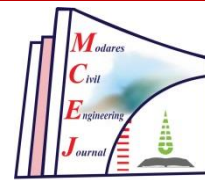




دانشگاه تربیت مدرس

دو ماهنامه

مهندسی عمران مدرّس



دوره ۲۶، شماره ۲، سال ۱۴۰۵ (شماره پیاپی: ۸۸)

نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول: فرهاد دانشجو

- ارزیابی کارایی روابط تجربی و مدل‌سازی عددی در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای کلید پیاپی مستطیلی با استفاده از روش پاسخ سطح
اکبر صفرزاده، هوشنگ ولایتی
- نگرش تحلیلی بر تأثیر هندسه و پیکربندی موضعی سازه‌های شبکه قطری بر عملکرد و مؤلفه استحکام تاب‌آوری لرزه‌ای
مریم خلیج‌زاده، صفورا مرشد شکرچی، افشین مشکوه‌الدینی، علی معصومی
- پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح ریل - جاده با بهره‌گیری از مدل پواسون
سید علی مسیبی، محمد حسینی، رضا محمدحسینی
- معرفی سیستم نوین پیشرفته برای شیرین‌سازی آب دریا با استفاده از خط لوله نمک‌زدایی و انتقال بخار به منطقه هدف: مطالعه موردی برای شهر چالوس
کوشا آقازاده، رضا عطارنژاد
- حل مسائل ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزای مرزی مختلط فوریه
مهدیه بهرام‌پور، صالح حمزه جواران، سعید شجاعی
- بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن مسلح شده با الیاف بازالتی تاییده
حسام‌الدین نساج مقدم، فرشید جندقی علائی
- بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند پاششی حاوی رس‌های کلسینه شده
سجاد میرزاحمدی، مسعود سلطانی محمدی

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

دفتر نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

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

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

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

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

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

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

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

نشانی دفتر مجله:

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

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

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

به نام آن که جان را فکرت آموخت.



مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۲، سال ۱۴۰۵

اعتبار علمی - پژوهشی

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

راهنمای تهیه و تدوین مقالات

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

۱- زبان رسمی مجله، فارسی است.

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

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

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

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

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

تبصره ۲: مقالات ترجمه، پذیرفته نمی‌شود.

۴- مقالات ارسالی باید دارای بخش‌های زیر باشند:

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

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

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

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

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

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

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

نشانی دفتر مجله:

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

دفتر مجله علمی مهندسی عمران مدرس

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

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

پست الکترونیکی: civiljournal@modares.ac.ir

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

صفحه	عنوان مقاله و نام نویسندگان
۷	ارزیابی کارایی روابط تجربی و مدل سازی عددی در پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با استفاده از روش پاسخ سطح اکبر صفرزاده، هوشنگ ولایتی
۱۹	نگرش تحلیلی بر تأثیر هندسه و پیکربندی موضعی سازه های شبکه قطری بر عملکرد و مؤلفه استحکام تاب آوری لرزه ای مریم خلج زاده، صفورا مرشد شکرچی، افشین مشکوه الدینی، علی معصومی
۳۳	پیش بینی تعداد تصادفات در گذرگاه های هم سطح ریل - جاده با بهره گیری از مدل پواسون سید علی مسیبی، محمد حسینی، رضا محمدحسینی
۴۹	معرفی سیستم نوین پیشرفته برای شیرین سازی آب دریا با استفاده از خط لوله نمک زدایی و انتقال بخار به منطقه هدف: مطالعه موردی برای شهر چالوس کوشا آقازاده، رضا عطارنژاد
۶۵	حل مسائل ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزای مرزی مختلط فوریه مهدیه بهرامپور، صالح حمزه جواران، سعید شجاعی
۷۹	بررسی آزمایشگاهی ویژگی های مکانیکی و دوام بتن مسلح شده با الیاف بازالتی تابیده حسام الدین نساج مقدم، فرشید جندقی علائی
۹۵	بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند پاششی حاوی رس های کلسینه شده سجاد میرزامحمدی، مسعود سلطانی محمدی

Assessing Experimental Relationships and Numerical Modeling for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weirs using Response Surface Methodology

Akbar Safarzadeh^{1*} , Houshang Velayati²

1. Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. MSc of Hydraulic Structures, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

This study examines the hydraulic relationships provided for piano-key weirs. The hydraulic relationships presented by researchers in various sources include multiple geometric parameters in some cases, while others focus only on a limited number of these parameters. In the first step, using the RSM-CCD method and data from Anderson's study (2011), the discharge coefficient relations were derived in the relative head ranges of 0.1-0.2 and 0.2-0.9, with a total of 18 data points. In the second step, through laboratory and numerical model designs, the derived relationship using the RSM-CCD method was compared and evaluated against other hydraulic relationships for piano-key weirs. This comparison was done using statistical indices and the discharge-head ratio charts. The statistical index values obtained from generalizing the discharge coefficient relation using the RSM-CCD method to Anderson's (2011) 115 laboratory data points were $R^2 = 0.9985$, $MAE = 0.0034$, and $RMSE = 0.0041$, indicating the accuracy of this method, despite using fewer data points. Evaluation of the hydraulic relationships presented for predicting the discharge coefficient of the physical model of the studied piano-key weir, using statistical indices, shows the good performance of the relationships by Liet-Ribeiro et al. (2012) and Michaels (2012). The R^2 , MAPE, and RMSE values for these two relationships are 0.99, 5.05%, 0.063, and 0.96, 6.8%, 0.071, respectively. Comparison of the discharge-head ratio charts derived from the RSM-CCD method and laboratory models shows that the accuracy of this relationship increases with increasing relative flow head. The MAPE values for the relative head ranges of 0.1-0.3 and 0.3-0.8 were 11% and 1.25%, respectively, which can be considered when predicting discharge at high relative heads.

Review History

Received: Mar 25, 2025

Revised: Aug 9, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Piano key weir,
Discharge coefficient
RSM-CCD
Experimental model
Numerical model

* Corresponding Author Email: safarzadeh@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0003-4515-2078

ارزیابی کارایی روابط تجربی و مدل سازی عددی در پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با استفاده از روش پاسخ سطح

اکبر صفرزاده*^۱، هوشنگ ولایتی^۲

۱. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این تحقیق روابط هیدرولیکی ارائه شده برای سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی قرار گرفت. روابط تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران در برخی منابع شامل پارامترهای هندسی متعدد بوده و در برخی منابع تنها شامل بررسی تعداد محدودی از این پارامترها می باشد. در گام اول با استفاده از روش RSM-CCD و داده های مطالعه اندرسون (۲۰۱۱) روابط ضریب دبی در بازه هد نسبی ۰/۱-۰/۲ و ۰/۲-۰/۹ در مجموع با ۱۸ سری داده ارائه شده است. در گام دوم با طراحی مدل های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی، رابطه استخراج شده با استفاده از روش RSM-CCD با دیگر روابط هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از شاخص های آماری و در قالب نمودار ضریب دبی هد نسبی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. مقادیر شاخص های آماری حاصل از تعمیم رابطه ضریب دبی به روش RSM-CCD، به ۱۱۵ داده آزمایشگاهی اندرسون (۲۰۱۱) به ترتیب برای R^2 ، MAE، RMSE، ۰/۹۹۸۵، ۰/۰۳۴، و ۰/۰۴۱ می باشد که نشان دهنده دقت این روش علی رغم استفاده از تعداد داده کمتر است. ارزیابی روابط هیدرولیکی ارائه شده برای پیش بینی ضریب دبی مدل فیزیکی سرریز کلید پیانویی مطالعه شده در این تحقیق با استفاده از شاخص های آماری نشان دهنده عملکرد مطلوب روابط لیت ریبرو و همکاران (۲۰۱۲) و میشلز (۲۰۱۲) است. مقادیر R^2 ، MAPE، RMSE به ترتیب برای دو رابطه ذکر شده عبارتند از ۰/۹۹، ۵/۰۵٪، ۰/۰۶۳ و ۰/۹۶، ۶/۸٪، ۰/۰۷۱ می باشد. مقایسه نمودار ضریب دبی هد نسبی استخراج شده برای روابط ضریب دبی حاصل از روش RSM-CCD و مدل آزمایشگاهی، نشان دهنده افزایش دقت این رابطه با افزایش هد نسبی جریان است به گونه ای که مقادیر MAPE محاسبه شده برای بازه هد نسبی ۰/۱-۰/۳ و بازه هد نسبی ۰/۸-۰/۳ به ترتیب ۱۱٪ و ۱/۲۵٪ است که می تواند در پیش بینی ضریب دبی در هد نسبی بالا مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی

سرریز کلید پیانویی

ضریب دبی

RSM-CCD

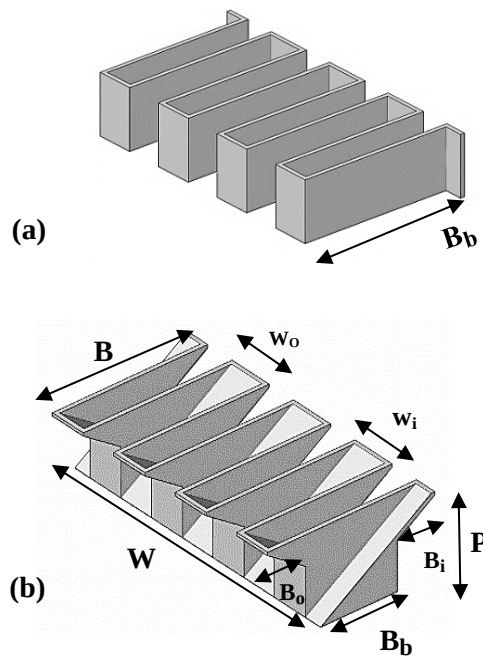
مدل آزمایشگاهی

مدل عددی

۱- مقدمه

دست و باعث صرفه جویی در میزان حجم بتن ریزی و هزینه ساخت سرریز می شوند. در این مدل از سرریزها بر خلاف سرریزهای کنگره ای، کلیدهای ورودی به صورت سطح شیب دار یک در میان به سمت داخل و خارج مخزن می باشد (شکل ۱). این

سرریزهای کلید پیانویی نوع تکامل یافته سرریزهای کنگره ای می باشند که علی رغم کاهش عرض ساختگاه سرریز، طول کلی تاج سرریز را حفظ کرده (بواسطه افزودن شیروانی در بالادست و پایین



شکل ۱. پارامترهای هندسی (a) سرریز کنگره‌ای، (b) سرریز کلید پیانویی
Fig. 1. Geometrical parameters of (a) Labyrinth weir, (b) Piano key weir

تعیین رابطه ضریب دبی برای سرریزهای کلید پیانویی همواره از موضوعات مهم پژوهشی در باره این مدل از سرریزها بوده است. کبیری سامانی و جواهری (2012) با استفاده از داده‌های مدل آزمایشگاهی بدست‌آمده از مطالعه هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیانویی در محدوده پارامترهای هندسی معین برای محاسبه میزان دبی عبوری، به منظور تعیین ضریب دبی (C_d) برای جریان در حالت رژیم آزاد، رابطه (۱) را پیشنهاد کردند که دقت این رابطه توسط پژوهشگران مذکور ۹۸ درصد گزارش شده است [6]:

$$C_{dw} = 0.121 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.675} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.377} \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.426} \left(\frac{B}{P} \right)^{0.306} \quad (1)$$

$$\exp \left(1.504 \frac{B_o}{B} + 0.093 \frac{B_i}{B} \right) + 0.606$$

لیت ریبرو و همکاران (2012) با بررسی ۴۹ مدل مختلف هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A روابطی را برای محاسبه میزان دبی افزایشی ارائه کردند. این رابطه نشان‌دهنده نسبت دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی به سرریز لبه تیز خطی است. این روابط به صورت روابط (۲، ۳) در نظر گرفته شده است [7]:

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_s} = \frac{C_p L \sqrt{2gH_T^3}}{0.42W \sqrt{2gH_T^3}} = f \left(\frac{L}{W} \right) \quad (2)$$

مدل از سرریزها برای اولین بار توسط بلانک از دانشگاه بریسکا الجزایر و لمپیر در موسسه هایدروکوپ فرانسه در سال ۲۰۰۱ طراحی شد. اولین مدل از سرریزهای کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ و توسط کمپانی EDF، به منظور بهسازی سد گلورس در فرانسه ساخته شد [1]. طبق شکل (b-۱)، سرریزهای کلید پیانویی دارای پارامترهای هندسی متعدد می‌باشند که به منظور بررسی تاثیر هر کدام از این پارامترها بر عملکرد سرریز، به صورت پارامترهای بی بعد هندسی مانند هد نسبی ($\frac{H_t}{P}$)، طول نسبی ($\frac{L}{W}$)، نسبت عرض کلیدها ($\frac{W_i}{W_o}$)، نسبت طول شیروانی‌ها ($\frac{B_o}{B_i}$)، در نظر گرفته می‌شوند. لیت ریبرو و همکاران (2013)، مقدار ایده‌آل برای طول نسبی ($\frac{L}{W}$) را ۵ در نظر گرفته‌اند. همچنین بررسی لیت ریبرو و همکاران (2013)، نشان می‌دهد که مقدار $\frac{W_i}{W_o}$ برای سرریزهای کلید پیانویی بهره برداری شده در بازه ۱ تا ۱/۵ می‌باشد [2]. ایریکوم و همکاران (2014) برای جریان با هد پایین و طول نسبی معادل ۵، مقدار $\frac{B_o}{B_i}$ برای حالتی که دارای بیشترین بازده است را ۳ در نظر گرفتند [3].

مطابق با تحقیقات اومانه و لمپیره (2006)، در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد که عبارت است از جریان نزدیک شونده که وارد کلیدهای ورودی شده و جریان از تاج پایین دست مشابه با یک سرریز لبه تیز با بدنه شیب‌دار به صورت ریزشی به سمت پایین تخلیه می‌شود. جریان دوم نیز در کلیدهای خروجی تشکیل شده بدین صورت که جریان از روی تاج بالادست به سمت پایین دست بخش شیب دار تخلیه می‌شود [4].

صفرزاده و نوروزی (2013)، وجود دیوارهای قائم در انتهای کلیدهای سرریزهای کنگره‌ای را باعث ایجاد ناحیه چرخشی جریان و افت انرژی و کاهش راندمان این مدل از سرریزها معرفی کردند. این پژوهشگران همچنین هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی، سرریزهای کنگره‌ای و سرریزهای کنگره‌ای با کلیدهای شیب‌دار را مقایسه کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی به علت حذف فشردگی جریان در کلیدهای ورودی و توزیع بهتر آن روی تاج‌های کناری در مقایسه با دو نوع دیگر بیشتر است [5].

$$C_d = -4.0038 \left(\frac{H}{P} \right) + 0.338 \left(\frac{L}{W} \right) + 0.569$$

$$\frac{H}{P} \leq 0.249, \frac{L}{W} \geq 5.5 \quad (9)$$

$$C_d = -5.1737 \left(\frac{H}{P} \right) + 0.2851 \left(\frac{L}{W} \right) + 1.185$$

$$\frac{H}{P} > 0.249 \quad (10)$$

$$C_d = -2.4112 \left(\frac{H}{P} \right) + 0.1944 \left(\frac{L}{W} \right) + 1.03$$

کروکستون و همکاران (2018)، با استفاده از نتایج مطالعه آزمایشگاهی اندرسون و تالیس (2011)، رابطه (۱۱) را برای پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی ارائه دادند. این رابطه به صورت تابعی از ضرایب معین برای هندسه مشخصی از سرریز و هد نسبی جریان می باشد که برای هندسی ۰/۹-۰/۱ و سرریز کلید پیانویی نوع A معتبر می باشد [10].

$$C_d = \left(a_1 + b_1 \left(\frac{H}{P} \right) + \frac{C_1 P}{H} \right)^{-1} \quad (11)$$

سی سرو و دلیس (2013) به منظور ارزیابی اثر طول شیروانی بر عملکرد سرریزهای کلید پیانویی مدل های نوع A, B, C, را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. سپس با آنالیز داده های بدست آمده از بررسی آزمایشگاهی رابطه ای را برای سرریزهای کلید پیانویی مدل های ذکر شده ارائه دادند. رابطه (۱۲) در محدوده هد نسبی معین تعریف شده است که مقادیر ضرایب برای هر مدل مقدار خاصی است [11].

$$C_d = a_3 + a_4 \frac{H}{P} + a_5 \left(\frac{H}{P} \right)^2 + a_6 \left(\frac{H}{P} \right)^3 + a_7 \left(\frac{H}{P} \right)^4 \quad (12)$$

سنگ سفیدی و همکاران (2017) با استفاده از روش سطح پاسخ به مطالعه جریان سرریزهای انحنادار پرداختند [12]. به علت تعدد پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیانویی، تاکنون رابطه ای جامع برای ضریب دبی این نوع از سرریزها ارائه نشده است. در تحقیق حاضر با استفاده از روش سطح پاسخ ضمن ارزیابی عملکرد سرریز کلید پیانویی، رابطه ضریب دبی نیز برای این مدل از سرریز ارائه شده است. در ادامه پژوهش حاضر با استفاده از نتایج مدل سازی آزمایشگاهی و عددی، روابط ضریب دبی ارائه شده در این پژوهش و دیگر مراجع با استفاده از شاخص های آماری مقایسه و ارزیابی شده است.

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{(L-W)P_i}{WH} \right)^{0.9} w * p * b * a \quad (3)$$

ضرایب a, b, p, w بیان کننده تاثیر پارامترهای هندسی مشخصی می باشد که به ترتیب به صورت $\left(\frac{P_0}{P_i} \right)^{0.5}$, $\left(\frac{W_i}{W_0} \right)^{0.5}$, $\left(\frac{R_0}{P_0} \right)^2$ و $\left(0.3 + \frac{B_i + B_0}{B} \right)^{-0.5}$ است.

میشلز در سال (2012)، آزمایش های گسترده ای را به منظور بررسی اثر چندین پارامتر مؤثر بر عملکرد سرریزهای کلید پیانویی در شرایط جریان آزاد ارائه کرد. او با تحلیل داده های بدست آمده از آزمایش، رابطه ای را برای مقدار دبی عبوری از واحد عرض سرریزهای کلید پیانویی (رابطه ۴)، ارائه داد. مطابق این رابطه، مقدار دبی عبوری از واحد عرض سرریز کلید پیانویی برابر با مجموع دبی در واحد عرض عبوری از تاج های کناری (رابطه ۵)، تاج های بالادست (رابطه ۶)، و تاج های پایین دست (رابطه ۷) است [8].

$$q = \frac{Q_{PKW}}{W} = q_u \frac{W_0}{W_u} + q_a \frac{W_i}{W_o} + q_s \frac{2B}{W_u} K_{W_i} K_{W_o} \quad (4)$$

$$q_s = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H + 1.6} \right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833 + p_e} \right)^2 \right) \left(\frac{P_e^\alpha + \beta}{(0.833H + p_e)^\alpha} \right) \sqrt{2gH^3} \quad (5)$$

$$q_u = 0.374 \left(\frac{1}{1000H + 1.6} + 1 \right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right) \sqrt{2gH^3} \quad (6)$$

$$q_a = 0.445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \sqrt{2gH^3} \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P} \right)^2 \right) \quad (7)$$

کومار و همکاران (2020) عملکرد سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه ای را با استفاده از روش درخت تصمیم و رگرسیون جنگل تصادفی بررسی کردند. نتایج بررسی ها نشان داد که روش رگرسیون جنگل تصادفی دارای دقت بیشتری در مقایسه با دیگر روش بکار گرفته شده می باشد. روابط ضریب دبی ارائه شده به روش درخت تصمیم برای سرریز کلید پیانویی مستطیلی به صورت روابط (۸، ۹ و ۱۰) برای دامنه هد نسبی و طول نسبی معین بوده و به صورت یک رابطه خطی می باشد [9]:

$$\frac{H}{P} \leq 0.249, \frac{L}{W} \leq 5.5 \quad (8)$$

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ^۱ (RSM)، یک روش آماری معتبر برای طراحی آزمایش، مدل کردن داده‌ها، بهینه‌سازی و تحلیل روابط بین داده‌ها می‌باشد توسط دو روش طراحی مرکب مرکزی^۲ (CCD) و طراحی باکس بنکن^۳ (BBD) قابل انجام است. در بین دو روش مذکور، طراحی مرکب مرکزی از عمومیت بیشتری برخوردار است. این روش بر اساس انجام آزمایش در نقاط خارجی و تکرار در نقطه مرکزی طراحی شده است که باعث افزایش نسبی دقت ارائه شده توسط این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌شود. در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته، مدلی تعریف شده که آثار اصلی و فاکتورها را روی هر متغیر جداگانه بیان می‌کند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، مدل درجه دوم یا فرم کاهیده آن است. مدل کلی روش سطح پاسخ چند متغیره به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود. در این مدل، Y پاسخ پیش‌بینی شده، b_0 ضریب ثابت، b_i اثر خطی، b_{ii} آثار مربعیات، b_{ij} آثار متقابل، و X_i و X_j سطوح (متغیر کد شده)، می‌باشد.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n b_{ij} X_i X_j \quad (13)$$

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی عملکرد سرریز کلید پیانویی از روش طرح مرکب مرکزی در روش سطح پاسخ در محیط نرم‌افزار Design Expert (Version 12) استفاده شده است. طراحی به روش طرح مرکب مرکزی در پنج سطح صورت می‌گیرد. $+1$ ، -1 سطوح بالا و پایین، $+\beta$ ، $-\beta$ حدهای جدید سطوح می‌باشند. صفر نیز به عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد سرریز کلید از داده‌های مطالعه اندرسون (2011) استفاده شده است [13]. بر اساس این مطالعه هد نسبی جریان و نسبت عرض کلیدها به عنوان سطوح اصلی و ضریب دبی جریان به عنوان پاسخ در نظر گرفته شده است. در گام اول پژوهش، بازه هد نسبی جریان به دو بازه $0.1-0.2$ و $0.2-0.9$ تقسیم شده است و سطوح مورد نظر مطابق با جداول (۱) و (۲) تنظیم شده است. در جدول‌های (۳) و (۴)، سطوح به همراه مقادیر واقعی و کدگذاری شده با پاسخ (ضریب دبی) برای استخراج رابطه ضریب دبی جریان به روش طرح مرکب مرکزی لحاظ شده است.

¹ Response Surface Methodology² Central Composite Design³ Box Behnken Design

جدول ۱. دامنه و تراز تنظیم شده سطوح

به روش RSM-CCD بازه‌ی هد نسبی $0.1-0.2$

Table 1. Range and levels of the factors in RSM-CCD (H/P=0.1-0.2)

Factors	$-\beta$	-1	0	+1	$+\beta$
$\left(\frac{H}{P}\right)$	0.10	0.1150	0.150	0.1850	0.20
$\left(\frac{W_i}{W_0}\right)$	0.67	0.79	1.09	1.38	1.5

جدول ۲. دامنه و تراز تنظیم شده

به روش RSM-CCD بازه‌ی هد نسبی $0.2-0.9$

Table 2. Range and levels of the factors in RSM-CCD (H/P=0.2-0.9)

Factors	$-\beta$	-1	0	+1	$+\beta$
$\left(\frac{H}{P}\right)$	0.2	0.303	0.55	0.797	0.90
$\left(\frac{W_i}{W_0}\right)$	0.67	0.79	1.09	1.38	1.5

جدول ۳. سطوح تنظیم شده به همراه مقادیر واقعی و کدگذاری شده به روش

RSM-CCD، هد نسبی $0.1-0.2$

Table 3. RSM-CCD plan in actual and coded values along with the response (H/P=0.1-0.2)

	$\left(\frac{H}{P}\right)$		$\left(\frac{W_i}{W_0}\right)$		Cd
	Actual value	Coded value	Actual value	Coded value	
1	0.115	-1	0.79	-1	0.49025
2	0.115	-1	1.38	+1	0.5318
3	0.185	+1	0.79	-1	0.4354
4	0.185	+1	1.38	+1	0.4839
5	0.150	0	0.67	$-\beta$	0.4493
6	0.150	0	1.5	$+\beta$	0.5162
7	0.10	$-\beta$	1.09	0	0.5215
8	0.20	$+\beta$	1.09	0	0.4519
9	0.150	0	1.09	0	0.4959

جدول ۴. سطوح تنظیم شده به همراه مقادیر واقعی و کدگذاری شده به روش

RSM-CCD، هد نسبی $0.2-0.9$

Table 4. RSM-CCD plan in actual and coded values along with the response (H/P=0.2-0.9)

	$\left(\frac{H}{P}\right)$		$\left(\frac{W_i}{W_0}\right)$		Cd
	Actual value	Coded value	Actual value	Coded value	
1	0.303	-1	0.79	-1	0.3524
2	0.303	-1	1.38	+1	0.3975
3	0.797	+1	0.79	-1	0.2233
4	0.797	+1	1.38	+1	0.2322
5	0.55	0	0.67	$-\beta$	0.2530
6	0.55	0	1.5	$+\beta$	0.2848
7	0.20	$-\beta$	1.09	0	0.4429
8	0.90	$+\beta$	1.09	0	0.2267
9	0.55	0	1.09	0	0.2773

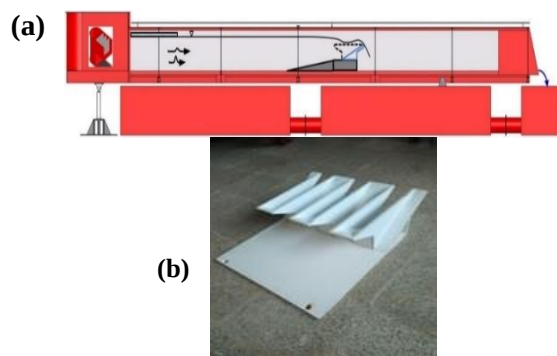
دبی جریان را با در نظر گرفتن معادله عمومی (رابطه ۱۴) دبی جریان استخراج شده است [10]:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH^3} \quad (14)$$

۲-۳- مدل سازی عددی

در بخش دیگری از مرحله دوم پژوهش به منظور شبیه سازی عددی سرریز کلید پیانویی، از نرم افزار FLOW3D استفاده شده است. معادلات اساسی حاکم بر روند شبیه سازی عددی در این پژوهش معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می باشد.

در این تحقیق، شبیه سازی عددی جریان روی سرریز آزمایشگاهی به دلیل تقارن مسئله با مدل سازی یک کلید واحد شامل یک کلید ورودی و دو نیم کلید خروجی انجام شده است. از مدل-K-RNG برای شبیه سازی لزجت گرداب ها و از روش جزء حجمی برای مشخص سازی هندسه سرریز و سطح آزاد سیال استفاده شده است. روش جزء سطح/حجم مانع برای هندسه سرریز در روش حجم محدود به کار رفته و موانع در سلول های محاسباتی به صورت نسبی (بین ۰ و ۱) در نظر گرفته می شوند. همچنین، الگوریتم جزء حجم سیال برای تعیین سطح آزاد سیال استفاده شده است. برای حل عددی معادلات غیر دائم، از تکنیک GMRES استفاده شده است. الگوی حل و انفصال معادله مومنتوم از نوع صریح درجه ۱ است که به افزایش سرعت حل کمک می کند. شبکه بندی مدل عددی نیز با استفاده از بلوک محاسباتی و شبکه بندی کارترین انجام شده است. به منظور شبکه بندی مدل عددی از یک بلوک محاسباتی با شبکه بندی کارترین برای انفصال میدان حل استفاده شده است. تعداد شبکه بهینه برای انفصال میدان حل ۱۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است شکل (۳-ب). شرایط مرزی مورد استفاده روی وجوه مختلف بلوک محاسباتی در شکل (۳-ا) نشان داده شده است. در وجه بالادست ضمن استفاده از شرط مرزی فشار (Pressure)، هد آب مورد نظر به ورودی میدان اعمال شده و با اعمال شرط مرزی خروجی (Outflow) به کف پایین دست بلوک محاسباتی، دبی خروجی از میدان به ازای هد اعمالی در ورودی محاسبه می شود. اعمال شرط مرزی خروجی برای کف مش بلوک به منظور اطمینان از عدم تأثیرگذاری پایاب بر عملکرد هیدرولیکی سرریز بوده و صفحه (Zmin) مش بلوک به حدی از انتهای شیب کلیدهای خروجی پایین تر در نظر گرفته شد تا جریان خروجی، بدون تأثیرپذیری از شرط مرزی صفحه مزبور، به راحتی از میدان



شکل ۲. تجهیزات مدل سازی آزمایشگاهی:

(a) نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی، (b) مدل فیزیکی سرریز کلید پیانویی

Fig. 2. Laboratory modeling equipment (a) The schematic view of a laboratory flume (b) physical model of the tested piano key weir

جدول ۵. مشخصات هندسی مدل فیزیکی

Table 5. Geometrical details of physical model

$\frac{B_i}{B_0}$	$\frac{W_i}{W_0}$	$\frac{P}{W_u}$	$\frac{L}{W}$	n
1	1.25	0.96	5	3

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

در بخشی از مرحله دوم این تحقیق مطابق شکل (۲-ا)، مطالعات آزمایشگاهی در فلوم افقی شیب پذیر به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با دیواره های شیشه ای و کف فولادی برای بررسی جریان آب انجام شده است. آب از مخزن اصلی به وسیله پمپ با دبی ۹۵ لیتر بر ثانیه به مخزن بالادست فلوم انتقال می یابد. برای آرام سازی جریان، از توری مشبک و صفحات یونولیتی استفاده شده است. عمق و تراز آب توسط خط کش دیجیتالی با دقت ۰/۱ میلی متر اندازه گیری می شود. در تفسیر نتایج، بار آبی جریان با استفاده از عمق و بار سرعت مورد بررسی قرار می گیرد. تراز آب از تاج سرریز به عنوان مبدأ و دبی متناظر با آن به عنوان خروجی سیستم قرائت می شود. دبی سنج الکترومغناطیسی با دقت ۱ لیتر بر ثانیه استفاده شده و قبل از اندازه گیری عمق، حداقل ۴ دقیقه زمان برای تثبیت عمق زمان صرف شده است. مدل فیزیکی سرریز کلید پیانویی با استفاده از صفحات PVC، به ضخامت ۹ میلی متر ساخته شده است شکل (۲-ب). مشخصات پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی در جدول (۵) گردآوری شده است. بازه دبی جریان اعمالی بر روی سرریز از ۲/۶ لیتر بر ثانیه تا ۸۷/۶ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که در هر مرحله از آزمایش ۲ لیتر بر ثانیه بر مقدار دبی افزوده شده و مقدار هد کل (مجموع هد استاتیک و سرعت) جریان محاسبه شده و ضریب

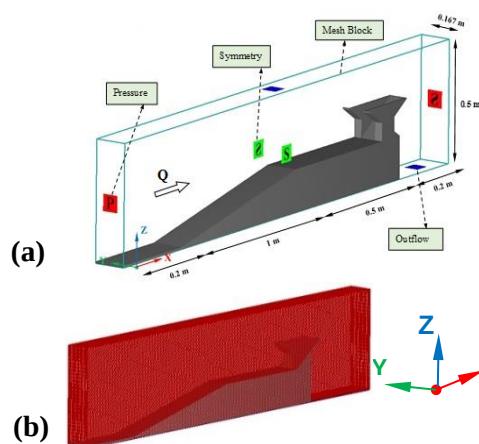
(RMSE) درستی و اعتبار این روابط ارزیابی شده است.

$$0.1 \leq \frac{H}{P} < 0.2 \quad (15)$$

$$C_d = 0.377 + 0.215 \left(\frac{W_i}{W_o} \right) + 0.171 \left(\frac{H}{P} \right) + 0.168 \left(\frac{W_i}{W_o} \right) \left(\frac{H}{P} \right) - 0.0745 \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^2 - 3.55 \left(\frac{H}{P} \right)^2$$

$$0.2 \leq \frac{H}{P} \leq 0.9 \quad (16)$$

$$C_d = \begin{pmatrix} +0.631 + 0.194 \left(\frac{W_i}{W_o} \right) - 0.566 \left(\frac{H}{P} \right)^2 \\ -0.095 \left(\frac{W_i}{W_o} \right) \left(\frac{H}{P} \right) \\ -0.0478 \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^2 + 0.361 \left(\frac{H}{P} \right)^2 \end{pmatrix}$$



شکل ۳. جزئیات مدل سازی عددی سرریز کلید پیانویی
(a). شرایط مرزی (b). نمای سه بعدی شبکه محاسباتی

Fig. 3. Details of the Numerical Simulation of the Piano Key Weir
(a) Boundary Conditions and (b) 3D Computational mesh

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس Anova رابطه ضریب دبی برای هد نسبی ۰/۱ - ۰/۲

Table 6. Statistical Findings from ANOVA: Discharge Coefficient Relationships for H/P Values between 0.1 and 0.2

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value
Model	0.009	5	0.0019	996	< 0.0001
$\frac{W_i}{W_o}$	0.004	1	0.0043	2249	< 0.0001
$\frac{H}{P}$	0.005	1	0.0051	2661	< 0.0001
$\left(\frac{W_i}{W_o} \right) \left(\frac{H}{P} \right)$	0	1	0	6.37	0.0859
$\left(\frac{W_i}{W_o} \right)^2$	0	1	0.0001	63.1	0.0042
$\left(\frac{H}{P} \right)^2$	0	1	0.0001	30.0	0.0119
Residual	5.695E-6	3	1.898E-6		

خارج شود. برای مرزهای کناری و مرز بالادست و مرز فوقانی میدان جریان از شرط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شده است. به عنوان شرط اولیه، یک ستون آب ساکن با جزء حجم برابر با یک (VOF=1) در داخل میدان در نظر گرفته شد

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل نتایج رابطه ضریب دبی استخراج شده با استفاده

از روش سطح پاسخ

روابط ضریب دبی ارائه شده برای سرریزهای کلیدپیانویی بر اساس نتایج مطالعه اندرسون (2011)، در دو بازه هد نسبی جریان ۰/۱-۰/۲ و ۰/۲-۰/۹، تابعی از هد نسبی جریان و نسبت عرض کلیدهای ورودی و خروجی به صورت روابط (۱۵ و ۱۶) تعریف شده است. نرم افزار به منظور بررسی درستی مدل های ریاضی ارائه شده از تحلیل واریانس ANOVA استفاده کرده است. میزان تطابق نتایج (R^2) مدل ریاضی ارائه شده با داده های آزمایشگاهی اندرسون (2011) برای بازه هد نسبی ۰/۱-۰/۲ (۹ داده) و ۰/۲-۰/۹ (۹ داده)، بیش از ۹۹ درصد و ۱ می باشد. انحراف معیار به ترتیب برای روابط (۱۵ و ۱۶)، ۰/۰۰۰۹ و ۰/۰۰۰۱ گزارش شده است. مقادیر Adjusted- R^2 که معادل و کمتر از R^2 لحاظ می شود به ترتیب برای روابط (۱۵ و ۱۶)، ۰/۹۹۸۴ و ۰/۹۹۹۹ تعیین شده است. مقدار ضریب تغییرات (Cv)، معادل ۰/۲۸۳۳ برای رابطه (۱۵) و ۰/۱۲۴۹ برای رابطه (۱۶) محاسبه شده است. جداول (۶ و ۷) برای تحلیل و بررسی مدل ریاضی ارائه شده است.

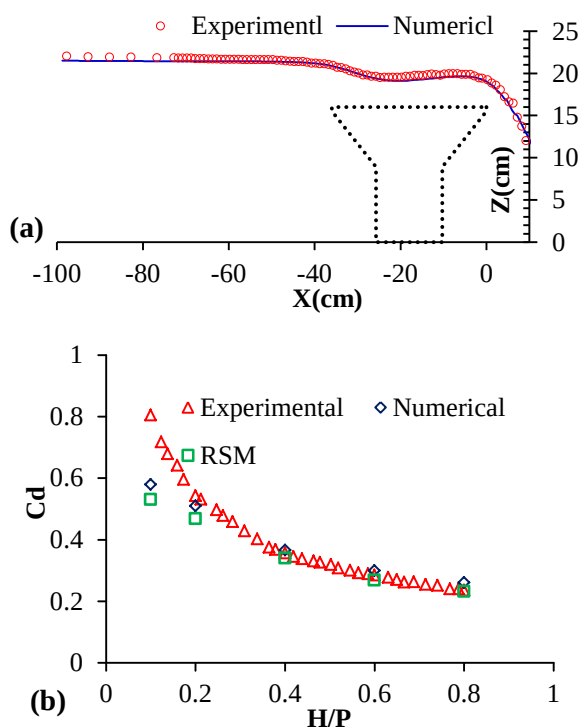
مطابق با جدول های تحلیل واریانس ارائه شده برای روابط ضریب دبی مقادیر P-Value و F-Value برای هر دو رابطه به ترتیب کمتر از ۵ درصد و بیشتر از مقادیر بحرانی می باشد که نشان دهنده اعتبار مدل ریاضی است. هر چند مقدار P-Value برای اثر بر هم کنش سطوح در رابطه ضریب دبی برای بازه هد نسبی ۰/۱-۰/۲ بیشتر از ۵ درصد محاسبه شده است اما به دلیل معتبر بودن اثر جداگانه هر کدام از این ترم ها در تعیین مقدار ضریب دبی، از حذف آن در مدل ریاضی ارائه شده خودداری شده است. جداول تحلیل واریانس و شاخص های محاسبه شده تنها برای ۱۸ داده در نظر گرفته شده است بدین منظور روابط ضریب دبی برای ۱۱۵ داده استخراج شده از مطالعه اندرسون (2011) تعمیم داده شده و با استفاده پارامترهای آماری مانند ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین خطای مربعات

علی رغم استفاده از تعداد داده کمتر دارد.

۲-۳- مقایسه نتایج حاصل از روابط ضریب دبی به روش سطح

پاسخ و مدل سازی عددی با نتایج مطالعه آزمایشگاهی

در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با نتایج مدل سازی عددی و روش سطح پاسخ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به منظور تعیین ضریب دبی جریان در مطالعه آزمایشگاهی، هد جریان روی تاج سرریز اندازه گیری شده و با در نظر گرفتن رابطه (۱۴) مقدار ضریب دبی محاسبه شده است. نتایج مدل سازی عددی نیز بعد از اطمینان از درستی همگرایی و مقایسه پروفیل سطحی جریان شکل (۵-ا)، به صورت نمودار (شکل ۵-ب) ارائه شده است. مطابق با نمودار (شکل ۵-ب)، برای تمامی مدل های ارائه شده، مقدار بیشینه ضریب دبی جریان در هدهای نسبی پایین اتفاق افتاده است که در این حالت سرریز دارای بیشترین راندمان خود است.



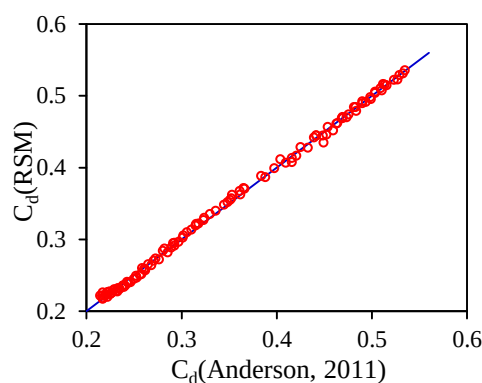
شکل ۵. مقایسه نتایج مدل سازی عددی و روش سطح پاسخ با داده آزمایشگاهی: (a). مقایسه پروفیل سطحی آب در مدل عددی و آزمایشگاهی به ازای $H/P = 0.4$; (b). نمودار مقایسه ای ضرایب دبی مدل آزمایشگاهی و عددی و روش سطح پاسخ

Fig. 5. Results Comparison of Numerical Simulation and RSM Method against Experimental Data: (a) Water Surface Profile Analysis at $H/P = 0.4$; (b) Discharge Coefficient Curves for RSM, Numerical, and Experimental Models

جدول ۷. نتایج تحلیل واریانس Anova رابطه ضریب دبی برای هد نسبی ۰/۹-۰/۲

Table 7. Statistical Findings from ANOVA: Discharge Coefficient Relationships for H/P Values between 0.2 and 0.9

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value
Model	0.040	5	0.008	17558	< 0.0001
$\frac{W_i}{W_o}$	0.001	1	0.001	2971	< 0.0001
$\frac{H}{P}$	0.036	1	0.036	78570	< 0.0001
$\left(\frac{W_i}{W_o}\right)\left(\frac{H}{P}\right)$	0	1	0	415	0.0003
$\left(\frac{W_i}{W_o}\right)^2$	0	1	0	107	0.0019
$\left(\frac{H}{P}\right)^2$	0.001	1	0.001	3102	< 0.0001
Residual	1.379E-6	3	4.596E-7		



شکل ۴. نمودار مقایسه ای روابط ضریب دبی ارائه شده به روش سطح پاسخ با داده های آزمایشگاهی مطالعه اندرسون (۲۰۱۱)

Fig. 4. Comparison of Discharge Coefficient between RSM Method and Experimental Data (Anderson 2011)

جدول ۸. مقایسه درصد اختلاف نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و روش سطح پاسخ با نتایج آزمایشگاه

Table 8. Comparison of Percentage Differences between Numerical Simulation and RSM Method Results with Experimental Data

$\frac{H}{P}$	$C_d(Ex)$	$C_d(Nu)$	$C_d(RSM)$	%Diff _{Nu}	%Diff _{RSM}
0.10	0.805	0.58	0.53	-38.8	-51.9
0.20	0.54	0.51	0.47	-5.9	-14.9
0.40	0.36	0.37	0.34	2.7	5.9
0.60	0.28	0.30	0.29	6.67	3.44
0.80	0.23	0.26	0.23	11.53	0

مطابق با شکل (۴)، ضریب دبی تعیین شده با استفاده از مدل های ریاضی ارائه شده با استفاده از روش سطح پاسخ دارای همخوانی بالایی با داده های مطالعه اندرسون (2011) است. همچنین مقادیر محاسبه شده پارامترهای آماری به ترتیب برای RMSE, MAE, R² معادل ۰/۹۹۸۵، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۰۴۱ می باشد که نشان از دقت بالای روش سطح پاسخ در محاسبه ضریب دبی

جدول ۹. مقایسه شاخص‌های آماری روابط هیدرولیکی ضریب دبی سرریز کلید

پیانویی

Table 9. Comparison of Statistical Indices for Equations of Discharge Coefficient in Piano Key Weirs

Reference	MAPE	RMSE	R2
Kabiri-samani & Javaheri(2012)	%40.56	0.42	0.99
Leite Ribeiro et al. (2012)	%5.05	0.063	0.99
Cicero & Delisle (2013)	%24.3	0.36	0.94
Crookston & Tullis (2018)	%4.5	0.075	0.96
Kumar et al. (2020)	%98	1.05	0.91
Michailes (2012)	%6.8	0.071	0.96
RSM Method	%4.6	0.071	0.95

همواره بیشتر از مقدار ضریب دبی مدل آزمایشگاهی بوده است. مطابق با جدول (۹)، مقایسه میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و مجذور میانگین خطای مربعات (RMSE)، نشان دهنده عملکرد مطلوب و مناسب رابطه لیت‌ریبیرو و همکاران (2012) در مقایسه با رابطه ضریب دبی کبیری‌سامانی-جواهری (2012) می‌باشد. شکل (۶-c، ۶-d، ۶-e) نشان‌دهنده مقایسه ضریب دبی محاسبه شده با استفاده از روابط کروکستون-تالیس (2018)، روش سطح پاسخ (تحقیق حاضر) و سی‌سرو-دلایس (2013) با ضریب دبی بدست‌آمده از مدل آزمایشگاهی می‌باشد. مطابق با نمودارهای استخراج شده، ضریب دبی حاصل از این روابط همواره از مقدار ضریب دبی بدست آمده از مدل فیزیکی مطالعه شده در تحقیق حاضر، کمتر است. همچنین برای سه رابطه مذکور، در بازه هد نسبی ۰/۱ الی ۰/۳، ضریب دبی حاصل از این روابط دارای بیشترین اختلاف با داده‌های حاصل از مدل فیزیکی می‌باشد که مقدار MAPE به ترتیب برای سه رابطه مذکور در بازه هد نسبی ۰/۳-۰/۱، ۱۱٪، ۱۲٪ و ۵۰٪ می‌باشد که با افزایش هد نسبی جریان از ۰/۳ الی ۰/۸، بر دقت این روابط افزوده شده است به طوری که مقدار MAPE برای سه رابطه مذکور به ترتیب در بازه‌ی مورد نظر ۱/۳٪، ۱/۲۵٪ و ۷٪ می‌باشد. روابط ارائه شده در تحقیق حاضر و کروکستون-تالیس (2018) با استفاده از نتایج تحقیق اندرسون (۲۰۱۱) می‌باشد که علی‌رغم استفاده از دو پارامتر هندسی $\frac{H_t}{p}$ و $\frac{W_i}{W_o}$ دارای دقت بالا و خطای کمتری در پیش‌بینی ضریب دبی جریان بوده (تاثیر پارامتر نسبت عرض کلیدها در رابطه کروکستون-تالیس (2018) به صورت ضرایب معین در نظر گرفته شده است)، که می‌تواند برای ارزیابی عملکرد سرریزهای کلید پیانویی در هدهای نسبی بالا مورد توجه قرار گیرد. مقایسه شاخص‌های آماری محاسبه شده برای سه رابطه مذکور مطابق با جدول (۹)، نشان‌دهنده عملکرد مشابه رابطه ضریب دبی کروکستون-تالیس (2018) و رابطه ضریب دبی استخراج شده با استفاده از روش سطح پاسخ در این تحقیق می‌باشد. هر چند مطابق با جدول (۱۰)، خطای حاصل از رابطه سی‌سرو و دلایس (2013) در مقایسه با دو رابطه مذکور بسیار بیشتر است اما در مقایسه با رابطه کبیری‌سامانی-جواهری (2012) دارای خطای کمتری می‌باشد. روند تغییرات ضریب دبی پیش‌بینی شده با استفاده از روابط کومار و همکاران (2020) نسبت به تغییرات هد نسبی

با افزایش هد نسبی جریان ضریب دبی روند نزولی پیدا کرده و با نزدیک شده به بیشینه هد نسبی جریان، مقدار ضریب دبی به حداقل خود رسیده است که در این هنگام روند تغییرات ضریب دبی نسبت به تغییرات هد نسبی جریان ناچیز می‌باشد.

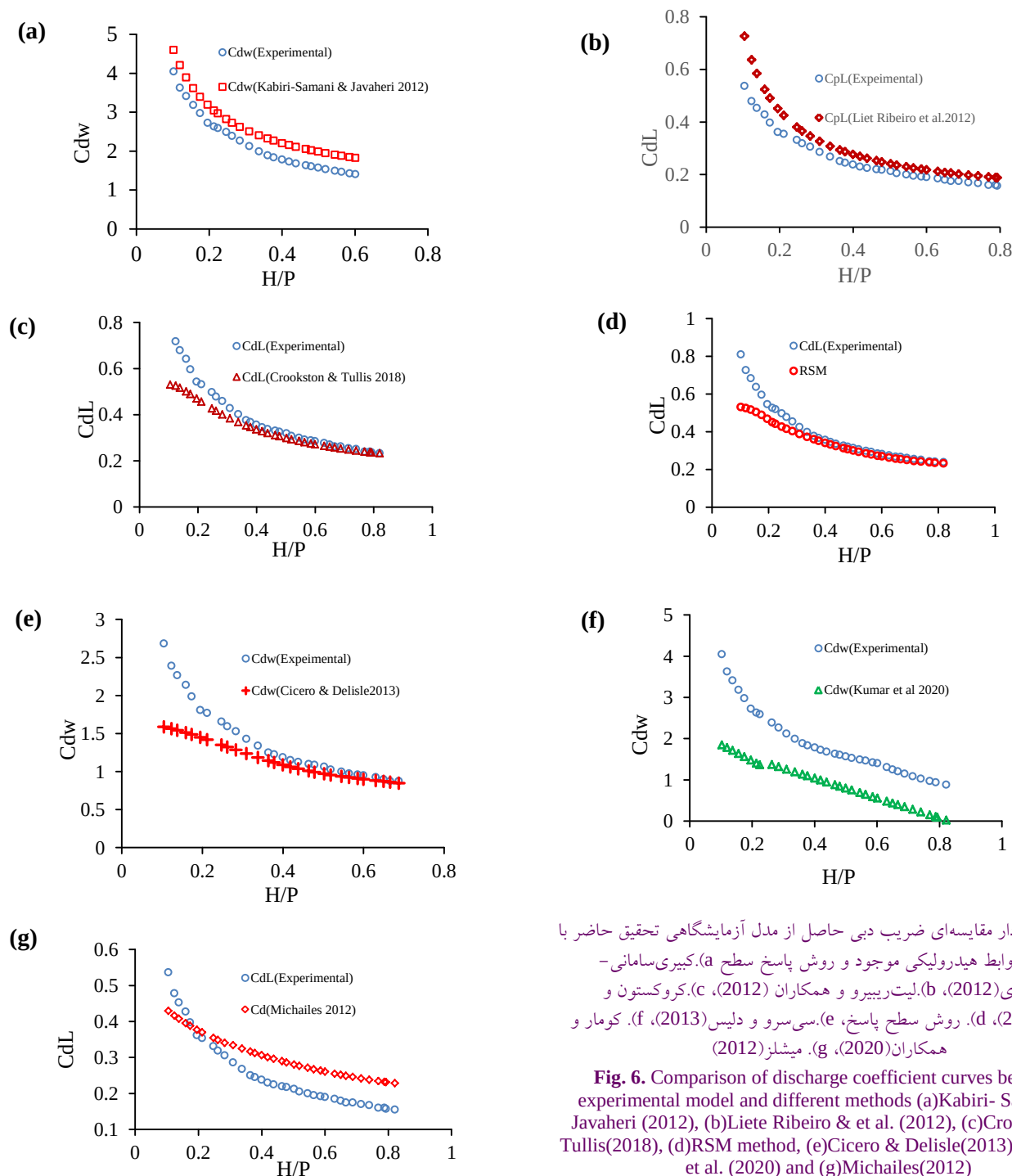
مطابق با نمودار شکل (۵-b) و جدول (۸)، بیشترین اختلاف نتایج شبیه‌سازی عددی و روش سطح پاسخ با داده‌های مطالعه آزمایشگاهی، در ابتدای بازه هد نسبی ($0.1 \leq \frac{H}{p} < 0.2$) رخ داده است که با افزایش هد نسبی جریان بر تطابق داده‌های عددی و روش سطح پاسخ با داده‌های آزمایشگاهی افزوده می‌شود. در حالت کلی و با توجه به جدول (۸)، ضریب دبی حاصل از مدل‌سازی عددی و پیش‌بینی شده به روش سطح پاسخ برای هدهای نسبی بازه ۰/۲ الی ۰/۸ دارای تطابق بهتر و مطلوبی با داده‌های آزمایشگاهی بوده که می‌تواند در مطالعه سرریزهای کلید پیانویی مورد توجه قرار گیرد.

۳-۳- مقایسه و ارزیابی روابط ضریب دبی سرریز کلید پیانویی

به منظور مقایسه و ارزیابی روابط ضریب دبی ارائه شده در دیگر مراجع، باید توجه داشت که در هرکدام از این مراجع برای دبی عبوری از تاج سرریز کلید پیانویی، معادله معینی در نظر گرفته شده است. بدین منظور در تحقیق حاضر مقادیر ضریب دبی مدل فیزیکی مطالعه شده در این تحقیق با در نظر گرفتن این موضوع محاسبه شده است و سپس نتایج حاصل با مقادیر ضریب دبی بدست آمده از روابط ارائه شده در مراجع، مقایسه و ارزیابی شده است. مطابق با شکل (۶-a و ۶-b)، در محدوده هد نسبی جریان معین، ضریب دبی حاصل از روابط ارائه شده توسط کبیری‌سامانی-جواهری (۲۰۱۲) و لیت‌ریبیرو و همکاران (2012)

گفته شده به ترتیب برای بازه هد نسبی جریان ۰/۱ تا ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۴۵ و در بازه هد نسبی ۰/۳ الی ۰/۸۲، به ترتیب ۸/۱٪ و ۰/۸۱ می باشد. این در حالی است که مقدار شاخص های آماری گفته شده در بازه هد نسبی ۰/۱ تا ۰/۳، برای رابطه لیت ریبرو و همکاران (2012) به ترتیب ۹/۱٪ و ۰/۱۰ و برای بازه هد نسبی ۰/۳ الی ۰/۸۲، شاخص های آماری گفته شده به ترتیب ۳/۲٪ و ۰/۳۲ می باشد که در مقایسه با بازه هد نسبی جریان

جریان به صورت خطی بوده (شکل f-۶). این اساساً با ماهیت روند تغییرات ضریب دبی سرریزهای آزاد در تناقض بوده و علاوه بر آن مطابق شاخص های آماری محاسبه شده در جدول (۹) دارای خطای زیادی در پیش بینی ضریب دبی جریان می باشد. ارزیابی رابطه ارائه شده توسط میشلز (۲۰۱۲) نشان می دهد که با افزایش هد نسبی جریان میزان خطای رابطه افزایش پیدا کرده است (شکل ۶-g). مقدار شاخص های آماری MAPE و RMSE برای رابطه



شکل ۶. نمودار مقایسه ای ضریب دبی حاصل از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر با نتایج روابط هیدرولیکی موجود و روش پاسخ سطح (a) کبیری سامانی - جواهری (2012)، (b) لیت ریبرو و همکاران (2012)، (c) کروکستون و تالیس (2018)، (d) روش پاسخ سطح، (e) سی سرو و دلیس (2013)، (f) کومار و همکاران (2020)، (g) میشلز (2012)

Fig. 6. Comparison of discharge coefficient curves between experimental model and different methods (a) Kabiri- Samani & Javaheri (2012), (b) Liete Ribeiro & et al. (2012), (c) Crookston & Tullis (2018), (d) RSM method, (e) Cicero & Delisle (2013), (f) Kumar et al. (2020) and (g) Michailis (2012)

است این در حالی است که با افزایش هد نسبی جریان از ۰/۳ الی ۰/۸، مقدار این شاخص آماری برای روابط مذکور به ترتیب ۳/۲٪، ۸/۱٪ و ۴۹/۲۰٪ محاسبه شده است. مقایسه مقادیر شاخص آماری نشان دهنده عملکرد مطلوب روابط لیت ریبری و همکاران (2012) و میشلز (2012) در مقایسه با رابطه‌ی ضریب دبی ارائه شده توسط کبیری سامانی - جواهری (2012) در بازه هد نسبی در نظر گرفته شده است.

۳- مقدار MAPE برای روابط ضریب دبی بدست آمده از روش RSM-CCD و کروکستون - تالیس (2018) و سی سرو - دلیس (2013) برای بازه‌ی هد نسبی جریان ۰/۳-۰/۱ به ترتیب ۱۲٪، ۱۱٪ و ۵۰٪ است. مقدار MAPE برای سه رابطه گفته شده در بازه هد نسبی ۰/۳-۰/۸ به ترتیب ۱/۲۵٪، ۱/۳٪ و ۷٪ است. که نشان دهنده افزایش دقت روابط ارائه شده با افزایش هد نسبی جریان است.

