi Amiri, J., Navayinia, B. and Navaei, S., 2011. Evaluation of performance of eccentric braced frame with friction damper. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 39(5), pp.717-732.
- [14] Amiri, J.V. and Tamjid, F., 2014. Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Using Pall Friction Damper. *Modares Journal of Civil Engineering*, 14(2).
- [15] Mirzaeeafrod, H., Mirtaheri, M. and Rahmani S. H., 2016. Effect of Cylindrical Frictional Dampers on Seismic Response of Steel Structures ". *Modares Civil Engineering*, 16(1), pp.227-236. [In Persian].
- [16] Wang, Y., Zhou, Z., Xie, Q. and Huang, L., 2020. Theoretical analysis and experimental investigation of hysteretic performance of self-centering variable friction damper braces. *Engineering Structures*, 217, p.110779.
- [17] Wang, Y., Zeng, B., Zhou, Z. and Xie, Q., 2021. Hysteretic and seismic performance of dual self-centering variable friction damper braces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, p.106774.
- [18] Javidan, M.M. and Kim, J., 2022. A rotational friction damper-brace for seismic design of resilient framed structures. *Journal of Building Engineering*, 51, p.104248.
- [19] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhosseini, S.M. and Zeighami, E., 2021, August. Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper. In *Structures* (Vol. 32, pp. 2073-2087). Elsevier.
- [20] Bakhshayesh, Y., Shayanfar, M. and Ghamari, A., 2021. Improving the performance of concentrically braced frame utilizing an innovative shear damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, p.106672.
- [21] Ding, Y., Zhou, Z., Huang, L. and Si, Y., 2021. Seismic performance of self-centering glulam frame with friction damper. *Engineering Structures*, 245, p.112857.
- [22] Pourzangbar, A., Vaezi, M., Mousavi, S.M. and Saber, A., 2020. Effects of brace-viscous damper system on the dynamic response of steel frames. *International Journal of Engineering. Transactions B: Applications*, 33(5), pp.720-731.

- [23] Ebrahimi, S. and Mirghaderi, S.R., 2023. A new friction-slip brace damper to improve seismic performance of braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, p.107945.
- [24] Barbagallo, F., Bosco, M., Floridia, A., Marino, E.M. and Rossi, P.P., 2020. Design for seismic upgrading of existing RC frames by friction dampers. *International Journal*, 37(1-2020).
- [25] Ebadi Jamkhaneh, M., Homaioon Ebrahimi, A. and Shokri Amiri, M., 2019. Investigation of the seismic behavior of brace frames with new corrugated all-steel buckling restrained brace. *International Journal of Steel Structures*, 19, pp.1225-1236.
- [26] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F., 1993. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, 9(3), pp.505-528.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Tabatabaei Mirhosseini, R. and Falahatnejad, A., 2025. Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.7-18.

**DOI:** 10.22034/25.3.3



## Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer

Sadegh Shahidi<sup>1</sup>, Meysam Bayat<sup>2\*</sup> , Sayed Alireza Zarei<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

### Abstract

Soil stabilization techniques have traditionally relied on cement or lime, yet there remains a significant knowledge gap regarding the mechanical behavior of soil treated with innovative materials. Addressing this gap, this study delves into the mechanical properties of soil stabilized with polyurethane (PU) foam, nano-silica, and basalt fiber. Through rigorous experimentation, unconfined compressive strength (UCS) and direct shear tests were conducted on reconstituted silica and calcareous samples, each treated with various combinations of these additives. A comprehensive examination of parameters such as additive content and curing time was undertaken to elucidate their effects. The results unveiled a noteworthy enhancement in UCS and shear strength parameters (cohesion and friction angle) with the incorporation of PU foam, nano-silica, or their amalgamation with fiber. Particularly striking was the superior performance observed with the combination of PU and basalt fiber, showcasing remarkable improvements in the mechanical behavior of both silica and calcareous sand, especially when considering shorter curing times. The synergistic effects of PU and basalt fiber proved instrumental in fortifying the soil's structural integrity against environmental challenges. Furthermore, it was consistently observed that calcareous samples exhibited elevated UCS, and shear strength values compared to their silica counterparts. This discrepancy underscores the inherent differences in mechanical behavior between these two types of sand, highlighting the need for tailored stabilization approaches. Moreover, the investigation delved into the failure patterns and microstructural changes within the stabilized samples, employing Scanning Electron Microscopy (SEM) for detailed analysis. This microscopic examination offered valuable insights into the efficacy of the stabilizing agents and their impact on the soil's mechanical properties. For instance, SEM imaging revealed significant bonding in fiber-reinforced samples, indicating enhanced load transfer mechanisms. Similarly, the presence of clusters of nano-silica particles adhering to sand particles showcased an improved cohesion within the stabilized soil. PU-stabilized samples, on the other hand, exhibited a cohesive layer enveloping sand particle, thereby enhancing interparticle connectivity and overall stability. The superior performance of PU over nano-silica was underscored by its ability to create a more cohesive matrix and foster stronger interparticle bonds, as evidenced by the SEM analysis. In conclusion, this study sheds light on the potential of innovative stabilization materials such as PU foam, nano-silica, and basalt fiber in bolstering the mechanical properties of soil. The findings not only offer valuable insights into the efficacy of these additives but also pave the way for the development of tailored soil stabilization techniques geared towards enhancing infrastructure resilience and sustainability.

### Review History

Received: Mar 13, 2024

Revised: Sep 01, 2024

Accepted: Jun 01, 2024

### Keywords

Silica and calcareous sand  
Soil improvement  
Fiber  
Nanomaterials  
Polymer

\* Corresponding Author Email: [bayat.m@pci.iaun.ac.ir](mailto:bayat.m@pci.iaun.ac.ir) - ORCID: 0000-0001-5525-5199



## مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی ماسه بهسازی شده با نانومواد، الیاف بازالت و پلیمر

صادق شهیدی<sup>۱</sup>، میثم بیات<sup>۲\*</sup> , سید علیرضا زارعی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان (اصفهان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
۳. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان (اصفهان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری

در حالی که روش‌های سنتی بهسازی خاک با استفاده از سیمان یا آهک به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته‌اند، اما هنوز درک کاملی از رفتار مکانیکی خاک‌های بهسازی شده با افزودنی‌های جدید مثل پلیمرها وجود دارد. این مطالعه به بررسی خواص مکانیکی خاک‌های استحکام‌بخشی شده با فوم پلی‌یورتان (PU)، نانوسیلیس و الیاف بازالت می‌پردازد. مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و آزمون برش مستقیم روی نمونه‌های بازسازی شده ماسه سیلیسی و کربناته با استفاده از ترکیبات مختلف از این مواد انجام شد. پارامترهای مختلفی از جمله مقدار مواد افزودنی و زمان عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهند که با افزودن فوم PU، نانوسیلیکا یا ترکیب آنها با الیاف، مقاومت فشاری بدون و پارامترهای مقاومت برشی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به ویژه، ترکیب PU و الیاف بازالت عملکردی بسیار امیدبخش در بهبود رفتار مکانیکی ارائه می‌دهد، به ویژه برای زمان‌های عمل‌آوری کوتاه که می‌تواند در پروژه‌هایی که زمان اهمیت بالایی دارد، مفید واقع شود. همچنین، شکل گسیختگی نمونه‌ها و ساختار پلیمر میکروسکوپی نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی

ماسه سیلیسی و کربناته  
بهسازی خاک  
الیاف، نانومواد  
پلیمر

### ۱- اجزای مقاله

از مواد نوآورانه مانند نانومواد و پلیمرها انتقال یافته است [12]. این مواد نوآورانه فرصت‌های بی‌نظیری را برای تقویت ساختارهای خاکی ارائه می‌دهند و مشکلات مرتبط با خاک‌های ضعیف یا خاک‌های نرمی که در زمان بارگذاری دچار تغییر شکل می‌شوند، را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد. از طریق استفاده دقیق و مهندسی، این مواد ویژگی‌های ریزساختار خاک را با نفوذ مناسب در فضاهای خالی بین ذرات تغییر می‌دهند و در نهایت موجب افزایش مقاومت توده خاک می‌شوند [4]. با تشدید شهرنشینی و افزایش تقاضا برای زیرساخت‌ها، اهمیت روش‌های نوین بهسازی

بهبود خاک به عنوان یک پایه اساسی در مهندسی عمران مطرح است، به ویژه زمانی که در پروژه با خاک ضعیف سر و کار داریم [1-5]. استفاده از افزودنی‌های سنتی، موادی مانند سیمان و آهک از گذشته تا به امروز در بهبود پایداری خاک و بهبود ظرفیت باربری مورد استفاده مهندسیین و پژوهشگران ژئوتکنیکی بوده است [6-11]. با این حال، با ظهور فناوری‌های پیشرفته که مضر برای محیط زیست هستند و فرآیندهای پراثری، تمرکز به سوی استفاده

خاک به طور چشمگیری بیشتر می‌شود [13, 14].

در مهندسی عمران معاصر، استفاده از الیاف برای تقویت خاک یا تثبیت آن با آهک و سیمان به عنوان یک راهبرد تحول‌آفرین ظاهر شده است. با اضافه کردن الیاف که به طور معمول از موادی مانند پلی‌پروپیلن، بازالت، پلی‌استر یا فولاد تشکیل شده‌اند، در توده خاک، مهندسان ویژگی‌های مکانیکی و عملکرد آن را تقویت می‌کنند [2, 15-17]. این روش نه تنها مقاومت و ظرفیت تحمل بار خاک را افزایش می‌دهد، بلکه از شکست و تغییرشکل‌های ترد جلوگیری می‌کند [18]. افزودن الیاف به خاک، مقاومت کششی آن را افزایش می‌دهد، خطر ایجاد شکست‌های ترد و رفتارهای شکننده را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، الیاف باعث می‌شود تا تنش‌ها درون جرم خاک به طور موثرتری پخش شود و احتمال شکست تحت بار را کاهش می‌دهد. مطالعه‌های قبلی نشان می‌دهند که تلفیق آهک، سیمان و الیاف، مواد مرکبی با ویژگی‌های مهندسی برتر ایجاد می‌کند [19-22]. علاوه بر این، استفاده از الیاف‌ها با کاهش نیاز به مواد تثبیت‌کننده سنتی مثل آهک و سیمان، مزایای زیست‌محیطی به همراه دارد که امروزه مورد توجه پژوهشگران است.

در مهندسی نوین، نانومواد با ویژگی‌های استثنایی خود، مواد ساختمانی را از طریق قدرت نفوذ بالا، توزیع، مقاومت و دوام، متحول کرده‌اند. اما تأثیر نانومواد از حوزه‌های ساخت و ساز معمولی فراتر می‌رود؛ آنها پیشروی خوبی در زمینه‌های مختلف مهندسی برای بهبود دوام، رفع آلودگی و راه‌حل‌های زیرساخت پایدار داشته‌اند [23-27]. جافاریان و همکاران [28] توانایی تحول‌آفرینی تزریق نانومواد به خاک‌های دانه‌ای را به روشنی نشان می‌دهند، با گزارش افزایش مقاومت فشاری و بهبود ویژگی‌های خاکهای دانه‌ای. به طور مشابه، لوئو و همکاران [29] ویژگی‌های مکانیکی ماسه کربناته بهسازی شده با سیمان را از طریق نانوسیلیکا افزایش داد. این پیشرفت‌ها نقش اساسی نانومواد در انقلاب مهندسی عمران را تأکید می‌کنند.

پلیمرها به تازگی به عنوان یک ماده نوآورانه دیگری در مهندسی عمران ظاهر شده‌اند. فوم پلی‌یورتان یک پلیمر آلی با ساختارهای سلولی بسته یا باز از زمان‌های گذشته تاکنون کاربردهای گوناگونی پیدا کرده است. تحقیقات بسیاری برای ترکیب فوم پلی‌یورتان با مواد آلی یا سیمان برای ساخت‌وسازهای

معمول در مهندسی عمران انجام شده است [30-34]. تقویت و بهسازی خاک با فوم پلی‌یورتان چندین مزیت دارد، از جمله طبیعت سبک آن، ویسکوزیته پایین، خواص چسبندگی بالا، عایق بودن در برابر حرارت، پایداری شیمیایی، قابلیت اتساع بعد از تزریق، نرخ اتساع بالا و زمان واکنش کوتاه و سریع. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تقویت انواع مختلف خاک‌های چسبنده و دانه‌ای با فوم پلی‌یورتان بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یا سطوح آب زیرزمینی آنها، حتی در شرایط ژئوتکنیکی پیچیده، امکان‌پذیر است [13, 14, 35-37].

هر چند مطالعات زیادی روی تثبیت خاک با استفاده از مواد متنوع انجام شده است، اما هنوز بررسی کاملی روی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی خاکهای دانه‌ای بهسازی شده با ترکیب الیاف بازالت، نانوسیلیکا و فوم پلی‌یورتان انجام نشده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری و برش مستقیم روی نمونه‌های بهسازی شده انجام شد، پنج نوع مخلوط افزودنی، شامل الیاف بازالت، آب، نانوسیلیکا و فوم پلی‌یورتان برای بهسازی نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته در نظر گرفته شد. پنج گروه نمونه تقویت شده با افزودنی‌های مختلف آماده شده است که شامل نمونه‌های بهسازی شده با الیاف، نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیکا، نمونه‌های بهسازی شده با ترکیبی از الیاف و نانوسیلیکا، نمونه‌های تثبیت شده با PU، و نمونه‌های بهسازی شده با PU و الیاف. این افزودنی‌ها به ماسه سیلیسی و کربناته افزوده شدند و سپس به درون قالب‌ها ریخته شدند تا پس از آن با عمل کوبش، نمونه‌ها آماده شوند. پس از دوره عمل آوری مورد نظر، آزمایش‌های UCS و برش مستقیم روی نمونه‌های انجام شده است. آثار مقدار افزودنی، زمان عمل آوری، نوع ماسه (سیلیسی و کربناته) روی مقدار مقاومت فشاری بررسی شده است. علاوه بر این، آزمایش‌های برش مستقیم برای تحلیل پاسخ برش نمونه‌ها انجام شده است.

در این تحقیق، همانطور که پیشتر اشاره شده است، ماسه سیلیسی و کربناته استفاده شده است. ماسه سیلیسی از منطقه ورزنه اصفهان جمع‌آوری شده است و ماسه کربناته از جزیره کیش در

است. قالب‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر برای آماده‌سازی نمونه‌ها به کار گرفته شدند. نمونه‌ها با نرخ کرنش ثابتی برابر با یک درصد در دقیقه بارگذاری شدند تا به مقدار تنش ماکزیمم برسند. مواد افزودنی مانند آب، الیاف، نانوسیلیکا و پلی‌یورتان با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن با ماسه سیلیسی یا کربناته خشک مخلوط شده است. مقدار آب در صورت

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی ماسه سیلیسی و کربناته

Table 1. Summary of physical characteristics of silica and calcareous sands

Soil type (USCS)	$G_s$	$\omega_{opt}$	$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{min}$
Silica Sand	SP	2.66	8	0.83
Calcareous Sand	SP	2.67	6.5	1.42

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالت

Table 2. Physical and mechanical characteristics of basalt fiber

Characteristics	Results
Color	Golden brown
Cut Length (mm)	12
Diameter of fiber ( $\mu\text{m}$ )	16
Density ( $\text{g/cm}^3$ )	2.62
Fracture strength (MPa)	2150
Elastic modulus (GPa)	98
Tensile strength (MPa)	3000
Water absorption (%)	0.1

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی نانوسیلیکا

Table 3. Physical properties of nano-silica

Characteristics	Results
Color	White
Form	Amorphous
Nano type	Silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ )
Purity (%)	99
Particle Size (nm)	20-30
Specific Surface Area ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	190-220
Free water content	Less than 3%

جدول ۴. ویژگی‌های فیزیکی پلی‌ارتان

Table 4. Technical properties of PU foam

Characteristics	Results
Application temperature	$\geq 5^\circ\text{C}$ ; curing below $50^\circ\text{C}$ not possible
Foam expansion	Approx. 100%-200%
Curing time	At $20^\circ\text{C}$ and high humidity: $\sim 1\text{cm/h}$ ; at low humidity and $20^\circ\text{C}$ : $\sim 0.5\text{cm/h}$ ; at high humidity and $50^\circ\text{C}$ : $\sim 0.5\text{cm/h}$ ; loses adherence after 10-20 minutes
Cell structure after curing	Closed cell
Temperature resistance	$-40^\circ\text{C}$ to $100^\circ\text{C}$
Heat conductivity	Approx. $0.04\text{ W/mK}$
Density (DIN 53420)	$23\text{ g/ml}$

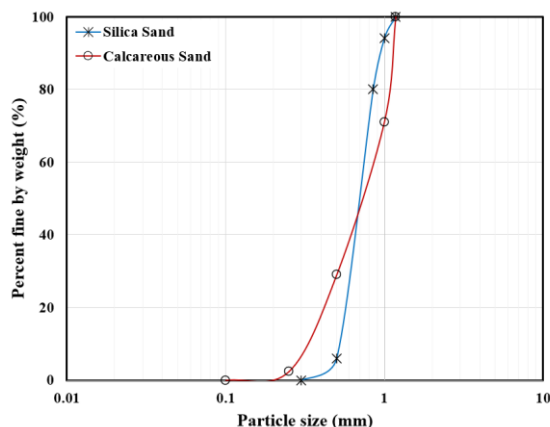
خلیج فارس استفاده شده است. منحنی‌های توزیع اندازه ذرات این دو نوع ماسه در شکل (۱) نشان داده شده است. ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌ها نیز در در جدول (۱) ارائه شده است.

الیاف بازالت با درصد‌های مختلف از ۰/۵ تا ۴ درصد وزنی برای بهسازی نمونه‌ها استفاده شده است. الیاف بازالت، که از سنگ آتشفشانی طبیعی به دست می‌آید، به خاطر ویژگی‌های مکانیکی استثنایی و پایداری زیست‌محیطی خود، روز به روز بیشتر شناخته می‌شود. با مزایایی از قبیل استحکام کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری گرمایی، الیاف بازالت به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله ساختمانی، هوافضا و خودروسازی برای تقویت مواد کامپوزیتی و افزایش عملکرد سازه‌ها استفاده می‌شود. جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق را شرح می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شده است از نانو ذرات نیز در این تحقیق برای تثبیت ماسه استفاده شده است. نوع نانو ذرات مورد استفاده در این تحقیق، نانوسیلیکا بوده است. جدول (۳) برخی ویژگی‌های نانوسیلیکا که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، ارائه می‌دهد.

نوع دیگر افزودنی مرود استفاده در این تحقیق، پلیمر بوده است. در این مطالعه، از فوم پلی‌یورتان یک نوع پلیمر خاص برای بهسازی خاک استفاده شده است. جدول (۴) ویژگی‌های آن را شرح می‌دهد.

در این مطالعه، آزمایش مقاومت فشاری طبق ASTM D2166 برای ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌های بهبود یافته استفاده شده

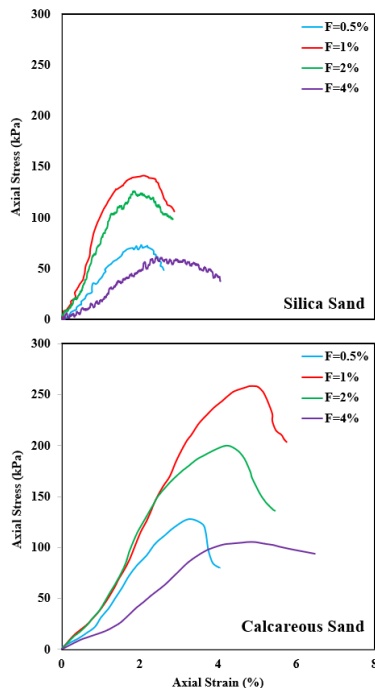


شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه سیلیسی و کربناته

Fig. 1. Particle size distribution curves of silica and calcareous sands

نشان می‌دهند. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نانوسیلیکا بیشترین UCS را در هر دو نمونه ماسه دارند، با افزایش UCS از ۵٪ تا ۱۰٪ محتوای نانوسیلیکا و سپس کاهش بعد از ۱۰٪ به ۲۰٪. نمونه‌های ماسه کربناته در اینجا نیز دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های ماسه سیلیسی هستند. به طور خاص، برای محتوای نانوسیلیکا ۵٪، ماسه کربناته دارای مقدار UCS بیشتری نسبت به شن سیلیکا را نشان می‌دهد، اما برای محتوای نانوسیلیکا بیشتر از ۵٪، شن سیلیکا ارزش‌های UCS بالاتری نسبت به شن کلسیم‌دار را نشان می‌دهد. کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده با محتوای نانوسیلیکا بیشتر از ۱۰٪ می‌تواند به ذرات نانوسیلیکا ارتباط داد که بین ذرات ماسه را پر می‌کنند و باعث کاهش اصطکاک بین ذرات و تسهیل غلظت ذرات می‌شود.

در این بخش، ترکیبی از نانوسیلیکا و الیاف بازالت برای تقویت نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته استفاده شده است با مقدار محتوای ثابت نانوسیلیکا ۵٪ و مقدار الیاف متغیر از ۰/۵٪ تا ۴٪. منحنی‌های تنش-کرنش این نمونه‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. مقادیر UCS با افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ تا ۱٪ افزایش می‌یابد و در مقدار الیاف برابر با ۱٪ به بیشترین مقدار خود می‌رسد، اما پس از آن با افزایش بیشتر مقدار الیاف، مقاومت



شکل ۲. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازالت

Fig. 2. UCS results of fiber-reinforced samples

وجود در ترکیب برابر با مقدار رطوبت بهینه (OMC) ماسه در نظر گرفته شده است. مخلوط‌ها با استفاده از روش تراکم مرطوب تا پنج لایه در قالب متراکم شده است و سپس درون یک نایلون قرار گرفته‌اند و در نهایت در دمای اتاق برای عمل‌آوری نگهداری شده‌اند.

برای آزمایش‌های برش مستقیم، نمونه‌ها در یک جعبه خمش ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری قرار گرفته‌اند. تقریباً روند مشابهی برای ساخت نمونه نمونه‌های برش مستقیم با نمونه‌های تک محوری استفاده شده است. پس از عمل‌آوری و انتقال نمونه‌ها به دستگاه برش مستقیم، یک تنش نرمال یکنواخت از طریق صفحه بالا اعمال شده است. در نهایت، بارگذاری برشی انجام شد. از سرعت بارگذاری ۰/۰۱ میلیمتر بر دقیقه برای آزمایش‌های برش مستقیم استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث‌ها

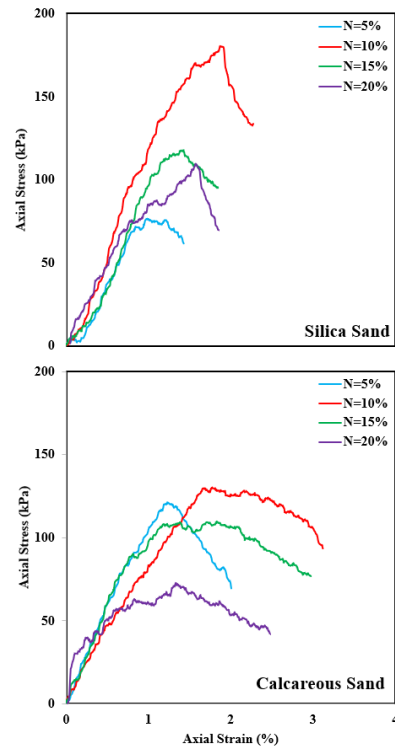
در این بخش، تأثیر مقدار افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری نمونه‌های سیلیسی و کربناته پس از گذشت ۲۸ روز عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی شده با الیاف بازالت را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های تقویت شده با ۱٪ الیاف بیشترین UCS را دارند. در واقع، با افزایش مقدار الیاف از ۰٪ تا ۱٪ مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است و با افزایش بیشتر الیاف از ۱٪ تا ۴٪ منجر به کاهش UCS می‌شود. به علاوه، مقایسه بین ماسه سیلیسی و کربناته نشان می‌دهد که نمونه‌های کربناته تقویت شده با الیاف، مقاومت UCS بالاتری نسبت به هم‌تایان سیلیسی دارند. اختلاف در مقدار UCS بین نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته، به ویژگی‌های منحصر به فرد ذرات ماسه کلسیم‌دار بازمی‌گردد. سطوح خشن و خلل و فرج بالا در ماسه کربناته، امکان نقاط تماس و قفل‌شدگی بیشتر با الیاف را فراهم می‌کند، که منجر به مکانیسم‌های انتقال بار و توزیع تنش بهتر و در نهایت باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی ماسه کربناته، به ویژه وجود مواد معدنی مانند کربنات کلسیم، می‌تواند اتصالات چسبنده قوی‌تری با مواد فیبر فراهم کند، که در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی را بهبود می‌بخشد. شکل (۳) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیکا را



کاهش می‌یابد. به طور کلی، نمونه‌های ماسه کربناته مقدار UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی نشان می‌دهد، به ویژه برای محتوای الیاف بیشتر از ۰/۵٪. به عنوان نمونه، در مقدار الیاف ۱٪، UCS ماسه کربناته برابر ۹۳۰ کیلوپاسکال است، در حالی که UCS ماسه سیلیسی تنها برابر با ۳۰۱ کیلوپاسکال است. مقایسه این یافته‌ها با نتایج قبلی در مورد نمونه‌های حاوی الیاف یا نانوسیلیس به تنهایی نشان می‌دهد که ترکیب نانوسیلیکا و الیاف بازالت بسیار تاثیرگذارتر از استفاده مجزای آنها است.

شکل (۵) نتایج آزمون UCS روی نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌یورتان با محتوای پلی‌یورتان از ۵٪ تا ۲۰٪ را ارائه می‌دهند. یافته‌ها نشان می‌دهد که محتوای بهینه پلی‌یورتان برای هر دو نوع ماسه برابر با ۱۰٪ است. به طور خاص، مقدار UCS با افزایش مقدار پلی‌یورتان از ۵٪ تا ۱۰٪ افزایش می‌یابد، سپس بعد از آن با افزایش بیشتر مقدار پلی‌یورتان، مقاومت آن کاهش می‌یابد. در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانو و الیاف، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان مقدار UCS بالاتری دارند، که نشان‌دهنده مزیت پلی‌یورتان نسبت به نانومواد و الیافها برای بهبود خاک است. این مزیت ممکن است از قابلیت پلی‌یورتان برای ایجاد یک ماتریس کامل پخش شده و مقاوم درون توده خاک نشأت گرفته باشد که پایداری و ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد. به علاوه، نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی مقدار UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی در تمام مقادیر پلی‌یورتان نشان می‌دهند که نشان از عملکرد برتر آنها در خاک‌های کربناته است. بهبودهای در رفتار مکانیکی خاک‌های دانه‌ای همچنین در مطالعات قبلی گزارش شده است [12, 38, 39] که با یافته‌های ارائه شده در این تحقیق هماهنگی دارد.

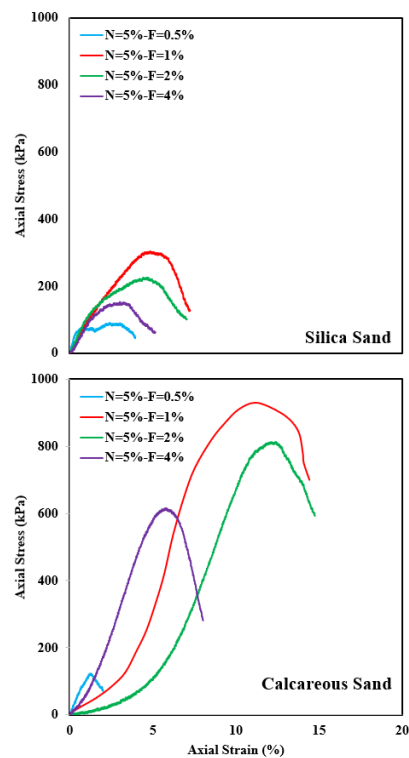
همچنین، ما مقاومت فشاری نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف را نیز بررسی کردیم. شکل (۶) تأثیر مقدار الیاف بر نتایج UCS نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف را نشان می‌دهند. در این تحقیق، محتوای پلی‌یورتان ثابت برابر با ۱۵٪ است، در حالی که مقدار الیاف از ۰ تا ۴٪ متغیر است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری با افزایش مقدار الیاف از ۰ تا ۴٪ به طور تدریجی افزایش می‌یابد. به طور مشخص، برای محتوای الیاف داده شده، نمونه‌های ماسه کربناته مقدار UCS بالاتری نسبت به



شکل ۳. نتایج آزمایش‌های تک محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با

نانوسیلیکا

Fig. 3. UCS results of nano-silica stabilized samples



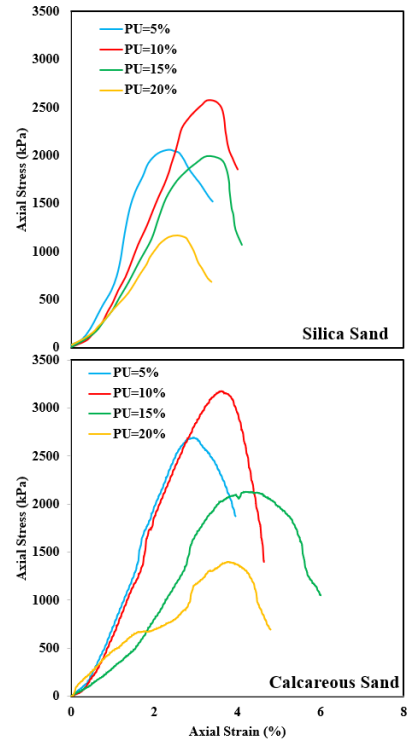
شکل ۴. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با

نانوسیلیکا و تقویت شده با الیاف بازالت

Fig. 4. UCS results of nano-silica stabilized fiber-reinforced samples

نمونه‌های شن سیلیکا را نشان می‌دهند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن الیاف به نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده باعث بهبود قابل توجه UCS و افزایش کرنش شکست می‌شود. این ترکیب از پلی‌یورتان و الیاف به دلیل اثرات هم‌زمانی آن‌ها بهبودهای قابل توجهی در ویژگی‌های مکانیکی را ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، افزودن الیاف مقاومت کششی و ظرفیت تحمل بار خاک را افزایش می‌دهد، در حالی که پلی‌یورتان همبندی و استحکام را فراهم می‌کند که منجر به ایجاد یک توده خاکی محکم و انعطاف‌پذیر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب پلی‌یورتان و الیاف برای کاربردهای بهسازی خاک، عملکرد و مقاومت بهبود یافته در هر دو نوع ماسه سیلیسی و کربناته ارائه می‌دهد. برخی تحقیقات قبلی نیز از ترکیب الیاف‌ها و پلیمرها برای افزایش رفتار مکانیکی انواع خاک‌ها استفاده کرده‌اند [40, 40] که نتایجی همسو با این نتایج بدست آوردند.

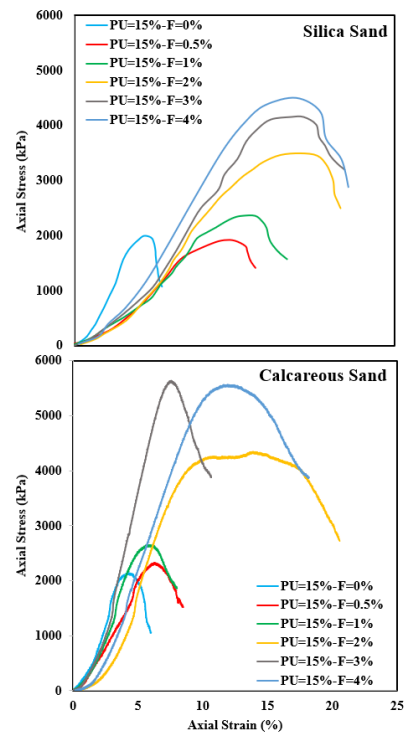
در این بخش، تأثیر زمان عمل‌آوری که از ۳ ساعت تا ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و از ۱ روز تا ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا است، بررسی شده است. پس از ۳ ساعت، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان به مقاومت کافی و قابل اندازه‌گیری رسیدند، در حالی که نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نیاز به یک دوره عمل‌آوری بیشتری برای به دست آوردن مقاومت کافی برای اندازه‌گیری داشتند. همانطور که از نتایج در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود، یک روند ثابت افزایش UCS با زمان در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود که به دلیل سخت‌شدن پیش‌رونده پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا ناشی از واکنش‌های شیمیایی یا فرآیند هیدراتاسیون نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، ماسه کربناته مقادیر UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی برای تمامی زمان‌های عمل‌آوری نشان می‌دهد، که به اختلاف‌های ذاتی و فیزیکی آنها مرتبط است. علاوه بر این، این اختلاف بین ماسه کربناته و سیلیسی با افزایش زمان عمل‌آوری، به‌ویژه هنگام اضافه کردن الیاف، تشدید می‌شود. در حالی که به‌طور کلی UCS با گذر زمان افزایش می‌یابد، نرخ افزایش UCS به وابستگی از افزودنی‌های استفاده شده متفاوت است. به‌طور خاص، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان نرخ بهبود UCS بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا را نشان می‌دهند که عملکرد برتر پلی‌یورتان را نسبت به گذشت زمان نشان می‌دهد. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف مقادیر



شکل ۵. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با

پلی‌ارتان

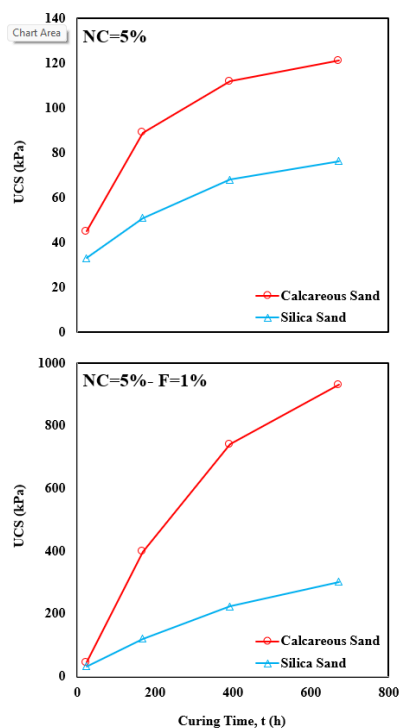
Fig. 5. UCS results of PU-stabilized samples



شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تک محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌ارتان

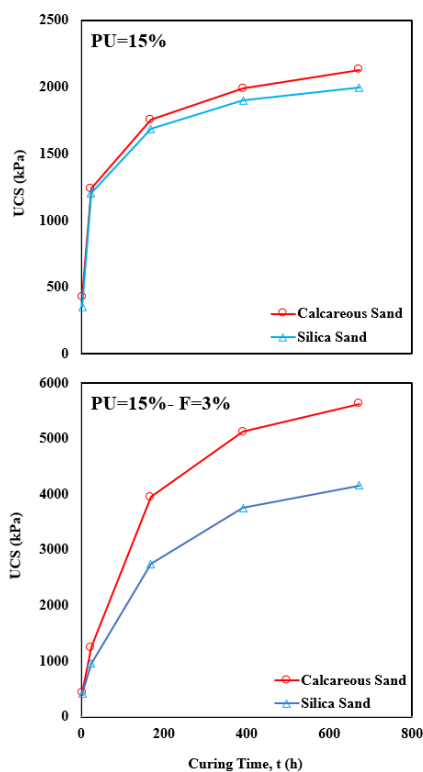
و الیاف

Fig. 6. UCS results of PU-stabilized fiber-reinforced samples



شکل ۷. اثر زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده حاوی نانوسیلیکا

Fig. 7. Effect of curing time on the UCS of treated samples containing nano-silica



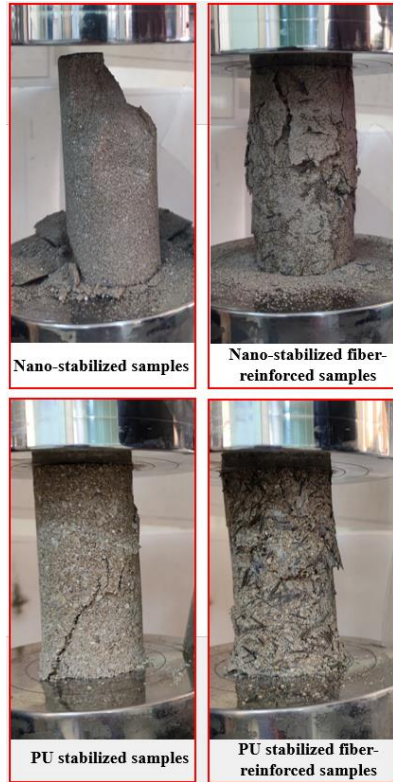
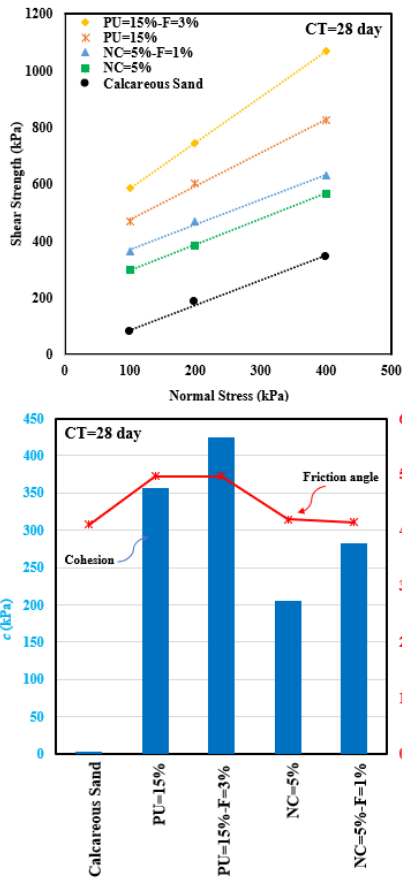
شکل ۸. اثر زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده حاوی پلی‌اورتان

Fig. 8. Effect of curing time on the UCS of treated samples containing PU

UCS را برای هر دو نمونه تقویت شده با پلی‌یورتان و نانوسیلیکا افزایش می‌دهد که به تأکید بر آثار هم‌زمانی افزودنی‌های ترکیب شده در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌پردازد.

بررسی تجزیه و تحلیل تصاویر حالت‌های شکست به عنوان یک ابزار حیاتی برای ارزیابی اثربخشی افزودنی‌های مختلف در نمونه‌های خاک بهسازی شده عمل می‌کند [41-45]. در شکل (۹)، تأثیر افزودنی‌های مختلف بر الگوهای شکست نشان داده شده است. هیچ تفاوت قابل تشخیصی بین حالت‌های شکست مشاهده شده در نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته وجود نداشت. بنابراین، برای ساده‌سازی، تنها یک تصویر نماینده برای هر نوع گروه افزودنی ارائه شده است. دو تصویر بالا الگوهای شکست مشاهده شده در ماسه سیلیسی را نشان می‌دهند، در حالی که دو تصویر پایین حالت‌های شکست در ماسه کربناته را نشان می‌دهند. نمونه‌هایی که تنها با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا تثبیت شده‌اند، رفتار ترد به همراه ترک‌های برشی را نشان داده‌اند. اضافه کردن الیاف‌ها به نمونه‌ها منجر به تغییر قابل توجهی در رفتار شده است. به‌طور خاص، افزودن الیاف‌ها باعث تغییر رفتار از ترد به انعطاف‌پذیر می‌شود. بنابراین، حضور الیاف‌ها باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر انتشار ترک‌ها در نمونه‌ها می‌شود.

بررسی تجزیه و تحلیل تصاویر حالت‌های شکست به عنوان یک ابزار حیاتی برای ارزیابی اثربخشی افزودنی‌های مختلف در نمونه‌های خاک بهسازی شده عمل می‌کند [41-45]. در شکل (۹)، تأثیر افزودنی‌های مختلف بر الگوهای شکست نشان داده شده است. هیچ تفاوت قابل تشخیصی بین حالت‌های شکست مشاهده شده در نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته وجود نداشت. بنابراین، برای ساده‌سازی، تنها یک تصویر نماینده برای هر نوع گروه افزودنی ارائه شده است. دو تصویر بالا الگوهای شکست مشاهده شده در ماسه سیلیسی را نشان می‌دهند، در حالی که دو تصویر پایین حالت‌های شکست در ماسه کربناته را نشان می‌دهند. نمونه‌هایی که تنها با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا تثبیت شده‌اند، رفتار ترد به همراه ترک‌های برشی را نشان داده‌اند. اضافه کردن الیاف‌ها به نمونه‌ها منجر به تغییر قابل توجهی در رفتار شده است. به‌طور خاص، افزودن الیاف‌ها باعث تغییر رفتار از ترد به انعطاف‌پذیر می‌شود. بنابراین، حضور الیاف‌ها باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر انتشار ترک‌ها در نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۹. فرم گسیختگی نمونه‌های بهسازی شده

Fig. 9. Failure patterns of the treated samples

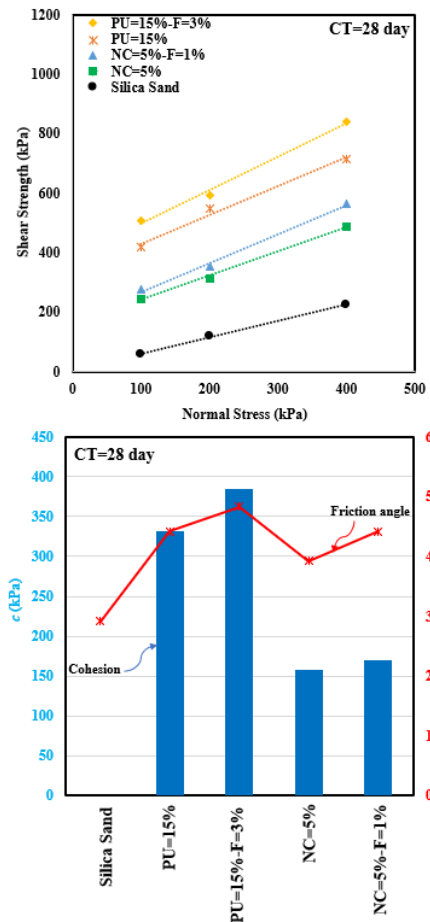
شکل ۱۱. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه کربناته

Fig. 11. Direct shear tests on calcareous sand samples

مقایسه بین نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نشان داد که پلی‌یورتان انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به نانوسیلیکا دارد. این تفاوت در انعطاف‌پذیری در الگوهای شکست مشاهده می‌شود، بطوریکه ترک‌های مشاهده شده در نمونه‌های با پلی‌یورتان تمایل به نشان دادن چسبندگی بیشتر نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا دارند.

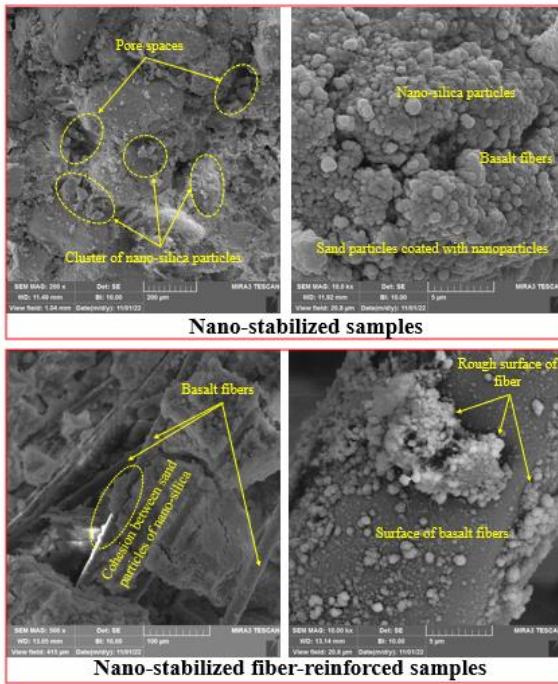
پارامترهای مقاومت برشی، از جمله چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک ( $\phi$ )، نقش حیاتی در ارزیابی پایداری و رفتار مواد خاکی ایفا می‌کنند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم برای ارزیابی مقاومت برشی نمونه‌های سیلیسی و کربناته تحت تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای نمونه‌های سیلیسی و کربناته را نشان می‌دهند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که نمونه‌های درمان شده مقاومت برشی بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های ماسه خالص سیلیسی و کربناته دارند. در میان نمونه‌های بهسازی شده برای هر دو نوع ماسه،



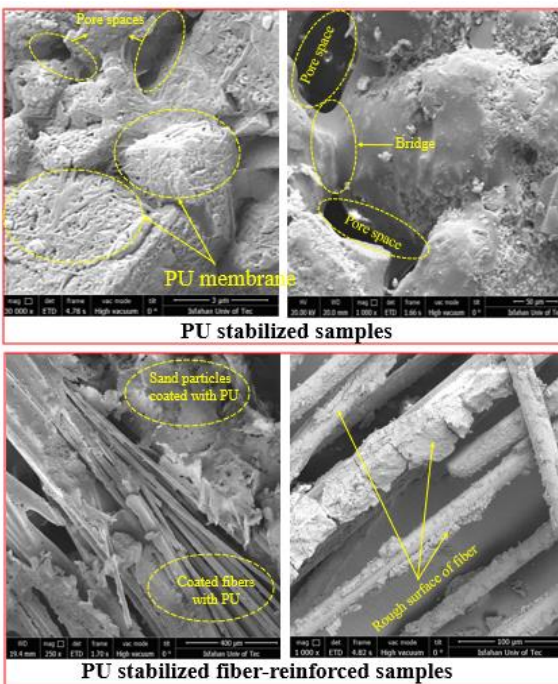
شکل ۱۰. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی ماسه سیلیسی

Fig. 10. Direct shear tests on silica sand samples



شکل ۱۲. نتایج SEM روی نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا

Fig. 12. SEM results for the samples containing nano-silica



شکل ۱۳. نتایج SEM روی نمونه‌های حاوی پلی‌ارتان

Fig. 13. SEM results for the samples containing PU

تجزیه و تحلیل SEM نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا خوشه‌هایی از ذرات نانوسیلیکا را که به سطح ذرات ماسه چسبیده‌اند و یک لایه محافظ تشکیل می‌دهند را نشان می‌دهد. این پدیده اتصال بین ذرات را بهبود می‌بخشد و فضاهای خالی را پر کرده و ویژگی‌های مکانیکی توده خاک را بهبود می‌بخشد. به طور

نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا کمترین مقاومت برشی را نشان می‌دهند، در حالی که نمونه‌های تثبیت‌شده با پلی‌یورتان و الیاف، مقادیر بالاتری از مقاومت برشی را نشان می‌دهند. افزایش مقاومت برشی با افزودن الیاف به نمونه‌های تثبیت‌شده با نانو یا پلی‌یورتان به تأثیر تقویتی الیاف‌ها در داخل ماتریس خاک برمی‌گردد. الیاف‌ها به عنوان عناصر تحمیل بار عمل می‌کنند، فشارهای اعمالی را به طریق بهتری توزیع می‌کنند و کلیه چسبندگی و مقاومت در برابر تغییر شکل برشی را افزایش می‌دهند.

مقایسه نتایج بین ماسه سیلیسی و آهکی نشان می‌دهد که نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های سیلیسی را برای یک افزودنی خاص نشان می‌دهد. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف به نمونه‌های پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا منجر به افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک برای ماسه سیلیسی شد، در حالی که این پارامترها برای ماسه کربناته نسبتاً ثابت مانده است. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در ساختار و شکل دانه‌های ماسه سیلیسی و کربناته باشد. ماسه سیلیسی معمولاً از ذرات گرد گوشه تشکیل شده است که در مقابل تنش‌های برشی حساس‌تر است و تمایل بیشتری به حرکت و لغزش دارد. هنگامی که الیاف‌ها به نمونه‌های پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا اضافه می‌شود، آن‌ها می‌توانند باعث افزایش درگیری بین دانه‌ها شوند و تا حدودی مانع غلتش و لغزش دانه‌ها می‌شوند و در نهایت باعث افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند. با این حال، در ماسه کربناته که شامل ذرات تیز گوشه‌تری است، اصطکاک طبیعی بین ذرات از پیش بالا است. بنابراین، اضافه کردن الیاف‌ها ممکن است به طور قابل توجهی سازوکار برهمکنش ذرات را تغییر ندهد. علاوه بر این، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و الیاف بالاترین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک را از خود نشان می‌دهند.

در شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، نتایج SEM نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا و پلی‌ارتان را ارائه شده است. به طور کلی، تصاویر SEM نمونه‌های تقویت شده با الیاف، اتصال محکم بین الیاف‌ها و ذرات ماسه را نشان می‌دهد. این سازوکار اتصال انتقال بار در داخل ماتریس خاک را تسهیل می‌کند و ویژگی‌های مکانیکی آن را بهبود می‌دهد.

مقاومت فشاری می‌شود، با مقدار الیاف بهینه بیشترین مقدار مقاومت فشاری به ترتیب ۴۵۰۲ و ۵۶۲۳ کیلوپاسکال برای ماسه سیلیسی و کربناته پس از ۲۸ روز بدست آمده است.

۳- بررسی زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد که نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان نرخ افزایش مقاومت فشاری بسیار بالاتری را نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا دارند، که نشان‌دهنده کارایی برتر پلی‌یورتان در بهبود خواص مکانیکی خاک در زمان کوتاه‌تر است که می‌تواند در پروژه‌هایی که زمان اهمیت بالایی دارد مورد توجه واقع شود.

۴- بررسی تجزیه و تحلیل بصری نمونه‌ها پس از آزمایش تک محوری نشان دهنده رفتار ترد نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا، با تشکیل ترک‌های برشی است. با این حال، اضافه کردن الیاف بازالیت، مانع از بروز رفتار ترد در نمونه‌ها شده است. نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان تردی کمتری نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا از خود نشان می‌دهند.

۵- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد که در نمونه‌های بازسازی شده به‌ویژه با استفاده از پلی‌یورتان و الیاف، بهبود قابل توجهی در مقاومت برشی وجود دارد. نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی، مقدار بالاتری از چسبندگی و زاویه اصطکاک را نشان می‌دهند، که در نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان و الیاف بیشترین اختلاف را نشان می‌دهند.

#### قردانی نویسندگان

از حمایت مادی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد کمال تشکر را داریم.

#### تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اظهار می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافع (اعم از مالی، حرفه‌ای، شخصی یا سازمانی) که بر روند پژوهش، نتایج یا تفسیرهای آن تأثیرگذار باشد، وجود ندارد.

#### سهم نویسندگان

صادق شهیدی انجام آزمایشات و آماده سازی اولیه مقاله و تجزیه و تحلیل داده‌ها را بر عهده داشت. ارائه برنامه آزمایشات

مشابه، تصاویر SEM نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان، لایه‌ای متراکم از پلی‌یورتان را نشان می‌دهند که ذرات ماسه را احاطه کرده و به طور مؤثر آن‌ها را به هم چسبانده است. این توده چسبیده اتصالات بین‌ذره‌ای را تقویت می‌کند که به افزایش مقاومت می‌شود. نتایج SEM نشان می‌دهند که پلی‌یورتان عملکرد برتری نسبت به نانوسیلیکا دارد به دلیل توانایی آن در ایجاد توسعه پس‌بنده گسترده‌تر اطراف ذرات ماسه. علاوه بر این، پلی‌یورتان به طور موثری حجم بیشتری از فضاهای خالی را پر کرده و سطح ذرات ماسه را به طور جامع‌تری پوشش می‌دهد نسبت به نانوزل.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تک محوری و برش مستقیم روی نمونه‌های بهسازی شده با ترکیب‌های مختلف از الیاف بازالیتی، پلی‌یورتان و نانوسیلیکا انجام شده است تا تأثیر انواع و مقدار افزودنی‌ها و زمان عمل‌آوری بر رفتار مکانیکی ماسه سیلیسی و کربناته را ارزیابی کند. بر اساس نتایج، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- در نمونه‌های بهسازی شده با الیاف، ماسه کربناته دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی است. مقدار بهینه الیاف در حدود ۱٪ برای هر دو نوع ماسه بدست آمده است. برای نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا، ماسه سیلیسی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به ماسه کربناته را نشان می‌دهد. با اضافه کردن مقدار بهینه نانوسیلیکا در حدود ۱۰٪، به همراه الیاف بازالیت، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش شدیدی داشته است، به‌ویژه برای ماسه کربناته. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و الیاف، مقدار بهینه الیاف برابر با ۱٪ بوده است.

۲- آزمایش‌های تک محوری نشان می‌دهد که پلی‌یورتان به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت فشاری ماسه سیلیسی و کربناته را افزایش می‌دهد. عملکرد بهینه با ۱۰٪ پلی‌یورتان مشاهده شده که بالاترین مقدار UCS را به ترتیب ۲۵۷۳ و ۳۱۷۷ کیلوپاسکال برای ماسه سیلیسی و کربناته پس از ۲۸ روز بدست آورده است. پلی‌یورتان مؤثرتر از نانوسیلیکا و الیاف بازالیتی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها بوده است. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در بهبود

## منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سازمان‌ها یا نهادهای داخلی و خارجی انجام شده است.

بررسی نتایج آماده سازی مقاله توسط میثم بیات صورت گرفت. سید علیرضا زارعی نیز تجزیه و تحلیل داده‌ها و آماده‌سازی مقاله را بر عهده داشت.

## References

- [1] Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M. and Nasri, M., 2021. Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(6), pp.1974-1984. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0953-5>.
- [2] Hadi Sahlabadi, S., Bayat, M., Mousivand, M. and Saadat, M., 2021. Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), p.04021232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905).
- [3] Baldovino, J.J., Izzo, R.L., Rose, J.L. and Domingos, M.D., 2021. Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, p.121874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874>.
- [4] Al-Atroush, M.E. and Sebaey, T.A., 2021. Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review. *Transportation Geotechnics*, 27, p.100494. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100494>.
- [5] Syed, M., GuhaRay, A., Agarwal, S. and Kar, A., 2020. Stabilization of expansive clays by combined effects of geopolymerization and fiber reinforcement. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101, pp.163-178. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00418-3>.
- [6] Saadat, M. and Bayat, M., 2022. Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), pp.80-91. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1699668>.
- [7] Saygili, A. and Dayan, M., 2019. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 161, pp.107-114. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.010>.
- [8] Chethan, B.A. and Ravi Shankar, A.U., 2021. Strength and durability characteristics of cement and class F fly ash-treated black cotton soil. *Indian Geotechnical Journal*, pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00488-2>.
- [9] Yang, X., Wei, J., Liang, J., Rong, H., Wu, B., Zhang, G. and Zhou, S., 2023. Corrosion characteristics of cement-stabilized crushed stone under vibrational effects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(5), p.04023092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004733](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004733).
- [10] Yabaluie Khamesluei, M.R., Bayat, M., Mousivand, M. and Nozari, M.A., 2024. Effect of zeolite replacement and tyre fibre inclusions on geotechnical properties of cement-or lime-stabilised sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(5), pp.879-894. <https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2326087>.
- [11] Wang, Z. and Mei, G., 2012. Dynamic properties of rubber cement stabilized soil based on resonant column tests. *Marine Georesources & Geotechnology*, 30(4), pp.333-346. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2011.631693>.
- [12] Ghasemi, M., Bayat, M. and Ghasemi, M., 2023. Experimental study on mechanical behavior of Sand improved by polyurethane foam. *Experimental Techniques*, 47(6), pp.1201-1211. <https://doi.org/10.1007/s40799-023-00633-5>.
- [13] Cao, X., Lee, L.J., Widya, T. and Macosko, C., 2005. Polyurethane/clay nanocomposites foams: processing, structure and properties. *Polymer*, 46(3), pp.775-783.
- [14] Espadas-Escalante, J.J. and Avilés, F., 2015. Anisotropic compressive properties of multiwall carbon nanotube/polyurethane foams. *Mechanics of Materials*, 91, pp.167-176. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.07.006>.
- [15] Tang, C.S., Wang, D.Y., Cui, Y.J., Shi, B. and Li, J., 2016. Tensile strength of fiber-reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), p.04016031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546).
- [16] Eshaghzadeh, M., Bayat, M., Ajalloeian, R. and Hejazi, S.M., 2021. Mechanical behavior of silty sand reinforced with nanosilica-coated ceramic fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(23), pp.2664-2683. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1898857>.
- [17] Tavakol, K., Bayat, M., Nadi, B. and Ajalloeian, R., 2023. Combined influences of cement, rice husk ash and fibre on the mechanical characteristics of a calcareous sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(9), pp.3729-3739. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0695-7>.
- [18] Razeghi, H.R. and Rad, A.S., 2024. Influence of fiber reinforcement on the ultrasonic P-wave velocity and unconfined compressive strength of cemented clay. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(1), p.7. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00516-0>.
- [19] Sujatha, E.R., Mahalakshmi, S. and Kannan, G., 2023.

- Potential of fibre reinforced and cement stabilized fibre reinforced soil blocks as sustainable building units. *Journal of Building Engineering*, 78, p.107733. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.107733>.
- [20] Shen, Y.S., Tang, Y., Yin, J., Li, M.P. and Wen, T., 2021. An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. *Construction and Building Materials*, 294, p.123537.
- [21] Dhar, S. and Hussain, M., 2019. The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), pp.1757-1778. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1468803>.
- [22] Syed, M., GuhaRay, A., Chukka, S.K. and Ahmad, S., 2024. Laboratory Investigation and Numerical Modeling on Fiber Reinforced Lime and Alkaline Binder Stabilized Pavement Subgrade Soil. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e03000.
- [23] Hosseini, A., Haeri, S.M., Mahvelati, S. and Fathi, A., 2019. Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), pp.1055-1065.
- [24] Davoodi, A., Esfahani, M.A., Bayat, M. and Mohammadyan-Yasouj, S.E., 2021. Evaluation of performance parameters of cement mortar in semi-flexible pavement using rubber powder and nano silica additives. *Construction and Building Materials*, 302, p.124166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124166>.
- [25] Davoodi, A., Esfahani, M.A., Bayat, M., Mohammadyan-Yasouj, S.E. and Rahman, A., 2022. Influence of nano-silica modified rubber mortar and EVA modified porous asphalt on the performance improvement of modified semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 337, p.127573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127573>.
- [26] Boschi, K., di Prisco, C.G., Grassi, D., Modoni, G. and Salvatore, E., 2024. Nanosilica grout permeation in sand: experimental investigation and modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(1), p.04023129. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11436>.
- [27] Karimiazar, J., Sharifi Teshnizi, E., Mirzababaei, M., Mahdad, M. and Arjmandzadeh, R., 2022. California bearing ratio of a reactive clay treated with nano-additives and cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), p.04021431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004028).
- [28] Jafarian Barough, M., Çelik, S. and Oltulu, M., 2022. Investigation into the effect of nanomaterial injection on improving the geotechnical properties of granular soils. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(4), pp.3163-3179. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00785-7>.
- [29] Tang, L., Wang, Z., Zhang, X., Chen, X., Luo, J. and Wang, Y., 2023. Influence of rheological parameters on cement slurry penetration characteristics of novel oscillating grouting technology. *Construction and Building Materials*, 409, p.133999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133999>.
- [30] Kumar, J., Verma, R.K. and Mondal, A.K., 2021. Taguchi-grey theory based harmony search algorithm (GR-HSA) for predictive modeling and multi-objective optimization in drilling of polymer composites. *Experimental Techniques*, 45, pp.531-548. <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00428-y>.
- [31] Ud Din, I., Hao, P., Panier, S., Khan, K.A., Aamir, M., Franz, G. and Akhtar, K., 2020. Design of a new Arcan fixture for in-plane pure shear and combined normal/shear stress characterization of fiber reinforced polymer composites. *Experimental Techniques*, 44, pp.231-240. <https://doi.org/10.1007/s40799-019-00353-9>.
- [32] Huan, Y.Q.S.Y., Shao, Y.Q., Dai, Y.J., Liu, Y.Q., Wang, T.Y., Zhang, T.H. and Liu, M.H., 2016. Experimental study of the Mechanical Properties of a Novel Supramolecular Polymer Filament using a Microtensile Tester based on electronic balance. *Experimental Techniques*, 40, pp.737-742. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0074-0>.
- [33] Golpazir, I., Ghalandarzadeh, A., Jafari, M.K. and Mahdavi, M., 2016. Dynamic properties of polyurethane foam-sand mixtures using cyclic triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 118, pp.104-115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.035>.
- [34] Samimi, A. and Zarinabadi, S., 2012. Application solid polyurethane as coating in oil and gas pipelines. In *CHISA 2012 - 20th International Congress of Chemical and Process Engineering and PRES 2012 - 15th Conference PRES 1*.
- [35] Shokrieh, M.M., Saeedi, A. and Chitsazzadeh, M., 2013. Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/polyester nanocomposites. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3, pp.1-5. <https://doi.org/10.1186/2193-8865-3-20>.
- [36] Zhou, Z., Du, X. and Wang, S., 2018. Strength for modified polyurethane with modified sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, pp.1897-1906. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0424-4>.
- [37] Zhang, Y., Qi, Y. and Zhang, Z., 2016. Synthesis of PPG-TDI-BDO polyurethane and the influence of hard segment content on its structure and antifouling properties. *Progress in Organic Coatings*, 97, pp.115-121. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.04.002>.
- [38] Chen, Q., Yu, R., Li, Y., Tao, G. and Nimbalkar, S., 2021. Cyclic stress-strain characteristics of calcareous sand improved by polyurethane foam adhesive.



- Transportation Geotechnics*, 31, p.100640. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100640>.
- [39] Abdelnaeem, M.M. and Hassona, F., 2023. Characterization of polyurethane foam conditioned sand. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 42(2), pp.199-218.
- [40] Liu, J., Chen, Z., Song, Z., Bai, Y., Qian, W., Wei, J. and Kanungo, D.P., 2018. Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand. *Polymers*, 10(5), p.499.
- [41] Hoang, T., Do, H., Alleman, J., Cetin, B. and Dayioglu, A.Y., 2023. Comparative evaluation of freeze and thaw effect on strength of BEICP-stabilized silty sands and cement-and fly ash-stabilized soils. *Acta Geotechnica*, 18(2), pp.1073-1092. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01612-7>.
- [42] Ghanbari, M. and Bayat, M., 2022. Effectiveness of reusing steel slag powder and polypropylene fiber on the enhanced mechanical characteristics of cement-stabilized sand. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 55(2), pp.241-257. <https://doi.org/10.22059/cej.2021.319310.1742>.
- [43] ShahriarKian, M., Kabiri, S. and Bayat, M., 2021. Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2), p.35. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00284-9>.
- [44] Qiu, C.C., Xu, G.Z., Gu, G.Q., Song, W.Z. and Cao, D.H., 2024. Uniaxial compression test of cement-solidified dredged slurry columns encased with geogrid. *Geosynthetics International*, 31(6), pp.1-17. <https://doi.org/10.1680/jgein.23.00132>.
- [45] Roustaei, M., Pumple, J., Hendry, M.T., Harvey, J. and Froese, D., 2024. Effect of freeze–thaw cycles on the macrostructure and failure mechanisms of fiber-reinforced clay using industrial computed tomography. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(9), pp.2007-2021. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0136>.


چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shahidi, S., Bayat, M. and Zarei, S.A., 2025. Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.19-32.

DOI: 10.22034/25.3.1



## Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods

Mohammadhossein Ahmadian Khameneh<sup>1</sup>, Hassan Afshin<sup>2\*</sup> ,  
Mehrdad Emami Tabrizi<sup>3</sup>, Yasser Alilou<sup>4</sup>, Gholamreza Qudsi Sharif<sup>5</sup>

1. Master Student of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
3. Assistant Professor of geotechnic Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
4. Head of Civil Engineering and Architecture Working Group, Scientific, Research and Technology Organization of Alborz Province Technology, karaj, Iran.
5. Instructor of the Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

### Abstract

The use of shotcrete is increasing rapidly. Due to the advancements in equipment and additives in the construction industry, there is an excellent need for high-strength shotcrete. Using high-strength fiber-reinforced shotcrete for slope stabilization, masonry and concrete structures, and underground structures improves quality and adhesion and increases work speed. Also, with increasing strength and consequently reducing the dimensions of sections, designs become more economical. In this research, using different mix designs, the effects of aggregate gradation and additives such as micro silica, superplasticizer, retarder, and micro recycled steel fibers on the strength and performance of shotcrete in laboratory and field conditions by two methods of wet and dry spraying were investigated. Based on the results, achieving high-strength shotcrete in the wet spraying method is more feasible, and a 28-day compressive strength of 987 kg/cm<sup>2</sup> was obtained in wet fiber-reinforced shotcrete. Compressive strength and energy absorption increased by 80% and 77%, respectively, compared to conventional wet fiber-reinforced shotcrete. Also, based on the toughness tests, the use of micro-recycled steel fibers has been effective in preventing the spread of micro cracks and controlling deformations, and in high-strength shotcrete, it has led to an increase in compressive strength and energy absorption of 28% and 97%, respectively, compared to the same design without using fibers. Mix designs WHSSH-0% and WHSFSH-0% showed that using 1% by volume of recycled microfibers improves compressive strength by 28%. On the other hand, in the final mix design, different percentages of accelerators were used to make it possible to execute thick layers and spray to varying angles without excessive rebound. The results showed that using accelerators reduces compressive strength by an average of 25% and reduces the compressive strength growth rate by 80% up to 28 days of age. Also, based on the results, with the improvement of strength in the mix designs for wet and dry shotcrete, in addition to a significant increase in the maximum load in the flexural test, the slip of fibers during cracking is reduced, and some of the fibers are broken during deformation. By using 1% by volume of micro recycled steel fibers in all fiber-reinforced designs, the service level is met based on the required energy absorption (60-100 joules). In the high-strength fiber-reinforced shotcrete design (WHSFSH-0%), a 75% increase in energy absorption compared to conventional fiber-reinforced shotcrete (WNFSH) indicates better performance of high-strength fiber-reinforced shotcrete, especially wet high-strength shotcrete, in terms of maximum bearable load before cracking and continued load-bearing capacity after cracking at the service level. Based on the results of energy absorption at the ultimate performance level (at a central displacement of 40 mm), the use of 1% by volume of micro-recycled steel fibers increased energy absorption by (77, 74, 66 and 65) %, respectively, in the designs (WHSFSH-1%, WHSFSH-0% WHSFSH-3%, WHSFSH-2%) compared to the WNFSH design. Also, in all the mix designs, the minimum energy absorption of 360-400 joules at a displacement of 40 mm, which is suitable for permanent and temporary support in most ground conditions, is met.

### Review History

Received: Apr 16, 2024

Revised: Jul 11, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

### Keywords

Shotcrete

Absorbing energy

Steel fibers

Flexural toughness

High-strength

Accelerator

\* Corresponding Author Email: hafshin@sut.ac.ir - ORCID: 0009-0001-6943-0688



## بررسی امکان بهبود برخی از مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در دو روش تر و خشک

محمد حسین احمدیان خامنه<sup>۱</sup>، حسن افشین\*<sup>۲</sup>، مهرداد امامی تبریزی<sup>۳</sup>، یاسر علیلو<sup>۴</sup>، غلامرضا قدسی شریف<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۴. مسئول کارگروه مهندسی عمران و معماری، سازمان علمی، پژوهشی و فناوری استان البرز، کرج، ایران.
۵. مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

### تاریخچه داوری

- دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱

### چکیده

### کلمات کلیدی

استفاده از بتن پاششی به صورت فزاینده‌ای رو به رشد است. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تجهیزات و افزودنی‌ها، در صنعت ساخت‌وساز، نیاز به مقاومت بالا در بتن پاششی به طور قابل توجهی احساس می‌شود. به کارگیری بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، در پایدارسازی گودها و شیروانی‌ها، مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی و بتنی و سازه‌های زیرزمینی باعث بهبود کیفیت، چسبندگی و افزایش سرعت کار می‌شود. همچنین با افزایش مقاومت و به دنبال آن با کاهش ابعاد مقاطع، طرح‌ها اقتصادی‌تر می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از طرح اختلاط‌های متفاوت، آثار دانه‌بندی مصالح و مواد افزودنی از قبیل دوده سیلیس، فوق روان کننده، آنی‌گیر و الیاف فولادی بازیافتی میکرو روی مقاومت و عملکرد بتن پاششی به صورت آزمایشگاهی و میدانی به دو روش پاشش تر و خشک بررسی شدند. براساس نتایج دستیابی به بتن پاششی مقاومت بالا در روش پاشش تر، از امکان‌پذیری بالاتری برخوردار بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۹۷ مگاپاسکال در بتن پاششی الیافی تر به دست آمد و به ترتیب مقاومت فشاری و جذب انرژی ۸۰ و ۷۷ درصد نسبت به بتن پاششی الیافی معمولی‌تر افزایش یافت. همچنین بر اساس آزمایش‌های چقرمگی استفاده از الیاف فولادی بازیافتی میکرو، در جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها و کنترل تغییرشکل‌ها، نقش موثری داشته و در بتن پاششی مقاومت بالا موجب شد، به ترتیب مقاومت فشاری و جذب انرژی ۲۸ و ۹۷ درصد نسبت به همان طرح بدون استفاده از الیاف افزایش یابد.

بتن پاششی

جذب انرژی

الیاف فولادی

چقرمگی خمشی

مقاومت بالا

آنی‌گیر

### ۱- مقدمه

پشت شبکه مش بندی، موجب حذف مش بندی و گسترش استفاده از بتن پاششی الیافی شده است [2]. در ساخت‌وسازهای جدید برای افزایش فضای مفید، تمرکز روی بلندمرتبه‌سازی و استفاده از فضاهای زیرزمینی می‌باشد. پس نیاز به بتن پاششی مقاومت بالای

بتن پاششی تقویت شده با الیاف یک بتن حاوی الیاف ناپیوسته است که با کمک هوا و سرعت بالا روی سطح کار پخش و روی آن می‌چسبد [1]. زمان پر بودن، دشواری اجرا و عدم پر شدن کامل

\* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - hafshin@sut.ac.ir :0009-0001-6943-0688

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، 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.

عرضی را کاهش می‌دهد [12]. Yan و همکاران با بررسی تجربی خواص مکانیکی بتن پاششی سیلیسی تقویت شده با الیاف فولادی نشان دادند، نسبت به طرح پایه، مقاومت کششی، خمشی، برشی بتن پاششی بهبود یافته و به ترتیب ۷۷، ۷۳ و ۹۸ درصد افزایش یافت [13]. Cheolwoo Park به تعیین نسبت اختلاط بهینه بتن پاششی با عملکرد بالا با استفاده از خاکستر بادی پرداخت. براساس نتایج با استفاده از خاکستر بادی مقاومت فشاری در تمام سنین افزایش می‌یابد. همچنین علاوه بر بهبود استحکام طولانی مدت، استفاده از خاکستر بادی آثار قابل توجهی در ساخت پذیری، کیفیت، کاهش آسیب پذیری محیط زیست و هزینه‌های اجرایی دارد [14]. Shakhawat و همکاران با بررسی آثار انواع آنی‌گیرهای آلومیناتی، معدنی سیمانی و غیر قلیایی بر چقرمگی خمشی بتن پاششی تقویت شده الیافی نشان دادند، انواع آنی‌گیرها اثر مخرب روی عملکرد طولانی مدت دارند. ولی آنی‌گیر غیرقلیایی با توجه به عملکرد بهتر در طولانی مدت و حفظ سلامتی کارگران، مناسب‌تر است [15]. نتایج تحلیلی و میدانی تحقیق Hisatake نشان داد، بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در تونل‌های تحت فشار با استحکام اولیه بالا و شکل پذیری نهایی می‌تواند به عنوان یک پوشش اولیه مناسب برای تونل‌های حفر شده در زمین‌های سست و تونل‌های تحت فشار خاک‌های آماس‌کننده استفاده شود [16]. Armelin و همکاران با بررسی تاثیر الیاف فولادی بر مشخصات ظاهری و مکانیکی بتن پاششی تهیه شده با الیاف فولادی نشان دادند، عامل اصلی افزایش مقاومت فشاری به فرآیند پاشش مربوط بوده و الیاف نقش چندانی در این افزایش ندارد [17]. Cao Meng و همکاران به بررسی بتن پاششی سبک وزن با مقاومت بالا با هدف کاهش پسرریز پرداختند. بر اساس نتایج آنان، در حالت استفاده از ماسه خاکستر بادی، بتن با وزن مخصوص ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۲ مگاپاسکال و در حالت استفاده ترکیبی از ماسه خاکستر بادی و پلی‌استایرن، بتن با وزن مخصوص ۱۶۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۰ مگاپاسکال حاصل شد [18]. بر اساس مطالعات Lu و همکاران با کاهش اندازه مصالح، سرعت پاشش افزایش و به دنبال آن پخش روی بستر آسان‌تر می‌شود. علاوه بر این، افزایش ویسکوزیته گسترش را دشوار، اما در عین حال باعث افزایش چسبندگی و جلوگیری از لغزش می‌شود [10].

الیافی در ساخت و سازها از اهمیت بسزایی برخوردار است. به کارگیری بتن پاششی مقاومت بالای الیافی موجب می‌شود با لایه‌های نازک‌تر، هزینه پایین‌تر و با سرعت بالاتر در حفاری تونل‌ها و گودها، ضمن جلوگیری از هوازگی و کنترل کرنش‌های ذاتی توده‌های سنگ و خاک، بتوان از لایه‌های پاشیده شده به عنوان لایه باربر و نهایی استفاده کرد. از طرفی به کارگیری بتن فوق در مرمت و مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی و بتن آرمه با توجه به چسبندگی و مقاومت بالاتر بسیار موثر خواهد بود. همچنین امروزه بتن پاششی برای ساخت سوله‌ها و خانه‌های سریع‌الاحداث به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سازه‌ها بتن پاششی به صورت المان پوسته‌ای اجرا و دارای عملکرد سازه‌ای است. بنابراین برای طراحی بهینه، سرعت اجرا و بهبود عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها استفاده از بتن پاششی مقاومت بالای الیافی ضروری است. آنی‌گیرها یکی از پرکاربردترین افزودنی‌های مورد استفاده در بتن پاششی می‌باشند و به کارگیری آنها موجب گیرش سریع بتن‌های پاششی و اجرای لایه‌های مقاوم و مستحکم بتنی در کوتاه مدت و کاهش پسرریز می‌شود [3]. آنی‌گیرها در دو نوع قلیایی و غیر قلیایی طبقه‌بندی [4, 5] و معمولاً همراه با هوای فشرده در هنگام اجرا روی سطح بتن با فشار پاشیده می‌شوند. با توجه به بهبود استحکام و خاصیت آب بندی و کاهش خطر واکنش قلیایی-سنگدانه و خطرات جانی کارگران ساختمانی در بتن پاشیده شده، بیشتر از آنی‌گیر غیرقلیایی استفاده می‌شود [6-8]. در بتن پاششی، دوده سیلیسی به عنوان یک پرکننده، برای بهبود چسبندگی و جلوگیری از جریان بتن پاششی عمل می‌کند. همچنین موجب بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی مخلوط و کاهش پسرریز می‌شود. ولی از سوی دیگر فوق روان‌کننده موجب کاهش قوام مخلوط و افزایش پسرریز می‌شود [9, 10].

Külekcı با مقایسه نتایج بتن پاششی تقویت شده الیافی، در نمونه‌های میدانی اجرا شده در فضا‌های زیرزمینی و نمونه‌های آزمایشگاهی، عملی بودن آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه را با ارزیابی شرایط میدانی نشان داد [11]. Guler و همکاران با بررسی آثار الیاف فولادی ماکرو، فورتا و پلی‌آمید نشان دادند، برای افزایش مقاومت و چقرمگی بتن، الیاف فولادی موثرترین الیاف بوده است و پیشرفت سریع و کنترل نشده ترک‌ها را با ایجاد اثر پل زدن کاهش و با ایجاد اثر محصور کنندگی جانبی، تغییر شکل

حفظ کارایی و چسبندگی، دو روش پاشش تر و خشک مورد بررسی قرار گرفت و برای بررسی نتایج، آزمون‌های مقاومت فشاری روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده و همچنین آزمون جذب انرژی روی پانل گرد به دو روش آزمایشگاهی و میدانی انجام شدند.

## ۲- توصیف مطالعات آزمایشگاهی

در این قسمت از مطالعه، مصالح به کارگرفته شده، طرح اختلاط‌های مربوطه و آزمایش‌های انجام یافته شرح داده شده است. برای مقایسه نتایج و بررسی تاثیر الیاف روی ویژگی‌های مکانیکی بتن پاششی، دو نوع بتن پاششی با رده مقاومتی معمولی و مقاومت بالا، در دو حالت غیر مسلح و مسلح شده توسط الیاف به دو روش تر و خشک اجرا شد. همچنین برای بررسی تاثیر آبی‌گیر روی عملکرد فشاری و خمشی بتن هدف، با توجه به ملات‌های آزمایشی ساخته شده و آزمون زمان گیرش، آثار درصدهای مناسب آبی‌گیر مورد بررسی قرار گرفت. لزوم توجه به مباحث اقتصادی موجب شد، در روند این تحقیق، ماسه معادن موجود در محدوده شهر تبریز مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به استفاده از الیاف فولادی در روند این تحقیق، برای حفظ کارایی، کاهش پس ریز و استهلاک تجهیزات و تسریع اجرا، مصالح سنگی درشت دانه به کار گرفته نشد.

## ۲-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق با توجه به استفاده از حجم بالای بتن پاششی در پروژه‌های عمرانی، برای دستیابی به مقاومت‌های بالا از به کارگیری مواد گران قیمت همچون آبی‌گیرهای خاص، ماسه سیلیسی و سیمان‌های پرمقاومت پرهیز و مصالح استفاده شده به شرح زیر است.

### ۲-۱-۱- سیمان، فوق روان‌کننده، دوده سیلیسی، آب

سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ محصول کارخانه‌ی سیمان صوفیان بر اساس ASTM C150 [26]، فوق‌روان‌کننده مصرفی بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر (Carboxal HF5000) شرکت البرز شیمی آسیا با pH ۵-۷ و وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب بر اساس ASTM C1141 [27]، دوده سیلیسی تولیدی کارخانه صنایع فرو آلیاژ ازنا لرستان با سطح ویژه ۲۰ متر مربع

بر اساس مطالعات Bohac و همکاران استفاده از خاکستر بادی، متاکائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی موجب افزایش تنش تسلیم، بهبود چسبندگی و کاهش پس‌ریز بتن پاششی می‌شود [19]. Jawhar و همکاران به بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن، ضایعات پلاستیک و به صورت ترکیبی با درصد حجمی ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد پرداختند. با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری، خمشی و کششی به ترتیب ۰/۳۵، ۱ و ۰/۷ درصد در بتن پاششی بهبود یافت [20]. در مطالعات Liao و همکاران، بارگذاری ضربه چرخه‌ای بر روی بتن پاششی تقویت‌شده با الیاف فولادی، بازالت، پلی‌پروپیلن و ذرات لاستیک انجام شد. براساس نتایج آنها، بطور کلی با افزایش تقویت‌کننده الیافی، خواص مکانیکی و دینامیکی بتن پاششی بهبود می‌یابد [21]. Bertrand به بررسی و مقایسه روش‌های پاشش تر و خشک، شرایط اجرایی و علل انتخاب هر یک از این روش‌ها پرداخت [22]. Morgan به بررسی دوام بتن‌های پاششی تر و خشک با استفاده از دوده سیلیس و الیاف فولادی پرداخت. بر اساس نتایج آن، بکارگیری این مصالح مقاومت فشاری بهبود یافت و تحت ذوب و یخبندان تغییرات چندانی در استحکام خمشی حاصل نشد [23]. Florain و همکاران به بررسی بتن‌های پاششی تر و خشک تحت سولفات‌ها پرداخت. بر اساس نتایج آنان، موادی همچون میکروسلیس موجب آثار مثبت در دو روش تر و خشک می‌شود [24]. در زمینه بتن پاششی بیشتر تحقیقات صورت گرفته برای بهبود مقاومت روی نوع آبی‌گیر تمرکز داشته است و بدین منظور بیشتر آبی‌گیرهای معدنی و یا دو جزئی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین برخی از پژوهشگران به بررسی بهبود استفاده سیمان‌های مقاومت بالا پرداخته‌اند. در این تحقیقات بیشترین مقاومت فشاری حاصله برابر ۶۶ مگاپاسکال بوده است و بیشتر بر روی روش پاشش تر تمرکز داشته‌اند [25]. بنابراین این تحقیق با هدف دستیابی به بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، با استفاده از مواد افزودنی رایج موجود در بازار، بدون بکارگیری مصالح و مواد گران قیمت همچون پودر و ماسه سیلیسی، آبی‌گیرهای خاص انجام شد. لازم به توضیح است، الیاف میکرو فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع بازیافتی می‌باشد که نسبت به سایر الیاف فولادی میکرو موجود در بازار بسیار ارزان‌تر می‌باشد. بدین منظور با انجام اصلاحات در انتخاب مصالح و طرح اختلاط‌ها برای دستیابی همزمان به مقاومت بالا، با

ترتیب برابر ۱۹۲/۸، ۷۰/۲، ۵۵/۶۶، ۲۰، ۸/۵۰ دقیقه و با بکارگیری ۴ درصد وزنی سیمان آنی گیر پودری برابر ۳/۸۰ دقیقه است. بر این اساس بکارگیری درصدهای بالاتر آنی گیر، موجب تسریع گیرش اولیه و نهایی بتن می شود.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی دوده سیلیسی

Table 1. Chemical properties of micro silica

SiO <sub>2</sub>	CaO	P	LOI	pH
90-95	0.5-1	0.04-0.06	1.5-2.5	8-9.5
	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
	0.04-0.08	0.6-1.2	0.6-1.2	0.4-0.8
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	C	Na <sub>2</sub> O
	1.2-1.8	0.04-0.07	0.8-2	0.3-0.6

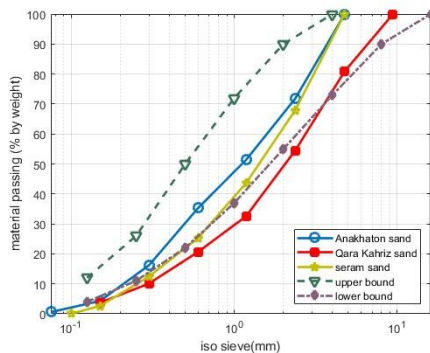
جدول ۲. مشخصات فیزیکی الیاف

Table 2. Physical properties of fibers

Micro recycled steel fibers	Length (mm)	Average aspect ratio	Tensile strength MPa
	10-30	95	2100

شکل ۱. الیاف فولادی بازیافتی میکرو

Fig. 1. Micro recycled steel fibers



شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی

Fig. 2. Grading of stone materials

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

Table 3. Physical properties of aggregates

Fineness modulus	Sand equivalent (%)	Specific weight			Absorbed water (%)	
		bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	apparent (gr/cm <sup>3</sup> )	Saturated-surface dry (G <sub>s</sub> ) (gr/cm <sup>3</sup> )		
3.48	94	2.66	2.73	2.68	1.04	Seram
3.21	91	2.57	2.62	2.59	0.81	Anakhaton
3.97	86	2.59	2.87	2.69	1.67	Qare kahriz

برگرم، وزن مخصوص ۲/۲ و ترکیب شیمیایی آن مطابق جدول (۱) دارای ۹۰-۹۵ درصد SiO<sub>2</sub> و آب مورد استفاده در طرح اختلاط های ریخته شده نیز آب شرب شهر تبریز می باشد.

## ۲-۱-۲ الیاف فولادی

در این تحقیق با هدف دستیابی به مقاومت فشاری و جذب انرژی بالا، بهبود خواص دینامیکی و ضربه ای بتن پاششی، از الیاف فولادی بازیافتی میکرو با مشخصات جدول (۲) استفاده شد. همچنین نمونه ای از الیاف به کار گرفته شده، در شکل (۱) نشان داده شده است.

## ۲-۱-۳ مصالح سنگی

در این تحقیق ابتدا ماسه معادن سرام و آناختون تبریز با حداکثر اندازه درشت دانه ۴/۷۵ میلی متر و ماسه قره کهریز خامنه با حداکثر اندازه درشت دانه ۹/۵ میلی متر از لحاظ دانه بندی، چگالی و ارزش ماسه ای و کاربرد آزمایشگاهی در بتن پاششی مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج مشخصات فیزیکی آن به شرح جدول (۳) است. همچنین دانه بندی این مصالح مطابق شکل (۲) است. براساس نتایج حاصل شده ماسه قره کهریز با مدول نرمی ۳/۹۷، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب و ارزش ماسه ای ۸۶ درصد برای ادامه تحقیق انتخاب شد.

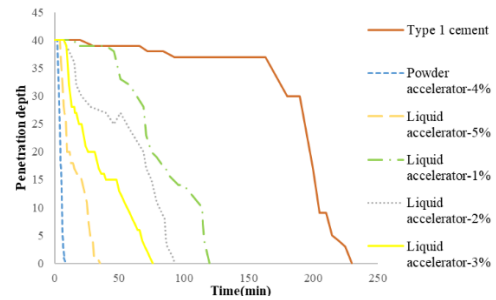
## ۲-۱-۴ آنی گیر

در این تحقیق با ساخت ملات و اندازه گیری زمان گیرش، انواع و درصدهای متفاوت آنی گیرکننده های بدون قلیایی موجود در بازار، بررسی شدند و در نهایت آنی گیر مایع و پودری شرکت البرز شیمی آسیا با توجه به آثار بهتر در بتن تازه و سخت شده، استفاده شد. در شکل (۳) نمودار گیرش سیمان مورد استفاده با درصدهای مختلف آنی گیر مورد استفاده نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمون سوزن و ویکات، زمان گیرش اولیه خمیر سیمان با بکارگیری ۰، ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی سیمان آنی گیر مایع به

مختلفی صورت گرفته است. بر اساس تحقیقات Morat و همکاران، استفاده از آنی گیرها در دوزهای مصرفی بالا موجب محدودیت اثر فوق روان کننده می شود. بنابراین برای همزیستی این مواد افزودنی دوز مصرفی باید با حساسیت انتخاب شود. طبق بررسی صورت گرفته استفاده همزمان بیش از سه درصد موجب کاهش معنادار نتایج شد [28]. همچنین Burak به تسریع مقاومت اولیه نمونه های حاوی مواد افزودنی فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اتر در صورت بکارگیری نمک های نیترات و سدیم آلومینات اشاره کرد. آنها ترکیب ۱/۸ درصد پلی کربوکسیلات با ۱/۶ درصد نمک های نیتریک را موثرترین ترکیب برای تنظیم گیرش و استحکام اولیه بدون افت قوام معرفی کردند [29]. بنابراین پس از بررسی های صورت گرفته، در این تحقیق این مواد افزودنی به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۳-۲- روش اجرا و تهیه نمونه های آزمایشی

طریقه ساخت بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، مشابه روش معمول ساخت بتن الیافی است [30]. برای پخش مناسب الیاف فولادی بازیافتی میکرو در بتن پاششی، الیاف در طول اختلاط بتن به صورت تدریجی با استفاده از سرنده به مخلوط اضافه شد. با این تفاوت که در روش پاشش خشک، اختلاط مصالح به صورت خشک و معمولاً از آنی گیرهای پودری استفاده می شود و در نهایت آب و سایر افزودنی های مایع در سر نازل اضافه می شود. ولی در روش پاشش تر فقط آنی گیر مایع به صورت پاششی در سر نازل اضافه می شود. در این تحقیق برای بهتر مشخص شدن



شکل ۳. گیرش سیمان با درصد آنی گیر مورد استفاده

Fig. 3. Cement setting with the percentage of accelerator used

### ۲-۲- طرح مخلوطها

در این تحقیق برای دستیابی به مقاومت بالا، طرح مخلوطهای متعددی به صورت آزمایشگاهی و میدانی، به دو روش پاشش تر و خشک تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. بعد از بررسی نتایج اولیه، سه طرح در روش پاشش خشک و هفت طرح در روش پاشش تر، به عنوان طرح مخلوطهای نهایی در انواع بتن پاششی معمولی، الیافی معمولی، مقاومت بالا و مقاومت بالای الیافی از میان طرح مخلوطهای اجرا شده، مطابق جدول (۴) مورد بررسی قرار گرفتند. در برخی از این مخلوطها مواد افزودنی فوق روان کننده و آنی گیر به صورت همزمان مورد استفاده قرار گرفتند. اگر چه این مواد افزودنی موجب آثار متضاد در خواص مکانیکی بتن پاششی می شوند ولی در بتن پاششی تازه، برای تنظیم گیرش و چسبندگی بهتر از آنی گیر و با توجه به درصد بالای دوده سیلیس بکارگرفته شده در این طرحها، برای بهبود قوام و مشخصات مکانیکی بتن پاششی سخت شده، استفاده از فوق روان کننده ها ضروری است. برای استفاده همزمان آنی گیرها و فوق روان کننده ها تحقیقات

جدول ۴. طرح مخلوطهای بتن پاششی مورد بررسی

Table 4. Mix details for examined shotcrete sets.

accelerator*	Fiber	super plasticizer	water	Micro silica	Cement	sand	Mixing plan	Spray type	
ACC(%)	F(% volume)	$\frac{SP}{C + SF}$ (%)	$\frac{W}{C + SF}$	$\frac{SF}{C}$ (%)	C(Kg)	S( $\frac{Kg}{m^3}$ )			
4	-	-	0.48	-	480	1536	DNSH	Dry	1
4	1	-	0.45	-	464	1486	DNFSH	Dry	2
4.4	1	1.55	0.27	11.62	598	1592	DHSFSH	Dry	3
5	-	-	0.48	-	480	1536	WNSH	Wet	4
5	1	-	0.45	-	464	1485	WNFSH	Wet	5
-	-	1	0.28	11.62	585	1557	WHSSH-0%	Wet	6
-	-	-	-	-	-	-	WHSFSH-0%		7
1	1	1.55	0.27	11.62	598	1591	WHSFSH-1%	Wet	8
2	1	1.55	0.27	11.62	598	1591	WHSFSH-2%	Wet	9
3	1	1.55	0.27	11.62	598	1591	WHSFSH-3%	Wet	10

\*در طرح های ردیف الی ۳ آنی گیر پودری شرکت البرز شیمی و در ردیف های ۴ الی ۱۰ از آنی گیر مایع البرز شیمی استفاده شده است.

مغزه‌گیری به عمل آمد و سپس بعد از کلاهدک گذاری مغزه‌ها مقاومت فشاری تعیین شد. لازم به توضیح است که ضرایب اصلاحی مربوط به ابعاد نمونه‌ها در محاسبه نتایج اعمال شده است.

## ۲-۵- آزمایش چقرمگی خمشی

این آزمون برای محاسبه انرژی جذب شده براساس استاندارد ASTM C1550-08 [32] انجام گرفت که بیانگر توانایی بتن تقویت شده الیافی برای توزیع مجدد تنش در محدوده بعد ترک است. در این آزمون نمونه‌ها تحت ترکیب تنش‌های غشایی و پیچشی قرار دارند که معرف رفتار واقعی بتن پاشیده شده است. همچنین در این آزمون وجود سه تکیه‌گاه در زیر نمونه، موجب توزیع مشخص بار و عدم تاثیر اعوجاج سطحی بر بیشترین بار شکست می‌شود (شکل ۵).