۴- در حالت کلی هدف از طراحی سرریزهای کلید پیانویی افزایش ظرفیت سرریز برای جریان با هدهای نسبی بالا می باشد. نتایج نشان دهنده‌ی عملکرد مطلوب روابط لیت ریبری و همکاران (2012) و RSM-CCD و کروکستون - تالیس (2018) در بازه هد نسبی جریان بالا است. که میتواند در پیش بینی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی مدل A مورد توجه قرار گیرد.

۵- با توجه به شاخص آماری R^2 ، MAPE، RMSE محاسبه شده برای رابطه ارائه شده در مطالعه میشلز (2012) که به ترتیب عبارتند از ۰/۹۶، ۰/۶/۸، ۰/۰۷۱ و همچنین تنوع مدل‌های سرریز کلید پیانویی استفاده شده در مطالعه میشلز (2012) بر خلاف رابطه کبیری سامانی - جواهری (2012) می تواند برای طراحی انواع مدل‌های سرریز کلید پیانویی در نظر گرفته شود.

۶- با توجه به تعدد پارامترهای هندسی سرریزهای کلید پیانویی امکان ارائه یک طرح جامع برای ساخت این مدل از سرریزها میسر نبوده است. روش سطح پاسخ (RSM) یک روش طراحی آزمایش معتبر است که می توان از آن برای طراحی مدل‌های فیزیکی مختلف سرریزهای کلید پیانویی با نسبت پارامترهای هندسی متنوع در شرایط و مقادیر مختلف هد جریان استفاده نمود. در این روش علاوه بر کاهش تعداد مدل و آزمایش که باعث کاهش هزینه و زمان خواهد شد، می توان

به میزان تقریبی یک سوم کاهش یافته است. مقادیر MAPE و RMSE برای رابطه کبیری سامانی - جواهری (2012) به ترتیب برای بازه هد نسبی ۰/۳-۰/۱، معادل ۵۰٪ و ۰/۵۱ و در بازه هد نسبی ۰/۶-۰/۳ معادل ۴۹/۲۰٪ و ۰/۵۱ می باشد. روابط ارائه شده توسط لیت ریبری و همکاران (2012)، کبیری سامانی - جواهری (2012) و میشلز (2012)، شامل پارامترهای هندسی متعددی است که حاصل مطالعه گسترده‌ای از مدل‌های هندسی سرریزهای کلید پیانویی می باشد. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می دهد که در بین سه رابطه مذکور روابط ریبری و همکاران (2012) و میشلز (2012) در مقایسه با رابطه ضریب دبی کبیری سامانی - جواهری (2012) دارای خطای کمتری می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شده است. بدین منظور ابتدا از داده های آزمایشگاهی اندرسون (۲۰۱۱) استفاده شده و با روش سطح پاسخ رابطه جامعی برای دو بازه نسبت H/P از ۰/۱ تا ۰/۲ و ۰/۲ الی ۰/۹ استخراج شده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و درستی آزمایی شد. در ادامه برای ارزیابی جامعیت رابطه استخراج شده، مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی یک سرریز کلید پیانویی جدید انجام شده و به ازای طیف وسیعی از نسبت هد به ارتفاع، ضریب دبی این سرریز تعیین و مدل عددی نیز با مقایسه پروفیل طولی سطح آب و نمودار ضریب دبی بین داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی درستی آزمایی شد. در ادامه، روابط تجربی موجود در مطالعات قبلی و همچنین، رابطه استخراج شده در تحقیق حاضر با داده‌های آزمایشگاهی مدل جدید مقایسه و بر اساس معیارهای آماری، دقت این روابط ارزیابی شد. بررسی مقادیر پارامترهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی روابط مختلف ضریب دبی نشان می دهد که:

۱- دقت این روابط در بازه‌های مختلف هد نسبی جریان متغیر است.

۲- مقایسه روابط تجربی ارائه شده توسط لیت ریبری و همکاران (2012)، میشلز (2012) و کبیری سامانی - جواهری (2012)، نشان می دهد که در بازه هد نسبی جریان ۰/۳-۰/۱ مقدار MAPE برای روابط گفته شده به ترتیب ۹/۱٪، ۴٪ و ۵۰٪

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع ندارند.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

این پژوهش با حمایت مادی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شده است.

با استفاده از دیگر قابلیت‌های موجود در این روش روابط ضریب دبی، مدل بهینه از سرریز کلید پیانویی با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی مختلف ارائه داد و با مدل‌های بهینه ارائه شده در دیگر مراجع از نظر کارایی هیدرولیکی و هزینه ساخت مقایسه کرد.

قدردانی نویسندگان

از حمایت مادی و معنوی دانشگاه محقق اردبیلی و پژوهشکده مهندسی آب و آبهای معدنی تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- [1] Laugier, F., 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at Goulours dam. *International Journal on Hydropower & Dams*, 14(5), pp.94-100.
- [2] Ribeiro, M.L., Pfister, M. and Schleiss, A.J., 2013, October. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs* (pp. 273-281).
- [3] Erpicum, S., Archambeau, P., Pirotton, M. and Dewals, B., 2014. Geometric parameters influence on Piano Key Weir hydraulic performances. In *5th Int. Symp. on Hydraulic Structures*. The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [4] Ouamane, A. and Lemperier, F. 2006. Design of a new economic shape of weir. In *Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century* (pp. 463-470). Barcelona, Spain.
- [5] Safarzadeh, A. and Norouzi, B. 2013. Comparison of three-dimensional hydrodynamics of rectangular piano key and labyrinth weirs. In *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering, Architecture, and Sustainable Urban Development* (pp. 102-111). Tabriz, Iran. (In Persian).
- [6] Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50, pp.114-120.
- [7] Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A. J. and Boillat, J. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50, pp.400-408.
- [8] Machiels, O. 2012. *Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs* (PhD thesis). HECE Research Unit, University of Liege, Belgium.
- [9] Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N. K. and Ranjan, S. 2020. Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Journal of Water Science*, 10(1), p.43.
- [10] Crookston, B. M., Anderson, R. M. and Tullis, B. P. 2018. Free-flow discharge estimation method for piano key weir geometries. *Journal of Hydro-Environment Research*, 19, pp.160-167.
- [11] Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M. and Motalebizadeh, M. R. 2017. Evaluation and analysis of flow over arced weirs using traditional and response surface methodologies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(11), 04017048.
- [12] Cicero, G. M. and Delisle, J. R. 2013. Discharge characteristics of piano key weirs under submerged flow. In *Proceedings of the Second International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2013* (pp. 101-109). London: Taylor & Francis Group.
- [13] Anderson, R. M. 2011. *Piano key weir head discharge relationship* (Master's thesis, Utah State University). Retrieved from All Graduate Thesis and Dissertations repository.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Safarzadeh, A. and Velayati, H., 2026. Assessing Experimental Relationships and Numerical Modeling for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weirs using Response Surface Methodology. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.7-18.



Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience

Maryam Khalajzadeh¹, Safoora Morshed-Shekarchi², Afshin Meshkat-Dini^{3*} , Ali Massumi⁴

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2. PhD Student, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
4. Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Abstract

Nowadays, with the advancement of science and technology and the growing population, constructing high-rise structures is essential for the optimal use of urban spaces. Diagrid structure is an extended resistant skeleton based on a framed tube system which has been considered in high-rise building constructions due to its architectural aesthetics and configurational character. These general characteristics are demonstrated by reducing the consuming materials by removing columns and applying a grid configuration of diagonal elements. The main structural element in these resistant structures is triangular modules that consist of two diagonal members and a horizontal connecting beam. The triangular modules and the angle of the diagonal members are two factors affecting the lateral stiffness and efficiency of these structures. Finding the optimal angle in design is an important step and depends on parameters such as shape, floor height, aspect ratio, lateral load distribution, and building location for each structure.

The seismic behavior of such a structure is affected by the configuration angle and the axial capacity of the diagonal members. With the dominance of axial function, the diagonal elements also resist lateral loads caused by wind and earthquakes and also play a key role in limiting the amplitude of inelastic behavior. Therefore, the seismic performance of diagonal elements would reduce the process of formation and expansion of nonlinear zones in diagrid structures. According to the lack of guiding principles for the integrated design of diagrid structures, there is a high demand for extensive research in collecting comprehensive and effective criteria for estimating stiffness and strength parameters, establishing dynamic stability, and understanding how the resilience of these structures changes due to dynamic loads caused by wind and earthquake.

It should be noted that the destructive effects of large earthquakes quickly lead to human and financial losses and spread to various economic, social, political, and cultural dimensions of human society. Considering the continuity of these different dimensions and their influence on each other, it is important to consider a suitable and coherent multifaceted approach to manage and reduce the destructive effects of unexpected events. The resilience assessment is one of the integrated approaches to managing and reducing the destructive effects of disasters. There is an urgent need to pay attention to the measurement of the resilience index and the construction of concepts and relationships between scientific research on this index and practical measures, especially on all types of resistant skeletons. Moreover the explanation of this parameter has been done mostly in the field of resilience in communities and cities.

In this study, the seismic performance of three 20-story studied diagrid buildings with the same structural system under a set of near-field records has been evaluated. The particular focus of this study is on evaluating the effect of the geometry and configuration of the resistant skeleton on the ground floor and the entrance section on behavioural characteristics. In this paper, an analytical study has been run on the results of incremental dynamic analysis (IDA), fragility curve, and the seismic resilience component under the selected earthquake records. The analytical results of this study show a close convergence between the behavioural characteristics of all three studied structures.

Review History

Received: Aug 8, 2024

Revised: May 10, 2025

Accepted: Jul 19, 2025

Keywords

Diagrid Structure
Structural Configuration,
Near-field Record
Incremental Dynamic
Analysis (IDA)
Fragility Curve
Seismic Resilience

* Corresponding Author Email: meshkat@khu.ac.ir - ORCID: 0009-0003-5234-9554



نگرش تحلیلی بر تأثیر هندسه و پیکربندی موضعی سازه‌های شبکه قطری بر عملکرد و مؤلفه استحکام تاب‌آوری لرزه‌ای

مریم خلیج‌زاده^۱، صفورا مرشد شکرچی^۲، افشین مشکوه‌الدینی^{۳*}، علی معصومی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۲. دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۴. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

چکیده

تاریخچه داوری

امروزه با پیشرفت علم و فناوری و همچنین رشد روز افزون جمعیت، ساخت سازه‌های بلند مرتبه برای استفاده بهینه از فضاهای شهری امری ضروری است. سازه شبکه قطری به عنوان یک ساختار تعمیم‌یافته بر پایه قاب خمشی محیطی و به دلیل ماهیت معماری و قابلیت پیکربندی، در ساخت سازه‌های بلند مرتبه مورد توجه مهندسان طراح قرار گرفته است. المان اصلی سازه‌ای در این ساختارهای مقاوم، پیکره‌های مثلثی است. پیکره مثلثی و زاویه اعضای قطری دو عامل مؤثر بر سختی جانبی و کارایی این سازه‌ها می‌باشد. اعضای قطری نیز با حاکمیت عملکرد محوری در برابر بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله مقاومت کرده و نقش اساسی در محدود نمودن گسترش حوزه‌های غیرخطی دارند. شایان ذکر است که به علت نبود ضوابط طراحی یکپارچه برای سازه‌های شبکه قطری، ضرورت انجام پژوهش‌های گسترده در زمینه تدوین معیارهای جامع و مؤثر در برآورد پارامترهای سختی و مقاومت، برقراری پایداری دینامیکی و چگونگی تغییرات تاب‌آوری این سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی ناشی از باد و زلزله، ملاحظه می‌شود. در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سه سازه هم‌ساختار شبکه قطری با بلندای ۲۰ طبقه تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک ارزیابی شده است. دیدگاه خاص این پژوهش در ارزیابی میزان تأثیرگذاری هندسه و پیکربندی اسکلت مقاوم در طبقه همکف و بخش ورودی سازه، روی پارامترهای مشخصه رفتاری است. یک مطالعه تحلیلی بر نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده، نمودارهای شکنندگی و مؤلفه تاب‌آوری لرزه‌ای تحت رکوردهای انتخابی صورت گرفته است. نتایج و آورده‌های تحلیلی این پژوهش، نشان از همگرایی نسبی و همخوانی به نسبت نزدیک میان ویژگی‌های رفتاری هر سه سازه مطالعاتی دارد. پاره‌ای تفاوت‌های نسبی نیز به سبب تعبیه ورودی با ساختار هندسی متفاوت در مشخصه‌های رفتاری سازه‌های مطالعاتی ملاحظه می‌شود.

کلمات کلیدی

شبکه قطری

پیکربندی سازه

رکورد حوزه نزدیک

تحلیل IDA

نمودار شکنندگی

تاب‌آوری لرزه‌ای

۱- مقدمه

سازه‌های شبکه قطری^۱ (دیاگرید) به دلیل قابلیت پیکربندی و ماهیت معماری، در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان و معماران قرار گرفته‌اند. بکار بردن اعضای قطری در هندسه سازه‌های بلند مرتبه سابقه پیشین دارد. این گونه ساختارها در طراحی سازه‌های با دهانه‌های بزرگ و تغییرات در پیکربندی و انحنا در هندسه، کاربرد گسترده دارند. ایده اصلی برای ابداع و توسعه این نوع پیکربندی سازه‌ای، کاهش مصرف مصالح در حذف ستون‌های عمودی و کاربرد شبکه المان‌های مورب بوده است. این ساختار سازه‌ای بر پایه یک چیدمان کامل از بخش‌های صلب مثلثی، متشکل از دو عضو قطری و یک تیر پیوند، ساخته می‌شود [1, 2].

اعضای قطری واقع در محیط پلان سازه، با عملکرد حاکم محوری در برابر بارهای وزنی و جانبی ناشی از باد و زلزله مقاومت می‌کنند. تیرهای افقی پیوند پانل‌ها نیز نقش زیادی در بهبود رفتار و جلوگیری از گسترش حوزه‌های غیرخطی دارد. پیکره صلب مثلثی و زاویه اعضای قطری، دو عامل تأثیرگذار در کارایی و سختی جانبی سازه‌های شبکه قطری است. زاویه اعضای قطری به پارامترهایی چون شکل، ارتفاع طبقه، توزیع بار جانبی، نسبت هندسی سازه بستگی داشته و برای هر سازه به صورت منحصر به فرد تعیین می‌شود. رفع تمرکز نسبی برآیندهای نیرویی، یکی از مزیت‌های این سیستم است. بدین ترتیب، با افزایش احتمال وقوع بارگذاری‌های تشدید یافته و همچنین برای بهبود پاسخ‌های غیرخطی می‌توان در اندازه زاویه اعضای قطری، هندسه و آرایش قرارگیری اعضای مورب، تغییرات لازم را ایجاد نمود. نتایج تحقیقات مونت تری و همکاران نشان می‌دهد که تغییر در اندازه زوایای اعضای قطری به طور مستقیم روی مؤلفه‌های سختی و برشی تأثیرگذار است [3, 4].

تحقیقات انجام شده توسط اسدی و همکاران نشان می‌دهد که رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها متأثر از زاویه پیکربندی و ظرفیت محوری اعضای قطری است. سازه‌های شبکه قطری به دلیل پیکربندی خاص و قابلیت بالای مقاومتی، دارای ظرفیت بسیار قابل توجه برای حفظ ایستایی و پایداری به ویژه در ترازهای عملکردی نزدیک به فروریزش کلی هستند [5]. مون با ارزیابی رفتار

سازه‌های شبکه قطری تحت بار باد نتیجه گرفت که این ساختارهای مقاوم با زاویه تندتر نسبت به تراز پایه، دارای عملکرد بهتری خواهند بود [6]. طبق تحقیقات کیم و کنگ تعریف زاویه اعضای قطری در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه، کارآمدترین زاویه برای مقاومت در برابر بارهای جانبی و ثقلی است [7]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط حشمتی و همکاران نیز برای بهبود عملکرد سازه‌های شبکه قطری می‌توان یک هسته مقاوم مرکزی با زاویه چیدمانی کمتر یا برابر با زاویه پیکربندی در ساختار پیرامونی، بکار برد [8]. طبق تحقیقات انجام شده توسط صادقی و رفویی نیز کاربرد مهاربندهای کمانش‌تاب^۲ (BRB) باعث تغییر در عملکرد لرزه‌ای و افزایش نسبی ضریب رفتار R می‌شود [9]. حشمتی و آقا کوچک برای سازه‌های شبکه قطری کوتاه و میان مرتبه، ضریب رفتار $R=4/5$ را پیشنهاد دادند [10].

لی و همکاران با بررسی عملکرد لرزه‌ای و سنجش تاب‌آوری برای مجموعه‌ای از سازه‌های شبکه قطری ۳۳ طبقه با هندسه ناهمگون و بخش‌های پیش آمده (برجسته) و پس رفته (تورفته) در پوسته پیرامونی، ضریب شکل‌پذیری $R=3$ را پیشنهاد دادند [11]. مرادی و عبدالمحمدی با معیارسازی روش انرژی، یک روند تحلیلی برای بررسی رفتار سازه‌های شبکه قطری بر پایه نتایج تحلیل‌های IDA و پردازش نمودارهای شکنندگی پایه‌ریزی نمودند [12]. نتایج تحقیق وحدانی و همکاران روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی با استفاده از نمودارهای شکنندگی حاکی از دامنه بزرگ آسیب‌پذیری تحت رکوردهای حوزه نزدیک است [13].

زنتر و گوندل به بررسی روش‌های مختلف ارزیابی نمودارهای شکنندگی همچون، شبیه‌سازی عددی مرتبط با رگرسیون خطی (LR)، برآورد ماکزیمم احتمال (MLE)، پرداخته و معایب و مزایا هر کدام را مطرح نمودند [14]. ژو و همکاران با بررسی تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک بر روی نمودارهای شکنندگی و تاب‌آوری دریافتند که دامنه‌های عددی مربوطه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، پایین‌تر از رکوردهای حوزه دور می‌باشند [15].

توجه به ساختار و هندسه ورودی در ساختمان‌ها با کاربری متفاوت در فضای شهری نقش زیادی در زیبایی معماری و کارایی سازه دارد. همچنین با توجه به جامع نبودن مطالعات پیشین روی

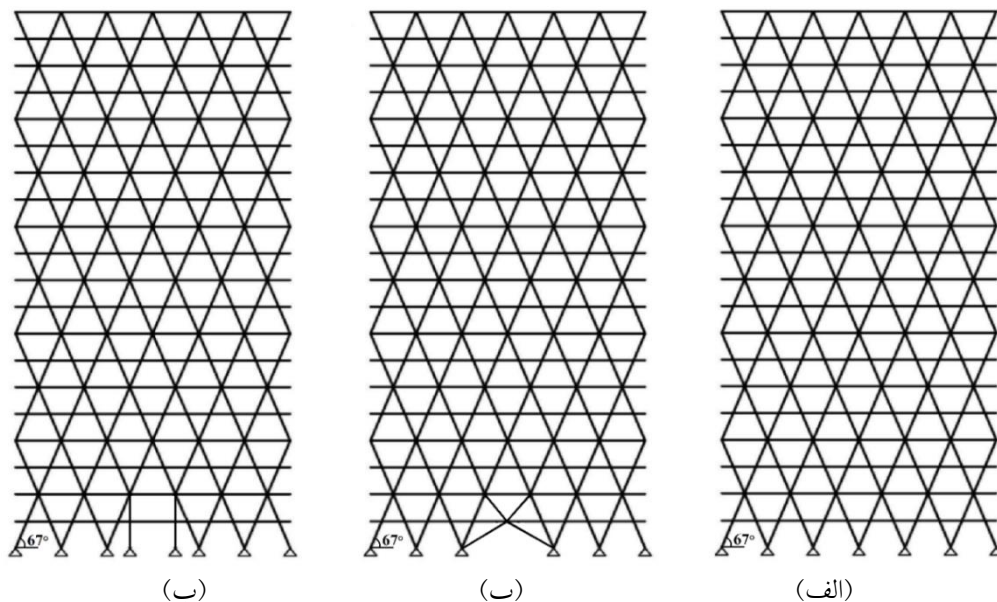
² Buckling Restrained Brace (BRB)¹ Diagrid

پیکربندی ۶۷ درجه و آرایش‌های متفاوت ورودی می‌باشند (شکل ۱). ساختار و طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس مدل پایه قاب خمشی دسته شده و با تمرکز بر همپایگی پارامتر سختی در طبقات مختلف استوار است [16, 17]. کاربرد آرایش‌های متفاوت برای بخش ورودی سازه، مرتبط با موضوع ارزیابی آثار تشدید یافته ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای در اسکلت مقاوم است. طرح نیمرخ المان‌های سازه‌های مطالعاتی با رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف و ایجاد مشخصات رفتار پیچشی سخت و یکسان‌سازی مؤلفه سختی برای هر سه ساختار شبکه قطری در نظر گرفته شده است. شکل (۱) نمای سه سازه مطالعاتی ۲۰ طبقه را نشان می‌دهد. طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ صورت گرفته است. پلان سازه‌های مطالعاتی، مربعی و متقارن به ابعاد 36×36 m می‌باشد. ارتفاع طبقات و فواصل اعضای قطری به ترتیب ۳.۵ و ۶ متر بوده و همچنین، مقادیر بار مرده و زنده مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است [18-20].

سازه‌های شبکه قطری در برابر رکوردهای زلزله و شاخص تاب آوری این سازه‌ها، توجه به پاسخ‌های دینامیکی این سازه‌ها در برابر رکوردهای حوزه نزدیک دارای آثار جهت‌داری نیازی مبرم است. به همین منظور در این مقاله به کمی‌سازی شاخص تاب‌آوری در سازه‌های شبکه قطری با هندسه‌های متفاوت ورودی پرداخته شده است. سازمان علمی این تحقیق دربرگیرنده ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و نیز مؤلفه تاب‌آوری سه سازه ۲۰ طبقه دارای اسکلت مقاوم شبکه قطری است. پیکربندی هندسی اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی شامل تفاوت‌گذاری در چیدمان المان‌های مورب مربوط به طبقات پایینی می‌باشد. توصیف و پردازش پارامترهای پاسخ غیرخطی سازه‌های مطالعاتی، تحت رکوردهای نیرومند سه مؤلفه‌ای حوزه نزدیک و بر پایه ارزیابی نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) انجام شده است. همچنین در همین راستا نیز ساخت و بررسی نمودارهای شکنندگی، همراه با تدوین شاخص تاب‌آوری مطالعه شده است.

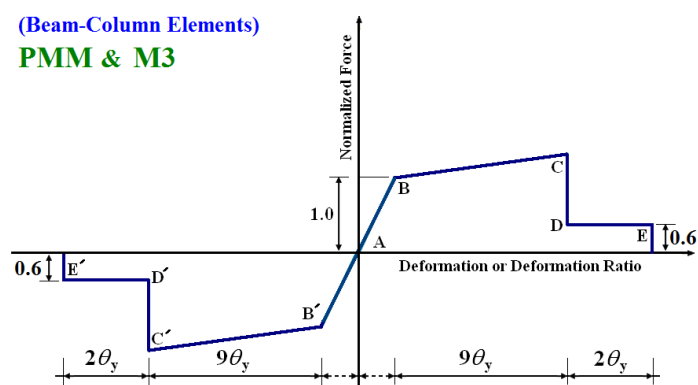
۲- ضوابط و مشخصات سازه‌های مطالعاتی

سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش عبارت از ساختارهای شبکه قطری ۲۰ طبقه با مدول‌های مثلثی دو طبقه در ارتفاع و زوایای

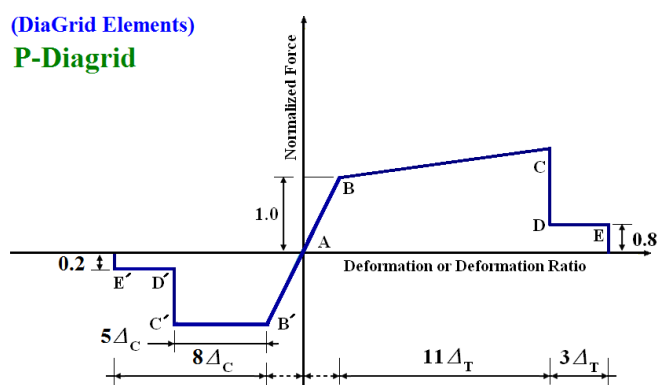


شکل ۱. چیدمان هندسی اسکلت پیرامونی سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری ۲۰ طبقه با زوایای پیکربندی ۶۷ درجه و آرایش‌های متفاوت ورودی؛ (الف) سازه (۱) با ورودی چند ضلعی، (ب) سازه (۲) با ورودی مثلثی، (پ) سازه (۳) با ورودی مستطیلی، [۱۷]

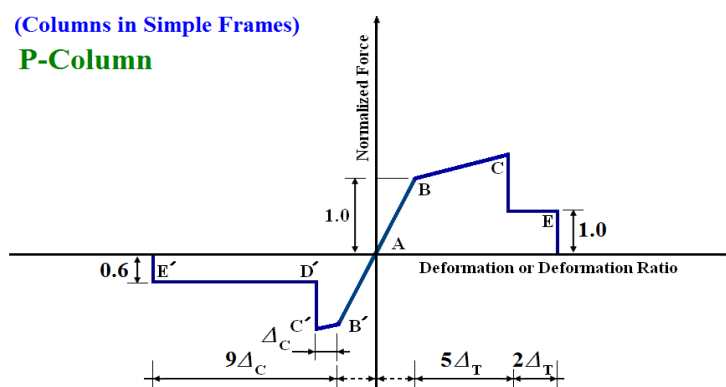
Fig. 1. Elevation view of the studied 20-story models with various perimeter geometric configurations; Structure 1 with a polygonal entrance, (b) Structure 2 with a triangular entrance, (c) Structure 3 with a rectangular entrance

(Beam-Column Elements)
PMM & M3

(ب)

(DiaGrid Elements)
P-Diagrid

(الف)

(Columns in Simple Frames)
P-Column

(ب)

شکل ۲. مدل رفتار غیرخطی المان‌های سازه شبکه قطری بر اساس ضوابط FEMA

(الف) المان مورب قطری، (ب) المان تیر-ستون، (پ) المان ستون در قاب ساده مفصلی، [17, 23]

Fig. 2. The proposed nonlinear behavioral models for the diagrid elements and the beam-columns [17,23]

انتقالی (راستاها X و Y پلان) نسبت به نخستین مود پیشگی برقرار است. تحلیل‌های مودال و پردازش‌های عددی با نرم‌افزار SAP2000 صورت گرفته است [22].

تعریف اتصالات المان‌های تیر-ستون داخلی بر اساس مشخصات رفتار خمشی بوده و اعضای مورب قطری نیز به صورت ستون‌های کج با دو سر مفصل خمشی و تیرهای پیرامونی به صورت گیردار برپا شده‌اند. تعریف مشخصات غیرخطی برای اعضای مورب قطری و نیز برای المان‌های تیر-ستون در آرایش قاب خمشی داخلی، مطابق شکل (۲) و بر اساس تمهیدات طراحی و تبیین موضوعی کاهش سختی و زوال مقاومت بوده و ضوابط FEMA لحاظ شده است [23, 24].

سنجش‌های محاسباتی و ارزیابی‌های عددی روی ساختار و طرح اسکلت مقاوم سازه‌های شبکه قطری مطالعاتی، همراه با توجه به تمهیدات لحاظ شده در ASCE/SEI7-10 بوده و ضریب رفتار R در این بررسی نیز طبق پیشنهاد اسدی و عادل‌ی با ۵ لحاظ شده است [21]. جدول (۱) دربرگیرنده مشخصات و ابعاد مقاطع طراحی شده برای تیرها، ستون‌ها و المان‌های مورب پیرامونی سه سازه مطالعاتی است [17]. مقاطع تیرها به صورت I شکل و مقاطع ستون‌ها و المان‌های مورب پیرامونی به صورت باکس انتخاب و طراحی شده‌اند. بر اساس نتایج تحلیلی آرایش مودال سازه‌های مطالعاتی، پریود اول انتقالی سازه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۱،۰۳، ۱،۰۴ و ۱،۰۴ ثانیه است. مشخصات رفتار پیشگی سخت این سازه‌ها نیز بر اساس بیشتر بودن پریود ارتعاشی مودهای اول

جدول ۱. مشخصات اعضای سازه‌های مطالعاتی در شکل (۱)، (ابعاد به cm) [17]

Table 1. Section sizes assigned to the beam-columns and the diagrid elements of the studied structures

Story	Diagrid Element	Internal column (Internal Moment Frame)	Internal column (Simple Frame)	Beam (Internal Moment Frame)	Beam (Simple Frame)
1-5	C55×2.5	C70 × 3.0	C65 × 2.5	B50×1.5×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
6-10	C48×2.5	C60 × 3.0	C55 × 3.0	B45×1.5×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
11-15	C40×2.5	C55 × 2.5	C48 × 2.5	B45×1.0×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
16-20	C40×1.5	C48 × 2.0	C40 × 2.5	B40×1.0×30×2.0	B35×1.0×15×2.0

کاربرد روش آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA) می‌باشد. ساختار مفهومی این روش بر این اساس است که تغییرات یک پارامتر مشخصه EDP^۴ نسبت به یک پارامتر IM^۵ (با معیار بیشینه شتاب مولفه TR) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل (۳) نمودارهای IDA متناظر با برآورد بیشینه پوش ترکیبی جابه‌جایی نسبی طبقات در هر دو جهت X و Y و نیز نمودارهای IDA خلاصه شده ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ نشان داده شده است. در روند پیاده‌سازی نمودارهای IDA، فاکتور مقیاس PGA به صورت گام به گام افزایش داده شده تا به تدریج معیار آستانه فروریزش (متناظر با دریفت ۲۰ درصد) برآورد شود [28, 29]. نتایج نشان می‌دهد، در (سازه ۱) روند گسترش حوزه‌های غیرخطی و تشکیل مفاصل پلاستیک با معیار CP نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطوح شتاب به نسبت پایین‌تری رخ داده و ساختار مقاوم نیز دچار ناپایداری می‌شود.

برآورد خسارت ناشی از زلزله، یک مؤلفه مهم در تجزیه و تحلیل مبتنی بر ارزیابی عملکرد سازه‌ها است. نمودار شکنندگی، احتمال وقوع یک سطح خاص از خسارت در سازه (یا فراتر از آن سطح خاص) را به عنوان تابعی از شدت حرکت زمین و بر پایه کاربرد و مفهوم‌سازی تابع توزیع احتمال توصیف می‌نماید. نمودار شکنندگی، یک مؤلفه کلیدی در ارزیابی و برآورد فرضی فروریزش سازه است و با استفاده از آن می‌توان احتمال مربوطه را تحت رکوردهای زلزله، همراه با توجه به شدت IM به دست آورد. نکته دیگر آن که بر پایه نمودارهای شکنندگی می‌توان یک نگرش و توصیف مؤثر برای پردازش وقوع ناپایداری و احتمالی فروریزش اسکلت مقاوم را تخمین زد [28-30].

۳- رکوردهای زلزله انتخابی

انتخاب نوع رکورد زلزله و توجه به پالس بزرگ اصلی، ساختارهای موجی شکل کوچک‌تر و اسپایک‌های کم‌دامنه تا پردامنه موجود در هر دو تاریخچه زمانی شتاب و سرعت و نیز گام زمانی آنها (هم ارز با محتوای فرکانسی مربوطه)، به عنوان یک موضوع مهم در مباحث ارزیابی طرح لرزه‌ای اسکلت مقاوم و تدوین نگرش‌های جامع در شناخت رفتار غیرخطی سازه‌ها محسوب می‌شود. در این پژوهش مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک متأثر از جهت‌داری پیش‌رو^۱ با نام مشخصه BAM، SYL، E06، TAB و نیز حاوی مشخصه جهت‌داری پس‌رو^۲ با نام مشخصه CLS برگزیده شده‌اند. همچنین برای ارزیابی رکوردهای دارای آثار جهت‌داری خنثی^۳ نیز جنبش‌های با نام مشخصه ARL و HVP انتخاب شده‌اند. جدول (۲) مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی را نشان می‌دهد. همچنین در بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، هر سه مؤلفه LN، TR و UP به صورت هم‌پایه شده در سطح شتاب ۱g (نسبت به مؤلفه TR) به طور هم‌زمان و به ترتیب در جهت X، Y و Z پلان اعمال شده‌اند. اطلاعات مربوطه از پایگاه تحقیقاتی PEER دریافت شده است [25, 26].

۴- ارزیابی پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌های مطالعاتی

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری با استفاده از نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی با نرم‌افزار PERFORM 3D مطالعه و ارزیابی شده است [27].

۴-۱- نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای

یک روند کارآمد برای ارزیابی و تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها،

^۴ Engineering Demand Parameter

^۵ Intensity Measure

^۱ Forward Directivity Effects

^۲ Backward Directivity Effects

^۳ Neutral Directivity Effects

جدول ۲. مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی

Table 2. Physical specifications of the selected near-field earthquake records

	Ground Motion Station	Year	Magnitude (Mw)	Distance (km)	Component	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	Tabas Tabas City	1978	7.4	3.0km	LN	0.836	97.70	39.91
					TR	0.851	121.3	94.50
2	Bam Bam City	2003	6.6	1.0km	LN	0.635	59.60	20.70
					TR	0.793	123.7	37.40
3	Northridge Sylmar (SYL)	1994	6.7	6.4km	LN	0.604	78.20	16.05
					TR	0.843	129.6	32.68
4	Imperial Valley Array (E06)	1979	6.5	1.0km	LN	0.410	64.90	27.69
					TR	0.439	109.8	65.89
5	Northridge Rinaldi (RRS)	1994	6.7	7.1km	LN	0.472	72.75	19.82
					TR	0.838	166.8	29.78
6	Northridge Sylmar (SCE)	1994	6.7	6.4km	LN	0.897	102.23	45.28
					TR	0.612	117.47	54.16
7	Northridge Newhall (NWH)	1994	6.7	5.0km	LN	0.583	74.93	17.55
					TR	0.589	97.32	37.92
8	Loma Prieta Corralitos (CLS)	1989	6.9	5.1km	LN	0.479	44.99	11.62
					TR	0.643	55.19	10.89
9	Imperial Valley Holtville (HVP)	1979	6.5	7.5km	LN	0.221	49.06	33.90
					TR	0.252	50.02	32.06
10	Northridge Arleta (ARL)	1994	6.7	12.9km	LN	0.307	23.04	10.18
					TR	0.345	42.04	10.09

می باشد [31-33]:

$$P(C|IM = im_i) = P(EDPd \geq EDPc | IM = im_i) \quad (1)$$

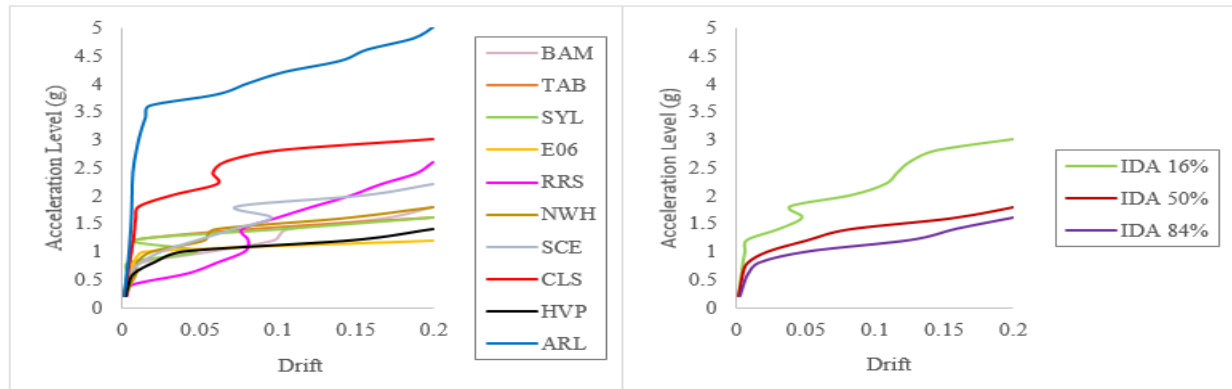
تبیین دیگر بحث فوق نیز در روند تعیین IM پیاده سازی شده و شتاب جانبی به طور مستقیم در تخمین احتمال فروریزش سازه مورد استفاده قرار می گیرد. در این روند، یک متغیر تصادفی به عنوان ظرفیت فروریزش با نماد IM_c مشخص می شود. پارامتر IM_c در واقع ماکزیمم شتاب جانبی است که در آن سازه ناپایداری دینامیکی را تجربه خواهد نمود. سپس، بر اساس ارزیابی نتایج تحلیل های IDA تحت یک مجموعه رکوردهای زلزله، تخمینی از ظرفیت فروریزش سازه مطالعاتی به دست می آید. همچنین در همین راستا نیز رابطه (۲) احتمال تجاوز IM از IM_c را نشان می دهد:

$$P(C|IM = im_i) = P(IM_c < IM = im_i) \quad (2)$$

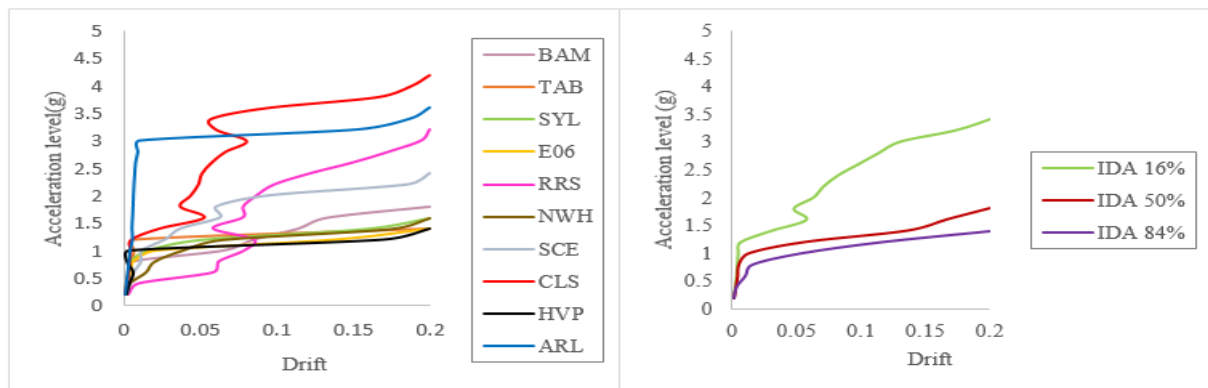
شایان ذکر است که دو روند با جنبه احتمالاتی برای انتخاب و

پردازش پارامترهای EDP و IM در تخمین و ارزیابی نمودارهای شکنندگی و برآورد احتمال فروریزش سازه کاربرد دارند. توصیفات عددی این موارد نیز با توجه به ارتباط پارامتر تقاضای مهندسی EDP (با معیار پوش ترکیبی بیشینه جابه جایی نسبی طبقات) و شاخص IM از طریق تحلیل های دینامیکی فزاینده به دست می آید.

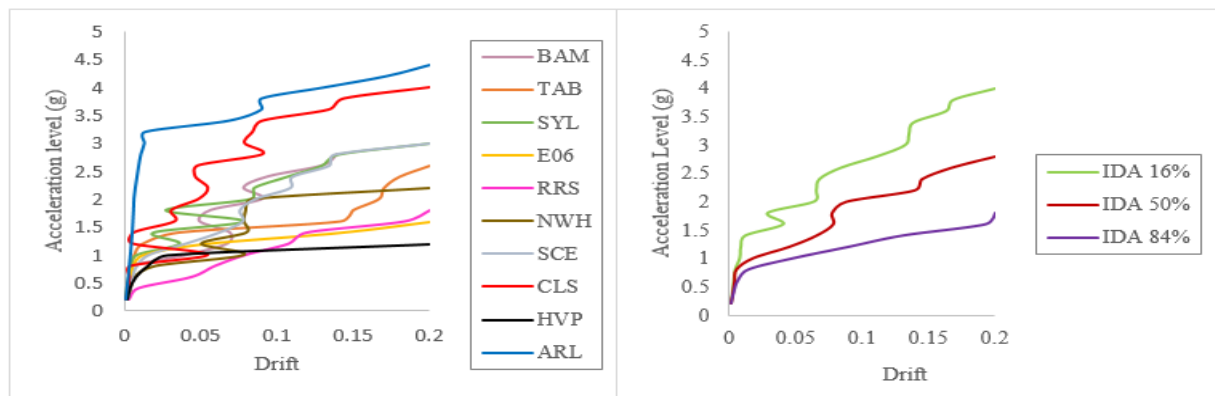
در معیارسازی EDP برای تخمین احتمال فروریزش سازه در تراز شدت IM، فرض می شود که اسکلت مقاوم در سطح عملکرد CP قرار دارد و مقدار تقاضای مفروض (با نشانه EDP Demand) از اندازه ظرفیت موجود (با نشانه EDP Capacity) در شدت $IM = im$ بیشتر می شود. بیان دیگر این موضوع به صورت عبارت $(EDPd \geq EDPc)$ است و این تعریف با رابطه (۱) معرفی شده و نشان دهنده احتمال تجاوز $EDPd$ از $EDPc$ در شدت $IM = im$



(الف)



(ب)



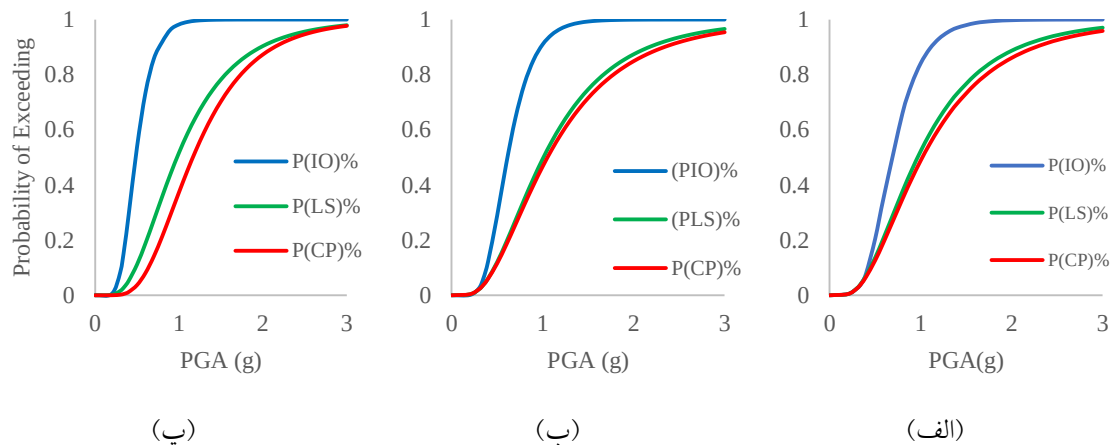
(پ)

شکل ۳. نمودارهای IDA متناظر با بیشینه دامنه پاسخ دررفت و سنجش‌های احتمالاتی IDA 16%، IDA 50% و IDA 84% برای سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) سازه ۱، (ب) سازه ۲، (پ) سازه ۳

Fig. 3. The IDA diagrams corresponding to the maximum drift and the probabilistic assessments of the IDA results at the probability of 16%, 50%, and 84% for the studied structures

شده‌اند. جدول (۳) دامنه معیار فراگذشت از حالت حدی برای پارامتر دررفت را بر اساس مطالعات و بررسی‌ها مشخص می‌کند. رابطه (۳) بیان‌گر ساختار ریاضی تابع چگالی احتمال برای توسعه نمودارهای شکنندگی مربوط به سه سازه مطالعاتی است [34, 35]:

برآورد پارامتر IM_c در روند توصیف IM و نیز واکاوی پارامترهای EDPd و EDPc در روند تبیین EDP، وابستگی مستقیم به ماهیت تصادفی رکوردهای زلزله دارد. در این پژوهش، نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک و بر مبنای تحلیل‌های IDA برای هر یک از اسکلت‌های مقاوم مطالعاتی برآورد



شکل ۴. نمودار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) سازه ۱، (ب) سازه ۲، (پ) سازه ۳

Fig. 4. The resulting fragility curves of the studied structures

عملکردی مشخص) برای یک سازه خاص در یک دوره زمانی معین (زمان کنترل) می‌باشد.

برآورد خسارت به ویژه تلفات مربوط به بلایای شدید نیاز به بیان توصیفی مربوطه دارد. همچنین ملاحظه شده است که روش‌های متنوع برآورد خسارت، هیچ‌کدام از ضریب اطمینان بالایی برخوردار نیستند [31-35]. به‌طورکلی خسارات و آسیب‌های ناشی از یک حادثه، به دو دسته خسارات سازه‌ای (LS) و خسارات غیرسازه‌ای (LNS) طبقه‌بندی می‌شوند. خسارت غیرسازه‌ای وابسته به زمان بوده و خسارت سازه‌ای نیز به پارامتر سرعت بستگی داشته و در طی وقوع سانحه رخ می‌دهد. طبق ضوابط HAZUS 2005 [36] با معادل‌سازی نسبت آسیب‌ها و خسارات با حالات حدی عملکردی سازه، نسبت‌های خسارت برای هر حالت استخراج شده و سپس تابع خسارت طبق فرمول پیشنهادی MCEER محاسبه می‌شود. جدول (۳) مطابق با ضوابط HAZUS 2005، نمود آثار خسارات غیرسازه‌ای به صورت افزایشی را همراه با نسبت خسارات اعضای سازه‌ای نشان می‌دهد. تابع خسارت پیشنهاد شده توسط سایمرالو و همکاران [37] مطابق رابطه (۴) است:

$$L(I) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_s}{I_s} \right] \times P_j \left\{ \bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{lim i}) \right\} \quad (4)$$

پارامترهای C_s و I_s در رابطه فوق به ترتیب، نماد هزینه تعمیر سازه در حالت حدی مورد نظر و نماد هزینه کل جایگزینی سازه بوده که به صورت ضرایب خسارت در حالات حدی مختلف لحاظ می‌شوند. همچنین P_j احتمال فراگذشت از حالت حدی

$$P(D|PGA) = \Phi((\ln(PGA) - \mu)/\sigma) \quad (3)$$

پارامترهای D نشانه خسارت، Φ تابع توزیع تجمعی نرمال، μ میانگین و σ انحراف معیار می‌باشند. بر پایه شکل (۳) و نیز بررسی نتایج حاصل از نمودارهای شکنندگی (شکل ۴) مشخص است که سازه ۲ نسبت به دو سازه دیگر، با شیب و احتمال کمتری وارد محدوده‌های عملکردی ایمنی جانی و آستانه فروریزش می‌شود. همچنین، این موضوع پس از تعیین محدوده کنترل و ارزیابی مؤلفه تاب‌آوری، نمود روشن‌تری خواهد داشت.

بر همین اساس، طرح ورودی مثلثی شکل (سازه ۲) نیز سبب ایجاد مشخصه رفتاری مناسب تحت رکوردهای انتخابی می‌شود. اضافه می‌شود که تعبیه طرح هندسی ورودی مثلثی شکل، قابلیت خوبی برای حفظ سطح عملکرد خدمت‌پذیری بدون وقفه داشته و کمترین احتمال فراگذشت از تراز مذکور (برابر با ۸۴ درصد) را در پی دارد. نکته دیگر آنکه یک روند کاهشی برای احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد LS و CP نیز با انتخاب سازه با ورودی چندضلعی، مثلثی و مستطیلی مشاهده می‌شود. مقادیر معیار مذکور در سطح عملکرد CP برای سه سازه مطالعاتی به ترتیب برابر ۴۹ و ۴۸ و ۳۷ درصد است. این مسئله نشان‌دهنده عملکرد به نسبت بهتر سازه مطالعاتی ۳ با طرح ورودی مستطیلی در سطح شتاب ۱g می‌باشد.

۲-۴- ضوابط تعیین تابع خسارت و برآورد مؤلفه تاب‌آوری

رویکرد تاب‌آوری یکی از نگرش‌های یکپارچه مدیریت و کاهش آثار تخریبی بلایا است. مفهوم تاب‌آوری (R) به عنوان یک تابع، نشان‌گر ظرفیت حفظ یک سطح عملکرد (و یا سطوح

همچنین پس از تعیین تابع خسارت و حد کنترل عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، پارامتر افت کیفیت کارایی سازه (کمیت Q) به صورت درصد ارزیابی می‌شود. این پارامتر توسط MCEER به عنوان مؤلفه استحکام تاب‌آوری یا به عبارت دیگر، تاب‌آوری سخت معرفی و شناخته می‌شود. جدول‌های (۵) و (۶) مقادیر محاسبه شده مؤلفه استحکام تاب‌آوری برای سازه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهند [36-39].

$$Q = 1 - Li \quad (۶)$$

شکل (۵) نشان‌دهنده شاخص تاب‌آوری (متناظر با کمیت Q) سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای انتخابی جدول (۲) می‌باشند. طبق نتایج حاصل شده، شاخص تاب‌آوری در سازه‌های ۲ و ۳ دارای نمود مطلوب‌تری بوده و دامنه عددی مربوطه نیز مقدار بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده از جدول‌های (۵) و (۶)، سازه مطالعاتی ۱ دارای بزرگ‌ترین مقدار تابع خسارت و کمترین مؤلفه تاب‌آوری می‌باشد. این مسئله، نمودی از قابلیت آسیب‌پذیری بیشتر این سازه تحت رکوردهای انتخابی است. همچنین، پردازش‌های عددی مؤلفه تاب‌آوری (جدول ۶) نشان‌دهنده مقادیر یکسان و بیش از ۸۲ درصد برای دو سازه شبکه قطری ۲ و ۳ است. این مسئله بیان‌گر افت کارایی کمتر (متناظر با دامنه بزرگ‌تر برای پارامتر Q) در عملکرد لرزه‌ای سازه‌های با ورودی مثالی (سازه ۲) و مستطیلی (سازه ۳) نسبت به سازه با ورودی چندضلعی (سازه ۱) می‌باشد.

مورد نظر بوده که با توجه به نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای قابل استخراج است. نکته دیگر آن که برای استخراج دامنه عددی و مقادیر مشخص مؤلفه تاب‌آوری، نیاز به تعیین محدوده کنترل مطابق با نمودار شکنندگی لرزه‌ای می‌باشد. در این پژوهش محدوده کنترل با توجه به رابطه (۵) تعیین شده است:

$$C_u = ABI \quad (۵)$$

پارامترهای C_u حد کنترل عملکرد لرزه‌ای (کرانه پوششی عملکرد لرزه‌ای)، A ضریب شتاب مبنای طرح ساختگاه، B ضریب بازتاب ساختمان و I ضریب اهمیت سازه بوده و ضرایب مذکور وابستگی مستقیم به پریود طبیعی سازه و خاک ساختگاه (با فرض خاک نوع II) دارند. در این حالت با توجه به پریود ارتعاش آزاد سازه‌ها و با در نظر گرفتن ساختگاه در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد، تعریف ضریب بازتاب بین مقادیر ۱ و ۲/۵ به همراه ضریب شتاب مبنای $0.35g$ و ضریب اهمیت سازه به صورت ثابت، آنگاه حد کنترل لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی قابل ارزیابی است. نتایج آورده شده در جدول (۴) نشان‌دهنده احتمالات فراگذشت متناظر با حد کنترل لرزه‌ای مربوط به سازه‌های مطالعاتی است [20, 38].

رابطه (۶) نشان‌دهنده کمیت افت کیفیت کارایی سازه، پیشنهاد شده توسط برونو و همکاران می‌باشد. در این رابطه Q پارامتر افت کیفیت کارایی سازه و Li تابع خسارت می‌باشد. برآورد عددی کمیت Q نشان‌دهنده تاب‌آوری لرزه‌ای نهایی سازه می‌باشد.