## ۳- نتایج آزمون‌های میدانی و آزمایشگاهی

### ۳-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

با توجه به جدول (۵)، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح WHSF5H-0% با مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۹۷ مگاپاسکال می‌باشد. دستیابی به مقاومت فشاری فوق با افزایش عیار سیمان به ۵۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب، استفاده از ماسه معدن قره‌کهریز با دانه‌بندی و مشخصات مکانیکی مناسب و استفاده از ۱۱/۶۳ درصد وزنی سیمان، دوده سیلیس و ۱/۵۵ درصد وزنی مواد سیمانی فوق روان‌کننده حاصل شد.



شکل ۴. نمونه‌ای از روش تهیه نمونه آزمایشی

Fig. 4. An example of the method of preparing a sample



شکل ۵. روش تهیه و آزمون نمونه‌های خمشی

Fig. 5. Method of making and testing flexural samples

آثار مخرب، آنی‌گیر در لحظات نهایی اختلاط بتن به میکسر اضافه شد. همچنین برای تهیه نمونه‌های میدانی از بتن پاششی مورد نظر، روز قبل اجرا در محیط آزمایشگاهی، مصالح توزین، به صورت خشک ترکیب و در نهایت در کیسه‌های ضدآب برای اجرای پاشش به محل اجرا منتقل شدند (شکل ۴). در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های مقاومت فشاری و آزمون چقرمگی خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C 1140 [31] و ASTM C1550 [32] قالب‌های مربوطه آماده‌سازی و طبق استانداردهای ASTM C171 [33] و ASTM C511 [34] شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها مهیا شد.

### ۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های اجرا شده، طبق استاندارد ASTM C42 [35] از پانل‌های تهیه شده

جدول ۵. نتایج آزمون مقاومت فشاری

Table 5. Compressive strength test results.

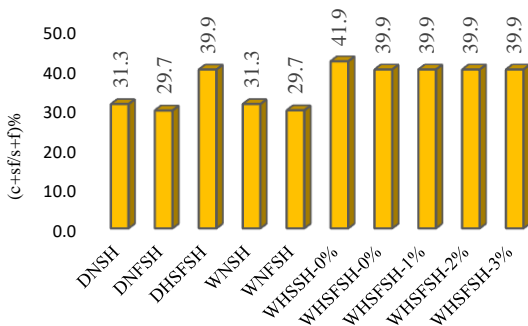
Percentile Increase (%)	Compressive Strength (28day) (Mpa)	Percentile Increase (%)	Compressive Strength (7days) (Mpa)	Specific weight (kg/m <sup>3</sup> )	Mixing plan
-	27.76	-	-	2269	DNSH
-19	23.39	-	-	2330	DNFSH
+27	38.04	-	-	2530	DHSFSH
-	23.73	-	19.87	2250	WNSH
-21	19.54	-23	16.18	2262	WNFSH
+66	69.16	+68	61.22	2410	WHSSH-0%
+75	96.80	+75	80.48	2534	WHSFSH-0%
+65	68.67	+69	65.17	2540	WHSFSH-1%
+65	67.80	+70	66.49	2552	WHSFSH-2%
+65	67.58	+62	65.62	2546	WHSFSH-3%



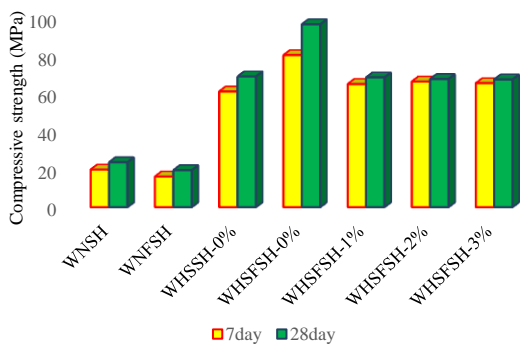
(3%، 44 درصد مقاومت فشاری کمتری حاصل شد. بر اساس شکل (8) مقایسه مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه‌های بتن پاششی نشان می‌دهد، نرخ رشد مقاومت فشاری از سن 7 تا 28 روزه در شرایط عمل آوری دمای بالا، متوسط برابر 8 درصد می‌باشد که نسبت به شرایط عمل آوری معمولی با نرخ رشد متوسط 15 درصد، 7 درصد کاهش داشته است. همچنین نرخ رشد مقاومت در طرح مخلوط‌های نهایی با شرایط عمل آوری یکسان نشان داد، استفاده از آبی‌گیر به طور متوسط، 80 درصد موجب کاهش نرخ رشد مقاومت از سن 7 تا 28 روزه شده است.



شکل 6. مقاومت فشاری 28 روزه طرح اختلاط‌های بتن پاششی  
Fig. 6. 28-day compressive strength of sprayed concrete



شکل 7. نسبت مواد چسباننده به ماسه و الیاف در طرح اختلاط‌ها  
Fig. 7. The ratio of binders to sand and fibers in the mix plan



شکل 8. نرخ افزایش مقاومت فشاری از سن 7 تا 28 روزه  
Fig. 8. Rate of increase in compressive strength from 7 to 28 days

بر اساس مشاهدات صورت گرفته در حین پاشش، این طرح دارای خاصیت پمپ پذیری مناسبی بوده و در طول این فرآیند، پس‌ریز کمتری داشته است. از طرفی مقایسه طرح اختلاط‌های WHSSH-0% و WHSSH-0% با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت نشان می‌دهد، استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازایستی میکرو روی مقاومت فشاری بتن پاششی مقاومت بالای تر، تاثیر مثبت داشته و موجب افزایش 28 درصدی مقاومت فشاری می‌شود. همچنین بر اساس نتایج شکل (6)، با توجه به چسبندگی قابل قبول بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در حالت بدون استفاده از آبی‌گیر، فقط برای دستیابی به گیرش و کسب مقاومت کوتاه مدت و امکان اجرای پاشش در زوایای مختلف بدون پس‌ریز زیاد و اجرای لایه‌های ضخیم‌تر با توجه به آزمون‌های زمان گیرش و ساخت ملات، درصدهای پایین آبی‌گیر در این بتن پاششی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از آبی‌گیر غیرقلیایی روی مقاومت فشاری 28 روزه بتن پاششی مقاومت بالای الیافی تر تاثیر نامطلوبی داشته و به ترتیب با افزودن 1، 2 و 3 درصد وزنی سیمان آبی‌گیر، مقاومت فشاری به ترتیب 20، 25 و 30 درصد کاهش یافت.

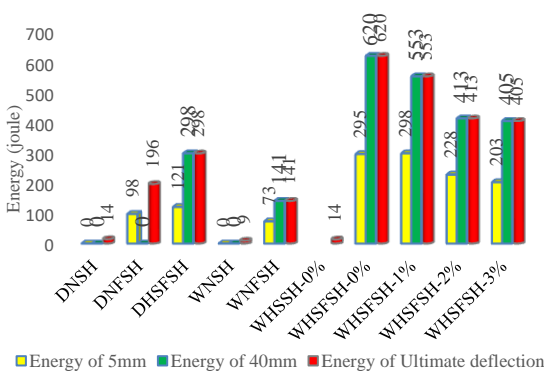
با توجه به شکل (7) در بتن پاششی معمولی خشک و معمولی تر، نسبت  $(\frac{c+s}{s+f})$  که به عنوان شاخصی از چسبندگی می‌توان از آن یاد کرد، پایین است. استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازایستی میکرو موجب کاهش چسبندگی در این طرح‌ها می‌شود و بتن پاشیده شده دارای ساختار تو خالی تری بوده و به موجب آن به طور متوسط 20 درصد مقاومت فشاری بتن پاششی معمولی الیافی کمتر از بتن پاششی معمولی می‌شود. از طرفی با توجه به تفاوت 19 درصدی وزن مخصوص در بتن پاششی معمولی و تفاوت 62 درصدی وزن مخصوص در بتن پاششی معمولی الیافی، در طرح اختلاط یکسان در دو روش پاشش تر و خشک و از طرفی فشار هوای بیشتر در بتن پاششی خشک (10-12 بار) نسبت به بتن پاششی تر با فشار هوای متوسط (8 بار)، نشانگر تراکم بهتر در بتن پاششی معمولی و الیافی معمولی خشک می‌باشد و به دنبال آن به طور متوسط 30 درصد مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود.

همچنین در طرح مقاومت بالای الیافی خشک، مقاومت فشاری 27 درصد نسبت به بتن پاششی خشک معمولی افزایش داشته است. ولی در بتن پاششی مقاومت بالای خشک (DHSFSH) با توجه به حجم بالای مصالح پودری، در حین پاشش آب کافی به تمامی مصالح نرسیده و واکنش هیدراتاسیون به صورت کامل انجام نمی‌پذیرد و نسبت به بتن پاششی مقاومت بالای تر (WHSSH-0%)

جدول ۶. نتایج آزمون چقرمگی خمشی

Table 6. Flexural toughness test results

Type of shotcrete	Peak Load	Deflection at peak load ( $\delta_{peak}$ )	Ultimate deflection ( $\delta_u$ )	Energy of 5mm	Increase	Energy of 40mm	Increase	Energy of Ultimate deflection
	KN	mm	mm	joule	(%)	joule	(%)	joule
DNSH	28	0.91	0.91	0	-100	0	-100	14
DNFSH	27	0.57	35.89	98	---	0	---	196
DHSFSH	34	0.89	42.09	121	19.26	298	100	298
WNSH	20	0.86	0.87	0	-100	0	-100	9
WNFSH	21	0.69	40	73	---	141	---	141
WHSSH-0%	37	0.8	0.8	0	-100	0	-100	14
WHSFSH-0%	80	2.12	52.85	295	75.23	620	77.31	620
WHSFSH-1%	72	1.11	49.28	298	75.42	553	74.53	553
WHSFSH-2%	60	2.27	47.63	228	67.85	413	65.92	413
WHSFSH-3%	58	3.91	46.20	203	63.89	405	65.23	405



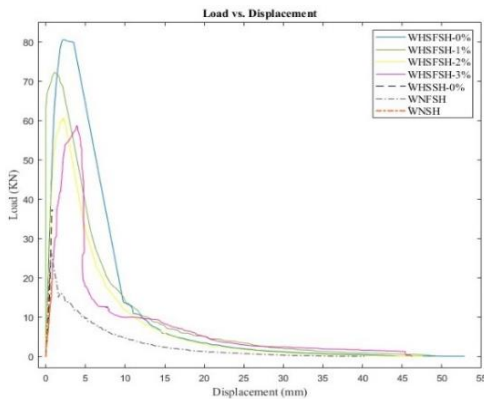
شکل ۹. جذب انرژی طرح‌های بتن پاششی

Fig. 9. Energy absorption of sprayed concrete mixtures



شکل ۱۰. پارگی الیاف تحت خمش در طرح WHSFSH-0%

Fig. 10. Rupture of fibers under bending in WHSFSH-0% plan



شکل ۱۱. نمودار نیرو-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت تر

Fig. 11. force- Displacement diagram of wet shotcrete mixes

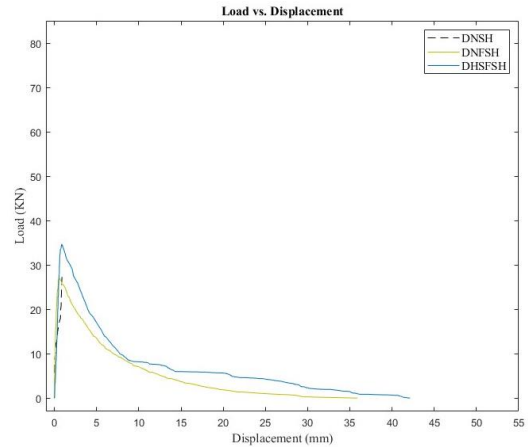
## ۲-۳- نتایج آزمایش چقرمگی خمشی

نتایج آزمایش چقرمگی خمشی در جدول (۶) و شکل (۹) ارائه شده است. در طرح مخلوط‌های بتن پاششی معمولی (بدون الیاف)، بعد از بار حداکثر، در نمونه‌ها رفتار شکننده مشاهده شد و بر این اساس در این طرح‌ها شکل پذیری و جذب انرژی پایینی حاصل شد. به کارگیری الیاف فولادی در بتن پاششی موجب شد، نمونه‌ها در محدوده بعد از بار حداکثر (محدوده پلاستیک) دارای رفتار شکل پذیر بوده و ظرفیت باربری بعد ایجاد ترک در نمونه‌ها با ایجاد پل توسط الیاف ادامه یابد. با توجه به جدول (۴) درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی مورد استفاده در تمامی طرح‌های بتن پاششی الیافی، یک درصد حجمی ثابت می‌باشد، پس تفاوت‌های ایجاد شده در جدول (۶) مربوط به بخش ماتریس بتنی می‌باشد. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود با بهبود مقاومت در طرح مخلوط‌های مربوط به بتن پاششی تر و خشک، علاوه بر افزایش قابل توجه بار حداکثر در آزمایش خمشی، طبق شکل (۱۰) دررفتگی الیاف در حین ترک کاهش یافته و بخشی از الیاف در حین تغییر شکل پاره می‌شوند و به موجب آن طبق شکل‌های (۱۱ و ۱۲) در محدوده تغییر مکان مرکزی ۲ تا ۱۰ میلی متر، شیب نمودار نیرو-تغییر مکان کاهش یافته است. از طرفی وجود الیاف در طرح اختلاط یکسان WHSSH-0% و WHSFSH-0% موجب افزایش ۵۳/۵۰ درصدی حداکثر بار قبل از ترک شده است.

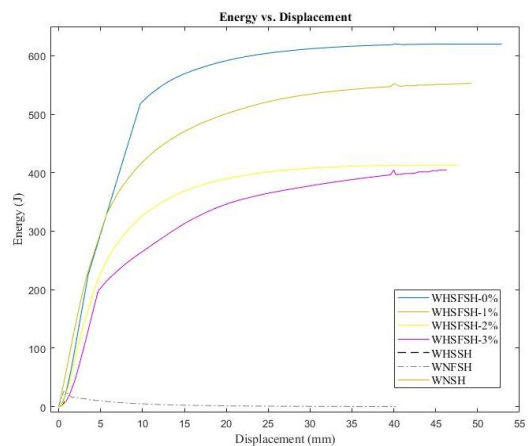
در شکل‌های (۱۳ و ۱۴)، قابلیت جذب انرژی طرح مخلوط‌های اجرا شده در دو روش پاشش تر و خشک تا تغییر مکان مرکزی حداکثر قابل تحمل آورده شده است. در بتن پاششی بر اثر عواملی همچون حرکت توده سنگ و خاک انتظار می‌رود،

گیری الیاف موجب عملکرد مرکب و افزایش ظرفیت باربری خمشی بتن پاششی می‌شود. مدول الاستیسیته بالای الیاف فولادی موجب عملکرد مناسب و مقرون به صرفه بتن پاششی در پوشش‌هایی با انتظار عرض ترک محدود می‌شود. عرض ترک عامل اصلی در عملکرد بعد از ترک بتن پاششی می‌باشد و جذب انرژی نمونه‌های پانل دایروی در تغییر مکان مرکزی ۵ و ۴۰ میلی‌متر به ترتیب معرف توانایی ادامه باربری بتن در عرض ترک ۱/۵ و ۷ تا ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. بررسی نتایج جذب انرژی در تغییر مکان مرکزی ۵ میلی‌متری که معرف سطح سرویس دهی می‌باشد نشان داد، بتن پاششی غیر مسلح توانایی ادامه باربری بعد ترک را ندارد و با استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو در تمامی طرح‌های الیافی با توجه به جذب انرژی مورد نیاز (۶۰-۱۰۰ ژول)، سطح سرویس دهی برآورده می‌شود [36]. در طرح بتن پاششی مقاومت بالای الیافی (WHSFSH-0%) با افزایش ۷۵ درصدی جذب انرژی نسبت به بتن پاششی الیافی معمولی (WNFSH) در روش تر و افزایش ۱۹ درصدی در طرح (DHSFSH) نسبت به طرح (DNFSH) در روش پاشش خشک و از طرفی افزایش ۴۰ درصدی جذب انرژی در طرح (WHSFSH-0%) نسبت به طرح (DHSFSH)، بیانگر عملکرد بهتر بتن پاششی مقاومت بالای الیافی به ویژه بتن پاششی مقاومت بالای تر، در حداکثر بار قابل تحمل قبل ترک و ادامه ظرفیت باربری بعد ترک در سطح سرویس دهی می‌باشد.

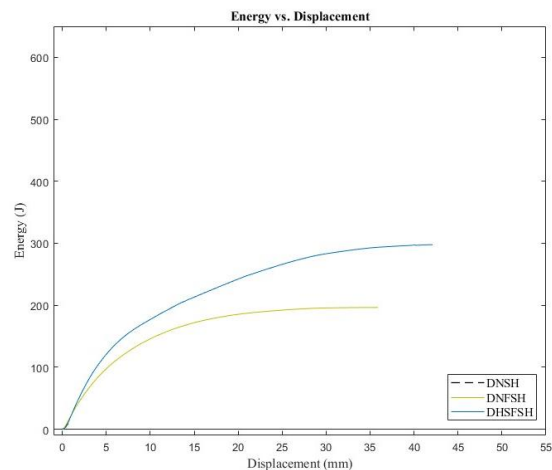
همچنین استفاده از آنی‌گیر در طرح‌های (WHSFSH-1% و ۲۲٪، WHSFSH-2%، WHSFSH-3%) موجب کاهش متوسط ۲۲ درصدی جذب انرژی نسبت به طرح (WHSFSH-0%) در سطح سرویس دهی می‌شود. با توجه به موارد کاربرد بتن پاششی مقاومت بالای الیافی و از طرفی استفاده از الیاف فولادی، بررسی شکل پذیری این نوع از بتن پاششی بیشتر در سطح بهره‌برداری (در جابه‌جایی مرکزی ۵ میلی‌متر) مقرون به صرفه و مورد توجه می‌باشد. نتایج جذب انرژی در سطح عملکرد نهایی (در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی‌متر) برای مقایسه جذب انرژی تحت تغییر شکل‌های بزرگ انجام می‌شود. همانند نتایج جذب انرژی در سطح سرویس دهی، استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو موجب شد در طرح‌های (WHSFSH-1%، WHSFSH-0%) (WHSFSH-2%، WHSFSH-3%) به ترتیب شاهد افزایش (۷۷،



شکل ۱۲. نمودار نیرو-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک  
Fig. 12. Force- Displacement diagram of dry shotcrete mixes



شکل ۱۳. نمودار انرژی-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت تر  
Fig. 13. Energy- Displacement diagram of wet shotcrete mixtures



شکل ۱۴. نمودار انرژی-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک  
Fig. 14. Energy-Displacement diagram of dry shotcrete mixtures

بتن پاشیده شده در هنگام ساخت و یا در هنگام بهره‌برداری دچار ترک شود ولی دچار گسیختگی نشود. بنابراین بررسی سطوح شکل پذیری و جذب انرژی در بتن پاششی مهم است. به کار

پاشش قابل قبول است.

- در طرح مخلوط نهایی  $WHSFSH_0\%$  با اصلاحات صورت گرفته، بیشترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه حاصل و به ترتیب برابر با  $۸۰/۴۸$  و  $۹۶/۸۰$  مگاپاسکال است که نسبت به طرح  $WNFSH$  (بتن پاششی الیافی معمولی)، مقاومت فشاری و جذب انرژی به ترتیب ۷۹ و ۷۰ درصد افزایش یافت.
- دستیابی به مقاومت‌های بالا در روش پاشش تر از امکان پذیری بالاتری نسبت به روش خشک برخوردار است.
- با به کارگیری الیاف فولادی بازیافتی میکرو، در طرح نهایی  $WHSFSH_0\%$  (بتن پاششی مقاومت بالای الیافی) نسبت به طرح  $WHSSH_0\%$  (بتن پاششی مقاومت بالا) در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، مقاومت فشاری و جذب انرژی به ترتیب ۲۸ و ۹۷ درصد افزایش یافت.
- با توجه به درصد حجمی ثابت الیاف فولادی (درصد)، در تمامی طرح اختلاط‌های بتن پاششی الیافی تر، تفاوت در جذب انرژی این طرح‌ها مربوط به ماتریس بتنی می‌باشد و در روند این تحقیق با افزایش ۸۰ درصدی مقاومت فشاری، جذب انرژی ۷۷ درصد افزایش یافت.
- براساس نتایج، آنی‌گیرها در حدود ۲۵ درصد موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

#### قدردانی نویسندگان

نویسندگان این مقاله کمال قدردانی واحترام را از تمامی حامیان این تحقیق بخصوص آقای مهندس میثم مولایی کارشناس محترم آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز و آقای مهندس مهدی فتحی مدیر عامل شرکت طرح و ساخت یادمان بنا را، دارند.

#### تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن وجود ندارد.

#### سهم نویسندگان

سهم نویسندگان با هم برابر است (۲۰٪ برای هر نویسنده).

#### منابع مالی

از منابع مالی نویسندگان و به صورت مساوی استفاده شده است.

۷۴، ۶۶ و ۶۵) درصدی در جذب انرژی نسبت به طرح  $WNFSH$  باشیم. همچنین استفاده از آنی‌گیر در این طرح‌ها موجب کاهش متوسط ۲۶ درصدی جذب انرژی شد. از طرف دیگر در تمامی طرح اختلاط‌های فوق، حداقل جذب انرژی ۳۶۰-۴۰۰ ژول در جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متری که برای پشتیبانی دائمی و موقت در اکثر شرایط زمین مناسب است، برآورده می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در نهایت در مقایسه کارهای انجام شده در این تحقیق با پژوهش‌های سایر محققین می‌توان گفت؛ همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ای که در تحقیقات دیگران دیده شد، برابر ۶۶ مگاپاسکال بوده‌است. در روند این تحقیق در روش پاشش تر با افزایش ۴۶ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۹۷ مگاپاسکال حاصل شد. بر اساس مطالعات صورت گرفته عملکرد بهتر الیاف فولادی در سایر تحقیقات مشاهده شد. ولی الیاف فولادی ماکرو موجب کاهش کارایی و پمپ پذیری بتن پاششی می‌شود. بنابراین در این پژوهش، الیاف فولادی بازیافتی میکرو استفاده و آثار این الیاف در مقاومت فشاری و چقرمگی خمشی بتن‌های پاششی تر و خشک در دو بتن رده مقاومتی معمولی و مقاومت بالا سنجیده شد. بدین منظور از تست خمش پانل دایره‌ای که نتایج دقیق‌تری نسبت به تست‌های خمش نمونه تیری و پانل مربعی دارد و به ندرت توسط سایر پژوهشگران بکارگرفته شده است، استفاده شد. بر اساس نتایج این آزمون، بهبود مقاومت فشاری موجب گشت با درصد حجمی ثابت الیاف فولادی، بتن پاششی مقاومت بالا در هر دو رده عملکردی سرویس دهی و نهایی عملکرد مناسبی داشته و نیاز به مسلح‌کننده‌های دیگری نباشد. علاوه بر این در اکثر تحقیقات صورت گرفته مقایسه آنی‌گیرهای متفاوت صورت گرفته و مشترکاً آنی‌گیرهای غیرقلیایی را مناسب دانسته‌اند. در این تحقیق بررسی درصدهای مختلف آنی‌گیر غیرقلیایی روی مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالا انجام شد.

و در نهایت به صورت خلاصه با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی انجام گرفته، می‌توان به موارد زیر تحت عنوان نتایج اصلی این تحقیق اشاره کرد.

- با توجه به مشاهدات صورت گرفته در حین پاشش، طرح مخلوط نهایی  $WHSFSH_0\%$  دارای کارایی، روانی و قابلیت

## References

- [1] ACI 506R-90, A., *Guide to shotcrete in Reported by ACI committee 506*.
- [2] Wang, X., Islam, M.M. and Zhang, Q., 2024. Influence of materials and nozzle geometry on spray and placement behavior of wet-mix shotcrete. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e02852.
- [3] Leung, C.K., Lai, R. and Lee, A.Y., 2005. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. *Cement and concrete research*, 35(4), pp.788-795.
- [4] Prudencio Jr, L.R., 1998. Accelerating admixtures for shotcrete. *Cement and concrete composites*, 20(2-3), pp.213-219.
- [5] Pan, Z., Wang, X. and Liu, W., 2014. Properties and acceleration mechanism of cement mortar added with low alkaline liquid state setting accelerator. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29(6), pp.1196-1200.
- [6] Paglia, C., Wombacher, F. and Böhni, H., 2001. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior. *Cement and concrete research*, 31(6), pp.913-918.
- [7] Salvador, R.P., Cavalaro, S.H., Segura, I., Figueiredo, A.D. and Pérez, J., 2016. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 111, pp.386-398.
- [8] Won, J.P., Hwang, U.J. and Lee, S.J., 2015. Enhanced long-term strength and durability of shotcrete with high-strength C12A7 mineral-based accelerator. *Cement and Concrete Research*, 76, pp.121-129.
- [9] Zhang, F., Cai, Y.B., Ding, J.T., Ning, F., Yang, S. and Wang, Z.L., 2017. Performance and action mechanism of new alkali-free liquid accelerators. *Water Resources and Power*, 35(5), pp.140-144.
- [10] Pan, G., Li, P., Chen, L. and Liu, G., 2019. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. *Construction and Building Materials*, 224, pp.1069-1080.
- [11] Liu, G., Cheng, W., Chen, L., Pan, G. and Liu, Z., 2020. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. *Construction and Building Materials*, 243, p.118180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180>.
- [12] Külleççi, G., 2021. Comparison of field and laboratory result of fiber reinforced shotcrete application. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2), pp.463-473.
- [13] Guler, S., Öker, B. and Akbulut, Z.F., 2021, June. Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete. In *Structures* (Vol. 31, pp. 781-791). Elsevier Elsevier.
- [14] Yan, X., Liu, L.M., Zhang, J.P., Li, Y.H. and Wang, H., 2018. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Siliceous Wet Shotcrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), p.1637261.
- [15] Park, C.W., Lee, H.G. and Kang, T.S., 2010. Evaluation of durability characteristics of high performance shotcrete using fly ash. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(3), pp.305-311.
- [16] Hossain, M.S., Han, S., Kim, S.K. and Yun, K.K., 2021. Long-term effect of accelerator content on flexural toughness of steel fiber reinforced shotcrete for tunnel construction. *Case Studies in Construction Materials*, 15, p.e00706.
- [17] Hisatake, M., 2003. Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 18(2-3), pp.197-204.
- [18] Armelin, H.S. and Helene, P., 1995. Physical and mechanical properties of steel-fiber reinforced dry-mix shotcrete. *Materials Journal*, 92(3), pp.258-267.
- [19] Meng, C. and Jin-yang, Z., 2013, June. Studies on lightweight high-strength shotcrete. In *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation* (pp. 1231-1234). IEEE.
- [20] Jawhar, A.A., Al-Hadithi, A.I. and Mansoor, Y.A., 2024, February. An experimental investigation of mechanical properties of wet-mixed shotcrete reinforced with different types of plastic fiber. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3009, No. 1). AIP Publishing.
- [21] Liao, H., Fang, Y., Yao, Z., Yu, T., Luo, H., Zhu, N., Wang, Y. and Li, M., 2023. Effects of fiber and rubber materials on the dynamic mechanical behaviors and damage evolution of shotcrete under cyclic impact load. *Journal of Building Engineering*, 73, p.106763.
- [22] Bertrand, J., 2006. Shotcrete Supply: Dry or Wet? A Shotcrete Supplier's Perspective. *Shotcrete, Spring*.
- [23] Morgan, D.R., Kirkness, A.J., McAskill, N. and Duke, N., 1988. Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibres. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 10(2), pp.96-102.
- [24] Steindl, F.R., Galan, I., Baldermann, A., Sakoparnig, M., Briendl, L., Juhart, J., Thumann, M., Dietzel, M., Röck, R., Kusterle, W. and Mittermayr, F., 2020. Sulfate durability and leaching behaviour of dry-and wet-mix shotcrete mixes. *Cement and concrete research*, 137, p.106180.
- [25] Dressler, I., Freund, N. and Lowke, D., 2020. The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing. *Materials*, 13(2), p.374.
- [26] Bohac, M., Kubatova, D., Kotlanova, M.K.,

- Khongova, I., Zedulova, A. and Stanek, T., 2021. The role of SCM's on rheology of sprayed mortar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1039, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1039/1/012001>.
- [27] ASTM, C., 2007. 150 Standard Specification for Portland Cement, ASTM International. *West Conshohocken, Pennsylvania, United States*. [https://doi.org/10.1520/C0150\\_C0150M-19A](https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-19A).
- [28] Timur, M. and Topçu, İ.L.K.E.R., 2023. Analysis of the Combined Usage of Plasticizer and Accelerator Effects on Microstructure for Mortar.
- [29] Felekoğlu, B., Tosun, K. and Baradan, B., 2011. Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticizer with different set-controlling admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(3), pp.1466-1473.
- [30] ASTM C 1141/C1141M-15, Standard Specification for Admixtures for Shotcrete.
- [31] ASTM C1140-11, Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels.
- [32] ASTM International, 2012. Standard C-1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). ASTM, West Conshohocken.
- [33] ASTM C 171 Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete.
- [34] ASTM C 511 Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.
- [35] ASTM C 42 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.
- [36] Papworth, F., 2002. Design guidelines for the use of fiber-reinforced shotcrete in ground support. *Shotcrete Magazine*, 1, pp.16-21.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Khameneh, M.A., Afshin, H., Emami Tabrizi, M., Alilou, Y. and Qudsi Sharif, G., 2025. Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.33-45.

DOI: 10.22034/25.3.4





## The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using “Cylindrical chamber” and “Pull-off” test methods

Mahmood Naderi<sup>1</sup>, Sardarwali Din<sup>2</sup>, Ali Saberi Varzaneh<sup>3\*</sup> 

1. Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2. Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
3. Ph.D. Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin.

### Abstract

Diffusion equations such as Darcy's equation which is used to measure the permeability coefficient of concrete has a one-dimensional limitation. If the water penetrates into the concrete in a multi-dimensional way. Therefore, there is a need for equations that measure the permeability coefficient of concrete either in a multi-dimensional way or without considering things like one-dimensional, two-dimensional or three-dimensional. Also, acute environmental conditions such as different cycles of ice and ice melting have a negative effect on concrete and especially on the surface of concrete. Therefore, in this article, according to the fractal theory, a new theoretical relationship has been presented that measures the permeability coefficient of concrete without the need for permeability dimensions. Also, the relationship between the surface resistance of concrete and its permeability coefficient in the conditions of ice and ice melting has been investigated by using pull tests from the surface and cylindrical chamber. Cylindrical chamber test is a new test invented by Mahoud Naderi. This test is very simple and has a portable device. The above test has the ability to measure the permeability of concrete in situ. Using this test, it is possible to measure the permeability of water into the concrete without breaking the concrete. To perform the above test, a steel plate must be glued on the concrete surface using epoxy resin glue. The desired adhesive must have the required compressive and shear strength so that no water leaks around it during the test. After that, the cylindrical container should be placed on the steel plate and water should be poured into it. Then, by using the handle on the device, the required pressure is applied to the water so that the water penetrates into the concrete. In the "direct tension" test to determine the surface resistance of concrete, first a metal cylinder with a diameter of 5 cm is attached to the place of the test using epoxy resin glue, then by using the "direct tension" device, the tensile force is applied to the cylinder. It is inserted to separate from the concrete surface. According to the existing relationship, the resistance value obtained by the "direct tension" method is obtained by dividing the tension force applied by the area of the cylinder. The direct tensile test can also be performed in situ. In addition, unlike the previous theories, the new theory has the ability to investigate the effect of processing time on the permeability coefficient. The obtained results show the high accuracy of the presented model for measuring the permeability coefficient of concrete. Also, the acute conditions of ice and ice melting have a negative effect on the permeability coefficient of concrete, and an inverse relationship between the permeability coefficient of concrete and the surface resistance obtained from the pull-out test was observed. With the increase in the number of acute cycles of ice and ice melting, the permeability of concrete also increases, which shows the negative effect of these conditions on concrete. Also, a great agreement between the theoretical and experimental results was observed.

### Review History

Received: May 20, 2024

Revised: Aug 28, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

### Keywords

Pull-off test

Cylindrical chamber test

Acute conditions


Permeability coefficient

\* Corresponding Author Email: [ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir) - ORCID: 0000-0003-0921-6484





## ارتباط ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی بتن تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن با به کارگیری آزمون "محفظه استوانه‌ای" و "Pull-off"

محمود نادری<sup>۱</sup>، سردارولی دین<sup>۲</sup>، علی صابری ورزنده<sup>۳\*</sup> 

۱. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳. دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### چکیده

### تاریخچه داوری

معادلات انتشار مانند معادله داری که برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن بکار می‌رود دارای محدودیت یک بعدی می‌باشد. در صورتیکه آب بصورت چند بعدی به داخل بتن نفوذ می‌کند. لذا نیاز به معادلاتی می‌باشد که یا بصورت چند بعدی یا بدون در نظر گرفتن مواردی مانند یک بعدی، دو بعدی یا سه بعدی مقدار ضریب نفوذپذیری بتن را اندازه‌گیری نماید. همچنین شرایط حاد محیطی مانند چرخه‌های مختلف یخ‌زدن و آب شدن دارای تاثیر منفی روی بتن و بخصوص بر سطح بتن می‌باشد. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال که توسط بنوایت ماندلبرات ارائه شده است، برای تعریف ساختار منافذ مواد سیمانی استفاده گردیده است. در این مقاله تئوری پیشنهادی جهت اندازه‌گیری نرخ نفوذ و ضریب نفوذپذیری بر اساس قوانین فراکتال ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از آزمون‌های "کشیدن از سطح" و "محفظه استوانه‌ای" رابطه بین مقاومت سطحی بتن با نفوذپذیری آن در شرایط یخ‌زدن و آب شدن مورد بررسی قرار گرفته است که ضریب تعیین این رابطه برابر با ۸۵ درصد به دست آمده است. نفوذپذیری و کاهش مقاومت سطحی بتن تحت ۱۲۰ چرخه حاد یخ‌زدن و آب شدن در سن ۱۲۰ روز به ترتیب ۲/۵ برابر و ۱۳/۴ درصد افزایش داشته است. در کل با توجه به نتایج حاصله، دقت بالای تئوری مذکور جهت اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در سنین مختلف مشاهده گردید. همچنین ضریب همبستگی بالا بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری بدست آمده به گونه‌ای که اختلاف نتایج بین نرخ نفوذ و ضریب نفوذپذیری کمتر از ۱۰ درصد به دست آمده است.

### کلمات کلیدی

کشیدن از سطح  
محفظه استوانه‌ای  
شرایط حاد  
ضریب نفوذپذیری

### ۱- مقدمه

اهمیت می‌باشد. همچنین مقدار نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد مانند دماهای بالا [1] فشار آب زیاد [2]، یخ‌زدن و آب شدن مداوم [3] حمله کلریدها [4]، حمله سولفات‌ها [5] می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این نفوذپذیری سطحی بتن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کوتاه مدت و بلند مدت آن دارد [6]. نفوذپذیری بتن اهمیت بسیار زیادی برای مقاومت در برابر تاثیرات خارجی دارد.

در طراحی سازه‌های مختلف بتنی علاوه بر مقاومت مورد نیاز، دوام بتن نیز می‌بایست مد نظر قرار گیرد. به عبارت دیگر، بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که هم دارای مقاومت مناسب بوده و هم دارای نفوذپذیری کمی باشد. به دلیل نفوذ عوامل آسیب رسان به داخل بتن و کاهش دوام آن، اطلاع از مقدار نفوذپذیری بتن بسیار با

\* رایانامه نویسنده مسئول: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir - ORCID: 0000-0003-0921-6484

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، 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.

نیاز به گرفتن مغزه از سازه و آزمایش نمودن مغزه در آزمایشگاه می‌باشد. همچنین برای ارزیابی مقاومت بتن بصورت مستقیم، نیاز به آزمون‌های مخرب می‌باشد. آزمون‌های درجا نیز اغلب بصورت مستقیم قادر به اندازه‌گیری مقاومت بتن نبوده یا دارای دستگاه بسیار گران قیمتی می‌باشند. در این تحقیق برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن از آزمون نوین "محفظه استوانه‌ای" استفاده شده است [27]. آزمون فوق دارای کاربرد وسیع، بسیار ساده، ارزان و قابلیت استفاده بصورت درجا می‌باشد [28]. در تحقیقی جهت صحت‌سنجی آزمون "محفظه استوانه‌ای" مقایسه‌ای بین نتایج این آزمون با استاندارد بریتانیا [29] انجام پذیرفت که همبستگی بالای ۹۵ درصد بین نتایج حاصل شد [30]. یکی از روش‌های درجا جهت اندازه‌گیری مقاومت سطحی بتن، آزمون کشیدن از سطح [31] می‌باشد. تحقیقات گذشته بیانگر دقت مناسب این آزمون برای ارزیابی مقاومت سطحی بتن بصورت درجا می‌باشد [32].

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن از یک مدل تئوری جدید استفاده شده است. بر خلاف مدل‌های قبلی، مدل استفاده شده در این تحقیق قابلیت در نظر گرفتن سن عمل‌آوری بتن در مقدار نفوذپذیری را دارا می‌باشد. با بسط مدل مذکور، یک مدل تئوری جدید ارائه شده است که با استفاده از پیچیدگی‌های مسیرهای جریان و مساحت سطحی منافذ، ضریب نفوذپذیری بتن تعیین شده است. همچنین رابطه بین مقدار مقاومت و نفوذپذیری بتن تحت شرایط یخ‌زدن و آب شدن ارائه گردیده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی و تئوری

### ۲-۱- مصالح مصرفی

از سیمان پرتلند تیپ ۲ برای ساخت بتن‌ها استفاده شده است. آب مورد استفاده نیز آب آشامیدنی شهری می‌باشد. مقدار چگالی سنگدانه‌های شن و ماسه به ترتیب برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد [33-34]. دانه‌بندی شن و ماسه نیز بر اساس استاندارد ASTM-C136 انجام پذیرفت [35]. چسب مخصوص مورد استفاده نیز از نوع رزین اپوکسی می‌باشد که ویژگی‌های آن در جدول (۱) قابل مشاهده است.

مواد شیمیایی آسیب رسان از طریق ترک‌ها و شکاف‌ها در ساختار بتن نفوذ کرده و منجر به واکنش فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌شوند، این امر باعث اختلال در ساختار بتن می‌شود [7]. با این حال، نفوذپذیری بتن به عنوان یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر دوام و عملکرد سازه‌های بتنی شناخته شده است.

بتنی که در معرض چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن قرار دارد، با دو نوع آسیب مستقل روبرو می‌شود: آسیب‌های داخلی و آسیب‌های خارجی [8]. آسیب‌های داخلی باعث ایجاد ترک‌های ریز در خمیر سیمان می‌شود و همچنین تغییر در خواص بتن مانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن می‌شود [9-12]. آسیب‌های خارجی عبارت است از پوسته شدن سطح بتن که معمولاً توسط نمک‌های یخ‌زدایی به وجود می‌آید. بطور کلی، خواص مکانیکی بتن تحت تأثیر آسیب‌های خارجی قرار نمی‌گیرد [8]. چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن علاوه بر آسیب به خواص مکانیکی بتن، منفی بر دوام بتن گذاشته و باعث تخریب آن می‌شود [13-18]. بتنی که در معرض آسیب یخ‌زدن و آب شدن قرار گرفته باشد، مقدار نفوذ کلرید در آن نسبت به بتنی که در این معرض قرار نگرفته است، بیشتر می‌شود [16]. بطور کلی، افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن باعث افزایش عمق نفوذ کلرید در بتن می‌شود [17-19].

در هندسه سنتی اقلیدسی، برای تعریف ابعاد، از اعداد صحیح استفاده می‌شود. اما تعریف ساختار منافذ توسط روابط اقلیدسی چندان نزدیک به واقعیت نمی‌باشد. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال که توسط بنوایت ماندلبرات [20] ارائه شده است، برای تعریف ساختار منافذ مواد سیمانی استفاده گردیده است. موارد مذکور در مطالعات پژوهشگران مختلفی بکار رفته است [21]. حجم، شکل و مساحت منافذ بتن دارای مشخصات فراکتالی می‌باشند که مرتبط با ویژگی‌های ماکروسکوپی آن هستند [22]. ساختار موجود در منافذ بتن نیز بسیار پیچیده بوده و تنها با پارامترهایی مانند تخلخل و توزیع قطر قابل بررسی نمی‌باشند [23-24]. اما با استفاده از تئوری فراکتال می‌توان پیچیدگی موجود در ساختار منافذ بتن را اندازه‌گیری نمود [25]. زیرا تئوری فراکتال دارای یک ارتباط موثر با مساحت خاص سطحی منافذ و قطر بحرانی می‌باشد [26].

در استانداردهای رایج دنیا برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن

جدول ۱. مشخصات چسب مصرفی

Table 1: Specifications of used glue

Strength (MPa)	Time to stick	Color	Mix ratio
70	90 Min	Gray	1-1



شکل ۱. آزمون کشیدن از سطح

Fig. 1. pull-off test

### ۲-۳- آزمون "محفظه استوانه‌ای"

طبق شکل (۲-الف) ابتدا یک صفحه فولادی روی نمونه بتنی چسبانده می‌شود. سپس دستگاه محفظه استوانه‌ای بر صفحه فولادی نصب شده و پر از آب می‌شود (شکل ۲-ب). سپس اهرم دستی را چرخانده تا فشار وارده برابر ۵ بار شود.

### ۲-۴- چرخه یخ‌زدن و آب شدن

چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن بر اساس استاندارد ASTM C666- B [37] انجام پذیرفته است. طبق استاندارد مذکور، آب شدن نمونه‌های بتنی باید در آب صورت پذیرد و یخ زدن آن‌ها در هوا انجام شود. نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد یخ زده و سپس برای مدت ۵۰ دقیقه در آب با دمای ۴ درجه سانتیگراد آب می‌شوند. تعداد چرخه‌ها به ترتیب ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ می‌باشند. نمونه‌ها بعد از انجام چرخه‌های مورد نظر، با استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" تحت آزمایش نفوذپذیری قرار گرفته‌اند.



ب) نصب دستگاه

الف) صفحه فولادی

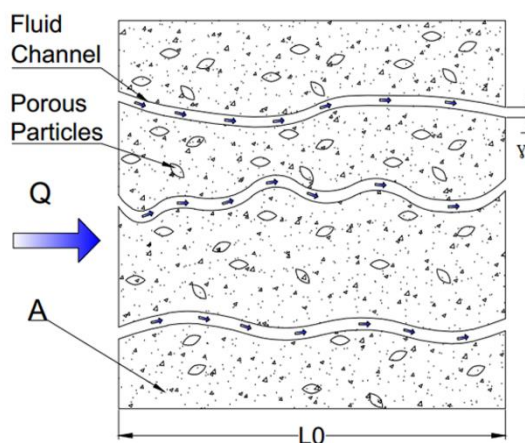
شکل ۲. آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 2. Cylindrical chamber test

### ۲-۵- مدل فراکتال

مطابق شکل (۳) محیط متخلخل موجود در بتن که حاوی منافذ مختلفی است را می‌توان به صورت مویرگی‌های منحنی فرض نمود. مقدار نفوذ آب در بتن را می‌توان با استفاده از مدل فراکتال محاسبه نمود. طول نمونه برابر  $L_0$  (mm)، قطر منفذ در محیط متخلخل برابر  $\gamma$  (mm)، نرخ جریان برابر  $Q$  ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) و مساحت محیط متخلخل برابر  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) می‌باشد [38]. محیط متخلخل در واقع یکنواخت نیست. وقتی که سیال در یک محیط متخلخل جریان دارد، مسیر جریان به صورت منحنی است [39].

در تحقیق انجام شده توسط گزو و یو [40] (۲۰۰۸) برای بررسی نفوذپذیری محیط متخلخل از یک مدل جدید بر اساس مشخصات هندسی فراکتال استفاده نموده‌اند که از تخلخل محیط مربوطه و قطر حداکثر منفذ تشکیل شده است. مدل مورد نظر (رابطه ۱) با مدل کازنی-کارمن (رابطه ۲) [41-42] نیز مقایسه شده که نتایج حاصل از مدل پژوهشگران گزو و یو با در نظر گرفتن



شکل ۳. کانال‌های مویرگی در محیط متخلخل

Fig. 3. Capillary channels in porous medium

### ۲-۲- آزمایش "کشیدن از سطح"

روش کشیدن از سطح از روش‌های نیمه مخرب محسوب می‌شود

می‌بیند و آب منجمد نشده‌ی منفذ، به ترک‌های میکرو نفوذ نموده و منجر به شکست انبساطی بیشتر می‌شود [43]. آب منفذی از سطح بتن شروع به انجماد می‌کند که باعث ایجاد فشار هیدرولیکی شده و آب منجمد نشده را در فضای خالی فشرده می‌کند. هنگامی که تنش کششی روی دیوار منفذ از مقاومت کششی نهایی بیشتر شود، ساختار منفذ پاره شده و ترک ایجاد می‌شود [44].