جدول ۳. معیار فراگذشت از حالات حدی برای پارامتر دریافت [23, 34] و نیز تعریف نسبت خسارت (ضریب خسارت) بر طبق HAZUS 2005 [36]

Table 3. The defined limit states based on the drift parameter and Definition of the damage ratio (damage factor) according to HAZUS 2005

Damage	Insignificant	Average (Equivalent to the IO performance level)	Average (Equivalent to the LS performance level)	Average (Equivalent to the CP performance level)
Domain of EDP [23, 34]		0.005	0.015	0.02
Structural Type [36]	0.01	0.1	0.5	1
Non-Structural Type [36]	-	Equivalent to 0.1	Equivalent to 0.1	-
Sum	0	0.2	0.6	1

جدول ۴. تعیین احتمال فراگذشت از حدود عملکرد با توجه به حد کنترل لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی

Table 4. Determination of the probability of exceeding performance limits considering the seismic control limit of the studied structures

Structure	The probability of exceeding performance levels		
	IO	LS	CP
Structure (1)	0.2804	0.1488	0.1427
Structure (2)	0.1598	0.1012	0.0799
Structure (3)	0.4629	0.0906	0.0271

جدول ۵. تعیین توابع خسارت Li برای سازه‌های مطالعاتی بر پایه نتایج جدول‌های ۳ و ۴

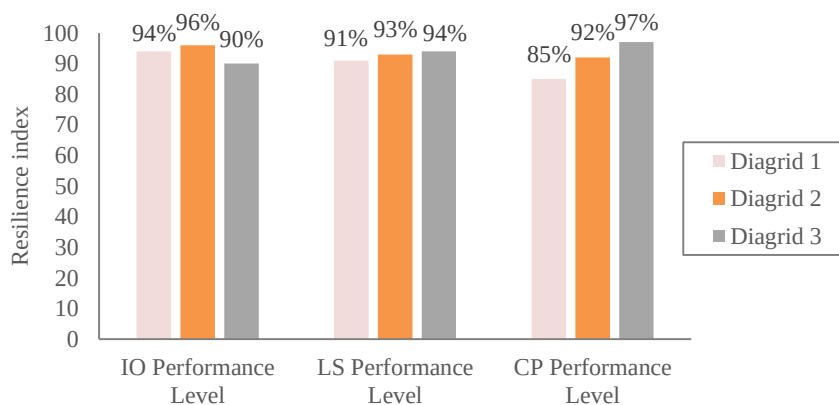
Table 5- Determination of the damage functions Li for the studied structures based on the results of Tables 3 and 4

Structure (1)				Structure (2)		Structure (3)	
Limit State	Damage Ratio	The probability of exceeding	Damage Function	The probability of exceeding	Damage Function	The probability of exceeding	Damage Function
IO	0.2	0.2804	0.0560	0.1598	0.0319	0.4629	0.0926
LS	0.6	0.1488	0.0892	0.1012	0.0607	0.0906	0.0544
CP	1.0	0.1427	0.1427	0.0799	0.0799	0.0271	0.0271
Total (Table 5)		-	0.2880	-	0.1725	-	0.1741

جدول ۶. تعیین مؤلفه تاب‌آوری سازه‌های مطالعاتی بر پایه نتایج جدول ۵

Table 6. Determination of the seismic resilience component of the studied structures based on the results of Table 5

Structure	Damage Function Li	Quality Function Q	Resilience Component (%)
Structure (1)	0.2880	0.7118	71.18
Structure (2)	0.1725	0.8273	82.73
Structure (3)	0.1741	0.8258	82.58



شکل ۵. شاخص تاب‌آوری سازه‌های مطالعاتی در سطوح عملکرد IO، LS و CP بر پایه نتایج جدول ۶

Fig. 5. Resilience index of the studied structures at IO, LS, and CP performance levels based on the results of Table 6

شاخص تاب‌آوری سازه مطالعاتی ۳ برای سه سطح عملکردی IO، LS و CP به ترتیب برابر ۹۰، ۹۴ و ۹۷ درصد است. این مورد نیز بیان‌گر بهبود سطح عملکرد سازه با طرح ورودی مستطیلی شکل، همگام با افزایش سطح حالت حدی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سه سازه شبکه قطری با هندسه ورودی متفاوت در اسکلت مقاوم تحت ۱۰ رکورد حوزه نزدیک متاثر از آثار جهت‌داری پیش‌رو، پس‌رو و خنثی ارزیابی شد. هر سه سازه مطالعاتی بر پایه هم‌ارزی مشخصات سختی المان‌های اصلی اسکلت مقاوم با اعضای مدل قاب-پایه طراحی شده‌اند. همچنین، پیاده‌سازی و پردازش نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده، نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای و مؤلفه تاب‌آوری متناظر با

افزون بر این مطلب نیز در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که سازه با ورودی مثلثی (سازه ۲) توانایی بیشتری برای انتقال بارهای دینامیکی در حوزه عملکردی IO دارد. همچنین، پردازش عددی مؤلفه تاب‌آوری در سطح عملکردی LS برای سازه‌های مطالعاتی ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۹۱ و ۹۳ و ۹۴ درصد محاسبه شده است. نکته دیگر آن که با افزایش دامنه دررفت و بررسی سطح عملکرد CP، سازه ۳ پایداری دینامیکی بیشتری دارد. آورده دیگر در این موضوع آن است که با افزایش سطح عملکرد، مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سازه‌های ۱ و ۲ دارای روند کاهشی است. این مسئله نشان‌دهنده تسریع روند زوال مقاومت و افزایش احتمالی وقوع ناپایداری در اسکلت سازه با عبور از سطح عملکرد IO به سمت سطح عملکردی CP می‌باشد. همچنین طبق شکل (۵)، مقادیر

درصد به ترتیب برای سازه‌های مطالعاتی ۳ و ۲ محاسبه شد. از این رو، طرح ورودی مستطیلی شکل برای سازه‌های شبکه قطری، احتمال حفظ سطح عملکرد خدمت‌پذیری بی‌وقفه تحت جنبش‌های نیرومند زمین را تا حدودی کاهش می‌دهد. همچنین در پردازش عددی حالت حدی آستانه فروریزش نیز مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سه سازه مطالعاتی ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۸۵، ۹۲ و ۹۷ درصد به دست آمد. بدین ترتیب، طراحی مستطیل شکل برای ورودی سازه سبب کارایی بهتر و کاهش آهنگ خرابی اسکلت مقاوم در حالت حدی CP می‌شود. نتایج این پژوهش بیان‌گر بهبود نسبی عملکرد لرزه‌ای سازه شبکه قطری طراحی شده با الگوی ورودی مستطیلی (سازه ۳)، همگام با افزایش سطح حالت حدی از IO به CP می‌باشد.

قدردانی نویسندگان

انجام این پژوهش تحت حمایت مادی از سوی مراکز یا نهادها نبوده است.

تعارض منافع

سهم نویسندگان برابر است.

سهم نویسندگان

این پژوهش منبع مالی نداشته است.

منابع مالی

این پژوهش منبع مالی نداشته است.

References

- [1] Kim J. and Lee Y.H., 2012. Seismic performance evaluation of diagrid system buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21, pp.736-749. <https://doi.org/10.1002/tal.643>.
- [2] Mele E., Toren M., Brandonisio G. and De Luca A., 2014. Diagrid structure for tall buildings: case studies and design considerations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), pp.124-145. <https://doi.org/10.1002/tal.1029>.
- [3] Rariei M. and Adeli H., 2016. Sustainability in high-rise building design and construction. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(13), pp.643-658. <https://doi.org/10.1002/tal.1276>.

- هر سه سازه مطالعاتی به شرح زیر ارزیابی محاسباتی شد.
- بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی فزاینده نشان‌گر آن است که در سازه مطالعاتی ۱ روند گسترش حوزه‌های غیرخطی و تشکیل مفاصل پلاستیک با معیار CP نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطوح شتاب به نسبت پایین‌تری رخ داده و ساختار مقاوم نیز دچار ناپایداری می‌شود.
- بر پایه نمودارهای شکنندگی به دست آمده، ملاحظه شد که سازه مطالعاتی ۲ نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطح شتاب ۱g و با احتمال فراگذشت ۸۴ درصدی، شیب و احتمال کمتری برای ورود به محدوده عملکردی IO نشان می‌دهد. همچنین همراه با افزایش سطوح عملکردی، مقادیر احتمال فراگذشت در سطح شتاب ۱g نیز کاهش می‌یابد. نتایج پارامتر مذکور برای سازه با ورودی چند ضلعی (سازه ۱) متناظر با سطوح عملکردی IO، LS و CP به ترتیب برابر ۹۲، ۵۳ و ۴۹ درصد بدست آمد.
- پیرو تعریف میزان فراگذشت از حدود عملکردی مشخصه و نیز محاسبه تابع خسارت با استفاده از فرمولاسیون پیشنهادی MCEER، پارامتر افت کیفیت کارایی و مؤلفه تاب‌آوری مربوطه محاسبه شد. مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سازه شبکه قطری ۱ برابر ۷۱ درصد و درباره دو سازه دیگر نیز بیش از ۸۲ درصد به دست آمد. بنابر این، ایجاد طرح ورودی برای اسکلت مقاوم با ساختار مثلثی و مستطیلی، توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از رکوردهای زلزله را بهبود می‌بخشد.
- در بررسی نتایج شاخص تاب‌آوری در سطح عملکرد IO، کمترین مقدار برابر ۹۰ درصد و بیشترین مقدار نیز برابر ۹۶

- [4] Montuori G.M., Mele E., Brandonisio G. and DeLuca A., 2014. Geometrical patterns for diagrids: exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*, 71, pp.112-127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.017>.
- [5] Asadi E., Li, Y. and He Y., 2018. Seismic performance assessment and loss estimation of steel diagrid structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 144(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002164).
- [6] Moon K., 2008. Sustainable structural engineering for tall building. *International Journal of Tall and Special Buildings*, 17(5), 895-914. <https://doi.org/10.1002/tal.475>.

- [7] Kim J. and Kong J., 2013. Progressive collapse behavior of rotor-type diagrid buildings. *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22, pp.1199-1214. <https://doi.org/10.1002/tal.762>.
- [8] Heshmati M., Khatami A. and Shakib H., 2020. Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings. *Journal of Structures*, 25, pp.113-126. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.030>.
- [9] Sadeghi S. and Rofooei F.R., 2020. Improving the seismic performance evaluation of steel diagrid structures using buckling restrained braces. *Journal of Construction Steel Research*, 166, 105905. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105905>.
- [10] Heshmati M. and Aghakouchak A., 2019. Quantification of seismic performance factors of steel diagrid system. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(3), e1572. <https://doi.org/10.1002/tal.1572>.
- [11] Lee J., Kong J. and Kim J., 2018. Seismic performance evaluation of steel diagrid buildings. *International Journal of Steel Structures*, 18(3), pp.1035-1047. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0044-8>.
- [12] Moradi M. and Abdolmohammadi M., 2020. Seismic fragility of a diagrid structure based on energy method. *Journal of Constructional Steel Research*, 174, 106311. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106311>.
- [13] Vahdani R., Gerami M. and Razi M., 2017. Seismic vulnerability assessment of steel moment-resisting frames based on local damage. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12, 1750016. <https://doi.org/10.1142/S1793431117500166>.
- [14] Zenter I. and Gundel M., 2017. Fragility analysis method: review of existing approaches and application. *Nuclear Engineering and Design*, 323, pp.245-258. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.021>.
- [15] Xu J.G., Wu G. and Feng D.C., 2020. Near fault ground motion effects on seismic resilience of frame structures damaged in Wenchuan earthquake. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16, 1704801. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019>.
- [16] Azhdarifar M., Meshkat-Dini A. and Sarvghd Moghadam A.R., 2017. Analytical study of interior rigid bents arrangement on seismic response of tall buildings. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, 19(3), pp.247-260.
- [17] Khalaj-Zadeh M., 2021. *Evaluation of Seismic Behavior and Stability of Diagrid Structures based on the Criterion of Fragility Curves in Near-Fault Zones*. MSc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, (in Persian).
- [18] The Iranian National Building Code. 2014. *Steel structures*. Issue 10, Tehran, Iran.
- [19] The Iranian National Building Code. 2014. *Design loads for buildings*. Issue 6, Tehran, Iran.
- [20] Standard No. 2800. 2014. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4th Edition, Tehran, Iran.
- [21] Asadi E. and Adeli H., 2018. Seismic performance factors for low-to mid-rise steel diagrid structural systems. *International Journal of Tall and Special Buildings*. <https://doi.org/10.1002/tal.1505>.
- [22] SAP2000, CSI, 2010. Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [23] FEMA 356, 1998. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management*.
- [24] FEMA 440, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. *Applied Technology Council (ATC-55 Project)*.
- [25] PEER Strong Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>.
- [26] Li C., Meng K. and Gou Y., 2024. An efficient algorithm to identify strong pulse-like ground motions based on the smoothed significant velocity half-cycles, *Earthquake Engineering*, pp.1-17.
- [27] PERFORM 3D, CSI, 2011. Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [28] Lachanas C.G. and Vamvatsikos D., 2021. Model type effects on the estimates seismic response of a 20story steel moment resisting frame. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 147(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003010).
- [29] Zhao D., Wang H., Wang D., Zhu R. and Zhang J., 2022. Quantitative classification of near-fault ground motions selected by energy indicators, *Structures*, 35, pp.780-791, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.032>.
- [30] Tian Y., Lin K., Zhang L., Lu X. and Xue H., 2021. Novel seismic progressive collapse resilient super-tall building system. *Journal of Building Engineering*, 102790.
- [31] Lallemand D., Kiremidjian A. and Burton H., 2015. Statical procedures for developing earthquake damage fragility curves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44, pp.1373-1389.
- [32] Pnevmatikos N.G., Papagiannopoulos G.A. and Papavasiliou G.S., 2019. Fragility curves for mixed concrete/steel frames subjected to seismic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, pp.709-713.
- [33] Cimellaro G.P., Reinhorn A.M. and Bruneau M.,

2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32, 3639-3649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>.
- [34] Zareian F., Krawinkler H., Ibarra L. and Lignos D., 2010. Basic concept and performance measures in prediction of collapse of buildings under earthquake ground motions. *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19, pp.167-181.
- [35] Xing L., Gardoni P. and Zhou Y., 2024. An Fragility estimates for high-rise buildings with outrigger systems under seismic and wind loads. *Earthquake Engineering*, 28:2, pp.496-531.
- [36] Multi-Hazard Loss Estimation Methodology (HAZUS), (2005). *Federal Emergency Management Agency & Department of Homeland Security*, Washington, D.C.
- [37] Cimellaro G.P., Fumo C., Reinhorn A.M. and Bruneau M., 2009. Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities, *Technical Report MCEER*, University of Buffalo, State University of New York.
- [38] Baghaei E., Homami P. and Meshkat-Dini A., 2021. Evaluation of the robustness component of seismic resilience in low and mid-rise braced frame structures in near-field sites. *Sharif Journal of Civil Engineering*. Sharif University of Technology, Tehran, IRAN, 37.2 (2.2), pp.159-171, <https://doi.org/10.24200/J30.2020.56543.2839>. (in Persian).
- [39] Khademi M., Tehranizadeh M., Shirkhani A. and Hajirasouliha I., 2023. Earthquake-induced loss assessment of steel dual concentrically braced structures subjected to near-field ground motions. *Structures*, 51, pp.1123-1139, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.105>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Khalajzadeh, M., Morshed-Shekarchi, S., Meshkat-Dini, A. and Massumi, A., 2026. Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience. *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp.19-32.



Prediction of Accidents at Rail-Road Grade Crossings Using the Poisson Mode

Seyed Ali Mosayebi¹, Mohammad Hosseini², Reza Mohammad Hasany^{1*} 

1. Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Master of Science, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Rail transportation holds a significant position among transportation modes due to its cost-effectiveness and high safety. However, the intersection of road and rail networks at level crossings reduces the safety of these points due to the direct connection of the rail infrastructure with road users and pedestrians. The growth of rail and road networks due to increased population and travel has increased the number of these crossings, which has led to an increase in the number of accidents, which are usually of high severity, and this has caused additional costs and delays. Therefore, there is a need for systematic methods to prioritize crossings to improve safety.

The present study includes sections of introduction, literature review, data description, statistical collection and analysis, modeling, validation, discussion, and results. This study aims to examine the factors influencing the number of accidents at these crossings and propose a method for prioritizing authorized level crossings in Iran, with an emphasis on improving safety. The research is based on 10 years of data up to 2022, demographic block data from 2006, and the characteristics of 130 level crossings. It employs the Zero-Inflated Poisson (ZIP) model, which offers higher accuracy than previous studies conducted in Iran. Additionally, this study seeks to diversify the influential variables and explore their relationships with accidents at level crossings. The model consists of two components: The Poisson component, which examines the number of accidents at the studied crossings, is influenced by factors such as road usage type, the male-to-female population ratio within an 8 km radius of the crossing, the distance to the nearest intersection, the total number of passing trains, the total population within an 8 km radius, and the number of railway tracks at the intersection. Given the positive coefficients of these factors in the model, an increase in any of them is expected to result in a higher number of accidents at the crossings. However, an increase in the number of railway tracks at the intersection leads to a reduction in accidents. The second component, the logistic component, evaluates the probability of no accidents occurring at a crossing. Factors such as the presence of an alternative route when the crossing is closed, the male-female population difference within an 8 km radius, and the average daily road traffic influence this probability. Specifically, an increase in the first two factors enhances the probability of no accidents, while an increase in road traffic reduces this probability.

These findings have several important practical applications. First, urban planners and transportation officials can effectively use this model to identify high-risk crossings and prioritize safety measures such as improving warning signs, increasing lighting, and installing automatic protective barriers. Second, integrating detailed population data into rail safety assessments can lead to more targeted and efficient safety interventions, as population distribution can significantly affect crash risk. Third, policymakers can implement necessary changes to road infrastructure to reduce crash risk, such as modifying steep angles at intersections and optimizing overall traffic flow near crossings. Finally, given the proven effectiveness of alternative routes in reducing crashes, designing additional lanes for crossings with high traffic volumes can be considered an effective and sustainable safety strategy.

Review History

Received: Nov 14, 2024

Revised: Aug 11, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Grade crossing

Accident prediction

Statistical models

Zero-Inflated Poisson model

* Corresponding Author Email: rmhasany@iust.ac.ir - ORCID: 0000-0002-0488-9711



پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح ریل - جاده با بهره‌گیری از مدل پواسون

سید علی مسیبی^۱، محمد حسینی^۲، رضا محمدحسینی^{۱*} 

۱. استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی

گذرگاه هم‌سطح
پیش‌بینی تصادفات
مدل‌های آماری
مدل پواسون صفرآماسیده

حمل و نقل ریلی به دلیل اقتصادی بودن و ایمنی بالا جایگاه ویژه‌ای در بین شیوه‌های حمل و نقلی دارد. اما تلاقی شبکه‌های جاده‌ای و ریلی در گذرگاه‌های هم‌سطح ایمنی شبکه ریلی را کاهش داده و خسارات مالی و جانی به دنبال دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تعداد تصادفات در این گذرگاه‌ها و ارائه روشی برای اولویت‌بندی گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز ایران با تأکید بر بهبود ایمنی، بر اساس داده‌های ۱۰ ساله منتهی به ۱۴۰۱ و بلوک جمعیتی سال ۱۳۸۵ شمسی و مشخصات ۱۳۰ گذرگاه هم‌سطح انجام‌شده و از مدل پواسون صفر آماسیده که نسبت به تحقیقات پیشین در ایران دقت بالاتری دارد، استفاده کرده است همچنین پژوهش حاضر به دنبال و تنوع‌بخشی به متغیرهای مؤثر و ارتباط آن‌ها بر تصادفات گذرگاه‌ها است. این مدل شامل دوبخش است: بخش پواسونی که تعداد تصادفات در گذرگاه‌های یاد شده را بررسی می‌کند تحت تأثیر عواملی همچون: نوع کاربری جاده، نسبت جمعیت مردان به زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه، فاصله تا نزدیک‌ترین تقاطع، تعداد کل قطارهای عبوری، جمعیت کل در محدوده ۸ کیلومتری گذرگاه و تعداد خطوط راه‌آهن موجود در تقاطع می‌باشد با توجه به ضرایب مثبت این عوامل در مدل، می‌توان انتظار داشت که در صورت افزایش در هریک از آن‌ها شاهد افزایش تعداد تصادفات در گذرگاه‌های یاد شده باشیم. ولی افزایش تعداد ریل در تقاطع به کاهش تصادفات می‌انجامد. بخش دوم مدل، بخش لجستیک است که احتمال عدم وجود تصادف در گذرگاه را ارزیابی می‌کند. عواملی مانند وجود جایگزین هنگام بسته بودن گذرگاه، اختلاف جمعیتی مردان از زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه و میانگین روزانه ترافیک جاده‌ای بر این احتمال اثرگذارند، به طوری که با افزایش دو عامل نخست احتمال عدم وجود تصادف در گذرگاه را افزایش و با افزایش ترافیک، این احتمال کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

افزایش تعداد تصادفات می‌شود که معمولاً شدت بالایی دارند و این باعث هزینه‌های اضافی و تاخیر شده است. بنابراین وجود روش‌های سیستماتیک برای اولویت‌بندی گذرگاه‌ها برای بهبود ایمنی ضروری است.

برای درک ضرورت اهمیت بررسی موضوع می‌توان نگاهی به آمار فرکانس تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح کرد. در کشور

حمل بار و مسافر توسط شبکه ریلی از نظر ایمنی اهمیت بالایی دارد اما گذرگاه‌های هم‌سطح به دلیل ارتباط مستقیم زیرساخت‌های ریلی با کاربران جاده و عابران، باعث کاهش ایمنی این نقاط می‌شوند. رشد شبکه‌های ریل و جاده به دلیل افزایش جمعیت و سفرها، تعداد این گذرگاه‌ها را افزایش داده که موجب

* رایانامه نویسنده مسئول: rmhasany@iust.ac.ir - ORCID: 0000-0002-0488-9711

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



آمریکا از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی تعداد تصادف‌های گزارش شده در گذرگاه‌های هم‌سطح ۱۲۶۰۷ عدد بوده که منجر به مرگ ۱۵۱۶ نفر و جراحت ۵۱۰۴ نفر شد [1]. از سویی دیگر در این کشور هر سه ساعت شاهد برخورد قطار با یک نفر است که در سال ۲۰۱۴ منجر به مرگ ۲۷۰ نفر شد همچنین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ در ایالت فلوریدا با دارا بودن ۴۵۰۳ گذرگاه، ۱۶۴۹ تصادف گزارش شد که منجر به مرگ ۲۶۸ نفر و زخمی شدن ۷۵۵ نفر شد [2]. همه این موارد در صورتی است که کشور آمریکا روند فرکانس تصادفات در گذرگاه‌ها را بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۳ میلادی، شصت و نه درصد کاهش داد [3]. در اتحادیه اروپا بیش از یک‌سوم تصادفات شبکه ریل مربوط به تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح می‌شود که سالانه بیش از سیصد نفر کشته می‌گردد این در حالی است که در کشورهای شرقی این اتحادیه تصادفات گذرگاه‌ها بیش از نیمی از کل سوانح ریلی را شامل می‌شود [4]. با این وجود سهم تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح از کل سوانح ریلی در کشور کره جنوبی حدود نود و پنج درصد است که بیست درصد این تصادفات منجر به مرگ و میر می‌شود [5]. مجارستان با ۵۸۰۰ گذرگاه ثبت شده در سال ۲۰۱۴ شاهد ۷۰ تصادف بود که منجر به ۱۰ نفر فوتی و ۲۱ نفر زخمی شد [6]. در تایوان در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ میلادی ۴۱۰ تصادف گزارش شد که منجر به ۱۲۵ فوتی و ۱۵۳ نفر زخمی شد [7]. میانگین سالانه تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح ایران ۱۲۳ عدد است که ۶۱ نفر فوتی و ۲۱ نفر زخمی به همراه دارد [8]. برای مقایسه وضعیت تصادفات در گذرگاه‌های ایران نسبت به آمریکا می‌توان میانگین سالانه تعداد تصادفات را بر تعداد گذرگاه‌های کشور مربوطه تقسیم کرد و به بررسی و مقایسه پرداخت. میانگین تعداد تصادفات سالانه در گذرگاه‌های آمریکا مابین ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ میلادی، ۲۴۸۷ عدد تصادف است و تعداد گذرگاه‌های این کشور ۲۴۳۲۱۰ گذرگاه است که این شاخص برای آمریکا ۰,۰۱ است [9]. در ایران در سال‌های مذکور به صورت میانگین سالانه ۴۸ تصادف ثبت شده است و در زمان یادشده ۲۴۳ گذرگاه گزارش شده است که در نهایت این شاخص برای ایران ۰,۲ است که حدود بیست برابر عدد آمریکا است [8].

سیاست رایج در ایران برای بهبود ایمنی گذرگاه‌های هم‌سطح،

جداسازی آن‌هاست که البته به دلیل منابع محدود نرخ جداسازی در سال ۲۰۱۱ حدود پانزده تا بیست گذرگاه است [10]. پژوهش‌های زیادی در رابطه با پیش‌بینی تصادفات در گذرگاه‌های ریل و جاده انجام شده است اما استفاده از مدل‌های آماری به دلیل پیش‌بینی و بیان ارتباط تعداد تصادفات گذرگاه با عوامل مؤثر بر آن، جایگاه ویژه‌ای دارد و در سال‌های اخیر در حال افزایش است [1-6, 11-15]. در این راستا استفاده از مدل پواسون به عنوان اولین گام در مدل‌سازی داده‌های تصادفات گذرگاه مدنظر است [5]. وجود تعداد زیاد صفرها و پراکندگی کمتر یا بیش‌ازحد داده‌ها دقت مدل‌ها پواسون را کاهش می‌دهد. از سویی مدل دوجمله‌ای منفی در مواجهه با پراکندگی کم و دو مدل یادشده با تعداد صفرهای زیاد داده‌ها محدودیت دارند [16]. مدل‌های صفرآماسیده علاوه بر پوشش مناسب محدودیت‌های یادشده در سال‌های اخیر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است [12]. این در حالی است که پژوهش‌های اخیر در رابطه با مدل‌سازی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های ایران با استفاده از مدل‌سازی پواسون [15] و دوجمله‌ای منفی [8] انجام گرفته است محدودیت‌های ذکر شده را کامل در نظر نگرفتند از این‌رو یکی از اهداف اصلی پژوهش پوشش این خلأ در رابطه با مدل‌سازی داده‌های تعداد تصادفات گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز ایران است.

از سویی به دلیل استفاده از داده‌های مشترک در کارهای گذشته، این پژوهش‌ها فاقد تنوع در متغیرهای مؤثر در تصادفات گذرگاه‌ها هستند. بر اساس آمار منتشر شده کشور آمریکا ۷۵ درصد افراد درگیر تصادفات گذرگاه‌ها در شعاع ۴۰ کیلومتری این مناطق و ۵۰ درصد افراد درگیر در تصادفات در گذرگاه‌ها در ۸ کیلومتری محل تصادف ساکن هستند [17]. این ارقام بیانگر در نظر گرفتن داده‌های جدیدی در رابطه با مدل‌سازی تعداد تصادفات در گذرگاه و متغیرهای مؤثر بر آن است. در ادبیات موضوع تنها پژوهش خان و همکاران بود که با داده‌های سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی داکوتای شمالی و با مدل لاجیت به پیش‌بینی تصادفات در گذرگاه پرداخت و پنج فاکتور مهم از جمله جمعیت ۸ کیلومتری گذرگاه، روی تصادفات گذرگاه مؤثر تشخیص داد [18]. و سایر پژوهش‌ها تنها به بررسی رابطه عوامل جمعیتی روی تصادفات گذشته داشتند پیش‌بینی از آینده تصادفات در گذرگاه ارائه نکردند [19, 20].

۲-۱- مدل پواسون

داده‌های شمارش تصادفات، با توجه صحیح و غیر منفی بودن با مدل رگرسیون پواسن تقریب زده می‌شوند. در محاسبه تعداد تصادفات برای گذرگاه i به صورت فرمول ۱ است.

$$P(y_i) = \frac{e^{(-\lambda_i)} (\lambda_i^{y_i})}{y_i!} = \frac{e^{-\mu} (\mu^{y_i})}{y_i!} \quad (1)$$

در فرمول ۱، پارامتر پواسونی λ_i بیانگر تعداد تصادفات پیش‌بینی شده برای گذرگاه i است که برابر است با $E(y_i)$ که نشان‌دهنده تعداد تصادفات مورد انتظار در سال در گذرگاه i است. در این مدل λ_i به صورت تابعی از متغیرهای توضیحی مطابق فرمول ۲ مشخص می‌شود.

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_m x_{im} \quad (2)$$

ضرایب β ، ضرایب رگرسیون را برآورد می‌کنند و X ها متغیر وابسته هستند

از آنجا که مدل رگرسیون پواسون هتروسکستیک^۲ است تکنیک مورد استفاده برای برآورد ضریب رگرسیون β می‌تواند حداکثر سازی احتمال لگاریتم باشد در نتیجه جواب به دست آمده مطابق فرمول ۳ است.

$$L(\beta_i) = \prod_i \frac{\exp(-\exp(\beta x_i)) (\exp(\beta x_i))^{y_i}}{y_i!} \quad (3)$$

یک ویژگی توزیع پواسون که استفاده از این مدل را با محدودیت همراه می‌کند برابری میانگین و واریانس آن است که مطابق فرمول ۴ است.

$$Var[Y] = E[Y] = \mu \quad (4)$$

در صورتی که میانگین با واریانس برابر نباشد گفته می‌شود که داده‌ها بیش از حد یا کم‌تر از حد پراکنده هستند. به صورت تجربی در داده‌های تصادفات راه‌آهن شاهد داده‌های بیش از حد پراکنده هستیم [5, 13].

۲-۲- مدل دوجمله‌ای منفی

دوجمله‌ای منفی یک مدل آماری جایگزین است که معمولاً برای مقابله با داده‌های بیش از حد پراکنده به کار می‌رود. توزیع دوجمله‌ای منفی مطابق فرمول زیر مدل‌سازی کرد:

از این رو تمرکز این پژوهش، توسعه مدل با نگاهی دقیق و جامع نسبت به پارامترهای جمعیتی و ارتباط آن‌ها تعداد تصادفات پیش‌بینی شده است.

پژوهش حاضر شامل هفت بخش است: مقدمه: به معرفی موضوع و گپ تحقیقاتی، مرور ادبیات: به معرفی چهار مدل پرکاربرد آماری، توصیف داده‌ها: چگونگی گردآوری و تحلیل آماری، مدل‌سازی: معرفی فرآیند، نرم‌افزارها و متغیرهای مؤثر، اعتبارسنجی: به بررسی دقت مدل، بحث و نتایج: به تحلیل یافته‌ها و مقایسه با پژوهش‌های دیگر می‌پردازند و جمع‌بندی و پیشنهادها: نتایج کلی و توصیه‌هایی برای تحقیقات آینده را بیان می‌کند.

۲-۲- مروری بر مدل‌های پیش‌بینی تعداد تصادفات

در زمینه پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح مطالعات بسیاری صورت گرفته است. بر اساس پایگاه استنادی اسکوپوس این مطالعات در ایران حدود ۵ پژوهش است. در سال‌های اخیر به دلیل قابلیت توصیفی در کنار پیش‌بینی تعداد تصادفات مدل‌های خطی تعمیم یافته^۱ مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. همچنین به دلیل ماهیت تعداد تصادفات مبنی بر گسسته بودن، غیرمنفی و تصادفی بودن قابلیت برآزش خوبی توسط این مدل‌ها دارند. از سویی دیگر پراکندگی بیش یا کمتر از حد، محدودیت‌هایی هستند که معمولاً در اعداد تصادفات یافت می‌شوند [18]. این محدودیت‌ها در داده‌های تصادفات موجب ناکارآمدی پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه توسط مدل پواسون می‌شود از سویی مدل دوجمله‌ای منفی، در مواجهه با داده‌های با پراکندگی کم دچار محدودیت است. از سویی دیگر وجود تعداد صفرهای بیش از حد در تعداد تصادفات باعث محدودیت در مدل‌های پواسون، دوجمله‌ای منفی می‌شود [16].

وجود این محدودیت‌ها باعث توسعه مدل‌های کلاسیک و به وجود آمدن مدل‌های خطی تعمیم‌یافته‌ای با عناوین صفرآماسیده و هاردل شد [1]. در ادامه مطالعات انجام‌شده و مدل‌های مورد استفاده در زمینه پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

² heteroscedastic¹ Generalized linear model (GLM)

$$p_{NB}(X = k) = \frac{\Gamma\left(k + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left(\Gamma(K + 1)\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right)\left(\frac{1}{1 + \alpha\lambda}\right)^{\frac{1}{\alpha}}\left(\frac{\alpha\lambda}{1 + \alpha\lambda}\right)^K}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

۳- توصیف داده‌ها

در این پژوهش اطلاعاتی که مورد استفاده قرار گرفت به قرار زیر بود:

اطلاعات مشخصات گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز، شامل ۲۳۰ گذرگاه که از اداره کل خط و سازه راه‌آهن جمع‌آوری شد.

تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح، شامل مجموع ۱۲۸۰ تصادفات در گذرگاه‌های مجاز و غیرمجاز و ۱۱۹ تصادف ثبت شده در گذرگاه‌های مجاز از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ شمسی که از اداره ایمنی راه‌آهن جمع‌آوری شد.

بلوک آماری جمعیت سال ۱۳۸۵ شمسی که از منابع اینترنتی جمع‌آوری شد [22, 23] و با استفاده از تعداد جمعیت کل هر شهر و تعداد کل خانوارها گزارش نفوس و مسکن سال ۱۳۸۵ مرکز آمار [24] برای اصالت داده‌های جمع‌آوری شده مورد بررسی قرار گرفت.

دیتاست مشخصات گذرگاه‌ها شامل نام اداره کل، نام محور، نام بلاک، نام گذرگاه، کیلومتر، مختصات جغرافیایی، تعداد خطوط ریلی، وجود راه‌بند، نوع راه‌بند، تعداد بوم، وضعیت هم‌سطح سازی، وضعیت علائم هشداردهنده، بیشترین سرعت قطار، تعداد قطارهای عبوری در شب و روز، شیب خط آهن در گذرگاه، هندسه خط آهن، نحوه عبور عابرین، زاویه تقاطع گذرگاه، هندسه و نوع کاربری جاده، ترافیک متوسط روزانه جاده، وضعیت دید کاربران جاده، شیب و تعداد لاین‌ها و درجه اهمیت جاده، وضعیت روشنایی گذرگاه، موقعیت گذرگاه، نام جاده، وضعیت هندسی و اختصاصی و عمومی بودن گذرگاه، ارتفاع خاکریز و وجود جایگزین در صورت بسته بودن گذرگاه بود. متغیر وجود جایگزین در صورت بسته بودن گذرگاه، بیانگر این موضوع است که در صورتی که گذرگاه به دلایلی از جمله عبور قطار، تصادف در گذرگاه و تعمیرات و نگهداری بسته شده باشد یک جایگزین مانند زیرگذر، تقاطع ریل و جاده دیگری در یک فاصله مشخص که این فاصله وابسته به شرایط جغرافیایی منطقه متغیر است، وجود دارد که کاربران جاده توانایی عبور از آن را دارند.

در این دیتاست ۱۳ گذرگاه به دلیل اختصاصی بودن، در دسترس

که $p_{NB}(X = k)$ احتمال رخ دادن k تعداد تصادف و λ مقدار مورد انتظار برای تعداد تصادفات است و α پارامتر پراکندگی است. در توزیع دوجمله‌ای منفی رابطه بین واریانس و میانگین به صورت زیر است:

$$Var(X) = E(X) + \alpha E(X)^2 \quad (6)$$

که در آن پارامتر پراکندگی بیش از حد است. اگر پراکندگی بیش از حد برابر با صفر باشد، دوجمله‌ای منفی به مدل پواسون کاهش می‌یابد [1]. در واقع در این مدل با اضافه کردن یک عبارت به نام ε با توزیع گاما برای همه متغیرها به مساله اجازه خواهد داد تا میانگین و واریانس برابر نباشند [8].

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_m x_{im} + \varepsilon \quad (7)$$

۳-۲- مدل پواسون صفر آماسیده

این مدل که توانایی پوشش تعداد صفرهای زیاد را دارد از دو بخش تشکیل شده است. یک مدل شمارشی و یک مدل لاجیت برای پیش‌بینی تعداد زیاد صفرها، به صورت کلی این مدل دویخشی که شامل پواسون و لاجیت است به صورت فرمول ۹ است.

$$P(Y = y_i) = \begin{cases} P_0 + (1 - P_0)P(y_i) & y_i = 0 \\ (1 - P_0)P(y_i) & y_i > 0 \end{cases} \quad (8)$$

در فرمول ۹، y_i : تعداد مورد انتظار تصادفات، P_0 : احتمال اعداد صفرهای اضافه، $P(y_i)$: دارای یک توزیع پواسون است که پیشتر توضیح داده شد [1].

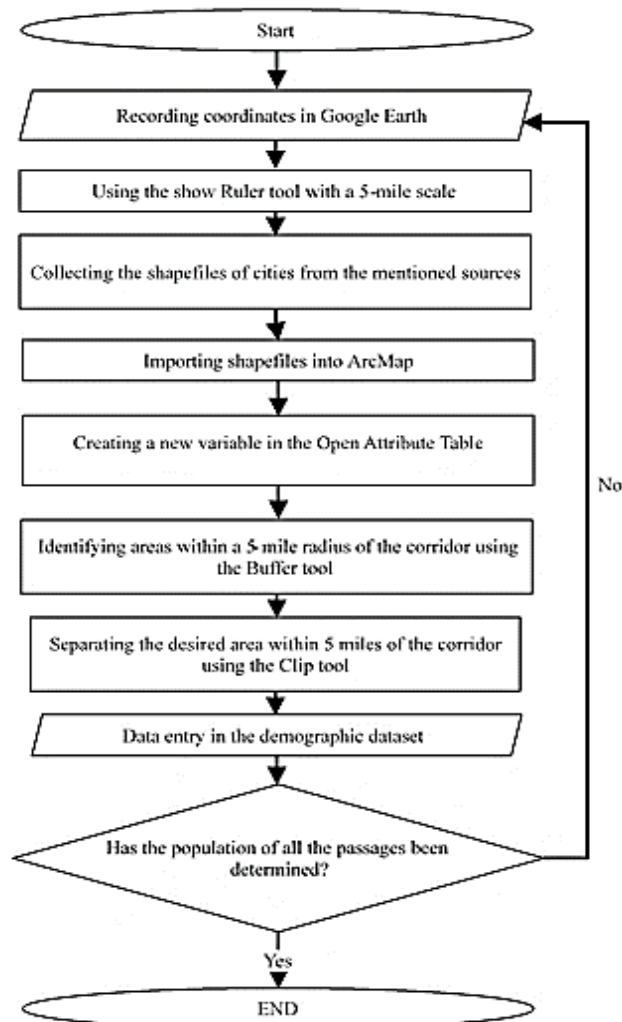
۴-۲- دوجمله‌ای منفی صفر آماسیده

این مدل دویخشی شامل بخش تورم صفر یا مدل لاجیت که برای محاسبه مکان‌های با احتمال تصادف نزدیک به صفر است و بخش شمارش یا مدل دوجمله‌ای منفی برای شمارش تصادفات است. قالب این مدل می‌تواند به صورت فرمول ۹ نوشته شود.

$$P(Y = y_i) = \begin{cases} P_0 + (1 - P_0)g(y_i) & y_i = 0 \\ (1 - P_0)g(y_i) & y_i > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$g(y_i)$: بیانگر مدل دوجمله‌ای منفی است، y_i : تعداد تصادفات مورد انتظار برای گذرگاه i ، P_0 : احتمال صفرهای زیاد [1].

مورد استفاده قرار گرفته است [25]. این در حالی است که مطالعاتی در رابطه با تأثیر این فاکتورها در تصادفات انجام شده است و مؤثر بودن آن بر تعداد تصادفات را تأیید می‌کند [26].



شکل ۱. فلوچارت ساخت متغیرهای جمعیتی

Fig. 1. Flowchart of Demographic Variable Construction

نبودن داده و یا غیر هم‌سطح سازشدن، از دیتاست حذف شد. عوامل مؤثر این دیتاستر مدل و توضیحات تکمیلی به صورت جدول [1] است. توزیع داده‌های تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز مطابق شکل (۲) است. این داده‌ها دارای مقادیر زیادی گذرگاه است که هیچ تصادفی در آن‌ها رخ نداده است از سویی میانگین این داده‌ها ۰,۵۳۴ و انحراف استاندارد آن‌ها ۰,۹۴۳ است که به معنی وجود پراکندگی بیش از حد در داده‌ها است.

در رابطه داده‌های جمعیتی، مختصات عرض و طول جغرافیایی هر گذرگاه از دیتاست مشخصات گذرگاه که قبلاً ذکر شد استخراج شد. و توسط نرم‌افزار Google Earth شهرهای تحت تأثیر در ۸ کیلومتری گذرگاه مشخص شد در نهایت شیپ فایل این شهرها وارد نرم‌افزار Arc Map 10.8.2 شده و متغیرهای یادشده ساخته شد. مراحل ساخت به صورت دقیق‌تر به ترتیب مطابق فلوچارت شکل (۱) پردازش شد و در نهایت دیتاست جمعیتی ایجاد شد که شامل کل جمعیت، جمعیت مردان، جمعیت زنان، جمعیت جوان (جمعیت بین ۵ تا ۱۹ سال)، جمعیت میانسال (جمعیت بین ۲۰ تا ۶۰ سال)، جمعیت کهن‌سال (جمعیت بالای ۶۰ سال) در ۸ کیلومتری گذرگاه، و نسبت جمعیت مردان نسبت به جمعیت زنان و اختلاف آن‌ها، است. مشخصات و توضیحات متغیرهای مؤثر این دیتاستر مدل مطابق جدول (۲) است.

اهمیت استفاده از متغیر نسب جمعیت مردان به جمعیت زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه به این دلیل است که، این متغیر در بعضی از مراجع به عنوان نسبت جمعیتی شناخته می‌شود که شاخصی مؤثر برای بررسی و نمایش فاکتورهای روان‌شناختی از جمله خشونت، افسردگی و عصبانیت

جدول ۱. مشخصات متغیرهای گذرگاه‌ها، مؤثر بر مدل

Table 1. Characteristics of Variables Related to Crossings Affecting the Model.

Variable	Values				Explanations
	Min	S.D	Mean	Max	
Number of railway lines	1	0.7514385	1.348837	4	The number of rail lines present in the Crossing
The number of passing trains at night	1	9.367832	7.95	41	The number of trains passing from 6 PM to 6 AM
The number of passing trains during daylight	1	6.532002	6.37561	31	The number of trains passing from 6 AM to 6 PM
The distance of the passage from the nearest road intersection		Categorized numbers			The distance in kilometers of the passage from the nearest road intersection
Type of road use		Categorized numbers			Type of use and functionality of the road (0 : rural road, 1 : secondary road, 2 : main road)
ADT	66	5625.828	2624.391	47770	Average daily road traffic
In case the passage is blocked, there is an alternative route for it.		Categorized numbers			It indicates an alternative to the intersection in case it is not available.

جدول ۲. متغیرهای جمعیتی مؤثر بر مدل

Table 2. Characteristics of Demographic Variables Used in the Model

Variable	Minimum	Mean	S.D	Median	Maximum	Explanations
Total population	0	106308.5	202608.1	17779	1173517	The total population is 5 miles from the crossing
population to The ratio of the male the female population	0	0.672626	0.825841	0.995372	10.09529	population to The ratio of the male the female population
The difference between the male female population and the population	-8443	2546.759	9018.567	0	116065	The difference in the population of population of women men from the

۴- مدل سازی

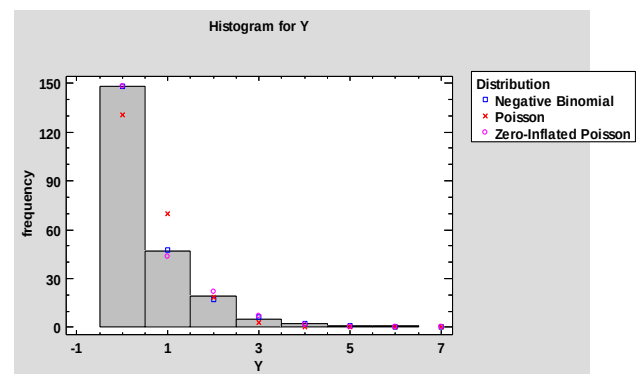
برای انجام مدل سازی تعداد تصادفات در گذرگاه های مجاز هم سطح ایران داده ها به ۸۰ درصد برای آموزش مدل و ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل به صورت تصادفی تقسیم شدند. متغیرهای ورودی مدل مطابق توضیحات بخش ۳ است. با انجام بررسی تعداد تصادفات گذرگاه مشخص شد این داده ها دارای پراکندگی بیش از حد هستند که در شکل (۲)، قابل مشاهده است.

برای انتخاب مدل مناسب برای برازش داده ها، بر اساس مدل های ادبیات موضوع، چهار مدل پواسون، دوجمله ای منفی، پواسون صفر آماسیده، دوجمله ای صفر آماسیده انتخاب شدند. مدل دوجمله ای منفی صفر آماسیده به دلیل محدودیت در داده های ورودی از این لیست حذف شد [31]

برای انتخاب مدل مناسب و مدل سازی با استفاده از نرم افزار NCSS 2023 دو آزمون بصری و لگاریتم درست نمایی بر روی داده های تصادفات انجام شد.

NCSS یک بسته آماری است که توسط Jerry L. Hintze در سال ۱۹۸۱ میلادی ساخته شده و توسط شرکت NCSS واقع در آمریکا، منتشر شد این نرم افزار شامل بیش از ۲۵۰ روش آماری و نموداری هستند همچنین این نرم افزار تمام فرمت های اصلی صفحه گسترده، پایگاه داده و فایل های آماری را وارد و صادر می کند و دارای مجموعه کامل اسناد است. از مهم ترین کاربرد کاربردهای این نرم افزار آماری می توان به: تحلیل واریانس، روش های ارزیابی نمودارها و نمودارها همبستگی، آمار توصیفی، تحلیل رگرسیون T-Tests و ... اشاره کرد [32].

بر اساس شکل (۲) عملکرد دوجمله ای منفی و پواسون صفر آماسیده مشابه هستند اما مدل پواسون همراه با خطا است. اما بر اساس جدول (۳) با توجه به بزرگ تر بودن مقدار لگاریتم



شکل ۲. آزمون بصری روی توزیع داده های تصادف

Fig. 2. Visual Test on the Distribution of Accident Data

جدول ۳. آزمون لگاریتم درست نمایی.

Table 3. Log-Likelihood Test.

Comparison of Alternative Distributions		
Distribution	Est. Parameters	Log Likelihood
Zero-Inflated Poisson	2	-222.85
Poisson	1	-233.589
Negative Binomial	2	-9.99E+11

برای دسته بندی این افراد در سه گروه، ترکیبی از استاندارد سازمان ملل متحد (UN) و سازمان جهانی بهداشت (WHO) مورد استفاده قرار گرفت [27, 28]. سازمان جهانی بهداشت (WHO) گروه های سنی بالای ۵ سال را در سوانح ترافیکی و جاده ایی درگیر دانسته است [29] از این در پژوهش حاضر جمعیت گروه زیر ۵ سال حذف شد، گروه اول (۵ تا ۱۹ سال) شامل دانش آموزان و نوجوانان است که رفتارهای متفاوتی در عبور و مرور دارند. گروه دوم (۲۰ تا ۶۰ سال) شامل نیروی کار و افراد فعال جامعه است که بیشترین میزان سفرهای روزانه را دارند. گروه سوم (بالای ۶۰ سال) شامل سالمندان است که ممکن است درگیر کاهش توانایی های شناختی و حرکتی باشند [30].

فرمول ۱۱ که مربوط به بخش باینری مدل است همبستگی بین میانگین روزانه ترافیک جاده و اختلاف جمعیت مردان از جمعیت زنان ۰,۴ است. تای نتیجه‌گیری کرد که همبستگی متغیرهای حمل‌ونقل شایع است و مشکل‌آفرین نیست. بنابراین، حذف خودکار متغیرهای دارای همبستگی بالا صحیح نیست و انتخاب متغیر باید با توجه به هدف تحقیق انجام شود [33]. همچنین هدف متغیرهای مستقل با همبستگی بالا می‌تواند به کاهش دقت و ثبات مدل منجر شود [34].

درست‌نمایی مدل پواسون صفرآماسیده این مدل برای برازش داده‌ها انتخاب شد (21).

برای مدل‌سازی سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شد و برای تخمین ضرایب از روش برآورد درست‌نمای بیشینه استفاده شد. درنهایت مدل پواسون صفرآماسیده که شامل دو بخش است. بخش شمارشی پواسونی مطابق فرمول ۱۰ است که در این بخش با انجام آزمون همبستگی مشخص شد تعداد خط ریل و تعداد کل قطارها در شبانه‌روز دارای همبستگی ۰,۶ بودند و همچنین در

$$E(\mu) = \text{Exp}(-1.75692212998667 + 0.399693403929521 * S1 + 1.14223671644244 * S2 + 0.368292176186057 * S3 + 0.0257167122783253 * S4 - 0.667965609694737 * S5 + 1.19036202206851E - 06 * S6) \quad (10)$$

$$E(\mu) = \text{Exp}(-1.9928790363313 - 0.000727703428784855 * S7 + 3.44128173088546 * S8 + 0.000225603481089144 * S9) \quad (11)$$

$E(\mu)$ بیانگر تعداد تصادفات، $S1$: نوع کاربری جاده (0: جاده روستایی، ۱: جاده فرعی، ۲: جاده اصلی)، $S2$: نسبت جمعیت مردان به جمعیت زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه، $S3$: فاصله گذرگاه تا تقاطع (0: کمتر از ۲۰ متر، ۱: بین ۲۰ تا ۲۰۰ متر، ۲: بیش از ۲۰۰ متر)، $S4$: تعداد کل قطارهای عبوری در گذرگاه، $S5$: تعداد خط ریل، $S6$: جمعیت کل در ۸ کیلومتری گذرگاه، $S7$: میانگین ترافیک روزانه جاده، $S8$: آیا در صورت بسته بودن گذرگاه جایگزین دارد یا خیر؟ (0: خیر، ۱: بله)، $S9$: اختلاف جمعیت مردان از جمعیت زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه.

پواسونی مطابق جدول (۵) و برای رابطه باینری مطابق جدول (۶) است. مقدار P در ضریب ثابت جدول (۵) نشانگر در نظر نگرفتن متغیرهای دیگری است که می‌تواند متغیر پاسخ را توضیح دهد [8]. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که ۹ متغیر در پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های مجاز هم‌سطح ریل و جاده در ایران در سال‌های ۹۱ تا ۴۰۱ شمسی مؤثر بوده است:

انتخاب متغیرها برای مدل، به این شکل بود که ابتدا همه متغیرهای موجود وارد متغیر شدند در گام بعد متغیری که بالاترین مقدار P -Value را دارا بود حذف می‌شد با حذف این متغیر پارامترهای آماری نظیر AIC قاعداً باید کاهش پیدا می‌کرد که در غیر این صورت متغیر دیگری که مقدار P -Value بالا داشت حذف شد این مراحل تا جایی ادامه پیدا کرد که درنهایت مقدار P همه متغیرها کمتر از ۰,۵ بود [1].

مدل پواسون صفرآماسیده برازش داده‌شده مطابق فرمول ۱۰ نشان‌دهنده رابطه پواسونی و فرمول ۱۱ بیانگر رابطه باینری مدل است نتایج حاصل از برازش مدل روی تصادفات گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز ایران در جدول (۴) قابل‌مشاهده است. همچنین نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل برای هریک از متغیر برای رابطه

جدول ۴. نتایج برازش مدل پواسون آماسیده روی داده‌ها

Table 4. Results of Fitting the Zero-Inflated Poisson Model on the Data

Item	Value
Log-Likelihood	-145.3738
AIC	312.7477

جدول ۵. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل برای متغیرها در رابطه لجستیک

Table 5. Results of Model Implementation for Variables in the Logistic Regression Component

Parameter	Regression Coefficient	Standard Error	Z-Statistic	Two-side P-value
Logistic Regression Model				
Intercept	-1.992879	1.336677	1.49092-	0.1359825
S7	-0.0007277	0.00037367	1.957468-	0.05
S8	3.441282	1.618048	2.12681	0.0334
S9	0.0002256	0.000117	1.9583	0.05

جدول ۶. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل برای متغیرها در رابطه پواسون

Table 6. Results of Model Implementation for Variables in the Poisson Component

Parameter	Regression Coefficient	Standard Error	Z-Statistic	Two-side P-value
Poisson Regression Model				
Intercept	-1.756922	0.4248444	-4.14E+00	3.54E-05
S1	0.3996934	0.1599273	2.499219	0.0124468
S2	1.142237	0.2707416	4.218917	2.45E-05
S3	0.3682922	1.38E-01	2.661102	0.0077885
S4	0.0257167	0.0129264	1.989478	0.0466484
S5	0.6679656-	0.2893587	2.308434-	0.020975
S6	1.90E-06	4.89E-07	2.432842	0.0149808

ضرایب آن‌ها هم مثبت بود به این معنی که با افزایش این متغیرها فرکانس تصادفات در گذرگاه‌های یادشده افزایش می‌یابد.

تعداد خطوط ریل در گذرگاه (S6) با توجه به مقدار P آن یعنی ۰,۰۲ در مدل معنادار تشخیص داده شد و با توجه به ضریب منفی آن می‌توان این نتیجه را برداشت کرد که با افزایش این متغیر تعداد تصادفات در گذرگاه‌های یادشده کاهش می‌یابد.

از منظر کاربردی، این یافته‌ها چندین ملاحظه کلیدی برای ایمنی حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی زیرساختی را برجسته می‌کنند:

مدیریت ترافیک: تأثیر معنادار حجم ترافیک در متغیرهای میانگین روزانه ترافیک در جاده، نوع کاربری جاده و تعداد عبور قطارها نشان می‌دهد که تقاطع‌های پرترافیک باید در اولویت اقدامات ایمنی قرار گیرند، مانند بهبود علائم، نصب موانع خودکار، یا بهینه‌سازی زمان‌بندی سیگنال‌ها.

بهبود زیرساخت: تعداد خطوط ریل در گذرگاه، فاصله گذرگاه تا نزدیک‌ترین تقاطع جاده و اینکه در صورت بسته بودن گذرگاه آیا جایگزین وجود دارد؟ تأثیر مثبت این فاکتورها که مستقیم یا غیرمستقیم تحت تأثیر زیرساخت‌ها هستند را بر میزان تصادفات تأیید می‌کند که این تدابیر ایمنی مؤثر هستند و نیاز به توسعه گسترده‌تر در مناطق پرخطر دارند.

ملاحظات جمعیتی: متغیر جمعیت کل نقش تراکم جمعیت در احتمال تصادف نشان می‌دهد که استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری باید اقدامات ایمنی ریلی را به ویژه در مناطق پرتراکم در نظر بگیرند از سویی عوامل دیگر همچون اختلاف و نسبت جمعیت مردان و زنان در ۸ کیلومتری گذرگاه نشان از بررسی دقیق‌تر به شاخص‌های جمعیتی است که تصمیم‌گیرندگان هنگام توسعه و یا ساخت گذرگاه جدید باد مدنظر داشته باشند.

• در بخش لجستیک مدل: خروجی تابع احتمال این بخش باینری است و احتمال عدم وجود یا وجود تصادفات در گذرگاه‌های یادشده را اندازه‌گیری می‌کند. متغیرهای مؤثر آن عبارت است از:

میانگین ترافیک روزانه در بخش جاده (S7) که بر اساس مقدار P این متغیر بر مدل مؤثر بوده است و دارای ضریب منفی ۰,۰۰۰۷۲۷۷ است که یعنی در صورت افزایش این متغیر احتمال اینکه در گذرگاه شاهد عدم وقوع تصادف باشیم کاهش پیدا می‌کند. متغیر مؤثر بعدی که عنوان آن "در صورت بسته بودن گذرگاه آیا جایگزین وجود دارد؟ (S8)" با مقدار P کمتر از ۰,۵ در مدل ظاهر شده و معنی دار است. با توجه به مقدار باینری این متغیر، اگر مقدار آن ۱ باشد می‌تواند احتمال اینکه گذرگاه بدون تصادف باشد را افزایش دهد.

اختلاف جمعیت مردان از جمعیت زنان (S9) که در مدل معنادار و ضریب آن مثبت است و نشان می‌دهد که با افزایش آن، احتمال اینکه گذرگاه تصادفی را تجربه نکند افزایش می‌یابد.

• در بخش پواسون مدل: این بخش تعداد تصادفات در گذرگاه را شمارش می‌کند و ۶ متغیر مؤثر آن به‌قرار زیر است:

نوع کاربری جاده (S1) با توجه به اینکه در مدل معنادار و ضریب آن مثبت بوده و با توجه به مقادیر آن می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که جاده‌های روستایی کمترین و جاده‌های اصلی موجب بیشترین تعداد تصادفات در گذرگاه‌های یادشده می‌شود.

نسبت جمعیتی مردان به جمعیت زنان (S2) و فاصله گذرگاه با نزدیک‌ترین تقاطع (S3) و تعداد کل قطارهای عبوری از گذرگاه (S4) و جمعیت کل در فاصله ۸ کیلومتری گذرگاه (S5) علاوه بر اینکه مقدار P آن‌ها کمتر از ۰,۰۵ بود و در مدل معنادار بودند

جدول ۷ نتایج آزمون‌های اعتبارسنجی مدل

Table 7. Results of Model Validation Tests

Model	Variance Equality Test			Mean Equality Test		
	F	P-value	Result	T	P-Value	Result
Zero-Inflated Poisson	1.752	0.0417	The hypothesis of variance equality is rejected	0.8268	0.41096	The hypothesis of mean equality is not rejected.

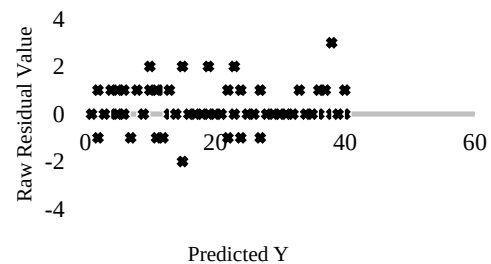
همچنین درجه آزادی این آزمون با استفاده از فرمول ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$df = \frac{\left(\frac{s_1}{n_1} + \frac{s_2}{n_2}\right)^2}{\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1 - 1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2 - 1)}} \quad (13)$$

طبق جدول (۷) و مقدار P محاسبه شده برای آزمون T فرض صفر (برابری میانگین‌ها) که مقداری بزرگ‌تر از ۰,۰۵ است، فرض صفر رد نشده است. در روابط با $\bar{x}$ میانگین نمونه‌ها و S انحراف استاندارد و s^2 واریانس نمونه‌ها و t آماره آزمون و df درجه آزادی است [35] همچنین با توجه به مقدار P در آزمون F که مقدار ۰,۰۴۱۷ و کمتر از ۰,۰۵ است، فرض صفر رد شده و بیانگر برابر نبودن واریانس دو نمونه است.

از سویی دیگر مطابق شکل ۳ که بیانگر نمودار باقی‌مانده^۱ -مقادیر پیش‌بینی است و با تجزیه و تحلیل آن می‌توان به عدم وجود الگوی خاص (با توجه به پراکندگی نقاط تصادفات حول خط صفر) را مشاهده کرد. همچنین مقادیر کم باقی‌مانده و تمرکز نقاط نزدیک صفر که بیانگر دقت بالای پیش‌بینی است از سویی در نمودار یک نقطه پرت با مقدار ۳ وجود دارد که مشکل خاصی برای مدل ایجاد نمی‌کند [36].

از سویی با مقایسه مطالعه حاضر با آخرین پژوهش انجام شده در حوزه پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح ریل و جاده در ایران می‌توان به درک بهتری در رابطه با مطالعه حاضر دست یافت. مطابق جدول (۸) مطالعه حاضر علاوه بر استفاده از داده‌های جدیدتر، مدل به روزتر با محدودیت کمتر، متغیرهای بیشتری را در مدل تعریف کرده که موجب تفسیر پذیری بهتر مدل شده است همچنین با توجه به مقدار AIC مدل حاضر که مقدار کمتری است و Log-Likelihood که مقدار بیشتری نسبت به مطالعه قبلی است، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل حاضر با داده‌ها بهتر برازش داده شده است [8].



شکل ۳. نمودار باقی‌مانده در مقابل مقادیر پیش‌بینی

Fig. 3. Residual Plot Against Predicted Values

این بینش‌ها پایه‌ای را برای سیاست‌گذاران فراهم می‌کنند تا مداخلات هدفمندی را برای کاهش تصادفات در تقاطع‌های راه‌آهن-جاده طراحی کنند. همچنین، گنجاندن متغیرهای جمعیتی در مدل بر اهمیت در نظر گرفتن عوامل اجتماعی-اقتصادی در ارزیابی تدابیر ایمنی حمل‌ونقل تأکید دارد.

۵- اعتبارسنجی

همان‌طور که پیش‌تر اعلام شد ۲۰ درصد داده‌ها که معادل ۴۰ گذرگاه بود که به صورت تصادفی برای اعتبارسنجی مدل و گسترش نتایج به سایر گذرگاه‌ها انتخاب شدند برای انجام این امر مطابق پژوهش محسنی و همکاران از آزمون T برای مقایسه میانگین دو نمونه و همچنین از آزمون F برای مقایسه واریانس‌های دو نمونه استفاده شد [8]. رویکرد این پژوهش مقایسه تعداد تصادفات گذرگاه که توسط مدل پیش‌بینی شده با مقدار واقعی تعداد تصادفات در این ۴۰ گذرگاه است. به جهت تعیین این مطلب که آیا تفاوت معناداری در این مقادیر وجود دارد یا خیر؟ برای مقایسه میانگین‌های دو نمونه از آزمون Aspin-Welch استفاده شد که برخلاف آزمون T سستی محدودیتی در رابطه با برابری واریانس‌ها ندارد. فرض صفر در این آزمون برابری میانگین‌ها، و فرض جایگزین نابرابری میانگین‌هاست. این آزمون از آماره فرمول ۱۲ برای مقایسه میانگین‌ها استفاده می‌کند.

$$t = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (12)$$

¹ Residual

جدول ۸. مقایسه پژوهش حاضر با پژوهش محسنی و همکاران

Table 8. Comparison of the Present Study with Mohseni et al.'s Study

	Present Study	Previous Study
Years of Data	91-401	88-93
Methodology	ZIP	NB
Total Population	✓	
Crossing Location		✓
Average Vehicle Traffic	✓	✓
Road Pavement Type		✓
Number of Railway Tracks	✓	
Male-to-Female Population Ratio	✓	
Total Number of Trains	✓	
Road Usage Type	✓	
Passing Train Speed		✓
Distance from Crossing to Nearest Intersection	✓	
Male Population Difference from Female Population	✓	
Alternative Route Available if Crossing is Closed	✓	
AIC	312.7	314.2
Log-Likelihood	-145.3	-149.1

۶- بحث و بررسی

مدل پواسونی نشان‌دهنده افزایش تصادفات است که ممکن است به ناآگاهی کاربران از گذرگاه مرتبط باشد و با تحقیقات گذشته همخوانی دارد [38, 39].

تعداد کل قطار (مجموع قطارهای روزانه و شبانه) با ضریب مثبت در مدل معنادار شده و نشان‌دهنده تأثیر مثبت بر تعداد تصادفات است که با پژوهش‌های گذشته همخوانی دارد [1, 3, 5, 11, 15, 18, 40, 41]. به دلیل این امر افزایش تعداد قطار باعث افزایش میزان مواجهه قطار با ماشین‌های جاده می‌شود [1].

تعداد خطوط راه‌آهن با ضریب منفی در معادله پواسون نشان می‌دهد افزایش خطوط باعث کاهش تصادفات می‌شود، دلیل آن همبستگی مثبت این متغیر با دید رانندگان و همبستگی مثبت با سرعت است که منجر به افزایش دید و کاهش سرعت کاربران جاده می‌شود. این یافته با نتایج سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد [14, 11].

جمعیت کل در ۸ کیلومتری گذرگاه با ضریب مثبت در رابطه پواسونی، نشان‌دهنده افزایش تصادفات با رشد جمعیت است و این یافته توسط خان تأیید شده است [18].

متغیر وجود جایگزین در صورت بسته بودن گذرگاه، دارای ضریب مثبت در مدل باینری است و با توجه به باینری بودن این متغیر می‌توان نتیجه گرفت که وجود جایگزین احتمال اینکه یک

طبق فرمول ۱۰ در مدل پواسون صفرآماسیده، ضرایب مثبت نشان‌دهنده تأثیر مستقیم متغیر بر تعداد تصادفات است. به این معنا که افزایش متغیر موجب افزایش تصادفات در گذرگاه می‌شود و بالعکس.

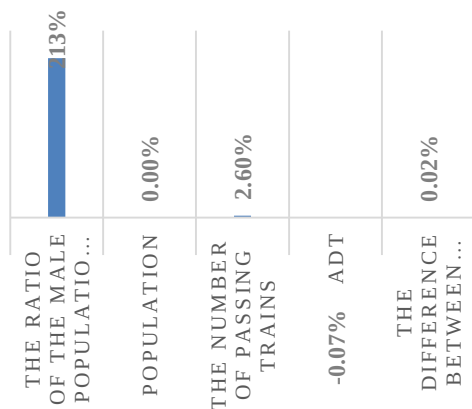
طبق فرمول ۱۱، ضریب مثبت در رابطه باینری مدل موجب افزایش احتمال صفر (بهبود ایمنی گذرگاه) می‌شود. بر اساس فرمول ۱۴، می‌توان تأثیر افزایش یک واحد متغیر بر تغییر تعداد تصادفات را تعیین کرد. در این فرمول، A نشان‌دهنده درصد تغییرات تصادفات و B ضریب متغیر است [8].

$$A = 100 * (Exp(B * 1) - 1) \quad (14)$$

با توجه به ضریب مثبت نوع کاربری جاده در معادله پواسونی، تأثیر مستقیم برافزایش تعداد تصادفات دارد. با توجه مقادیر این متغیر در جدول (۱)، بیشترین تصادفات در جاده‌های اصلی رخ می‌دهد که با نتایج دیگر پژوهشگران همخوانی دارد [11, 3].

نسبت جمعیت مردان به زنان با ضریب مثبت در معادله پواسونی ظاهر شده که با یافته‌های راب و سلیمانی، مبنی بر نسبت ۳ برابری دخالت مردان به زنان در حوادث، همخوانی دارد [37, 2].

فاصله گذرگاه تا نزدیک‌ترین تقاطع جاده‌ای با ضریب مثبت در



شکل ۴. درصد تغییر هر متغیر برای افزایش یک واحد در تعداد تصادفات

Fig. 4. The percentage change of each variable leading to a one-unit increase in the number of accidents

۷- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این پژوهش به دنبال ارائه مدلی برای پیش‌بینی تعداد تصادفات در گذرگاه‌های هم‌سطح مجاز ریل و جاده ایران با نگاهی نو و استفاده از فاکتورهای جمعیتی و استفاده از داده‌های اخیر تصادفات راه‌آهن است.

در این پژوهش از داده‌های تصادفات گذرگاه‌های مجاز هم‌سطح ایران از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ شمسی برای پیش‌بینی تعداد تصادفات استفاده شد در کنار داده‌های تصادفات، از داده‌های مشخصات که شامل ۲۳۰ گذرگاه بود هم استفاده شد در نهایت برای جمعیت تحت تأثیر در ۸ کیلومتری گذرگاه‌ها از شیپ فایل بلوک جمعیت آماری سال ۱۳۸۵ استفاده شد. روش مورد استفاده برای مدل‌سازی این داده‌ها استفاده از پواسون صفرآماسیده بود که با توجه به توزیع داده‌ها، نسبت به روش پواسون و دوجمله‌ای منفی که برای تصادفات گذرگاه‌های ایران کار شده بود دارای مزیت‌هایی همچون پوشش پراکندگی کمتر یا بیشتر داده‌ها و تعداد زیاد صفرها بود.

با انجام مدل‌سازی و بررسی‌های آماری، عوامل مؤثر بر تصادفات گذرگاه‌های مجاز هم‌سطح ایران، جمعیت کل، نوع کاربری جاده، نسبت جمعیتی مردان به جمعیت زنان، فاصله گذرگاه تا تقاطع جاده، تعداد خط راه‌آهن در گذرگاه، میانگین روزانه ترافیک جاده، داشتن جایگزین برای گذرگاه در صورت بسته بودن و اختلاف بین جمعیت مردان و جمعیت زنان تشخیص داده شدند.

نتایج این مطالعه چندین عامل مهم مؤثر بر تعداد تصادفات را

گذرگاه بدون تصادف باشد را بالا می‌برد. این موضوع با یافته‌های پژوهش آستل مبنی برافزایش ایمنی در گذرگاه‌های بسته‌شده، در صورت وجود جایگزین همخوانی دارد [42].

اختلاف جمعیت مردان و زنان با ضریب مثبت در معادله باینری نشان می‌دهد افزایش آن احتمال اینکه گذرگاه صفر تصادف را تجربه کند را بالا می‌برد، که با یافته‌های پژوهشگران درباره رفتار غیر ایمن تر زنان و بالا بودن خطاهای ادراکی در زنان همسو است [19]. این یافته با نظر هالیم که احتمال دخالت مردان در تصادفات گذرگاه‌های هم‌سطح کمتر از زنان است، مطابقت دارد [12].

میانگین روزانه ترافیک جاده با ضریب منفی در مدل لجستیک نشان می‌دهد افزایش ترافیک خطر تصادف در گذرگاه را کاهش می‌دهد، که با یافته‌های گذشته همخوانی دارد [3, 5, 8, 14].

با مقایسه این پژوهش و پژوهش محسنی و همکاران می‌توان درک بهتری نسبت به نقاط ضعف و قوت این پژوهش داشت. محسنی و همکاران که با استفاده از داده‌های تصادف سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ با مدل دوجمله‌ای منفی مدل‌سازی شد چهار متغیر که عبارت بود از: موقعیت گذرگاه، میانگین وسایل نقلیه، نوع روسازی جاده و سرعت قطارهای عبوری را روی تعداد تصادفات در گذرگاه‌ها مؤثر دانستند: مدل آن‌ها همچنین بر اساس معیارهای آماری AIC^۱ برابر ۳۱۴٫۲ و لگاریتم درست‌نمایی^۲ برابر با ۱۴۹٫۱- بود [8]. این در حالی است که پژوهش حاضر با داده‌های تصادفات ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ که به‌روزتر هستند بر اساس مدل پواسون صفرآماسیده مدل‌سازی شد که نسبت به مدل قبلی بهتر پراکندگی بیش‌ازحد و تعداد زیاد صفرها را پوشش داده است همچنین متغیرهای مؤثر این مدل نه متغیر بودند که پیشتر ذکر شدند و این می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که این مدل قابلیت توصیفی بهتری دارد همچنین بر اساس معیارهای آماری AIC و لگاریتم درست‌نمایی دارای دقت بهتر و برازش بهتری است [1].

نمودار شکل (۴) با استفاده از فرمول ۱۴ درصد تغییرات تعداد تصادفات گذرگاه در صورت تغییر پارامتر مذکور است که سه پارامتر اول از چپ مربوط به بخش پواسونی و مابقی مربوط به بخش لجستیک مدل است.

¹ Akaike information criterion

² Log-Likelihood

هواشناسی در هنگام تصادفات در گذرگاه‌های مجاز هم‌سطح ایران و چگونگی تأثیر آن بر سوانح می‌تواند عامل مهمی در تصادفات باشد که می‌تواند بر مدل و تعداد تصادفات مؤثر باشد همچنین گسترش مدل حاضر با سایر تکنیک‌هایی همچون بیزین می‌تواند روی دقت مدل تأثیر مثبت بگذارد.

قردانی نویسندگان

نویسندگان از حمایت معنوی دانشگاه سپاسگزاری می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان در مقاله برابر است.

منابع مالی

هیچ گونه منابع مالی برای این مقاله دریافت نشده است.

شناسایی کرد. جمعیت کل در محدوده ۸ کیلومتری گذرگاه، نوع کاربری جاده و نسبت جمعیتی مردان به زنان تأثیر مستقیمی بر وقوع تصادفات داشتند. نسبت بالاتر جمعیت مردان با افزایش نرخ تصادفات همراه بود که نشان‌دهنده نقش احتمالی عوامل رفتاری در الگوهای ترافیکی است. همچنین، گذرگاه‌هایی که در فاصله دورتری از تقاطع‌های جاده‌ای قرار داشتند، احتمال بیشتری برای وقوع تصادف داشتند و این امر بر اهمیت خطرات ایمنی در مناطق دورافتاده تأکید دارد. علاوه بر این، گذرگاه‌هایی که تعداد بیشتری خط ریلی داشتند، تصادفات کمتری را تجربه کردند که احتمالاً به دلیل اجرای بهتر اقدامات ایمنی در این گذرگاه‌ها بوده است. حجم ترافیک جاده‌ای نیز عامل مهمی بود، به‌طوری‌که افزایش میانگین ترافیک روزانه احتمال وقوع تصادفات را بیشتر می‌کرد. همچنین، وجود مسیر جایگزین برای گذرگاه‌هایی که ممکن است بسته شوند، به‌طور قابل توجهی نرخ تصادفات را کاهش داد که اهمیت طراحی مسیرهای جایگزین برای افزایش ایمنی را نشان می‌دهد.

این یافته‌ها دارای کاربردهای عملی متعددی هستند. نخست، برنامه‌ریزان شهری و مسئولان حمل‌ونقل می‌توانند از این مدل برای شناسایی گذرگاه‌های پرخطر و اولویت‌بندی اقدامات ایمنی مانند بهبود علائم هشداردهنده، افزایش روشنایی و نصب راه‌بندهای خودکار استفاده کنند. دوم، ادغام داده‌های جمعیتی در ارزیابی ایمنی ریلی می‌تواند منجر به مداخلات ایمنی هدفمندتر شود، زیرا توزیع جمعیت می‌تواند بر خطر تصادفات تأثیر بگذارد. سوم، سیاست‌گذاران می‌توانند برای کاهش خطر تصادفات، تغییراتی در زیرساخت‌های جاده‌ای، مانند اصلاح زوایای تند در تقاطع‌ها و بهینه‌سازی جریان ترافیک در نزدیکی گذرگاه‌ها، اعمال کنند. درنهایت، با توجه به اثربخشی مسیرهای جایگزین در کاهش تصادفات، طراحی مسیرهای اضافی برای گذرگاه‌هایی که دارای حجم ترافیک بالایی هستند، می‌تواند یک راهبرد ایمنی مؤثر باشد.

در خصوص ادامه و تکمیل پژوهش حاضر پیشنهادهایی موردتوجه است از جمله، با توجه به گسترش روزافزون گردآوری و ذخیره‌سازی داده‌های ژئوپلیتیکی و جی‌آی‌اسی^۱ می‌توان از داده‌هایی مانند توپولوژی منطقه حادثه، ارتفاع و سایر المان‌های مربوطه به جهت افزایش دقت و چگونگی ارتباط با تعداد سوانح در گذرگاه استفاده کرد. از سویی دیگر استفاده از داده‌های

¹ Geographic Information System (GIS)

References

- [1] Yang, X. and et al., 2022. Modeling the accident prediction for at-grade highway-rail crossings, *Intelligent Transportation Infrastructure*, 1, liac017.
- [2] Pasha, J., Dulebenets, M.A., Abioye, O.F., Kavoosi, M., Moses, R., Sobanjo, J. and Ozguven, E.E., 2020. A comprehensive assessment of the existing accident and hazard prediction models for the highway-rail grade crossings in the state of Florida. *Sustainability*, 12(10), p.4291.
- [3] Austin, R.D. and Carson, J.L., 2002. An alternative accident prediction model for highway-rail interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, 34(1), pp. 31–42.
- [4] Liang, C. and Ghazel, M., 2023. Accident prediction modeling approaches for European railway level crossing safety. *New Research on Railway Engineering and Transportation*.
- [5] Oh, J., Washington, S.P. and Nam, D., 2006. Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), pp. 346–356.
- [6] Borsos, A., Gabor, M. and Koren, C., 2016. Safety ranking of railway crossings in Hungary. *Transportation Research Procedia*, 14, pp. 2111–2120.
- [7] Hu, S.R., Li, C.S. and Lee, C.K., 2010. Investigation of key factors for accident severity at railroad grade crossings by using a logit model. *Safety Science*, 48(2), pp. 186–194.
- [8] Mohseni, M., Hoseini, S.A. and Bagheri, M., 2020. Modeling of the frequency of accidents in Iran's railway level crossings. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 12(2), pp. 273–288. (in Persian).
- [9] Federal Railroad Administration, 2023. *Highway-Rail Grade Crossing Incidents*. Washington, DC: US Department of Transportation. Available at: <https://data.transportation.gov>
- [10] Zaker, J.A. and Sadeghi, A.A., 2012. Evaluation of safety improvement in Iranian railway level crossings. *Journal of Safety Engineering*, 1(1), pp. 1–6.
- [11] Hu, S.R., Li, C.S. and Lee, C.K. 2012. Model crash frequency at highway–railroad grade crossings using negative binomial regression. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 35(7), pp. 841–852.
- [12] Haleem, K. and Gan, A., 2015. Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the US. *Journal of Safety Research*, 53, pp. 23–29.
- [13] Lu, P. and Tolliver, D. 2016. Accident prediction model for public highway-rail grade crossings. *Accident Analysis & Prevention*, 90, pp. 73–81.
- [14] Saccomanno, F.F., Fu, L. and Miranda-Moreno, L.F. 2004. Risk-based model for identifying highway-rail grade crossing blackspots. *Transportation Research Record*, 1862(1), pp. 127–135.
- [15] Ayati, E., Zakeri, J.A. and Sadeghi, A., 2010. Accident prediction model for Iran railway-highway grade crossings. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 2(2), pp. 99–114. (in Persian).
- [16] Lord, D. and Mannering, F., 2010. The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), pp. 291–305.
- [17] National Highway Traffic Safety Administration, 2017. *US Department of Transportation*. Available at: <https://www.nhtsa.gov> [Accessed June 2017].
- [18] Khan, I.U., Lee, E. and Khan, M.A., 2018. Developing a highway rail grade crossing accident probability prediction model: a North Dakota case study. *Safety*, 4(2), 22.
- [19] Holland, C. and Hill, R., 2010. Gender differences in factors predicting unsafe crossing decisions in adult pedestrians across the lifespan: A simulation study. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4), pp. 1097–1106.
- [20] Raub, R.A., 2009. Examination of highway–rail grade crossing collisions nationally from 1998 to 2007. *Transportation Research Record*, 2122(1), pp. 63–71.
- [21] Yu, R., et al., 2019. A marginalized random effects hurdle negative binomial model for analyzing refined-scale crash frequency data', *Analytic Methods in Accident Research*, 22, 100092.
- [22] Datakadeh, 2024. *Data Store*. Available at: <https://datakadeh.com> (in Persian).
- [23] Shahrnegar, 2024. *Data Store*. Available at: <https://www.shahrnegar.com> (in Persian).
- [24] Statistical Center of Iran, 2006. *Population and Housing Report*. Available at: <https://web.archive.org/web/20121113182514/http://www.amar.org.ir/Default.aspx?tabid=553> (in Persian).
- [25] Richardson, T., 2018. Discussion paper: Not enough guys to go around: How the sex ratio affects our behavior. *PsyPag Quarterly*.
- [26] Briem, V., Ragnarsson, A. and Thordarson, K., 2002. Psychological factors in young drivers' traffic accidents.
- [27] Dyussenbayev, A., 2017. Age periods of human life. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 4(6).
- [28] United Nations, 2002. *Provisional guidelines on standard international age classifications*.
- [29] World Health Organization, 2019. *Global status report on road safety 2018*. Geneva: WHO.
- [30] Eghtesad24, 2023. What do age groups mean?. Iran. Available at: <https://eghtesad24.ir> (in Persian).
- [31] Fang, R., 2013. *Zero-inflated negative binomial*

- (ZINB) regression model for over-dispersed count data with excess zeros and repeated measures, an application to human microbiota sequence data. PhD thesis. University of Colorado.
- [32] NCSS, 2023. *NCSS 2023 Statistical Software*. Kaysville, Utah: NCSS.
- [33] Tay, R., 2017. Correlation, variance inflation and multicollinearity in regression model. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 12, pp. 2006–2015.
- [34] O'Brien, R.M., 2017. Dropping highly collinear variables from a model: why it typically is not a good idea. *Social Science Quarterly*, 98(1), pp. 360–375.
- [35] Algina, J., 2005. A spin–Welch Test. *Encyclopedia of Biostatistics*, 1.
- [36] Obi, I., Vange, T. and Chigbu, P., 2009. Using residual analysis to validate rice sowing dates experiment model.
- [37] Soleimani, S. and et al., 2019. Mining the highway-rail grade crossing crash data: A text mining approach. in *18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA)*. IEEE.
- [38] Keramati, A. and et al. 2020. Geometric effect analysis of highway-rail grade crossing safety performance. *Accident Analysis & Prevention*, 138, 105470.
- [39] Lu, P. and et al. 2023. *Safety Support System for HRGCs*. Fargo: Mountain-Plains Consortium.
- [40] Lu, P. and et al. 2020. A gradient boosting crash prediction approach for highway-rail grade crossing crash analysis. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 6751728.
- [41] Brod, D., Gillen, D. and Decisiontek, L., 2020. *A new model for highway-rail grade crossing accident prediction and severity*. Washington, DC: US Department of Transportation, Federal Railroad Administration.
- [42] Astle, D., 1976. Selective crossing closures – a neglected option in crossing safety programs. *AREA Bulletin*, 78.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mosayebi, S.A., Hoseini, M. and Mohammad Hasany, R., 2026. Prediction of Accidents at Rail-Road Grade Crossings Using the Poisson Mode. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.33-47.



Content

Article Title and Authors Names	Page
Assessing Experimental Relationships and Numerical Modeling for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weirs using Response Surface Methodology 7 <i>Akbar Safarzadeh, Houshang Velayati</i>	7
Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience 19 <i>Maryam Khalajzadeh, Safoora Morshed-Shekarchi, Afshin Meshkat-Dini, Ali Massumi</i>	19
Prediction of Accidents at Rail-Road Grade Crossings Using the Poisson Mode 33 <i>Seyed Ali Mosayebi, Mohammad Hosseini, Reza Mohammad Hasany</i>	33
Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City 49 <i>Koosha Aghazadeh, Reza Attarnejad</i>	49
Solving Viscoelastic Problems Using Complex Fourier Boundary Element Method 65 <i>M. Bahrampour, S. Hamzehei-Javaran, S. Shojaee</i>	65
Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete 79 <i>H. Nasaj Moghadam, F. Jandaghi Alaei</i>	79
Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement 95 <i>Sajjad Mirzamohammadi, Masoud Soltani Mohammadi</i>	95

Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City

Koosha Aghazadeh¹, Reza Attarnejad^{2*} 

1. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, PO. Box: 1417613131 Tehran, Iran.

Abstract

This article presents a comprehensive analysis of an innovative seawater desalination and transfer system, hereafter referred to as the "desalination pipeline system." This system seeks to provide an efficient solution for freshwater shortages, particularly in coastal regions. The proposed system is structured into three main stages: evaporation, transfer, and condensation. Each stage is intricately detailed, elucidating the processes and formulations involved, while underlining the system's remarkable capabilities in achieving high transfer speeds and substantial desalination capacities. Focusing on the specific context of Chalus—a coastal city in Iran—and the adjacent heights of Kelardasht, the study underscores the unique geographical and climatic conditions of the region. The interplay between the marine environment and the mountainous terrain creates a potential opportunity for harnessing seawater through an effective desalination process. By exploring various pipe diameters within the system, the research challenges the conventional wisdom that larger diameters are inherently better for maximizing freshwater output and operational efficiency. Contrary to these assumptions, the findings indicate that utilizing smaller diameter pipes can result in significantly higher vapor speeds. Nevertheless, it is crucial to regulate these speeds to prevent vapor velocities from surpassing the speed of sound, which could lead to inefficiencies and operational issues. The methodology employs pipelines with diameters of 1 meter and 2 meters for the transfer of vapor over a distance of 15 kilometers, transporting it from the Chalus area to Alam Kuh, which is situated at an elevation of 1,800 meters. This distance and elevation present unique challenges and opportunities, as they require precise engineering to ensure the effective movement of desalinated water. The study reveals that the efficiency of sub-atmospheric vapor transfer is primarily influenced by three key factors: pipe diameter, transfer distance, and the temperature difference between the seawater and the receiving mountain peaks. These findings provide critical insights into the design and operation of the desalination pipeline system. Specifically, the research quantifies the performance of the two pipe diameters under investigation. The results demonstrate that a 2-meter diameter pipe can produce an average of 3,950 cubic meters of freshwater daily, of which 2,950 cubic meters are effectively transferred to the higher altitude. In contrast, the 1-meter diameter pipe yields 850 cubic meters of water per day, with 710 cubic meters successfully transferred. These figures highlight the balance between pipe diameter and transfer efficiency, emphasizing that various configurations can still lead to the effective delivery of freshwater resources. This characteristic minimizes the need for extensive pre-treatment processes or additional energy inputs, making the operation both environmentally friendly and economically viable. In conclusion, the proposed desalination pipeline system offers a progressive approach to addressing freshwater shortages, presenting a cost-effective and efficient alternative to many existing desalination methods. By leveraging the unique geological and climatic conditions of the Chalus and Kelardasht region, this system not only maximizes the potential of seawater resources but also contributes to sustainable water management practices. Future studies could expand upon these findings, exploring long-term operational viability, environmental impacts, and potential scalability to further enhance the system's applicability in other regions facing water scarcity.

Review History

Received: Dec 29, 2024

Revised: Jul 4, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

seawater desalination
sub-atmospheric pressure
thermal distillation
water transfer
sustainability

* Corresponding Author Email: attarnjd@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887



معرفی سیستم نوین پیشرفته برای شیرین سازی آب دریا با استفاده از خط لوله نمک زدایی و انتقال بخار به منطقه هدف: مطالعه موردی برای شهر چالوس

کوشا آقازاده^۱، رضا عطارنژاد^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استاد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

این مطالعه به بررسی انتقال بخار در فرایند نمک زدایی آب دریا پرداخته و هدف آن افزایش نرخ انتقال آب است. سیستم طراحی شده شامل سه مرحله اصلی تبخیر، انتقال و میعان می باشد. در این سیستم آب دریا بعد از تبدیل به بخار به واسطه اختلاف درجه حرارت یا فشار به سمت مقصد حرکت می کند. دستاوردهای اصلی این تحقیق شامل سرعت بالای انتقال و ظرفیت بالای سیستم شیرین سازی آب دریا می باشد. یافته ها نشان می دهند که سه عامل اصلی شامل قطر لوله، طول انتقال و اختلاف دما بر کارایی سیستم تأثیرگذار هستند. این تحقیق همچنین از لوله هایی با قطرهای ۱ و ۲ متر برای انتقال بخار از ارتفاعات علم کوه در نزدیکی چالوس با ارتفاع ۱۸۰۰ متر و فاصله ۱۵ کیلومتری استفاده کرده است. مطالعه موردی مذکور نشان می دهد که این فناوری می تواند به عنوان یک راهکار عملی و مقرون به صرفه برای تأمین آب در مناطق خشک و مرتفع مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان می دهد که استفاده از لوله هایی با قطر مناسب، همراه با کنترل شرایط انتقال، می تواند محدودیت های موجود در سیستم های رایج را کاهش دهد و امکان انتقال پایدار آب را فراهم کند. مقایسه این سیستم با روش های رایج نمک زدایی مشابه نشان می دهد که کارایی بالاتر، هزینه عملیاتی کمتر و تأثیر زیست محیطی کاهش یافته که از جمله مزایای آن محسوب می شود. تحلیل ساختاری و ترمودینامیکی نشان داده است که افزایش راندمان انتقال بخار از طریق تنظیم فشار و دمای جریان می تواند تأثیر چشمگیری بر عملکرد سیستم داشته باشد. این اطلاعات می توانند به بهینه سازی طراحی و عملکرد سیستم های نمک زدایی مشابه در آینده کمک کنند.

کلمات کلیدی

نمک زدایی آب دریا

فشار زیر اتمسفر

مدیریت منابع آب

انتقال آب

پایداری سیستم

۱- مقدمه

واقعیت که منابع سنتی آب، مانند آب های زیرزمینی و سطحی، ناکافی شده اند، پیچیده تر شده است [2]. نمک زدایی به عنوان یکی از امیدوارکننده ترین راه حل ها شناخته شده است و این پتانسیل را دارد که آب خام را برای تولید فراهم کند. انتظار می رود در سال های آینده پروژه های نمک زدایی شاهد افزایش سرمایه گذاری ها و استقرار در مقیاس بزرگتر باشند که منجر به کاهش هزینه های

کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان به یک مسئله مبرم تبدیل شده است. تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت شهری و شیوه های قدیمی مدیریت آب منجر به کمبود آب امروزی شده است [1]. بسیاری از مناطق در تلاش هستند تا دسترسی به آب آشامیدنی سالم و پاکی را که نیاز را برآورده می کند، فراهم کنند، که با این

* رایانامه نویسنده مسئول: attamjd@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887

کپی رایت © ۲۰۲۶، 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، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.



واحد و بهبود کارایی کلی می‌شود [3].

مهم‌ترین فرآیند نمک‌زدایی شامل تکنیک‌های مختلفی مانند اسمز معکوس (RO)، تقطیر است. در روش‌هایی که فاز آب را تغییر نمی‌دهند، کیفیت آب کمتر است. اسمز معکوس آب دریا (SWRO)، اسمز معکوس آب شور (BWRO)، اسمز جلو (FO)، الکترودیالیز (ED) و معکوس الکترودیالیز (EDR) یکی از روش‌های رایج شیرین‌سازی آب بدون تغییر فاز می‌باشد [4]. میانگین هزینه تولید ۱ مترمکعب آب نمک‌زدایی برای این سیستم‌ها به طور گسترده‌ای از ۰,۳۰۵-۰,۴۱ USD/m³ متغیر بوده است، با این حال، ماژول‌های غشایی اسمز معکوس فعلی نمی‌توانند در فشار هیدرولیکی بسیار بالا کار کنند که معمولاً مربوط به شوری ۷۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر از RO است. آب نمک خروجی در مقابل، تقطیر حرارتی یکی از بهترین راه‌ها برای تصفیه آب دریا و آب شور برای تبدیل آنها به آب آشامیدنی است [5, 6]. رایج‌ترین فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی عبارتند از فشرده‌سازی بخار مکانیکی (MVC)، نمک‌زدایی فلاش چند مرحله‌ای (MSF)، جوشاندن چند اثره (MEB)، نمک‌زدایی چنداثره (MED) و بخار خنک [7]. هزینه تقطیر آب در این روش‌ها بین ۰,۱۲۵ تا ۱,۱۱ دلار آمریکا در هر مترمکعب است، که این تفاوت هزینه‌ها بسته به مسائل مختلف مانند نوع فناوری، منابع انرژی، و شرایط محیطی کاهش یا افزایش می‌یابد و بر کارایی و اقتصادی بودن این روش‌ها تأثیر می‌گذارد [8].

در میان تکنیک‌های مختلف مورد استفاده در تقطیر آب دریا، بهره‌وری از روش بخار سرد در حال افزایش است. نمک‌زدایی با بخار سرد که به عنوان نمک‌زدایی حرارتی با دمای پایین نیز شناخته می‌شود، یک رویکرد ابتکاری است که از اصول تبخیر برای حذف محتوای نمک از آب دریا یا آب شور استفاده می‌کند [9]. برخلاف روش‌های نمک‌زدایی سنتی، که بیشتر بر مصرف انرژی بالا تکیه می‌کنند، فرآیندهای بخار خنک راه‌حلی با انرژی کارآمدتر و سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهند. تقطیر با بخار خنک شامل حرارت دادن آب دریا تحت فشار کاهش یافته تا زمانی که تبخیر شود، سپس متراکم و جمع‌آوری بخار برای تولید آب شیرین است. در طول فرآیند، انتقال بخار نقش مهمی ایفا می‌کند. مطالعات متعددی در مورد نمک‌زدایی آب دریا به روش بخار سرد در قالب مقالات و پتنت‌ها موجود است [10-18].

اگرچه زمینه قابل‌توجهی برای صرفه‌جویی در مصرف آب بدون تأثیر بر سطح خدمات آن وجود دارد، اما پاسخ اصلی به کمبود آب افزایش عرضه بوده است. این کار تا حد زیادی با انتقال آب از جاهایی که فراوان است به جاهایی که کمیاب است انجام می‌شود. انتقال آب شیرین به همان اندازه مهم است که نمک‌زدایی آب دریا مهم می‌باشد [10]. هزینه‌های انتقال آب از چند سنت در هر مترمکعب تا بیش از یک دلار متغیر است. هزینه یک ارتفاع عمودی ۱۰۰ متری تقریباً به اندازه یک جابه‌جایی افقی ۱۰۰ کیلومتری (۰,۰۵-۰,۰۶ دلار در مترمکعب) است. این امر انتقال آب شیرین شده را در ارتفاعات و داخل منطقه بسیار گران می‌کند. روش‌های سیستم‌های توزیع آب، سیستم‌های ثقلی، سیستم‌های پمپاژ و سیستم‌های ثقلی و پمپاژ ترکیبی می‌باشد [19, 20].

سیستم خط لوله آب‌شیرین‌کن بهبودیافته سیستمی مبتنی بر روش بخار سرد برای نمک‌زدایی آب دریا و انتقال بخار آب مقطر است. [21]. در سیستم خط لوله نمک‌زدایی، آب دریا در فشار زیر اتمسفر با استفاده از حداقل انرژی حرارتی تبخیر می‌شود. تفاوت بین دو انتهای لوله اجازه می‌دهد تا بخار از آب دریا یا اقیانوس به سمت بالای کوه حرکت کند. با رسیدن به قله کوه، بخار متراکم می‌شود و به دلیل آب و هوای سردتر به آب مایع تبدیل می‌شود. این سیستم از ارتفاع قابل توجه برای انتقال آب به مقصد مورد نظر بدون مصرف انرژی اضافی بهره می‌برد. سال‌های اخیر شاهد مطالعات متعددی با تمرکز بر امکان‌سنجی و کارایی بالای این روش بوده است.

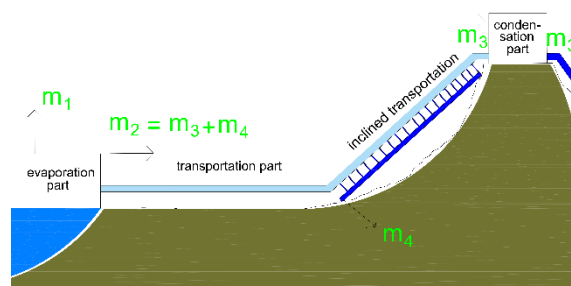
برای اطمینان از انتقال بهینه بخار در طول مسیر باید چندین مرحله انجام شود. اینها شامل حصول اطمینان از نگهداری مناسب پمپ‌های خلاء برای جلوگیری از هرگونه نوسان در سطوح خلاء و طراحی محفظه‌های تبخیر و کندانسور برای ارائه انتقال حرارت کارآمد و حداکثر مساحت سطح برای انتقال بخار می‌باشد تا انتقال سریع و کارآمد بخار را تضمین کند [22]. انتقال بخار یکی از جنبه‌های مهم تقطیر خط لوله در طول نمک‌زدایی آب دریا است و بهینه‌سازی این فرآیند برای دستیابی به سطوح با بازده بالاتر بسیار مهم است. تحقیق و توسعه مستمر روشی حیاتی برای تولید آب شیرین از آب دریا است که راه حلی پایدار برای چالش‌های کمبود آب ارائه می‌کند [23].

بخش های متعددی تشکیل می شود. این فرآیند دارای ۳ قسمت اصلی تبخیر، انتقال و کندانس می باشد که به اختصار توضیح داده می شود و در قسمت بعدی به طور مفصل توضیح داده خواهد شد.

- قسمت تبخیر: در بخش تبخیر این سیستم، عمل بخار شدن آب دریا یا اقیانوس صورت می گیرد. در ابتدا قبل از انجام عمل تبخیر، در فشار زیر اتمسفر به منظور افزایش راندمان و خروج گازهای غیر قابل کندانس از آب دریا، آب دریا به مقدار زیادی هوازدايي خواهد شد. در هنگام عمل هوازدايي مقداری از آب دریا یا اقیانوس به حالت بخار در آمده که برای مصرف در محل استفاده می شود. در مرحله بعد آب های هوازدايي شده در مخزنی که فشار آن کمتر از فشار بخار آب هوزدا شده می باشد تبخیر می شود و بخارهای آب به منظور انتقال به محل مورد نظر از طریق لوله های وارد مرحله بعد می شوند. گازهای موجود در آب دریا و بخارهای تولید شده در مرحله گاززدایی توسط لوله ای جداگانه برای مصرف خارج می شوند.

- قسمت انتقال: در این قسمت در ابتدا بخارهای تولید شده باید برای انتقال به مقصد آماده شوند. آماده شدن به این معنا می باشد که بخارهای تولید شده به دلیل تبخیر و هوازدايي در قسمت قبل قطعاً دمایی کمتر از محیط داشته و باید به اندازه ای که هم دما با محیط شوند به آنها گرما داده شود. به همین دلیل در قسمت آماده سازی بخار برای انتقال، افزایش راندمان و تداوم فرآیند باید انرژی اضافی ای به سیستم تزریق شود. بعد از عمل آماده سازی، بخارها توسط لوله ای به سمت محل کندانس حرکت می کنند. دلیل حرکت بخارها دمای کمتر کندانسور نسبت به دمای این بخش می باشد. در قسمت انتقال افقی به دلیل هم دما بودن بخار با محیط میعان به ندرت رخ می دهد؛ اما با افزایش ارتفاع در قسمت انتقال، دمای هوا کاهش می یابد و به دلیل ادیاباتیک نبودن لوله بخار شروع به میعان می کند که توسط لوله هایی تحت نیروی ثقل جمع آوری می شوند.

- قسمت میعان: در این قسمت بخارهایی که از مرحله انتقال عبور کرده اند باید به مایع تبدیل شوند. برای انجام عمل کندانس در این مرحله از لوله هایی برای انتقال سرما از خارج اتاقک های میعان به داخل آن برای تبدیل بخارهای انتقال یافته به نوک کوه استفاده می شود. پس از تبدیل بخارها به آب به



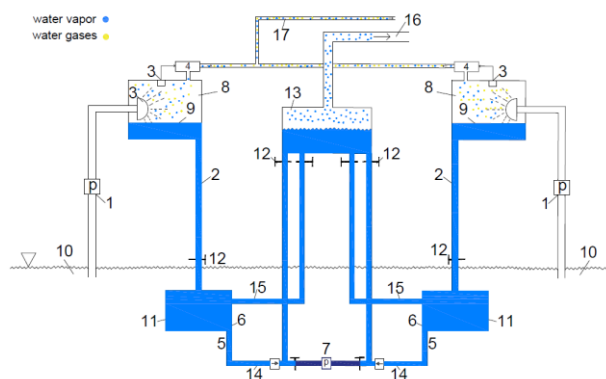
شکل ۱. شکل شماتیک قسمت هوازدايي و تبخیر

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

در این تحقیق، امکان سنجی راه اندازی آزمایشی سیستم مورد بحث قرار گرفته است. باوجود مطالعات متعدد، هیچ آزمایش دقیقی در مورد این سیستم و انتقال آب تصفیه شده انجام نشده است. هدف، راه اندازی سیستم به گونه ای است تا به شبیه سازی دقیق شرایط دنیای واقعی دست پیدا کند. از ویژگی های قابل توجه این سیستم آزمایشی می توان به استفاده از آب تولید شده باکیفیت بالا، راندمان بالا، اعمال فشارهای مختلف زیر جوی برای ارزیابی سیستم و انتقال بخار اشاره کرد. نوآوری های اولیه این تحقیق با بهره گیری از فرآیندهای طبیعی و کم مصرف، کارایی را به شدت افزایش می دهند و هزینه ها را کاهش می دهند. ابتدا، با کاهش فشار و ارتفاع، دمای تبخیر آب شور در شرایط خلأ پایین آمده و مصرف انرژی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. سپس، بخار آب بدون نیاز به پمپ های برقی و به طور طبیعی، توسط لوله های عایق و نیروی اختلاف فشار و دما به سمت نقاط میعان هدایت می شود. در نوک کوه و هوای خنک محیط، بخار میعان شده و آب خالص تولید می شود، بدون نیاز به تجهیزات پیچیده یا پرهزینه. آب تولید شده نیز به صورت مستقیم و بدون هزینه اضافی به مناطق مختلف انتقال می یابد، بهره برداری از ارتفاعات طبیعی برای کاهش هزینه های انتقال و پمپاژ، و استفاده از نیروی طبیعی برای راه اندازی فرآیندها، همگی این سیستم را به یک راهکار پایداری و اقتصادی در مناطق خشک و کوهستانی بدل می کند. پتانسیل این سیستم برای تصفیه آب خانگی نیز آن را به عنوان یک رقیب قابل توجه برای تصفیه کننده های آب خانگی با استفاده از روش اسمز معکوس قرار می دهد.

۲- طرح کلی از سیستم خط لوله نمک زدایی

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود این سیستم از



شکل ۲. شکل شماتیک قسمت هوازدايي و تبخير

Fig. 2. Schematic diagram of the de-aeration and evaporation section

- لوله مورد استفاده در مرحله انتقال تنها از یک لایه خارجی با ضخامت مشخص تشکیل شده است. فرض ضخامت ثابت و تک جداره بودن باعث ساده سازی محاسبات انتقال حرارت، کاهش پیچیدگی مکانیکی، یکنواختی در میعان بخار و بهینه سازی مصرف انرژی در سیستم های نمک زدایی خط لوله ای می شود.

۳-۲- قسمت تبخیر

در شکل (۲) قسمت تبخیر به صورت شماتیک نشان داده شده است که هوازدايي و تبخیر آب دریا در این مرحله صورت می گیرد. سازوکار این قسمت بدین صورت می باشد که آب دریا (۱۰) در ابتدا در لوله ای (۱) به سمت بالا پمپ می شود که مشخصات پمپ باید محاسبه شده باشد. آب دریا از طریق نازل های آب پخشان (۳) به درون محفظه ۸ که فشاری زیر اتمسفر دارد، پاشیده می شود. بخشی از آب پاشیده شده توسط نازل های پخشان در شرایط فشار زیر اتمسفر تبخیر شده که گرمای لازم برای تبخیر را از مابقی آب های اسپری شده می گیرد. بخار آب تولید شده به همراه سایر گازهای محلول در آب توسط پمپ (۴) به سمت مرحله بعدی هدایت می شوند تا بخار آب موجود کندانس شده و برای مصرف در محل آماده شوند. آب های اسپری شده باقی مانده به دلیل فشار پایین تانک و اسپری شدنشان بیشتر گاززدا می باشد [23]. این آب از طریق لوله (۲) به تانک ذخیره (۱۱) متصل می شود و به سمت این مخزن در جریان می باشد. بعد از این کار آب گاززدا باید برای انجام عمل تبخیر وارد مخزن تبخیر (۱۳) شود. از آنجایی که مخزن تبخیر در شرایطی نزدیک به خلا و در حال

دلیل وجود ارتفاع، انرژی پتانسیل نسبتاً خوبی موجود می باشد که از این مهم می توان علاوه بر انتقال آب به محل مصرف با استفاده از نیروی وزن خود، در تولید انرژی الکتریکی نیز استفاده نمود؛ پس نیروگاه برقی برای بهره برداری و احیای قسمتی از انرژی مصرف شده در قسمت های قبل احداث می شود. در انتها نیز آب خام با افزودن مواد معدنی برای مصرف آماده می شود.

۳- معرفی سیستم و فرمول های مربوطه

در این قسمت ابتدا به فرض های موجود در این تحقیق پرداخته می شود و سپس در مورد هر یک از سه بخش موجود در سیستم به طور مفصل بحث خواهد شد و فرمول های مربوط به آن ارائه می شود.

۳-۱- فرضیات اصلی

- مفروضات اساسی برای چارچوب کلی محاسبه به شرح زیر است:
- به دلیل پایین بودن فشار در تمامی مراحل رفتار گاز کاملاً ایده آل بوده است و از فرمول گاز ایده آل ($PV = nRT$) می توان استفاده نمود.
- در مرحله انتقال که اختلاف ارتفاع وجود ندارد لوله در تمامی مراحل با محیط هم دما بوده و از مقدار کم میعان به علت اندک اختلاف دمایی صرف نظر می شود. در انتقال های با افزایش ارتفاع نیز آب موجود در لوله بلافاصله جمع آوری می شود و مانع از دوفازی شدن جریان درون لوله می شود؛ پس جریان یک فازی فرض می شود.
- دمای محیط اطراف لوله به صورت خطی و متناسب با تغییرات ارتفاعی لوله عوض می شود.
- مسئله را به صورت پایا حل کرده و تغییرات پارامترها در واحد زمان ثابت در نظر گرفته می شود.
- با توجه به این نکته که گازها در سرعت های بالا رینولدزهای بزرگی را تولید می کنند و فشار درون لوله کمتر از اتمسفر می باشد و قطر لوله های انتقال بزرگ می باشد؛ پس اثر اصطکاک بسیار ناچیز می باشد در نتیجه از اثر کم اصطکاک صرف نظر شده است. در قسمت نتایج مشاهده می شود که فرض اولیه درست می باشد.

تبخیر می باشد پس آب از طریق لوله ای (۱۴) به سمت مخزن تبخیر می رود. توجه شود که میزان سرعت در این قسمت کنترل می شود. به دلیل فشار کمتر مخزن تبخیر از مخزن گاززدا و وجود افت در لوله، سطح آب در محوطه تبخیر نسبت به مخزن هوازدا متغیر است و بسته به شرایط موجود و مقدار آب مورد نیاز می تواند کمی بالاتر و یا پایین تر از سطح آب مخزن هوازدا قرار گیرد. آب به دلیل فشاری که در مخزن تبخیر وجود دارد تمایل دارد به دمای متناظر آن فشار دست یابد پس دمای آب شروع به کاهش می کند و در این هنگام مقداری از آب موجود در منبع تبخیر به واسطه این گرما به بخار تبدیل می شوند.

دمای آب کاهش یافته به دلیل ارتباط با مخزن ذخیره و تفاوت دمای موجود تمایل دارد که از طریق لوله ای (۱۵) به مخزن قبلی بیاید، و هم دما با سایر آنها شود. به دلیل اینکه اطراف مخزن و لوله های ارتباط دو مخزن را آب دریا تشکیل داده اند دمای آب کاهش یافته، دمای از دست رفته خود را به وسیله گرمای موجود در آب دریا دست می آورد. آب دوباره گرم شده دوباره به مخزن تبخیر می آید. این پروسه تا زمانی ادامه دارد که شوری آب تا شاخص شوری تعیین شده برای اقیانوس یا دریای مورد نظر، بالا رود. این عمل به این خاطر است که این درجه شوری مشکلی برای محیط زیست ایجاد نکند. حالت دوم زمانی می باشد که به نمک و سایر مواد موجود در آب دریا نیاز باشد. در این حالت عمل تبخیر بیشتر انجام گرفته و پروسه طولانی تر می شود. باید توجه داشت که با افزایش شوری عمل تبخیر با کاهش سرعت مواجهه می شود؛ زیرا با افزایش شوری دمای تبخیر نیز تغییر می کند و به دمای آب موجود نزدیک می شود که هرگز نباید میزان شوری به حدی برسد که دمای تبخیر آب در مخزن تبخیر با دمای آب در منبع ذخیره مساوی شود و همیشه باید کمتر از آن باشد. در هر دو حالت نیاز به قطع سیستم و جمع آوری نمک و آب باقی مانده مخزن ذخیره می باشد. به همین علت از چندین سیستم گاززدایی استفاده می شود. هرچه تعداد مخازن تبخیر و سیستم های گاززدا بیشتر باشد به انرژی کمتری برای تبخیر آب نیازمندیم.

این تحقیق فرض را به بازگشت آب دریا به اقیانوس گذاشته؛ پس زمانی که شوری آب به مقدار مورد نظر رسید تمامی شیرهای (۱۲) مرتبط با مخزن ذخیره بسته می شوند و آب شور توسط پمپ به بیرون هدایت می شود. تعداد مخزن های هوازدا و تبخیر برحسب

مقدار آب مورد نیاز تعیین می شود؛ ولی به هر مخزن تبخیر باید حتماً حداقل ۲ سیستم گاززدا وصل باشد که در هنگام تمیز شدن یک مخزن، عملیات تبخیر قطع نشود و مخزن دیگر وظیفه آبرسانی را انجام دهد. بخارهای تولید شده در مخزن تبخیر توسط لوله ای (۱۶) به مرحله بعدی منتقل می شوند تا برای انتقال آماده شوند. بخار آب و گازهای محلول که اکسیژن قسمت عمده آن گازها را تشکیل می دهد، برای بهره برداری و تأمین آب همان منطقه توسط لوله ای دیگر (۱۷) به مرحله بعد منتقل می شوند. دقت شود که قسمت تبخیر از چندین مخزن تبخیر تشکیل شده است و هر مخزن تبخیر نیز به چندین مخزن هوازدایی متصل شده است. زیرا وجود چندین مخزن تبخیر و مخزن هوازدا سیستم را نسبت به اختلالات احتمالی، می کند و به منظور هماهنگ شدن قسمت تبخیر با سایر قسمت ها می باشد؛ زیرا نرخ تبخیر نباید حداکثر نرخ انتقال و تراکم بیشتر شود. در صورت بیشتر بودن نرخ تبخیر فشار در سیستم بالا می رود و راندمان سیستم پایین می آید. به همین دلیل باید نرخ تبخیر کنترل شود و کل سیستم به صورت یکپارچه عمل کند.

باتوجه به شکل (۲) معادله پیوستگی و معادله برنولی برای لوله اولیه (۱) و نازل های سیستم (۳) توسط معادلات ۱ و ۲ نوشته می شود.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1)$$

که A_1 مساحت لوله و A_2 مساحت نازل ها می باشد (m^2) و v سرعت می باشد (m/s) .

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_l \quad (2)$$

به دلیل کم بودن فشار در محوطه (۸) بخشی از آب تبخیر می شود که به وسیله فرمول (۳) آب تبخیر شده محاسبه می شود.

$$m_t c(T_{sw} - T_{dw}) = m_1 \lambda \quad (3)$$

که در آن m_t مقدار آب پمپ شده در هر ثانیه، m_1 مقدار آب بخار شده در محفظه (۸)، T_{sw} دمای آب دریا، T_{dw} دمای آب گاززدا می باشد که متناظر با فشاری است که در محفظه ایجاد شده است. c ظرفیت گرمایی ویژه آب است که متناظر با دما و شوری آب دریا تعیین می شود و λ گرمای نهان تبخیر است که برحسب دما تعیین می شود. همین معادله را برای مخزن تبخیر نیز می نویسیم. به دلیل کم بودن فشار در مخزن تبخیر بخشی از آب تبخیر می شود که به وسیله فرمول (۴) آب تبخیر شده محاسبه می شود.