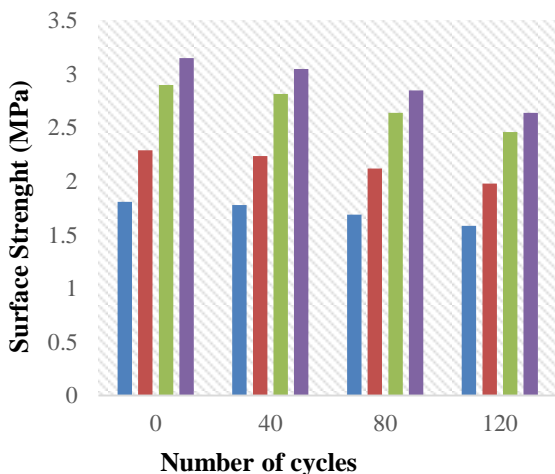
### ۳-۲- حجم نفوذ حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن، حجم نفوذ نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در مقایسه حجم نفوذ بتن معمولی با بتن قرار گرفته در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن، تحت تأثیر چرخه‌های مختلف به صورت کلی افزایش در حجم نفوذ مشاهده شده است. این افزایش حجم نفوذ در سن ۷ روزه تحت چرخه‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۱/۱۵، ۱/۴۴ و ۱/۵۹ برابر، در سن ۲۸ روزه به میزان ۱/۱۵، ۱/۴۲ و ۱/۵۸ برابر، در سن ۹۰ روزه به میزان ۱/۱۸، ۱/۴ و ۱/۷۲ برابر و در سن ۱۲۰ روزه به میزان ۱/۳۲، ۱/۷۲ و ۲/۱۴ برابر به دست آمده است.

جدول ۲. نسبت‌های مخلوط (kg/m<sup>3</sup>)

Table 2. Mixing plan (kg/m<sup>3</sup>)

Water	Sand	Gravel	Cement	W/C	Strenght (MPa)
206	863.6	686.83	415	0.5	30



شکل ۴. تغییر مقاومت سطحی در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

آبی=۷ روز . قرمز=۲۸ روز . سبز=۹۰ روز . بنفش=۱۲۰ روز

Fig. 4. Change of surface strength in freeze-thaw cycles

ابعاد فراکتالی، تخلخل و حداکثر قطر منفذ نسبت به مدل کازنی-کارمن دارای دقت بیشتر می‌باشد.

$$K = \frac{\pi D_f^{(1-D_t)/2} \times [4 \times (2 - D_f)]^{\frac{1+D_t}{2}}}{128 \times (3 + D_t - D_f)} \times \left(\frac{\phi}{1-\phi}\right)^{(1+D_t)/2} \times \lambda_{max}^2 \quad (1)$$

$$K = \frac{d_c^2 \times \phi^3}{16c \times (1-\phi)^2} \quad (2)$$

در روابط فوق  $\lambda_{max}$  بیشترین قطر منفذ،  $\phi$  تخلخل محیط مورد نظر،  $d$  قطر منفذ،  $c$  ضریب تجربی،  $D_f$  ابعاد مساحت سطح منافذ فراکتالی و  $D_t$  پیچیدگی کانال‌های مویینگی می‌باشد.

### ۲-۶- ساخت نمونه‌ها

با عنایت به اینکه بتن بکار رفته در بیشتر سازه‌های معمولی دارای مقاومت فشاری حدود ۳۰ مگاپاسکال هستند پس در این تحقیق از طرح مخلوط نشان داده شده در جدول (۲) استفاده شده است. برای انجام آزمایش "کشیدن از سطح" و "محفظه استوانه‌ای"، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها در سنین مختلف از ۷ الی ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۳-۳- تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده

#### ۳-۱- مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شده

مقادیر مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی در اثر چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن در شکل (۴) قابل مشاهده است. نمونه‌ها در سنین مختلف (۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه) و چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن (چرخه‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰) قرار گرفته‌اند. با افزایش تعداد این چرخه‌ها، مقاومت سطحی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت سطحی در سن ۷ روزه برای چرخه‌های فوق به ترتیب به میزان ۱/۷، ۶/۶ و ۱۰/۹ درصد، در سن ۲۸ روزه به ترتیب به میزان ۲/۴، ۷/۴ و ۱۱/۴ درصد، در سن ۹۰ روزه به ترتیب به میزان ۲/۹، ۹ و ۱۲/۶ درصد و در سن ۱۲۰ روزه به ترتیب به میزان ۳/۲، ۹/۵ و ۱۳/۴ درصد می‌باشد. علت کاهش مقاومت سطحی در چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن این است که کریستال‌های یخ، تمایل دارند به سمت فشار پائین، رشد کنند. در این صورت دیوار جانبی توسط فشار کریستالیزاسیون آسیب

افزایش حجم باعث آسیب بتن در اثر تنش تبلور می‌شود. فشار تبلور یک پدیده رایج یخ‌زدگی در طبیعت است. کریستال‌ها به سمت دیوار منفذ که دارای انحنای مختلف است رشد می‌کنند [46]. هنگام یخ‌زدن آب در منافذ انتهایی نیم‌کره کریستالی، باعث ایجاد تنش اضافی کریستالیزاسیون می‌شود. اگر تنش کریستالیزاسیون از حد مقاومت بتن بیشتر شود، باعث آسیب به بتن می‌شود [47].

### ۳-۳- نتایج آزمون جیوه و استخراج مدل جدید فراکتال

با استفاده از آزمون جیوه، حجم کل منافذ در سنین مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است.

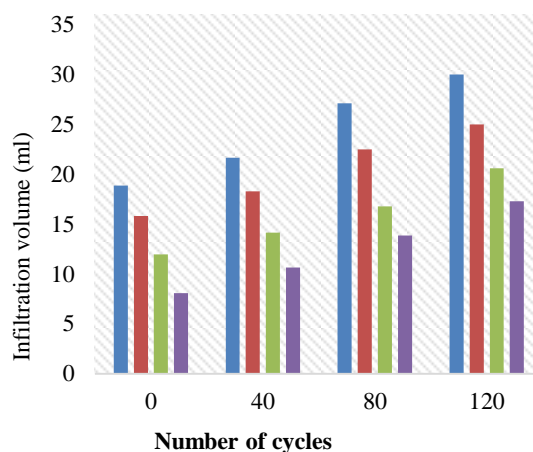
با استفاده از آزمایش جیوه می‌توان مشخصه‌های بیشتری از ساختار منافذ را به دست آورد، مانند تخلخل، سطح کل منافذ و متوسط قطر منافذ. این مشخصات در جدول (۲) نیز خلاصه شده است. با استفاده از حجم کل منافذ و مساحت سطح خاص منافذ و جایگذاری آن در رابطه ۳، قطر متوسط منافذ به دست می‌آید [48].

$$d_{av} = \frac{4 \times V}{A} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $d_{av}$  قطر متوسط منافذ (نانومتر)،  $V$  حجم کل منافذ (میلی‌متر مکعب بر گرم) و  $A$  مساحت سطح خاص منافذ (مترمربع بر گرم) است.

با توجه به جدول (۳)، مشاهده می‌شود که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد. علت این تغییرات، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که باعث فشردگی ساختار منافذ بتن می‌شود. مساحت منافذ در ابتدای عمل‌آوری افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان به حالت ثابت تبدیل می‌شود [48].

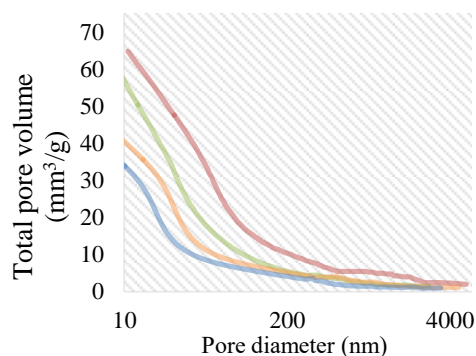
با توجه به تحقیقات پیشین و آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شده است که با افزایش سن عمل‌آوری در ریز ساختار منافذ بتن، تغییر به وجود می‌آید که علت این تغییر پیشرفت واکنش هیدراسیون سیمان است. این پیشرفت باعث کاهش اندازه منافذ می‌شود، زیرا محصولات واکنش ذکر شده به تدریج خلل و فرج را پر می‌کنند [43, 48]. سپس با استفاده از اندازه‌های قطر متوسط منافذ، اقدام به قرار دادن آن در نمودار دو بعدی  $x$  و  $y$  می‌شود. به گونه‌ای که در جهت  $x$ ، سن عمل‌آوری بر اساس روز و در جهت  $y$  قطر متوسط منافذ جایگذاری می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی در



شکل ۵. تغییر حجم نفوذ آب در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن

آبی=۷ روز. قرمز=۲۸ روز. سبز=۹۰ روز. بنفش=۱۲۰ روز

Fig. 5. Change of water infiltration volume in freeze-thaw cycles



شکل ۶. توزیع منافذ و حجم منافذ در سنین مختلف

بنفش=۷ روز. سبز=۲۸ روز. نارنجی=۹۰ روز. آبی=۱۲۰ روز

Fig. 6. Pore distribution and pore volume in different treatments

جدول ۳. مشخصات منافذ در سنین مختلف

Table 3. Characteristics of pores at different ages

Curing (Day)	Total pore volume (mm³/g)	Specific surface area of pores (m²/g)	Medium diameter (nm)	Porosity (%)
7	67	5.3	50.6	18.4
28	58	5.9	39.3	16.86
90	41	6.2	26.5	13.3
120	35	6.1	23	11.24

دلیل افزایش حجم نفوذ در چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن، به وجود آمدن آسیب در داخل بتن است. در مورد این آسیب می‌توان گفت که سازوکار آسیب بتن در چرخه‌های حاد یخ‌زدن و آب شدن ناشی از یخ‌زدن آب در داخل یا روی سطح بتن می‌باشد [45]. وقتی آب به یخ تبدیل می‌شود حجم آن ۹ درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که آب در منافذ بتن تبدیل به یخ شود، این

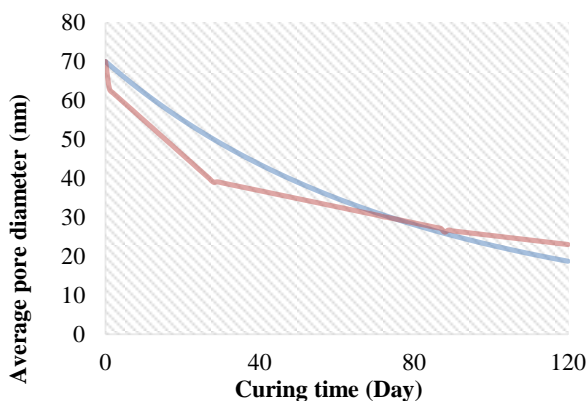
$$D_f = D_e - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left( \frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}} \right)} \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $D_e$  بعد هندسی اقلیدسی است که در فضای دو بعدی مقدار آن برابر ۲ و در فضای سه بعدی مقدار آن مساوی با ۳ است [52]. همچنین  $\varepsilon$  مقدار تخلخل بتن (۰/۱۵) است که در آزمایش جیوه به دست آمده است.  $\gamma_{\min}$  و  $\gamma_{\max}$  نیز بیشترین و کمترین قطر منافذ است که بیشترین آن برابر با ۷۰ نانومتر می‌باشد که در محدوده منافذ قطر متوسط آزمایش جیوه حاصل شده است و مقدار حداقل آن در محدوده قطر منافذ ژل قرار دارد که مساوی با ۵ نانومتر است [26].

کانال‌های مویرگی موجود در بتن دارای پیچیدگی است که این پیچیدگی را می‌توان با  $L_t$  نشان داد. اگر طول نمونه برابر با  $L_0$  باشد؛ روشن است که  $L_t \geq L_0$  اما در صورتی که جریان در یک کانال مستقیم باشد آنگاه  $L_t = L_0$  است. ویتکرافت و همکاران [53] برای دریافت  $L_t$  از قانون فراکتال رابطه ۱۰ استفاده نمودند؛

$$L_t(\gamma) = L_0^D \times \gamma^{1-D} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $D_t$  اندازه بُعد پیچیدگی را نشان می‌دهد که به معنای بُعد پیچ خوردگی مسیر مویرگی در هنگام عبور سیال از ساختار متخلخل است. هنگامی که  $D_t = 1$  باشد نشان دهنده یک مسیر مویرگی مستقیم است و  $D_t$  بزرگتر از آن مربوط به یک مسیر مویرگی منحنی است. برای محاسبه  $D_t$  از رابطه ۱۱ استفاده شده است [53].



شکل ۷. کاهش قطر منافذ با افزایش سن آبی=نتایج تئوری. بنفش = نتایج آزمایشگاهی

Fig. 7. Reduction of pore diameter with increasing age

فضای متلب طبق روند فوق ترسیم می‌شود. سپس یک نمودار معادل، با نمودار داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب رسم شد که باعث حصول رابطه ۴ و نمودار شکل (۷) شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل آوری، قطر متوسط منافذ کاهش می‌یابد. پس افزایش سن به معنای افزایش مقاومت، کاهش منافذ و کاهش نفوذپذیری است. رابطه ۵ که بر اساس تغییر رابطه ۴ به دست آمده است، رابطه‌ی مهمی است که در محاسبات استخراج مدل جدید فراکتال استفاده می‌شود.

$$\gamma = \gamma_{\max} \times C^{a \times t} \quad (4)$$

$$\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} = C^{-a \times t} \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $a$  ضریب زمان است که بر اساس رابطه ۶ حاصل می‌شود و  $t$  سن عمل آوری (روز) و  $C$  قاعده تابع نمایی که مقدار آن برابر ۲ است. تعیین مقدار  $C$  و مقدار  $a$  بر این اساس است که منحنی تئوری، متناظر منحنی داده‌های آزمایشگاهی بوده و مقدار  $\gamma_{\max}$  نیز برابر حداکثر قطر متوسط که برابر با ۷۰ نانومتر است می‌باشد.

$$a = \frac{16.01}{t - 1000} \quad (6)$$

در سال ۲۰۰۲ گزو و یو [40] برای اندازه‌گیری توزیع منافذ در محیط متخلخل با استفاده از قانون مقیاس بندی فراکتال، از رابطه ۷ استفاده نمودند [49]. ویژگی‌های فراکتالی توزیع اندازه منافذ، بیشتر در منافذ مویرگی بزرگ به عنوان عامل موثر عمل می‌نمایند. در همین حال، ویژگی‌های پیچیدگی در ناحیه منافذ کوچک ژل و ناحیه‌ی منافذ کوچک مویرگی دارای نقش موثر می‌باشند [50].

$$N(L \geq \gamma) = \left( \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \right)^{D_f} \quad (7)$$

در رابطه ۷،  $N$  تعداد منافذ،  $D_f$  بعد فراکتال و  $\gamma$  قطر منفذ است؛ پس برای دریافت تعداد منافذ از قانون مقیاس بندی فراکتال (رابطه ۷) استفاده شده است و این رابطه با توجه به رابطه ۵ تبدیل به رابطه‌ی ۸ شده است. به طوری که در رابطه ۵ مقیاس  $\gamma_{\max}/\gamma$  به مقیاس جدیدی که مساوی با  $C^{-at}$  است تغییر یافته است و رابطه به شکل رابطه ۸ نشان داده می‌شود.

$$N(t) = (C^{-a \times t})^{D_f} = 2^{\frac{-16.01 \times t \times D_f}{t - 1000}} \quad (8)$$

همچنین برای محاسبه بعد فراکتال مساحت سطحی  $D_f$  از رابطه ۹ استفاده می‌شود [51].

$$Q(t) = -\frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t} (3 + D_t - D_f)} \frac{D_f}{+C} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)} \quad (17)$$

$$Q(t) = \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t} (3 + D_t - D_f)} \frac{D_f}{+C} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)} \quad (17)$$

$$- \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t} (3 + D_t - D_f)} - 9 \quad (18)$$

اکنون، با استفاده از نرخ جریان، می‌توان ضریب نفوذپذیری را

که در رابطه ۱۹ نشان داده شده است محاسبه کرد [56].

$$K = \frac{\mu \times L_0 \times Q}{A \times P} \quad (19)$$

در رابطه ۱۹،  $L_0$  طول نمونه و  $A$  مساحت مورد نظر (میلی متر

مربع)، در نمونه است. با جایگذاری رابطه ۱۸ به جای عبارت (Q)

در رابطه ۱۹، رابطه ۲۰ بدست می‌آید. پس از ساده‌سازی این رابطه،

رابطه نهایی ضریب نفوذپذیری بدست می‌آید. بر اساس تغییرات

زمان می‌توان ضریب نفوذپذیری (K) را با بکارگیری مدل جدید

محاسبه نمود.

$$\frac{\pi \times D_f \times L_0^{1-D_t} \times \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \times A \times (3 + D_t - D_f)} \frac{9 \times \mu \times L_0}{A \times P} \quad (20)$$

به عنوان نمونه، نرخ جریان و ضریب نفوذپذیری برای بتن

عمل‌آوری شده در ۲۸ روز محاسبه شده است. ابتدا پارامترهایی که

در محاسبه نرخ جریان، ضریب نفوذپذیری و عمق نفوذ استفاده

می‌شود، در جدول (۴) معرفی شده است.

با جایگذاری اعداد جدول (۳) در روابط ۱۸ و ۲۰ داریم:

$$Q(28) = \frac{\pi}{128} \frac{0.5 \times 1.5 \times (0.00007)^{4.084}}{150^{1.084} \times 8.9 \times 10^{-10} \times (3 + 1.084 - 1.28)}$$

جدول ۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده

Table 4. Values of used parameters

parameter	amount	Unit
$D_e$	2	
$\varepsilon$	0.15	
$\lambda_{\min}$	0.00000227	mm
$D_f$	1.28	
$D_t$	1.084	
$\gamma_{\max-a}$	0.00007	mm
$\mu$	0.0000000089	MPa.s
$p$	0.5	MPa
$A$	4418	mm <sup>2</sup>
$L_0$	150	mm
$\pi$	3.14	

$$D_t = 1 + \frac{\ln \bar{\gamma}}{\ln \left(\frac{L_0}{\bar{\gamma}}\right)} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱،  $\bar{\gamma}$  قطر متوسط (نانومتر) و  $\bar{\gamma}$  متوسط پیچیدگی

است [54].

در این تحقیق برای اندازه‌گیری طول پیچیده‌گی کانال مویرگی

بتن از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود اما به جای  $\bar{\gamma}$  از مقدار رابطه ۵

استفاده شده که رابطه‌ی جدید ۱۲ به دست آمده است.

$$L_t(t) = L_0^{D_t} \times (\gamma_{\max} \times C^{a \times t})^{1-D_t} \rightarrow L_t(t) = L_0^{D_t} \times \gamma_{\max}^{1-D_t} \times 2^{\frac{-16.01 t + 16.01 t D_t}{t-1000}} \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از رابطه ۸، نرخ تغییرات تعداد منافذ dN را

می‌توان به صورت رابطه ۱۳ به دست آورد.

$$dN(t) = \ln 2 \times 2^{\frac{-16.01 t D_f}{t-1000}} \times \frac{16010 D_f}{(t-1000)^2} \times dt \quad (13)$$

نرخ جریان سیال، در یک کانال مویرگی را می‌توان بر اساس

رابطه اصلاح شده هاگن پوازی به دست آورد (رابطه ۱۴) [55].

$$q(t) = \frac{\pi \times P \times \gamma^4}{128 \times L_t(t) \times \mu} \quad (14)$$

$$K(t) = \frac{\pi \times D_f \times L_0^{1-D_t} \times \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \times A \times (3 + D_t - D_f)} 2^{\left(\frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000}\right)}$$

در رابطه ۱۴،  $P$  فشار سیال (مگاپاسکال) و  $\mu$  ضریب

ویسکوزیته (مگاپاسکال ثانیه) است. با استفاده از روابط ۵ و ۱۲

می‌توان قطر متوسط و طول پیچیدگی جدید را در رابطه ۱۴

جایگذاری نمود که پس از ساده سازی، رابطه ۱۵ حاصل می‌شود؛

این رابطه شکل جدید رابطه هاگن پوازی می‌باشد.

$$q(t) = \frac{\pi \times P \times \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \times \mu \times L_0^{D_t}} 2^{\left(\frac{(16.01 \times t \times D_t) + (48.03 \times t)}{t-1000}\right)} \quad (15)$$

با استفاده از نرخ جریان حجمی یک کانال، نرخ کل جریان از

محیط متخلخل را می‌توان با انتگرال‌گیری رابطه‌ی ۱۶ محاسبه

نمود؛ پس از محاسبه ثابت انتگرال (رابطه ۱۷)، حالت نهایی رابطه

نرخ جریان در رابطه ۱۸ داده شده است که با بکارگیری این رابطه

می‌توان نرخ جریان را برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری حساب

نمود.

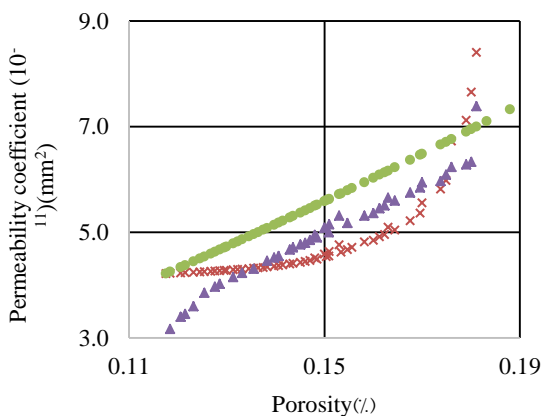
$$Q(t) = \int q(t) dN(t) \quad (16)$$

نفوذپذیری را محاسبه نمود. با توجه به نمودار همبستگی مشاهده می شود که مقدار آن نزدیک به نتایج آزمایشی می باشد. علاوه بر این موقعیت این نمودار به طور تقریبی بین نتایج مدل جدید فراکتال و نتایج مدل گزو و یو قرار دارد که می توان از نتایج آن به عنوان نتایج بهینه استفاده نمود. با بررسی نتایج، مشاهده می شود که افزایش تخلخل منجر به افزایش مقادیر نفوذپذیری می شود. این امر به دلیل افزایش تعداد منافذ نفوذپذیر و ایجاد کانال های بیشتر موینگی بتن است که نقش مهمی در افزایش نفوذپذیری ایفا می کنند. بین مقادیر ضریب نفوذپذیری و مقادیر تخلخل رابطه مستقیم بر قرار است که نمودار مورد نظر در شکل (۹) این موضوع را به خوبی نشان می دهد.

جدول ۵. مقایسه مقادیر ضریب نفوذپذیری در سنین مختلف

Table 5. Comparison of permeability coefficient values at different ages

Curing (Day)	permeability coefficient (mm <sup>2</sup> )		
	Theoretical results × 10 <sup>-11</sup>	Laboratory results × 10 <sup>-11</sup>	Percentage difference(%)
7	6.22	6.33	1.74
9	5.67	6.24	9.13
14	4.98	5.99	16.86
21	4.55	5.65	19.48
28	4.34	5.36	19.01
41	4.14	5.04	17.86
54	4.03	4.77	15.51
67	3.98	4.5	11.78
80	3.92	4.23	7.33
90	3.9	4.02	2.99



شکل ۸. نتایج مدل های مختلف

آبی=نتایج آزمایشها . سبز=مدل گزو و یو . قرمز=مدل فراکتال

Fig. 8. Results of different models

$$2 \left( \frac{16.01 \times 2419200(3+1.084-1.28)}{2419200-1000} \right) - \frac{\pi}{128} \frac{0.5 \times 1.5 \times 0.00007^{4.084}}{150^{1.084} \times 8.9 \times 10^{-10} \times (3+1.084-1.28)} - 9 = 0.792 \frac{mm^3}{s}$$

$$K(28) = \frac{\pi}{128} \frac{1.28 \times 150^{(1-1.084)} \times (0.00007)^{4.084}}{4418 \times (3+1.084-1.28)}$$

$$2 \left( \frac{16.01 \times 2419200(3+1.084-1.28)}{2419200-1000} \right) - \frac{\pi}{128} \frac{1.28 \times 150^{(1-1.084)} \times (0.00007)^{4.084}}{4418 \times (3+1.084-1.28)} - \frac{9 \times 8.9 \times 10^{(-10)} \times 150}{4418 \times 0.5} = 4.78 \times 10^{-11} mm^2$$

در تحقیق دیگر [57]، مشاهده شده است که ضریب نفوذپذیری برای عمل آوری ۲۸ روزه برابر با  $4.2 \times 10^{-11}$  (میلی متر مربع) است و در این تحقیق نیز برابر با  $4.78 \times 10^{-11}$  (میلی متر مربع) به دست آمده که اختلاف نتایج بسیار اندک می باشد که نشان از دقت نتایج دارد.

### ۳-۴- مقایسه ضریب نفوذپذیری حاصل از مدل جدید فراکتال و آزمون "محفظه استوانه ای"

در جدول (۵) مقادیر ضریب نفوذپذیری در سنین مختلف برای نتایج تئوری و آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مشاهده می شود که، درصد اختلاف بین نتایج در عمل آوری های ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۹/۶ و ۶/۲۲ درصد است. وجود مقدار اندک اختلاف، نشان از دقت تئوری مذکور است.

### ۳-۵- درستی آزمایشی و مقایسه نتایج مدل جدید فراکتال با مدل های موجود

در این بخش برای اطمینان از دقت نتایج بدست آمده، مقایسه نتایج آزمایشها و مدل جدید فراکتال با نتایج مدل گزو و یو (رابطه ۱) در شکل (۸) قابل مشاهده است. در این نمودار، نتایج با الگوهای مختلف به منظور تفکیک آنها ارائه شده اند.

در شکل (۹)، نتایج بدست آمده برای بررسی رابطه همبستگی ارائه شده است. در رابطه همبستگی مشاهده می شود که بین نتایج رابطه درجه سه وجود دارد. همچنین با بکارگیری مقدار تخلخل و جایگذاری آن در رابطه همبستگی می توان مقدار ضریب

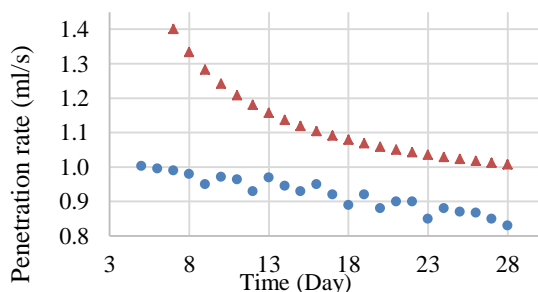


نتایج مدل‌های مختلف در جداول (۶ و ۷) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، می‌توان اظهار کرد که بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و همبستگی کم‌ترین میزان اختلاف وجود دارند. به همین ترتیب در مرحله بعدی، مقایسه بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج حاصل شده از مدل جدید فراکتال قرار دارند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل شده از رابطه همبستگی می‌تواند مقادیری با اختلاف تقریباً کم‌تر از ۵ درصد مقایسه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها ارائه دهند؛ پس این رابطه را می‌توان به عنوان رابطه بهینه در زمینه اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن در نظر گرفت.

### ۳-۶- استفاده از مدل جدید فراکتال در نتایج دیگر محققان

در این قسمت، از مدل جدید فراکتال به منظور صحت و دقت آن در نتایج تحقیق یکی دیگر از محققین استفاده شده است [58]. نتایج تئوری و نتایج آزمایش‌ها در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج دیده می‌شود که با افزایش زمان عمل آوری، در مقادیر نرخ نفوذ کاهش دیده می‌شود، زیرا پیشرفت هیدراسیون سیمان سبب افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری می‌گردد.

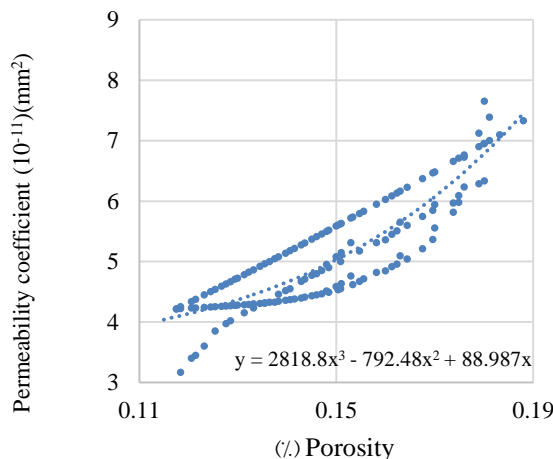
در شکل (۱۱)، نمودار همبستگی بدست آمده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیق مذکور و نتایج مدل جدید فراکتال نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که معادله توانی با ضریب تعیین بالای ۸۵ درصد بین نتایج آزمایش‌ها و نتایج تئوری وجود دارد.



شکل ۱۰: صحت سنجی معادله تئوری در تحقیقی دیگر

قرمز= مقادیر تئوری. آبی=مقادیر آزمایشگاهی

Fig. 10. Verification of the theory equation in another research



شکل ۹. همبستگی بین نتایج مختلف

Fig. 9. Correlation between results

جدول ۶. مقادیر ضریب نفوذپذیری در نتایج مختلف

Table 6. Values of permeability coefficient in different results

Porosity	permeability coefficient (mm <sup>2</sup> )		
	Optimal results (10 <sup>-11</sup> )	Theoretical results (10 <sup>-11</sup> )	Percentage difference (%)
0.179	6.78	7.1	4.57
0.177	6.61	6.42	2.93
0.175	6.46	5.98	7.95
0.17	6.11	5.56	9.84
0.169	6.01	5.3	13.47
0.164	5.75	5.04	14.13
0.161	5.57	4.92	13.24
0.157	5.35	4.8	11.36
0.151	5.06	4.6	10.01
0.145	4.81	4.42	8.78
0.139	4.61	4.35	5.98
0.133	4.44	4.3	3.15
0.128	4.32	4.32	0

جدول ۷. مقادیر پارامترهای استفاده شده

Table 7. Values of used parameters

Optimal results (10 <sup>-11</sup> )	permeability coefficient (mm <sup>2</sup> )	
	Laboratory results × 10 <sup>-11</sup>	Percentage difference (%)
6.78	6.33	7.04
6.61	6.24	5.9
6.46	6.13	5.31
6.11	6	1.78
6.01	5.85	2.8
5.75	5.65	1.8
5.57	5.51	1.12
5.35	5.31	0.66
5.06	5.04	0.41
4.81	4.77	0.8
4.61	4.5	2.45
4.44	4.23	4.86
4.32	4.32	4.02

مقایسه‌ای انجام شده بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با

#### ۴- نتیجه گیری

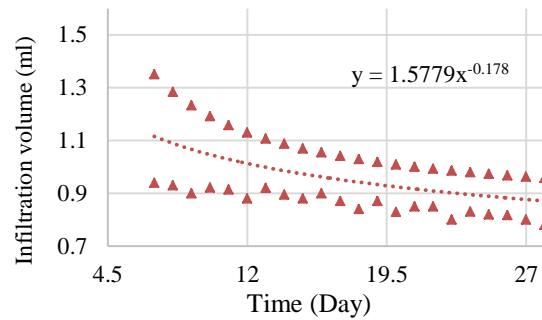
- رابطه معکوسی بین ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح مشاهده شد. با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی و ضریب نفوذپذیری یک رابطه خطی با ضریب شدت ۹۲ درصد بدست آمد.
- با بسط تئوری فراکتال، مدل جدیدی ارائه شد که ضمن در نظر گرفتن آثار سن عمل آوری، قابلیت اندازه گیری ضریب نفوذپذیری بتن را با دقت بالایی دارا می باشد.
- اختلاف ضریب نفوذپذیری حاصل از مدل جدیدی و نتایج آزمایشگاهی در سن ۹۰ روز حدود ۶ درصد می باشد که نشان از دقت بالای مدل مذکور می باشد.
- با توجه به نتایج آزمون جیوه برای بتن در سنین مختلف مشاهده شد که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل آوری کاهش می یابد.
- با افزایش تعداد چرخه های یخ زدن و آب شدن، مقاومت سطحی حاصل از آزمون کشیدن از سطح کاهش می یابد. این کاهش مقاومت سطحی در بتن با عمل آوری ۱۲۰ روزه برای چرخه های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۳/۲، ۹/۵ و ۱۳/۴ درصد می باشد.
- در مقایسه حجم نفوذ بتن معمولی با بتن قرار گرفته در چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن، تحت تأثیر چرخه های مختلف به صورت کلی افزایش حجم نفوذ آب به بتن مشاهده شده است. این افزایش حجم نفوذ در بتن با عمل آوری ۱۲۰ روزه برای چرخه های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ به ترتیب به میزان ۱/۳۲، ۱/۷۲ و ۲/۱۴ برابر به دست آمده است.
- با مقایسه نتایج مدل جدید فراکتال و مدل گزو و یو رابطه بهینه ای که قادر به ارائه نتایج دقیق در زمینه نفوذپذیری بتن است، بدست آمد.

#### قدردانی نویسندگان

در انجام این پژوهش از سوی مراکز یا دانشگاه ها حمایتی صورت نگرفته است.

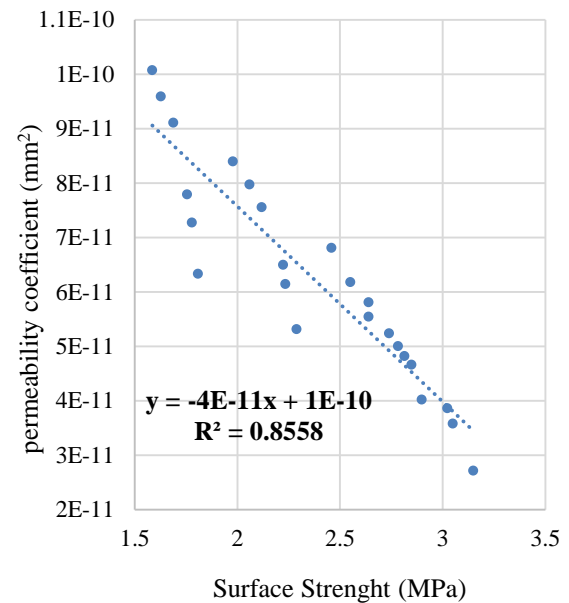
#### تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن



شکل ۱۱. همبستگی بین نتایج مختلف

Fig. 11. Correlation between different results



شکل ۱۲. همبستگی بین مقاومت سطحی و ضریب نفوذپذیری نمونه ها در

چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن

Fig. 12. Correlation between surface resistance and permeability coefficient of samples in acute ice and ice melting cycles

#### ۷-۳ بررسی همبستگی بین مقاومت سطحی و ضریب

#### نفوذپذیری نمونه ها در چرخه های حاد یخ زدن و آب شدن

با در نظر گرفتن تحلیل رگرسیون بین مقاومت سطحی حاصل از روش کشیدن از سطح و ضریب نفوذپذیری یک رابطه خطی با ضریب شدت ۹۲ و ضریب تعیین ۸۵ درصد بدست آمده است. در این قسمت بین ضریب نفوذپذیری و مقاومت سطحی یک رابطه ی معکوس برقرار است، به این دلیل که با افزایش مقاومت سطحی، ضریب نفوذپذیری کاهش می یابد و کانال های مویرگی بتن را کاهش می دهد. این حالت منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری می شود که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.

وجود ندارد.

## منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی شخص یا نهادی استفاده

نشده است.

## سهام نویسندگان

سهام هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

## References

- [1] Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H. and Cao, M., 2024. Multiscale cracking pattern-based homogenization model of water permeability in hybrid fiber-reinforced concrete after high-temperature exposure. *Journal of Building Engineering*, 84, p.108643.
- [2] Zhang, G., Zheng, H., Wei, X., Li, Z., Yan, Z. and Chen, X., 2024. Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure. *Developments in the Built Environment*, 17, p.100385.
- [3] Zeng, W., Wang, W., Pan, J. and Liu, G., 2023. Effect of steel fiber on the permeability of freeze-thaw damaged concrete under splitting tensile and compressive loads. *Journal of Building Engineering*, 80, p.108086.
- [4] Zeng, W., Zhao, X., Zou, B. and Chen, C., 2023. Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion. *Journal of Building Engineering*, 80, p.108042.
- [5] Zhang, J., Zhou, L., Nie, Q., Wu, H. and Wu, L., 2024. Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 411, p.134369.
- [6] Yang, J., Dong, Q., Chen, X., Shi, B. and Wang, X., 2024. Evaluation of concrete surface permeability: A dynamic water film-based approach. *Measurement*, 224, p.113863.
- [7] Yıldırım, M. and Özhan, H.B., 2023. Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 7(1), pp.48-59.
- [8] Powers, T.C., 1945, January. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 41, No. 1, pp. 245-272).
- [9] Tian, J., Wang, W. and Du, Y., 2016. Damage behaviors of self-compacting concrete and prediction model under coupling effect of salt freeze-thaw and flexural load. *Construction and Building Materials*, 119, pp.241-250.
- [10] Wang, B., Pan, J., Fang, R. and Wang, Q., 2020. Damage model of concrete subjected to coupling chemical attacks and freeze-thaw cycles in saline soil area. *Construction and Building Materials*, 242, p.118205.
- [11] Zhang, D., Mao, M., Zhang, S. and Yang, Q., 2019. Influence of stress damage and high temperature on the freeze-thaw resistance of concrete with fly ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 229, p.116845.
- [12] Qiu, W.L., Teng, F. and Pan, S.S., 2020. Damage constitutive model of concrete under repeated load after seawater freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 236, p.117560.
- [13] Ren, J. and Lai, Y., 2021. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack. *Cold Regions Science and Technology*, 188, p.103301.
- [14] Polat, R., Qarluq, A.W. and Karagöl, F., 2021. Influence of singular and binary nanomaterials on the physical, mechanical and durability properties of mortars subjected to elevated temperatures and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 295, p.123608.
- [15] Zhang, B., Yan, B. and Li, Y., 2023. Study on mechanical properties, freeze-thaw and chlorides penetration resistance of alkali activated granulated blast furnace slag-coal gangue concrete and its mechanism. *Construction and Building Materials*, 366, p.130218.
- [16] Jiang, W.Q., Shen, X.H., Xia, J., Mao, L.X., Yang, J. and Liu, Q.F., 2018. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete. *Construction and Building Materials*, 179, pp.553-565.
- [17] Li, L.J., Liu, Q.F., Tang, L., Hu, Z., Wen, Y. and Zhang, P., 2021. Chloride penetration in freeze-thaw induced cracking concrete: A numerical study. *Construction and Building Materials*, 302, p.124291.
- [18] Linjie, L.I. and Qingfeng, L.I.U., 2022. Numerical analysis on freezing rate and chloride transport in concrete subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 50(8), pp.2245-2256.
- [19] Zhang, M., Yang, L.M., Guo, J.J., Liu, W.L. and Chen, H.L., 2018. Mechanical properties and service life prediction of modified concrete attacked by sulfate corrosion. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), pp. 1-7.
- [20] Mandelbrot, B.B., 1982. The Fractal Geometry of Nature, New York. *Freeman WH*, 16, p.32.
- [21] Xuan, W., Chen, X., Yang, G., Dai, F. and Chen, Y., 2018. Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after

- exposure to high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 187, pp.222-236.
- [22] Zhang, B. and Li, S., 1995. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(4), pp.1383-1386.
- [23] Gao, Y., Jiang, J., De Schutter, G., Ye, G. and Sun, W., 2014. Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Construction and Building Materials*, 69, pp.253-261.
- [24] Chen, X., Zhou, J. and Ding, N., 2015. Fractal characterization of pore system evolution in cementitious materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, pp.719-724.
- [25] Ma, H., Sun, J., Wu, C., Yi, C. and Li, Y., 2020. Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars. *Materials*, 13(11), p.2442.
- [26] Han, X., Wang, B. and Feng, J., 2022. Relationship between fractal feature and compressive strength of concrete based on MIP. *Construction and Building Materials*, 322, p.126504.
- [27] Naderi, M. 2010. Determination of concrete, stone mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method. *Registration of patent in Companies and industrial property Office*, Reg. N. 67726, Iran.
- [28] Naderi, M. and Kaboudan, A., 2021. Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, pp. 1-11.
- [29] BS EN 12390-8. 2009. Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure, British Standards Institution, London.
- [30] Naderi, M. and Kaboudan, A., 2020. Cylindrical Chamber: A new in situ method for measuring permeability of concrete with and without admixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3), pp.2225-2241
- [31] ASTM C1583/C1583M. 2013. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method). *American Society for Testing and Materials*.
- [32] Pereira, E. and de Medeiros, M.H.F., 2012. Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5, pp.757-780.
- [33] ASTM C128-15 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [34] ASTM C127-15 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [35] ASTM C136-19 2019. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- [36] Giancaspro, J., Millman, L., Goolabsingh, R., MacDonald, K. and Yang, Q.D., 2014. *A Novel Bearing Swivel Joint and a Universal Joint for Concrete Pull-Off Testing Using a Material Testing Machine*. ASTM International.
- [37] ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates, 2008. *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. ASTM international.
- [38] Yu, B. and Li, J., 2001. Some fractal characters of porous media. *Fractals*, 9(03), pp.365-372.
- [39] Patro, D., Bhattacharyya, S. and Jayaram, V., 2007. Flow kinetics in porous ceramics: understanding with non-uniform capillary models. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(10), pp.3040-3046.
- [40] Xu, P. and Yu, B., 2008. Developing a new form of permeability and Kozeny–Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry. *Advances in water resources*, 31(1), pp.74-81.
- [41] Kozeny, J., 1927. Ueber kapillare leitung des wassers im boden. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, 136, p.271.
- [42] Carman, P.C., 1937. Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Eng. London*, 15, pp.150-156.
- [43] Corte, A.E., 1962. Vertical migration of particles in front of a moving freezing plane. *Journal of Geophysical Research*, 67(3), pp.1085-1090. <https://doi.org/10.1029/JZ067i003p01085>.
- [44] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P., 2010, June. A study of the behaviors of cement-based materials subject to freezing. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 1611-1616). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535987>.
- [45] Yuan, J., Du, Z., Wu, Y. and Xiao, F., 2019. Freezing-thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters. *Construction and Building Materials*, 204, pp.317-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.149>.
- [46] Özcan, F. and Koç, M.E., 2018. Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 187, pp.382-393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.183>.
- [47] Valenza II, J.J. and Scherer, G.W., 2007. A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cement and Concrete*

- Research*, 37(7), pp.1022-1034. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.003>.
- [48] Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J. and Shi, C., 2023. Review on the characteristics and multi-factor model between pore structure with compressive strength of coral aggregate. *Construction and Building Materials*, 370, p.130326.
- [49] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P., 2010, June. A study of the behaviors of cement-based materials subject to freezing. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 1611-1616). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535987>.
- [50] Yu, B. and Cheng, P., 2002. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International journal of heat and mass transfer*, 45(14), pp.2983-2993. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00014-5).
- [51] Yu, B. and Cheng, P., 2002. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International journal of heat and mass transfer*, 45(14), pp.2983-2993. <https://doi.org/10.1142/S0218348X19400036>.
- [52] Kim, J. and Choi, S., 2023. Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 366, p.130157.
- [53] Xu, P., 2015. A discussion on fractal models for transport physics of porous media. *Fractals*, 23(03), p.1530001.
- [54] Wheatcraft, S.W. and Tyler, S.W., 1988. An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. *Water Resources Research*, 24(4), pp.566-578.
- [55] Liu, H., Xie, Z., Yu, R. and Zhang, N., 2022. A new three-dimensional fractal dimension model to describe the complexity of concrete pores. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(3), pp.127-138.
- [56] Torrent, R.J., Neves, R.D. and Imamoto, K.I., 2021. *Concrete permeability and durability performance: from theory to field applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429505652>.
- [57] Naderi, M., Kaboudan, A.R. and Amin Afshar, M., 2020. Studying the Strength and Diffusion and Permeability Coefficients of Concretes Containing Silica Fume, Fly Ash, Zeolite And Limestone Powder. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36(2.2), pp. 13-25.
- [58] Kaboudan., A., 2020. Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using “Cylindrical chamber” method. Ph.D. Student, Imam Khomeini International University.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Naderi, M., Din, S. and Saberi Varzaneh, A., 2025. The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using “Cylindrical chamber” and “Pull-off” test methods. *Moades Civil Engineering journal*, 25(3), pp.47-60.

DOI: 10.22034/25.3.5



## Investigation of the effect of long-term aging on the high- and low-temperature performance of bitumen

Mohammad Mehdi Dadaei<sup>1</sup>, Pouria Hajikarimi<sup>2\*</sup> , Mohammad Rahi<sup>3</sup>, Mehdi Dastoori Razaz<sup>4</sup>, Behnoosh Tahmasbi<sup>5</sup>, Fereidoon Moghadas Nejad<sup>6</sup>

1. Ph.D. student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
3. Director of Research and Development, Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.
4. Manager, Dept. of Research and Development, Pasargad Oil Company, Abadan, Iran.
5. Laboratory Expert, Dept. of Research and Development, Pasargad Oil Company, Abadan, Iran
6. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

### Abstract

Accurately analyzing the behavior of bitumen as a viscoelastic material, along with its natural aging process, is crucial in pavement engineering. Bitumen, being a thermoplastic substance, exhibits mechanical properties that vary with temperature, significantly affecting the durability and overall performance of asphalt pavements. To ensure long-term serviceability, it is essential to control the high- and low-temperature properties of bitumen to prevent distress mechanisms such as rutting at high temperatures and cracking at low temperatures. This is particularly important in regions with extreme temperature fluctuations, where bitumen must remain stable under varying climatic conditions.

In this study, the effects of aging on the mechanical properties of bitumen were simulated using the Superpave testing system, a widely accepted approach in asphalt binder performance grading. Specifically, short-term aging was replicated using the Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT), which mimics the oxidation that occurs during the mixing and construction phases. Long-term aging was simulated using the Pressure Aging Vessel (PAV), which accelerates the oxidative hardening that takes place over the pavement's service life. Understanding the impact of these aging processes is essential for predicting the long-term behavior of asphalt pavements and developing strategies to improve their durability.

To evaluate the impact of repeated PAV aging cycles, three different penetration-grade bitumens were selected: 40-50 (PG70-16), 60-70 (PG64-22), and 85-100 (PG58-28). These grades reflect their resistance to temperature-induced distress. Each bitumen type was subjected to one, two, and three PAV aging cycles to provide insight into the progressive effects of oxidation on its rheological and mechanical properties. The gradual stiffening of bitumen due to oxidation can lead to increased brittleness, making it more susceptible to cracking under traffic loads and environmental stresses. Therefore, evaluating the extent of these changes is critical in designing pavements that can withstand long-term exposure to aging factors.