قسمت بعدی انتقال از یک خط لوله تشکیل یافته که این خط لوله، چگالنده را به سیستم متصل می‌نماید. در موردیایی مثل بندرعباس - گنو انتقال در ابتدا به صورت افقی رخ می‌دهد و هیچ اختلاف ارتفاعی وجود ندارد دما در محیط و داخل لوله تقریباً ثابت مانده و کاهش دما و فشار بسیار جزئی می‌باشد؛ اما در مواردی که در هنگام انتقال، اختلاف ارتفاع وجود دارد و یا به کوه مورد نظر می‌رسیم با بالا رفتن خط لوله از کوه، افت فشار رخ می‌دهد و دمای بخار نیز پایین می‌آید. هنگامی که در لوله عمل میعان رخ می‌دهد گرمایی که از بخار گرفته می‌شود به سمت دیواره‌های لوله حرکت می‌کند و آن را در دمایی برابر با دمای بخار آب نگه دارد. از آنجاکه در تجهیزات، فقط بخار آب وجود دارد، فشاری که درون لوله وجود دارد برابر با فشار معادل دمای اطراف لوله می‌باشد که این اتفاق بیانگر تعادل پایدار سیستم می‌باشد و بخار تمایل دارد به صورت اشباع باقی بماند در نتیجه سیستم در برابر هر تغییری که پیش آید سعی خواهد نمود که به وضعیت پایدار خود تغییر می‌کند. اگر فشار بالا رود یا دما کاهش یابد، بخار اضافی بلافاصله میعان می‌شود که رخ دادن عمل میعان به منظور حفظ وضعیت تعادل سبب می‌شود که فشار درون لوله کاهش یابد. اگر فشار کم شود یا دما افزایش یابد بخار به حالت غیراشباع در آمده و فشار درون لوله بالا می‌رود، از آنجایی که سیستم خواهان رسیدن خود به وضعیت پایدار است این افزایش فشار را با تبخیر آب مایع موجود در لوله جبران می‌کند. به عنوان نتیجه می‌توان گفت که دمای بهره‌برداری، خود را با شرایط کلیه قسمت‌های دستگاه هماهنگ می‌کند. این امر به میزان بسیار زیادی باعث سهولت شرایط شده و کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت.

آبی که احتمال دارد در اثر میعان به وجود آید، باید به صورت ثقلی جمع‌آوری شود. زیرا تشکیل قطرات درشت آب که نزدیک به سرعت صوت در حال حرکت می‌باشند، می‌توانند به لوله و سیستم خسارت وارد کنند به همین دلیل باید آبی که میعان می‌شود جمع‌آوری شود. به همین دلیل از لوله‌هایی مانند شکل (۴) استفاده می‌شود که ارتفاعی حدود ۱۳ متر یا بیشتر دارند دلیل آن این است که در هنگام جمع‌آوری این آب‌ها خلأ سیستم از بین نرود و هنگام باز شدن شیرها فشار خارج سیستم مانع از تخلیه کامل آب درون لوله می‌شود و مقدار آب تخلیه شده تقریباً با مقدار آب‌های موجود در ارتفاعی بیش از ۱۰ متر برابر می‌باشد.

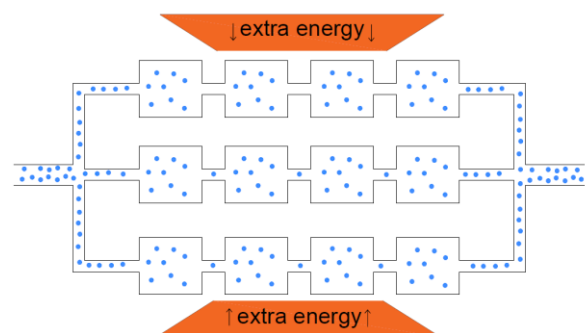
$$m_{dw}c(T_{sw} - T_{s1}) = m_2\lambda \quad (4)$$

که در معادله فوق m_{dw} مقدار آب گاززدا در هرثانیه دمای آب گاززدا و T_{s1} دمای بخار آب تولیدی در مخزن تبخیر می‌باشد که متناظر با فشاریست که در محفظه ایجاد شده است. ظرفیت گرمایی ویژه آب است و λ گرمای نهان تبخیر است. همچنین کاهش فشار در مخزن تبخیر نیز از فرمول (۵) به دست می‌آید.

$$\Delta P_e = \frac{\sqrt{2\pi(P_e/\rho_e)} (m_2/A_e)}{\alpha_e\{1 - (1/2)(P_e/\rho_e\lambda)\}} \quad (5)$$

۳-۳- قسمت انتقال

در ابتدای مرحله انتقال نیاز است که بخار موجود با دمایی برابر با محیط وارد لوله انتقال شود به همین دلیل بخار آب باید تا دمای محیط گرم شود. این امر علاوه بر تداوم فرآیند در سیستم، به انتقال آب نیز کمک می‌کند؛ زیرا هنگامی که آب وارد لوله انتقال می‌شود بدون اینکه میعان شود به مسیر خود ادامه دهد و در قسمت‌هایی هم به علت تغییرات جزئی کاهش دما امکان میعان وجود دارد که مشکلی پیش نمی‌آید و در زمان‌هایی که دمای خارج بیشتر شود مقدار بسیار جزئی‌ای از آب‌ها تبخیر شده که در ادامه توضیح داده می‌شود. بالا بردن دمای بخار علاوه بر اینکه فایده هم دما شدن با محیط را دارد به افزایش سرعت بخار نیز کمک می‌کند به همین علت ما برای افزایش سرعت بخار طی چندین مرحله بخار را گرم می‌کنیم. همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود. بخش حرارت دادن به بخار همانند بخش تبخیر در محل دریا از چندین قسمت تشکیل شده است تا موجب تقویت سیستم شود.



شکل ۳. آماده‌سازی بخار آب برای انتقال

Fig. 3. Preparing water vapor for transfer

کندانس شده و بخار خروجی مساوی می باشد.

معادله مومنتوم: با نوشتن معادله مومنتوم برای المان نشان داده

شده در شکل بالا رابطه (۷) به دست می آید:

$$\rho u u A|_x - \rho u u A|_{x+\Delta x} + P A|_x - P A|_{x+\Delta x} - \tau_w s \Delta x - \rho g \sin(\alpha) A \Delta x = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A u \Delta x) \quad (7)$$

با ساده سازی رابطه بالا و باتوجه به فرضیات اولیه و ثابت بودن

قطر، معادله (۸) به دست می آید.

$$P_i - p_{i+1} = \rho g + \rho_{i+1} u_{i+1}^2 - \rho_i u_i^2 \quad (8)$$

معادله انرژی: با نوشتن معادله انرژی برای المان نشان داده شده

در شکل بالا و ساده کردن آن، رابطه (۹) به دست می آید:

$$m_i \left(h_i + \frac{u_i^2}{2} + g \Delta z \right) = Q \cdot \Delta x + m_{i+1} \left(h_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2} \right) + (m_i - m_{i+1}) h_{fg} \quad (9)$$

برای به دست آوردن گرمای خارج شده از لوله فرض شده در

مرحله انتقال رابطه (۱۰) استفاده می شود:

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{R_i}{2\pi r_1} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi \lambda_k} + \frac{R_o}{2\pi r_2}} \quad (10)$$

پس از تحلیل لوله انتقال و به دست آوردن سرعت و دما و

سایر پارامترهای لازم در هر المان، میزان جرم انتقال یافته از طریق

لوله به صورت معادله (۱۱) به دست می آید:

$$m_3 = \rho_n \frac{\pi D^2}{4} u_n \quad (11)$$

باید دقت نمود که در این مرحله سرعت نباید از سرعت

صوت در خلا (445 m/s) تجاوز نماید؛ زیرا این امر سبب می شود

که سیستم دچار اختلال شود و موجب صدمه زدن به لوله ها

می شود. این سرعت همان سرعتی است که برای مقادیر بیشتر از

آن، کاهش فشار در قسمت میعان متوقف می شود تا جریان بخار

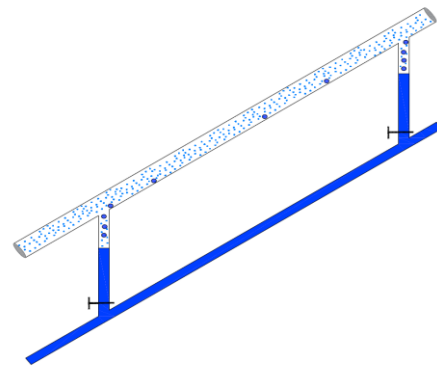
افزایش یابد. برای آنکه سیستم چنین عملکردی از خود نشان دهد،

لازمست که اتاقک و لوله های میعان ابعاد مناسبی داشته باشد تا

بتواند گرمای تبخیر مربوط به حداکثر جریان بخار را جذب کند.

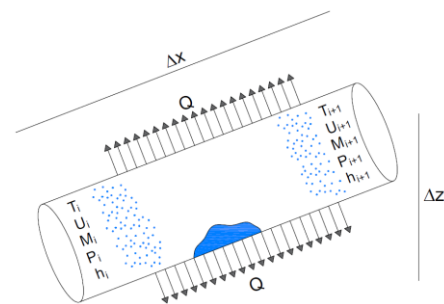
برای به دست آوردن مقدار آب کندانس شده در مسیر کافی

است که آب های کندانس شده در هر المان را با هم جمع کنیم.



شکل ۴. نمایی از نحوه جمع آوری بخارهای میعان شده

Fig. 4. View of condensed vapor collection



شکل ۵. المانی از لوله مورب برای تحلیل بخار آب انتقال

Fig. 5. Element of pipe for water vapor analysis transfer

این لوله ها در فواصل بسیار نزدیک تعبیه شده اند. (حدود هر

۵۰-۱۰۰ متر) پس آب های کندانس شده در مرحله انتقال توسط

این لوله ها به لوله ای دیگر راه پیدا می کنند و به سمت پایین کوه

برای بهره برداری هدایت می شوند.

در این قسمت به بررسی جریان حاکم در لوله انتقال بخار

پرداخته می شود. باتوجه به شکل (۵)، المانی از یک لوله را در نظر

گرفته و به بررسی معادلات حاکم بر آن پرداخته می شود. برای

تحلیل خط لوله انتقال به سه معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی نیاز

است که سرعت و دما را در انتهای لوله انتقال و یا در لحظه

رسیدن به مرحله کندانس به دست آورد [24].

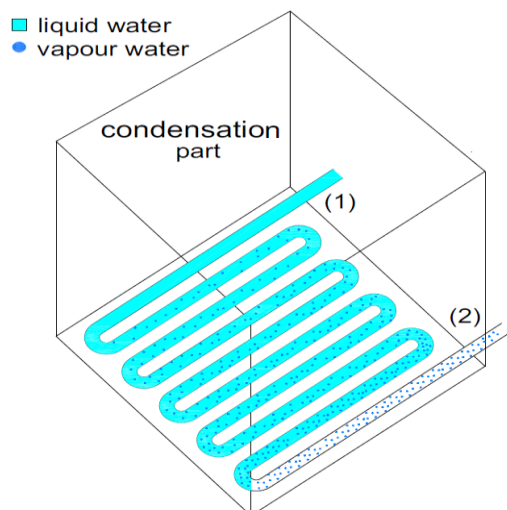
معادله پیوستگی: با نوشتن معادله پیوستگی برای المان نشان

داده شده در شکل بالا، و با توجه به فرضیات اولیه رابطه (۶) به

دست می آید:

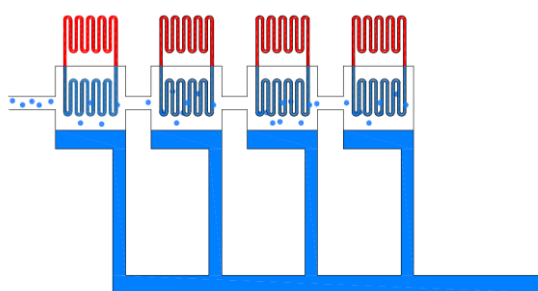
$$\rho_i u_i A = \rho_{i+1} u_{i+1} + (m_i - m_{i+1}) \quad (6)$$

این رابطه بیانگر این می باشد که مقدار بخار ورودی با آب



شکل ۶. نمای از اتاقک میعان

Fig. 6. View of the condensation chamber



شکل ۷. شکل شماتیکی از قسمت میعان

Fig. 7. Schematic diagram of the condensate section

دلیل اینکه بخش کندانس از چندین قسمت در چندین شکل مختلف تشکیل شده است این است که چنین چیدمانی، سیستم را نسبت به اختلالات احتمالی، تقویت کرده و به منظور هماهنگ شدن با سایر قسمت‌ها می‌باشد. زیرا تمامی بخارهای یافته کندانس شود و گرنه با افزایش فشار و اختلال در سیستم همراه خواهد بود. در این بخش باید تمامی بخاری که به مرحله کندانس می‌رسند توسط اتاقک‌های کندانس میعان شوند. از آنجایی که در لوله‌های گرمایی و مخزن‌های کاندنس سیال آب وجود دارد و گرمایی نهان و تبخیر برابری را دارند؛ پس نرخ آب درون لوله‌های گرمایی با نرخ مقدار جرمی که باید بخار شود تقریباً برابر می‌باشد. برای محاسبه مشخصات لوله‌های گرمایی در ابتدا از معادله انرژی استفاده می‌شود که با توجه به شکل در (۲) نقطه ورودی و خروجی لوله لوله‌های گرمایی به اتاقک کندانس نوشته می‌شود [25].

$$M_4 = \sum_{i=1}^n m_i \quad (12)$$

۳-۴- قسمت میعان

در قسمت آخر بخارهای باقی مانده و انتقال یافته به قسمت کندانسور وارد می‌شوند. در این بخش باید با گرفتن گرمای بخار آن را به صورت مایع در آورد. همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود کندانسورها دارای لوله‌هایی مانند لوله‌های گرمایی می‌باشند که گرما را از داخل سیستم به خارج سیستم هدایت می‌کند. درون این لوله‌ها آب در فشار زیر اتمسفر وجود دارد. فشار موجود در این لوله‌ها معادل با دمایی است که برابر با میانگین دمای داخل محفظه کندانس و محیط می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد در نقطه ۱ درون لوله‌های گرمایی تنها آب وجود دارد و به دلیل فشار زیر اتمسفر موجود در آن و تفاوت دمایی که با مخزن کندانس دارد در طول لوله شروع به بخار شدن می‌کند به صورتی که در هنگام خارج شدن در نقطه ۲ بخار آب درون لوله‌های گرمایی وجود دارد. در خارج از مخزن کندانس نیز همین شرایط موجود می‌باشد به طوری که بخار شروع به کندانس می‌کند. برای گرفتن گرما در قسمت خارجی می‌توان از منابع طبیعی چون آب چشمه‌ها، برف‌ها و یا دمای سردی که در ارتفاعات موجود است، استفاده نمود. مخزن کندانس از تعداد زیادی لوله‌های افقی لوله‌های گرمایی تشکیل شده است که در شکل یکی از آن‌ها نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود این قسمت از محفظه‌های بسیاری تشکیل شده است که برای تفهیم بیشتر لوله‌های لوله‌های گرمایی به صورت عمودی نشان داده شده‌اند. تعداد این محوطه‌ها و تعیین ابعاد لوله‌های چگالنده یا میعان کننده که با استفاده از دمای پایین‌تر محیط بخار آب را به صورت مایع در می‌آورند، با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی از جمله اختلاف دمای موجود در محل و درون کندانسورها، ضریب انتقال حرارتی لوله‌ها، هوا و سرعت باد می‌باشد. مخزن آب شرب در موقعیتی با ارتفاع زیاد قرار گرفته است که آب‌های کندانس شده در لوله‌ای جمع‌آوری شده و به سمت نیروگاهی در پایین کوه هدایت می‌شود و می‌توان میزان قابل توجهی برق استخراج نمود که بیشتر از کل انرژی مصرف شده در این سیستم می‌باشد.

جدول ۱. دمای هوا برای مناطق مورد نظر

Table 1. Air temperature for the target areas

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Min temp of Kelardasht	1.1	2.3	4.2	6.7	7.9	8.8	14.5	15.4	16.2	8.5	4.6	2.2
Max temp of Kelardasht	11.6	14.2	18	18.2	21.1	21.2	23.3	24.4	24.7	18.3	11.8	12.1
Max temp of Chalus	16.4	13.3	8.7	21.1	26.3	26.8	29.1	30.4	32.9	25	17.2	18.3
Min temp of Chalus	5.2	6.8	2.2	12.1	13.4	15.2	21.4	22.9	21.6	15.2	9.5	7.4

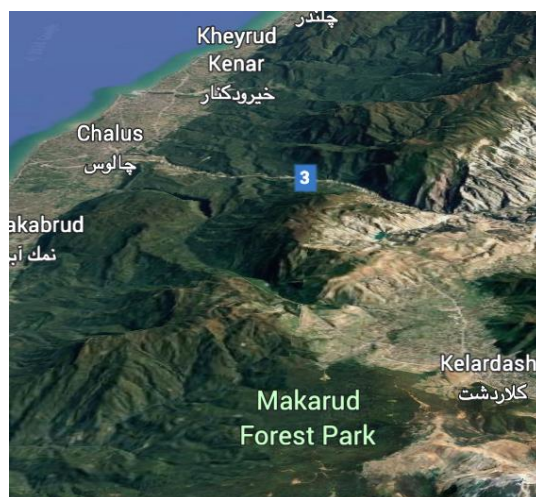
از شهر ساحلی چالوس در شمال ایران به ارتفاعات ۱۸۰۰ متری علم کوه در ۱۵ کیلومتری آن بررسی شد. اطلاعات هواشناسی مربوط به دمای سطح دریا در شهر چالوس (منبع گرم) و ارتفاعات علم کوه (منبع سرد) در جدول (۱) نشان داده شده است. دما برای یک ماه میانگین دمای روزانه (حداکثر) و شبانه (حداقل) دمای هر ماه گزارش شده است، همچنین موقعیت جغرافیایی مناطق مورد نظر در شکل شماره (۸) نشان داده شده است [25، 26].

۵- نتایج

محاسبه از بخش انتقال شروع می شود. با توجه به قدرت سیستم در دبی بخار آب، طراحی قسمت تبخیر و میعان و تعیین تعداد مخازن مورد نیاز آغاز می شود.

در ابتدا با در نظر گرفتن دمای محیط و دما در ارتفاعات مختلف، خط لوله انتقال با توجه به معادلات انتقال به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. سرعت بخار در طول لوله انتقال، تحت تأثیر تغییرات چگالی ناشی از دما و فشار متغیر قرار می گیرد. این تغییرات از طریق معادله پیوستگی و حل مجموعه ای از معادلات ترمودینامیکی استخراج شده از مقاله مورد بررسی تعیین می شوند. مطابق شکل (۵)، در دو سر لوله، شش پارامتر اصلی شامل سرعت، مشخصات ترمودینامیکی، و نرخ انتقال جرم نقش تعیین کننده ای دارند.

با حل معادلات مربوط به فرآیند انتقال، نرخ میعان محاسبه شده و با در دست داشتن نرخ تبخیر و ویژگی های ترمودینامیکی در ابتدای المان، می توان سرعت و سایر پارامترهای ترمودینامیکی را در نقاط مختلف مسیر استخراج کرد. این تحلیل امکان مدل سازی دقیق تر رفتار بخار در طول لوله را فراهم آورده و نقش مهمی در بهینه سازی فرآیند انتقال ایفا می کند. شایان ذکر است که لوله انتقال از عناصر مختلفی تشکیل شده است که تغییرات دما و انرژی در آنها با توجه به شرایط مختلف متفاوت است. پس از تجزیه و تحلیل تمام عناصر خط لوله، موارد زیر به دست می آید:



شکل ۸. موقعیت جغرافیایی مناطق هدف

Fig. 8. Location of target regions

$$qn_3 = h_{fg}m_3 \quad (13)$$

برای محاسبه q از فرمول (۱۴) استفاده می شود:

$$q = h_c A_h (T_c - T_h) \quad (14)$$

دقت شود که در هنگام کندانس، مخزن کندانس کمی با کاهش فشار روبه رو خواهد بود. به دلیل کم بودن مقدار این اختلاف فشار می توان از آن صرف نظر نمود؛ اما بهتر است این کاهش فشار برای دقت بیشتر در نظر گرفته شود که از رابطه (۱۵) محاسبه می شود [26].

$$\Delta P_c = \frac{\sqrt{2\pi(P_c/\rho_c)} (m_3/A_c)}{\alpha_c \{1 - (1/2)(P_c/\rho_c \lambda)\}} \quad (15)$$

۴- مطالعه موردی

مقدار تفاوت بین دمای منبع سرد و گرم و همچنین مسیر کوتاه، یک دیدگاه کاربردی مناسب و امکان پذیر برای سیستم پیشنهادی است. در صورت تحقق این دو اولویت، تنها دغدغه فنی و عملیاتی، میزان ارتفاع عمده خواهد بود. در هر صورت موارد ذکر شده می تواند نتایج کارآمدی داشته باشد. یک مطالعه موردی با نتایج رضایت بخش در انتقال آب شیرین شده به روش بخار سرد

جدول ۲. نتایج محاسبه شده برای سیستم پیشنهادی

Table 2. Result of the proposed system

July (tir)	D=1m	D=2m
Transfer section		
Transfer rate m_3 (kg/s)	11.23	48.92
Vapor velocity at the first (m/s)	284.3	244.1
Vapor velocity at the end (m/s)	361.3	323.9
Water transfer rate m_4 (kg/s)	1.1	1.8
Vapor temperature at end ($^{\circ}\text{C}$)	19.9	21.4
Evaporation section		
Vapor transfer rate m_2 (kg/s)	12.8	48.9
Number of evaporation chamber	4	12
evaporation temperature ($^{\circ}\text{C}$) T_{s1}	24.3	23.8
Deaeration temperature ($^{\circ}\text{C}$) T_{dw}	25.5	25.5
Pumped water percentage (%)	25	25
Deaerate pumped water (kg/s)	100	100
Distilled water on site m_1 (kg/s)	3	10
condensation section		
Number of condensation chamber	4	10
Heat pipes diameters	10	10
Condensation chamber dimensio (m^3)	4×4×4	4×4×4

در شکل‌های (۹ تا ۱۱) میزان آب تولید شده در منطقه، طول مسیر و مقصد مشخص شده است. متوسط آب تولیدی در روز برای یک لوله با قطر ۲ متر در روز $3950 \text{ (day/m}_3\text{)}$ است که $2950 \text{ (day/m}_3\text{)}$ از آن انتقال و مابقی به صورت محلی مصرف می‌شود. عدد به دست آمده مقدار متوسطی از آب تولیدی در ماه‌های مختلف می‌باشد که بسته به میزان دماهای موجود و شرایط سیستم از 3742 تا 4227 متر مکعب در روز متغیر می‌باشد. میزان آب تولیدی با استفاده از لوله با قطر ۱ متر $850 \text{ (day/m}_3\text{)}$ است که از این مقدار $710 \text{ (day/m}_3\text{)}$ منتقل می‌شود که برای مه‌های مختلف از 745 تا 971 متر مکعب در روز متغیر می‌باشد.

این سیستم برای تولید انبوه آب شیرین لزوماً به لوله‌های با قطر زیاد نسبت به مطالعات پیشین نیاز ندارد (۲۹)، زیرا با کاهش قطر، سرعت بخار آب در لوله مطابق با معادلات (۹) افزایش می‌یابد. در صورتی که در مطالعات گذشته با بالارفتن قطر حداکثر ظرفیت سیستم جهت انتقال افزایش می‌یافت. همچنین استفاده از لوله‌های با قطر بسیار زیاد (۴ متر) علاوه بر بالابردن هزینه تولید و اجرا، کارایی بیشتری نسبت به قطرهای کوچکتر ندارد.

- سرعت در ابتدا و انتهای لوله انتقال برای مقایسه با سرعت صدا.
- مقدار بخار منتقل شده و باید متراکم شود (m_3).
- مقدار آبی که در قسمت انتقال متراکم شده و جمع شده است (m_4).
- دمای انتهای مسیر، جایی که خط لوله به کندانسور (T_c) می‌رسد.

از آنجایی که دمای بخار داخل کندانسور، مقدار بخار انتقالی و دمای بیرون مشخص است، تعداد محفظه‌های مورد نیاز برای چگالش و ابعاد لوله‌های حرارتی مشخص می‌شود. مقدار آب منتقل شده همراه با آب متراکم شده از طریق مسیر، مقدار کل آبی را که باید به صورت بخار از مخزن بخار خارج شود ($m_2 = m_3 + m_4$) به دست می‌دهد. با داشتن تعداد سیستم‌های گاززدایی و مخازن تبخیر و میزان آب تولیدی، کل آب پمپاژ شده به لوله به دست می‌آید. فشار در مخزن تبخیر و در سیستم گاززدایی با توجه به شرایط دمای فعلی و مقدار آب مورد نیاز تعیین می‌شود. در نهایت میزان آب تولید شده در سایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن مقدار بخار انتقالی تعداد مخازن چگالش و ابعاد لوله‌های حرارتی محاسبه می‌شود.

از آنجایی که این سیستم بیشترین میزان تولید را در ماه جولای دارد، این ماه برای نمایش نتایج انتخاب شده است. حداکثر تعداد مخازن مورد نیاز در بخش تبخیر و میعان‌ات گازی نیز برای این ماه تعیین شده است. نتایج محاسبات و میزان آب تولید شده در تیرماه برای یک خط لوله با قطرهای ۱ و ۲ متر در جدول (۲) ارائه شده است. به طور طبیعی، هرچه قطر لوله انتقال بیشتر باشد، ظرفیت انتقال جریان نیز افزایش می‌یابد. با این حال، باید توجه داشت که در لوله‌هایی با قطر بزرگتر، افت فشار کمتری رخ می‌دهد؛ پس در طول انتقال برابر برای ۲ قطر متفاوت، افت فشار در لوله کوچکتر بیشتر می‌شود که این امر سبب می‌شود فشار و دما در طول لوله انتقال با قطر کوچکتر بیشتر کاهش یابد. طبیعی است هر چه اختلاف فشار بین ۲ سر لوله انتقال بیشتر باشد سرعت حرکت سبال نیز بیشتر بوده و انتقال سریعتر انجام می‌شود؛ اما به واسطه قطر کمتر قدرت انتقال و نرخ کمتری را دارد.

پیشنهادی از نقطه نظر کارایی و نتیجه نهایی برتر است. در مطالعات پیشین، به ویژه آنهایی که در شرایط خلأ انجام شده، استفاده از لوله های قطر بزرگ برای انتقال آب رایج بوده است. اما تحلیل داده ها نشان می دهد که با افزودن تمهیدات اصلاحی و بهره گیری از تغییرات بر اساس پژوهش های قبلی، راندمان سیستم به طور قابل توجهی ارتقاء یافته است. این بهبود به حدی است که دیگر نیاز به استفاده از لوله های قطر بزرگ که قبلاً ضروری به نظر می رسید، نیست. در نمونه های مشابه، برای انتقال آب، از لوله هایی با قطر ۴ متر استفاده شده است، اما بررسی نرخ تولید نشان می دهد که عملکرد سیستم جدید به صورت واضحی بهتر است.

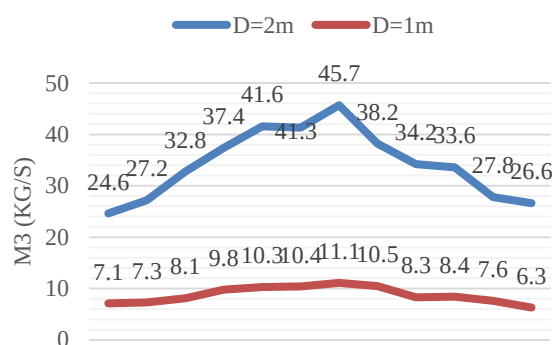
در ضمن، هرچند طول مسیر انتقال پارامتری مهم است و روی راندمان تأثیر دارد، اما تفاوت چشمگیری در نتایج نهایی مشاهده می شود که حکایت از برتری سیستم پیشنهادی دارد. در مجموع، این تحقیق نشان می دهد که سیستم جدید نه تنها نسبت به نمونه های موجود عملکرد بهتری دارد، بلکه حجم قابل توجهی از آب را تولید می کند، و این ها گواه بر برتری و آینده داری فناوری پیشنهادی در حوزه نمک زدایی است.

از منظر فیزیک و با رعایت اصول حاکم بر پدیده های انتقال، با در نظر گرفتن فناوری و توانایی بشر در ساخت خطوط لوله طولانی، ایجاد خط لوله بخار هم از جنبه های کاربردی و هم منطقی به نظر می رسد. انتقال آب شیرین کن از طریق این سیستم دارای مزایای زیادی است که موجب جلب توجه محققین در توسعه این روش گردیده است. سطح مقطع لوله انتقالی و اختلاف دمای اندک، از جمله عوامل مؤثر در انتقال بخار در سیستم مذکور محسوب می شوند.

جدول ۳. مقایسه نتایج سیستم پیشنهادی با سایر مطالعات

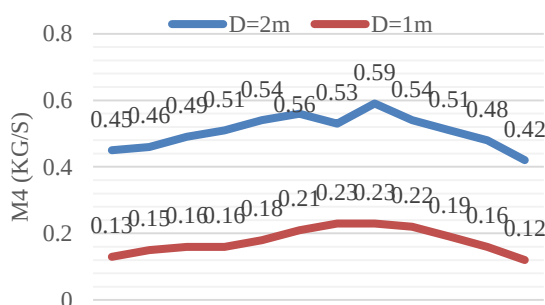
Table 3. Comparison of the proposed system with other studies.

reference	L (km)	D (m)	h (m)	m_t (m ³ /day)
(17)	160	2 & 4	2200	48 & 278
	70	2 & 4	1500	48 & 278
(22)	160	2 & 4	2200	54 & 324
	70	2 & 4	1500	55 & 354
	30	1 & 2 & 4	2300	33 & 211 & 1063
(29)	29	1 & 2 & 4	2000	26 & 169 & 1085
This study	15	1	1800	850
This study	15	2	1800	3950



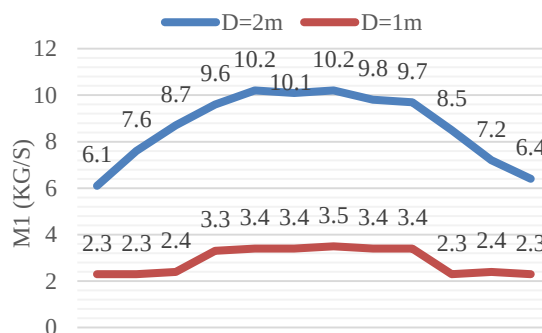
شکل ۹. میزان تولید ماهانه آب مقطر و انتقالی m_3

Fig 9. Monthly production rate of distilled and transferred water, m_3 (L/s).



شکل ۱۰. نرخ تولید ماهانه آب مقطر در بخش انتقال، m_4

Fig. 10. Monthly production rate of distilled water in transportation part, m_4 (L/s).



شکل ۱۱. نرخ ماهانه آب مقطر در محل تبخیر، m_1

Fig. 11. Monthly Rate of distilled water on the site, m_1 (L/s)

نتایج به دست آمده با سیستم های مشابه تصفیه و انتقال آب مقایسه شد تا تصویری جامع تر و کامل تر از عملکرد سیستم های نمک زدایی ارائه گردد. هدف اصلی سیستم پیشنهادی، انتقال مؤثر آب در فرآیند نمک زدایی است که در بسیاری از سیستم های معاصر تنها تا حدی به این هدف پرداخته شده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، این مقایسه نشان می دهد که سیستم

قطرهای بزرگ لزوماً ضروری نیست. لوله‌هایی با قطر کوچک‌تر می‌توانند سرعت انتقال بالاتری را فراهم کنند، اما این سرعت باید تحت کنترل قرار گیرد تا از محدوده سرعت صوت فراتر نرود. در شرایط خلأ، سرعت ذرات منتقل شده می‌تواند به مقدار قابل توجهی به سرعت صوت نزدیک شود که نیازمند تنظیمات دقیق در طراحی سیستم است.

راه‌اندازی این سامانه تنها مستلزم دسترسی به آب دریا یا مناطق مرتفع اقیانوسی و کوهستانی با اختلاف دمایی جزئی است. با هزینه اولیه نسبتاً کم، امکان نصب سیستمی فراهم می‌شود که نه تنها فرآیند شیرین‌سازی را اجرا می‌کند، بلکه آب تولیدی را نیز به طور مستقیم انتقال می‌دهد. این ویژگی موجب می‌شود که سیستم پیشنهادی از نظر بهره‌وری و مقرون به صرفه بودن، عملکرد بهتری نسبت به بسیاری از روش‌های موجود در حوزه نمک‌زدایی داشته باشد.

۷- علائم و اختصارات

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه آب ($J/^\circ C.kg$)
D	قطر لوله
g	شتاب ناشی از گرانش
L	طول عنصر
M	نرخ جریان جرمی (kg/s)
me	نرخ تبخیر (kg/h), (kg/s)
m_t	نرخ انتقال (kg/h), (kg/s)
m_c	نرخ میعان (kg/h), (kg/s)
m_{fw}	میزان آب شیرین تولیدی و انتقالی (kg/h)
n	طول عمر بر حسب سال
p	فشار بخار (kPa)
p_s	فشار سیستم (kPa)
Δp_{ec}	افت فشار کل در خلأ ($Pa=N/m^2$)
t	زمان (s)
T_{s1}	دمای تبخیر سیستم ($^\circ C$)
T_1	دمای سیستم ($^\circ C$)
T_{sw}	دمای آب شور ($^\circ C$)
T_0	دمای بخار در انتهای لوله ($^\circ C$)
T_{dw}	دمای آب گاززدا ($^\circ C$)

افزایش قطر لوله تا حد ممکن، انتخاب مناطق آب‌وهوایی با حداکثر اختلاف دمای طبیعی در حداقل فاصله، و بهره‌گیری از گزینه‌های آب خام با شوری کمتر از آب دریا (مانند پساب‌ها و آب‌های شور) می‌تواند به بهبود کارایی سیستم کمک کند. محاسبات مربوط به انتقال بخار، در صورت عدم ساده‌سازی فرضیات و عدم دخالت شرایط پیرامونی در مورد بخش چگالش، و با در نظر گرفتن حداکثر شوری و قابلیت تراکم‌پذیری سیال، اعداد قابل اعتمادتری را برای انتقال بخار نسبت به مدل‌سازی‌های قبلی ارائه می‌دهد.

با وجود اینکه طول خط انتقال بخار مسئله‌ای مهم است، صنعت تولید لوله‌های باکیفیت و سبک در قطرهای مختلف امروز به مرحله‌ای رسیده است که از لحاظ استحکام، جرم، عایق حرارتی، سهولت نصب و مهارت در بهره‌برداری، کاملاً قابل اعتماد است و به لحاظ بازگشت سرمایه در زمان مقرر، تقریباً هیچ محدودیتی در زمینه لوله‌کشی وجود ندارد؛ بنابراین، با انجام مطالعات جامع، از جمله ارزیابی‌های زیست‌محیطی و هواشناسی، و همچنین نظارت دقیق بر شرایط دمایی مبدأ، مقصد و انتخاب نقاط مناسب برای انتقال، امکان‌پذیری روش‌های انتقال بهبود می‌یابد. شایان‌ذکر است که هندسه خطوط لوله انتقال می‌تواند به کارایی سیستم آسیب برساند، اما آنچه در بخش انتقال حیاتی است، طول لوله می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به معرفی و تحلیل سیستم خط لوله نمک‌زدایی پرداخته است؛ روشی نوین برای شیرین‌سازی و انتقال آب دریا که طی سه مرحله تبخیر، انتقال و تراکم بررسی شده است. در این مطالعه، هر یک از این مراحل همراه با فرایندها و فرمول‌های مرتبط، به طور دقیق تشریح شده‌اند.

دستاوردهای کلیدی این تحقیق شامل افزایش سرعت انتقال و بهبود ظرفیت شیرین‌سازی آب دریا است که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهینه‌سازی تأمین آب در مناطق مختلف داشته باشد. برای بررسی عملی این سیستم، شهر چالوس و ارتفاعات کلاردشت به عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شده‌اند تا عملکرد روش پیشنهادی در شرایط واقعی ارزیابی شود.

بررسی‌های دقیق‌تر در مورد قطرهای مختلف لوله‌های انتقال نشان می‌دهد که برخلاف برخی تحقیقات پیشین، استفاده از

حمایت‌های مادی و معنوی از سوی مراکز، دانشگاه‌ها یا نهادهای خاص به انجام رسیده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی (اعم از مالی، شخصی یا سازمان) در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد و موردی گزارش نشده است.

مشارکت نویسندگان

کوشا آقازاده: ایده‌پردازی، طراحی روش تحقیق، تحلیل داده‌ها و نگارش نسخه اولیه مقاله. رضا عطارنژاد: نظارت علمی، بازنگری نهایی و اصلاحات تخصصی متن.

منابع مالی

این مطالعه بدون استفاده از هرگونه منابع مالی (اعم از پژوهانه یا اعتبار مالی دولتی و خصوصی) انجام شده است و هزینه‌های مربوطه توسط نویسندگان تأمین گردیده است.

References

- [1] Firozjaei, MR., Hajebi, Z., Naeeni, STO. and Akbari, H., 2024. Discharge performance of a submerged seawater intake in unsteady flows: Combination of physical models and decision tree algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, 60.
- [2] Firozjaei, MR., Taghi, S., Naeeni, O. and Akbari, H., 2023. Evaluation of seawater intake discharge coefficient using laboratory experiments and machine learning techniques. *Ships and Offshore Structures*, pp.1–14.
- [3] Hajebi, Z., Firozjaei, MR., Naeeni, STO. and Akbari, H., 2024. Hydraulic performance of bottom intake velocity caps using PIV and OpenFOAM methods. *Appl Water Sci*, 14(3), pp.1–13.
- [4] Behnam, P., Faegh, M. and Khiadani, M., 2022. A review on state-of-the-art applications of data-driven methods in desalination systems. *Desalination*, 532, 115744.
- [5] Tong, T. and Elimelech, M., 2016. The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6846–55.
- [6] Rahmani Firozjaei, M., Salehi, Neyshabouri, SAA., Amini Sola, S. and Mohajeri, SH., 2019. Numerical Simulation on the Performance Improvement of a Lateral Intake Using Submerged Vanes. *Iranian*

Q	مقدار گرمای استخراج شده در واحد طول (W/m)
u	سرعت بخار (m/s)
Q _c	کل گرمای استفاده شده در قسمت چگالش
Q _{in}	انرژی گرمایی ورودی خالص (kW)
w	ورودی کار (W/m)
Δz	ارتفاع عنصر لوله (m)
US\$	دلار آمریکا
τ _w	تنش برشی دیوار (N/m ²)
λ _c	گرمای نهان تراکم بخار (J/kg)
λ _e	گرمای نهان تبخیر آب (J/kg)
ρ	چگالی بخار (kg/m ³)
Q _c	کل گرمای استفاده شده در قسمت چگالش
Q _{in}	انرژی گرمایی ورودی خالص (kW)
w	ورودی کار (W/m)

قدردانی

نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله بدون دریافت

- Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43(2), pp.167–77.
- [7] Ghazi, ZM., Rizvi, SWF., Shahid, WM., Abdulhameed, AM., Saleem, H. and Zaidi, SJ., 2022. An overview of water desalination systems integrated with renewable energy sources. *Desalination*, 542, 116063.
- [8] Grzegorzec, M., Wartalska, K. and Kaźmierczak, B., 2023. Review of water treatment methods with a focus on energy consumption. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 143.
- [9] Arnau, P.A., Navarro, N., Soraluce, J., Martínez-Iglesias, J.M., Illas, J. and Oñate, E., 2019. Cool steam method for desalinating seawater. *Water (Switzerland)*, 11(11), pp.1–16.
- [10] Herrán-González, A., De La Cruz, J.M., De Andrés-Toro, B. and Risco-Martín, J.L., 2009. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Appl Math Model*, 33(3), pp.1584–600.
- [11] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2026. High-pressure desalination pipeline system for water purification and vapor transfer utilizing waste heat from factories. *Applied Water Science*, 16 (101). <https://doi.org/10.1007/s13201-026-02795-0>.
- [12] Wellmann, J. and Morosuk, T., 2016. Renewable energy supply and demand for the city of El Gouna, Egypt. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4), 314.

- [13] Inoue, K., Abe, Y., Murakami, M. and Mori, T., 2006. Feasibility study of desalination technology utilizing the temperature difference between seawater and inland atmosphere. *Desalination*, 197(1–3), pp.137–53.
- [14] Kong, S. tong, 2011. Application F, Data P. (12) *United States Patent*, 2(12), 12–5.
- [15] Rahmani Firozjaei, M., Behnamtalab, E. and Salehi Neyshabouri, SAA., 2020. Numerical simulation of the lateral pipe intake: flow and sediment field. *Water and Environment Journal*, 34(2), pp. 291–304.
- [16] Naeeni, S.T.O., Rahmani Firozjaei, M., Hajebi, Z. and Akbari, H., 2023. Investigation of the performance of the response surface method to optimize the simulations of hydraulic phenomena. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1).
- [17] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2025. Experimental investigation of friction coefficient in water vapor transportation pipelines under sub-atmospheric pressure. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 114.
- [18] Firozjaei, M.R., Hajebi, Z., Naeeni, S.T.O., Akbari, H. and Iglesias, G., 2025. Hydrodynamic Performance of Seawater Intake Structures Through Numerical Modelling and Particle Image Velocimetry. *Water (Basel)* [Internet], 17(17), 2607. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/17/2607>
- [19] Spedaletti, S., Rossi, M., Comodi, G., Salvi, D. and Renzi, M., 2021. Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45(August 2020).
- [20] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2024. Experimental investigation of desalination pipeline system and vapor transportation by temperature difference under sub-atmospheric pressure. *Journal of Water Process Engineering*, 60(March), 105133.
- [21] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2020. Improved Desalination Pipeline System Utilizing the Temperature Difference under Sub-Atmospheric Pressure. *Water Resources Management*, 1;34(1), pp.1–19.
- [22] Shojaei, M., Nosrati, M. and Attarnejad, R., 2022. Mathematical analysis of sub-atmospheric vapor pipeline transmission for seawater desalination: Green and Eigen functions solutions. *Desalination Water Treat*, 254, pp.169–80.
- [23] Hamdan, M., Al-Kasasbeh, T., Qawasmeh, B. and Al Assaf, A., 2023. Waste Heat Recovery to Improve the Carbon Footprint a Case Study: Cement Industry in Jordan. *International Review of Civil Engineering*, 14(2).
- [24] Aghazadeh, K., Asadzadeh Totonchi, B. and Attarnejad, R., 2026. Energy-efficient water reuse system for high-rise buildings utilizing sub-atmospheric pressure and temperature gradients. *Urban Water Journal*, pp.1-18. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2026.2639445>.
- [25] Takehara, Y., Fujimoto, S. and Okumura, K., 2010. High-velocity drag friction in dense granular media. *Europhysics Letters*, 92(4).
- [26] Moore, J. and Runkles, J., 1968. Evaporation from brine solutions under controlled laboratory conditions. *Texas Water Development Board, Austin, Texas* (May), pp.1–67.
- [27] Climate-Data.org [Internet]. Available from: <https://fa.climate-data.org/>
- [28] Weather [Internet]. Available from: <http://www.irimo.ir/far/>
- [29] Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2020. Study of sweetened seawater transportation by temperature difference. *Heliyon*, 6(3).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Aghazadeh, K. and Attarnejad, R., 2026. Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.49-63.



Solving Viscoelastic Problems Using Complex Fourier Boundary Element Method

M. Bahrampour¹, S. Hamzehei-Javaran^{1*} , S. Shojaee¹

1. Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Abstract

This paper suggests a novel numerical approach to the analysis of two-dimensional viscoelastic materials using an enriched boundary element method (BEM) with complex Fourier radial basis functions (RBFs). The research is motivated by the growing need for accuracy and efficiency in tools capable of simulating the time-dependent behavior of materials like rubber, concrete, and polymers. The standard elastic analysis is not capable of modeling such advanced materials, and thus, viscoelastic formulations emerge as a more efficient option. The new method incorporates the Kelvin–Voigt rheological model and the weighted residual approach to constitute the governing equations, and finally uses complex Fourier shape functions to perform boundary variable interpolation. In the classical BEM, kernel functions are the fundamental solutions of the governing differential equations, and the field of interest is transformed to its boundary, leading to a significant reduction in the number of degrees of freedom. However, classical BEM accuracy can be finite, especially when employing conventional Lagrangian shape functions. To overcome such shortcomings, this contribution develops and applies sophisticated Fourier-based RBFs that are capable of meeting exponential, trigonometric, and polynomial field behavior simultaneously. The shape functions of these RBFs have Kronecker delta-type characteristics, partition of unity, and piecewise infinite continuity, which collectively enable enhanced convergence and satisfaction of boundary conditions. The contribution first develops the enriched formulation for boundary viscoelastic problems, achieving consistency through the extension of complex Fourier shape functions, with algebraic techniques for their use in boundary discretization. A major innovation is the hybridization of complex exponential and trigonometric terms into a radial form, enabling a more general approximation of boundary field variables.

For the validation of the proposed method, three classic problems are analyzed: (1) a simply supported beam with a time-varying load, (2) a fixed beam with a central point load, and (3) radial deformation of a viscoelastic rocket motor case due to constant internal pressure. In all cases, the solutions from the complex Fourier BEM are compared with the classical BEM solutions and available analytical solutions. The evaluation includes displacement-time history plots and mesh plots, which show the increased accuracy and convergence of the new approach. Notably, the Fourier BEM always produces results very close to analytical benchmarks, even with fewer elements, while classical BEM deviates significantly from the analytical results over time. The results indicate that the new method possesses several advantages: reduced degrees of freedom, higher accuracy, and computational efficiency. This is owing to the spectral richness of complex Fourier RBFs and their ability to approximate a wide range of physical responses. Furthermore, the formulation remains stable for creep and stress relaxation calculations over time owing to the stability of the implemented shape functions. In summary, the new Fourier boundary element method provides an exciting alternative to the traditional numerical methods in viscoelastic simulation. It benefits from the dimensional reduction property of BEM and high accuracy of spectral interpolation, thereby being particularly beneficial for simulating time-dependent mechanical properties in engineering materials. Further work can focus on generalizing the method to three-dimensional problems or anisotropic viscoelastic materials.

Review History

Received: Mar 15, 2025

Revised: July 6, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

2D Viscoelastic problems
Boundary element method
Radial basis functions
Complex Fourier elements

* Corresponding Author Email: s.hamzeheijavaran@uk.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7341-4314 - Tel.: +989123054622



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

حل مسائل ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزای مرزی مختلط فوریه

مهدیه بهرامپور^۱، صالح حمزهء جواران^{۲*}، سعید شجاعی^۳

۱. دانشجوی دکتری، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲. دانشیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳. استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این مقاله، روش اجزای مرزی مختلط فوریه برای تحلیل عددی دوبعدی مواد ویسکوالاستیک مانند لاستیک، بتن، پلیمر یا مواد زیستی با استفاده از توابع پایه شعاعی (RBF) باز فرمول‌بندی شده است. این مسئله به این دلیل مورد توجه قرار گرفته است که با پیشرفت علم و گرایش به روش‌های بهینه‌تر، به دیدگاه‌های واقعی‌تری نیاز پیدا شده است.

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی

مسائل ویسکوالاستیک دوبعدی

روش اجزای مرزی

توابع پایه شعاعی

المان مختلط فوریه

در روش متداول اجزای مرزی (BEM)، قضیه کلاسیک دوگانه بازمینی شده است و توابع پایه مختلط فوریه به جای توابع شکل کلاسیک لاگرانژ به کار گرفته شده‌اند. این توابع می‌توانند حوزه‌های مختلفی مانند میدان توابع نمایی و مثلثاتی و همچنین توابع چندجمله‌ای را اغنا کنند. سپس، جابه‌جایی‌ها و تنش‌های تخمین زده شده و برای سه مسئله مرجع با روش‌های کلاسیک و تحلیلی مقایسه می‌شوند تا اعتبار و پایداری روش پیشنهادی بررسی شود. نتایج، نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای روش فوریه در مقایسه با رویکرد کلاسیک است و با توجه به اینکه نتایج دقیق‌تر با کمترین درجه‌های آزادی به دست می‌آیند، نتیجه‌گیری می‌شود که روش پیشنهادی اقتصادی‌تر و کارآمدتر است.

۱- مقدمه

ویسکوز (یک میراگر می‌باشد. ترکیب‌های خطی مختلفی از دو المان مذکور در طول سال‌ها به منظور رسیدن به تجسمی قابل قبول‌تر انجام شده است که شامل مدل‌های کلین-وویت، مکسول-ویچرت، پویتینگ-تامسون و مدل جفری می‌باشد. برخی از مدل‌های پیچیده‌تر نیز در پیشینه تحقیقات علمی گزارش شده است که هر یک مزایا و معایب خاص خود را در مدل‌سازی خزش و وادادگی تنش دارد [2, 3] و در این راستا روش‌های عددی در تحلیل ویسکوالاستیک به طور فزاینده‌ای رایج شده‌اند [4-12].

در مسائل مهندسی، نتایج تحلیلی به راحتی در دسترس نیستند و حتی در برخی موارد به طور کامل غیرقابل دسترسی هستند. به همین دلیل پژوهشگران به روش‌های عددی در قالب کدهای رایانه‌ای روی

با توجه به این موضوع که تحلیل ویسکوالاستیک نسبت به روش‌های معمول الاستیک، دیدگاه واقع‌گرایانه‌تری ارائه می‌دهد و در نتیجه به شبیه‌سازی بهینه‌تر و اقتصادی‌تری منجر می‌شود، در سال‌های اخیر مواد ویسکوالاستیک توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. کاربردهای وسیعی از این مواد در رشته‌هایی مانند مهندسی سازه به عنوان سیستم‌های اتلافی، دینامیک سازه‌ها و رئولوژی مشاهده می‌شود [1]. مواد ویسکوالاستیک با تفکیک رفتار آن‌ها به دو بخش الاستیک و ویسکوز مدل‌سازی می‌شوند. یک فنر نمایانگر جسم هوکین^۱ (بخش الاستیک) است و نماینده مایع نیوتنی^۲ (بخش

¹ Hookean Solid

² Newtonian Fluid

آزادی^۸، دقت کلی فرمول‌بندی BEM ویسکوالاستیک، افزایش می‌یابد [26]، اما همچنان معضل زمان و بهینه‌سازی مطرح است و به همین دلیل انتخاب دقیق توابع تقریب برای بهینه‌سازی فرایند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

توابع پایه شعاعی^۹ به عنوان توابع درون یاب در این مقاله در نظر گرفته خواهند شد. نویسندگان، پیش‌تر از توابع پایه هنکل کروی^{۱۰} در تحلیل FEM مواد ویسکوالاستیک استفاده کرده‌اند [33] و در اینجا، توابع پایه مختلط فوریه^{۱۱} با قدرت عددی بالا به عنوان جایگزینی برای توابع شکل کلاسیک لاگرانژی در نظر گرفته شده است. این توابع شکل نخستین بار توسط حمزه جواران و همکاران در سال ۲۰۱۱ معرفی شدند [34] و پس از آن در تقریب میدان‌های متفاوت از مسائل مهندسی به کار گرفته شدند [35-41] که نتایج رضایت‌بخشی نشان دادند. از جمله نقاط قوت این درون‌یاب‌ها می‌توان به ارضا هم‌زمان میدان توابع نمایی و مثلثاتی و نیز میدان توابع چند جمله‌ای اشاره کرد. RBF ها معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دسته اول غیرنوسانی^{۱۲} مانند اسپیلن‌های نازک^{۱۳}، مولتی‌کوادریک‌ها^{۱۴} و توابع مخروطی [15, 42, 43] و دسته دیگر مانند فوریه حقیقی و مختلط، J-Bessel و توابع پایه هنکل کروی، نوسانی هستند [33, 35 - 37, 39, 40, 44 - 55]. در این پژوهش، چند نمونه عددی برای نشان دادن درستی، پوشش عددی کامل میدان، توانایی همگرایی سریع روش پیشنهادی و مزایای استفاده از آن در زمینه ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فرمول‌بندی اجزای مرزی ویسکوالاستیک

همان‌گونه که ذکر شد، رفتار ویسکوالاستیک مواد باید از طریق مدل‌های مختلف شبیه‌سازی شود [2] و روش اجزای مرزی نیز باید با استفاده از یکی از دو روش توصیف‌شده به کار گرفته شود. هر مدل و روش دارای مزایا و معایب خاص خود است [۱۸]. مدل رئولوژیکی کلون-وویت^{۱۵} با ترکیبی خطی از فنر و میراگر به عنوان مدل انتخابی در این مقاله به کار رفته است که دارای

می‌آورند. این روش‌ها بیشتر به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های مبتنی بر مش و روش‌های بدون مش. دسته اول رایج‌تر است و همانطور که از نام آن پیداست نیاز به توپولوژی گرهی در مش دارد و شامل روش‌هایی از قبیل روش اجزای مرزی^۱ و روش اجزای [13] و دسته دوم شامل روش‌هایی مانند روش پترو-گالرکین^۳ یا روش راه‌حل‌های بنیادین^۴ می‌باشد [14, 15].

BEM یک روش مبتنی بر مش است که به خاطر مزایایی مانند کاهش ابعاد مسئله به گونه‌ای که درصد خطا را در مرزها محدود می‌کند، محبوبیت یافته است [16]. این روش به‌ویژه در دامنه‌های نامتناهی و نیمه‌نامتناهی یا مسائل تمرکز تنش بسیار انعطاف‌پذیر است. به‌طور کلی در این روش، مرز خارجی هندسه مورد نظر گسسته می‌شود، در حالی که در FEM تمام ناحیه باید مش‌بندی شود. سپس معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی^۵ در قالب معادلات انتگرال مرزی حل می‌شوند. بنابراین، در پیشینه تحقیقات علمی، از BEM به عنوان یک جایگزین هوشمند برای FEM یاد شده است [13, 17-19].

دو رویکرد مختلف برای حل مسائل ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزای مرزی وجود دارد؛ یک روش - که در سال ۱۹۸۲ توسط کاسوما با استفاده از تبدیل لاپلاس^۶ ارائه شده است [20] که با مشکلاتی در تبدیل عددی مواجه بود و دیگری در سال ۱۹۸۸ با استفاده از قضیه کار متقابل^۷ معرفی شد [21]. راه‌حل دوم از انسجام بیشتری برخوردار بود اما دقت کافی نداشت. با این حال، این رویکردها بنیان‌گذار کارهای بعدی بودند. برای نمونه، برخی از پژوهشگران هر دو روش را برای نوع خاصی از مواد ویسکوالاستیک به کار بردند [22]. بسیاری از پژوهشگران [23-28] از روش کار متقابل در زمینه‌های مختلف ویسکوالاستیک استفاده کردند و در سال ۲۰۱۷ گائول این روش را در دینامیک ویسکوالاستیک به کار برد. اما تعداد کمتری از دانشمندان [29-31] مانند ایگومنوف که به تازگی تحلیل ویسکوالاستیک آنیزوتروپیک را با استفاده از روش تبدیل لاپلاس بررسی کرده است، روش معرفی‌شده اول را استفاده نمودند [32].

با اعمال تغییرات ایزوپارامتریک و در نتیجه، افزایش درجات

⁸ Degrees Of Freedom (DOF)

⁹ Radial Basis Function (RBF)

¹⁰ Spherical Hankel

¹¹ Complex Fourier

¹² Non-Oscillatory

¹³ Thin Splines

¹⁴ Multi-Quadratics

¹⁵ Kelvin-Voigt

¹ Boundary Element Method (BEM)

² Finite Element Method (FEM)

³ Petrov-Galerkin Method

⁴ Fundamental Solutions Method

⁵ Partial Differential Equations (PDE)

⁶ Laplace Transform

⁷ Reciprocal Work Theorem

می گیرند تا در روش اجزای مرزی ویسکوالاستیک پیاده سازی شده و فرمول بندی را به گونه ای بهبود بخشند که دقت بیشتر، پوشش فیزیکی بالاتر و همگرایی سریعتری داشته باشد.