For low-temperature performance analysis, the Bending Beam Rheometer (BBR) test was conducted at 0°C, -6°C, and -12°C to assess the stiffness and susceptibility of the aged bitumen to thermal cracking. To evaluate high-temperature performance, the Dynamic Shear Rheometer (DSR) test was carried out at seven different temperatures, ranging from 46°C to 82°C. This test provided key data on the complex shear modulus and phase angle, which are critical indicators of bitumen's resistance to rutting and fatigue cracking. Additionally, the rheological data obtained from these tests help predict pavement performance under various climatic and loading conditions.

The results showed that with increased aging, the high-temperature performance of the bitumens improved by up to three PG grades, while the low-temperature performance increased by a maximum of two grades. After three PAV aging cycles, the performance grades of the tested bitumens shifted to PG82-4, PG82-10, and PG70-16, respectively. Additionally, the study examined the relationship between the high-temperature properties of aged bitumen and its chemical composition over different aging periods. A strong linear correlation was observed between the viscoelastic properties at high temperatures and the chemical aging index, with an  $R^2$  value exceeding 0.9. These findings highlight the significant influence of aging on bitumen performance and emphasize the importance of considering aging resistance when selecting bitumen for pavement applications. Future research should focus on developing modification techniques to enhance bitumen's aging resistance and improve its long-term performance in diverse environmental conditions.

### Review History

Received: Jul 22, 2024

Revised: Nov 08, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

### Keywords

Asphalt binder

Aging

Bending Beam Rheometer

Dynamic Shear

Rheometer

Performance Grading.

\* Corresponding Author Email: [phajikarimi@aut.ac.ir](mailto:phajikarimi@aut.ac.ir) - ORCID: 0000-0001-5621-7274



## بررسی تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر ویژگی‌های عملکردی دمای بالا و پایین قیر

محمد مهدی دادائی<sup>۱</sup>، پوریا حاجی کریمی<sup>۲\*</sup> ID، محمد راهی<sup>۳</sup>، مهدی دستوری رزاز<sup>۴</sup>، بهنوش طهماسبی<sup>۵</sup>، فریدون مقدس نژاد<sup>۶</sup>

۱. دانشجوی دکتری تخصصی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۳. مدیر تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران.
۴. مدیر آزمایشگاه، واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، آبادان، ایران.
۵. کارشناس آزمایشگاه، واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، آبادان، ایران.
۶. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

### چکیده

### تاریخچه داوری

- تحلیل دقیق رفتار قیر به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک و پدیده‌های طبیعی حاکم بر آن مانند پیرشدگی، از مسائلی مهم مهندسی روسازی است. از این رو کنترل ویژگی‌های دمای پایین و بالای قیرها به منظور پیشگیری از ترک خوردگی‌های دمای پایین و آسیب‌های متداول دمای بالا به منظور خدمت‌دهی مناسب در طول عمر روسازی ضروری است. در این مطالعه شبیه‌سازی پدیده پیرشدگی و بررسی آثار آن روی ویژگی‌های مکانیکی قیرها با استفاده از روش دستورالعمل سوپرپیو یعنی روش RTFOT برای پیرشدگی کوتاه‌مدت و روش PAV برای پیرشدگی بلندمدت انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های مکرر PAV بر ویژگی‌های قیرها سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف ۴۰-۵۰ (PGV۰-۱۶)، ۶۰-۷۰ (PG۲۲-۶۴) و ۱۰۰-۸۵ (PG۵۸-۲۸) انتخاب و از هر کدام سه نمونه تحت مراتب پیرشدگی یک الی سه بار PAV قرار گرفته‌اند. آزمون رئومتر تیر برشی (BBR) در سه دما از صفر تا ۱۲- درجه سانتی‌گراد و رئومتر برش دینامیکی (DSR) در هفت دما از ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. براساس نتایج به دست آمده دمای بالای عملکردی قیرها حداکثر سه رده و دمای پایین عملکردی آن‌ها حداکثر دو رده افزایش را متحمل شده‌اند. به عبارت دیگر درجه‌بندی قیرهای سه‌گانه، پس از سه مرتبه اعمال PAV به ترتیب به ۸۲-۱۰، ۸۲-۴ و ۷۰-۱۶ تبدیل است. همچنین ارتباط خصوصیات عملکردی دمای بالای قیرهای پیرشده با تغییرات شیمیایی آن‌ها در مراتب مختلف پیرشدگی بررسی و تغییرات آن‌ها به منظور نمایش همبستگی میان این ویژگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ویژگی‌های ویسکوالاستیک دمای بالا و شاخص پیرشدگی شیمیایی قیرهای مختلف دارای ارتباط خطی قوی با ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیش از ۰/۹ بوده است.

### کلمات کلیدی

- قیر پیرشدگی رئومتر تیر خمشی رئومتر برش دینامیکی رده‌بندی عملکردی قیر

### ۱- مقدمه

در سطح جهان هستند [1]. استفاده از قیر به عنوان یکی از اجزای اصلی این نوع روسازی در مناطق مختلف جهان وابسته به سیاست‌های توسعه زیرساختی آن‌ها بوده است و بر این اساس

روسازی‌های آسفالتی به سبب دارا بودن ویژگی‌های انعطاف‌پذیری و راحتی حرکت یکی از رایج‌ترین نوع رویه راه‌ها

\* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - phajikarimi@aut.ac.ir :0000-0001-5621-7274

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، 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.

رایج‌ترین روش دارای استاندارد در آزمایشگاه‌های مختلف روسازی از روش RTFO و به دنبال آن PAV استفاده شده است. از آنجا که در پژوهش‌های مختلف مانند پژوهش براسول و همکاران [16] و ما و همکاران [17] بر کافی نبودن انجام یک مرتبه شبیه‌سازی بلندمدت به روش PAV تاکید شده است و در برخی از مطالعات به تکرار این روش تا دو یا سه مرتبه [15-16] و نیز در برخی موارد استفاده از تابش اشعه فرابنفش [20] علاوه بر یک مرتبه PAV مورد استفاده واقع شده است. از آنجا که تکرار چرخه‌های پیرشدگی نیازمند هزینه مالی و صرف زمان زیاد است، در این مطالعه به بررسی ضرورت چرخه‌های مکرر PAV و آثار آن بر ویژگی‌های عملکردی سه نوع قیر با درجات مختلف پرداخته شده است. به این منظور پس از تهیه سه نوع قیر با درجات نفوذ ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ و انجام شبیه‌سازی کوتاه‌مدت پیرشدگی به وسیله روش RTFO، یک الی سه مرتبه PAV روی نمونه‌ها انجام شده است. رئومتر تیر خمشی یکی از روش‌های طبقه‌بندی قیرها است که برای تعیین ویژگی‌های عملکردی دمای پایین قیرها با استفاده از پاسخ‌هایی مانند سختی خزشی خمشی، S، نرمی خزشی و نرخ خزش، m، مورد استفاده قرار گرفته است؛ S و m خروجی‌های اصلی آزمایش رئومتر تیر خمشی به شمار می‌روند [10-18]. نتایج این آزمون در سه دمای صفر، ۶- و ۱۲- درجه سانتی‌گراد در تحلیل‌های این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین آزمایش رئومتر برشی دینامیکی یکی از آزمایش‌های مورد تأیید پروتکل سوپرپیو برای تعیین و بررسی ویژگی‌های عملکردی قیر به ویژه در دماهای بالا است [22]. با استفاده از خروجی‌های این آزمایش یعنی مدول مختلط برشی ( $G^*$ ) و نیز زاویه فاز ( $\delta$ ) بر اساس پروتکل سوپرپیو رده‌بندی عملکردی قیر نیز تعیین می‌شود. علاوه بر ضرورت تکرار چرخه‌های پیرشدگی، اهداف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات رده‌بندی عملکردی قیرهای مختلف تحت مراتب مختلف پیرشدگی، ارائه منحنی‌های جامع دمایی و پیرشدگی قیر به وسیله مشخصه‌های دمایی بالا و پایین، و نیز بررسی همبستگی میان مراتب مختلف پیرشدگی میان ویژگی‌های ویکسوالاستیک دمای بالا و ویژگی‌های شیمیایی قیر است.

آمریکای شمالی ۲۵ درصد، اتحادیه اروپا ۱۷ درصد، سایر کشورهای اروپایی ۱۱ درصد، آسیا و اقیانوسیه ۳۷ درصد، آمریکای جنوبی ۷ درصد و آفریقا ۳ درصد از کل سهم استفاده از قیر را به خود اختصاص داده‌اند [2]. روسازی آسفالتی ۶۷ درصد از سطح راه‌های کشور ایران به طول بیش از ۲۲۰ هزار کیلومتر را پوشش داده‌اند [3]. قیر مانند هر ماده آلی تحت شرایط مختلف دمایی، واکنش با اکسیژن و نیز برخورد اشعه فرابنفش دچار تغییرات ساختاری به لحاظ شیمیایی می‌شود. به عبارت دیگر قیر در طول عمر طرح تحت تأثیر ترافیک و شرایط آب و هوایی دچار تغییرات فیزیوشیمیایی می‌شود که به این پدیده موثر بر ویژگی‌های مکانیکی قیر پیرشدگی گفته می‌شود [4]. عواملی مانند دمای بالا، اکسیژن، تابش نور خورشید و مواجهه با گونه‌های فعال اکسیژن مانند  $O_3$  مسبب پدیده پیرشدگی شناخته شده‌اند [5]. پیرشدگی فرآیندی شیمیایی است که منجر به سخت شدن و افزایش گرانبوی قیر با گذشت زمان می‌شود و این پدیده از سال ۱۹۰۰ میلادی در ایالات متحده شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است [6-7]. شش عامل اکسیداسیون، تبخیر، پلیمریزاسیون، تیکسوتروپی، سینریزیس و جداسازی به عنوان عوامل اصلی ایجاد پدیده پیرشدگی شناخته شده‌اند [8]. همچنین برخی از پژوهش‌ها فرآیند اکسیداسیون را عامل اصلی پیرشدگی قیر معرفی کرده‌اند [9-10]. از آنجا که پیرشدگی بر ویژگی‌های مکانیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی مانند مدول برجهندگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین اثرگذار است، شناخت رفتار قیر پس از پیرشدگی بلندمدت به منظور ارائه طرح‌های مناسب و اقتصادی روسازی‌ها ضروری است. به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی قیرها روش‌های مختلفی از جمله PAV [11]، UV [12]، PAV+UV، RTFO+PAV [13] و استفاده از آون به مدت‌های طولانی‌تر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. هوفکو و همکاران [14] نیز با استفاده از گونه‌های فعال اکسیژن به شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت پرداخته‌اند و نتایج نشان داد که عمده پیرشدگی ناشی از حضور گونه  $NO_x$  است و متأثر از دیگر گونه‌ها نیست و تا حدودی با پیرشدگی PAV+RTFO تطابق دارد. همچنین پیرشدگی بلندمدت قیر می‌تواند ناشی از رطوبت و تغییرات شیمیایی ساختاری در اثر اشعه UV نیز باشد [15]. در این مطالعه به دلیل استفاده از



جدول ۱. مشخصات قیرهای مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Properties of asphalt binders used in this study

Property	Unit	Standard Method	Asphalt Binder		
			B40/50 (PG70-16)	B60/70 (PG64-22)	B85/100 (PG58-28)
Penetration at 25°C	dmm	ASTM D5	45	65	86
Softening point	°C	ASTM D36	58	54	49
Ductility at 25°C	cm	ASTM D113	>100	>100	>100
Flash point	°C	ASTM D92	>250	>250	>250

شده است و آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D6648-08 انجام می‌شود [21]. سختی خزشی خمشی،  $S$ ، و نرخ خزش،  $m$ ، دو خروجی اصلی آزمایش رئومتر تیرچه خمشی هستند. در این آزمایش بار ثابت  $980 \pm 50$  میلی نیوتن به صورت متمرکز به مدت ۲۴۰ ثانیه در بازه‌های زمانی ۵، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ ثانیه به وسط دهانه تیرچه ساخته شده از قیر مورد نظر با ابعاد مشخص وارد می‌شود و تغییر مکان عمودی وسط دهانه تیر در بازه‌های زمانی ۰/۵ ثانیه‌ای ثبت می‌شود. با توجه به آنچه در ادبیات مرتبط با تئوری ویسکوالاستیسیته کاملاً شناخته شده است، خروجی آزمایش خزش به صورت نرمی خزشی قابل محاسبه است [23]. به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی، اصل مطابقت الاستیک - ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته و پس از ساده‌سازی روابط معادله (۱) به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [24]:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (1)$$

در این رابطه  $\delta(t)$  تغییر مکان وسط دهانه (برحسب میلی‌متر)،  $P$  بار متمرکز ثابت وسط دهانه (نیوتن)،  $L$  طول دهانه تیر (میلی‌متر) و  $b$  و  $h$  به ترتیب عرض و ارتفاع تیرچه (میلی‌متر) و  $t$  زمان (ثانیه) است.

نرخ خزش،  $m$ ، قدر مطلق شیب نمودار  $\log S(t)$  برحسب  $\log(t)$  است که توسط رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$m = \left| \frac{d\{\log[S(t)]\}}{d\{\log(t)\}} \right| \quad (2)$$

در این مطالعه آزمایش رئومتر تیر خمشی روی هر یک از نمونه‌های حاصل از مراتب سه‌گانه پیرشدگی به روش PAV در سه دمای ۱۲-، ۶- و صفر درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

## ۲- مصالح و روش تحقیق

### ۱-۲- مصالح

این مطالعه روی سه نوع قیر خالص با درجات نفوذ مختلف ۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد واقع در شهر آبادان انجام شده است. مشخصات قیرهای استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است. این قیرها به ترتیب دارای رده‌بندی عملکردی ۱۶-۷۰، ۲۲-۶۴ و ۲۸-۵۸ بوده است که در بسیاری از مناطق آب و هوایی ایران کاربرد داشته‌اند.

### ۲-۲- آزمایش‌ها

#### ۱-۲-۲- شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت

در این مطالعه شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر بر اساس استاندارد ASTM D2872 به روش RTFO انجام شده است. در این روش غشای نازکی از قیر درون محفظه دوار دستگاه قرار گرفته و تحت شرایط اکسیداسیون عمل پیرسازی در دمای بالای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه انجام می‌شود.

#### ۲-۲-۲- شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت

به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت قیر، نمونه‌های حاصل از آزمایش RTFO درون محفظه PAV مطابق پروتکل ASTM D6521 قرار گرفته‌اند و یک مرتبه مورد پیرشدگی واقع شده‌اند. همچنین از آنجا که به منظور تکرار چرخه‌های PAV پروتکل استاندارد وجود ندارد، عملیات به طور مشابه با همان استاندارد پیرسازی مرتبه اول ادامه یافته تا مراتب مکرر حاصل شوند.

#### ۳-۲-۲- آزمایش رئومتر تیر خمشی<sup>۱</sup>

در بسیاری از مطالعات پژوهشی و استانداردها آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های خزشی قیر معرفی

<sup>1</sup> Bending Beam Rheometer (BBR)

جدول ۲. برنامه آزمایشگاهی پژوهش.

Table 2. Research laboratory program.

FTIR Test	High Temperature Test	Low Temperature Test	Sample Condition	Bitumen Type	Sample Code
Using the device model IRTracer-100	DSR Based on ASTM D7175-15 To calculate the complex shear modulus and phase angle	BBR Based on ASTM D6648 To calculate flexural stiffness and creep rate	0PAV	40-50	A0PAV
			1PAV		A1PAV
			2PAV		A2PAV
			3PAV	60-70	A3PAV
			0PAV		B0PAV
			1PAV		B1PAV
			2PAV		B2PAV
			3PAV		B3PAV
			0PAV		C0PAV
			1PAV	85-100	C1PAV
			2PAV		C2PAV
			3PAV		C3PAV

### ۲-۲-۴- آزمایش رئومتر برش دینامیکی<sup>۱</sup>

به منظور بررسی ویژگی‌های عملکردی قیر در دمای بالا، پس از آماده‌سازی نمونه‌هایی با مراتب مختلف پیرشدگی به روش PAV از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی مطابق با استاندارد ASTM D7175-08 برای آماده‌سازی نمونه‌ها، چگونگی انجام آزمایش و نیز تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. آزمایش DSR روی تمامی ۱۲ نمونه قیر مورد نظر (حالت پیرنشده و ۳ حالت پیرشدگی از سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف) در بازه دمایی ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد با گام‌های دمایی ۶ درجه‌ای انجام شده است. این بازه‌ها در مورد قیرهای خالص و پیرنشده از دمای ۴۶ تا ۸۲ در همان گام ۶ درجه‌ای و نیز از فرکانس ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است. در این مطالعه فرکانس زاویه‌ای از ۰/۶۲۸ تا ۶۲۸ رادیان بر ثانیه (۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز) در ۱۶ فرکانس مختلف تغییر داده شده و تغییرات پارامترهای دیگر سنجیده شده است. با استفاده از این آزمایش مدول مختلط برشی ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) قیر تعیین شده است که در مراحل بعد با استفاده از آن‌ها تحلیل‌های مختلفی از تأثیر پدیده پیرشدگی بر ویژگی‌های قیر در دمای بالا انجام و نتایج آن‌ها ارائه شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

استفاده از منحنی جامع برای نمایش اطلاعات آزمایش‌های متداول و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فرکانس، دما و پارامترهای

مکانیکی مواد یکی از روش‌های رایج در ویسکوالاستیسیته است که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [25]. به منظور در نظر گرفتن آثار مربوط به شرایط دمایی و مراتب مختلف پیرشدگی به وسیله روش PAV در مدل‌سازی شکل‌پذیری خزشی نمونه‌ها در گام اول از مفهوم زمان کاهش یافته (از طریق جابه‌جایی افقی منحنی‌ها) و در گام دوم به عبارتی سختی کاهش یافته (از طریق جابه‌جایی قائم منحنی‌ها) استفاده شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمایش BBR انجام شده در این مطالعه، منحنی‌های جامع دمایی سختی-زمان کاهش یافته برای قیر خالص و نیز هر مرتبه PAV در دمای مرجع ۶- درجه سانتی‌گراد تهیه شده است. در این روش از جابه‌جایی افقی منحنی‌ها با استفاده از اعداد دلخواه به منظور در امتداد یکدیگر قرار گرفتن منحنی‌های صفر و ۱۲- درجه سانتی‌گراد با منحنی ۶- درجه سانتی‌گراد (به عنوان دمای مرجع) استفاده شده است. ضرایب انتقال منحنی‌ها در امتداد محور زمان در جدول (۳) و نیز منحنی‌های مربوط به قیر ۵۰-۴۰ در شکل‌های (۱) تا (۴) ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که از ارائه اطلاعات دیگر قیرها به دلیل تشابه بالا و جلوگیری از طولانی شدن مطالب خودداری شده است. حال با استفاده از یکپارچه‌سازی این منحنی‌ها و ترسیم آن‌ها برای هر نوع قیر در یک نمودار مانند شکل (۵) به ترسیم منحنی جامع پیرشدگی سختی کاهش یافته-زمان کاهش یافته هر نمونه قیر پرداخته می‌شود. در این قسمت از جابه‌جایی قائم نمودارهای مربوط به مراتب PAV به منظور قرار گرفتن روی منحنی قیر خالص (به عنوان مرجع) استفاده می‌شود. همچنین ضرایب انتقال قائم منحنی‌های مراتب مختلف PAV برای هم امتداد شدن با نمودار قیر پیرنشده در جدول (۴) آورده شده است.

<sup>1</sup> Dynamic Shear Rheometer (DSR)

جدول ۳. ضرایب انتقال افقی منحنی مراتب مختلف PAV از قیر ۴۰-۵۰ به

دمای مرجع -۶ درجه سانتی‌گراد.

**Table 3.** Horizontal shift factors of different PAV curves from 40-50 bitumen to the reference temperature of -6°C.

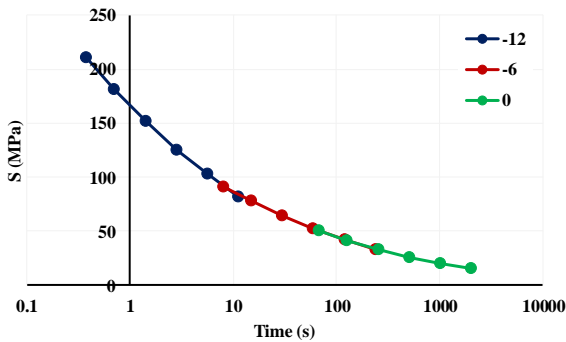
$a_T$	Temp	Times of PAV	$a_T$	Temp	Times of PAV
0.112	-12		0.1000	-12	
1.000	-6	2 PAV	1.000	-6	Original
6.166	0		-	0	
0.152	-12		0.047	-12	
1.000	-6	3 PAV	1.000	-6	1 PAV
8.472	0		8.511	0	

جدول ۴. ضرایب انتقال قائم منحنی مراتب مختلف PAV قیر ۴۰-۵۰ در دمای

-۶ درجه سانتی‌گراد.

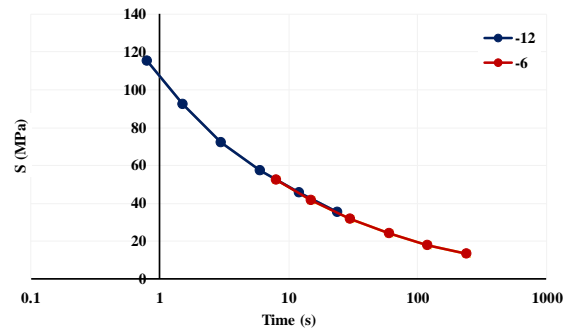
**Table 4.** Vertical shift factors of different PAV curves of bitumen 40-50 at -6°C.

Condition	Original	1PAV	2PAV	3PAV
Vertical Shift Factor	1.000000	0.0931108	0.683912	0.524807



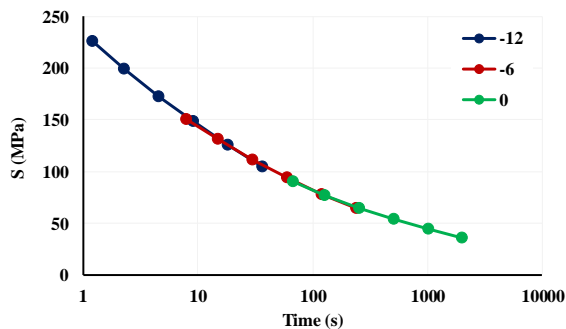
شکل ۲. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ یک مرتبه PAV در دمای -۶ درجه سانتی‌گراد

**Fig 2.** Master curve of 40-50, 1<sup>st</sup> PAV at -6°C



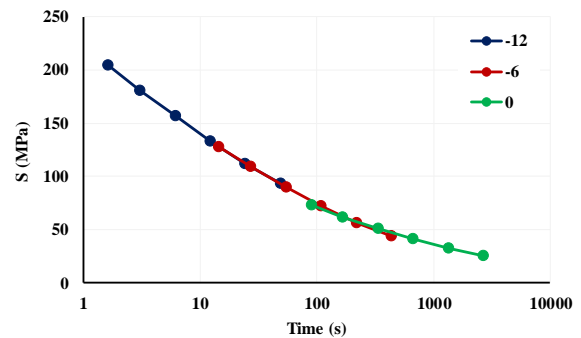
شکل ۱. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ خالص در دمای -۶ درجه سانتی‌گراد

**Fig 1.** Master curve of pure bitumen 40-50 at -6°C



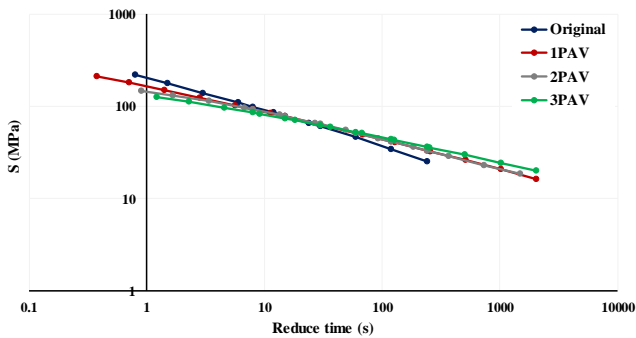
شکل ۴. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ سه مرتبه PAV در دمای -۶ درجه سانتی‌گراد

**Fig. 4.** Master curve of bitumen 40-50, 3<sup>rd</sup> PAV at -6°C



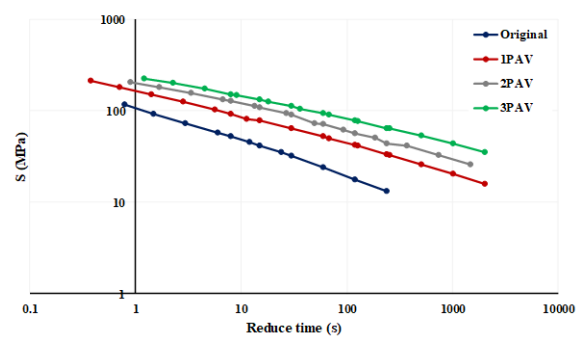
شکل ۳. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ دو مرتبه PAV در دمای -۶ درجه سانتی‌گراد

**Fig. 3.** Master curve of bitumen 40-50, 2<sup>nd</sup> PAV at -6°C



شکل ۶. منحنی جامع سختی برای مراتب پیرشدگی مختلف قیر ۴۰-۵۰

**Fig. 6.** Master curve of flexural creep stiffness for different aging levels of bitumen 40-50



شکل ۵. نمودار منحنی‌های جامع قیر ۴۰-۵۰ خالص و مراتب مختلف PAV شده

در دمای -۶ درجه سانتی‌گراد

**Fig. 5.** Master curves of bitumen 40-50 and different levels of PAV-aged bitumens at -6°C

مفهوم فرکانس زاویه‌ای کاهش یافته و استفاده از اعداد دلخواه به منظور جابه‌جایی افقی منحنی‌های دماهای بالاتر یا پایین‌تر از ۵۸ درجه سانتی‌گراد به منظور قرار گرفتن در راستای منحنی دمای مرجع، منحنی جامع مربوط به قیر ۴۰-۵۰ ایجاد و در شکل (۷) نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری از طولانی شدن متن مقاله از ارایه نتایج مشابه برای سایر نمونه‌های قیر خودداری شده است.

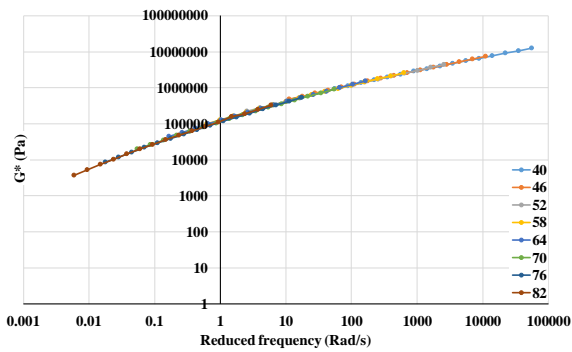
در ادامه تصاویر منحنی‌های زاویه فاز در برابر فرکانس زاویه‌ای کاهش یافته برای قیر ۴۰-۵۰ و مراتب پیرشده آن ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شده است در ادامه منحنی‌های مربوط به قیر ۴۰-۵۰ از آزمایش BBR ارائه شده است.

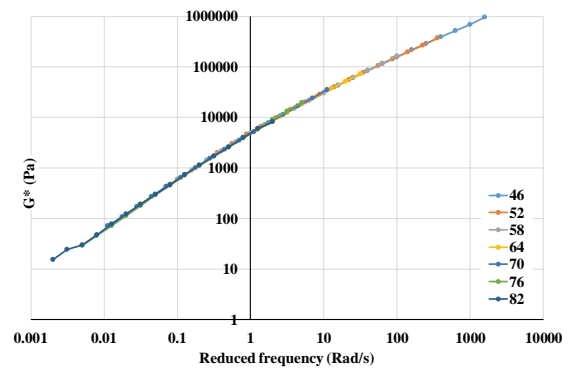
لازم به ذکر است در مورد قیر خالص، داده‌های آزمایش BBR در دمای صفر درجه سانتی‌گراد در دسترس وجود نداشته است. در شکل (۶) منحنی نهایی سختی-زمان برای قیر ۴۰-۵۰ ارائه شده است.

### ۲-۳- تحلیل نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

با استفاده از نتایج آزمایش DSR شامل مدول برشی مختلط ( $G^*$ ) و نیز زاویه فاز ( $\delta$ ) منحنی‌های جامع مربوطه در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد ترسیم شده است. در این قسمت با استفاده از



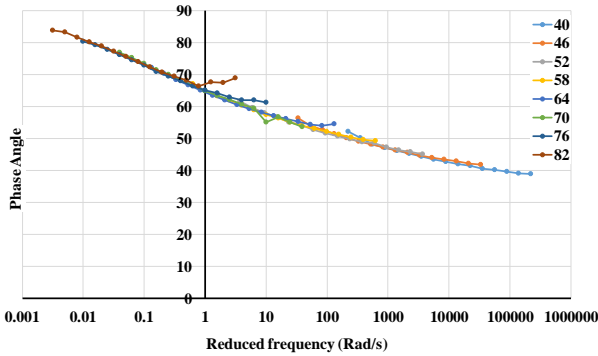
ب



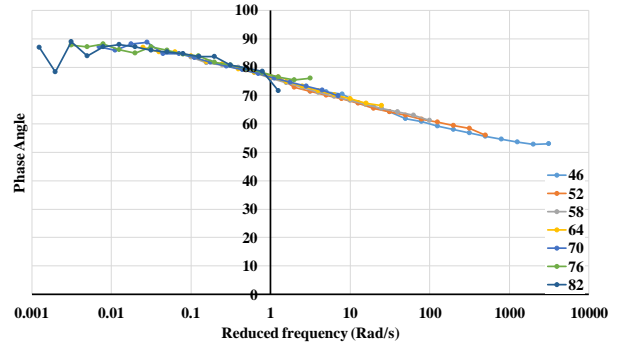
الف

شکل ۷. منحنی جامع مدول مختلط برشی در برابر فرکانس زاویه‌ای برای قیر ۴۰-۵۰؛ الف) RTFO، ب) ۳ مرتبه PAV

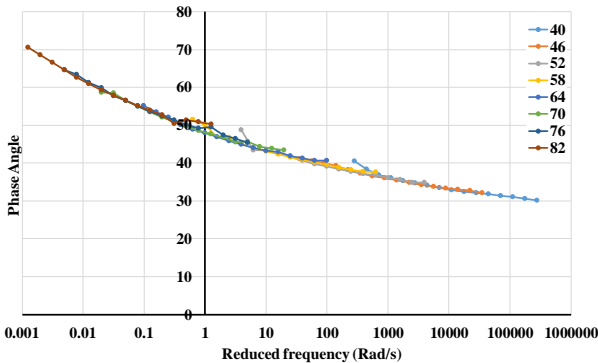
Fig. 7. Master curve of complex shear modulus versus angular frequency for bitumen 40-50; a) RTFO, b) 3 PAV



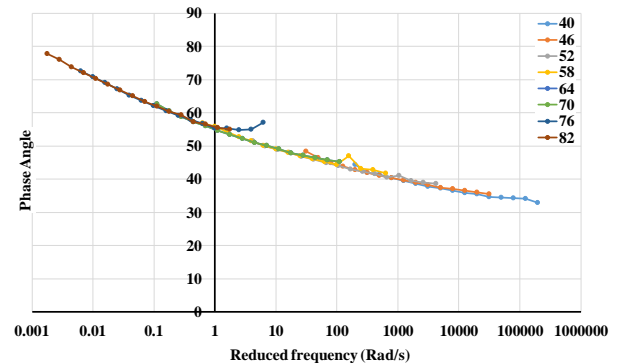
ب) قیر یک مرتبه PAV



الف) قیر خالص



د) قیر سه مرتبه PAV



ج) قیر دو مرتبه PAV

شکل ۸. منحنی‌های جامع زاویه فاز-فرکانس زاویه‌ای برای مراتب مختلف پیرشدگی قیر ۴۰-۵۰

Fig. 8. Master curve of phase angle versus angular frequency for different aging levels of bitumen 40-50

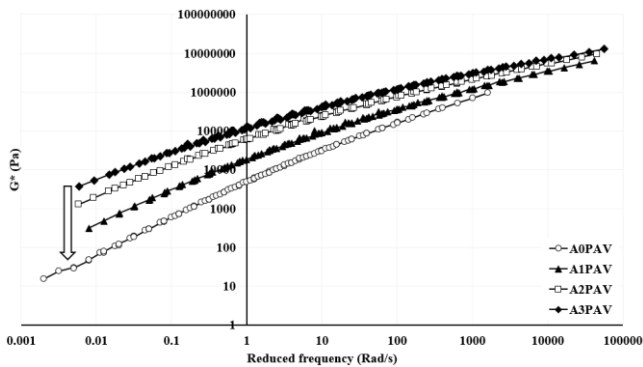
۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ و عدد دوم مرتبه پیرشدگی به روش PAV است.

همچنین مقادیر جابجایی قائم منحنی‌های جامع در جدول ۵ ارائه شده است.

### ۳-۳- تغییرات رده‌بندی عملکردی

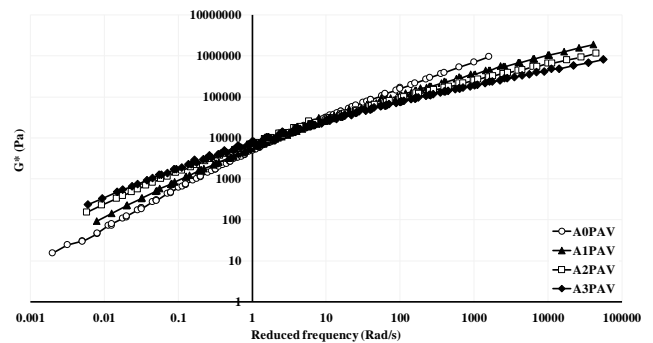
دستورالعمل سوپریپو به منظور طبقه‌بندی عملکردی قیرها در دمای پایین با استفاده از آزمایش BBR و در دمای بالا با استفاده از آزمایش DSR معیارهای معینی را ارائه کرده است. بر این اساس در تعیین رده‌بندی عملکردی قیر در دمای پایین سختی خمشی خزشی،  $S$ ، در ثانیه ۶۰ ام بارگذاری باید کمتر از ۳۰۰ مگاپاسکال

در ادامه با استفاده از منحنی‌های جامع ایجادشده در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد در بخش قبل و قرار دادن منحنی‌های مراتب مکرر پیرشدگی از یک نوع قیر درون یک نمودار می‌توان با جابه‌جایی قائم و استفاده از مفهوم مشابه با فرکانس زاویه‌ای کاهش یافته منحنی‌های جامع پیرشدگی را ایجاد کرد. در این صورت با استفاده از اعداد دلخواه به منظور جابه‌جایی عمودی منحنی‌های مراتب بالاتر پیرشدگی به منظور قرار گرفتن در راستای منحنی قیر RTFO، منحنی جامع سختی‌زمان برای مراتب مختلف پیرشدگی ایجاد می‌شود. روند این جابه‌جایی در شکل (۹) برای قیر با درجه نفوذ ۴۰-۵۰ نشان داده شده و در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای نهایی قیرهای دارای درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و ۱۰۰-۸۵ ارائه شده است. در شکل‌های (۹ الی ۱۱)، A تا B کد متناظر قیرهای



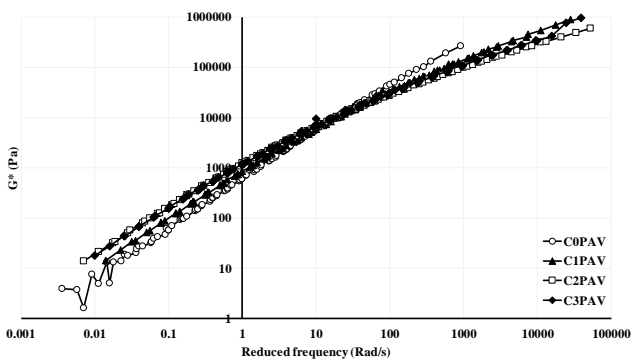
شکل ۹. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۴۰-۵۰ و روند جابه‌جایی قائم

Fig. 9. Master curve of aging for bitumen 40-50 and vertical shift trend



شکل ۱۰. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۶۰-۷۰

Fig. 10. Master curve of aging for bitumen 60-70



شکل ۱۱. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۸۵-۱۰۰

Fig. 11. Master curve of aging for bitumen 85-100

جدول ۵. ضرایب جابه‌جایی قائم منحنی‌های جامع برای ایجاد منحنی‌های جامع پیرشدگی

Table 5. Vertical shift factors of master curves at 58°C to create aging master curves

		Bitumen Type		
Times of PAV		40-50	60-70	85-100
Original		1.000	1.000	1.000
1PAV		-0.525	-0.625	-0.600
2PAV		-0.925	-0.925	-0.750
3PAV		-1.200	-1.075	-0.925

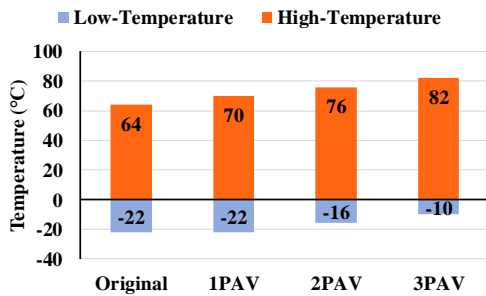
در ۱۰-۸۵ به دلیل انعطاف اولیه بالا سریعتر آغاز شده است. در دمای بالای عملکردی اما قیر ۶۰-۷۰ برخلاف قیرهای دیگر سه رده افزایش را در سه مرتبه پیرشدگی به روش PAV نمایش داده است.

### ۳-۴- همبستگی تغییرات شیمیایی و ویسکوالاستیکی

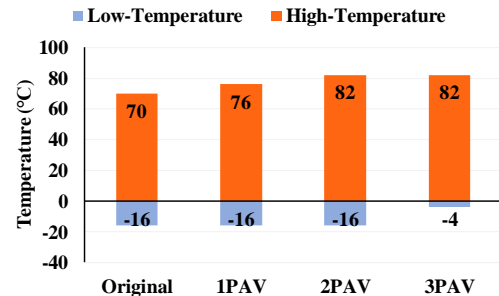
بررسی ارتباط میان رفتارهای مختلف قیر از جمله رفتار ویسکوالاستیک، فیزیکی و شیمیایی به منظور شناسایی بهتر این ماده و تغییراتش ضروری است. در این راستا نتایج مطالعه دادائی و همکاران [26]، نشان داده است که ارتباط خطی میان شاخص پیرشدگی محاسبه شده از طریق آنالیز طیفسنجی مادون قرمز و مقادیر ضرایب جابه‌جایی قائم منحنی جامع سختی خزشی-زمان بسیار معنادار بوده است. در این مطالعه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش رثومتر برش دینامیکی، مقادیر جابه‌جایی قائم منحنی مدول مختلط برشی در برابر فرکانس زاویه‌ای با مرجعیت قیرهای پیرنشده محاسبه و با استفاده از مقادیر شاخص پیرشدگی شیمیایی ارتباط پارامترهای دمای بالا نیز بررسی شده است.

در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از کمترین دمای روسازی باشد. همچنین مقدار نرخ خزش،  $m$ ، در ثانیه ۶۰ ام بارگذاری باید بزرگتر از ۰/۳ در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از کمترین دمای محیط خدمت‌دهی روسازی آسفالتی باشد. کنترل این معیارها منجر به کاهش احتمال ترک‌خوردگی در دمای پایین عملکردی می‌شود. به منظور رده‌بندی عملکرد قیر در دمای بالا با توجه به اینکه کلیه نمونه‌ها به روش PAV پیرشده‌اند، با استفاده از معیار مقایسه  $G^* \times \sin(\delta) \leq 5000 \text{ (kpa)}$  به تعیین حدود عملکردی قیر براساس خرابی خستگی پرداخته می‌شود.

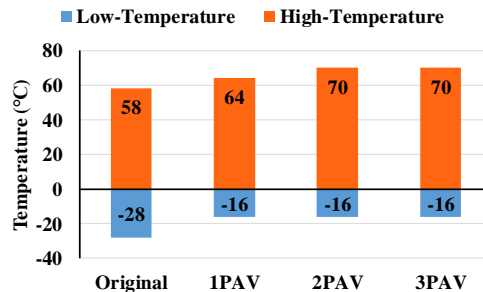
کنترل این معیار تضمین‌کننده استفاده از قیرهای منعطف‌تر در تغییر شکل‌های زیاد تحت بارگذاری محیط خدمت‌دهی است. شکل (۱۲)، نمایش بازه‌های دمایی عملکردی قیرهای با درجات نفوذ مختلف ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ را ارائه داده است. همانطور که مشخص است در هر سه نوع قیر، حداکثر دو رده افزایش رده در دمای پایین عملکردی رخ داده است. البته این روند تغییر در قیرهای مختلف متفاوت بوده است و روند تغییر برای قیر



ب



الف



ج

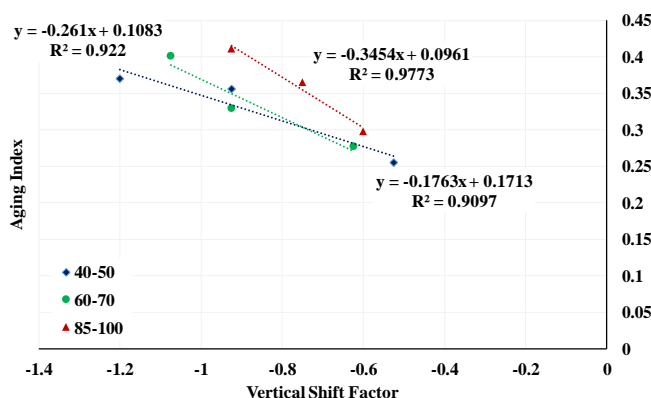
شکل ۱۲. تغییرات دمای بالا و پایین عملکردی قیر در مراتب مختلف پیرشدگی؛ الف) قیر ۴۰-۵۰، ب) قیر ۶۰-۷۰ و ج) قیر ۸۵-۱۰۰

Fig. 12. Changes of high and low performance temperature of bitumen in different times of aging; a) bitumen 40-50, b) bitumen 60-70 and c) bitumen 85-100

جدول ۶. مقادیر شاخص پیرشدگی حاصل از تحلیل شیمیایی با استفاده از نتایج آزمایش FTIR

Table 6. Aging index values obtained from chemical analysis using FTIR test results

Times of PAV	40-50	60-70	85-100
Original	0.132	0.114	0.153
1PAV	0.255	0.278	0.298
2PAV	0.356	0.330	0.365
3PAV	0.370	0.402	0.411



شکل ۱۳. همبستگی مقادیر جابه‌جایی قائم منحنی جامع مدول مختلط برشی در مقابل شاخص پیرشدگی

Fig. 13. Correlation of vertical shift factors of the complex shear modulus master curve versus aging index

برای قیر ۱۰۰-۸۵ بوده است و کندترین آن برای قیر ۵۰-۴۰ که مطابق با انتظار رخ داده است. هر سه قیر سه رده افزایش را تحت سه مرتبه PAV متحمل شده‌اند.

- در تغییرات دمای بالای عملکردی قیر ۷۰-۶۰ سه رده افزایش، و دو نوع دیگر دو رده افزایش دما را متحمل شده‌اند.
- بررسی تناسب میان ضرایب جابه‌جایی قائم منحنی جامع مدول مختلط برشی - فرکانس زاویه‌ای با مقادیر شاخص پیرشدگی حاصل از آزمایش آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) نشان داده است ارتباط پارامترهای ویسکوالاستیک دمای بالا با پارامترهای شیمیایی ارتباطی خطی با ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیش از ۰/۹ دارد.

#### قدردانی نویسندگان

نویسندگان از "شرکت نفت پاسارگاد" به سبب در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به آزمایش‌های قیر مورد استفاده در این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

#### تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

نتایج نشان داده شده در شکل (۱۳) نشان‌دهنده آن است که ارتباط قوی خطی میان شاخص پیرشدگی شیمیایی و مقادیر جابه‌جایی قائم منحنی مدول مختلط برشی و فرکانس زاویه‌ای نیز وجود دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

از آنجا که استفاده از روش‌های متداول برای شبیه‌سازی دوره بلندمدت پیرشدگی کافی نبوده است راهکارهای نوینی ارائه شده است که در این مطالعه از تکرار چرخه‌های شبیه‌سازی PAV استفاده شده است. در این مطالعه تأثیر استفاده مکرر از چرخه‌های فرآیند PAV بر ویژگی‌های مکانیکی دمای بالا و پایین قیرهای متداول مصرفی در کشور ایران (۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ذیل مهم‌ترین نتایج حاصل‌شده از این مطالعه به‌شمار می‌رود:

- چرخه‌های مکرر پیرشدگی به روش PAV نسبت به مرتبه اول آن دارای رفتار معناداری است و می‌توان با داده‌های بالاتر به پیش‌بینی پارامترهای این روند نیز دست یافت. براین اساس انجام مکرر PAV برای شبیه‌سازی بلندمدت ضرورتی ندارد و قابل معادل‌سازی است.
- سریع‌ترین تغییرات مربوط به رده‌بندی عملکردی دمای پایین

## سهم نویسندگان

همچنین مرور، بازیابی و ارزیابی روش‌شناسی و کیفیت مقاله توسط فریدون مقدس‌نژاد انجام شده است.

## منابع مالی

در نگارش این مقاله، از منابع مالی هیچ سازمانی استفاده نشده است.