۳- وفقی کردن توابع شکل

در این بخش، توسعه تابعی به عنوان ایده اصلی برای بهبود توابع فوریه مختلط به گونه ای استفاده می شود که بتوان آن ها را به عنوان توابع شکل برای یک المان مرزی به کار گرفت. در ابتدا، $\bar{P}(r)$ به عنوان یک تابع پیوسته ی تکه ای ارائه می شود که با اصول سری فوریه مختلط مطابقت دارد:

$$\bar{P}(r) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} c_s e^{i \omega_s r} \quad (5)$$

که در آن پارامترهای سری مختلط فوریه به صورت c_s و ω_s ارائه می شوند. یک جمله از معادله بالا می تواند به عنوان تابع پایه شعاعی مختلط فوریه تعریف شود:

$$R(r) = a e^{i \omega r} \quad (6)$$

که در آن a و ω پارامترهای شکل توابع مختلط فوریه هستند و $i^2 = -1$. بدین ترتیب، فرآیند غنی سازی توابع پایه شعاعی مختلط فوریه به عنوان توسعه تابعی^۴ RBF ها و تعداد معینی از جملات پایه چندجمله ای آغاز می شود:

$$\phi(\mathbf{x}) \approx \phi_h(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^{nr} R_s(r) \alpha_s + \sum_{t=1}^{np} P_t(\mathbf{x}) \beta_t \quad (7)$$

که در آن تعداد جملات پایه چندجمله ای و گره ها به ترتیب با np و nr نشان داده می شوند و سپس، معادله برای $\phi_h(\mathbf{x})$ بازنویسی می شود:

$$\phi_h(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{P}^T \boldsymbol{\beta} \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_{nr}]^T$$

$$\mathbf{P} = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_{np}]^T$$

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{nr}]^T$$

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_{np}]^T$$

سپس این عبارت در نقاط گرهی ارضا می شود:

$$\bar{\phi} = \bar{\mathbf{R}} \boldsymbol{\alpha} + \bar{\mathbf{P}} \boldsymbol{\beta} \quad (9)$$

که در آن:

عملکرد رضایت بخشی به ویژه در مدلسازی خزش^۱ است. روش انتخابی برای فرایند BEM، تکنیک باقی مانده وزنی^۲ است که معادله دیفرانسیل تعادل را با استفاده از حل اساسی کلونین به عنوان تابع وزنی به صورت زیر تشکیل می دهد:

$$\int_{\Omega} u_{ki}^* (\sigma_{ij,j} + b_i) d\Omega = 0 \quad (1)$$

در این فرمول، σ_{ij} نشان دهنده تنش و b_i نیروی کالبدی است. سپس، با استفاده از قضیه دیورژانس، ناحیه انتگرال گیری از حوزه به مرز تغییر می یابد و انتگرال گیری به روش جزء به جزء در غیاب نیروهای کالبدی منجر به عبارت زیر می شود (برای اطلاعات بیشتر به مرجع [24] مراجعه شود):

$$\sigma_{pq}(p) = \int_{\Gamma} \sigma_{piq}^* p_i d\Gamma - \int_{\Gamma} \bar{p}_{piq} u_i d\Gamma - \gamma \int_{\Gamma} \bar{p}_{piq} \dot{u}_i d\Gamma \quad (2)$$

که در آن p_i نشان دهنده تنش سطحی^۳ است و $\bar{p}$ حل اساسی می باشد. هنگامی که ضرایب ویسکوالاستیک هیدرواستاتیک و انحرافی برابر با یکدیگر در نظر گرفته شوند، γ نشان دهنده این اقدام خواهد بود ($\theta_\lambda = \theta_\mu = \gamma$).

مقادیر هر پارامتر مجهول به صورت یک ترکیب خطی از مقادیر گرهی پارامتر و توابع شکل درونیابی شده در نظر گرفته می شود و پس از برخی تبدیلات جبری، فرمول بندی جابه جایی به دست می آید:

$$TU(t) + \gamma TU'(t) = GP(t) \quad (3)$$

T و G ماتریس های حل اساسی در روش BEM هستند که در پیوست ب به صورت کامل توضیح و بسط داده شده اند و با استفاده از توابع شکل مختلط فوریه ارزیابی می شوند که پایه ای اصلی این روش را تشکیل می دهند [56]. t نشان دهنده زمان است و در نهایت، به عنوان مشتق خطی زمانی جابه جایی در نظر گرفته می شود. در نهایت، فرم کاربردی فرمول بندی به صورت زیر ارائه می شود:

$$\bar{T}U_{s+1} = GP_{s+1} + F_s \quad (4)$$

$$\bar{T} = (1 + \frac{\gamma}{\Delta t})T$$

$$F_s = \frac{\gamma}{\Delta t} TU_s$$

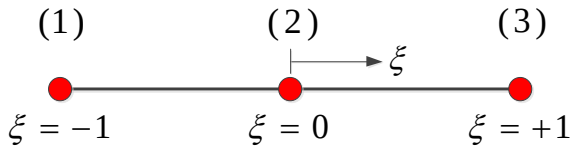
توابع شکل پیشنهادی در بخش بعدی مورد بحث قرار

¹ Creep

² Weighted Residual

³ Traction

⁴ Functional Expansion



شکل ۱. المان سه گرهی در دستگاه مختصات طبیعی

Fig. 1. Three-node element in the natural coordinate system

$$\bar{\mathbf{R}} = a \begin{bmatrix} 1 & e^{i\omega} & e^{2i\omega} \\ & 1 & e^{i\omega} \\ \text{Sym.} & & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\bar{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

عبارات واسط به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

$$\mathbf{Z}_\alpha = \frac{1}{2a(1-e^{i\omega})(3-e^{i\omega})} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ & 4 & -2 \\ \text{sym.} & & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}_\beta = \frac{1}{3-e^{i\omega}} \begin{bmatrix} 1 & 1-e^{i\omega} & 1 \\ & -0.5(3-e^{i\omega}) & 0 \\ & 0 & 0.5(3-e^{i\omega}) \end{bmatrix}$$

و در نهایت تابع شکل یک المان مرزی مختلط فوریه با ۳ گره در سیستم مختصات طبیعی ξ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{N}(\xi) = [N_1(\xi) \quad N_2(\xi) \quad N_3(\xi)] \quad (21)$$

$$N_1(\xi) = \frac{1}{2}(-\xi + c + k(\xi))$$

$$N_2(\xi) = (1-c) - k(\xi)$$

$$N_3(\xi) = \frac{1}{2}(\xi + c + k(\xi))$$

$$\text{که در اینجا: } c = \frac{2}{3-e^{i\omega}}$$

$$k(\xi) = \frac{e^{i\omega|\xi+1|} - 2e^{i\omega|\xi|} + e^{i\omega|\xi-1|}}{(1-e^{i\omega})(3-e^{i\omega})} \text{ می‌باشد.}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامتر a در فرآیند غنی‌سازی حذف می‌شود. این تابع ویژگی‌های توابع شکل مختلط فوریه را حفظ می‌کند، به طوری‌که پارامتر شکل مختلط ω به دلیل بخش موهومی خود، میدان نمایی را پوشش می‌دهد و بخش حقیقی این پارامتر مختلط به میدان توابع مثلثاتی را شامل می‌شود و در نتیجه خاصیت تطبیق‌پذیری را به سایر مزایای ارزشمند این دسته از توابع شکل اضافه می‌کند. به طور کلی، ویژگی‌هایی که این توابع را به نامزدهای مناسبی برای این منظور تبدیل می‌کند، به شرح زیر است:

- ویژگی دلتای کرونیکر: این ویژگی به ارضا شرایط مرزی

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \phi(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \phi(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} R_1(r_1) & \cdots & R_n(r_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1(r_n) & \cdots & R_n(r_n) \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} P_1(\mathbf{x}_1) & \cdots & P_m(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_1(\mathbf{x}_m) & \cdots & P_m(\mathbf{x}_n) \end{bmatrix}$$

به دلیل بیشتر بودن تعداد مجهولات از تعداد معادلات، عبارت زیر پیشنهاد می‌شود تا یکتایی معادله (۹) تضمین شود [53, 57, 58]:

$$\sum_{s=1}^{nr} P_t(\mathbf{x}_s) \alpha_s = 0, \quad t = 1, 2, \dots, np \quad (11)$$

بنابراین، مجموعه نهایی معادلات به دست می‌آید که می‌توان به صورت جبری مورد بررسی قرار گیرد:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \bar{\mathbf{P}} \\ \bar{\mathbf{P}}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

عبارات واسط ($\mathbf{Z}_\beta$ و $\mathbf{Z}_\alpha$) برای در نظر گرفتن مقادیر گرهی در محاسبات استفاده می‌شوند:

$$\alpha = \mathbf{Z}_\alpha \bar{\Phi}, \quad \beta = \mathbf{Z}_\beta \bar{\Phi} \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_\beta = [\bar{\mathbf{P}}^T \bar{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{P}}]^{-1} \bar{\mathbf{P}}^T \bar{\mathbf{R}}^{-1}, \quad (14)$$

$$\mathbf{Z}_\alpha = \bar{\mathbf{R}}^{-1} - \bar{\mathbf{R}}^{-1} \bar{\mathbf{P}} \mathbf{Z}_\beta$$

پس از جایگزینی $\mathbf{Z}_\beta$ و $\mathbf{Z}_\alpha$ ، عبارت زیر حاصل می‌شود:

$$\phi_h(\mathbf{x}) = [\mathbf{R}^T(r) \mathbf{Z}_\alpha + \mathbf{P}^T(\mathbf{x}) \mathbf{Z}_\beta] \bar{\Phi} \quad (15)$$

که در آن $[\mathbf{R}^T(r) \mathbf{Z}_\alpha + \mathbf{P}^T(\mathbf{x}) \mathbf{Z}_\beta]$ ، که همچنین به عنوان $\mathbf{N}(\mathbf{x})$ نیز شناخته می‌شود، عبارتی است که مقادیر گرهی را به میدان تابع مرتبط می‌سازد و این دقیقاً تعریف یک تابع شکل درون‌یاب است. این فرمول اکنون شفاف‌سازی شده تا در یک المان مرزی سه گرهی در مختصات طبیعی پیاده‌سازی شود (شکل ۱).

$$\mathbf{R}(r) = \begin{bmatrix} R_1(r) \\ R_2(r) \\ R_3(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a e^{i\omega|\xi+1|} \\ a e^{i\omega|\xi|} \\ a e^{i\omega|\xi-1|} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{P}(\xi) = \begin{bmatrix} 1 \\ \xi \end{bmatrix} \quad (17)$$

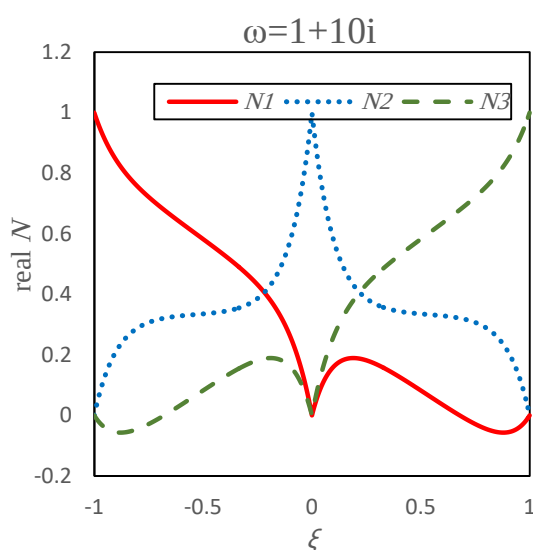
در این مرحله پروسه غنی‌سازی انجام می‌شود:

محاسبه مشتقات $k(\xi)$ به دست می‌آید.

فرمول‌بندی‌های این ویژگی‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است و شکل (۲) نمونه‌هایی از توابع شکل پیشنهادی برای المان ۳-گره‌ای نشان می‌دهد. شکل‌های ۲.۱ (الف و ب) تأثیر افزایش بخش موهومی ω را نشان می‌دهند که رفتار تابع پیشنهادی را به سمت توابع نمایی تغییر می‌دهد، در حالی که شکل ۲.۲ (ج و د) مقادیر بالاتری در بخش حقیقی نشان می‌دهند که در نتیجه آن، ویژگی‌های نوسانی به دلیل مشارکت بیشتر میدان توابع مثلثاتی آشکارتر می‌شود.

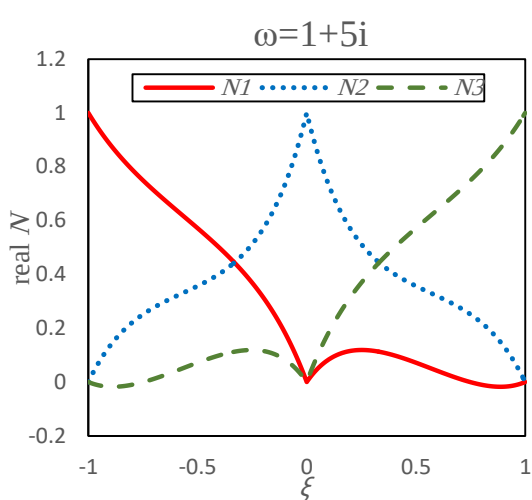
منجر می‌شود و بدین معناست که وقتی یک گره مقدار یک دارد، مقادیر سایر گره‌ها صفر است.

- **افراز واحد:** در روش‌های مبتنی بر مش، این ویژگی به همگرایی سریع‌تری منجر می‌شود.
- **استقلال خطی:** که می‌توان آن را از خاصیت دلتای کرونگر نتیجه گرفت (جدول ۱).
- **پیوستگی تکه‌ای بی‌نهایت:** با استخراج مشتقات مرتبه اول، دوم و مراتب بالاتر از توابع شکل، یک الگوی تکراری برای



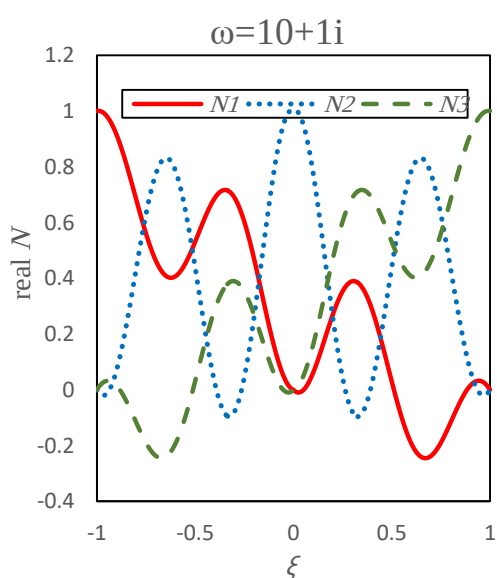
(ب)

(b)



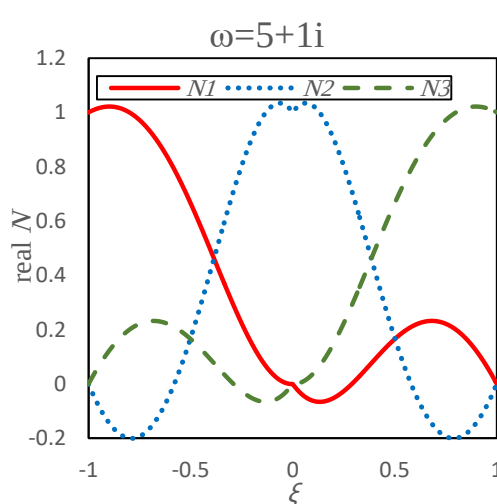
(الف)

(a)



(د)

(d)



(ج)

(c)

شکل ۲. توابع شکل فوریه مختلط برای یک المان سه گره‌ای در مختصات طبیعی. (الف و ب) تأثیر افزایش بخش موهومی، (ج و د) تأثیر افزایش بخش حقیقی

Fig. 2. The complex Fourier shape functions for a 3-node element in natural coordinates. (a) and (b) Effect of increasing the imaginary part, (c) and (d) Effect of increasing the real part

$$\nu = 0.3 \quad (22)$$

$$\gamma = 4$$

$$E_{\text{elastic}} = 0.1 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{viscous}} = 0.4 \text{ MPa}$$

$$E_0 = E_{\text{el}} + E_v$$

نیروی خزش^۱ در دو مرحله محاسبه می‌شود: در زمان بارگذاری (معادله (۲۳)) و پس از باربرداری (معادله (۲۴)):

$$D(t) = D_0(1 - \exp(-\frac{t}{\gamma})) \quad (23)$$

$$D(t - t_1) = D_0(1 - \exp(-\frac{(t - t_1)}{\gamma})) \quad (24)$$

که در آن:

$$D_0 = \frac{1}{E_0} \quad (25)$$

حل تحلیلی در هر نمونه از طریق ضرب جابه‌جایی الاستیک محاسبه شده از دانش مقاومت مصالح و تطابق خزش تعیین می‌شود. گام زمانی برای تحلیل عددی به عنوان $\frac{1}{80}$ از زمان کل تحلیل در نظر گرفته می‌شود و تنظیمات مش برای هر دو روش BEM کلاسیک و مختلط فوریه به‌عنوان یک المان سه‌گره‌ای در هر طرف هندسه مسئله در نظر گرفته می‌شود. نمودارهای مقایسه‌ای برای ارزیابی نمونه‌ها به‌کار می‌روند تا توافق نزدیک BEM فوریه‌ای و حل تحلیلی را با استفاده از کمترین درجه آزادی نشان دهند و هر مقایسه شامل سه نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی است:

- حل تحلیلی
- BEM کلاسیک
- BEM مختلط فوریه

در اولین نمونه، یک تیر با طول ۱۵ و عرض ۵ شکل (۳ الف) با تکیه‌گاه ساده و تحت بار نوسانی در طول مدت ۴۰ ثانیه قرار می‌گیرد شکل (۳ ب). این تیر با استفاده از BEM با یک المان در هر طرف هندسه تحلیل شده است شکل (۳ ج) و همین روش برای تمامی نمونه‌های عددی به‌کار گرفته شد.

جدول ۱. فرمولاسیون خصوصیات توابع مختلط فوریه

Table 1. Formulations of complex Fourier function properties

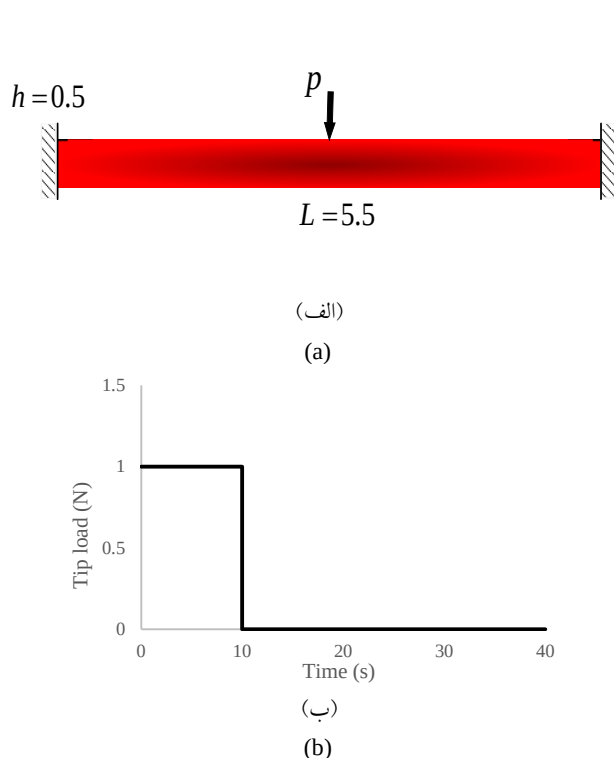
Formulation	Properties
$N_m(\xi_n) = \begin{cases} 1+0i & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases}$	Kronecker Delta
$\sum_{j=1}^3 N_j(\xi) = 1+0i$	Partition of Unity
$\sum_{j=1}^3 c_j N_j(\xi; \xi_1, \xi_2, \xi_3) = 0$ $\rightarrow c_1 = c_2 = c_3 = 0$	Linear Independence
$0 = \sum_{n=1}^3 c_n N_n(\xi_k) = \sum_{n=1}^3 c_n \delta_{nk}$ $\rightarrow c_n = 0, n = 1, 2, 3$	
$\frac{d^m N_1(\xi)}{d\xi^m} = \frac{1}{2}(l + \frac{d^m k(\xi)}{d\xi^m})$, $l = -1 \text{ if } m = 1$, $l = 0 \text{ if } m = 2, 3, \dots$	
$\frac{d^m N_2(\xi)}{d\xi^m} = -\frac{d^m k(\xi)}{d\xi^m}$, $m = 1, 2, \dots$	
$\frac{d^m N_3(\xi)}{d\xi^m} = \frac{1}{2}(l + \frac{d^m k(\xi)}{d\xi^m})$, $l = +1 \text{ if } m = 1$, $l = 0 \text{ if } m = 2, 3, \dots$	Infinite Piecewise Continuity
$\frac{d^m k(\xi)}{d\xi^m} = -\omega^2 \frac{d^{m-2} k(\xi)}{d\xi^{m-2}}$	

(برای جزییات بیشتر به پیوست الف مراجعه شود.)

۴- مسائل مرجع

در این قسمت مجموعه‌ای از نمونه‌های عددی ارائه می‌شود تا درستی و برتری توابع شکل المان مختلط فوریه را نشان دهد. همان‌طور که قبلاً بحث شد مدل کلین-وویت به دلیل مزایای بارز در مدلسازی خزش برای شبیه‌سازی ویسکوالاستیک انتخاب شده است. ویژگی‌های مواد برای تمامی نمونه‌ها یکسان بوده و به شرح زیر می‌باشد:

¹ Creep Compliance



شکل ۴. (الف) هندسه تیر دو سر گیردار، (ب) تاریخچه بارگذاری مثال دوم

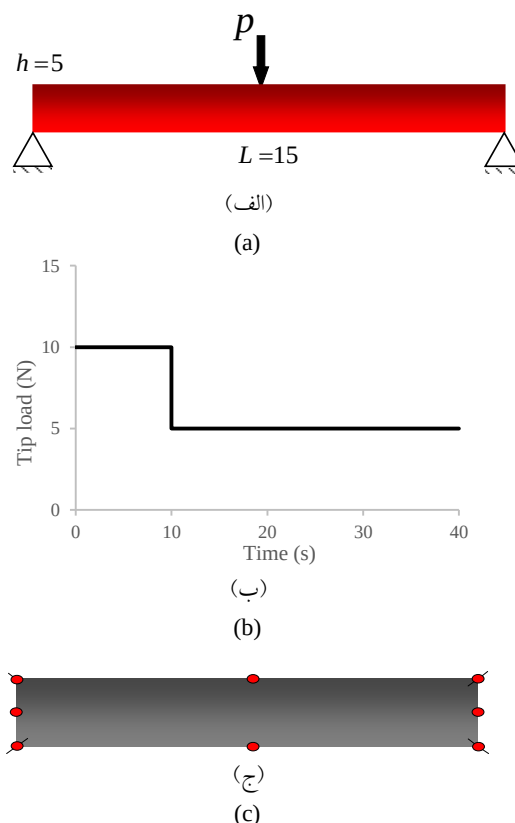
Fig. 4. (a) Geometry of the fixed ended beam, (b) 2nd example's history of loading

۵- نتایج نمونه‌های عددی

نتایج به صورت نمودارهای مقایسه‌ای برای ارزیابی BEM فوریه و BEM کلاسیک و مقایسه آن‌ها با حل تحلیلی نشان داده می‌شود. شکل‌های (۶ تا ۸). همان‌طور که از دیاگرام‌ها مشهود است، زمانی که تعداد المان‌های مشابه در هر دو روش پیاده‌سازی شود، توافق نزدیکی بین BEM فوریه و نتایج تحلیلی حاصل می‌شود و این در حالی است که اگرچه هر سه نمودار نمایش داده شده از یک نقطه شروع می‌شوند، اما BEM کلاسیک در طول دوره زمانی از حل تحلیلی فاصله قابل ملاحظه‌ای می‌گیرد. استفاده از توابع شکل فوریه خطا را به گونه‌ای کاهش می‌دهد که تقریباً با پاسخ‌های تحلیلی هم‌راستا می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش معرفی شده برای تحلیل عددی مواد ویسکوالاستیک تحت بارگذاری و هندسه‌های مختلف به کار گرفته شد تا دقت را بهبود بخشیده و فرایند تحلیل را اقتصادی‌تر کند. ابتدا، یک فرمول‌بندی برای روش اجزای مرزی در نظر گرفته شد



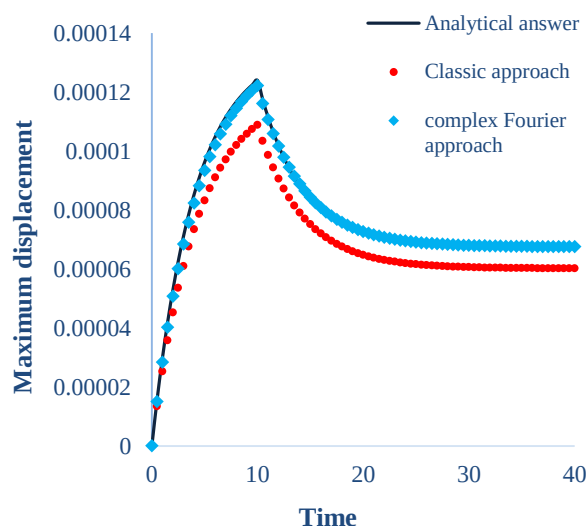
شکل ۳. (الف) هندسه تیر با تکیه گاه ساده، (ب) تاریخچه بارگذاری نمونه اول،

(ج) مش‌بندی نمونه اول

Fig. 3. (a) Geometry of the simply supported beam, (b) 1st example's history of loading, (c) 1st example's meshing

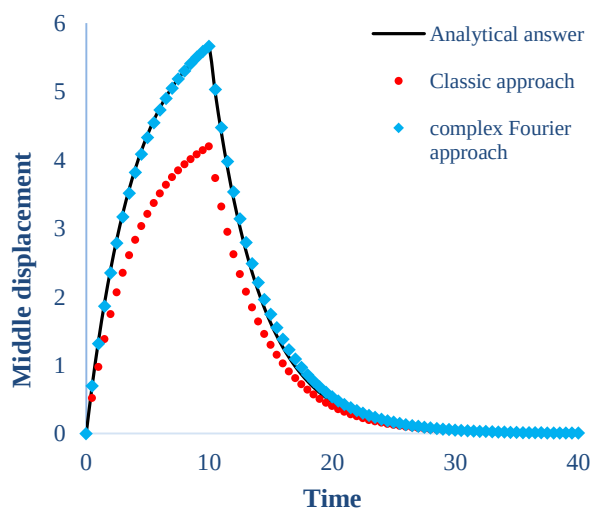
نمونه دوم شامل یک تیر با انتهای گیردار است که ویژگی‌های هندسی آن شامل طول ۵/۵ و ارتفاع ۰/۵ شکل (۴ الف) می‌باشد که تحت بار موقتی در وسط هندسه شکل قرار دارد. شکل (۴ ب). تاریخچه زمانی بارگذاری و هندسه مسئله نشان داده شده و مش‌بندی مشابه نمونه قبلی انجام شده است.

در هر دو نمونه، جابه‌جایی حداکثر با استفاده از سه روش مختلف ذکر شده محاسبه می‌شود و در نهایت در نمونه نهایی، جابه‌جایی شعاعی یک موتور راکت با شعاع داخلی ۲ و شعاع خارجی ۴ شکل (۵ الف) زمانی که تحت فشار ثابت ۱۰۰ پاسکال قرار دارد شکل (۵ ب) تخمین زده می‌شود. به دلیل تقارن کامل راکت، تنها یک چهارم از هندسه نیاز به مش‌بندی دارد شکل (۵ ج).



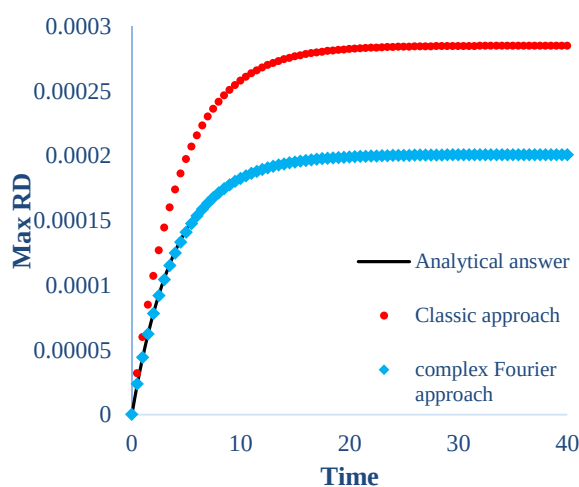
شکل ۶. نمودارهای ارزیابی نمونه اول

Fig. 6. The first example evaluation graphs.



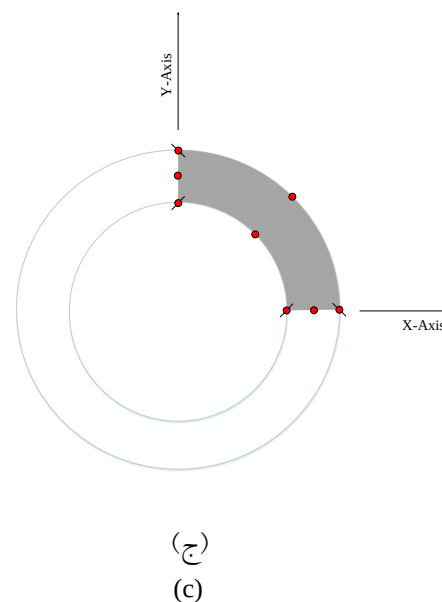
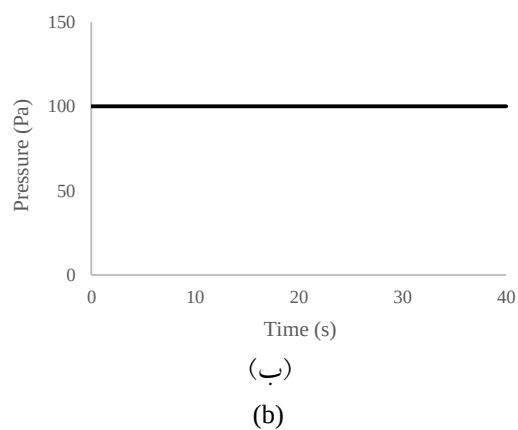
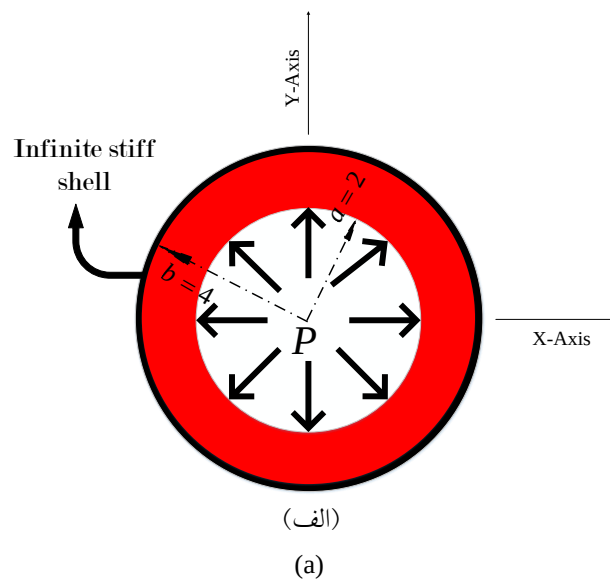
شکل ۷. نمودارهای ارزیابی نمونه دوم

Fig. 7. The second example evaluation graphs.



شکل ۸. نمودارهای ارزیابی نمونه سوم

Fig. 8. The third example evaluation graphs.



شکل ۵. (الف) هندسه موتور راکت، (ب) تاریخچه بارگذاری مثال آخر، (ج)

مش بندی مثال سوم

Fig. 5. (a) Geometry of the rocket's motor, (b) last example's history of loading, (c) 3rd example's meshing

قدردانی نویسندگان

از حمایت دانشگاه شهید باهنر کرمان قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافع در چاپ مقاله حاضر وجود ندارد.

سهم نویسندگان

مهدیه بهرامپور ۴۰ درصد، صالح حمزه جواران ۳۰ درصد و سعید شجاعی ۳۰ درصد.

منابع مالی

در انجام مقاله حاضر از منابع مالی استفاده نشده است.

References

- [1] Haddad, Y.M., 1995. Viscoelasticity of engineering materials.
- [2] Gutierrez-Lemini, D., 2014. Engineering viscoelasticity. Springer, 910.
- [3] Owens, R.G. and Phillips, T.N., 2002. Computational rheology. World Scientific.
- [4] Courtois, A. and et al., 2019. Numerical multiscale homogenization approach for linearly viscoelastic 3D interlock woven composites. *International Journal of Solids and Structures*, 163, pp.61-74.
- [5] Haj-Ali, R.M. and Muliana, A.H., 2004. A multi-scale constitutive formulation for the nonlinear viscoelastic analysis of laminated composite materials and structures. *International Journal of Solids and Structures*, 41(13), pp.3461-3490.
- [6] Koutsawa, Y. 2007. Static and free vibration analysis of laminated glass beam on viscoelastic supports. *International Journal of Solids and Structures*, 44(25-26), pp.8735-8750.
- [7] Mesquita, A.D., Coda, H.B. and Venturini, W.S., 2001. Alternative time marching process for BEM and FEM viscoelastic analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 51(10), pp.1157-1173.
- [8] Pallicity, T.D. and Böhlke, T., 2011. Effective viscoelastic behavior of polymer composites with regular periodic microstructures. *International Journal of Solids and Structures*, 216, pp.167-181.
- [9] Saito, R. and et al., 2020. Decoupled two-scale viscoelastic analysis of FRP in consideration of dependence of resin properties on degree of cure. *International Journal of Solids and Structures*, 190, pp.199-215.
- [10] Tong, X. and et al., 2020. A nonlinear viscoelastic constitutive model for cyclically loaded solid composite propellant. *International Journal of Solids and Structures*, 198, pp.126-135.
- [11] Rezaei Balouchi, M. and Saleh Jalali, R., 2015. Pounding response of adjacent buildings with non-equal height under near-fault strong ground motion. *Modares Civil Engineering journal*, 15(1), pp.35-46.
- [12] Taherkhani, H. and Jalali Jirandehi, M., 2017. Investigation of Top-Down Cracking in Asphalt Pavements Using FEM. *Modares Civil Engineering journal*, 17(1), pp.127-135.
- [13] Manolis, G.D. and Beskos, D.E., 1988. Boundary element methods in elastodynamics.
- [14] Ma, Q., 2005. Meshless local Petrov–Galerkin method for two-dimensional nonlinear water wave problems. *Journal of Computational Physics*, 205(2), pp.611-625.
- [15] Naffa, M. and Al-Gahtani, H.J., 2007. RBF-based meshless method for large deflection of thin plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 31(4): pp.311-317.
- [16] Sládek, V. and Sladek, J., 1998. Singular integrals in boundary element methods.
- [17] Becker, A., *The Boundary Element Method in Engineering, a Complete Course*. 1992, McGraw-Hill.
- [18] Beer, G., Smith, I., and Duenser, C., 2008. The boundary element method with programming: for engineers and scientists. *Springer Science & Business Media*.
- [19] yazdani, M., 2017. Sensitive Analysis of Nodal Force Function in the Elastostatic Problems in Decoupled Equations Method. *Modares Civil Engineering journal*, 17(3), pp.247-257.
- [20] Kusama, T. and Mitsui, Y., 1982. Boundary element method applied to linear viscoelastic analysis. *Applied*

- Mathematical Modelling*, 6(4), pp.285-290.
- [21] Sim, W.J. and Kwak, B.M., 1988. Linear viscoelastic analysis in time domain by boundary element method. *Computers & structures*, 29(4), pp.531-539.
- [22] Syngellakis, S., 2003. Boundary element methods for polymer analysis. *Engineering analysis with boundary elements*, 27(2), pp.125-135.
- [23] Anacleto, F.E.S., de Oliveira Ribeiro, G., and Ribeiro, T.S.A., 2009. Application of the boundary element method to viscoelastic and viscoplastic analysis. in *Proc., 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.
- [24] Fareed, M. and Ashrafi, H., 2010. A general boundary element formulation for the analysis of viscoelastic problems. *International Journal of Engineering*, 23(2), pp.153-168.
- [25] Lee, S., 1995. Boundary element analysis of linear viscoelastic problems using realistic relaxation functions. *Computers & structures*, 55(6), pp.1027-1036.
- [26] Mesquita, A.D. and Coda, H.B., 2003. A simple Kelvin and Boltzmann viscoelastic analysis of three-dimensional solids by the boundary element method. *Engineering analysis with boundary elements*, 27(9), pp.885-895.
- [27] Sensale, B., Partridge, P., and Creus, G., 1970. The dual reciprocity boundary element method in viscoelasticity. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 14.
- [28] Sensale, B., Partridge, P., and Creus, G., 2001. General boundary elements solution for ageing viscoelastic structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(6), pp.1455-1468.
- [29] Chen, Y. and Hwu, C., 2011. Boundary element analysis for viscoelastic solids containing interfaces/holes/cracks/inclusions. *Engineering analysis with boundary elements*, 35(8), pp.1010-1018.
- [30] Lee, S.S., Sohn, Y.S., and Park, S.H., 1994. On fundamental solutions in time-domain boundary element analysis of linear viscoelasticity. *Engineering analysis with boundary elements*, 13(3), pp.211-217.
- [31] Zhu, X. and et al., 2011. A fast multipole boundary element method for 2D viscoelastic problems. *Engineering analysis with boundary elements*, 35(2), pp.170-178.
- [32] Igumnov, L. and Markov, I., 2016. Boundary-element modeling of three-dimensional anisotropic viscoelastic solids. in *Advanced materials: Manufacturing, physics, mechanics and applications*. Springer.
- [33] Bahrampour, M., Hamzeh Javaran, S., and Shojaee, S., 2018. New insight into viscoelastic finite element modeling of time-dependent material creep problems using spherical Hankel element framework. *International Journal of Applied Mechanics*, 10(08), pp.1850085.
- [34] Javaran, S.H., Khaji, N., and Noorzad, A., 2011. First kind Bessel function (J-Bessel) as radial basis function for plane dynamic analysis using dual reciprocity boundary element method. *Acta mechanica*, 218(3), pp.247-258.
- [35] Hamzehei-Javaran, S., 2018. Approximation of the state variables of Navier's differential equation in transient dynamic problems using finite element method based on complex Fourier shape functions. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(4), pp.431-450.
- [36] Hamzehei-Javaran, S. and Khaji, N., 2018. Complex Fourier element shape functions for analysis of 2D static and transient dynamic problems using dual reciprocity boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 95, pp.222-237.
- [37] Izadpanah, E., Shojaee, S., and Hamzehei-Javaran, S., 2018. A time-dependent discontinuous Galerkin finite element approach in two-dimensional elastodynamic problems based on spherical Hankel element framework. *Acta Mechanica*, 229, pp.4977-4994.
- [38] Hamzehei-Javaran, S. and Khaji, N., 2014. Dynamic analysis of plane elasticity with new complex Fourier radial basis functions in the dual reciprocity boundary element method. *Applied Mathematical Modelling*, 38(14), pp.3641-3651.
- [39] Khaji, N. and Hamzehei-Javaran, S., 2013. New complex Fourier shape functions for the analysis of two-dimensional potential problems using boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37(2), pp.260-272.
- [40] Mohammadi Nia, M., Shojaee, S., and Hamzehei-Javaran, S., 2020. Utilizing new spherical Hankel shape functions to reformulate the deflection, free vibration, and buckling analysis of Mindlin plates based on finite element method. *Scientia Iranica*, 27(5), pp.2209-2229.
- [41] Mordouei, F., Shojaee, S., and Hamzehei-Javaran, S., 2019. Development of Novel Spherical Hankel Shape and Radial Basis Functions in Structural Topology Optimization by Level Set Method. *Modares Civil Engineering journal*, 19(2), pp.183-196.
- [42] Mai-Duy, N. and Tran-Cong, T., 2001. Numerical solution of differential equations using multiquadric radial basis function networks. *Neural networks*, 14(2), pp.185-199.
- [43] Shu, C., Ding, H., and Yeo, K., 2003. Local radial basis function-based differential quadrature method and its application to solve two-dimensional incompressible Navier-Stokes equations. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 192(7-8), pp.941-954.

- [44] Aziz, I. and Khan, W., 2012. Numerical integration of multi-dimensional highly oscillatory, gentle oscillatory and non-oscillatory integrands based on wavelets and radial basis functions. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 36(8), pp.1284-1295.
- [45] Bahrapour, M., Hamzehei-Javaran, S., and Shojaee, S., 2020. Spherical Hankel-Based Creep Analysis of Time-Dependent Materials Using Boundary-Element Theories. *Journal of Engineering Mechanics*, 146(6), p. 04020050.
- [46] Farmani, S., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., and Hamzehei-Javaran, S., 2019. Increasing the solution accuracy in the numerical modeling of boundary value problems using finite element method based on Hankel shape functions. *International Journal of Applied Mechanics*, 11(07), p.1950062.
- [47] Farmani, S., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., and Hamzehei-Javaran, S., 2019. Developing new numerical modeling for sloshing behavior in two-dimensional tanks based on nonlinear finite-element method. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(12): p.04019107.
- [48] Farmani, S., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., and Javaran, S.H., 2018. The improvement of numerical modeling in the solution of incompressible viscous flow problems using finite element method based on spherical Hankel shape functions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 87(2), pp.70-89.
- [49] Fornberg, B., Larsson, E., and Wright, G., 2006. A new class of oscillatory radial basis functions. *Computers & Mathematics with Applications*, 51(8), p.1209-1222.
- [50] Hamzehei Javaran, S. and Shojaee, S., 2017. The solution of elastostatic and dynamic problems using the boundary element method based on spherical Hankel element framework. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 112(13), pp.2067-2086.
- [51] Hamzehei-Javaran, S. and Shojaee, S., 2018. Improvement of numerical modeling in the solution of static and transient dynamic problems using finite element method based on spherical Hankel shape functions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 115(10), pp.1241-1265.
- [52] Izadpanah, E., Shojaee, S., and Hamzehei-Javaran, S., 2018. Time-discontinuous finite element analysis of two-dimensional elastodynamic problems using complex Fourier shape functions. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 4(Special Issue: Applied and Computational Issues in Structural Engineering), p.442-456.
- [53] Hamzehei-Javaran, S., Khaji, N., and Moharrami, H., 2011. A dual reciprocity BEM approach using new Fourier radial basis functions applied to 2D elastodynamic transient analysis. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35(1), pp.85-95.
- [54] Malekzadeh, M., Hamzehei-Javaran, S., and Shojaee, S., 2019. Novel insight into high-order numerical manifold method using complex Fourier element shape functions in statics and dynamics. *International Journal of Applied Mechanics*, 11(06), pp.1950058.
- [55] Power, H. and Barraco, V., 2002. A comparison analysis between unsymmetric and symmetric radial basis function collocation methods for the numerical solution of partial differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 43(3-5), pp.551-583.
- [56] Ali, A. and Rajakumar, C., 2004. The boundary element method: Applications in sound and vibration. *Crc Press*.
- [57] Samaan, M.F. and Rashed, Y.F., 2007. BEM for transient 2D elastodynamics using multiquadric functions. *International Journal of Solids and Structures*, 44(25-26), pp.8517-8531.
- [58] Wang, J. and Liu, G., 2002. On the optimal shape parameters of radial basis functions used for 2-D meshless methods. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191(23-24), pp.2611-2630.

پیوست الف - مشتقات متوالی توابع شکل پیشنهادی

برای یک المان مختلط فوریه سه گرهی برآورد مشتقات متوالی از عبارات ذیل توسط یک عملیات جبری به دست می آیند:

$$\phi_1'(\xi) = \frac{1}{2}(-1 + k'(\xi)) \quad (26)$$

$$n = 2, 3, \dots$$

$$\phi_1^{(n)}(\xi) = \frac{1}{2}k^{(n)}(\xi)$$

$$n = 1, 2, \dots \quad (27)$$

$$\phi_2^{(n)}(\xi) = -k^{(n)}(\xi)$$

$$\phi_3'(\xi) = \frac{1}{2}(1 + k'(\xi)) \quad (28)$$

$$n = 2, 3, \dots$$

$$\phi_3^{(n)}(\xi) = \frac{1}{2}k^{(n)}(\xi)$$

جالب آن که به دلیل خواص توابع نمایشی حقیقی مختلط، می توان یک رابطه بازگشتی میان مشتقات $k(\xi)$ برقرار کرد که در زیر آمده است:

$$k^{(n)}(\xi) = -\omega^2 k^{(n-2)}(\xi) \quad (29)$$

به طور مثال، تا چهارمین مشتق $k(\xi)$ در زیر ارائه شده است:

(۳۰)

به ذکر می‌باشد که C_{ij} ضریب هندسی است که مقدار آن برای گره

روی مرز برابر با $\frac{1}{2}\delta_{ij}$ می‌باشد.

ب-۲- گسسته‌سازی مرز و تشکیل ماتریس‌های BEM

مرز دامنه به المان‌های مرزی تقسیم شده و انتگرال‌گیری روی هر جزء انجام شده است. برای هر گره میدان و هر المان مرزی، مقادیر T_{ij} و U_{ij} محاسبه و انتگرال‌گیری عددی (گوس کوادراچر) انجام می‌شود. خروجی این مرحله، به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$\{t\} \cdot [G] = \{u\} \cdot [H] \quad (32)$$

که در این رابطه ماتریس‌های اساسی

$$H_{ij} = \int_{\Gamma_j} T_{ij}(x_i, y) d\Gamma(y)$$

است که از انتگرال‌گیری عددی عناصر حاصل از حل اساسی جابجایی تشکیل می‌شود. این ماتریس نشان‌دهنده تأثیر تنش سطحی روی مرز بر جابجایی در نقطه میدان است بعلاوه،

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} U_{ij}(x_i, y) d\Gamma(y)$$

که از انتگرال‌گیری حل اساسی تنش سطحی در مرز به دست می‌آید. این ماتریس نمایانگر تأثیر جابجایی روی مرز در تولید تنش سطحی در نقطه میدان می‌باشد.

$$\begin{aligned} (e^{2i\omega} - 4e^{i\omega} + 3)k'(\xi) &= i\omega[e^{i\omega(1+\xi)} - 2(H(\xi) - H(-\xi))e^{i\omega|\xi|} - e^{i\omega(1-\xi)}], \\ (e^{2i\omega} - 4e^{i\omega} + 3)k''(\xi) &= -\omega^2[e^{i\omega(1+\xi)} - 2(H(\xi) + H(-\xi))e^{i\omega|\xi|} + e^{i\omega(1-\xi)}], \\ (e^{2i\omega} - 4e^{i\omega} + 3)k'''(\xi) &= -i\omega^3[e^{i\omega(1+\xi)} - 2(H(\xi) - H(-\xi))e^{i\omega|\xi|} - e^{i\omega(1-\xi)}], \\ (e^{2i\omega} - 4e^{i\omega} + 3)k^{(4)}(\xi) &= \omega^4[e^{i\omega(1+\xi)} - 2(H(\xi) + H(-\xi))e^{i\omega|\xi|} + e^{i\omega(1-\xi)}], \end{aligned}$$

که در آن $H(\xi)$ بیانگر تابع هوی ساید می‌باشد.

پیوست ب- ساختار جواب‌های اساسی در روش اجزای مرزی

روش اجزای مرزی بر پایه‌ی معادلات انتگرال مرزی بنا شده که در آن از جواب‌های اساسی معادلات الاستیسیته به عنوان هسته‌های انتگرال استفاده می‌شود. این توابع پایه، پاسخ تحلیلی محیط پیوسته بی‌نهایت به بارگذاری متمرکز هستند.

ب-۱- معادله انتگرال مرزی الاستیسیته خطی

معادله‌ی انتگرال مرزی برای یک محیط دوبعدی الاستیک خطی ایزوتروپ به صورت زیر است:

$$\int_{\Gamma} U_{ij}(x, y) t_j(y) d\Gamma(y) = \quad (31)$$

$$\int_{\Gamma} T_{ij}(x, y) u_j(y) d\Gamma(y) + c_{ij}(x) u_j(x)$$

که در آن x نقطه میدان، y نقطه منبع (محل اعمال بار متمرکز) و u_j مؤلفه‌ی جابه‌جایی می‌باشد. همچنین، t_j نشان‌دهنده‌ی مؤلفه‌ی تنش سطحی، $(t_j = n_{jk} \sigma_k)$ ، T_{ij} جواب اساسی جابه‌جایی و U_{ij} جواب اساسی تنش سطحی است. لازم

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Bahrampour, M. and Hamzehei-Javaran, S., 2026. Solving Viscoelastic Problems Using Complex Fourier Boundary Element Method. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.65-77.



Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete

H. Nasaj Moghadam¹, F. Jandaghi Alaei^{2*} 

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

The corrosion of steel reinforcement is a major challenge for concrete structures in marine environments, reducing their durability and structural integrity. In such aggressive conditions, chloride ions penetrate the concrete cover and initiate the corrosion of embedded steel bars, leading to surface cracking and loss of bond strength over time. While steel fibers are commonly used in Fiber Reinforced Concrete (FRC), their susceptibility to corrosion and pitting has led researchers to explore non-metallic alternatives. Basalt fiber, a non-metallic material, offers numerous advantages, including high tensile strength, non-toxicity, and excellent resistance to acidic and corrosive environments. In recent years, the global trend toward sustainable and high-durability construction materials has further increased the attention given to basalt fibers, particularly in infrastructures located in coastal or offshore regions. This study investigates the mechanical and durability properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) with twisted basalt fibers at different volume fractions. Four mixtures containing 0%, 0.5%, 1%, and 1.8% fiber content were prepared and compared to Normal Concrete (NC). Mechanical properties, including compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of rupture (MOR), were assessed. The results indicated that compressive strength marginally increased from 48.4 MPa for NC to 51.3 MPa for BFRC-1.8, representing a 6% improvement attributed to the crack-bridging action of the fibers. More notable were the enhancements in splitting tensile strength, which increased from 2.8 MPa in NC to 4.1 MPa in BFRC-1.8, reflecting a 46% gain. The incorporation of twisted basalt fibers also shifted the failure mode from brittle to ductile, enabling the concrete to absorb and dissipate more energy before failure. Flexural performance, measured via MOR, improved by 15%, 40%, and 81% for fiber additions of 0.5%, 1%, and 1.8%, respectively, with corresponding increases in toughness values reaching up to 364%. These results demonstrate the superior energy absorption and resilience of BFRC under loading. Durability properties, including water penetration depth, electrical resistivity, and performance under accelerated corrosion testing, were also evaluated. Durability assessments showed marked improvements with increased fiber content. Water penetration depth decreased substantially (by 18–53%), confirming the ability of fibers to reduce porosity and fill microcracks, thereby protecting internal steel from ion ingress. Electrical resistivity tests revealed that greater fiber content produced higher electrical resistance, further impeding the initiation and progression of corrosion. Results from accelerated corrosion testing demonstrated that twisted basalt fibers are highly effective in mitigating steel rebar corrosion. Corrosion rates were substantially reduced from 0.55 mm/year in NC to 0.25, 0.16, and 0.09 mm/year for BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8, respectively. Similarly, rebar weight loss decreased from 49.9% in NC to 22.7%, 14.1%, and 8.6% in the respective BFRC mixtures. The time to the first visible crack caused by corrosion was delayed, increasing from 55 days in NC to 74 days in BFRC-1.8. These findings indicate that twisted basalt fibers effectively impede the passage of aggressive ions, markedly improving the durability of reinforced concrete in severe environments. In summary, incorporating twisted basalt fibers into concrete blends offers measurable benefits in both mechanical and durability properties, with a pronounced effect in suppressing steel reinforcement corrosion, making BFRC a highly promising, sustainable material for marine infrastructure.

Review History

Received: Mar 15, 2025

Revised: Aug 11, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC)
Twisted Basalt Fiber
Crack, Corrosion
Durability
Mechanical properties

* Corresponding Author Email: fjalaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5236-4445



بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن مسلح شده با الیاف بازالتی تاییده

حسام الدین نساج مقدم^۱، فرشید جندقی علانی^{۲*} 

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

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

چکیده

تاریخچه داوری

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها برای سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی، خوردگی آرماتورهای فولادی است. خوردگی موجب کاهش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌شود. الیاف فولادی یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین الیاف در بتن الیافی است. معایبی همچون خوردگی الیاف فولادی و وقوع خوردگی تشدید شده در محل تماس الیاف فولادی با آرماتورها منجر به این موضوع شده که پژوهشگران به استفاده از الیاف غیر فلزی روی آورند. الیاف بازالتی نوعی از الیاف غیر فلزی می‌باشند که مزایای فراوانی از جمله غیرسمی بودن، مقاومت کششی بالا و مقاومت در برابر محیط‌های اسیدی را دارند. این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی و دوام چهار ترکیب بتن الیافی بازالتی تاییده پرداخته است. در این پژوهش چهار طرح اختلاط با مقادیر مختلف ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد از الیاف بازالتی تاییده ساخته شده است. در ادامه پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و خوردگی تسریع شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش حجم الیاف بازالتی تاییده در ماتریس بتنی، هر دو پارامتر مدول گسیختگی و مقاومت کششی بهبود می‌یابند. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف تا ۱/۸ درصد، تنها ۶ درصد افزایش در مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش‌های دوام نشان می‌دهند که الیاف بازالتی تاییده به خوبی با ماتریس بتنی ترکیب شده و عملکرد پل‌زنی آن‌ها به طور مؤثری ترک‌ها را مهار می‌کند. به همین دلیل، تعداد حفره‌ها و ریزترک‌ها در بتن الیافی بازالتی نسبت به بتن معمولی کاهش یافته و در نتیجه، دوام بتن‌های الیافی بازالتی تاییده در محیط‌های خورنده به مراتب بیشتر از بتن‌های معمولی می‌باشد.

کلمات کلیدی

الیاف بازالتی تاییده

بتن الیافی بازالتی

ترک

خوردگی

دوام

ویژگی‌های مکانیکی

۱- مقدمه

می‌شود [2-4]. وجود حفرات و ریزترک‌های^۱ موجود در بتن باعث می‌شود که بتن قادر به انتقال تنش‌های کششی زیادی نباشد. بنابراین، با افزایش تنش، رشد ترک‌ها و شکست در بتن رخ می‌دهد [5]. از این رو، ضروری است تا ضعف مقاومت کششی در بتن جبران شود [6].

در سال‌های اخیر، یکی از مهم‌ترین مسائل برای پژوهشگران و مهندسان، افزایش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی از طریق بهبود ترکیب ساختاری آن‌ها بوده است [1]. بتن به عنوان یک ماده ترد و شکننده با مقاومت فشاری بالا و مقاومت کششی پایین شناخته

¹ Micro cracks

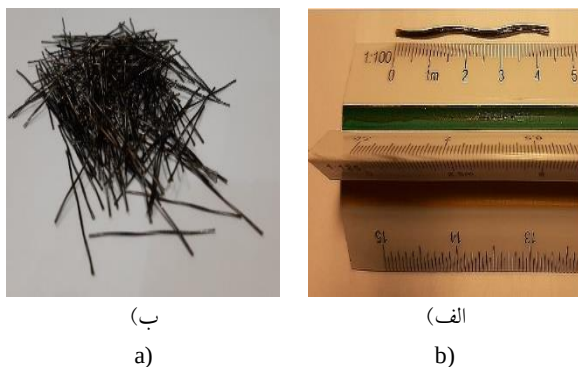
یکی از روش‌های رایج برای کاهش تنش‌های کششی در بتن، استفاده از آرماتورهای تقویتی است. اضافه کردن الیاف به بتن یکی دیگر از راهکارهای مناسب برای افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن می‌باشد [8, 7]. با افزودن الیاف به ماتریس بتنی، می‌توان شکل‌پذیری بتن و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی^۱ و طاق^۲ بتن را بهبود بخشید. انتخاب نوع الیاف در ماتریس بتنی مسأله مهم و ضروری است که باید توسط مهندسان و طراحان در نظر گرفته شود.

امروزه مطالعات متعددی توسط پژوهشگران به منظور بررسی تأثیر استفاده از الیاف بر رفتار ماتریس‌های بتنی انجام شده است [9, 10]. خواص مکانیکی الیاف، هندسه، توزیع، جهت‌گیری و مقدار الیاف مصرفی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌هایی هستند که برای الیاف در نظر گرفته می‌شوند [11]. از سوی دیگر، ویژگی‌هایی مانند مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و کرنش نهایی الیاف بر رفتار بتن الیافی تأثیر می‌گذارند. الیاف با مدول الاستیسیته بالا، مقاومت بتن در برابر گسیختگی و ضربه را افزایش می‌دهند. از طرفی، الیاف با مدول الاستیسیته پایین، طاق و مقاومت در برابر ترک‌های اولیه در بتن را بهبود می‌بخشند. از دیگر ویژگی‌های مهم الیاف، هندسه الیاف مانند طول، قطر، نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر) و شکل مقطع آن‌ها می‌باشند. با توجه به تحقیقات انجام شده، الیاف با طول بیشتر، در کنترل ترک‌ها می‌توانند بهتر عمل کنند و همچنین با افزایش نسبت ابعادی (طول به قطر الیاف)، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد [12]. توجه به این نکته ضروری است که افزایش نسبت ابعادی (طول به قطر الیاف) منجر به افزایش احتمال تجمع الیاف و مشکلات کارایی مخلوط بتنی می‌شود. لازم به توضیح است که برای کنترل و کاهش جمع‌شدگی پلاستیکی، گسترش ترک‌ها و عرض ترک‌ها، معمولاً از حجم‌های کم الیاف (<۱٪) استفاده می‌شود. از سوی دیگر، برای افزایش طاق و کنترل ترک‌ها در اعضای ساخته شده با بتن‌های الیافی درجاریز یا پیش‌ساخته، معمولاً حجم‌های متوسط الیاف (۲-۱ درصد) به‌کار گرفته می‌شوند [13, 14]. همچنین برای بهبود ظرفیت طاق ماتریس بتنی، شکل‌پذیری و انرژی شکست، از مقادیر بالای الیاف (>۲٪) در سازه‌ها استفاده می‌شود [15].

الیاف در سه گروه فلزی، معدنی و آلی طبقه‌بندی می‌شوند. امروزه بتن‌های الیافی از دو نوع الیاف فلزی و غیرفلزی ساخته می‌شوند. برای ساخت بتن الیافی غیرفلزی، معمولاً از الیافی مانند پلی‌پروپیلن^۳، کربن، شیشه و مواد مشابه استفاده می‌شود [16, 17]. استفاده از الیاف فولادی در ساخت بتن‌های الیافی مزایای زیادی از جمله قیمت مناسب آن‌ها در مقایسه با سایر الیاف، در دسترس بودن، پلاستیسیته مناسب، مقاومت کششی بالا و مدول الاستیسیته مناسب را دارد [10]. یکی از معایب اساسی الیاف فولادی، مشکل خوردگی این الیاف در ماتریس بتنی می‌باشد. به این صورت که در طول عملیات پل‌زنی^۴ الیاف در بین وجوه ترک‌ها، الیاف فولادی در معرض نفوذ یون‌های خورنده قرار گرفته و دچار خوردگی می‌شوند. علاوه بر این، الیاف فولادی داخل بتن نیز دچار خوردگی شده و آثار زنگ‌زدگی این خوردگی روی سطوح اجزای بتنی قابل مشاهده می‌باشد. یکی دیگر از معایب استفاده از الیاف فولادی، خوردگی تشدید شده^۵ در محل تلاقی الیاف فولادی با آرماتورهای تقویتی می‌باشد. از این رو، خوردگی عمومی به وجود آمده روی سطح آرماتورها و همچنین خوردگی تشدید شده، منجر به کاهش سطح مقطع میلگردها، تمرکز تنش و کاهش ظرفیت باربری بتن مسلح می‌شود.

الیاف بازالتی، از ماده طبیعی ساخته شده که به گروه الیاف غیرآلی تعلق دارند. این الیاف مزایای زیادی از جمله مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت عالی در برابر دماهای بالا، عدم خوردگی، وزن سبک، هزینه مقرون به صرفه و سازگاری با محیط زیست را دارا می‌باشند [18]. امروزه، بسیاری از سازه‌های بتنی به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی خورنده، به دلیل وجود یون‌های کلرید از خوردگی آرماتورها و آسیب‌دیدگی رنج می‌برند [19]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به بررسی نوع جدیدی از الیاف ماکرو بازالت^۶ به نام الیاف بازالتی تاییده^۷ پرداخته‌اند. این نوع الیاف مانند میله‌های پلیمری کوچک درون بتن عمل می‌کنند. الیاف بازالتی تاییده نسبت به الیاف فولادی باعث خوردگی تشدید شده یا کاهش سطح مقطع میلگردها نمی‌شوند.

³ Polypropylene⁴ Bridging action⁵ Pitting corrosion⁶ Macro basalt⁷ Twisted basalt fiber¹ Modulus of rupture² Toughness



شکل ۱. تصویر ظاهری و طول الیاف بازالتی تابیده: الف) طول الیاف بازالتی تابیده، شکل ظاهری الیاف

Fig. 1. Geometry and size of twisted basalt fibers: a) Twisted basalt fiber; b) Length of twisted basalt fiber

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

بتن مورد آزمایش در این پژوهش با استفاده از سیمان پرتلند نوع II اساوہ با وزن مخصوص ۳/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، آب، شن، ماسه، ماسه ریزدانه کوارتز (S200)، پودر کوارتز (S400)، میکروسیلیس کارخانه فروآلیاژ کاویان، الیاف بازالتی تابیده و فوق روان کننده‌های (SMF)^۵ و (SNF)^۶ ساخته شده است. مصالح ریزدانه از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳/۷ تشکیل شده است، در حالی که مصالح درشت‌دانه شامل سنگریزه طبیعی خرد شده با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر وزن مخصوص برای شن و ماسه به ترتیب ۲/۲۲ و ۲/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است. جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و شکل (۱) شکل ظاهری الیاف بازالتی تابیده را نشان می‌دهد.

۲-۲- طرح اختلاط

جدول (۲) طرح اختلاط بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده را نشان می‌دهد. برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام BFRCها، سه نوع طرح اختلاط با مقادیر مختلف الیاف بازالتی تابیده ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد در این مطالعه در نظر گرفته شده است. تمام مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن با استفاده از میکسری با ظرفیت ۰/۱ مترمکعب مخلوط شده است. برای کلیه طرح اختلاط‌های BFRC و NC نسبت آب به مجموع سیمان و میکروسیلیس $(\frac{W}{C+M})$ و نسبت میکروسیلیس به سیمان $(\frac{M}{C})$ به

مقطع تابیده این الیاف باعث می‌شود که انرژی زیادی در هنگام فرآیند بیرون کشیدن آن‌ها از ماتریس بتنی مستهلک شود، که منجر به بهبود استحکام و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی می‌شود. بنابراین، مطالعه و تحقیق در مورد ارزش عملی و عملکرد الیاف بازالتی تابیده در سازه‌های بتنی ضروری است.

امروزه بسیاری از محققان در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن الیافی بازالتی تحقیق کرده‌اند [20, 21]. براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، پژوهشگران بیان داشتند که درصد مناسب الیاف بازالتی خرد شده برای عملکرد بهینه در بتن، در محدوده ۰/۳-۰/۵ درصد قرار دارد [22;23]. از طرف دیگر، پژوهشگران بیان کرده‌اند که استفاده از الیاف بازالتی تابیده تا ۴ درصد حجمی مفید است [24].

با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص می‌شود که افزودن الیاف بازالتی به ماتریس بتنی، بهبود اندکی را بر نتایج مقاومت فشاری به همراه دارد [25, 26]. از طرف دیگر، مطالعات نشان می‌دهند که الیاف بازالتی باعث تغییر شکست فشاری از حالت شکننده^۱ به حالت شکل‌پذیر^۲ می‌شوند [23]. استفاده از الیاف بازالتی در ماتریس بتنی باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود [26]. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که الیاف بازالتی می‌توانند به طور قابل توجهی مدول گسیختگی را افزایش و عملکرد بتن را پس از ترک‌خوردگی بهبود بخشند [23, 26]. یکی از مزایای استفاده از الیاف، انجام عملیات پل‌زنی روی وجوه ترک‌ها و جلوگیری و یا کنترل گسترش ترک‌ها در ماتریس بتنی می‌باشد. بسیاری از پژوهشگران خواص دوام بتن الیافی بازالتی از جمله جذب آب [27]، نفوذ یون کلرید [28]، مقاومت الکتریکی [27] و نفوذ آب [29] را مطالعه کرده‌اند.

هدف اصلی از این پژوهش آزمایشگاهی، بررسی و ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی (NC)^۳ و بتن الیافی بازالتی (BFRC)^۴ است. نوآوری این تحقیق در بهره‌گیری از الیاف بازالتی تابیده در سه درصد حجمی مختلف (۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد) و تحلیل تطبیقی تأثیر این مقادیر بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن تعریف می‌شود.

¹ Brittle

² Ductile

³ Normal concrete

⁴ Basalt fiber reinforced concrete

⁵ Sulfonate Melamine Formaldehyde

⁶ Sulfonate Naphthalene Formaldehyde

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف بازالتی تابیده

Table 1. Physical and mechanical properties of twisted basalt fiber

Sample	Length (mm)	Aspect Ratio (L/d)	Density (gr/m ³)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Number of fiber per Kg
Twisted basalt fiber	43	61	2.1	1000	44	27400

جدول ۲. ترکیب بکار رفته برای ساخت بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)

Table 2. Mix proportions of concrete (kg/m³)

Specimen	Cement	Water	Sand	Gravel	S200	S400	Microsilica	SMF	SNF	Fiber
NC	424	208	1066	458	130	43.5	43	7.5	-	-
BFRC-0.5	424	208	1066	458	130	43.5	43	9	1.2	10.5
BFRC-1.0	424	208	1066	458	130	43.5	43	10.55	2.4	21
BFRC-1.8	424	208	1066	458	130	43.5	43	13	4.3	38

است. این آزمایش با استفاده از دستگاه جک فشاری با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و نرخ بارگذاری ۱ کیلونیوتن در ثانیه انجام شده است. متوسط مقاومت کششی سه استوانه به عنوان مقاومت کششی هر طرح اختلاط در نظر گرفته شده است. برای انجام این آزمایش، آزمونه‌ها به‌طور افقی زیر جک قرار گرفته و به منظور توزیع یکنواخت تنش، دو تخته چوبی با عرض و طول تقریبی ۲۵ و ۳۴۰ میلی‌متر در بالا و پایین آزمونه‌ها قرار داده شده است.

۲-۳-۳- مدول گسیختگی

آزمایش مدول گسیختگی در سن ۲۸ روزگی طبق استاندارد ASTM C1609/C1609M-07 [33] انجام شده است. برای هر دو نوع بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده، یک تیر با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر تهیه و تحت آزمایش با نرخ کنترل جابه‌جایی ۰٫۱ میلی‌متر در دقیقه قرار گرفته شده است. این روش آزمایش (آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای) رفتار BFRC‌ها و NC را تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای مقایسه کرده و از این طریق مقدار طاقت از طریق منحنی بار-انحراف به دست آورده شده است.

۲-۳-۴- عمق نفوذ آب

برای آزمایش نفوذ آب، سه آزمونه به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شده است. پس از ۲۸ روز، آزمونه‌ها به مدت ۳ روز در کوره قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. پس از خنک شدن آزمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد، تحت فشار آب به مدت ۷۲ ساعت با فشار ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفته شده است. در ادامه، برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب، استوانه‌ها از وسط با استفاده از جک فشاری به دو قسمت شکسته شده است. برای محاسبه نفوذ آب، میانگین سه مقدار حداکثر ثبت شده اندازه‌گیری شده است.

ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در کلیه طرح‌های اختلاط، مقدار استفاده شده از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در ترکیب یکسان می‌باشد. لازم به توضیح است که با افزایش مقدار الیاف، خواص مکانیکی بتن بهبود می‌یابد، اما در عین حال کارایی آن کاهش می‌یابد. مطابق نتایج سایر محققان مشخص می‌شود که با افزایش مقدار الیاف میزان کارایی بتن کاهش می‌یابد [30]. در این پژوهش، با هدف دستیابی به سلامتی یکنواخت در حدود 120 ± 5 میلی‌متر برای کلیه طرح‌های اختلاط، از دو نوع فوق‌روان‌کننده بر پایه نفتالین (SNF) و ملامین (SMF) استفاده شده است.

۲-۳-۳- آزمایش‌های آزمایشگاهی

۲-۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-116:1983 [31] با استفاده از آزمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری به دست آمده است. این آزمایش با استفاده از دستگاه جک هیدرولیک مقاومت فشاری با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن و نرخ بارگذاری ۰/۳N/(mm².s) برای آزمونه‌های ساخته شده انجام شده است. برای انجام این آزمایش، سه آزمونه برای هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین آزمونه‌ها برای بیان مقاومت فشاری استفاده شده است.

۲-۳-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی برزلی روی آزمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از استاندارد ASTM C 496/C 496M-04 [32] صورت پذیرفته است. سه آزمونه استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر برای هر طرح اختلاط تهیه و پس از ۲۸ روز تحت آزمایش قرار گرفته شده

اجرای آزمایش خوردگی تسریع شده بر نمونه‌های دارای الیاف بازالتی تابیده ضروری می‌باشد. هدف این آزمایش، بررسی سرعت شروع و پیشرفت خوردگی میلگرد، نرخ افت وزن، نرخ خوردگی و تأثیر حضور الیاف بازالتی تابیده بر محافظت آرماتور در محیطی مهاجم است. انجام این آزمایش بر اساس الگوبرداری از مطالعات گذشته انجام شده است [35]. در شکل (۲) نمایی شماتیک از انجام آزمایش خوردگی تسریع شده نشان داده شده است. سیستم خوردگی تسریع شده شامل یک سطل پلاستیکی به همراه شبکه فلزی در سطل و یک منبع تغذیه ۱۲ ولتی DC می‌باشد. قطب مثبت منبع تغذیه به بالای میلگرد هر نمونه و قطب منفی به شبکه فلزی واقع در سطل متصل شده است.

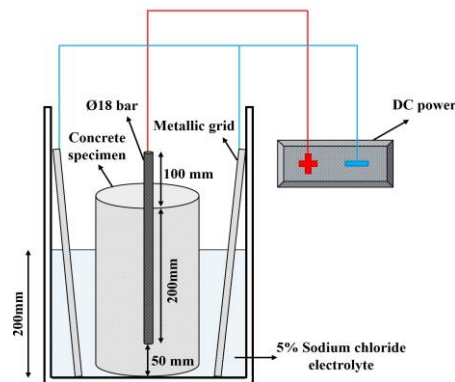
۳- بحث در خصوص نتایج آزمایشات

نتایج آزمایش‌های انجام شده، شامل آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، پاسخ نیرو-جابجایی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و خوردگی تسریع شده برای هر دو نوع بتن معمولی و بتن الیافی بازالتی تابیده در این بخش ارائه و مورد بحث قرار گرفته شده است.

۳-۱- ویژگی‌های مکانیکی

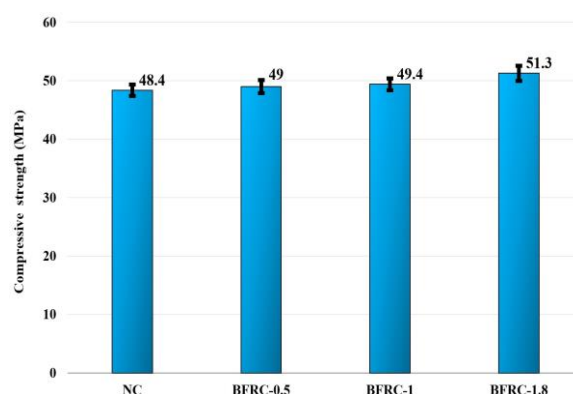
۳-۱-۱- مقاومت فشاری

شکل (۳) نشان‌دهنده مقاومت فشاری NC و BFRC با درصدهای مختلف الیاف بازالتی تابیده است. با توجه به شکل (۳)، افزایش مقدار الیاف بازالتی تابیده در NC تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نداشته است. با توجه به شکل (۳) مشخص می‌شود که مقاومت فشاری برای NC و BFRC-1.8 به ترتیب ۴۸/۴ و ۵۱/۳ مگاپاسکال است. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به NC، مقاومت فشاری به ترتیب ۱/۲، ۲/۱ و ۶ درصد افزایش یافته است. همان‌طور که مشخص است الیاف بازالتی تابیده تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نداشته است. از سوی دیگر، افزایش جزئی مقاومت فشاری مشاهده شده، به نقش الیاف در بهبود اثر پواسن^۱ در ماتریس بتنی و حفظ یکپارچگی بتن مرتبط می‌باشد. دلیل دیگر افزایش مقاومت فشاری در ماتریس بتنی، عمل پل زدن الیاف در بین وجوه ریزترک‌ها در



شکل ۲. نمایی شماتیک از آزمایش خوردگی تسریع شده

Fig. 2. Schematic representation of the accelerated corrosion test setup



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های NC و BFRC

Fig. 3. Compressive strength test results for NC and BFRCs

۲-۳-۵- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بتن برای بررسی نفوذ یون‌های کلریدی به بتن انجام می‌شود. این آزمایش غیر مخرب، طبق استاندارد AASHTO T 358-15 [34] انجام شده است. در این آزمایش، مقاومت بتن اشباع شده در برابر نفوذ یون‌های کلرید اندازه‌گیری می‌شود. سه نمونه استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر برای تعیین مقاومت الکتریکی در ۲۸ روز برای هر دو نوع NC و BFRC با استفاده از پروب چهارپینی و نر مورد آزمایش قرار گرفته شده است.

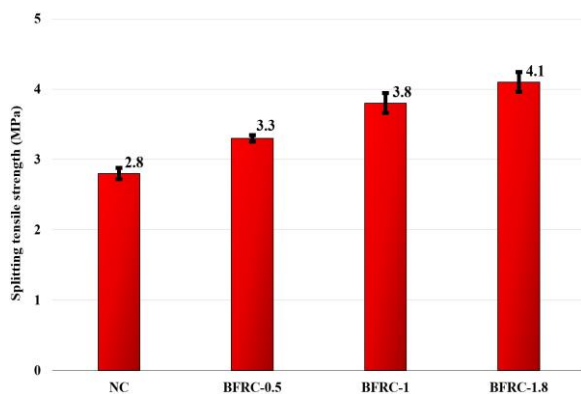
۲-۳-۶- خوردگی تسریع شده

خوردگی آرماتور در بتن یکی از اساسی‌ترین معضلات دوام سازه‌های بتن مسلح است که در مناطق مرطوب، دریایی، یا مواجهه با یون کلر اهمیت دوچندان می‌یابد.

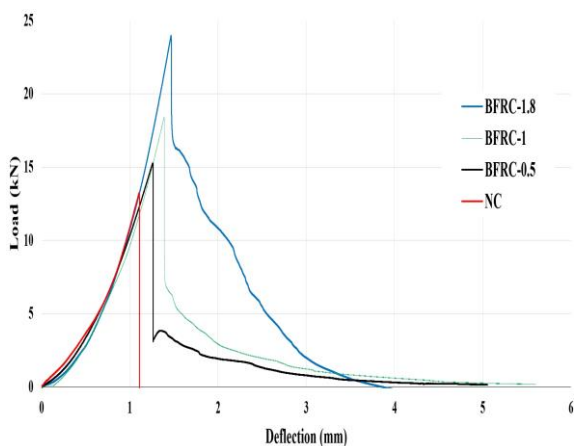
با توجه به ارتقای دوام بتن با استفاده از الیاف بازالتی تابیده و نیاز به ارزیابی اثر این الیاف بر مقاومت سازه در برابر خوردگی،

¹ Poisson's ratio

بازالتی تابیده تأثیر متفاوتی بر طاق NC داشتند و آزمون-BFRC 1.8 نسبت به سایر بتن‌ها استحکام و طاق بالاتری را نشان داده است. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، مقادیر طاق به ترتیب ۱۷۳، ۱۰۹ و ۳۶۴ درصد نسبت به آزمون NC بهبود پیدا کرده است. با توجه به آزمایش انجام شده مشاهده می‌شود که الیاف بازالتی تابیده عرض ترک‌ها را متوقف و از گسترش ترک‌ها در ماتریس بتن جلوگیری کرده است. در نتیجه، حالت شکست در BFRC‌ها نسبت به NC از شکننده به انعطاف‌پذیر تغییر پیدا کرده است. دلیل این تغییر حالت، اثر پل زنی الیاف در BFRC‌ها است، جایی که الیاف بازالتی تابیده، رشد ترک‌ها را متوقف کرده و تنش‌ها را در دو طرف ترک‌ها تحمل می‌کنند. نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان می‌دهند که با افزودن انواع مختلف الیاف به ماتریس بتنی، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد [37, 38].



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های NC و BFRC
Fig. 4. Splitting tensile strength test results for NC and BFRCs



شکل ۵. نتایج آزمایش مدول گسیختگی برای آزمون‌های NC و BFRC
Fig. 5. MOR test results for NC and BFRCs

مراحل گیرش اولیه بتن می‌باشد که این امر منجر به افزایش سختی بتن و در نهایت منجر به افزایش مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز می‌شود.

۳-۱-۲- مقاومت کششی

مطابق تحقیقات انجام شده، با افزایش مقدار الیاف، انعطاف‌پذیری بتن بهبود یافته و مقاومت آن در برابر ترک‌های طولی افزایش می‌یابد [10]. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، افزودن الیاف بازالتی تابیده به NC منجر به بهبود استحکام کششی می‌شود. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به NC، مقاومت کششی به ترتیب ۱۸، ۳۶ و ۴۶ درصد نسبت به NC افزایش پیدا کرده است. بهبود مقاومت کششی مشاهده شده در BFRC‌ها نسبت به NC، در ارتباط با الیاف در تحمل تنش‌ها بین وجوه ترک‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر، الیاف در BFRC‌ها باعث تاخیر در وقوع ترک‌خوردگی و رشد ترک‌های ماکرو می‌شوند و در نتیجه، مقاومت کششی افزایش می‌یابد [36] طبق نتایج آزمایش انجام شده، عملیات پل زنی ترک‌ها توسط الیاف بازالتی تابیده در BFRC‌ها منجر به تغییر رفتار شکننده NC از شکست ناگهانی و ترد به رفتار انعطاف‌پذیر شده است.

۳-۱-۳- مدول گسیختگی

شکل (۵) نتایج آزمایش مدول گسیختگی را نشان می‌دهد. جدول (۳) خلاصه‌ای از مقادیر مدول گسیختگی و طاق در آزمایش حاضر را نشان می‌دهد که شامل حداکثر بار و انحراف مربوطه، همچنین شاخص‌های طاق مانند $P-600$ ، $P-150$ ، $f-150$ و $T-150$ می‌شود. طبق شکل (۵)، آزمون‌های BFRC واکنش بار و انحراف بالاتری در مراحل ترک‌خوردگی و شکست نسبت به آزمون NC را از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مدول گسیختگی بتن معمولی برابر با ۵/۳ مگاپاسکال می‌باشد، در حالی که برای BFRC‌ها مقدار آن بین ۶/۱ تا ۹/۶ مگاپاسکال متغیر می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود آزمون‌های BFRC با مقدار بالاتر الیاف بازالتی تابیده، دارای مدول گسیختگی بالاتری می‌باشند. مقدار مدول گسیختگی برای مقدار الیاف بازالتی تابیده ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد به ترتیب ۱۵، ۴۰ و ۸۱ درصد نسبت به NC افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر مختلف الیاف

جدول ۳. نتایج آزمایش مدول گسیختگی برای آزمون‌های NC و BFRC

Table 3. Flexural properties of NC and BFRCs

Mix	Maximum load and corresponding deflection		Modulus of Rupture (MOR) (MPa)	Toughness	Toughness indices					
	Load (kN)	Deflection (mm)			P_{600} (kN)	P_{150} (kN)	f_{600} (kN)	f_{150} (kN)	T_{600} (kN)	T_{150} (kN)
BFRC-1.8	24	1.496	9.6	25.5	4.9	4.2	1.96	1.7	1.2	23.9
BFRC-1.0	18.4	1.391	7.4	15	4.9	1.8	1.95	0.7	1.1	13.2
BFRC-0.5	15.3	1.262	6.1	11.5	5.3	1.1	2.12	0.4	1.4	10.4
NC	13.2	1.107	5.3	5.5	5.3	-	2.14	-	1.6	5.5

زیادی است که در هنگام ساخت و عمل‌آوری و همچنین حرارت هیدراتاسیون در زمان گیرش اولیه سیمان به وجود می‌آید. از سوی دیگر، وجود تنش‌های فشاری و کششی اعمال شده به بتن نیز باعث ایجاد ترک‌های بزرگ‌تری می‌شود. وجود این فضاهای خالی و ترک‌های ناشی از آن‌ها باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش دوام بتن می‌شود [42]. نفوذ آب به بتن، یون‌های خورنده را به داخل بتن هدایت کرده و پس از رسیدن به سطح میلگردها موجب ترک‌خوردگی بتن و خوردگی آن می‌شود. بنابراین، دوام بتن ارتباط نزدیکی با نفوذ آب دارد و این امر از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه، با کاهش تعداد ترک‌ها و افزایش یکپارچگی بتن، مقدار نفوذ آب کاهش یافته و دوام بتن افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش مقاومت بتن در برابر ترک خوردگی استفاده از الیاف است [43].

شکل (۶) نتایج آزمایش نفوذ آب را برای هر دو نوع NC و BFRCها بر اساس استاندارد BS EN 12390-8:2009 [44] نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به NC، نفوذ آب در بتن بهبود یافته است. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، بیشترین مقدار نفوذ آب مربوط به آزمون‌های NC می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، مقدار نفوذ آب کاهش می‌یابد. عمق نفوذ آب در BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب ۱۸، ۲۹ و ۵۳ درصد نسبت به NC کاهش یافته است. کاهش نفوذ آب در بتن به عملکرد الیاف بازالتی تابیده مربوط می‌شود. نتایج آزمایش نشان دهنده توزیع مناسب الیاف در مخلوط و یکپارچگی ماتریس بتن می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار الیاف در ماتریس بتنی، منافذ و ریزترک‌های BFRCها نسبت به NC کاهش می‌یابد. در نتیجه، دوام BFRCها در محیط‌های خورنده بیشتر از آزمون‌های بدون الیاف است.

دلیل دیگر افزایش مدول گسیختگی در BFRCها، حفظ یکپارچگی بتن پس از ترک‌های اولیه در ماتریس از طریق الیاف بازالتی تابیده و جذب تنش‌ها در محل وقوع ترک‌ها می‌باشد. در نتیجه، ناحیه انتقال بین سیمان و مصالح (ITZ)^۱ بهبود می‌یابد [39]. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، منحنی بار-انحراف NC در هنگام شکست یک افت ناگهانی را نشان می‌دهد. از طرفی، آزمون‌های BFRC پس از شکست، مقاومت بیشتری از خود نشان داده است که این نتیجه به وسیله عملکرد الیاف در ماتریس بتنی توجیه پذیر می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که BFRC-1.8 نسبت به سایر BFRCها و NC دارای سختی بالاتری است. علاوه بر این، BFRC-1.8 پس از بار اوج، کاهش کمتری نسبت به سایر BFRCها از خود نشان می‌دهد که نشان‌دهنده میزان انرژی بیشتری است که در هنگام جداسازی و کشش الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتن آزاد می‌شود که این واکنش در ارتباط مستقیم با مقاومت کششی و استهلاک انرژی الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی می‌باشد. در نتیجه، انرژی صرف شده برای کشش و بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی باعث تأخیر در شکست آزمون‌های BFRC نسبت به NC می‌شود.

۲-۳- ویژگی‌های دوام

۲-۳-۱- عمق نفوذ آب

مقاومت بتن در برابر شرایط محیطی مختلف به طور مستقیم به نفوذپذیری آن مرتبط است. از این رو، دوام بتن می‌تواند از طریق آزمایش نفوذ آب ارزیابی و تحلیل شود [40, 41]. نفوذپذیری بتن به میزان ارتباط ترک‌های داخلی و ساختار منافذ آن بستگی دارد. نفوذپذیری بالا باعث نفوذ یون‌های خورنده و رطوبت به داخل بتن می‌شود. بتن به طور ذاتی دارای منافذ، حفرات و ریزترک‌های

¹ Interfacial Transition Zone

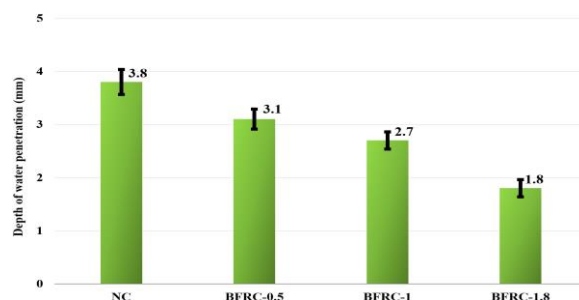
دلیل دیگر افزایش مقاومت الکتریکی بتن، کاهش فضاهای خالی و ترک‌های میکروسکوپی در ماتریس بتنی است که از طریق استفاده از الیاف بازالتی تابیده حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، اختلاط خوب و عملیات پل زنی الیاف روی وجوه ترک‌ها موجب تقویت چسبندگی و یکپارچگی درون ماتریس بتنی می‌شود که در نتیجه باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. در نتیجه، با افزایش مقاومت الکتریکی در BFRC ها، نفوذ یون‌های کلریدی به داخل ماتریس بتن کاهش یافته و دوام بتن بهبود می‌یابد.

۳-۲-۳- خوردگی تسريع شده

شکل (۸) نتایج به دست آمده از پایش جریان عبوری آزمون‌های استوانه‌ای دارای میلگرد فولادی در سن ۲۸ روز و تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت در محلول ۵ درصد NaCl را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مبنای خاتمه این آزمایش، پایدار شدن تغییرات جریان در آزمون NC و تخریب آن در نظر گرفته شده و در همان زمان آزمایش برای سایر آزمون‌ها نیز پایان یافته است.

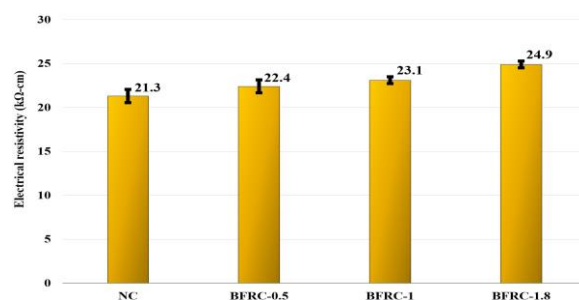
با توجه به شکل (۸) مشخص می‌شود که مقدار جریان عبوری در طول زمان برای آزمون NC نسبت به آزمون‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده BFRC-0.5، BFRC-1، BFRC-1.8 و BFRC-1.8 بیشتر بوده است. کاهش جریان در آزمون‌های دارای الیاف را می‌توان به نقش برجسته الیاف بازالتی تابیده در اصلاح ریزساختار بتن نسبت داد؛ به گونه‌ای که حضور این الیاف با پر کردن و انسداد بخشی از حفرات و ترک‌های ماتریس بتنی، و همچنین قطع اتصال زنجیره‌ای بین حفرات، زمینه کاهش رسانایی و به تبع آن کاهش سرعت انتقال یون‌های مهاجم به سمت میلگردها را فراهم نموده است. از سوی دیگر، الیاف تابیده باعث بهبود تراکم، کاهش تخلخل و افزایش یکنواختی توزیع اجزای داخلی بتن می‌گردد که این موضوع مستقیماً بر تأخیر در شروع خوردگی و کاهش نرخ آن اثرگذار است [45].

سازوکار انتقال جریان به سطح میلگرد عمدتاً از طریق شبکه حفرات و منافذ بتن صورت می‌گیرد؛ در نتیجه، با به کارگیری الیاف بازالتی تابیده که انسداد مؤثر این مسیرها را ایجاد می‌نماید، مسیر حرکت یون‌های کلر محدود و جریان عبوری کاهش می‌یابد. وقوع تغییرات ناگهانی و افزایشی در نمودار جریان معمولاً زمانی ثبت می‌شود که ترک‌های ریز در سطح بتن ظاهر شده و این ترک‌ها



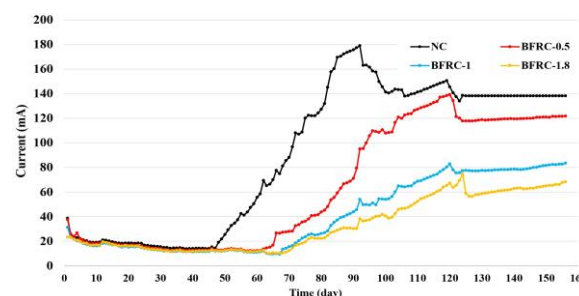
شکل ۶. نتایج آزمایش نفوذ آب برای آزمون‌های NC و BFRC

Fig. 6. Depth of water penetration test results for NC and BFRCs



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی برای آزمون‌های NC و BFRC

Fig. 7. Electrical resistivity test results for NC and BFRCs

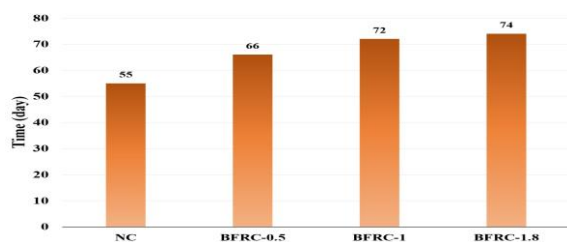


شکل ۸. نتایج آزمایش خوردگی تسريع شده تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت

Fig. 8. Results of the accelerated corrosion test under a constant potential difference of 12 V

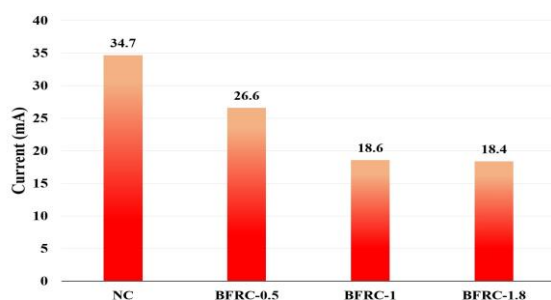
۳-۲-۳- مقاومت الکتریکی

شکل (۷) نتایج مقاومت الکتریکی BFRC ها و NC را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، افزایش مقدار الیاف در ماتریس بتنی منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده به NC، مقاومت الکتریکی به ترتیب ۵، ۹ و ۱۷ درصد نسبت به آزمون NC بهبود یافته است. بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی برای آزمون BFRC-1.8 مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به تأثیر مستقیم الیاف بازالتی تابیده روی ماتریس بتنی نسبت داد. با افزودن الیاف بازالتی تابیده به NC، چسبندگی و یکپارچگی ماتریس بتنی افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به بهبود مقاومت الکتریکی می‌شود.



شکل ۹. سن مشاهده ترک در آزمون‌های NC, BFRC-0.5, BFRC-1, BFRC-1.8 و BFRC-1.8

Fig. 9. Crack initiation time in NC, BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8 specimens



شکل ۱۰. جریان اولیه در آزمون‌های NC, BFRC-0.5, BFRC-1, BFRC-1.8 و BFRC-1.8

Fig. 10. Initial current in NC, BFRC-0.5, BFRC-1, and BFRC-1.8 specimens

ایجاد تأخیر در بروز ترک و نیز کاهش معنی‌دار جریان عبوری در سن معادل، به‌طور مستقیم از کیفیت اختلاط، سازگاری ریزساختاری و عملکرد پل‌زنی و انتقال تنش الیاف بازالتی تابیده در درون ماتریس بتنی ناشی می‌شود. این ویژگی باعث افزایش چسبندگی، یکپارچگی و مقاومت در برابر نفوذ عوامل مهاجم، به‌ویژه یون‌های کلر، می‌شود و در نهایت ارتقاء مقاومت بتن در برابر خوردگی را به‌دنبال دارد [45, 46].

یکی از پارامترهای مهم در آزمایش خوردگی تسریع شده بررسی نرخ خوردگی می‌باشد که با استفاده از آیین‌نامه ASTM G1-90 [47] و معادله ۱ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته شده است.

$$\text{Corrosion Rate} = \frac{(K * W)}{(A * T * D)} \quad (1)$$

در معادله فوق K ضریب ثابت تبدیل واحدها برابر با ۸۷۶۰۰، W جرم از دست رفته آزمون برحسب گرم، A سطح آزمون (سطح در معرض محیط) برحسب سانتی‌متر مربع، T مدت زمان آزمون بر حسب ساعت و D چگالی میلگرد مطابق با آیین‌نامه ۷/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به معادله مذکور مقدار نرخ خوردگی برای آزمون‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به‌ترتیب ۹/۳، ۴/۲، ۲/۶ و ۱/۶ میلی‌متر در سال محاسبه شده است.

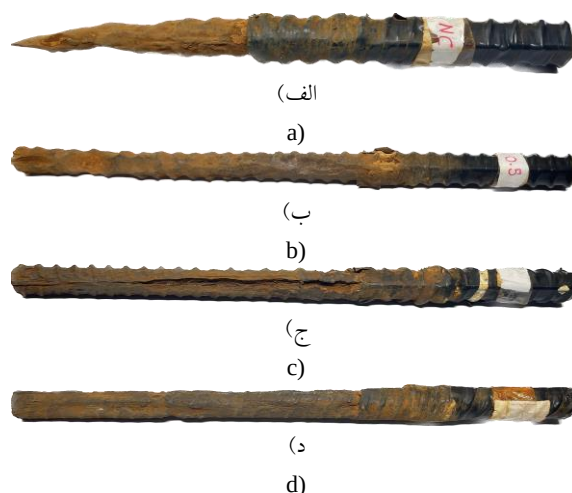
ارتباط بیشتری بین محلول خورنده و میلگرد برقرار می‌نمایند. با ادامه روند خوردگی و افزایش محصولات ناشی از فرآیند خوردگی، این ترک‌ها افزایش یافته و در نهایت به صورت ترک‌های ماکروسکوپی قابل مشاهده می‌شوند. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که خوردگی ناشی از مهاجرت یون‌های مخرب و تأثیر آن بر میلگرد در آزمون بتنی NC منجر به وقوع ترک خوردگی شدید و در نهایت شکست سازه‌ای نمونه شده است. این موضوع بیانگر حساسیت بتن فاقد الیاف به پیشرفت فرآیند خوردگی و بروز ترک‌های سازه‌ای می‌باشد.

از سوی دیگر، مقاومت قابل توجه آزمون‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده در این مرحله کاملاً مشهود است، به طوری که حضور این الیاف با کنترل و محدودسازی ریزترک‌ها و بهبود یکپارچگی ماتریس بتن، مانع از توسعه ترک‌های اصلی و بروز شکست ناگهانی شده است. ثبت این رفتار در پایان دوره آزمایش نشان می‌دهد که به کارگیری الیاف بازالتی تابیده نقش مؤثری در ارتقاء مقاومت بتن در برابر پیشرفت ترک خوردگی ناشی از فرآیندهای خوردگی ایفا نموده است.

شکل (۹ و ۱۰) نشان‌دهنده سن بروز نخستین ترک در آزمون‌ها و جریان ثبت‌شده در آن روز می‌باشند. همان‌گونه که از تحلیل داده‌ها برمی‌آید، سن بروز نخستین ترک در آزمون‌ها متناسب با نوع و میزان مصرف الیاف به‌طور قابل توجهی به تعویق افتاده است. به عبارت دیگر، زمان مشاهده ترک اولیه در آزمون‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به‌ترتیب در روزهای ۵۵، ۶۶، ۷۲ و ۷۴ رخ داده است. این نتایج به صورت روشن اثبات می‌نماید که اضافه کردن الیاف بازالتی تابیده تأثیری مثبت و پایدار بر به تعویق انداختن فرآیند ترک‌زایی سطحی بتن دارد. تجزیه و تحلیل تغییرات جریان عبوری نیز مؤید آن است که میزان جریان در آزمون‌های حاوی الیاف نسبت به آزمون شاهد (NC) در لحظه بروز ترک اولیه، کاهش معناداری یافته است؛ به گونه‌ای که این کاهش به ترتیب برای آزمون‌های BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 معادل ۲۳/۳، ۴۶/۴ و ۴۷ درصد نسبت به آزمون NC بوده که اثبات‌کننده نقش مهارکننده و عملکرد موثر الیاف بازالتی تابیده در کنترل نفوذپذیری و پیشگیری از رشد ترک‌ها در محیط خورنده می‌باشد.

فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی به عنوان ویژگی‌های مکانیکی و نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و خوردگی تسریع شده به عنوان ویژگی‌های دوام در نظر گرفته شده است. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام شده است.
- الیاف بازالتی تابیده دارای مقاومت کششی بالایی هستند و استفاده از آن‌ها تاثیر زیادی در بهبود مقاومت فشاری ندارد؛ با این حال، این الیاف می‌توانند از رشد ترک‌های اولیه جلوگیری کنند که باعث بهبود مقاومت فشاری می‌شود. مقدار مقاومت فشاری برای NC برابر $48/4$ مگاپاسکال و برای بیش‌ترین مقدار الیاف استفاده شده به میزان $1/8$ درصد (BFRC-1.8) برابر $51/3$ مگاپاسکال بدست آمده است. به عبارت دیگر، بیشترین استفاده از الیاف در ماتریس بتنی تنها ۶ درصد افزایش در مقاومت فشاری ایجاد کرده است.
- افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی شده است. مقادیر ثبت شده مقاومت کششی برای NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب $2/8$ ، $3/3$ ، $3/8$ و $4/1$ مگاپاسکال بوده است. بیشترین افزایش در مقاومت کششی برای BFRC-1.8 حدود ۴۶ درصد نسبت به NC بوده است. طبق نتایج آزمایش مقاومت کششی، مشخص می‌شود که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، حالت شکست از رفتار ترد و شکننده به رفتار شکل‌پذیر تغییر پیدا کرده است.
- با افزایش میزان الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی، مدول گسیختگی افزایش یافته است. نتایج آزمایش‌های مدول گسیختگی نشان می‌دهد که الیاف بازالتی تابیده با ایجاد عملیات پل‌زنی روی وجوه ترک‌ها، از رشد ترک‌ها جلوگیری کرده و از گسترش ترک‌ها در بتن جلوگیری می‌نماید. با افزودن $0/5$ ، 1 و $1/8$ درصد الیاف بازالتی تابیده، مدول گسیختگی به ترتیب ۱۵، ۴۰ و ۸۱ درصد نسبت به NC افزایش یافته است. بهبود در انعطاف‌پذیری باعث شد تا BFRC‌ها انرژی و نیروهای بیشتری را تحمل کرده و در نتیجه تحمل نیروهای بیشتری نسبت به NC قبل از وقوع شکست را از خود نشان دهند.



شکل ۱۱. وضعیت ظاهری نمونه‌ها در انتهای آزمایش خوردگی تسریع شده.

الف: NC، ب: BFRC-0.5، ج: BFRC-1 و د: BFRC-1.8

Fig. 11. Surface condition of the specimens at the end of the accelerated corrosion test: a) NC, b) BFRC-0.5, c) BFRC-1, and d) BFRC-1.

در انتها و پس از اتمام دوره آزمایش، میلگردهای جاسازی شده در بتن استخراج و با استفاده از برس سیمی، تمامی خرده‌های بتنی و محصولات زنگ‌زدگی به دقت پاک‌سازی شده‌اند، سپس با ترازوی دیجیتال عملیات وزن‌کشی انجام گرفته است. ارزیابی اختلاف وزن ابتدایی و نهایی میلگردها در این آزمایش نشان می‌دهد که افت وزنی و به تبع آن کاهش مقطع میلگرد در نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب معادل $49/9$ ، $22/7$ ، $14/2$ و $8/6$ درصد بوده است (شکل ۱۱). این نتایج ضمن تأیید نقش اثربخش الیاف بازالتی تابیده بر کاهش نفوذپذیری و کنترل آسیب خوردگی میلگردها، حاکی از ارتقاء عملکرد سازه‌ای نمونه‌های بتنی تقویت شده با این نوع الیاف در محیط‌های خورنده می‌باشد. در مجموع، نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از الیاف بازالتی تابیده علاوه بر تأخیر انداختن شروع خوردگی و کاهش سرعت پیشرفت آن، با بهبود ساختار داخلی بتن، زمینه‌ساز افزایش دوام و طول عمر سازه‌های بتن مسلح در محیط‌های خورنده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمایش‌های مختلفی برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام NC و BFRC‌ها انجام شده است. این مطالعه با استفاده از مقادیر مختلف الیاف بازالتی تابیده به میزان $0/5$ ، 1 و $1/8$ درصد انجام شده و نتایج با NC مقایسه شده است. مقاومت

کردن منافذ، ایجاد انسداد در مسیرهای نفوذپذیر و افزایش یکنواختی ماتریس، مانع انتقال مؤثر یون‌های مهاجم به سطح میلگرد می‌شود و بدین ترتیب نرخ خوردگی کاهش یافته است.

- مطابق با آزمایش خوردگی تسریع شده مشخص می‌گردد که پس از پایان آزمایش، کاهش وزن میلگرد در نمونه‌های دارای الیاف بازالتی تابیده نسبت به بتن شاهد کمتر بوده است؛ به طوری که درصد کاهش وزن میلگرد در نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1، BFRC-1.8 به ترتیب برابر با ۲۹/۹، ۲۲/۷، ۱۴/۱ و ۸/۶ درصد به دست آمده است. این روند کاهشی را می‌توان نتیجه تاثیر الیاف بازالتی در بهبود تراکم و یکنواختی ساختار داخلی بتن دانست؛ به گونه‌ای که این الیاف با پر کردن حفرات و محدود کردن مسیرهای نفوذ یون‌های مخرب، سبب کاهش دسترسی یون‌های خورنده به سطح میلگرد و افزایش حفاظت فولاد در برابر خوردگی می‌شوند. از سوی دیگر مشاهده سطح میلگردها پس از پایان آزمون نیز نشان می‌دهد که حضور الیاف به حفظ یکپارچگی و کاهش آثار خوردگی کمک کرده است.

- مطابق با نتایج آزمایش خوردگی تسریع شده، افزایش تاخیر در بروز ترک‌های سطحی ناشی از خوردگی در نمونه‌های حاوی الیاف بازالتی تابیده قابل توجه بوده است. زمان بروز نخستین ترک برای نمونه‌های NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب در روزهای ۵۵، ۶۶، ۷۲ و ۷۴ به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان الیاف، مدت زمان مورد نیاز برای ایجاد ترک روی سطح بتن بیشتر شده است. علت این رفتار را می‌توان به نقش الیاف در کاهش تخلخل و ایجاد محدودیت در مسیرهای نفوذ عوامل خورنده نسبت داد؛ به طوری که حضور الیاف بازالتی در ماتریس بتن، با محدود کردن انتقال یون‌های مخرب، آغاز ترک خوردگی ناشی از خوردگی میلگرد را به تأخیر انداخته است.

- با استفاده از الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی، ویژگی‌های مکانیکی و دوام کلی سازه بهبود می‌یابد. این الیاف می‌توانند مقاومت بتن را در برابر عوامل محیطی مختلف، از جمله خوردگی، که می‌تواند منجر به ترک خوردگی و آسیب‌های دیگر در طول زمان شود را افزایش دهند. استفاده از الیاف

- طبق نتایج آزمایش مدول گسیختگی، الیاف بازالتی تابیده در BFRC ها به عنوان یک سازوکار پل زنی عمل کرده که تنش‌های هر دو طرف ترک‌ها را تحمل کرده و انرژی بیشتری برای جدا شدن و کشیدن الیاف از ماتریس بتنی آزاد می‌کند. در نتیجه، مقادیر سختی و طاقت برای BFRC-1.8، BFRC-1 و BFRC-0.5 به ترتیب ۱۰۹، ۱۷۳ و ۳۶۴ درصد نسبت به NC افزایش یافته است.

- طبق نتایج آزمایش نفوذ آب، مشخص می‌شود که با افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی، نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ۰/۵ تا ۱/۸ درصد الیاف بازالتی تابیده، عمق نفوذ آب به ترتیب ۱۸ تا ۵۳ درصد نسبت به NC بهبود یافته است. این کاهش در نفوذ به دلیل مهار ترک‌های میکروسکوپی و چسبندگی قوی بین الیاف و ماتریس بتنی می‌باشد. علاوه بر این، الیاف باعث کاهش تخلخل و افزایش یکپارچگی بتن شده است. در نتیجه، کاهش نفوذ آب در بتن موجب افزایش عمر مفید و دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌شود.

- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی منجر به افزایش این پارامتر می‌شود. به عبارت دیگر، الیاف به طور مؤثر با ماتریس بتنی مخلوط شده که این امر به افزایش چسبندگی و کاهش فضای خالی در ماتریس بتنی می‌شود. همچنین، الیاف روی وجوه ترک به عملیات پل زنی پرداخته و از رشد و گسترش آن‌ها در ماتریس بتنی جلوگیری بعمل می‌آورند. در نتیجه، با افزایش مقاومت الکتریکی در BFRC ها، پتانسیل ورود یون‌های خورنده به داخل بتن کاهش یافته و عمر مفید سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی و خورنده افزایش می‌یابد.

- با توجه به آزمایش خوردگی تسریع شده مشخص شد که افزودن الیاف بازالتی تابیده به ماتریس بتنی باعث کاهش نرخ خوردگی میلگردها در محیط خورنده شده است. مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های بدون الیاف تا بیشترین درصد الیاف NC، BFRC-0.5، BFRC-1 و BFRC-1.8 به ترتیب برابر با ۹/۳، ۴/۲، ۲/۶ و ۱/۶ میلی‌متر در سال بدست آمده است. این روند کاهشی را می‌توان به نقش الیاف در اصلاح ریزساختار بتن نسبت داد؛ به گونه‌ای که حضور الیاف با پر

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان در مقاله یکسان است.

منابع مالی

برای نوشتن این مقاله از هیچ منبع مالی استفاده نشده است.

بازالتی تابیده می‌تواند از تشکیل ترک‌های با عرض زیاد در محیط‌های دریایی جلوگیری کرده و دوام بتن را بهبود بخشد.

قدردانی نویسندگان

از حمایت مادی و معنوی قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

برای نویسندگان تعارض منافع وجود ندارد.