## References

- [1] Ma, L., Varveri, A., Jing, R. and Erkens, S., 2021. Comprehensive review on the transport and reaction of oxygen and moisture towards coupled oxidative ageing and moisture damage of bitumen. *Construction and Building Materials*, 283, p.122632.
- [2] Eurobitume, A., 2011. The bitumen industry-A global perspective. Production, chemistry, use, specification and occupational exposure. *Asphalt Institute*, p.7.
- [3] RMTO., 2022. Iran's Road Maintenance and Transportation Organization (RMTO). Retrieved from <http://www.rmto.ir>.
- [4] Arabani, M. and Majd Rahimabadi, M., 2023. Investigating the effects of aging on moisture damage of hot mix asphalt containing Wetfix additive and granite and limestone aggregates. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), pp.23-38.
- [5] Siddiqui, M.N. and Ali, M.F., 1999. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. *Fuel*, 78(9), pp.1005-1015.
- [6] Ma, B., Hu, Y., Si, W., Wei, K. and Chang, X., 2020. Study on the temperature control effects of an epoxy resin composite thermoregulation agent on asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 257, p.119580.
- [7] Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Zhu, Z., Singhvi, P., Mohamed Ali, U., Sawalha, M., Espinoza Luque, A.F., Garcia Mainieri, J.J. and Zehr, T.G., 2019. Development of long-term aging protocol for implementation of the Illinois flexibility index test (I-FIT). *FHWA-ICT-19-009*.
- [8] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. and Kennedy, T.W., 1996. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.
- [9] Soenen, H., Lu, X. and Laukkanen, O.V., 2016. Oxidation of bitumen: Molecular characterization and influence on rheological properties. *Rheologica acta*, 55, pp.315-326.
- [10] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christiansen, D.W. and Bahia, H.U., 1994. Binder characterization and evaluation. Volume 1. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC*.
- [11] Migliori, F. and Corté, J.F., 1998. Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests. *Transportation research record*, 1638(1), pp.56-63.
- [12] Liu, H., Zhang, Z., Tian, Z. and Lu, C., 2022. Exploration for UV aging characteristics of asphalt binders based on response surface methodology: Insights from the UV aging influencing factors and their interactions. *Construction and Building Materials*, 347, p.128460.
- [13] Huang, S.C., Tia, M. and Ruth, B.E., 1996. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(3), pp.147-152.
- [14] Hofko, B., Maschauer, D., Steiner, D., Mirwald, J. and Grothe, H., 2020. Bitumen ageing—Impact of reactive oxygen species. *Case Studies in Construction Materials*, 13, p.e00390.
- [15] Xu, S., Huang, J., Tighe, S., Zhang, C., Ma, H., Jia, X. and Zhou, X., 2022. Aging evaluation of base and SBS modified bitumens under the coupling effect of multiple aging factors. *Construction and Building Materials*, 348, p.128670.
- [16] Braswell, E., Saleh, N.F., Elwardany, M., Yousefi Rad, F., Castorena, C., Underwood, B.S. and Kim, Y.R., 2021. Refinement of climate-, depth-, and time-based laboratory aging procedure for asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2675(2), pp.207-218.
- [17] Ma, J., Singhvi, P., Ozer, H., Al-Qadi, I.L. and Sharma, B.K., 2021. Brittleness progression for short- and long-term aged asphalt binders with various levels of recycled binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), pp.1399-1409.
- [18] Qian, Y., Guo, F., Leng, Z., Zhang, Y. and Yu, H., 2020. Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Hong Kong through laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 265, p.120651.
- [19] Singhvi, P., García Mainieri, J.J., Ozer, H., Sharma, B.K. and Al-Qadi, I.L., 2020. Effect of chemical composition of bio- and petroleum-based modifiers on asphalt binder rheology. *Applied Sciences*, 10(9), p.3249.
- [20] Jamal, M. and Giustozzi, F., 2022. Enhancing the asphalt binder's performance against oxidative ageing and solar radiations by incorporating rubber from



- waste tyres. *Construction and Building Materials*, 350, p.128803.
- [21] ASTM, D., 2008. Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). West Conshohocken, PA: ASTM.
- [22] Qiu, H., Tan, X., Shi, S. and Zhang, H., 2013. Influence of filler-bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive. *Journal of Modern Transportation*, 21, pp.40-46.
- [23] Aflaki, S. and Hajikarimi, P., 2012. Implementing viscoelastic rheological methods to evaluate low temperature performance of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 36, pp.110-118.
- [24] Brinson, H.F. and Brinson, L.C., 2008. Polymer engineering science and viscoelasticity. *An Introd.*, 99, p. 157.
- [25] Zhang, F., Wang, L., Li, C. and Xing, Y., 2020. Predict the phase angle master curve and study the viscoelastic properties of warm mix crumb rubber-modified asphalt mixture. *Materials*, 13(21), p.5051.
- [26] Dadaei, M.M., Moghadas Nejad, F. and Hajikarimi, P., 2023. Investigation of the effect of global warming on the bitumen performance grading of Iran. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(2), pp.17-32.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Dadaei, M.M., Hajikarimi, P., Rahi, M., Dastoori Razaz, M., Tahmasbi, B. and Moghadas Nejad, F., 2025. Investigation of the effect of long-term aging on the high-and low-temperature performance of bitumen. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.61-72.

DOI: 10.22034/25.3.6



## Selection of the Most Optimal Oxygen Capturing Compound in the Nitrate Removal Process for use in Permeable Reactive Bio Barriers

Mohammad Ali Hosseinian<sup>1</sup>, Nader Mokhtarani<sup>2\*</sup> , Hossein Ganjidoust<sup>3</sup>

1. Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Full Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

### Abstract

Mineral anions are one of the most important toxic substances harmful to humans and animals even in low concentrations. Nitrate ions are considered important surface and groundwater pollutants for their high solubility in water. Nitrate is converted to nitrite and N-nitroso in the human body through certain reactions. N-nitroso combinations are considered carcinogenic and the primary cause of methemoglobinemia diseases. The existing nitrate in water resources is not easily separated for it is highly soluble and therefore the methods usually used for this purpose are very costly. Various methods can be used to remove or reduce the concentration of nitrate. Reverse osmosis, electrodialysis, electrocoagulation, ion exchange and membrane processes are among the physico-chemical methods of nitrate purification. Among the types of nitrate purification methods, biological processes with relatively high efficiency, the possibility of complete removal of the pollutant and less harmful effects on the environment, are one of the most suitable options for the decomposition and removal of nitrate from water and groundwater. In a situation where the contaminated area is wide and it is not possible to pump water due to economic reasons or the large volume, treatment using in-situ methods will be a more suitable option. One of the types of in-situ biological treatment processes is the use of the permeable reactive bio-barrier (PRBB) method. PRBB is one of the novel and reliable methods used for in-situ groundwater remediation. A PRBB is an emplacement of reactive media in the sub-surface designed to intercept a contaminated plume, provide a flow path through the reactive media and transform the contaminant(s) into environmentally acceptable forms to attain remediation concentration goals down gradient of the barrier. PRBB can degrade nitrate at a high rate under anaerobic conditions. In this research, different concentrations of four chemical substances including ZVI, nZVI, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were used as Oxygen Capturing Compounds (OCC) in the removal of nitrate from polluted water in the PRBB process on a laboratory scale. Based on the obtained results, these substances affect the parameters of DO, pH, MLSS, turbidity, nitrate concentration, durability of DO, and ORP. After laboratory tests and taking into the opinion of experts, the qualitative effect of each parameter was calculated quantitatively and through the analytical hierarchy process (AHP), the best oxygen-capturing compound was selected. The results obtained from AHP (with an inconsistency ratio of 0.063), revealed that the priority of choosing OCC from three technical, economic, and environmental aspects is related to the concentrations of 750 mg/l ZVI, 240 mg/l Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 85 mg/l Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 550 mg/l nZVI respectively. The concentration of 750 mg/l ZVI (the best OCC) during the experiments was able to reduce the DO from 7 to 0.05 mg/l in approximately 500 minutes and within the ideal range of the denitrification process (DO<0.05 mg/l). In addition, after the durability of DO tests, it was found that this substance has maintained its deoxygenation properties for a longer period than other used compounds. Also, based on the results, the concentration of 750 mg/l ZVI had a positive effect on the increase of MLSS and removal of nitrate.

### Review History

Received: Jul 26, 2024

Revised: Oct 05, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

### Keywords

Analytical Hierarchy Process


Oxygen Capturing Compound, Nitrate

Permeable Reactive Bio Barrier

\* Corresponding Author Email: [mokhtarani@modares.ac.ir](mailto:mokhtarani@modares.ac.ir) - ORCID: 0000-0001-6121-019X



## انتخاب بهترین عامل گیرنده اکسیژن در فرآیند حذف نیترات به منظور استفاده در دیواره‌های بیولوژیکی فعال نفوذپذیر

محمد علی حسینیان سراجی لو<sup>۱</sup>، نادر مختارانی<sup>۲\*</sup> , حسین گنجی دوست<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

### کلمات کلیدی

تحلیل سلسله مراتبی

مواد گیرنده اکسیژن

نیترات

دیواره‌های بیولوژیکی نفوذپذیر

### چکیده

یکی از روش‌های حذف اکسیژن محلول از محیط آب به منظور انجام واکنش‌های دنیتریفیکاسیون استفاده از ترکیبات گیرنده اکسیژن (OCC) است. در این تحقیق تاثیر مقادیر مختلف چهار ماده  $nZVI$ ،  $ZVI$ ،  $Na_2S_2O_3$  و  $Na_2S_2O_5$  به عنوان OCC به منظور استفاده در حذف نیترات از آب آلوده در فرایند PRBB در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده، این مواد علاوه بر کاهش اکسیژن محلول، بر پارامترهایی چون pH محیط، جمعیت میکروبی، کدورت، ماندگاری DO، ORP و حتی حذف نیترات تاثیرگذار بوده و آثار مثبت و منفی از خود بر جای می‌گذارند. در این پژوهش پس از انجام آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن نظر متخصصین، میزان اثرگذاری کیفی هر یک از پارامترها به صورت کمی احصا و بهترین ماده OCC از طریق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انتخاب شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های پیمانه‌ای نشان داد که اولویت انتخاب OCC از سه جنبه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی به ترتیب مربوط به  $ZVI$ ،  $Na_2S_2O_3$ ،  $Na_2S_2O_5$  و  $nZVI$  می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل با استفاده از  $ZVI$  (بهترین OCC) به میزان  $750 \text{ mg}$  به ازای هر لیتر آب مورد آزمایش در مدت زمان تقریبی  $500$  دقیقه میزان DO آب از  $7$  به  $0.5$  میلی‌گرم در لیتر کاهش یافته و در محدوده ایده‌آل برای فرآیند دنیتریفیکاسیون قرار گرفت. پس از انجام واکنش‌های ماندگاری نیز مشخص شد، این ماده خاصیت اکسیژن زدایی خود را در مدت زمان طولانی تری در مقایسه با سایر ترکیبات مورد استفاده حفظ نموده است. همچنین در طی آزمایش‌ها pH محیط در محدوده مناسب برای انجام واکنش‌های دنیتریفیکاسیون ( $7 < \text{pH} < 8.5$ ) قرار داشت. براساس نتایج به دست آمده میزان  $ZVI$  مورد استفاده در افزایش جمعیت میکروبی و راندمان حذف نیترات نیز دارای تاثیر مثبت بود.

مهم‌ترین آلاینده‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی به شمار می‌رود [1, 2]. نیترات در غلظت‌های غیرمجاز باعث به وجود آمدن بیماری‌های مختلفی از جمله سرطان، سندروم آبی و بیماری متهموگلوبینمیا و اثر سوء آن بر جنین خواهد شد که ضرورت

### ۱- مقدمه

آنیون‌های معدنی از مهم‌ترین مواد سمی هستند که در غلظت‌های کم نیز برای انسان و حیوانات مضر می‌باشند [1]. از میان این آنیون‌ها، یون نیترات به علت حلالیت بالا در آب از

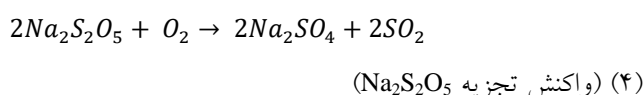
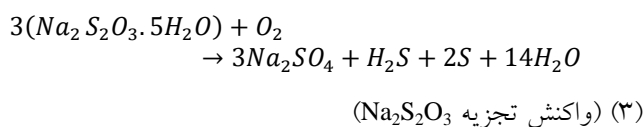
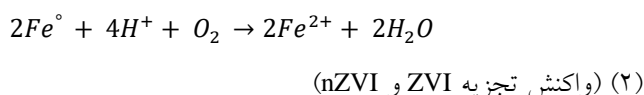
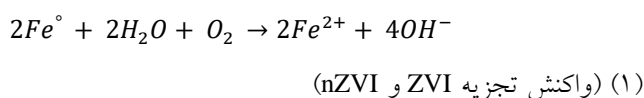
\* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - mokhtarani@modares.ac.ir :0000-0001-6121-019X

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، 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.

فعال و غیرفعال انجام می‌پذیرد. روش‌های فعال به روش‌هایی اطلاق می‌شود که گاز نیتروژن در محیط تزریق می‌شوند و معمولاً با دوره پایداری کوتاه مدت همراه می‌باشند. در روش‌های غیر فعال نیز با استفاده از ترکیبات گیرنده اکسیژن<sup>۱</sup> (OCC)، میزان اکسیژن موجود در محیط را کاهش می‌دهند [14]. مواد مختلفی پتانسیل قرارگیری در دسته OCC ها را دارند. آهن صفر ظرفیتی (ZVI)، نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی (nZVI)، سدیم تیوسولفات (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و سدیم متابی سولفیت (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) از پرکاربردترین مواد در حذف اکسیژن محلول در تحقیقات مختلف بوده‌اند [14]. این ترکیبات به ترتیب مطابق واکنش‌های (۱ تا ۴) در محیط آب باعث حذف اکسیژن محلول و کاهش DO می‌شوند [16-20]:



در تحقیقات بسیاری، چگونگی حذف اکسیژن محلول از محیط آب زیرزمینی مورد بررسی قرار است [14, 21, 22]. در این میان OCCها علاوه بر کاهش DO بر پارامترهایی همچون ORP، کدورت، جمعیت میکروبی، pH [23, 24] و در نهایت حذف نیترات [25, 26] نیز تاثیر گذار می‌باشند. همچنین حفظ خاصیت این مواد در طول زمان و ماندگاری آن، تاثیر جدی در فرآیند و راندمان حذف دارد. در کنار مجموع عوامل ذکر شده همواره بحث هزینه-فایده<sup>۲</sup> در کنار مسائل زیست محیطی و فنی مورد توجه بوده است [27].

روش‌های مختلفی برای انتخاب بهترین OCC از بین مواد ذکر شده وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (VIKOR، ANP، DEMATEL)، تکنیک

تصفیه آن را می‌طلبد. از روش‌های مختلفی، می‌توان برای حذف یا کاهش میزان نیترات بهره برد. اسمز معکوس، الکترودیالیز، انعقاد الکتریکی، تبادل یونی و فرآیندهای غشایی از جمله روش‌های فیزیکی-شیمیایی تصفیه نیترات می‌باشند. در میان انواع روش‌های تصفیه نیترات، فرآیندهای بیولوژیکی با راندمان نسبتاً بالا، امکان حذف کامل آلاینده و آثار سوء کمتر بر محیط، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌های تجزیه و حذف نیترات از بسترهای آبی می‌باشند [3-5].

در شرایطی که منطقه آلوده شده گسترده باشد و امکان پمپاژ آب به دلایل اقتصادی یا زیاد بودن حجم وجود نداشته باشد، تصفیه به کمک روش‌های درجا گزینه مناسب‌تری خواهد بود. یکی از انواع فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی درجا، استفاده از روش دیواره فعال نفوذپذیر است. در این روش، بستر نفوذپذیر از حرکت آلاینده‌ها و ورود آنها به پایین دست بستر جلوگیری می‌کند. در روش‌های زیست پالایی درجا ماده شیمیایی جدیدی وارد محیط نمی‌شود و از آنجایی که تصفیه به کمک تجزیه بیولوژیکی رخ می‌دهد سمیت محیط کاهش یافته و عمدتاً آلاینده جدیدی تولید نمی‌شود. به علاوه این روش‌ها صرفه اقتصادی داشته و در صورت استفاده از آن آلودگی در مناطق مجاور نشر نخواهد یافت [2, 6, 7].

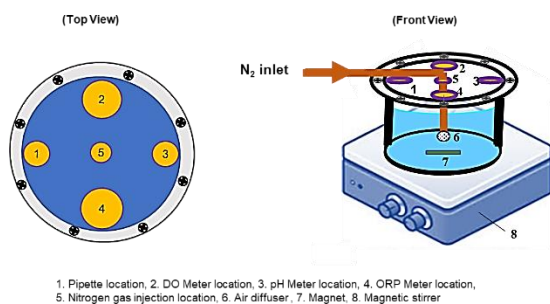
دیواره بیولوژیکی بی‌هوازی به منظور کلرزدایی از ترکیبات آلی، رسوب دهی فلزات و حذف نیترات مورد استفاده قرار می‌گیرند [8-11]. نیترات برای تجزیه پذیری بیولوژیکی بهتر و انجام واکنش‌های دنیتریفیکاسیون، به شرایط بی‌هوازی (انوکسیک) نیاز داشته و در شرایط هوازی به خوبی تجزیه نمی‌شود [12]. در مراجع گوناگون غلظت اکسیژن محلول برای انجام یک فرآیند بی‌هوازی (انوکسیک) کمتر از ۰/۸ mg/L ذکر شده است. این در حالی است که به منظور دستیابی به راندمان بالای تصفیه، غلظت‌های کمتر از ۰/۰۵ mg/L پیشنهاد شده و هر چه این میزان به صفر نزدیک باشد مناسب‌تر نیز خواهد شد [13-15].

به منظور حذف نیترات از آب زیرزمینی با استفاده از روش دیواره فعال نفوذ پذیر بیولوژیکی در مرحله اول باید میزان DO در آب به حد بسیار پایینی رسیده تا شرایط برای مرحله دوم که فرآیند دنیتریفیکاسیون در آن انجام خواهد شد، آماده شود [16].

حذف اکسیژن محلول از محیط آب به دو شیوه روش‌های

<sup>1</sup> Oxygen Capturing Compound

<sup>2</sup> Cost- Benefit



شکل ۱. شماتیک راکتور ناپیوسته مورد استفاده

Fig. 1. Schematic of used batch reactor

## ۲-۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش کار

به منظور انجام این تحقیق از یک راکتور ساخته شده از جنس پلکسی گلاس و با حجم موثر ۵۰۰ mL مطابق شکل (۱) استفاده شد. برای جلوگیری از ورود هوا به داخل سیستم در بالای آن صفحه‌ای از همان جنس به گونه‌ای که امکان باز و بسته شدن را دارد تعبیه شد. همچنین روی این صفحه چهار محل برای قرارگیری دستگاه‌های اندازه‌گیری و نمونه‌برداری و یک محل برای تزریق گاز نیتروژن به سیستم در مواقع مورد نیاز پیش بینی شد. در طول آزمایش‌ها پارامترهای pH، DO، ORP، MLSS، کدورت و غلظت نیترات مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا ۵۰۰ mL آب شهری به داخل راکتور منتقل و با تزریق گاز نیتروژن، اکسیژن محلول در آن به ۷ mg/l کاهش یافت. پس از آن میزان مواد گیرنده اکسیژن مورد نیاز بر اساس محاسبات استوکیومتری و همچنین آزمایش‌های اولیه تعیین شد. در ادامه در هر آزمایش مقادیر مختلف OCC به راکتور اضافه شده و در مدت زمان مشخص عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور برای ZVI و nZVI مقادیر ۱۵۰، ۳۵۰، ۵۵۰ و ۷۵۰، برای  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  مقادیر ۳۰، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ و برای  $\text{NaS}_2\text{O}_5$  مقادیر ۴۵، ۵۵، ۸۵ و ۱۱۰ (همگی به ازای هر لیتر آب در داخل راکتور) مورد آزمایش قرار گرفت.

تمامی آزمایش‌ها در دمای  $25^\circ\text{C}$  و با سرعت اختلاط ۱۵۰ rpm انجام شد. در حین انجام واکنش‌ها در فواصل زمانی مشخص پارامترهای DO، pH، غلظت نیترات و ORP اندازه‌گیری شد. در پایان هر آزمایش نیز کدورت آب با مقدار اولیه آن مورد مقایسه قرار گرفت.

شباهت به حل ایده آل (TOPSIS) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۴</sup> (AHP) اشاره نمود [27]. AHP روشی منعطف، قوی و ساده است که برای تصمیم‌گیری در شرایطی که معیارهای تصمیم‌گیری متضاد، انتخاب بین گزینه‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد، مورد استفاده قرار می‌گیرد [28]. مدل AHP شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها است. سطح اول هر درخت بیان‌کننده هدف تصمیم‌گیری و سطح آخر هر درخت نیز بیان‌کننده گزینه‌هایی است که با همدیگر مقایسه می‌شوند و برای انتخاب در رقابت با همدیگر هستند. سطوح میانی نیز نشان‌دهنده فاکتورهایی است که ملاک مقایسه گزینه‌ها هستند. مرحله اساسی در این تصمیم‌تعیین فاکتورهایی است که بر اساس آنها، گزینه‌های رقیب با همدیگر مقایسه می‌شوند. بنابراین منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با همدیگر تلفیق می‌سازد تا تصمیم بهینه براساس نظر متخصصین حاصل شود [29].

هدف اصلی از انجام این تحقیق، انتخاب بهترین OCC در فرآیند حذف نیترات از آب آلوده با استفاده از AHP به منظور استفاده در دیواره‌های بیولوژیکی فعال نفوذپذیر بوده است. بدین منظور چند ماده مختلف گیرنده اکسیژن انتخاب و اثر آنها بر کاهش میزان DO آب مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل میزان اکسیژن محلول، آثار این مواد از سه جنبه زیست محیطی، فنی و اقتصادی شامل پارامترهای pH، جمعیت میکروبی، کدورت، میزان غلظت نیترات، ماندگاری، ORP و همچنین قیمت مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت نیز با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، بهترین ماده گیرنده اکسیژن و مقدار بهینه آن انتخاب شد. لازم به توضیح است در سایر پژوهش‌های انجام شده در مورد عملکرد OCCها، صرفاً میزان کارایی آنها در حذف اکسیژن محلول، مورد توجه قرار گرفته، اما در این پژوهش، مواد یادشده از سایر جنبه‌ها و آثار منفی و مثبت هر یک نیز مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گرفت. در نهایت نیز با بکارگیری روش AHP، بهترین ماده گیرنده اکسیژن با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر انتخاب شد.

<sup>3</sup> Technique for Order Preference by Similarity Ideal Solution

<sup>4</sup> Analytical Hierarchy process

مواد شیمیایی نیز شامل  $KNO_3$  محصول شرکت Merck آلمان؛ OCCها شامل ZVI، nZVI ساخت شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان مشهد،  $Na_2S_2O_3$  و  $Na_2S_2O_5$  ساخت شرکت SRL کره جنوبی، در طول آزمایشها مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۳- روش انتخاب بهترین OCC

در این پژوهش به منظور انتخاب بهترین OCC از فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. در این فرآیند، ساخت سلسله مراتبی، مقایسه‌های زوجی و محاسبه وزن نسبی و ناسازگاری به ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا نمودار سلسله مراتبی در چهار سطح: هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها تشکیل شد. سپس مقایسه‌های زوجی بین آنها براساس ماتریس رابطه (۵) انجام و امتیاز مربوطه نسبت به یکدیگر تعیین شد. لازم به توضیح است در این رابطه  $a_{ij}$  ترجیح عنصر  $i$ ام نسبت به عنصر  $j$ ام می‌باشد. حال با مشخص بودن  $a_{ij}$ ها، وزن عناصر ( $w_i$ ) بدست می‌آید. در ادامه برای محاسبه وزن نسبی از روش میانگین هندسی استفاده شد. نرخ ناسازگاری (I.R.) نیز با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice v 11.0 محاسبه شد. همچنین امتیازدهی‌ها و مقایسه‌های زوجی براساس تکمیل پرسشنامه توسط متخصصین حوزه محیط‌زیست انجام پذیرفت.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = [a_{ij}], i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

شکل (۲-ا) مشاهده می‌شود، حضور مقادیر مختلف ZVI در داخل راکتور باعث کاهش میزان DO آب شده اما در غلظت‌های ۱۵۰ و ۳۵۰ mg/l، میزان کاهش به گونه‌ای نیست که بتوان از آن، در شرایط بی‌هوازی (انوکسیک) بهره برد و انجام واکنش‌های دنیتریفیکاسیون با اختلال مواجه خواهد شد. این در حالیست که در هنگام استفاده از غلظت ۵۵۰ mg/l میزان DO نسبت به دو غلظت قبلی سریع‌تر کاهش یافته و در مقادیر نزدیک به شرایط ایده‌آل برای واکنش‌های دنیتریفیکاسیون قرار گرفته است. همچنین غلظت ZVI ۷۵۰ mg/l توانسته است در مدت زمان تقریبی ۵۰۰ دقیقه میزان DO آب را از ۷ به ۰/۰۵ mg/l کاهش دهد. لذا از بین غلظت‌های آزمایش شده برای ZVI، غلظت ۷۵۰ mg/l

برای بررسی پایداری میزان اکسیژن محلول در طول زمان، تاثیر میزان این مواد در مدت زمان ۸ روز و در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعت مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به توضیح است که در این مرحله، لحظه شروع آزمایش‌ها، انتهای زمان بکار رفته برای آزمایش‌های مربوط به حذف DO در مراحل قبلی بوده است.

همچنین به منظور بررسی تاثیر این مواد بر جمعیت میکروبی، ۵۰۰ میلی‌لیتر از سوسپانسیون سازگار شده (لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری سازگار شده برای فرآیند دنیتریفیکاسیون) به همراه مواد گیرنده اکسیژن در غلظت‌های بیان شده در راکتور قرار گرفته و پس از ۲۴ ساعت اختلاط با دور rpm ۱۵۰، میزان افزایش MLSS اندازه‌گیری شد.

### ۲-۲- اندازه‌گیری پارامترها، مواد و تجهیزات مورد استفاده

برای اندازه‌گیری غلظت نیترات از روش ۸۰۳۹ دستگاه اسپکتروفتومتر DR/4000-HACH، جمعیت میکروبی به روش شمارش سلول زنده (Viable Cell Count) و پارامتر MLSS نیز مطابق روش (۲۵۴۰D) ذکر شده در کتاب استاندارد متد انجام پذیرفت (۲۰۱۲، APHA). به منظور اندازه‌گیری اکسیژن محلول و پتانسیل اکسایش و کاهش از DO/ORP متر مدل HQ30d شرکت Hach و از دستگاه کدورت سنج مدل 2100P شرکت Hach برای سنجش کدورت استفاده شد. همچنین pH محلول‌ها به وسیله الکتروود شیشه‌ای pH متر Metrohm 691 اندازه‌گیری شد. برای هم زدن محلول داخل راکتور نیز از هیتر استیرر آنالوگ آلفا مدل HS860 شرکت PKP استفاده شد.

### ۲-۴- آنالیز قیمت

بر مبنای استعلام انجام شده (سال ۲۰۲۱) قیمت مواد مورد استفاده در آزمایشات برای ZVI، nZVI،  $Na_2S_2O_3$  و  $Na_2S_2O_5$  به ترتیب برابر با ۷۴/۳، ۳۳۳/۳، ۲۱ و ۳۶ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم در نظر گرفته شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر اکسیژن محلول

نتایج حاصل از اثر OCCها بر DO در طی زمان برای هر چهار ماده تحت آزمایش شامل ZVI، nZVI،  $Na_2S_2O_3$  و  $Na_2S_2O_5$  در مقادیر مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در

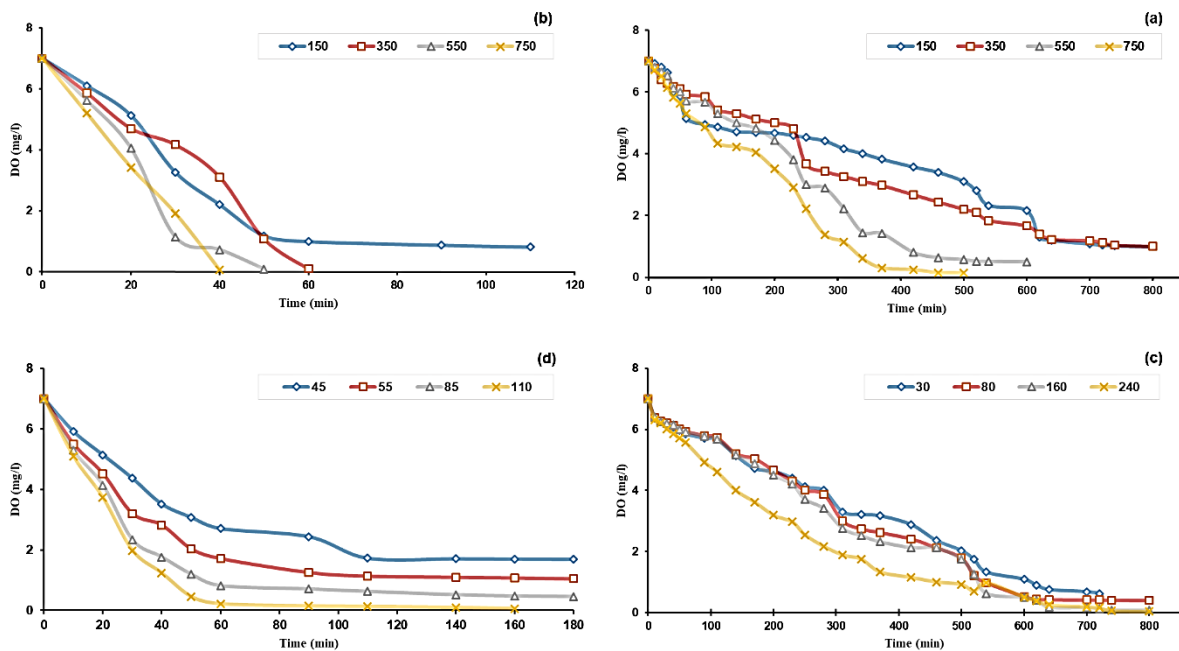
برای انجام واکنش‌های دنتیریفیکاسیون را فراهم نمایند. اما برای دو مقدار بعدی و بعد از گذشت زمان تقریبی ۱۵۰ دقیقه، میزان DO در محدوده مناسب قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل، غلظت‌های ۵۵۰ و ۷۵۰ mg/l ZVI، ۳۵۰ و ۵۵۰ mg/l nZVI، ۱۱۰ و ۸۵ mg/l  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و ۳۰، ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ mg/l  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  قادر به فراهم آوردن شرایط بی‌هوازی (انوکسیک) مشابه ZVI، عملکرد بهتری دارند. دلیل این امر زیادتر بودن سطح ویژه ذرات nZVI در مقایسه با ZVI می‌باشد. بطوریکه در یک جرم مشخص، سطح تماس ذرات nZVI نسبت به ZVI بسیار بیشتر بوده و با سرعت بیشتری نیز نسبت به حذف اکسیژن محلول اقدام نموده است. همچنین در بین مقادیر مختلف nZVI نیز به ترتیب غلظت ۷۵۰، ۵۵۰ و ۳۵۰ mg/l عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. کاهش میزان DO برای هر دو ماده ZVI و nZVI مطابق واکنش‌های (۱ و ۲) قابل تفسیر است.

### ۲-۳- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر pH

pH مورد نیاز برای عملکرد مناسب باکتری‌های حذف‌کننده نیترات در محدود ۷ الی ۸/۵ قرار دارد [16]. نتایج حاصل از استفاده از مواد مختلف گیرنده اکسیژن بر pH محیط در شکل (۳) آورده شده است. همانطور که در شکل (۳-ا) مشاهده می‌شود،

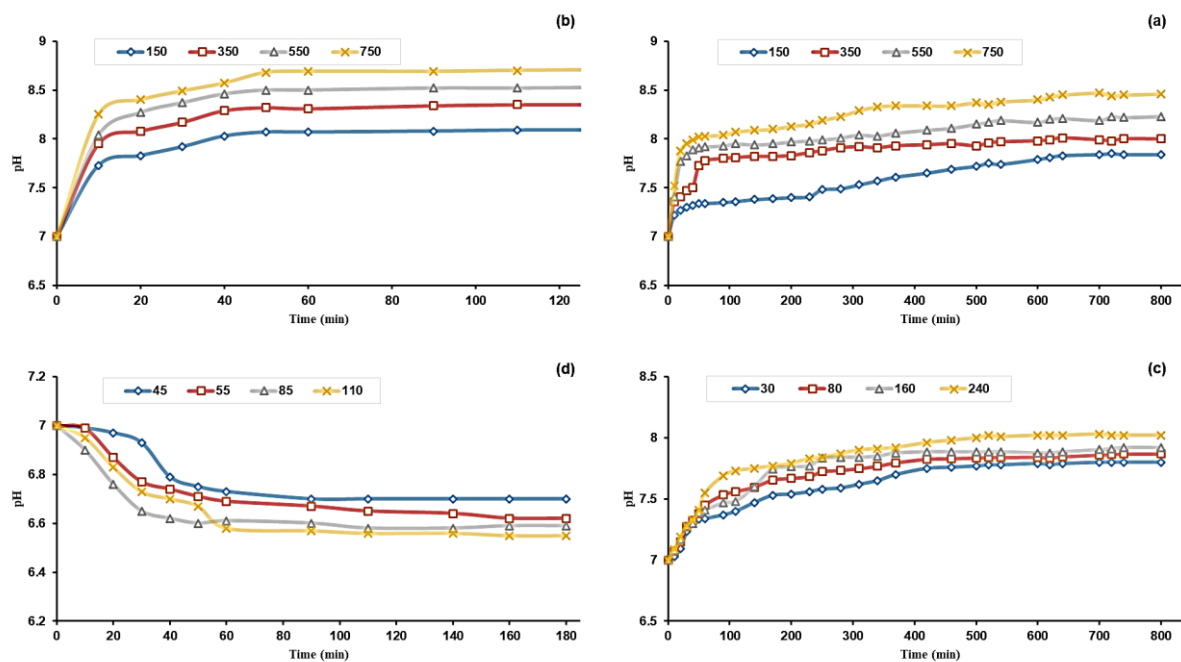
عملکرد بهتری را از خود به نمایش گذاشته است. براساس شکل (۲-ب) غلظت ۷۵۰ mg/l nZVI نیز در حذف اکسیژن محلول موفق‌تر عمل نموده و با سرعت بیشتری نسبت به سایر مقادیر، اکسیژن محلول را کاهش داده است. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها، مشخص است که تمامی غلظت‌های nZVI نسبت به غلظت‌های مشابه ZVI، عملکرد بهتری دارند. دلیل این امر زیادتر بودن سطح ویژه ذرات nZVI در مقایسه با ZVI می‌باشد. بطوریکه در یک جرم مشخص، سطح تماس ذرات nZVI نسبت به ZVI بسیار بیشتر بوده و با سرعت بیشتری نیز نسبت به حذف اکسیژن محلول اقدام نموده است. همچنین در بین مقادیر مختلف nZVI نیز به ترتیب غلظت ۷۵۰، ۵۵۰ و ۳۵۰ mg/l عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. کاهش میزان DO برای هر دو ماده ZVI و nZVI مطابق واکنش‌های (۱ و ۲) قابل تفسیر است.

حذف اکسیژن محلول توسط  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  با استفاده از واکنش (۳) قابل بیان می‌باشد. بر این اساس و با توجه به شکل (۲-ج)، میزان نهایی DO در هنگام استفاده از غلظت‌های ۱۶۰ و ۲۴۰ mg/l  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  زیر ۰/۱ mg/l (۰/۵ mg/l) بوده که شرایط ایده‌آل برای فرآیند دنتیریفیکاسیون را مهیا نموده است. همچنین با توجه به شکل (۲-د) دو غلظت ابتدایی  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  نتوانسته‌اند شرایط لازم



شکل ۲. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر اکسیژن محلول: (a) ZVI، (b) nZVI، (c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و (d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  بر حسب mg/l

Fig. 2. The effect of OCC on DO: a) ZVI, b) nZVI, c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  and d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  in mg/l



شکل ۳. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر pH: (a) ZVI، (b) nZVI، (c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و (d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  بر حسب mg/l

Fig. 3. The effect of OCC on pH: a) ZVI, b) nZVI, c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  and d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  in mg/l

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  نه تنها باعث افزایش pH محیط نشده بلکه با گذشت زمان، به دلیل تولید یونهای  $\text{H}^+$  مطابق واکنش (۴)، اسیدیته محلول را نیز افزایش داده است. بنابراین در صورت الزام به استفاده از این ترکیب به عنوان عامل گیرنده اکسیژن، تنظیم pH محیط به منظور حفظ عملکرد مناسب سیستم نیز باید مورد توجه قرار گیرد. با توجه به نتایج حاصل از این بخش، در هنگام استفاده از مقادیر ۳۵۰، ۵۵۰ و ۷۵۰ mg/l ZVI، ۱۵۰ و ۳۵۰ mg/l nZVI و هر چهار غلظت  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  پارامتر pH در محدوده مناسب ( $7 < \text{pH} < 8.5$ ) برای انجام واکنش‌های دینتریفیکاسیون قرار داشت. در حذف غلظت‌های بالای نیترات از آب، با استفاده از nZVI اصلاح‌شده با ذرات آهن و مس در یک سیستم PRBB و در مقیاس آزمایشگاهی، بهترین عملکرد سیستم، در pH محدوده خنثی گزارش شده است [25].

### ۳-۳- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر میزان جمعیت میکروبی

میزان اثرگذاری هر یک از OCC‌های مورد استفاده بر جمعیت میکروبی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، ZVI و nZVI در میزان افزایش جمعیت میکروبی تاثیر مثبت داشته که این امر به دلیل وجود آهن و رشد میکروارگانیسم‌ها در طول آزمایش بوده است. همچنین  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$

برای هر چهار مقدار ZVI مورد آزمایش، میزان pH محیط در ابتدا با شیب زیادی افزایش یافته و سپس تثبیت شده است. افزایش pH در ساعات اولیه فرایند را می‌توان به تولید یونهای OH<sup>-</sup> در طول واکنش‌ها (با توجه به روابط (۱) و (۲) مرتبط دانست. در این فرآیند در ابتدا، ذرات ZVI با مولکول‌های آب واکنش داده و یونهای OH<sup>-</sup> تولید می‌شود. پس از گذشت مدت زمان تقریبی ۶۵۰ دقیقه از شدت این واکنش‌ها کاسته شده و تغییرات pH نیز تقریباً ثابت باقی خواهد ماند. در خصوص استفاده از nZVI نیز مانند آزمایش‌های مربوط به ZVI در تمامی مقادیر با گذشت زمان، pH با افزایش همراه بوده و پس از مدت زمان ۵۰ دقیقه تقریباً ثابت باقی مانده است. نتیجه حاصل از تاثیر مقادیر مختلف  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  بر pH محلول در طی زمان در شکل (۳-۳) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، pH در کلیه آزمایش‌ها پس از یک افزایش جزئی در مدت زمان ۵۲۰ دقیقه، در محدوده مناسب برای انجام واکنش‌های دینتریفیکاسیون قرار دارد. دلیل تغییر pH محلول در اثر افزودن  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  در آزمایشات مختلف با استفاده از واکنش (۳) قابل توجیه است.

تاثیر استفاده از  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  به عنوان عامل حذف اکسیژن بر pH محلول نیز در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برخلاف سایر مواد گیرنده اکسیژن مورد استفاده،



### ۳-۴- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر ایجاد کدورت

کدورت نیز به عنوان آلاینده ثانویه در فرآیند حذف نیترات با استفاده از روش PRBB ممکن است عوارض نامطلوبی بر عملکرد سیستم بیولوژیکی دیواره داشته و رنگ، بو و طعم آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار دهد [33]. نتایج حاصل از اثر مواد گیرنده اکسیژن مورد استفاده بر ایجاد کدورت در هر یک از آزمایش‌ها در شکل (۵) آورده شده است. همچنانکه از نتایج بر می‌آید، برای هیچ کدام از غلظت‌های دو ماده ZVI و nZVI، کدورت در محدوده مجاز قرار نداشته اما برای دو ماده  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  در همه مقادیر، میزان کدورت در محدوده مجاز قرار داشته است. دلیل افزایش کدورت در هنگام استفاده از غلظت‌های مختلف دو ماده ZVI و nZVI، آزادسازی یون‌های  $\text{Fe}^{2+}$  در حین فرآیند براساس واکنش‌های شماره (۱ و ۲) می‌باشد. بر این اساس هر چه غلظت این دو ماده بیشتر شود، میزان آزادسازی یون‌های  $\text{Fe}^{2+}$  نیز بیشتر شده که کدورت بیشتری ایجاد خواهد کرد. در فرآیند حذف نیترات از آب آشامیدنی توسط انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودهای آهنی، افزایش کدورت ناشی از آزادسازی یون‌های  $\text{Fe}^{2+}$  گزارش شده است [34, 35].

### ۳-۵- ماندگاری اکسیژن محلول

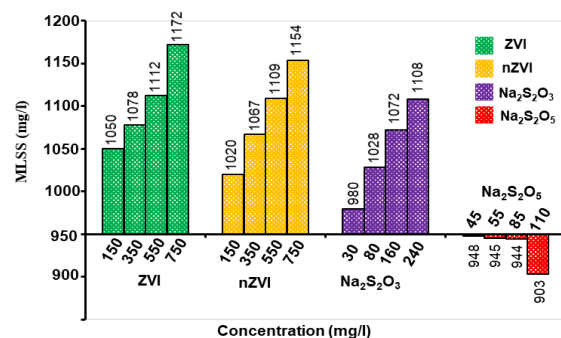
با توجه به اینکه زمان مورد نیاز برای تجزیه نیترات در دیواره‌های بیولوژیکی ۸ روز گزارش شده [16]، در تحقیق حاضر نیز به منظور ارزیابی میزان ماندگاری اثر مواد OCC در تداوم کاهش اکسیژن محلول، میزان DO در یک بازه زمانی ۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. از نتایج بدست آمده (نمودارها نمایش داده نشده است). در این بخش می‌توان نتیجه گرفت با وجود اینکه تمامی مواد مورد استفاده قادر به حذف اکسیژن محلول و تثبیت آن در بازه زمانی انجام آزمایش‌ها بوده‌اند، اما تنها در هنگام استفاده از غلظت‌های بالای آنها شرایط ایده‌آل برای حذف بیولوژیکی نیترات فراهم شده است.

### ۳-۶- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر پتانسیل اکسیداسیون و احیاء

میکروارگانسیم‌ها، نسبت به میزان پتانسیل اکسیداسیون و احیاء در محیط‌های مختلف، عکس‌العمل‌های متفاوتی از خود نشان خواهند داد. هر چه میزان ORP کاهش یابد، محیط از حالت هوازی به سمت بی‌هوازی (انوکسیک) شدن پیش خواهد رفت. در

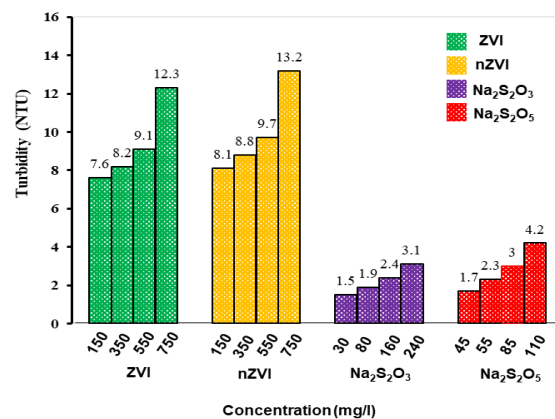
به دلیل تولید ترکیبات اسیدی باعث کاهش جمعیت میکروبی شده است. میزان MLSS شروع آزمایش‌ها برابر با  $950 \text{ mg/l}$  بود که به عنوان نمونه شاهد در آزمایش‌ها بکار رفت و سنجش تغییرات نمونه‌های آزمایش شده و تغییرات آنها براساس نمونه شاهد سنجش شد.

با توجه به نتایج این بخش از آزمایش‌ها، به ترتیب مقادیر  $750 \text{ mg/l}$  ZVI،  $750 \text{ mg/l}$  nZVI و  $550 \text{ mg/l}$  ZVI در افزایش جمعیت میکروبی موفق‌تر عمل نموده‌اند. لازم به توضیح است افزایش جمعیت میکروبی سازگار شده، رابطه مستقیمی با افزایش راندمان حذف آلاینده در PRBBها دارد [13]. پس در تحقیقات بسیاری، اثر افزایش مواد مختلف بر تغییرات جمعیت میکروبی بررسی شده است. در حذف PCE در یک ستون بی‌هوازی در حضور ZVI افزایش حدود دو برابری (بیش از ۹۹ درصد) جمعیت میکروبی گزارش شده است [32].



شکل ۴. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر میزان جمعیت میکروبی

Fig. 4. The effect of OCC on MLSS

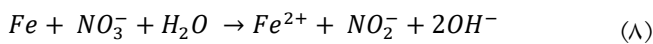
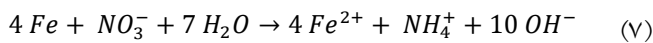
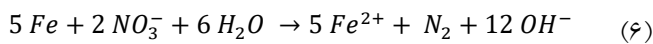


شکل ۵. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر میزان کدورت

Fig. 5. The effect of OCC on Turbidity

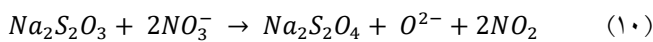
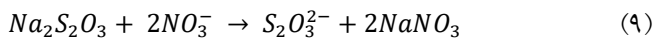
### ۳-۷- اثر مواد گیرنده اکسیژن بر حذف نیترات

نتایج حاصل از حذف نیترات توسط OCCهای مورد استفاده در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین درصد حذف مربوط به nZVI و ZVI و کمترین آن مربوط به  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  بوده است. روابط (۶ تا ۸) واکنش‌های احتمالی نیترات با ZVI و nZVI را تشریح می‌کند [38-41]:

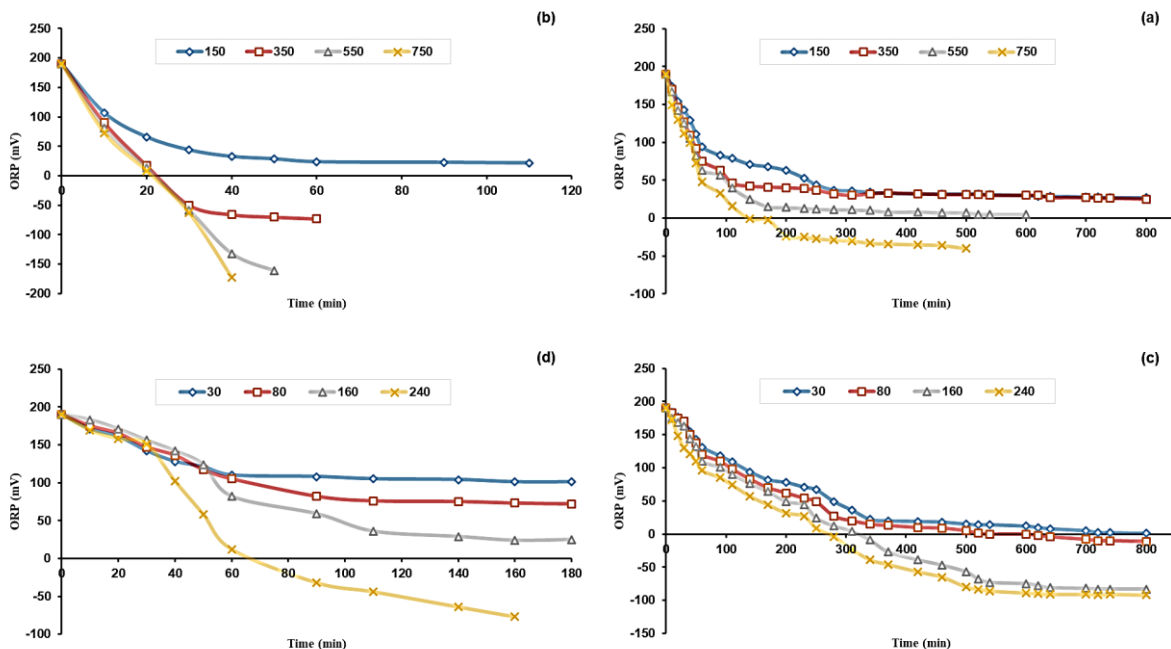


مطابق روابط (۶ تا ۸) در اثر افزودن آهن صفر ظرفیتی به محیط، نیترات به ترتیب به گاز نیتروژن، یون آمونیوم و یون نیتريت تبدیل و از محیط خارج می‌شود. در واقع در واکنش‌های فوق، احیای نیترات اتفاق افتاده است.

معادله (۹ و ۱۰) نیز واکنش‌های احتمالی نیترات با  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  را نشان می‌دهد [42, 43]:



ORPهای بالای صفر میلی ولت، محیط در حالت هوازی و در بازه بین صفر تا  $-50$  میلی ولت شرایط آنوکسیک و در بازه  $-50$  میلی ولت به پایین شرایط بی هوازی حاکم خواهد شد. بر اساس نتایج تحقیقات مشابه برای رشد میکروارگانیسم‌ها و انجام عمل دنیتریفیکاسیون، پتانسیل اکسیداسیون و احیا در محدوده  $-50$  میلی ولت تا  $-250$  میلی ولت، مورد نیاز می‌باشد [36]. بررسی نتایج حاصل از نمودارهای شکل (۶) برای هر چهار OCC مورد استفاده نشان می‌دهد که غلظت‌های  $750 \text{ mg/l}$  ZVI،  $350 \text{ mg/l}$  و  $550 \text{ mg/l}$  nZVI، تمامی غلظت‌های  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و غلظت‌های  $85$  و  $110 \text{ mg/l}$   $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  توانایی کاهش ORP به محدوده ایده‌آل برای انجام واکنش‌های بی‌هوازی (آنوکسیک) حذف نیترات را دارند. لازم به توضیح است با کاهش DO (مطابق آنچه در بند قبل بدان اشاره شد) به مرور میزان پتانسیل اکسیداسیون و احیا کاهش یافته و در نهایت شرایط بی‌هوازی (آنوکسیک) بر سیستم حاکم می‌شود. ارتباط میزان ORP با مقادیر pH و DO و همچنین شرایط ایده‌آل فرآیند دنیتریفیکاسیون توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [37].

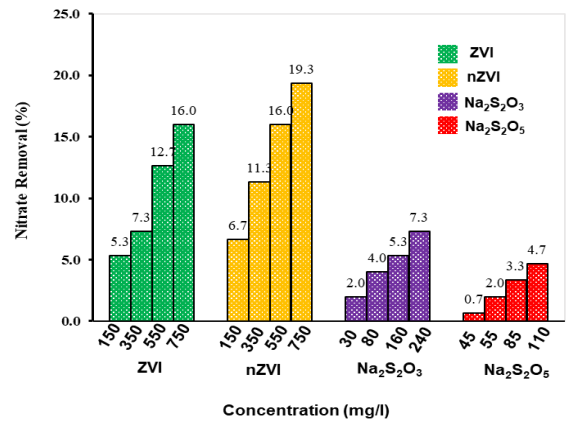


شکل ۶. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر ORP: (a) ZVI، (b) nZVI، (c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و (d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  بر حسب  $\text{mg/l}$

Fig. 6. The effect of OCC on ORP: a) ZVI, b) nZVI, c)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  and d)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  in  $\text{mg/l}$

بهترین ماده گیرنده اکسیژن در شرایط انجام این تحقیق می‌باشد. همان‌گونه مشاهده می‌شود، به منظور انتخاب بهترین ماده گیرنده اکسیژن، ۴ سطح شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها تعریف شده است. در سطح تعیین هدف، انتخاب بهترین ماده گیرنده اکسیژن و در سطح معیارها سه معیار فنی، اقتصادی و زیست محیطی قرار گرفته است. با توجه به معیارها، زیرمعیارهایی شامل میزان DO، pH، میزان کدورت، میزان پتانسیل اکسایش و کاهش، MLSS، غلظت نیترات، قیمت مواد و میزان ماندگاری اکسیژن محلول قرار دارد. همچنین مقادیر مختلف ZVI، nZVI،  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  در سطح ۴ قرار گرفته که از بین آنها بهترین ماده گیرنده اکسیژن انتخاب می‌شود. محدودیت اصلی در انتخاب گزینه‌ها، توانایی آنها در حذف DO و قرارگیری در ناحیه ایده‌آل واکنش‌های دنیتریفیکاسیون می‌باشد. در ادامه ماتریس ارجحیت نسبی معیارهای کلی شامل معیارهای زیست محیطی، اقتصادی و فنی و زیرمعیارهای هر کدام از آنها تشکیل و وزن نسبی هر یک محاسبه شد که نتایج مربوطه بر روی شکل (۸) نشان داده شده است.

پس از تشکیل ماتریس‌های ارجحیت نسبی هر یک از گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارها، محاسبات مربوط به وزن نسبی هر یک از گزینه‌ها توسط نرم‌افزار Expert Choice v 11.0 انجام شد. رابطه (۱۱)، ماتریس وزن نسبی محاسبه شده هر یک از گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارها را نشان می‌دهد. پس از محاسبه وزن نسبی هر یک از گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارها و همچنین مشخص شدن میزان اهمیت نسبی هر یک از زیرمعیارها نسبت به پارامترها، وزن کلی گزینه‌ها با توجه به اوزان نسبی به دست آمده برای معیارهای سه‌گانه محاسبه و نتایج حاصل در ماتریس (۱۲) ارائه شده است.



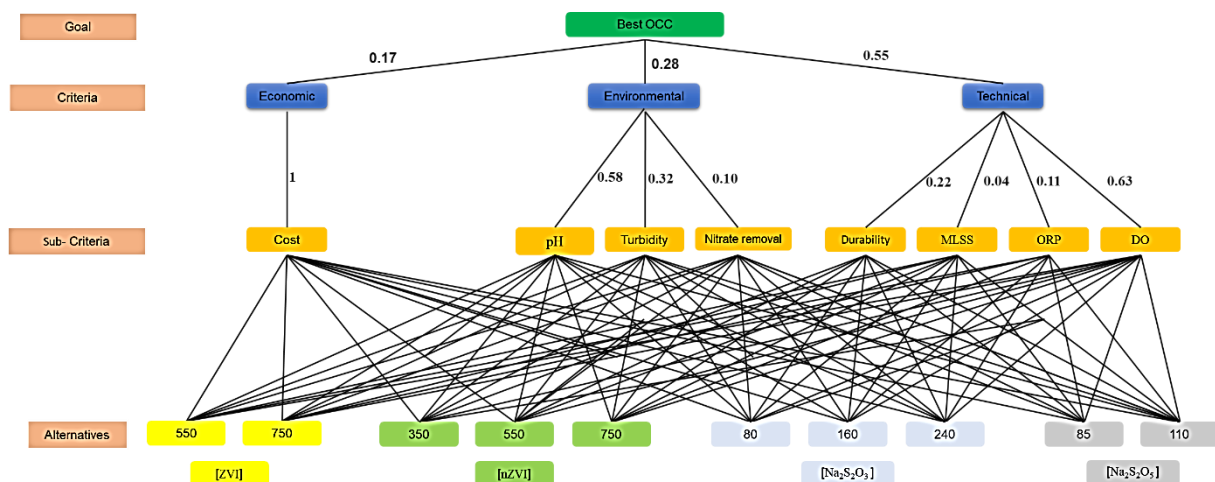
شکل ۷. اثر مواد گیرنده اکسیژن بر میزان غلظت نیترات

Fig. 7. The effect of OCC on Nitrate Removal

مطابق این روابط در ابتدا  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  با نیترات واکنش داده و سدیم نیترات و یون تیوسولفات تشکیل می‌شود. در ادامه نیز نیترات به نیتريت تبدیل شده و از محیط حذف می‌شود. از آنجایی که شرایط خاصی برای حاکم شدن هر یک از این دو واکنش مورد نیاز است پس حذف نیترات نسبت به زمانی که از ZVI و nZVI به عنوان عامل گیرنده اکسیژن استفاده شده (روابط ۶ تا ۸) کمتر خواهد بود. برای  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  با نیترات نیز واکنش خاصی در محلول وجود نداشته و حذف نیترات در این خصوص را می‌توان به جذب جزئی آن توسط بستر و یا خطاهای ناشی از آزمایش‌ها مرتبط دانست. در حذف نیترات از آب زیرزمینی در یک سیستم PRBB دو لایه، کاهش ۱۵ درصدی نیترات در لایه اول گزارش شده که با نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر هماهنگی دارد [16].

### ۳-۸- انتخاب ماده گیرنده اکسیژن با استفاده از AHP

شکل (۸) نشان دهنده ساختار سلسله مراتبی برای انتخاب



شکل ۸. ساختار سلسله مراتبی تعیین بهترین ماده گیرنده اکسیژن

Fig. 8. Hierarchical structure to determine the best OCC

$$W_4 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.02 & 0.13 & 0.12 & 0.11 & 0.03 & 0.10 & 0.06 \\ 0.06 & 0.07 & 0.13 & 0.11 & 0.16 & 0.11 & 0.10 & 0.04 \\ 0.08 & 0.08 & 0.11 & 0.02 & 0.11 & 0.03 & 0.10 & 0.04 \\ 0.09 & 0.26 & 0.12 & 0.05 & 0.17 & 0.03 & 0.06 & 0.02 \\ 0.15 & 0.26 & 0.12 & 0.02 & 0.29 & 0.01 & 0.04 & 0.01 \\ 0.02 & 0.03 & 0.11 & 0.27 & 0.03 & 0.24 & 0.20 & 0.29 \\ 0.14 & 0.08 & 0.11 & 0.04 & 0.03 & 0.18 & 0.18 & 0.14 \\ 0.20 & 0.10 & 0.11 & 0.04 & 0.05 & 0.14 & 0.18 & 0.10 \\ 0.05 & 0.02 & 0.03 & 0.29 & 0.03 & 0.13 & 0.02 & 0.18 \\ 0.20 & 0.08 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.10 & 0.02 & 0.13 \end{bmatrix}$$

(۱۱)

$$W_5 = [0.0591180 \quad 0.1576430 \quad 0.100889 \quad 0.109989 \quad 0.077892 \quad 0.078739 \quad 0.097421 \quad 0.130081 \quad 0.1144991 \quad 0.0737]$$

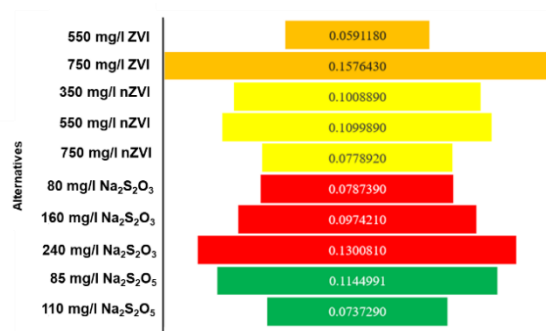
پارامترها به صورت کمی احصا و از طریق AHP، بهترین ماده OCC به منظور استفاده در فرآیند حذف نیترات در دیواره‌های بیولوژیکی فعال نفوذپذیر انتخاب شد. بر این اساس، غلظت ۷۵۰ mg/l ZVI به عنوان بهترین OCC و سپس مقادیر ۲۴۰ میلی‌گرم بر لیتر  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ، ۸۵ میلی‌گرم بر لیتر  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  و در نهایت ۵۵۰ میلی‌گرم بر لیتر nZVI که به ترتیب بهترین عملکرد را از سه جنبه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی داشتند به عنوان اولویت‌های بعدی انتخاب شدند. غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ZVI (بهترین OCC) در طی آزمایش‌ها توانست، در مدت زمان تقریبی ۵۰۰ دقیقه میزان DO آب را از ۷ به ۰/۰۵ mg/l کاهش داده و در محدوده ایده‌آل برای انجام فرآیند دینتریفیکاسیون ( $\text{DO} < 0.05 \text{ mg/l}$ ) قرار دهد. پس از انجام آزمایش‌های تکمیلی نیز مشخص شد این ماده ضمن حفظ خاصیت اکسیژن زدایی در مدت زمان طولانی‌تر، قادر به تامین pH مناسب برای انجام واکنش‌های دینتریفیکاسیون در محدوده  $7 < \text{pH} < 8.5$  می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده اگرچه غلظت ۷۵۰ mg/l ZVI باعث افزایش کدورت محیط می‌شود اما در افزایش جمعیت میکروبی و حذف نیترات دارای تاثیر مثبت است.

#### قدردانی نویسنده‌گان

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس و در آزمایشگاه محیط زیست دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست این دانشگاه انجام پذیرفته است. بدینوسیله از دانشگاه تربیت مدرس به جهت در اختیار قرار دادن امکانات اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

#### تعارض منافع

برای نویسندگان این پژوهش تعارض منافی وجود ندارد.



شکل ۹. وزن نهایی گزینه‌های پیشنهادی برای انتخاب گزینه

Fig. 9. Final weight of the alternatives for choosing the best OCC

در ادامه نتایج به دست آمده از محاسبات (توسط نرم افزار Expert Choice v 11.0)، از لحاظ ناسازگاری مورد ارزیابی قرار گرفته که همه مقادیر در محدوده مجاز و زیر عدد ۰/۱ (۰/۰۶۳) قرار داشتند. در نهایت نیز وزن نهایی گزینه‌ها برای انتخاب بهترین ماده گیرنده اکسیژن محاسبه شد که نتایج مربوطه در شکل (۹) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ZVI با غلظت ۷۵۰ mg/l به عنوان بهترین OCC از سه جنبه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در اولویت می‌باشد. پس از آن نیز به ترتیب مقادیر ۲۴۰ mg/l  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ، ۸۵ mg/l  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  و ۵۵۰ mg/l nZVI در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

#### ۴- نتیجه گیری

براساس نتایج حاصل چهار ماده ZVI، nZVI،  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  و  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  که به عنوان OCC مورد آزمایش قرار گرفتند، بر پارامترهای DO، pH، جمعیت میکروبی، کدورت، میزان حذف نیترات، ماندگاری اکسیژن محلول و ORP تاثیرگذار بوده و آثار مثبت و منفی از خود بر جای می‌گذارند. پس از انجام آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن نظر متخصصین، میزان اثرگذاری کیفی هر یک از

سهم هر یک از نویسندگان برابر است..

در انجام این پژوهش از حمایت‌های مالی خارج از دانشگاه استفاده نشده است.

## References

- Ganesan, P., Kamaraj, R. and Vasudevan, S., 2013. Application of isotherm, kinetic and thermodynamic models for the adsorption of nitrate ions on graphene from aqueous solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(5), pp.808-814.
- Kassaei, M.Z., Motamedi, E., Mikhak, A. and Rahnemaie, R., 2011. Nitrate removal from water using iron nanoparticles produced by arc discharge vs. reduction. *Chemical Engineering Journal*, 166(2), pp.490-495.
- Zendehbad, M., et al., Nitrate in groundwater and agricultural products: intake and risk assessment in northeastern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. 29(52): p. 78603-78619.
- Darvishmotevalli, M., Moradnia, M., Noorisephr, M., Fatehizadeh, A., Fadaei, S., Mohammadi, H., Salari, M., Jamali, H.A. and Daniali, S.S., 2019. Evaluation of carcinogenic risks related to nitrate exposure in drinking water in Iran. *MethodsX*, 6, pp.1716-1727.
- World Health Organization, 2003. Nitrate and nitrite in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. In *Nitrate and nitrite in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*.
- Girma, G., 2015. Microbial bioremediation of some heavy metals in soils: an updated review. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, G. Microbiology*, 7(1), pp.29-45.
- Asha, L.P. and Sandeep, R.S., 2013. Review on bioremediation-potential tool for removing environmental pollution. *International Journal of Basic and Applied Chemical Sciences*, 3(3), pp.21-33.
- Aquarehab, 2013. Biobarrier: Generic guideline.
- Nitrate, D.E.S., 2006. *Nitrite: Health Information Summary; Environmental Fact Sheet. New Hampshire Department of Environmental Services* (Vol. 468). ARD-EHP-16.
- Scherer, M.M., Richter, S. and Valentine, R.L., 2000. Chemistry and Microbiology of. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(3), pp.363-411.
- Wilson, R.D., Mackay, D.M. and Scow, K.M., 2002. In situ MTBE biodegradation supported by diffusive oxygen release. *Environmental Science & Technology*, 36(2), pp.190-199.
- Careghini, A., Saponaro, S. and Sezenna, E., 2013. Biobarriers for groundwater treatment: a review. *Water science and technology*, 67(3), pp.453-468.
- Freidman, B.L., Speirs, L.B., Churchill, J., Gras, S.L., Tucci, J., Snape, I., Stevens, G.W. and Mumford, K.A., 2017. Biofilm communities and biodegradation within permeable reactive barriers at fuel spill sites in Antarctica. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 125, pp.45-53.
- Kwon, K., Shim, H., Bae, W., Oh, J. and Bae, J., 2016. Simultaneous biodegradation of carbon tetrachloride and trichloroethylene in a coupled anaerobic/aerobic biobarrier. *Journal of hazardous materials*, 313, pp.60-67.
- Lee, T.H., Cao, W.Z., Tsang, D.C., Sheu, Y.T., Shia, K.F. and Kao, C.M., 2019. Emulsified polycolloid substrate biobarrier for benzene and petroleum-hydrocarbon plume containment and migration control—A field-scale study. *Science of the Total Environment*, 666, pp.839-848.
- Liu, S.J., Zhao, Z.Y., Li, J., Wang, J. and Qi, Y., 2013. An anaerobic two-layer permeable reactive biobarrier for the remediation of nitrate-contaminated groundwater. *Water research*, 47(16), pp.5977-5985.
- Cauvain, S.P., 2020. Chapter 13 - The use of redox agents in breadmaking, in *Breadmaking* (Third Edition), S.P. Cauvain, Editor. Woodhead Publishing. pp. 391-413.
- Wieser, H., 2012. 18 - The use of redox agents in breadmaking, in *Breadmaking* (Second Edition), S.P. Cauvain, Editor. Woodhead Publishing. pp. 447-469.
- Setiawan, W.A., Astika, H., Astuti, T., Putra, A.K., Ayuningtyas, A. and Bahti, H.H., 2018, December. Assessing effectiveness of sodium metabisulfite for treatment of coal tar wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 212, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- alama, A.E., 2019. Effective Sodium Metabisulfite (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), HCl, Sulfur and Distilled Water for the Removal of Pb, Zn and Cr Contaminated Soil in the Columns Method. *Agricultural Sciences*, 10(07), pp.882-892.
- Choi, J.H., Kim, Y.H. and Choi, S.J., 2007. Reductive dechlorination and biodegradation of 2, 4, 6-trichlorophenol using sequential permeable reactive barriers: laboratory studies. *Chemosphere*, 67(8), pp.1551-1557.
- Lee, T.H., Tsang, D.C., Chen, W.H., Verpoort, F., Sheu, Y.T. and Kao, C.M., 2019. Application of an emulsified polycolloid substrate biobarrier to remediate petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater. *Chemosphere*, 219, pp.444-455.
- Folch, A., Vilaplana, M., Amado, L., Vicent, T. and Caminal, G., 2013. Fungal permeable reactive barrier to remediate groundwater in an artificial aquifer. *Journal of hazardous materials*, 262, pp.554-560.

24. Silva, B., Rocha, V., Lago, A., Costa, F. and Tavares, T., 2021. Rehabilitation of a complex industrial wastewater containing heavy metals and organic solvents using low cost permeable bio-barriers—from lab-scale to pilot-scale. *Separation and Purification Technology*, 263, p.118381.
25. Hosseini, S.M., Ataie-Ashtiani, B. and Kholghi, M., 2011. Nitrate reduction by nano-Fe/Cu particles in packed column. *Desalination*, 276(1-3), pp.214-221.
26. Rao, S.M. and Malini, R., 2015. Use of permeable reactive barrier to mitigate groundwater nitrate contamination from on-site sanitation. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(2), pp.336-340.
27. Liu, G. and Wang, J., 2015. Modeling effects of DO and SRT on activated sludge decay and production. *water research*, 80, pp.169-178.
28. Yu, D. and Hong, X., 2022. A theme evolution and knowledge trajectory study in AHP using science mapping and main path analysis. *Expert Systems with Applications*, 205, p.117675.
29. Sreenivasan, A., Suresh, M. and Nedungadi, P., 2023. Mapping analytical hierarchy process research to sustainable development goals: Bibliometric and social network analysis. *Heliyon*, 9(8).
30. Crampon, M., Hellal, J., Mouvet, C. and Ollivier, P., 2021. Degradation of tetrachloroethylene by zero valent iron nanoparticles in the presence of a natural groundwater bacterial biofilm in a sandy porous media. *Heliyon*, 7(1).
31. Liu, H.Y., Yang, G.F., Cheng, Z.W., Chu, Q.Y., Xu, Y.F., Zhang, W.X., Ye, J.X., Chen, J.M., Wang, L.N., Yang, Z.Y. and Tang, Z.Q., 2022. Interaction of tetrahydrofuran and methyl tert-butyl ether in waste gas treatment by a biotrickling filter bioaugmented with *Piscinibacter caeni* MQ-18 and *Pseudomonas oleovorans* DT4. *Chemosphere*, 286, p.131552.
32. Liu, S., Yang, Q., Yang, Y., Ding, H. and Qi, Y., 2017. In situ remediation of tetrachloroethylene and its intermediates in groundwater using an anaerobic/aerobic permeable reactive barrier. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.26615-26622.
33. Zolla, V., Freyria, F.S., Sethi, R. and Di Molfetta, A., 2009. Hydrogeochemical and Biological Processes Affecting the Long-term Performance of an Iron-Based Permeable Reactive Barrier. *Journal of Environmental Quality*, 38(3), pp.897-908.
34. Gizaw, A., Zewge, F., Kumar, A., Mekonnen, A. and Tesfaye, M., 2021. A comprehensive review on nitrate and phosphate removal and recovery from aqueous solutions by adsorption. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(7), pp.921-947.
35. Kumar, N.S. and Goel, S., 2010. Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), pp.528-533.
36. GES. 2000. Lecture supplement 4: oxidation and reduction (redox) reactions. soil chemistry.
37. Luccarini, L., Pulcini, D., Sottara, D., Di Cosmo, R. and Canziani, R., 2017. Monitoring denitrification by means of pH and ORP in continuous-flow conventional activated sludge processes. *Desalination and Water Treatment*, 61, pp.319-325.
38. Flury, B., Frommer, J., Eggenberger, U., Mader, U.R.S., Nachtegaal, M. and Kretzschmar, R., 2009. Assessment of long-term performance and chromate reduction mechanisms in a field scale permeable reactive barrier. *Environmental science & technology*, 43(17), pp.6786-6792.
39. Hwang, Y.H., Kim, D.G. and Shin, H.S., 2011. Mechanism study of nitrate reduction by nano zero valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), pp.1513-1521.
40. Ludwig, R.D., Smyth, D.J., Blowes, D.W., Spink, L.E., Wilkin, R.T., Jewett, D.G. and Weisener, C.J., 2009. Treatment of arsenic, heavy metals, and acidity using a mixed ZVI-compost PRB. *Environmental Science & Technology*, 43(6), pp.1970-1976.
41. Phillips, D.H., Nooten, T.V., Bastiaens, L., Russell, M.I., Dickson, K., Plant, S., Ahad, J.M.E., Newton, T., Elliot, T. and Kalin, R.M., 2010. Ten year performance evaluation of a field-scale zero-valent iron permeable reactive barrier installed to remediate trichloroethene contaminated groundwater. *Environmental Science & Technology*, 44(10), pp.3861-3869.
42. Chirila, N., 2014. Remarks on recent developments in the chemical oxido-reduction reaction used in treat the wastewater. *Procedia Technology*, 12, pp.621-627.
43. Liu, Y., Zhang, X. and Wang, J., 2022. A critical review of various adsorbents for selective removal of nitrate from water: Structure, performance and mechanism. *Chemosphere*, 291, p.132728.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟


Hosseini, M.A., Mokhtarani, N. and Ganjidoust, H., 2025. Selection of the Most Optimal Oxygen Capturing Compound in the Nitrate Removal Process Using Permeable Reactive Bio Barriers. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.73-85.

DOI: 10.22034/25.3.2





# Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading

Mahdi Yazdani<sup>1</sup>, Seyed Ahmad Hosseini<sup>2\*</sup> 

1. Ph.D. Student, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

## Abstract

So far, the performance of masonry walls against in-plane lateral loads such as earthquake loads has been extensively studied, but less attention has been paid to out-of-plane loads such as explosions. Due to their large surface area, walls endure significant forces during explosions, leading to extensive damage and potentially causing severe financial losses and casualties. Given the increase in terrorist and sabotage attacks, reinforcing these structures seems necessary. In recent years, fiber-reinforced polymers (FRP) have been widely and effectively used in the reinforcement and performance improvement of these structures. Their light weight, high stiffness and high strength, and corrosion resistance are among the properties that have attracted researchers to use these materials. Finite element modeling not only provides a basis for better understanding the behavior of masonry walls but also is very useful in predicting the behavior of these members after reinforcement, especially in the absence of experimental results. In this study, using numerical modeling in ABAQUS software, the behavior of masonry walls reinforced with FRP strips against a blast with an explosive charge equivalent to 150 kg of TNT (the weight of explosive likely to be carried in a sabotage attempt via a vehicle) at a distance of 5 meters was investigated. Lagrangian equations were used to model the mechanical behavior of the structure, and the solver used in this research is an explicit solver to account for the time factor in the software's integration process. The total time considered for the entire explosion process is 1 second, and the explosive load was applied to the studied structure using the Conwep method. The type of fibers, width, thickness, area, and angle of the FRP strips were important and influential parameters that were examined for the efficiency of this reinforcement method. The modeling results indicate that this reinforcement technique is highly effective in strengthening masonry walls against explosions, as it has reduced the deflection of the wall by at least 70% and its energy by up to 90%. It can also be inferred that an arrangement for reinforcing masonry walls with FRP strips is suitable if it covers the areas prone to damage, which in masonry walls are the mortar joints between the bricks. Therefore, the horizontal arrangement shows better performance compared to the vertical and diagonal arrangements. Similarly, reinforcing 100% of the wall area performs much better than reinforcing 50% and 25% of the wall area, but it is not economically acceptable. In general, similar to structural elements, non-structural elements can also exhibit plastic behavior in critical situations, preventing the collapse of these elements due to the absorbed energy. Therefore, walls with higher plastic energy show better behavior against explosive loads. Additionally, based on the hysterical displacement and kinetic energy diagrams of the wall, it can be seen that the behavior of reinforced walls is oscillatory, while the behavior of unreinforced walls is noticeably pulsating. Finally, the optimal arrangement of FRP strips proposed for reinforcing masonry walls against explosions in this study is the use of CFRP strips horizontally, with a thickness of 1 mm, a width of 24 cm, and covering 50% of the surface area; This configuration successfully decreased the deflection of the wall from 63.1 cm to 7.7 cm and damped approximately 13% of the blast wave energy.

## Review History

Received: Dec 05, 2024  
Revised: Dec 10, 2024  
Accepted: Nov 25, 2024

## Keywords


Masonry wall  
Explosion  
Strengthening  
FRP Composite  
Numerical Modeling

\* Corresponding Author Email: [hosseini@mut.ac.ir](mailto:hosseini@mut.ac.ir) - ORCID: 0000-0001-9268-9295





## مقاوم سازی و بررسی تاثیر آرایش های مختلف نوارهای FRP بر رفتار دیوار بنایی در برابر بار انفجار

مهدی یزدانی<sup>۱</sup>، سید احمد حسینی<sup>۲\*</sup> 

۱. دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

### چکیده

### تاریخچه داوری

سازه های بنایی پتانسیل خرابی شدیدی در انفجار داشته و با توجه به افزایش حوادث تروریستی، مقاوم سازی این ساختمان ها ضروری به نظر می رسد. در سی سال گذشته، پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) کاربرد گسترده و مناسبی در امر مقاوم سازی و بهبود عملکرد این سازه ها داشته است. مدل سازی به روش اجزا محدود ضمن ایجاد

زمینه ای برای درک بهتر رفتار دیوارهای بنایی، در پیش بینی رفتار این اعضا پس از تقویت، در فقدان نتایج آزمایشگاهی بسیار مفید خواهد بود. در این پژوهش، با استفاده از مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس، رفتار دیوارهای بنایی

تقویت شده با ورق های FRP در برابر انفجاری با خرج ماده منفجره معادل ۱۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای لازم و تاثیرگذار برای بررسی کاربرد این روش مقاوم سازی تحلیل شدند. عرض،

ضخامت، مساحت و زاویه چیدمان ورق های FRP از پارامترهای موثر بر رفتار دیوارهای بنایی تقویت شده به شمار می رود. نتایج حاصل از مدل سازی نشان می دهد که این روش مقاوم سازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار

کارامد بوده به طوری که جابه جایی ۶۳ سانتی متری مرکز دیوار حداقل ۷۰ درصد و انرژی آن تا ۹۰ درصد نیز کاهش داشته است. علاوه بر این مقاوم سازی دیوارها با نوارهای افقی در مقایسه با نوارهای عمودی و قطری، عملکرد دیوار را

به مقدار بیشتری بهبود می بخشد.

### کلمات کلیدی

دیوار بنایی، انفجار

مقاوم سازی

کامپوزیت FRP

مدل سازی عددی

### ۱- مقدمه

آجر می باشد. ضرورت بررسی مقاوم سازی این نوع دیوارها در برابر تهدیدات ناشی از انفجارات عمود بر سطح احساس شد. تاکنون عملکرد دیوارهای آجری در برابر بارهای جانبی داخل صفحه مانند بار زلزله مورد مطالعه زیادی قرار گرفته ولی در برابر بارهای عمود بر صفحه مانند بار انفجار کمتر مورد توجه بوده است. دیوارها به دلیل مساحت بسیار زیادی که دارند، در انفجار نیروی زیادی را متحمل می شوند که استعداد بالای خرابی آن ها را در پی دارد. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک دیوار بنایی آجری با مشخصات ثابت و تنها با تغییر پارامترهای تاثیرگذار بر مقاوم سازی

با توجه به اینکه حملات تروریستی در سال های اخیر شکل وسیع تری به خود گرفته است و بیشتر حملات به صورت بمب های حجیم منفجر شده در اطراف ساختمان ها می باشد که منجر به خسارات جانی و سازه ای به ویژه دیوارها با مصالح بنایی می شود. لیکن از آنجایی که نمی توان از وقوع چنین رخدادهایی جلوگیری کرد و نیز به علت شکست و گسیختگی این دیوارها عمدتاً به دلیل ناکافی بودن شکل پذیری و مقاومت لازم مصالح می باشد. پس با توجه به اینکه بیشتر دیوارهای موجود در بناهای کشور از مصالح

\* رایانامه نویسنده مسئول: hoseini@mut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-9268-9295

کپی رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می توانید این



مطلب را در هر قالب و رسانه ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازنساز کنید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

به کمک پوشش FRP، پاسخ دیوار به این تغییرات بررسی شد.

## ۲- تاریخچه مطالعات

طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نیست. ولی با تمهیداتی می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارد شده کاست و عملکرد سازه را ارتقا بخشید. بیشتر ساختمان‌های موجود را سازه قاب تشکیل می‌دهد که معمولاً از یک قاب با ظرفیت باربری نسبتاً بالا و دیوار پر شده با مقاومت نسبتاً کم تشکیل شده است [1, 2]. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که میزان آسیب دیوار بنایی در مقایسه با قاب تحت بار انفجار شدیدتر بوده و آوارهای پرتاب‌شده به طور اجتناب‌ناپذیری یک تهدید بزرگ برای افراد و ابزار موجود در سازه خواهد بود [3-7]. بنابراین، یافتن روش‌های حفاظتی مؤثر برای کاهش آسیب دیوارهای بنایی آسیب‌پذیر تحت بار انفجار از اهمیت بالایی برخوردار است.

رویکردی که برای مقاوم‌سازی دیوارهای موجود در برابر انفجار باید در نظر گرفت، تقویت خارجی آن‌هاست و استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف تکنیکی است که اخیراً اقبال زیادی دارد [8-10]. سیستم‌های متداول FRP مورد استفاده عبارتند از: الیاف کربن، شیشه، آرامید و یا بازالت که توسط یک ماتریکس پلیمری مانند اپوکسی، وینیل استر یا پلی استر برای ساختن CFRP، GFRP، AFRP و BFRP به یکدیگر متصل می‌شوند [11-15]. ژاک [16] اثر استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف را به عنوان یک استراتژی مقاوم‌سازی برای بهبود مقاومت در برابر انفجار در دیوارها و دال‌های بتنی بررسی کرد که افزایش قابل توجهی در استحکام و سختی و کاهش قابل توجهی در حد بیشتر جابه‌جایی نمونه‌های تقویت شده با FRP مشاهده شد. اورتون و همکاران [17] اثر بار انفجار ضعیف بر دال بتنی تقویت شده با CFRP را بررسی کرد. یافته‌های آزمایش نشان داد که CFRP به طور مؤثر در برابر بار انفجار مقاومت می‌کند و انحرافات دال را کاهش می‌دهد؛ اما تحت بارهای انفجاری شدید، بتن به طور فاجعه‌باری در ضخامت دال شکست خورد و پارگی کامل در سطح پشتی CFRP قابل مشاهده بود. به منظور تعیین اثر سازه‌های بتنی تقویت شده با FRP هنگام قرار گرفتن در معرض بارهای انفجاری، رویکردهای عددی متعددی پیشنهاد شده است؛

بررسی‌های عددی موتالیب و همکاران [18] نشان می‌دهد که حفظ عملکرد ترکیبی بین FRP و بتن به طور قابل توجهی به استحکام پیوند بین دیوار و پوشش FRP و هم‌چنین تعداد لایه‌های آن بستگی دارد و نتایج نشان داد که تقویت دیوار بتن آرمه با FRP به طور مؤثری ظرفیت آن را برای مقاومت در برابر بارهای انفجار افزایش می‌دهد. الانچیزیان و همکاران [19] نیز اثر نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی و خمشی لایه‌های کامپوزیت CFRP و GFRP را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که اگرچه کرنش تا شکست برای هر دو ماده CFRP و GFRP با افزایش نرخ کرنش کاهش یافت، اما مقاومت دینامیکی ماده GFRP با افزایش نرخ کرنش بهبود پیدا کرد.

به طور کلی تحقیقات موجود در مورد بررسی تقویت FRP با زیرساخت‌های عمرانی در برابر بارهای انفجار بیشتر بر روی دیوارها سازه‌ای [20, 21]، دال‌ها [22, 23] و یا تیرها [24, 25] متمرکز است. بنابراین، نیاز به مطالعه اثر آرماتور FRP روی دیوارهای بنایی تحت بارگذاری انفجار وجود دارد.

## ۳- رفتار مصالح

### ۳-۱- مصالح بنایی

سازه بنایی یک ماده ناهمسانگرد ترکیبی می‌باشد و سازوکار رفتارش کاملاً بستگی به ویژگی‌های اجزاء تشکیل دهنده‌اش دارد. به بیان ساده‌تر، سازه‌های بنایی از واحدهای بنایی تشکیل یافته‌اند که به وسیله ملات به یکدیگر متصل شده‌اند. واحد بنایی و ملات هرکدام ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارند که همین امر باعث ایجاد ترکیبی غیرهمگن از آن‌ها در ساخت دیوارهای بنایی شده است که در نهایت موجب تغییر در رفتار دیوار می‌شود. دیوارهای بنایی به صورت مصالح کامپوزیتی که شامل مصالح آجر و ملات می‌باشند غیرایزوتروپیک و دارای رفتار غیرخطی هستند. مطابق شکل (۱)، سه روش مرسوم در زمینه مدل‌سازی دیوارهای بنایی وجود دارند. در روش اول می‌توان دیوار را به صورت هموژن و یک‌دست در نظر گرفت که از دقت چندانی برخوردار نمی‌باشد [26]. در روش دیگر، مصالح آجر و ملات و سطح مشترک بین آن‌ها به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شود که به دلیل دقت بالای این روش، حجم محاسبات و زمان تحلیل آن افزایش می‌یابد. روش آخر که از دقت کافی برخوردار است و در عین حال حجم

می‌شود و با بارگذاری بیشتر، سازوکار کاهش سختی مصالح شروع می‌شود که پارامترهای خرابی به عنوان کنترل‌کننده کاهش سختی از مقدار صفر (بدون خرابی) شروع شده و تا مقدار یک (خرابی کامل) ادامه می‌یابند.

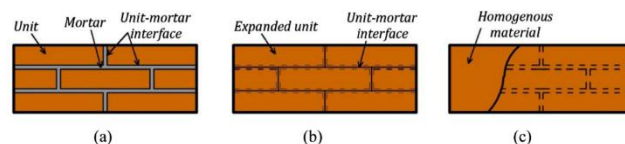
#### ۴- روش تحقیق

##### ۴-۱- بیان مسئله

در این تحقیق با در نظر گرفتن مقدار وزنی ماده منفجره‌ای که احتمال می‌رود در یک اقدام خرابکارانه از طریق وسیله نقلیه (خودرو با اندازه متوسط) حمل شود، مقدار ۱۵۰ کیلوگرم معادل ماده منفجره TNT در نظر گرفته شد [29]. هم‌چنین، فاصله انفجار برابر با ۵ متر انتخاب شد که برای اتخاذ تدابیر امنیتی و تمهیدات بازدارنده مانند حصارکشی و ایجاد محوطه قرق، از نظر اقتصادی به صرفه باشد.

##### ۴-۲- مدل‌سازی عددی

در این مطالعه برای شبیه‌سازی اجزا محدود از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس نسخه ۲۰۲۲ استفاده شد. از آنجایی که آنالیز غیرخطی قدرتمندترین ابزار برای تحلیل انواع سازه‌ها با مصالح مختلف از جمله مصالح بتنی و آجری است. در این روش امکان پیگیری کامل پاسخ سازه از مرحله الاستیک تا مرحله ترک‌خوردگی و خردشدگی تا گسیختگی نهایی وجود دارد. به دلیل وجود ملات و درز ملات در سازه‌های بتنی و آجری که به صورت یک سری صفحات ضعیف عمل می‌کنند، رفتار سازه‌های بتنی یا بنایی حتی در برابر بارهای متوسط و نه چندان شدید نیز یک رفتار غیرخطی است. بنابراین آنالیز غیرخطی به عنوان بهترین و کامل‌ترین روش برای سازه‌های آجری شمرده می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی سازه از معادلات لاگرانژی استفاده شده است و حلگر مورد استفاده در این تحقیق حلگر از نوع صریح (Explicit) می‌باشد تا عامل زمان در فرآیند انتگرال‌گیری نرم افزار لحاظ شود. زمان در نظر گرفته شده برای کل فرآیند انفجار برابر ۱ ثانیه می‌باشد. اعمال بار انفجاری روی سازه مورد مطالعه با استفاده از روش CONWEP صورت گرفته است که با استفاده از تکنیک‌های اتصال منحنی، معادلات با درجه بالای نمایی را برای رفتار انفجار در نظر می‌گیرد.



شکل ۱. انواع روش مدل‌سازی دیوار بنایی

(الف) ماکرو، (ب) میکرو ساده‌شده، (ج) میکرو [26]

Fig. 1. Types of masonry wall modeling methods: a) detailed Micro, b) simplified Micro, c) Macro [26]

محاسبات مدل منطقی و مناسب است، روش میکرو ساده‌شده نام دارد که ملات در آن مدل‌سازی نمی‌شود اما اثر چسبندگی آن برآجرها به طور کامل مدل‌سازی می‌شود [27].

##### ۳-۲- کامپوزیت FRP

کامپوزیت‌ها هم‌چنان که از نامشان پیداست ترکیبی فیزیکی از دو یا چند ماده هستند که ماده حاصل دارای ویژگی‌های خاصی است که در هیچ یک از مواد تشکیل‌دهنده به تنهایی یافت نمی‌شود. وزن سبک، سختی و مقاومت زیاد و مقاومت در برابر خوردگی از جمله خواصی است که استفاده از این مواد را برای بهسازی و ترمیم سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار داده است. بر اساس معیار هشین چهار نوع مود گسیختگی شامل کشش در الیاف، فشار در الیاف، کشش در ماتریس و فشار در ماتریس بر اساس روابط ۱ تا ۴ محتمل بوده و هرگاه تنش ایجادشده در هر یک از قسمت‌های الیاف و ماتریس تحت اثر فشار یا کشش، بیشتر از یک شود سازوکار خرابی آغاز می‌شود [28].

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}^t}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^t}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}^c}{X^C}\right)^2 \quad (2)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}^t}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^t}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

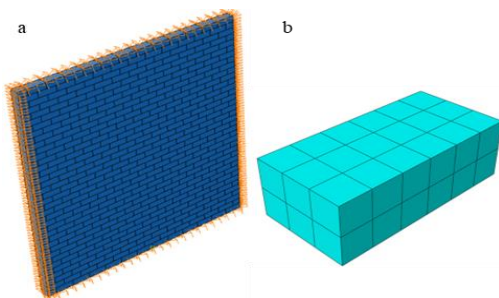
$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}^c}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}^c}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}^c}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه‌ها  $F_f^t$  و  $F_f^c$  به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در الیاف و  $F_m^t$  و  $F_m^c$  نیز به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در ماتریس می‌باشد. هم‌چنین  $\sigma_{ij}$  اعضای تانسور تنش مؤثر،  $X^C$  و  $X^T$  مقاومت کششی و فشاری در راستای طولی،  $Y^C$  و  $Y^T$  مقاومت کششی و فشاری در جهت الیاف عرضی و  $S^L$  و  $S^T$  مقاومت برشی در جهت طولی و عرضی می‌باشند. زمانی که تنش برابر یا بیشتر از یکی از مقادیر روابط ۱ تا ۴ شد سازوکار خرابی آغاز

دور دیوار صرف نظر شد و به محدود کردن درجات آزادی برای حصول به شرایط مفصلی اکتفا شده است (درجه آزادی انتقالی در سه جهت صفر قرار داده شد).

از آنجایی که مصالح بنایی مانند بتن رفتار می کنند بنابراین برای توصیف رفتار غیرخطی بتن، مدل خرابی پلاستیسیته آن به نرم افزار معرفی شد. معیار خرابی و عملکرد تسلیم به ترتیب بر اساس مدل دراگر-پراگر و عملکرد لابلینر تعیین شد. در این مدل فرض می شود

که تلفیق فشار و ترک بتن سازوکار اصلی شکست است. این مدل در بسیاری از تحقیقات برای مطالعه پاسخ دینامیکی سازه بتنی تحت بار انفجار استفاده شده است. پارامترهای مدل پلاستیک بتن آسیب دیده برای مصالح بنایی و همینطور رفتار آن در فشار و کشش به ترتیب در جدول های (۱ و ۲) ارائه شده است. همچنین تئوری هشین برای ارزیابی عملکردهای FRP های لایه ای برای مقاوم سازی دیوارها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات الاستیک کامپوزیت های FRP و همینطور پارامترهای آسیب آن ها بر اساس معیار هشین به ترتیب در جدول های (۳ و ۴) ارائه شده است.



شکل ۲. الف) شرایط مرزی مفصلی دیوار بنایی  
ب) واحد بنایی مدل شده با اندازه مش ۴ سانتی متر

Fig. 2. a) Joint boundary conditions of masonry wall;  
b) Modeled masonry unit with a mesh size of 4 cm

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و پارامترهای CDP برای مصالح بنایی [31]

Table 1. Mechanical properties and CDP parameters for brick [31]

$E$ (MPa)	1892	$\psi$	20
$\nu$	0.15	$K$	0.67
$f'_c$ (MPa)	9.9	$e$	0.1
$f_t$ (MPa)	0.69	$(Fb_0/Fc_0)$	1.16
$g$ (kg/m <sup>3</sup> )	1812	Viscosity	0

روش CONWEP یکی از روش های شناخته شده و رایج برای شبیه سازی آثار انفجار در محیط های عددی است که توسط ارتش ایالات متحده در نرم افزارهای محاسباتی توسعه داده شده است. این روش بر اساس داده های تجربی، مقدار فشار انفجار و زمان اعمال آن را برای سازه هایی که در معرض موج انفجار قرار می گیرند، محاسبه می کند. پارامترهای ورودی در این روش، مقدار ماده منفجره (معادل TNT) و همچنین فاصله بین محل انفجار و سازه هستند و باتوجه به رابطه ۵، فشاری که در هر نقطه از هدف وارد می شود تابعی از فشار بازتابی و فشار فرودی در آن نقطه و زاویه تابش موج انفجار می باشد [30].

$$p = p_i (1 + \cos \alpha - 2 \cos^2 \alpha) + p_r \cdot \cos^2 \alpha \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$  زاویه برخورد،  $P_i$  فشار فرودی و  $P_r$  فشار بازتابی است.

در این تحقیق، دیوار بنایی به روش میکرو ساده شده شبیه سازی شده است؛ یعنی یک واحد بنایی با مشخصات آجر مدل شده ولی به جای مدل کردن ملات، اثر چسبندگی آن بر آجرها اعمال شده است. مطابق شکل (۲)، ابعاد دیوار مدل شده در این تحقیق  $3m \times 3m$  می باشد و هر آجر به ابعاد  $80mm \times 120mm \times 240mm$  با استفاده از المان SOLID و به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع انتخاب شده برای سطح مقطع آجر به میزان یک سانتی متر بیش از مقدار واقعی در نظر گرفته می شود زیرا روش به کار گرفته شده از نوع میکرو ساده شده می باشد و به این ترتیب نیازی به مدل سازی ملات به صورت پارت های مجزا نمی باشد. به این دلیل لازم است به ارتفاع آجر (ناشی از وجود ملات در درزهای افقی) و به طول آجر (ناشی از وجود ملات در درزهای قائم) به میزان نیمی از ضخامت ملات در هر طرف افزوده شود. بنابراین اندازه ابعاد مربوط به ارتفاع و طول آجر به میزان یک سانتی متر افزایش داده شد. همچنین ورق های FRP نیز با استفاده از المان SHELL در نرم افزار شبیه سازی شده است که از قید tie برای اتصال این ورق ها به دیوار استفاده شد. از آنجایی که دیوار فقط تحت بار ثقلی وزن خودش و نیروی فشار انفجار قرار می گیرد و بار خارجی دیگری به آن وارد نمی شود، با یک فرض ساده کننده، از مدل سازی قاب

جدول ۲. رفتار فشاری و کششی مصالح بنایی برای مدل CDP [31]

Table 2. Compressive & tensile behavior of brick for CDP model [31]

Compressive behavior		Tensile behavior	
Yield stress (MPa)	Inelastic strain	Yield stress (MPa)	Cracking strain
6.92	0	0.69	0
8.00	0.00033	0.54	0.00011
9.68	0.00177	0.36	0.00029
9.90	0.00287	0.25	0.00042
9.68	0.00418	0.17	0.00055
8.63	0.00644	0.12	0.00067
7.28	0.00842	0.09	0.00078
4.28	0.01193	0.07	0.00078

جدول ۳. مشخصات رفتار الاستیک کامپوزیت‌های FRP [20, 32]

Table 3. Elastic behavior of FRP composites [20, 32]

	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
CFRP	54000	2227	0.3	1127	1127	1127
GFRP	18000	818	0.3	414	414	414
BFRP	15000	10000	0.3	4800	4800	4800

جدول ۴. پارامترهای آسیب کامپوزیت‌های FRP بر اساس معیار هشین [32]

Table 4. Damage parameters of FRP composites based on Hashin model [32]

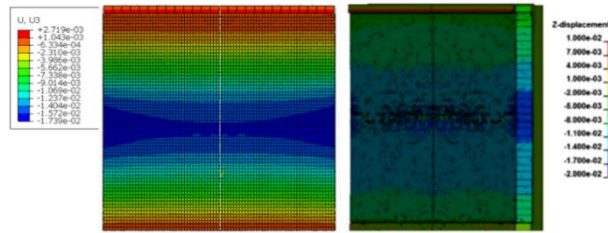
	CFRP	GFRP	BFRP
Tens. strength in norm. dir. of fiber (MPa)	1188	810	460
Comp. strength in norm. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	260
Tens. strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	45
Comp. strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	60
Shear strength in norm. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	35
Shear strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	20
Fracture Tens. energy in fibers' dir. (mJ)	92	92	73
Fracture Tens. energy in trans. dir. (mJ)	1.1	1.1	0.67
Fracture Comp. energy in fibers' dir. (mJ)	0.2	0.2	26.7
Fracture Comp. energy in trans. dir. (mJ)	0.2	0.2	13.3

### ۳-۴- درستی آزمایشی

و همکاران به صورت  $70\text{mm} \times 110\text{mm} \times 240\text{mm}$  میلی‌متر بوده، ضخامت ملات بین آجرها ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و دیوارها با ضخامت ۲۴ سانتی‌متر مدل شدند. هم‌چنین در مدل‌سازی از المان مکعب مستطیلی هشت گره‌ای استفاده شده و برای مش‌بندی آجرها سه اندازه مختلف ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر را امتحان کرده و نهایتاً مش مورد قبول که همگرایی و تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته را ۴۰ میلی‌متر انتخاب کردند.

شکل (۳) برای نمایش تطابق مطالعه چیکیتو و همکاران و این پژوهش استخراج شده است. هم‌چنین مقایسه میانگین تغییرشکل‌های رخ داده در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج، درستی مدل‌سازی این پژوهش محقق می‌شود و به نظر می‌رسد اختلافی هم که وجود دارد به دلیل تفاوت در شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای مختلف و فرض ساده کننده مورد استفاده در خلال مدل‌سازی می‌باشد.

بخش حاضر به درستی آزمایشی و مقایسه نتایج پژوهش انجام شده چیکیتو و همکاران [33] در سال ۲۰۲۱ و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس اختصاص داده شده است. این پژوهشگران به بررسی دیوار بنایی تحت بار انفجار و تقویت آن‌ها به کمک پوشش FRP در نرم‌افزار المان محدود ال اس داینا پرداخته‌اند و و نتایج مدل‌سازی خود را با تحقیقات آزمایشگاهی (میدانی) مقایسه نموده‌اند. آن‌ها دیوار مورد نظر خود را با ابعاد  $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$  از جنس آجر مدل کردند. چیکیتو و همکاران نوع انفجار را سطحی انتخاب کرده‌اند و تمام انفجارها با خرج تی‌ان‌تی  $31/4$  کیلوگرم و در فاصله ۵ متری از دیوار مدل شده‌اند. هم‌چنین از شرایط مرزی گیردار برای دیوار استفاده کردند. هرچند که در ادامه، پژوهشگران فوق‌الذکر به این نتیجه رسیده‌اند که در انفجارهای شدید، همه شرایط مرزی به صورت مفصلی عمل خواهند کرد. اندازه آجر مورد استفاده در مدل چیکیتو



شکل ۳. کانتور تغییر شکل دیوار در شبیه‌سازی این تحقیق و مقاله مرجع [33]

Fig. 3. Contour of the wall deflection in the research and the reference article [33]

جدول ۵. نتایج جابه‌جایی وسط دیوار در مدل پیشنهادی و مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی پژوهش مرجع [33]

Table 5. Results of the deflection of the wall in the proposed model and comparison with the numerical and experimental results (based on [33])

Deflection of the center of the wall (mm)			
ABAQUS (Error)	LS-DYNA[32] (Error)	Experimental	
15.21 (7.9%)	15.51 (10.1%)	14.09	Unreinforced wall
11.87 (5.3%)	12.11 (7.5%)	11.27	Reinforced wall

مستهلک‌شده در آن بیشتر می‌باشد.

#### ۵-۱- بررسی دیوار موجود مقاوم نشده

شکل (۴-الف) کانتور جابه‌جایی دیوار بنایی مقاوم‌نشده را در مقابل بار انفجار ناشی از ۱۵۰ کیلوگرم خراج TNT در فاصله ۵ متری از پاشنه دیوار نشان می‌دهد. همان‌طور واضح است، دیوار بنایی قابلیت سرویس‌دهی خود را کاملاً از دست داده و ملات و آجر هر دو دچار گسیختگی شده‌است. شکل (۴-ب) نیز نمودار انرژی‌های دیوار بنایی مقاوم‌نشده را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات بالا اختلاف میان کار خارجی و مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی، انرژی مستهلک‌شده می‌باشد که خود شامل انرژی مستهلک‌شده پلاستیک، انرژی مستهلک‌شده خردشدن، انرژی مستهلک‌شده خزش می‌باشد.

کار اصلی این پژوهش از این بخش آغاز می‌شود. مدل پایه مطابق شکل (۵)، توسط چیدمان‌های متفاوت تقویت شد. این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که الیاف FRP به دلیل سبکی، بدون افزودن جرم دیوار می‌توانند بسیار کارآمد باشند. افزون بر این، یافتن مناسب‌ترین چیدمان به دلیل گران بودن این کامپوزیت، گام بزرگی در بهینه کردن این دیوارها است. برای سنجش درستی چیدمان‌ها تلاش شد تا از منطقی بخردانه پیروی شود تا مقایسه آن‌ها و نتیجه‌گیری ساده‌تر شود. بر این اساس، متغیرهای در نظر گرفته برای این تحقیق شامل عرض نوار، ضخامت نوار، سطح پوشش، زاویه نوار و جنس فیبر می‌باشد.

#### ۵- تجزیه و تحلیل

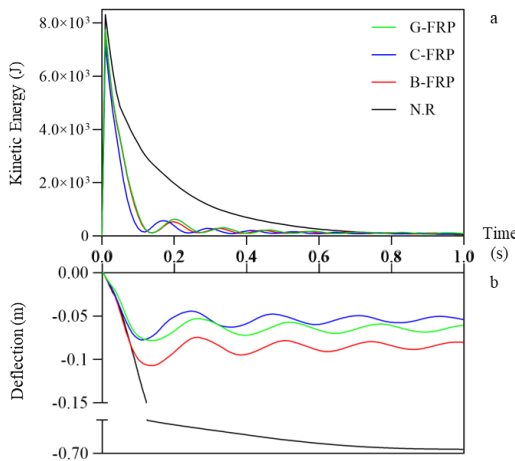
در این پژوهش سه خروجی مدنظر است؛

- خروجی جابه‌جایی: برای این کار، جابه‌جایی مرکز دیوار محاسبه می‌شود.
  - خروجی آسیب FRP: برای بررسی دقیق‌تر، کانتور آسیب کششی نوارهای FRP ارائه خواهد شد.
  - خروجی انرژی-زمان: برای ارزیابی تعادل انرژی، انرژی جنبشی کل سازه محاسبه خواهد شد.
- یکی از روش‌های بررسی پاسخ موانع سازه‌ای در معرض انفجار، انرژی رسیده به مانع می‌باشد. این انرژی به سه صورت خود را نشان می‌دهد؛ انرژی جنبشی (که سبب سرعت گرفتن المان می‌شود)، انرژی پتانسیل (یا انرژی کرنشی الاستیک) و انرژی مستهلک‌شده (ناشی از ترک‌های پلاستیک، اصطکاک داخلی، تغییر شکل‌های پلاستیک، خرد شدن). برای ایجاد بالانس انرژی، با توجه به کار خارجی انجام شده و مقابله با انرژی ورودی در سیستم، سازه با تغییر شکل‌های الاستیک، پلاستیک، میرایی و انرژی جنبشی سعی می‌کند تا تعادل را ایجاد نماید [34]. از آن جایی که میزان انرژی رسیده به موانع با ابعاد یکسان، مستقل از نوع تقویت و جنس مصالح به کار گرفته شده می‌باشد و با توجه به اینکه در لحظه پیک انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل صفر می‌باشد، می‌توان انرژی مستهلک‌شده در حالات گوناگون مقاوم‌سازی را با یکدیگر مقایسه کرد. بنابراین در صورتی که پیک انرژی جنبشی در یک حالت کمتر از حالتی دیگر باشد در این صورت میزان انرژی

۲-۵- بررسی اثر جنس فیبر

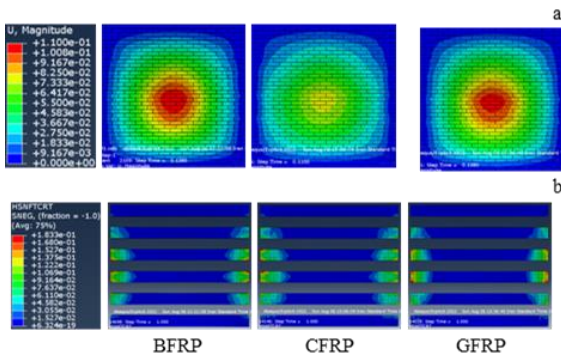
برای بررسی پارامتریک اثر جنس فیبر ورق‌های FRP، از نوار با فیبرهای شیشه، کربن و بازالت به ترتیب برای مقاوم‌سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و چیدمان نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد و افقی می‌باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه‌جایی مرکز آن برای جنس‌های مختلف الیاف نوار، در شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به نمودارها و کانتورهای شکل‌های (۶ و ۷)، جنس فیبر نوارهای FRP اثر قابل توجهی بر انرژی جنبشی دیوار و خرابی کششی نوارهای FRP نمی‌گذارد و فقط جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده با نوار BFRP متفاوت است به طوری که جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده با نوارهای GFRP، CFRP و BFRP به ترتیب برابر ۷/۷، ۸/۷ و ۱۰/۷ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۶. تاثیر جنس فیبر بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 6. Effect of fiber type on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

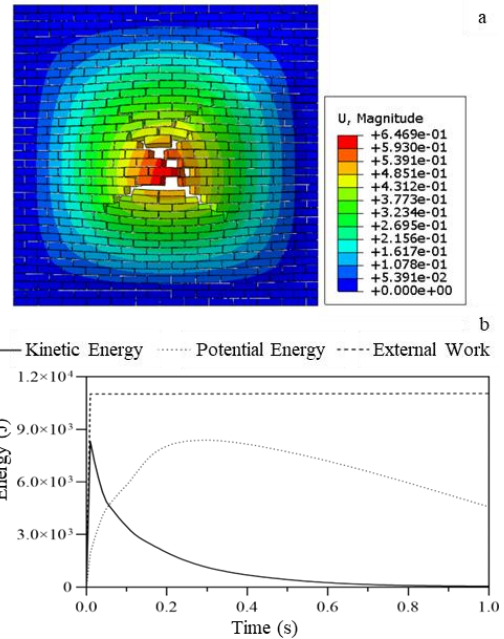


شکل ۷. تاثیر جنس فیبر بر:

الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

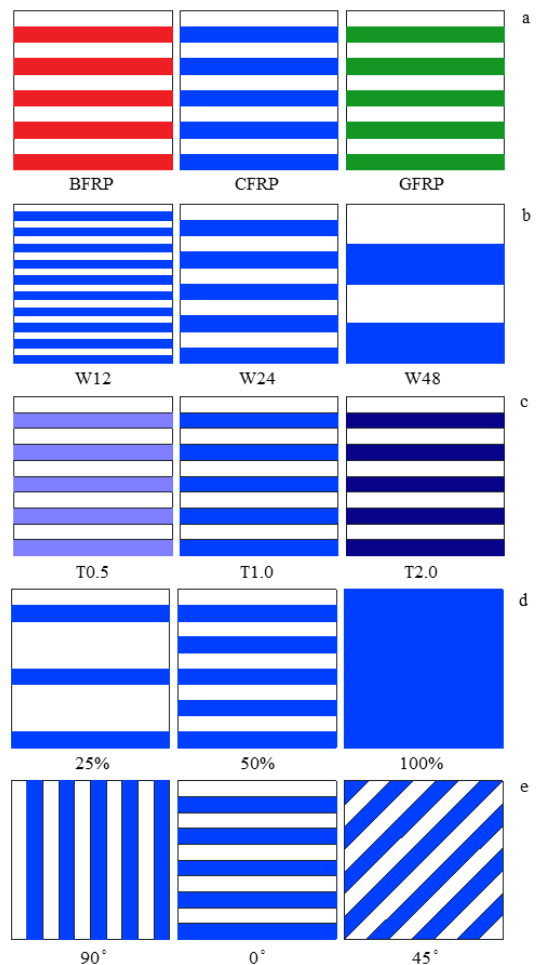
Fig. 7. Effect of fiber type on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour



شکل ۴. الف) کانتور تغییر شکل و ب) نمودار انرژی‌های دیوار

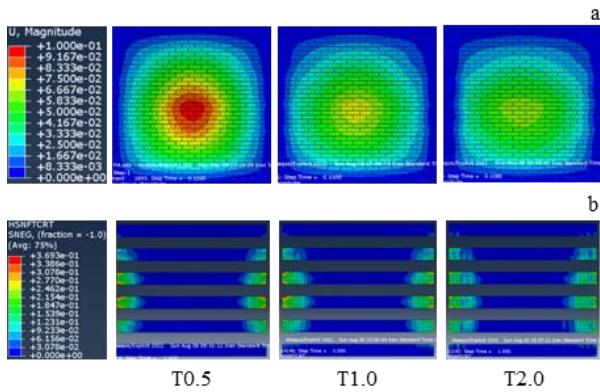
Fig. 4. a) Deflection and b) Energy diagram of unreinforced wall



شکل ۵. چیدمان‌های مختلف تقویت برای مطالعه اثر پارامترهای:

الف) جنس الیاف، ب) عرض، ج) ضخامت، د) سطح پوشش، ه) زاویه

Fig. 5. Different reinforcement arrangements to study the effect of parameters: a) type of fibers, b) strip width, c) strip thickness, d) coverage percentage, e) strip angle



شکل ۱۱. تاثیر ضخامت نوار بر:

الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 11. Effect of strip thickness on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour

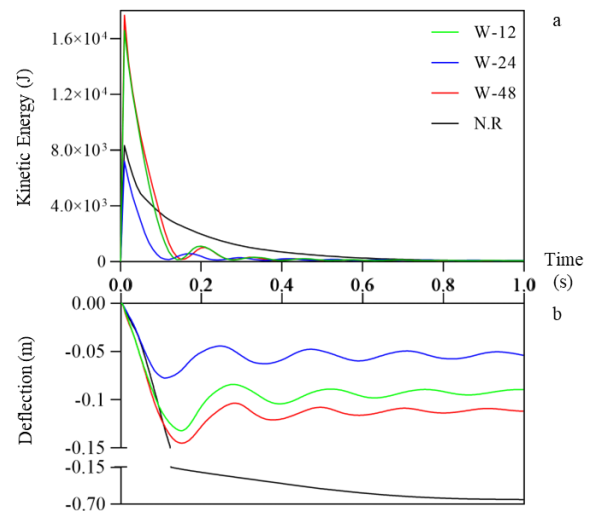
### ۳-۵- بررسی اثر عرض نوار

برای بررسی پارامتریک اثر عرض ورق‌های FRP، از نوار با عرض‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ سانتی‌متری به ترتیب برای مقاوم‌سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی ضخامت، سطح پوشش، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد، افقی و کربن می‌باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه‌جایی مرکز آن برای عرض‌های مختلف نوار، در شکل (۸) نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل (۸)، جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده با نوارهای FRP با عرض متوسط (۲۴ سانتی‌متر) حدوداً نصف جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده به کمک نوار با عرض‌های ۱۲ سانتی‌متر و ۴۸ سانتی‌متر می‌باشد و حدیثتر انرژی جنبشی برای عرض‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۱۶/۵۸، ۷/۱۹ و ۱۷/۶۸ کیلوژول می‌باشد. هم‌چنین بر مبنای کانتورهای جابه‌جایی مرکز دیوار و خرابی نوارهای FRP که در شکل (۹) نشان داده شده‌است، عرض ۲۴ سانتی‌متری نوارهای FRP عملکرد بهتری را نسبت به دیگر عرض‌های نوار از خود نشان داده‌است.

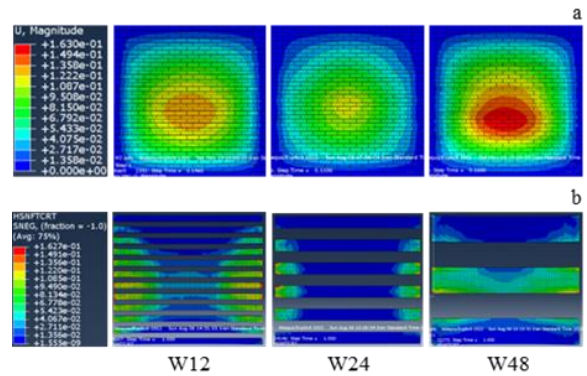
### ۴-۵- بررسی اثر ضخامت نوار

برای بررسی پارامتریک اثر ضخامت ورق‌های FRP، از نوار با ضخامت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متری استفاده شده‌است. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص است، دیوار مقاوم‌شده به وسیله نوار با ضخامت‌های مختلف، تقریباً انرژی جنبشی یکنواختی را تجربه کرده اما جابه‌جایی مرکز دیوار با ضخامت نوارهای FRP رابطه مستقیم دارد. هم‌چنین با توجه به شکل (۱۱)، خرابی نوارهای FRP با ضخامت‌های ۰/۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر تقریباً یکسان بوده که از خرابی نوار با ضخامت ۲ میلی‌متر کمتر است که منطقی می‌باشد.



شکل ۸. تاثیر عرض نوار بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 8. Effect of strip width on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

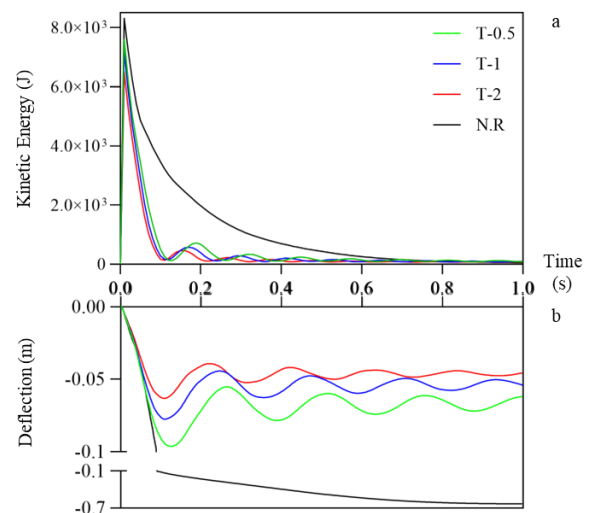


شکل ۹. تاثیر عرض نوار بر:

الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 9. Effect of strip width on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour



شکل ۱۰. تاثیر ضخامت نوار بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 10. Effect of strip thickness on: a) kinetic energy, b) Time history deformation



### ۵-۵- بررسی اثر درصد پوشش

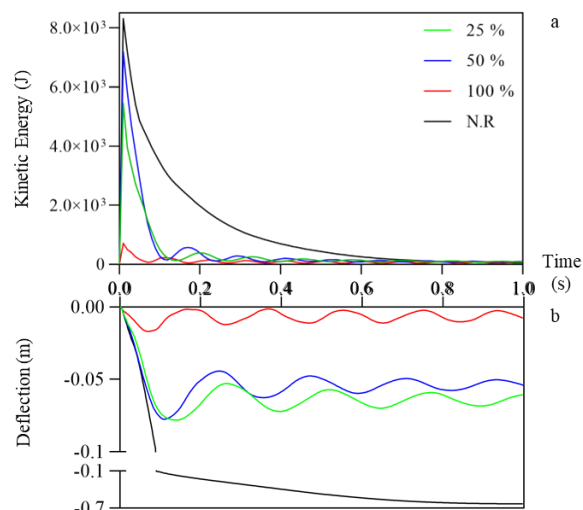
برای بررسی پارامتریک اثر مساحت ورق‌های FRP، از مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سطح پوشش به ترتیب برای مقاوم‌سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، افقی و کربن می‌باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن، در شکل (۱۲) و شکل (۱۳) نیز کانتور جابه‌جایی و خرابی پوشش FRP را برای مساحت‌های مختلف نوار نشان داده شده‌است.

همانطور که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، با افزایش سطح پوشش نوارهای FRP از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، تفاوت چندانی در جابه‌جایی مرکز ایجاد نمی‌شود. اما وقتی که سطح مقاوم‌سازی به روش FRP به ۱۰۰ درصد می‌رسد (یعنی پوشش کل دیوار)، حدبیشتر جابه‌جایی مرکز دیوار به حدود ۱۷ میلی‌متر می‌رسد. علاوه بر این، انرژی جنبشی و خرابی پوشش FRP هم به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با این حال پوشش این درصد از سطح دیوار صرفه اقتصادی خوبی ندارد.

### ۵-۶- بررسی اثر زاویه نوار

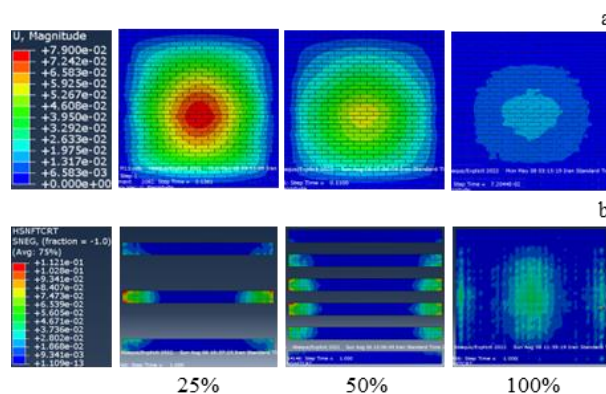
برای بررسی پارامتریک اثر زاویه ورق‌های FRP، از نوار با زاویه‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه‌ای به ترتیب برای مقاوم‌سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده‌است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد و کربن می‌باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه‌جایی مرکز آن برای زاویه‌های مختلف نوار، در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است.

حدبیشتر انرژی جنبشی برای نوار با زاویه‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۷/۱۹، ۶/۴۱ و ۷/۲۷ می‌باشد. علاوه بر این همان طور که در شکل (۱۴-ب) مشخص است، چیدمان افقی نوارهای FRP عملکرد قابل قبول‌تری را نسبت به دیگر چیدمان‌ها از خود نشان داده به طوری که جابه‌جایی مرکز دیوار با نوارهای افقی، با کاهشی ۳۶ درصدی و ۵۸ درصدی به ترتیب نسبت به چیدمان‌های مورب و قائم داشته‌است. دلیل این پدیده را می‌توان به پوشش کامل درزهای افقی و سرتاسری آجرها توسط نوارهای افقی نسبت داد. هم‌چنین از شکل (۱۵) هم می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۱۲- تاثیر درصد پوشش بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

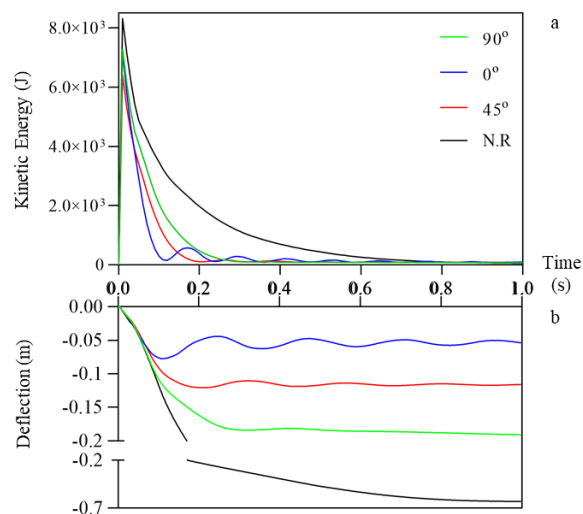
Fig. 12. Effect of coverage percentage on: a) kinetic energy, b) Time history deformation



شکل ۱۳. تاثیر درصد پوشش بر:

الف) کانتور جابجایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

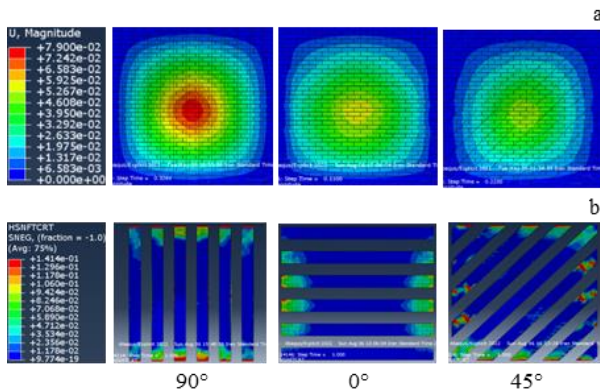
Fig. 13. Effect of coverage percentage on: a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour



شکل ۱۴. تاثیر زاویه نوار بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 14. Effect of strip angle on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

کارآمد بوده به طوری که جابه‌جایی مرکز دیوار حداقل ۷۰ درصد و انرژی آن تا ۹۰ درصد نیز کاهش داشته‌است. ۴- در نهایت آرایش بهینه پیشنهادی، استفاده از نوارهای CFRP به صورت افقی، با ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۲۴ سانتی‌متر و پوشش ۵۰ درصد سطح می‌باشد. این آرایش توانسته خیز قائم دیوار را از ۶۳/۱ سانتی‌متر به ۷/۷ سانتی‌متر کاهش دهد و چیزی حدود ۱۳ درصد از انرژی حاصل از موج انفجار را دمپ کند.



شکل ۱۵. تاثیر جنس فیبر بر:

(الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، (ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 15. Effect of strip angle on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour

جدول ۶. خلاصه نتایج جابه‌جایی نهایی مرکز و حدیشت انرژی جنبشی دیوار

Table 6. Summary results of residual displacement and maximum kinetic energy of the wall

	Sample	Deflection (cm)	Deflection Change (%)	Max Kinetic Energy (kJ)	Kin. Energy Change (%)
Fiber Type	N.R	63.1	-	8.31	-
	GFRP	7.8	-88	7.74	-7
	CFRP	7.7	-88	7.19	-13
Strip Width	BFRP	10.7	-83	7.70	-7
	12	13.2	-79	16.58	+99
	24	7.7	-88	7.19	-13
Strip Thickness	48	14.5	-77	17.67	+113
	0.5	9.6	-85	7.60	-9
	1.0	7.7	-88	7.19	-13
Coverage Percentage	2.0	6.3	-90	6.50	-22
	25	7.8	-88	5.45	-34
	50	7.7	-88	7.19	-13
Strip Angle	100	1.7	-97	7.09	-91
	0	7.7	-88	7.19	-13
	45	12.1	-81	6.41	-23
	90	18.4	-71	7.28	-12

### قدردانی نویسندگان

در انجام این پژوهش، از سوی مراکز یا دانشگاه‌ها حمایتی

زاویه نوار تاثیر زیادی بر خرابی نوارها ندارد و تقریباً در هر چیدمانی، دو طرف انتهایی نوارها دچار خرابی کششی می‌شود.

### ۷-۵- جمع‌بندی نتایج

در این تحقیق ۱۶ حالت در نظر گرفته شده که اولین حالت بدون تقویت بوده که محل‌های خرابی کاملاً مشخص می‌باشد. سپس آثار پارامترهای مهم مقاوم‌سازی به کمک نوارهای FRP مورد تحلیل قرار گرفت که خلاصه نتایج بدست آمده در این پژوهش در جدول (۶) ارائه شده‌است.

در جدول (۶)، برای هر پارامتر، بهینه‌ترین حالت از نظر کاهش انرژی جنبشی و خیز دیوار مشخص شده‌است. در واقع می‌توان گفت که انتخاب پارامتر مناسب به معنای ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف‌پذیری دیوار می‌باشد.

### ۶- نتیجه‌گیری

آشنایی با روش مقاوم‌سازی برای تقویت دیوارهای بنایی با استفاده از پوشش FRP و همچنین تاثیر پارامترها و آرایش‌های مختلف بر رفتار دیوار تقویت‌شده با این روش، دستاورد اصلی این تحقیق به شمار می‌آید. به سخن دیگر، یافتن میزان تاثیر عرض، ضخامت، مساحت، زاویه و جنس فیبر ورق‌های FRP بر جابه‌جایی مرکز دیوار و انرژی جنبشی آن، مدنظر نویسندگان بوده‌است. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان فهمید که آرایشی برای تقویت دیوار بنایی به کمک نوارهای FRP مناسب است که سطوح مستعد خرابی را بیشتر پوشش دهد که در دیوارهای بنایی این سطوح، اتصالات ملات می‌باشد. بنابراین آرایش افقی در مقایسه با آرایش قائم و مورب عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

۲- با توجه به نمودارهای هیستریکال جابه‌جایی مرکز دیوار و انرژی جنبشی دیوار می‌توان دریافت که رفتار دیوارهای مقاوم‌شده بر خلاف دیوار مقاوم‌نشده به صورت رفت و برگشتی است. دلیل این امر این است که دیوار تقویت‌نشده به علت ضعیف بودن نسبت به انفجار موردنظر، به صورت محسوسی رفتار پالسی دارد.

۳- نتایج عددی نشان می‌دهد این روش مقاوم‌سازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار در نظر گرفته شده در این پژوهش

صورت نگرفته است.

### سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

### تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن

وجود ندارد.

### منابع مالی

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

### References

- [1] Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A. and Varum, H., 2016. Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls. *Engineering Structures*, 111, pp.48-63.
- [2] Shamim, S., Ahmad, S. and Khan, R.A., 2020. An investigation on response of blast load on masonry structure. In *Smart Cities—Opportunities and Challenges: Select Proceedings of ICSC 2019* (pp. 527-537). Springer Singapore.
- [3] Shamim, S., Ahmad, S. and Khan, R.A., 2023. Numerical study on dynamic response of hollow and cavity type clay brick masonry infill panels subjected to blast loading. *Engineering Failure Analysis*, 146, p.107104.
- [4] Badshah, E., Naseer, A., Ashraf, M. and Ahmad, T., 2021. Response of masonry systems against blast loading. *Defence Technology*, 17(4), pp.1326-1337.
- [5] Chiquito, M., López, L.M., Castedo, R., Pérez-Caldentey, A. and Santos, A.P., 2019. Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment. *Engineering Structures*, 201, p.109805.
- [6] Shamim, S., Khan, R.A. and Ahmad, S., 2022, May. Fragility analysis of masonry wall subjected to blast loading. In *Structures* (Vol. 39, pp. 1016-1030). Elsevier.
- [7] Hatfield, J.E. and Davidson, J.S., 2022. Fragmentation and hazard analysis of brittle materials under far-field blast loading. *Advances in Structural Engineering*, 25(7), pp.1535-1548.
- [8] Dong, Z., Ji, J., Liu, Z., Wu, C., Wu, G., Zhu, H. and Zhang, P., 2023. I-shaped ECC/UHPC composite beams reinforced with steel bars and BFRP sheets. *Sustain. Struct*, 3, p.000022.
- [9] Yan, J., Liu, Y., Xu, Z., Li, Z. and Huang, F., 2020. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 146, p.103720.
- [10] Li, H., Chen, B., Fei, B., Li, H., Xiong, Z., Lorenzo, R., Fang, C. and Ashraf, M., 2022. Mechanical properties of aramid fiber reinforced polymer confined laminated bamboo lumber column under cyclic loading. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(5), pp.1057-1070.
- [11] Elshazli, M.T., Saras, N. and Ibrahim, A., 2022. Structural response of high strength concrete beams using fiber reinforced polymers under reversed cyclic loading. *Sustain. Struct*, 2(2), p.000018.
- [12] Liang, R. and Hota, G., 2021. Development and evaluation of load-bearing fiber reinforced polymer composite panel systems with tongue and groove joints. *Sustainable Structures*, 1(2).
- [13] Olonisakin, K., He, S., Yang, Y., Wang, H., Li, R. and Yang, W., 2022. Influence of stacking sequence on mechanical properties and moisture absorption of epoxy-based woven flax and basalt fabric hybrid composites. *Sustain. Struct*, 2, p.16.
- [14] Hosseini, M., Jian, B., Li, H., Yang, D., Wang, Z., Feng, Z., Shen, F., Zhang, J., Lorenzo, R., Corbi, I. and Corbi, O., 2022. A Review of Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforced concrete composite column members modelling and analysis techniques. *Journal of Renewable Materials*, 10(12), pp.3243-3262.
- [15] Wilt, J., Liang, R., GangaRao, H. and Mostoller, J., 2023. Structural responses of FRP sheet piles under cantilever loading. *Sustainable Structures*, 3(1).
- [16] Jacques, E., 2011. *Blast retrofit of reinforced concrete walls and slabs*. University of Ottawa (Canada).
- [17] Orton, S.L., Chiarito, V.P., Minor, J.K. and Coleman, T.G., 2014. Experimental testing of CFRP-strengthened reinforced concrete slab elements loaded by close-in blast. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), p.04013060.
- [18] Mutalib, A.A. and Hao, H., 2011. Numerical analysis of FRP-composite-strengthened RC panels with anchorages against blast loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(5), pp.360-372.
- [19] Elanchezhian, C., Ramnath, B.V. and Hemalatha, J., 2014. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures. *Procedia Materials Science*, 6, pp.1405-1418.
- [20] Yavartanoo, F. and Kang, T.H.K., 2022. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering*, 49, p.103993.
- [21] Tabatabaei, Z.S., Volz, J.S., Baird, J., Gliha, B.P. and Keener, D.I., 2013. Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete

- panels exposed to blast loading. *International journal of impact engineering*, 57, pp.70-80.
- [22] Hosseini, M., Jian, B., Zhang, J., Li, H., Lorenzo, R., Hosseini, A., Ghosh, P., Shen, F., Yang, D. and Wang, Z., 2023. Numerical Study on the Behaviour of Hybrid FRPs Reinforced RC Slabs Subjected to Blast Loads. *Journal of Renewable Materials*, 11(9), pp.1-15.
- [23] Reifarth, C., Castedo, R., Santos, A.P., Chiquito, M., López, L.M., Pérez-Caldentey, A., Martínez-Almajano, S. and Alañon, A., 2021. Numerical and experimental study of externally reinforced RC slabs using FRPs subjected to close-in blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 156, p.103939.
- [24] Gemi, L., Madenci, E., Özkılıç, Y.O., Yazman, Ş. and Safonov, A., 2022. Effect of fiber wrapping on bending behavior of reinforced concrete filled pultruded GFRP composite hybrid beams. *Polymers*, 14(18), p.3740.
- [25] Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y.O., Gemi, L. and Arslan, M.H., 2020. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, p.112561.
- [26] Abdulla, K.F., Cunningham, L.S. and Gillie, M., 2017. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, pp.349-365.
- [27] D'Altri, A.M., de Miranda, S., Castellazzi, G. and Sarhosis, V., 2018. A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels. *Computers & Structures*, 206, pp.18-30.
- [28] Shin, D.K., Kim, H.C. and Lee, J.J., 2014. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three point bending. *Composites Part B: Engineering*, 56, pp.397-407.
- [29] KARLOS, V. and SOLOMOS, G., 2013. Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. Administrative Arrangement No JRC 32253-2011 with DG-HOME Activity A5-Blast Simulation Technology Development.
- [30] Børvik, T., Hanssen, A.G., Langseth, M. and Olovsson, L., 2009. Response of structures to planar blast loads—A finite element engineering approach. *Computers & Structures*, 87(9-10), pp.507-520.
- [31] Motovali Emami, S.M., Mohammadi, M. and Lourenço, P.B., 2017. Equivalent diagonal strut method for masonry walls in pinned connection and multi-bay steel frames. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 19(4), pp.299-311.
- [32] Raza, A., Ali, B., Nawaz, M.A. and Ahmed, I., 2020, October. Structural performance of FRP-RC compression members wrapped with FRP composites. In *Structures* (Vol. 27, pp. 1693-1709). Elsevier.
- [33] Chiquito, M., Castedo, R., Santos, A.P., López, L.M. and Pérez-Caldentey, A., 2021. Numerical modelling and experimental validation of the behaviour of brick masonry walls subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 148, p.103760.
- [34] Szyniszewski, S. and Krauthammer, T., 2012. Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*, 42, pp.142-153.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Yazdani, M. and Hoseini, S. A., 2025. Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.87-99.

DOI: 10.22034/25.3.7





## Content

<b>Article Title and Authors Names</b>	<b>Page</b>
<b>Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers</b> Ramin Tabatabaei Mirhosseini, Ata Falahatnejad	<b>7</b>
<b>Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer</b> Sadegh Shahidi, Meysam Bayat, Sayed Alireza Zarei	<b>19</b>
<b>Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods</b> Mohammadhossein Ahmadian Khameneh, Hassan Afshin, Mehrdad Emami Tabrizi, Yasser Alilou, Gholamreza Qudsi Sharif	<b>33</b>
<b>The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using “Cylindrical chamber” and “Pull-off” test methods</b> Mahmood Naderi, Sardarwali Din, Ali Saberi Varzaneh	<b>47</b>
<b>Investigation of the effect of long-term aging on the high- and low-temperature performance of bitumen</b> Mohammad Mehdi Dadaei, Pouria Hajikarimi, Mohammad Rahi, Mehdi Dastoori Razaz, Behnoosh Tahmasbi, Fereidoon Moghadas Nejad	<b>61</b>
<b>Selection of the Most Optimal Oxygen Capturing Compound in the Nitrate Removal Process for use in Permeable Reactive Bio Barriers</b> Mohammad Ali Hosseini, Nader Mokhtarani, Hossein Ganjidoust	<b>73</b>
<b>Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading</b> Mahdi Yazdani, Seyed Ahmad Hosseini	<b>87</b>

## 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](mailto: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.Toousi 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.	<b>Aghakoucheh</b> , Tarbiat Modares University	A.	<b>Fakhimi</b> , Tarbiat Modares University
M.	<b>Ahmadi</b> , Tarbiat Modares University	A.R.	<b>Ghari</b> , Quran University of Isfahan
A.	<b>Pak</b> , Sharif University	Gh.R.	<b>Ghodrati Amiri</b> , Elm O San'at University
N.	<b>Khaji</b> , Tarbiat Modares University	A.H.	<b>Ghazviniyan</b> , Tarbiat Modares University
S.	<b>Dordaei</b> , Tarbiat Modares University	A.	<b>Ghanbari</b> , Kharazmi Univesity
S.M.	<b>Zahraei</b> , Tehran University	A.	<b>Kadousi</b> , Tarbiat Modares University
Sh.	<b>Shahbeik</b> , Tarbiat Modares University	Sh.P.	<b>Kahouni</b> , Amir Kabir University
H.	<b>Shakib</b> , Tarbiat Modares University	M.	<b>Kokabi</b> , Tarbiat Modares University
M.R.	<b>Ameri</b> , University of Shiraz	Sh.	<b>Maleki</b> , Sharif University
A.	<b>Arabzadeh</b> , Tarbiat Modares University	J.	<b>Vaseghi Amiri</b> , Babol Noshirvani University
B.	<b>Asgariyan</b> , Khajeh Nasir Toosi University	M.A.	<b>Hadiyanfard</b> , Shiraz University of Technology
M.N.	<b>Ouliyaei</b> , Tarbiat Modares University	Sh.D.	<b>Yasrebi</b> , Tarbiat Modares University

<b>Technical Editor:</b>	Zahra Azizi	<b>Executive Expert:</b>	Zahra khoiniha
<b>English Editor:</b>	Fateme Torabi	<b>Type and Layout:</b>	Masoud Sarvari

Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

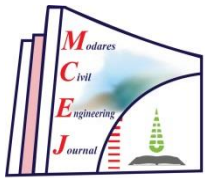
Post Box: 14117-13116.

Tel & Fax: +98 (21) 82884950

Email: [civiljournal@modares.ac.ir](mailto:civiljournal@modares.ac.ir)

This Journal is indexed in the ISC and Scientific Information Database.

[www.ISC.ir](http://www.ISC.ir) & [www.SID.ir](http://www.SID.ir)



# Modares Civil Engineering Journal



Scientific Journal

Volume 25, Issue 3, 2025 (Serial: 83)

Executive Manager: Farhad Daneshjoo

Founder and Publisher: Tarbiat Modares University

- **Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers**  
Ramin Tabatabaei Mirhosseini, Ata Falahatnejad
- **Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer**  
Sadegh Shahidi, Meysam Bayat, Sayed Alireza Zarei
- **Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods**  
Mohammadhossein Ahmadian Khameneh, Hassan Afshin, Mehrdad Emami Tabrizi, Yasser Alilou, Gholamreza Qudsi Sharif
- **The relationship between permeability coefficient and surface strength of concrete under freeze-thaw cycles using “Cylindrical chamber” and “Pull-off” test methods**  
Mahmood Naderi, Sardarwali Din, Ali Saberi Varzaneh
- **Investigation of the effect of long-term aging on the high- and low-temperature performance of bitumen**  
Mohammad Mehdi Dadaei, Pouria Hajikarimi, Mohammad Rahi, Mehdi Dastoori Razaz, Behnoosh Tahmasbi, Fereidoon Moghadas Nejad
- **Selection of the Most Optimal Oxygen Capturing Compound in the Nitrate Removal Process for use in Permeable Reactive Bio Barriers**  
Mohammad Ali Hosseinian, Nader Mokhtarani, Hossein Ganjidoust
- **Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading**  
Mahdi Yazdani, Seyed Ahmad Hosseini

Journal Address: Tarbiat Modares University, Shahid Chamran and Jalal-e-Alahmad highways intersection, Tehran, Iran. PO Box 14117-13116.