References

- [1] Smirnova, O.M., Menéndez Pidal de Navascués, I., Mikhailevskii, V.R., Kolosov, O.I., and Skolota, N.S., 2021. Sound-absorbing composites with rubber crumb from used tires. *Applied Sciences*, 11(16), p.7347.
- [2] Ahmad, J., Aslam, F., Martinez-Garcia, R., Hechmi El Ouni, M., and Mohamed Khedher, K., 2021. Performance of sustainable self-compacting fiber reinforced concrete with substitution of marble waste (MW) and coconut fibers (CFs). *Scientific Reports*, 11(1), p.23184.
- [3] Said, A., Elsayed, Ma., Abd El-Azim A., Althoey, F., and Tayeh B.A., 2022. Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01009.
- [4] Ahmad, J., Majdi A., Al-Fakih, A., Farouk Deifalla, A., Althoey, F., Hechmi El Ouni, M., and A. El-Shorbagy, M., 2022. Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review. *Materials*, 15(10), p.3601.
- [5] Kayali, O., 2016. Sustainability of fibre composite concrete construction. In *Sustainability of construction materials*, pp.539-566.
- [6] Ahmad, J., Majdi, A., Farouk Deifalla, A., F. Isleem, H., and Rahmawati, C., 2022. Concrete made with partially substitutions of copper slag (CPS): State of the art review. *Materials*, 15(15), p.5196.
- [7] Mahmoud, A.A., and Elkatatny, S., 2020. Improving class G cement carbonation resistance for applications of geologic carbon sequestration using synthetic polypropylene fiber. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76, pp.103184.
- [8] Faridul Hasan, K.M., György Horváth, P., and Alpár, T., 2022. Lignocellulosic fiber cement compatibility: a state of the art review. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), pp.5409-5434.
- [9] Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., and Kawashima, S., 2018. Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, 6(3), p.47.
- [10] Eisa, A.S., Elshazli, M.T., and Nawar, M.T., 2020. Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252, p.119078.
- [11] Halvaei, M. Jamshidi, M., and Latifi, M., 2016. Effect of fiber geometry and tenacity on the mechanical properties of fine aggregates concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45(5), pp.1083-1099.
- [12] Yazıcı, Ş., İnan, G., and Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp.1250-1253.
- [13] Barluenga, G., and Hernández-Olivares, F., 2007. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. *Cement and Concrete Research*, 37(12), pp.1624-1638.
- [14] Hao, Y., and Hao, H., 2013. Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests. *Construction and Building Materials*, 48, pp.521-532.
- [15] Aydin, A.C., 2007. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp.1149-1154.
- [16] Ibrahim, K. I. M., 2017. The combined influence of polypropylene fibers [PPF] and silica fume [SF] on concrete strength. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(8), pp.106-112.
- [17] Gu, M., Ahmad, W., M. A.T., Zia, A. Akmal, U., Awad, Y.A., and Alabduljabbar, H., 2022. Scientometric analysis and research mapping knowledge of coconut fibers in concrete. *Materials*, 15(16), p.5639.
- [18] Dilbas, H., and Çakır, Ö., 2020. Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254, p.119216.
- [19] Angst, U., Elsener, B., K. Larsen, C., and Vennesland, Ø., 2009. Critical chloride content in reinforced

- concrete—A review. *Cement and concrete research*, 39(9), pp.1122-1138.
- [20] Al-Kharabsheh, B.N., Moafak Arbili, M. Majdi, A., M. Alogla, S., Hakamy, A., Ahmad, J., and Farouk Deifalla, A., 2023. Basalt Fiber Reinforced Concrete: A Compressive Review on Durability Aspects. *Materials*, 16(1), p.429.
- [21] John, V.J., and Dharmar, B., 2021. Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete—A review. *Structural Concrete*, 22(1), pp.491-502.
- [22] Iyer, P., Y. Kenno, S., and Das, S., 2015. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), p.04015015.
- [23] Jiang, C. Fan, K., Wu, F., and Chen, D., 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, pp.187-193.
- [24] Adhikari, S., 2013. Mechanical and structural characterization of mini-bar reinforced concrete beams, The University of Akron, Ohio.
- [25] Lipatov, Y.V., Gutnikov, S.I., Manylov, M.S., Zhukovskaya E.S., and Lazoryak B.I., 2015. High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials & Design*, 73, pp.60-66.
- [26] Wang, D., Ju, Y., Shen, H., and Xu, L., 2019. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, pp.464-473.
- [27] Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., and Saradar, A., 2018. Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Construction and Building Materials*, 162, pp.321-333.
- [28] Niu, D. Su, L., Luo, Y., Huang, D., and Luo, D., 2020. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 237, p.117628.
- [29] Wu, H., Zhao, J., and Wang, Z., 2013. Study on micro-structure and durability of fiber concrete. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(2), pp:659-664.
- [30] Kirthika, S.K., and Singh, S.K., 2018. Experimental investigations on basalt fibre-reinforced concrete. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99, pp.661-670.
- [31] BS 1881-116, 1983. Testing concrete-Part 116: method for determination of compressive strength of concrete cubes, London, UK.
- [32] ASTM C 496/C 496M-04, 2004. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken (PA), USA.
- [33] ASTM C1609/C1609M-07, 2010. Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), West Conshohocken (PA), USA.
- [34] AASHTO Designation: T 358-15, 2019. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Washington, D.C, USA.
- [35] Boğa, A.R. and Topçu, I.B., 2012. Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.258-264.
- [36] Ayub, T., Shafiq, N., and Fadhil Nuruddin, M., 2014. Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77, pp.131-139.
- [37] Abbas, S., M.Soliman, A., and L.Nehdi, M., 2015. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials*, 75, pp.429-441.
- [38] Abushanab, A., Alnahhal, W., and Farraj, M., 2021. Structural performance and moment redistribution of basalt FRC continuous beams reinforced with basalt FRP bars. *Engineering Structures*, 240, p.112390.
- [39] Larsen, I.L., and Thorstensen R.T., 2020. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 256, p.119459.
- [40] Qin, Y. Li,M., Li, Y., Ma, W., Xu, Z., Chai, J., and Zhou, H., 2021. Effects of nylon fiber and nylon fiber fabric on the permeability of cracked concrete. *Construction and building materials*, 274, p.121786.
- [41] Ma, Z., Liu, M., Duan Z., Liang, C., and Wu, H., 2020. Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 257, p.120518.
- [42] Li, X. Xu, Q., and Chen, S., 2016. An experimental and numerical study on water permeability of concrete. *Construction and building materials*, 105, pp.503-510.
- [43] Chahal, N., Siddique, R., and Rajor, A., 2012. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.351-356.
- [44] BS EN 12390-8, 2009. Testing hardened concrete—Part 8: depth of penetration of water under pressure,

- London, UK.
- [45] Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Su, C., Liu, J. and Wu, Z., 2023. Mechanical properties of a novel UHPC reinforced with macro basalt fibers. *Construction and Building Materials*, 377, p.131107.
- [46] Muhammad, J.H. and Yousif, A.R., 2023. Effect of basalt minibars on the shear strength of BFRP-reinforced high-strength concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e02020.
- [47] ASTM G1-90, Reapproved 1999. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, West Conshohocken (PA), USA.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Nasaj Moghadam, H. and Jandaghi Alaei, F., 2026. Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.79-93.



Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement

Sajjad Mirzamohammadi¹, Masoud Soltani Mohammadi^{2*} 

1. Ph.D., Department of structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

The construction industry is particularly cost-sensitive, thus new materials should be justified, and their economic advantages should be satisfactory. Over the last 50 years, using fiber-reinforced cement base materials has significantly increased. Among them, a particularly malleable category includes engineered cementitious composites (ECC), strain hardening cementitious composites (SHCC), and ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC). These high-performance fiber reinforced cementitious based materials (HPFRCC) show considerable strain hardening capacity. Meanwhile, it is crucial to consider how these new materials (HPFRCC) will affect the environment. Indeed, the quantity of cement or cementitious materials used in their manufacturing may sometimes approach 1000 kg/m³. Substituting supplemental materials with cementitious properties for clinker is one of the greatest ways to reduce carbon dioxide emissions from HPFRCC manufacture (supplementary cementitious materials). Clays-containing kaolinite is one of the acceptable auxiliary ingredients for cement with good accessibility. These clays are among the substances that are widely distributed over the globe. When heated to 700-850°C, clays with at least 40% kaolinite produce metakaolin and become significantly pozzolanic. The simultaneous addition of calcined clay, and limestone to replace with part of the clinker in the mixed design results in LC3 or cement consisting of calcined clay and limestone, which reduces carbon emissions by roughly 30% turns into dioxide (CO₂). The optimal substitution ratio of OPC by LC3 is 50% clinker, 30% calcined clay (MK), 15% limestone powder, and 5% gypsum. Therefore, the optimal OPC substitution ratio by LC3 is 45% (55% OPC, 30% calcined clay, and 15% limestone powder) with kaolin content of around 40-50% in the clay. This study developed a sprayable HPFRCC using local materials such as limestone calcined clay cement (LC3) and ordinary polypropylene (PP) fiber to increase the durability of structures (as a material for repairing) without harming the environment. The developed composite's sprayability and mechanical performance were investigated through a flow table, compressive strength, uniaxial tension, and three-point flexural tests. Moreover, the material sustainability index (MSI) was used to evaluate the performance of the mixes in terms of consumed energy and carbon emissions. Finally, using LC3 and ordinary polypropylene fibers, it was possible to achieve sprayable HPFRCC with a tensile strain capacity of 3.5%. Furthermore, this composite exhibits low carbon production, low cost, and high ductility, promoting its use in infrastructure repairs. The compressive strength of cast specimens was 11% higher than that of the sprayed specimens. The reason for this was their apparent density difference and porosity (i.e. the compressive strength of the cast specimens was higher due to their lower porosity). The bending and tensile strengths of the cast specimens were, respectively, 14% and 22% lower than those of the sprayed specimens due to pneumatic compaction during the spraying process; the distribution of fibers in the sprayed specimens was more uniform, resulting in greater bending and tensile strengths. However, the flexural deformation and tensile strain capacity of the sprayed and cast specimens were almost equal. Moreover, A superplasticizer/binder (LC3 mass) ratio of 2.5% must be chosen for spraying HPFRCC containing calcined clay.

Review History

Received: May 11, 2025

Revised: Aug 8, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Mechanical properties
HPFRCC
Sprayable
LC3 cement
PP fiber

* Corresponding Author Email: msoltani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-8696-8247



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند پاششی حاوی رس‌های کلسینه شده

سجاد میرزامحمدی^۱، مسعود سلطانی محمدی^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی، مهندسی عمران و محیط‌زیست، تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استاد، مهندسی عمران و محیط‌زیست، تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) پاششی در کاربردهای عملی به عنوان یک مصالح ترمیمی امیدوارکننده شناخته می‌شوند. با این حال، مقدار مصرف بالای سیمان در طرح مخلوط HPFRCC که منجر به تولید زیاد گاز کربن‌دی‌اکسید و ترک‌خوردگی انقباضی بالقوه می‌شود، نیاز به تغییراتی دارد. در این تحقیق، یک HPFRCC پاششی با استفاده از مصالح محلی مانند سیمان‌های سه جزئی (LC3) و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی (PP) به منظور افزایش دوام سازه‌ها و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه یافته است. قابلیت پاشش و عملکرد مکانیکی این کامپوزیت با آزمایش‌های جریان اسلامپ (Flow table test)، مقاومت فشاری، کشش تک‌محوری و خمش سه‌نقطه‌ای بررسی شد. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد طرح مخلوط‌های ساخته شده، شاخص عملکرد مواد (MSI) از نقطه‌نظر انرژی مصرف شده و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید بکار گرفته شد. مقایسه با نمونه متداول کامپوزیت‌های سیمانی الیافی (M45-ECC) نشان داد که طرح توسعه داده شده در این تحقیق (A-2.5) به ترتیب حدود ۲۱ درصد انرژی مصرف شده و ۲۰ درصد انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید کمتر تولید می‌کند که بیانگر برتری آشکار زیست‌محیطی این طرح نسبت به نمونه‌های رایج است. در نهایت دستیابی به HPFRCC پاششی با ظرفیت کرنش کششی ۳/۵ درصد در صورت استفاده از رس‌های کلسینه شده و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی میسر شد.

کلمات کلیدی

خواص مکانیکی

کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند

پاشش

سیمان LC3

الیاف پلی‌پروپیلن

۱- مقدمه

گفت که این فناوری حتی هنگام تسلیح با الیاف فولادی، شبه ترد

باقی می‌ماند [3-4].

به طور کلی مواد پایه سیمانی می‌تواند شامل بتن (خمیر سیمان حاوی سنگ‌دانه درشت و ریز)، ملات (خمیر سیمان حاوی سنگ‌دانه ریز) و یا خمیر سیمان (فاقد سنگ‌دانه) باشد. حضور الیاف در بتن، ملات و یا خمیرهای سیمانی باعث تبدیل شدن آن‌ها به یک کامپوزیت یا ماده مرکب خواهد شد که از دو فاز تشکیل شده‌اند. یک فاز آن‌ها الیاف، و فاز دیگر آن‌ها سایر مواد تشکیل‌دهنده خواهد بود (ترکیب آب، سیمان هیدرولیکی و

بتن به دلیل عملکرد مکانیکی خوب، هزینه پایین، طول عمر و دسترسی وسیع، یکی از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در ساخت‌وساز است. با این حال، به دلیل ترد بودن، بتن از ترک‌خوردگی آسیب دیده و به دنبال آن ایمنی و دوام سازه‌ها کاهش می‌یابد [1-2]. فناوری بتن پاششی برای تعمیرات زیرساختی توجه زیادی را به خود جلب کرده و مزایای آن عبارتند از: عدم نیاز به قالب، هزینه مقرون به صرفه، تغییرات کمتر در عملکرد مکانیکی و کارایی بالا در ساخت‌وساز می‌باشند. با این حال باید

* رایانامه نویسنده مسئول: msoltani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-8696-8247

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



سنگدانه) که به آن ماتریس می‌گویند [5-6].

مواد پایه سیمانی الیافی برحسب رفتار در برابر بارهای کششی به دو نوع مواد پایه سیمانی الیافی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و مواد پایه سیمانی با رفتار نرم‌شوندگی تقسیم‌بندی می‌شوند. در چند دهه اخیر مواد پایه سیمانی الیافی توانمند بر مبنای اصول میکرومکانیک توسعه یافته‌اند. این مواد رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ترک‌خوردگی چندگانه قابل توجهی از خود نشان داده و بتن‌های الیافی توانمند (HPFRC)^۱، کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)^۲ را شامل می‌شوند [7-9].

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند یک بتن شکل‌پذیر مسلح الیافی بوده که برای حداقل ۳٪ ظرفیت کرنش کششی طراحی شده است [10]. امروزه HPFRCC پاششی با روانی کنترل شده توسط کاهنده آب، عامل اصلاح شده لزجت و سیمان آلومینات کلسیم (CSA)^۳ توسعه یافته است. سازه‌های تعمیر یا مرمت شده با HPFRCC پاششی شامل کانال‌های انتقال آب، پوشش تونل‌ها، دیوارهای بنایی، سدها و مجاری آب می‌باشد [11-13]. با این وجود، دوز بالای سیمان در ترکیب HPFRCC سبب افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد انتشار CO₂ می‌شود، زیرا ۵ الی ۸ درصد کل انتشار CO₂ با منشا انسانی مربوط به تولید سیمان است [14-16]. علاوه بر این، حجم بالای سیمان در HPFRCC منجر به ایجاد انقباضی چشم‌گیر تا ۱۵۰۰ με در مدت ۲۸ روز و افزایش بالقوه خطر ترک‌خوردگی می‌شود [17-19]. آثار زیست‌محیطی ناشی از افزایش مصرف سیمان و انتشار CO₂ در تحقیقات متعددی گزارش شده است [20-22]. بنابراین، HPFRCC پاششی به کار برده شده در این تحقیق می‌تواند سبب بهبود بیشتر هم از لحاظ زیست‌محیطی و کاهش انقباض شود.

در سال‌های اخیر، سیمان LC3^۴ به منظور کاهش آثار زیست‌محیطی تولید سیمان، توسعه یافته است. سیمان LC3 شامل ۵۰٪ کلینکر، ۳۰٪ رس کلسینه شده، ۱۵٪ سنگ آهک و ۵٪ گچ است که انتشار CO₂ را در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی (OPC) حدود ۲۰-۳۵ درصد کاهش می‌دهد. LC3 در توسعه HPFRCC کم‌کربن (با میزان کربن پایین) با شکل‌پذیری کششی بسیار بالا،

پایداری زیادی از خود نشان داده اما در کاربردهای پاششی HPFRCC بسیار مورد استفاده قرار نگرفته است. با توجه به روانی تغییر یافته ماتریس (خمیر) LC3 انتظار می‌رود که این ترکیب روی قابلیت پمپاژ و پاشش LC3-HPFRCC اثر بگذارد. بدین منظور نیاز به پژوهش در مورد ویژگی روانی HPFRCC مبتنی بر LC3 برای کاربری‌های پاششی وجود دارد [23-24].

HPFRCC معمولاً شامل ۲٪ حجمی از الیاف مصنوعی پلیمری است. الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA)^۵، الیاف پلی‌اتیلن (PE)^۶ و الیاف پلی‌پروپیلن بادوام (HTPP)^۷ پرکاربردترین انواع الیاف هستند [25-26]. برخلاف معایبی همچون مقاومت و سختی پایین، الیاف PP به‌عنوان الیافی ارزان‌تر نسبت به الیاف PVE یا PE در طراحی HPFRCC برای مقاصد تعمیر و بهسازی به کار می‌روند [27-28]. به دلیل قطر کوچکتر (۱۲ میکرومتر)، تعداد الیاف PP حدود ۱۰/۶ برابر الیاف PVA (قطر ۳۹ میکرومتر) برای یک دوز معین و همان طول الیاف است. مقدار زیاد الیاف PP سبب می‌شود تا پمپاژ و پاشش HPFRCC سخت‌تر شود [29]. روانی ترکیب همچنین روی پخش الیاف PP و عملکرد مکانیکی PP-HPFRCC سفت شده اثر می‌گذارد [30].

ژو و همکاران [24] به بررسی و توسعه یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند بادوام و به صرفه از نظر هزینه پرداختند. سیمان پرتلند معمولی (OPC) و الیاف PVA که معمولاً در HPFRCC مورد استفاده بودند به ترتیب با سیمان LC3 و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) جایگزین شدند. مقاومت فشاری، رابطه تنش - کرنش کششی و رفتار خود - ترمیمی در سه نسبت آب به سیمان (۰/۱۶، ۰/۲ و ۰/۳) مطالعه شدند. HPFRCC جدید یک ظرفیت کرنش کششی بزرگتر از ۶٪ و یک پهنای ترک کمتر از ۸۲ میکرومتر نشان داد. در مقایسه با HPFRCC معمولی ساخته شده از OPC و الیاف PVA، هزینه مواد، انرژی مصرف شده و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید LC3-PP-HPFRCC به ترتیب به اندازه ۶۱٪، ۴۵٪ و ۴۸٪ کاهش یافت. ویژگی‌های مکانیکی بهتر و دوام‌پذیری بالاتر همراه با آثار محیطی کم و هزینه پایین تولید مواد باعث شد تا LC3-PP-HPFRCC ماده‌ای ماندگار برای کاربردهای ساختاری و غیرساختاری باشد. در تحقیقی دیگر ژو و همکاران [14] یک

^۵ Polyvinyl alcohol Fiber

^۶ Polyethylene Fiber

^۷ High Tenacity Polypropylene Fiber

^۱ High Performance Fiber Reinforced Concrete

^۲ High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

^۳ Calcium sulfoaluminate

^۴ Limestone Calcined Clay Cement

ج) مرحله پاشش: کیفیت پاشش (اسپری کردن) با عوامل زیادی همچون الگوی پیستوله، مهارت اپراتور نازل، جهت پاشش، فشار هوا و چسبندگی مصالح بررسی می‌شود. چسبندگی مصالح یکی از مهم‌ترین عوامل برای بررسی قابلیت پودرسازی (Atomization) نازلی است که HPFRCC با آن پاشیده شده است. حداقل روانی مورد نیاز برای پودرسازی به صورت (D_{min}^{spray}) در شکل (۱) نشان داده می‌شود.

د) مرحله لایه‌گذاری (منظور ایجاد لایه‌ای از HPFRCC پاششی است، یا مرحله تعمیر): یک ویژگی رئولوژیکی دو مرحله‌ای برای HPFRCC پاششی طراحی شد. در مرحله اول (قبل از پاشش)، روانی بالا برای اختلاط، پمپاژ و هماهنگی زمان کار مورد نیاز، مطلوب است. در مرحله دوم (بعد از پاشش)، جریان‌پذیری HPFRCC تازه باید به سرعت کاهش پیدا کند تا اجازه لایه‌گذاری با ضخامت کافی از مصالح تعمیر روی بستر را بدهد. زمان سکون، بازه‌ای از زمان است که بلافاصله پس از اختلاط و قبل از پاشش تعریف می‌شود. بنابر ویژگی رئولوژیکی دو مرحله‌ای ذکر شده در بالا و به منظور دستیابی به کیفیت پودرسازی و توانایی لایه‌گذاری مناسب، زمان سکون بهینه مورد نیاز است. حداکثر روانی مجاز برای ضخامت مورد نیاز لایه‌گذاری به صورت D_{max}^{spray} تعریف شده است.

ژو و همکاران [14] دریافتند که عدد ۲/۵، حداکثر روانی مجاز (D_{max}^{spray}) برای الزام لایه‌گذاری HPFRCC پاششی است. اگرچه روانی (>2.5) ممکن است ضخامت کافی را با افزایش چسبندگی مصالح همچون عامل پیوند یا زبری سطح تامین کند، اما توصیه می‌شود که مقدار جریان‌پذیری برابر با ۲/۵ را به طور محافظه‌کارانه به عنوان مقدار حداکثری برای لایه‌گذاری مصالح پاشیده شده در نظر گرفت. در سمت دیگر، روانی شدیداً کم نیز ممکن است مانعی در برابر پاشش HPFRCC باشد. با میزانی کمتر از جریان‌پذیری بحرانی حداقل، HPFRCC پاشیده شده نمی‌تواند به کیفیت پودرسازی مناسبی دست پیدا کند. فشار هوای بیشتر نیز پودرسازی مصالح را آسان‌تر می‌کند. با این وجود، فشار اضافی سبب جدا شدن الیاف PP از مخلوط می‌شود. در PP-HPFRCC پاششی، وقتی فشار هوا بیشتر از 500 kPa باشد، الیاف PP از مخلوط جدا می‌شوند.

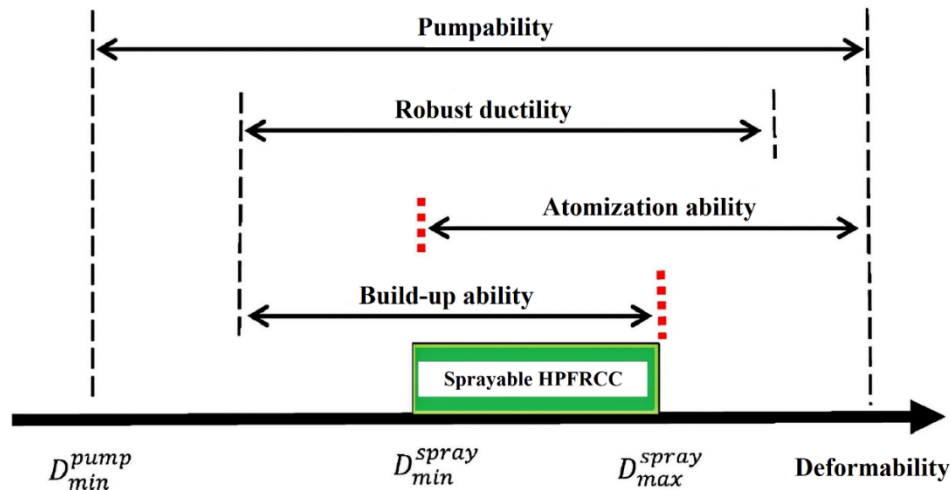
HPFRCC پاششی با استفاده از سیمان LC3، افزودنی سولفا آلومینات کلسیم (CSA) و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به منظور افزایش دوام و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه دادند. قابلیت پاشش و عملکرد مکانیکی این کامپوزیت با آزمایش‌های میز جریان (Flow table test) و کشش تک‌محوری بررسی شد. هنگام پاشش و در مقایسه با نمونه‌های تهیه شده به روش قالب‌گیری، HPFRCC دارای مقاومت فشاری قابل مقایسه با ظرفیت کرنش کششی بالاتر (۵/۷٪) و عرض ترک کاهش یافته‌تر (۳۰ میکرومتر در ۱٪ کرنش کششی) است.

کنترل مواد تشکیل‌دهنده طرح اختلاط در حالت تازه به منظور دستیابی به انواع مختلف HPFRCC ضروری است. در حالی که شاخص‌های مختلفی همچون لزجت (ویسکوزیته) و فشار پمپ برای طراحی بتن پاششی به کار می‌رود، قابلیت جریان‌پذیری (روانی) با آزمایش جریان اسلامپ به عنوان یک شاخص ساده و عملی ارائه شده است. شکل (۱) قاعده طراحی مفهومی HPFRCC پاششی را با استفاده از شاخص جریان‌پذیری مطابق مرجع [14] به تصویر می‌کشد. لزوم کنترل روانی در مراحل مختلف پردازش متفاوت خواهد بود:

الف) مرحله اختلاط: یک لزجت متوسط می‌تواند پخش یکنواخت الیاف را تضمین و منجر به ایجاد یک ویژگی سخت‌شدگی کرنشی پایدار شود. علاوه بر این، جریان‌پذیری (روانی) کم به منظور رسیدن به اثر پایدار سخت‌شدگی کرنشی در PP-HPFRCC ترجیح داده می‌شود.

ب) مرحله پمپاژ: قبل از پاشش، HPFRCC تازه به وسیله یک پمپ از میکسر به نازل منتقل می‌شود. برای پمپاژ از طریق شلنگ با فشار پمپ مناسب، HPFRCC تازه به روانی اولیه بالایی برای این کار نیاز دارد که آن را به عنوان روانی پمپاژ حداقل (D_{min}^{pump}) تعریف می‌کنند (شکل ۱).

از آنجایی که کارایی در بازه زمانی بین پایان اختلاط و آغاز پمپاژ کاهش می‌یابد، جریان‌پذیری پمپاژ حداقل (D_{min}^{pump}) کمتر از مقدار حداقل جریان‌پذیری پایدار (Robust Ductility) است. در سمت دیگر، یک ملات با روانی بالا، حتی مانند آب را می‌توان پمپاژ کرد اما لزجت پایین آن برای پخش الیاف PP کافی نمی‌باشد. از این جهت، بازه شاخص روانی برای پمپاژ بزرگتر از جریان‌پذیری پایدار خواهد بود.



شکل ۱. قاعده طراحی مفهومی ملات‌های الیافی پاششی با استفاده از شاخص جریان‌پذیری (روانی) [14]

Fig. 1. Material deformability principle for designing sprayable HPFRCC [14]

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند معمولی، رس خام و رس کلسینه شده (MK)

Table 1. Chemical composition of materials used to make HPFRCC

	OPC (%)	RC (%)	MK (%)
CaO	62.3	1.2	1.3
SiO ₂	16.5	73.7	78.8
L.O.I	5.9	6.63	0.46
SO ₃	4.7	0.047	0.074
Fe ₂ O ₃	3.4	0.306	0.324
Al ₂ O ₃	3.4	17.36	18.18
MgO	1.2	0.204	0.23
K ₂ O	1	0.213	0.23
Na ₂ O	0.5	0.057	0.071
MnO	0.4	0.012	0.011
TiO ₂	0.2	0.029	0.037
Sr	0.2	0.025	0.02
P ₂ O ₅	0.08	0.063	0.074
Ba	0.07	0.039	0.026
Cl	0.03	0.011	0.007
Pb	0.03	0.013	-
Zn	0.02	0.004	0.005
Ga	-	0.002	0.002
As	-	0.01	0.007
Rb	-	0.001	-
Cu	0.01	-	0.003
Kaolinite (%)	-	41	-

این تحقیق قصد دارد تا یک HPFRCC پاششی با مزایای همچون شکل‌پذیری بسیار بالا، انقباض و کربن کم، و هزینه پایین تشکیل دهد. سیمان LC3 و ۲ درصد حجمی الیاف PP برای رسیدن به این ویژگی‌ها به کار رفت. بازه جریان‌پذیری (روانی) مناسب به منظور پاشش با آزمایش میز جریان اسلامپ مطابق با ASTM C1437 [31] ارزیابی شد. آزمایش‌های پاشش به منظور تایید قابلیت پاشش و توانایی ایجاد لایه پاششی نیز صورت گرفت. خواص مکانیکی HPFRCC پاششی با پارامترهایی از جمله مقاومت فشاری، عملکرد کششی مستقیم و خمشی مورد بررسی قرار گرفت. در انتها نیز به بررسی تفاوت خواص مکانیکی نمونه‌های پاششی و قالبی (درجا ریخته شده) پرداخته خواهد شد.

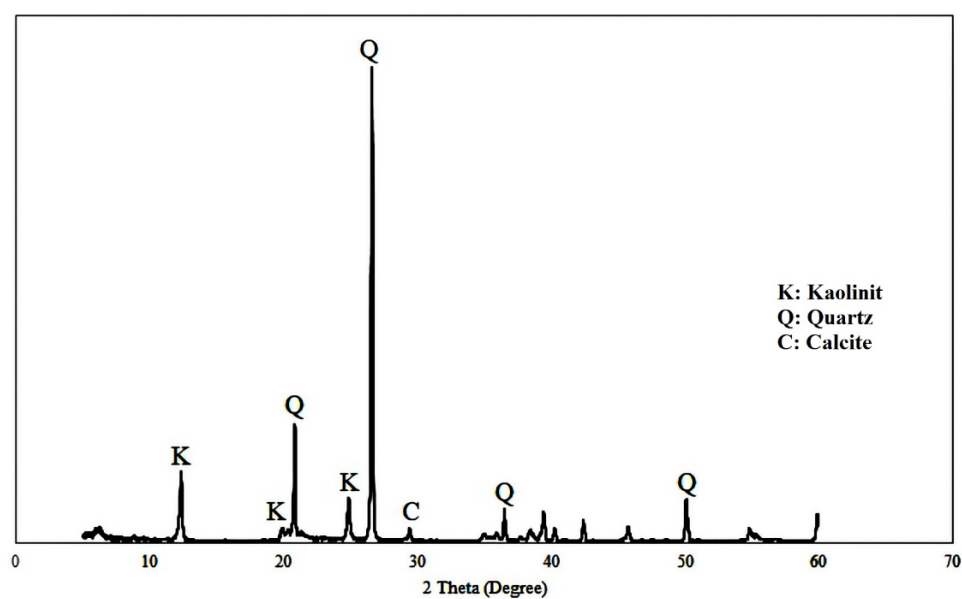
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح آزمایشگاهی

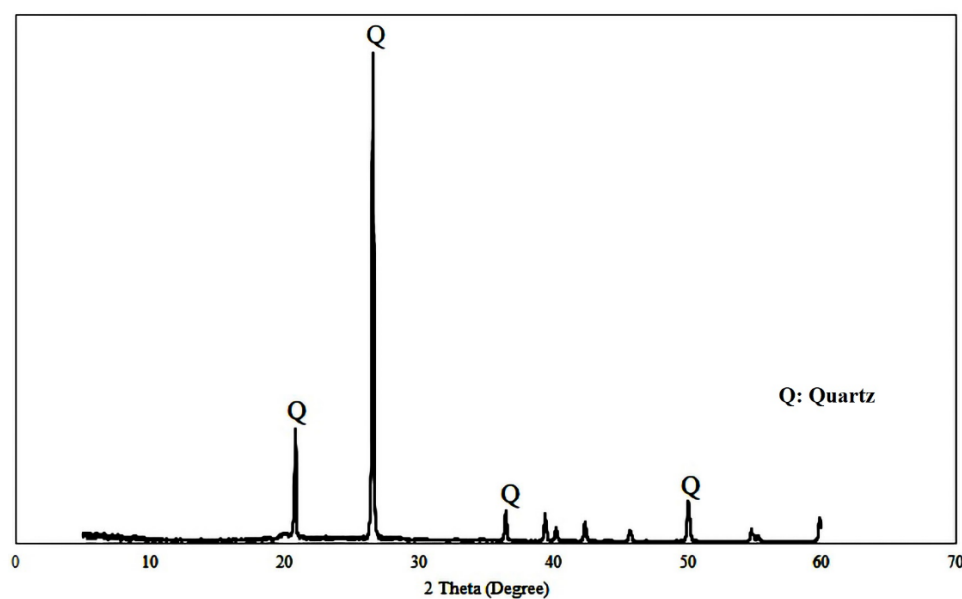
رس خام (RC) استفاده شده در این تحقیق از معدن مرنند- تبریز تهیه شد که دارای درصد بالای کائولینیت (حدود ۴۱٪) و ناخالصی‌های حرارت‌پذیر کم است. با توجه به بررسی‌های اولیه، دمای کلسیناسیون برای این رس ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (مدت ۱ ساعت در کوره الکتریکی بستر ثابت) انتخاب شد و نتایج XRD شکل (۲) نیز نشان داد که تبدیل کامل کائولینیت به فاز آمورف متاکائولن در همین دما حاصل می‌شود. پس دماهای بالاتر می‌تواند فعالیت پوزولانی را محدود کند. جدول (۱) مشخصات شیمیایی

شده (کلسینه شده) استفاده شد. همچنین شکل (۲) نشان دهنده نتایج آزمایش XRD رس خام و کلسینه شده می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فازهای تبلور رس کلسینه شده شامل کوارتز بوده که عملیات حرارت‌دهی، منجر به ناپدید شدن پیک کائولینیت و ظاهر شدن پیک ۲ تا بین زوایای ۲۰ الی ۳۰ درجه شده است که قله‌های کوچک‌تر شکل‌گیری فاز آمورف (پوزولانی) را نشان می‌دهد. پودر سنگ‌آهک، یک محصول جانبی از معدن سنگ‌آهک بوده که به طور گسترده به عنوان ماده افزودنی،

سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱ ساوه (OPC)، رس خام و کلسینه شده (متاکائولن یا MK) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که رس کلسینه شده یک اصطلاح کلی برای انواع رس‌های حرارت دیده است و تنها بخشی از آن‌ها که منشأ کائولینیتی با درصد بالای کائولینیت دارند، با این روش به متاکائولن تبدیل می‌شوند؛ به عبارتی، متاکائولن محصول کلسیناسیون رس کائولینیتی خاص بوده و معادل کل رس‌های کلسینه شده محسوب نمی‌شود. با این حال در این تحقیق از واژه متاکائولن (MK) به جای رس حرارت داده



الف) رس خام



ب) رس کلسینه شده

شکل ۲: پراش اشعه پرتو ایکس

Fig. 2. X-ray diffraction analysis of row clay (RC) and calcined clay (MK): (a) RC; and (b) MK

فیلر، رقیق کننده و واکنش دهنده شیمیایی در سیمان به کار گرفته می شود. پودر سنگ آهک مورد استفاده در این تحقیق (LS) تهیه شده از معادن استان قم می باشد. لازم به توضیح است که رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک مصرفی تا ریزی مورد نظر آسیاب شدند به طوری که درصد باقی مانده مصالح مصرفی روی الک ۲۹۷ میکرون ۹/۷ و ۱۵/۷ درصد به ترتیب می باشد (درصد باقی مانده مصالح مصرفی روی الک ۵۳ میکرون ۲۸ و ۴۴ درصد است). همچنین سنگ دانه های مورد مصرف در این تحقیق (SS) از نوع ریزدانه (ذرات رد شده از الک شماره ۵۰ و باقی مانده روی الک ۱۰۰) و ماسه سیلیسی می باشد. فوق روان کننده (HRWRA) مورد استفاده در این تحقیق بر پایه پلی کربوکسیلیک است.

طرح مخلوط های بررسی شده در جدول (۲) ارائه شده اند. تمامی این طرح ها دارای الیاف ثابتی از جنس پلی پروپیلن می باشند. خواص مکانیکی الیاف مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) نشان داده شده است. در تحقیقی که توسط کریم پور و مظلوم [32] صورت گرفت ثابت شد درصد و طول بهینه الیاف پلی پروپیلن برای دستیابی به خواص مکانیکی قابل قبول به ترتیب ۲ درصد و ۱۲ میلی متر می باشد. بنابراین درصد حجمی و طول الیاف به کار برده شده در تمامی طرح مخلوط های این تحقیق ثابت و مقدار ۲ درصد و ۱۲ میلی متر می باشد. در نام گذاری طرح مخلوط ها حروف A مربوط به نمونه های پاششی و B مربوط به نمونه های قالبی می باشد. همچنین عدد دوم اشاره به نسبت فوق روان کننده به مواد سیمانی دارد.

در تحقیقات مختلف ثابت شده است میزان بهینه جایگزینی سیمان معمولی با سیمان LC3 مقدار ۵۰ درصد به شرح ۵۰ درصد کلینکر، ۳۰ درصد رس کلسینه شده (MK)، ۱۵ درصد پودر

سنگ آهک و ۵ درصد سنگ گچ می باشد [20, 23-24]. بدین منظور میزان جایگزینی سیمان معمولی با سیمان LC3 در این تحقیق ۴۵ درصد به شرح ۵۵ درصد سیمان معمولی، ۳۰ درصد متاکاژولن و ۱۵ درصد پودر سنگ آهک است. به بیان بهتر، به دلیل استفاده مستقیم از سیمان پرتلند (OPC) و عدم استفاده از کلینکر، گچ از طرح اختلاط حذف می شود.

در این تحقیق، پودر سنگ آهک (LS) به دو صورت استفاده شده است: (۱) به عنوان بخشی از ترکیب سیمان LC3 (LC3-LS) و جزئی از فرمولاسیون استاندارد سیمان های سه جزئی به شمار می رود. (۲) به صورت پرکننده خنثی (Filler-LS) که تنها برای کاهش فضای خالی و بهینه سازی روانی مخلوط اضافه شده است. این دو کاربرد در جدول برای جلوگیری از ابهام به صورت مجزا ذکر شده اند.

در جدول (۲) نسبت آب به مواد جامد (W/S)، نسبت جرمی کل آب به مجموع تمام اجزای جامد (پودری/دانه ای) موجود در طرح اختلاط می باشد. این اجزا شامل سیمان LC3 (خود شامل سیمان OPC، رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک درون ترکیب است)، پودر سنگ آهک اضافی (Filler-LS) و ماسه سیلیسی می باشد. این نسبت با نسبت متداول آب به بایندر متفاوت است.

ترتیب اختلاط مصالح در این تحقیق مطابق مرجع [30] می باشد. شکل (۳) ترتیب اختلاط مصالح در این تحقیق را نشان می دهد. در انتها با پایان عملیات اختلاط مواد داخل قالب های مشخص پاشش (نمونه های پاششی) و ریخته (نمونه های قالبی) شده به طوری که یک روز بعد از قالب خارج می شوند و تحت شرایط عمل آوری در آب به مدت ۲۸ روز قرار می گیرند.

جدول ۲. طرح مخلوط های مورد بررسی (درصد وزنی)

Table 2. Mix proportions used to make HPFRCC

Mix	OPC	MK	LC3-LS	Filler - LS	SS	Water	HRWRA *	PP fiber vol%	W/S**
A-1.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	1.5	2	0.3
A-2	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2	2	0.3
A-2.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2.5	2	0.3
A-3	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	3	2	0.3
B-2.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2.5	2	0.3

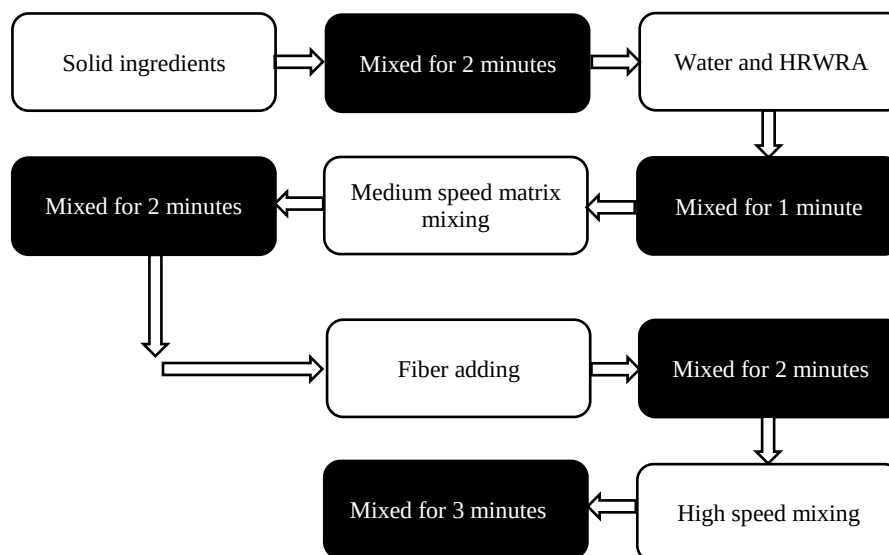
* Superplasticizer-to-binder ratio

** Water-to-solid ingredient ratio (OPC+MK+LC3-LS+Filler-LS+SS)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی‌پروپیلن

Table 3. Properties of PP fiber

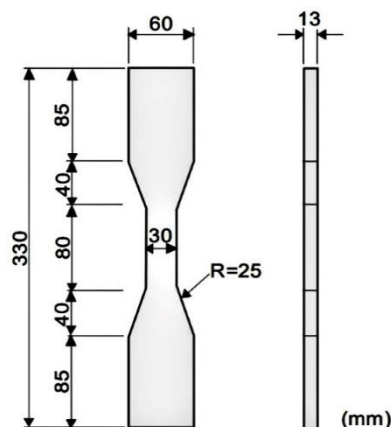
Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Density (Kg/m ³)	Melting point (°C)	(L _f /d _f)
PP	0.035	12	350-400	3.5	910	160	343



شکل ۳. ترتیب اختلاط مصالح

Fig.3. Order of mixing materials

JSCE [34] استفاده شد. شکل (۵) چیدمان طراحی شده برای بررسی مقاومت کششی مستقیم نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این شکل از دو LVDT با هدف بدست آوردن جابه‌جایی استفاده شد. به بیان بهتر، روی بخش میانی هر نمونه دمبلی شکل دو عدد LVDT با دقت بسیار بالا نصب شد و طول گیج برابر ۸۰ میلی‌متر انتخاب شد تا جابه‌جایی خالص سنجیده شود. سیگنال‌ها در طول کل بارگذاری ثبت و بر اساس داده‌های جابه‌جایی خالص، منحنی تنش - کرنش رسم شد. لازم به توضیح است نتایج ارائه شده برای کرنش نمونه‌ها، کرنش مهندسی بوده و با این فرض که تغییر طول به طور یکنواخت در طول معینی از تمام نمونه‌ها (طول اولیه یکسان برای تمامی نمونه‌ها) توزیع شده است، بدست آمده است. با این حال در برخی از موارد، به ویژه در شرایطی که ترک‌ها فقط در نواحی خاصی (لوکالیزه شدن) به وجود می‌آید، تقسیم تغییر طول نمونه به طول اولیه یکسان ممکن است نتایج دقیقی را ارائه ندهد و کرنش مهندسی باید بر اساس تغییر طول در نواحی خاص محاسبه شود. پس در مطالعات توجه به این مورد ضروری می‌باشد. همچنین از نمونه‌های منشوری به ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰



شکل ۴. ابعاد نمونه‌های دمبلی شکل

Fig.4. Dog-bone-shaped samples

۲-۲- آزمایش‌های انجام گرفته

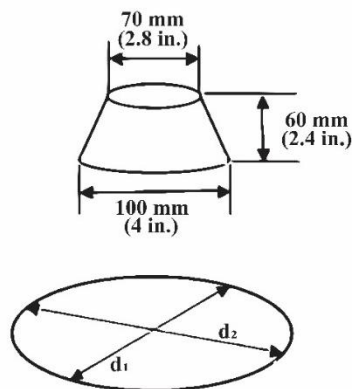
به منظور بررسی خواص مکانیکی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق از مقاومت فشاری، کششی مستقیم و خمشی سه نقطه‌ای استفاده شد. برای بررسی مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C109/C109M-20a [33] استفاده شد. از نمونه‌های دمبلی شکل مطابق شکل (۴) برای آزمایش کشش مستقیم مطابق با استاندارد



شکل ۶. چیدمان خمش سه نقطه‌ای
Fig.6. Three point bending test setup



شکل ۵. چیدمان کشش مستقیم
Fig.5. Direct tensile test setup



شکل ۷. مخروط اسلامپ مورد استفاده قرار گرفته برای آزمایش روانی
Fig. 7. Schematic diagram of the mini-slump cone used to determine the deformability index

باتوجه به مطالب ارائه شده در جدول (۴)، طرح مخلوط A-2.5 با زمان سکون ۱۰ دقیقه به عنوان طرح مخلوط نهایی مناسب برای پاشش انتخاب شد. به بیان بهتر این طرح مخلوط باگذشت زمان ۱۰ دقیقه میزان روانی ۲/۵ (بیشترین روانی مجاز مطابق مراجع قبلی) و باگذشت زمان ۲۰ دقیقه میزان روانی ۲/۲۳ دارد. در ادامه خواص مکانیکی این طرح مخلوط به صورت پاششی و قالبی مورد مقایسه قرار گرفت.

میلی متر برای بررسی مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها مطابق با مرجع [28] استفاده شد. شکل (۶) چیدمان آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد که از یک LVDT برای ثبت جابه‌جایی در مرکز نمونه استفاده می‌شود. لازم به توضیح است که برای هر طرح مخلوط ۳ عدد نمونه مکعبی، ۳ عدد نمونه دمبلی شکل و سه عدد نمونه منشوری به منظور انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۳- نتایج

۳-۱- آزمایش جریان اسلامپ

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود یک مخروط اسلامپ کوچک (با قطر $d_0 = 10 \text{ cm}$) به منظور اندازه‌گیری و سنجش کمی روانی مورد استفاده قرار گرفت. ملات تازه حاصل، برای آزمایش جریان اسلامپ (Flow table test) در بازه‌های ده دقیقه‌ای به کار رفت به طوری که پس از برداشتن مخروط، آزمایش جریان اسلامپ مطابق با ASTM C1437 [31]، انجام شد (۲۵ ضربه در ۱۵ ثانیه). بیشترین قطر افزایش یافته (d_1) و قطر عمود بر d_1 (با علامت d_2) ثبت شده و برای محاسبه شاخص روانی (D) مطابق مرجع [14] مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۴. شاخص روانی طرح مخلوط‌های مورد بررسی

Table 4. Deformability index as a function of time for mixes

Mix	D at start	D at 10 min	D at 20 min
A-1.5	3	1.89	1.4
A-2	3	2.2	2.06
A-2.5	3	2.42	2.23
A-3	3.4	2.8	2.42
B-2.5	3	2.42	2.23

۲-۳- مقاومت فشاری

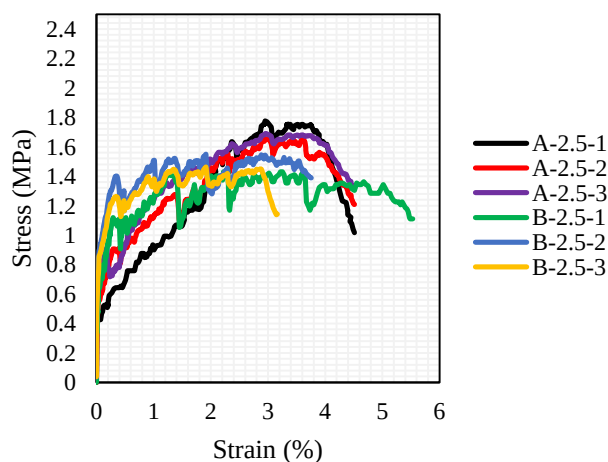
متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های قالبی ۲۰ (مقاومت فشاری نمونه اول ۱۹/۵، نمونه دوم ۲۰/۵ و نمونه سوم ۲۰) و پاششی ۱۸ (مقاومت فشاری نمونه اول ۱۷/۵، نمونه دوم ۱۹ و نمونه سوم ۱۸) مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به این موضوع که طرح مخلوط‌های نوشته شده در این تحقیق با هدف کاربرد آن‌ها در تعمیر، مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد انواع المان‌های سازه‌ای می‌باشد بهبود رفتار کششی مستقیم و خمشی آنها از اهمیت بالاتری نسبت به مقاومت فشاری برخوردار بوده است.

در تحقیقی که توسط هوآنگ و همکاران [28] منتشر شد، یک بررسی سیستماتیک از مواد سیمانی الیافی قابل پاشش با شکل‌پذیری بالا از طرح مواد تا کاربردهای عملی آن به منظور مقاوم‌سازی تیرهای بتنی ارائه شد. در این تحقیق یک HPFRCC قابل اسپری با استفاده از مواد پایه سیمانی، آب، ماسه سیلیسی ریزدانه، فوق‌روان‌کننده پلی کربوکسیلات (SP)، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) و الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) تولید شد. مواد پایه سیمانی شامل پرتلند معمولی و خاکستر بادی بودند. آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های پاششی و قالبی به ترتیب ۲۱ و ۱۸ مگاپاسکال می‌باشد. ژو و همکاران [14] یک ماده پایه سیمانی الیافی توانمند با استفاده از سیمان LC3، افزودنی سولفا آلمینات کلسیم (CSA) و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به منظور افزایش دوام و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه دادند. نمونه‌ها هم به روش قالب‌گیری و هم به روش پاششی تهیه شدند. آن‌ها دریافتند که میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های قالبی و پاششی به ترتیب ۲۲ و ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد.

۳-۳- کشش مستقیم

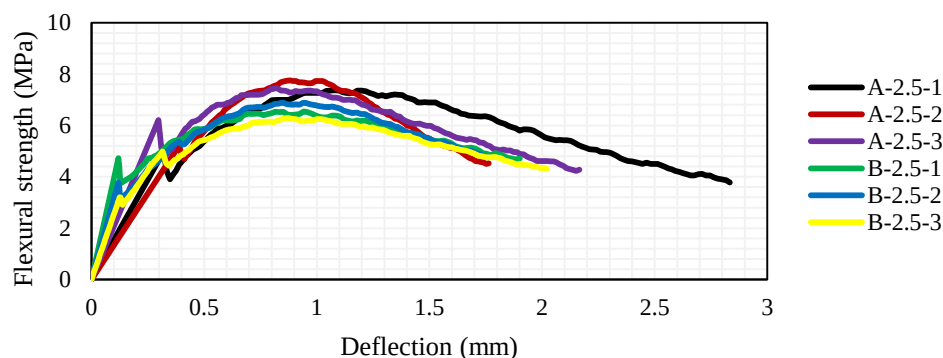
شکل (۸) نمودارهای تنش - کرنش کششی نمونه‌های مورد

بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد (سه نمونه برای روش پاششی و سه نمونه برای روش قالبی). با توجه به این شکل می‌توان دریافت که نمونه‌های پاششی مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های قالبی داشته با این حال ظرفیت کرنش کششی آن‌ها تقریباً برابر است. شکل (۹) چگونگی پاشش طرح مخلوط مورد نظر (A-2.5) را نشان می‌دهد. روش پاشش مورد استفاده در این پژوهش از نوع افقی یا جانبی بوده و جهت‌گیری کلیه قالب‌ها در طول فرآیند پاشش به صورت عمودی می‌باشد، به گونه‌ای که لایه ملات بر سطح داخلی قالب‌ها نشسته است. منظور از پاشش افقی، اعمال ملات با حرکت افشانه به صورت جانبی به سمت دیواره قالب عمودی است. در انتها نیز سطح قالب‌های مورد نظر صاف می‌شود. شایان ذکر است ظرفیت کرنش کششی بالای ثبت شده در شکل (۸)، پیش‌تر در تحقیقات گسترده توسط نویسندگان گزارش شده است [35-37]. در این تحقیقات ۱۸ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که طرح اختلاط‌های نوشته شده حالات مختلفی از نوع سیمان، حالات مختلفی از نوع فیلر، مقدار آنها و حالات مختلفی از نسبت آب به مواد جامد را در بر می‌گرفتند. طرح اختلاط بهینه حاصل به دلیل ریزساختار متراکم، پراکندگی یکنواخت الیاف و پیوند مناسب بین الیاف و ماتریس شکل‌پذیری بسیار بالایی از خود نشان داد. طرح اختلاط استفاده شده در مطالعه حاضر همان طرح اختلاط بهینه این تحقیقات می‌باشد.



شکل ۸. نمودار تنش - کرنش کششی

Fig. 8. Tensile stress-strain curves of the specimens



شکل ۱۰. نمودار خمش سه نقطه‌ای
Fig. 10. Load-deflection curves of samples



شکل ۹. چگونگی پاشش نمونه‌ها
Fig. 9. The procedure of samples spray

۴-۳- خمش سه نقطه‌ای

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود نمودار خمش سه نقطه‌ای طرح مخلوط‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این شکل نمودار خمشی سه نمونه پاششی A-2.5-1، A-2.5-2 و A-2.5-3 و سه نمونه قالبی (B-2.5-1,2,3) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که نمونه‌های پاششی مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های قالبی داشته با این حال ظرفیت تغییر شکل خمشی آن‌ها تقریباً برابر است. لازم به ذکر است در آزمون خمش سه نقطه‌ای، مقادیر بار ثبت شده توسط دستگاه با استفاده از رابطه مربوطه به مقاومت خمشی تبدیل شدند. بنابراین، عنوان محور عمودی مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال می‌باشد. هوانگ و همکاران [28] در تحقیقی به بررسی خواص خمشی (از نمونه‌های منشوری به ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر استفاده شد) کامپوزیت‌های سیمانی الیافی حاوی الیاف پلی‌وینل الکل پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به منظور آزمایش خمش سه نقطه‌ای با سرعت ثابت 0.2 میلی‌متر بر دقیقه از دستگاه 250-kN-INSTRON استفاده کردند. محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها از دهانه تیر مورد آزمایش واقع شده 120 میلی‌متر بوده و از یک جفت LVDT برای اندازه‌گیری تغییر شکل خمشی وسط دهانه تیر استفاده شد. منحنی‌های تنش برحسب تغییر شکل خمشی نمونه‌های اسپری شده و قالبی در روز ۱۴ و ۲۸ بدست آمدند. مشاهده شد که مقاومت و ظرفیت تغییر شکل خمشی نمونه‌های اسپری شده هم در روز ۱۴ و هم ۲۸ بالاتر

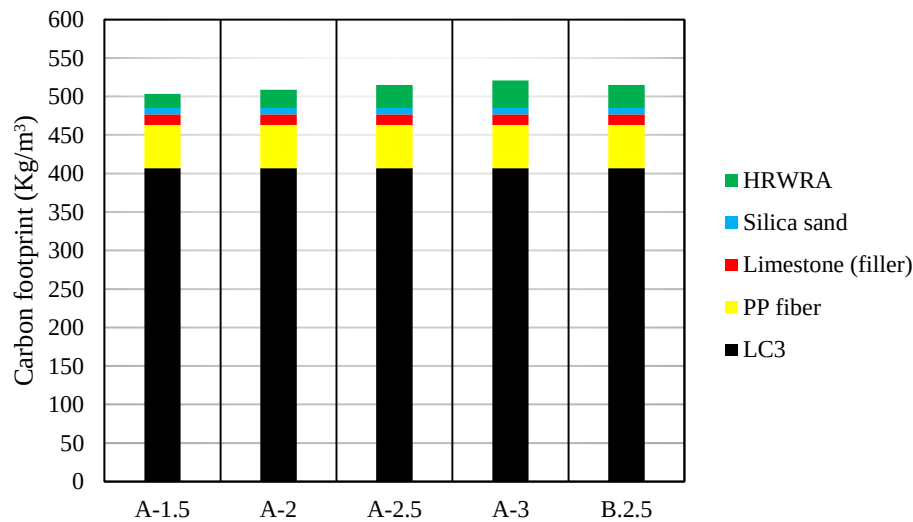
از نمونه‌های قالبی می‌باشد.

۵-۳- شاخص عملکرد مواد (MSI)

به منظور ارزیابی عملکرد طرح مخلوط‌های ساخته شده، شاخص عملکرد مواد (MSI)^۱ از نقطه نظر انرژی مصرف شده و تولید کربن بکار گرفته شد. انرژی مصرف شده همان انرژی کل مورد نیاز برای ساخت ماده و تولید کربن نشان دهنده مقدار کل گازهای گلخانه‌ای (در اینجا CO_2) مرتبط با تولید مواد از جمله استخراج، پردازش، احتراق سوخت، حمل‌ونقل و غیره می‌باشد. داده‌های MSI برای مولفه‌های طرح مخلوط‌ها در جدول (۵) لیست شده و این مقادیر میانگین تخمین زده شده از مقالات و مراجع مختلف هستند به بیان بهتر، ضرایب انرژی مصرف شده و میزان تولید کربن برای هر جزء سازنده طرح اختلاط، از مقادیر میانگین گزارش شده در منابع معتبر استخراج شده است [24]. لازم به توضیح است داده‌های MSI مورد بحث در این تحقیق، بر روی تحلیل عملکرد در سطح مواد طرح مخلوط‌ها تمرکز کرده و برای یک ارزیابی عملکرد دقیق‌تر می‌توان مدل ارزیابی چرخه عمر (LCA)^۲ را بکار برد. شکل (۱۱ و ۱۲) میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف انرژی به ازای هر مترمکعب از طرح مخلوط‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید هر طرح اختلاط با استفاده از رابطه

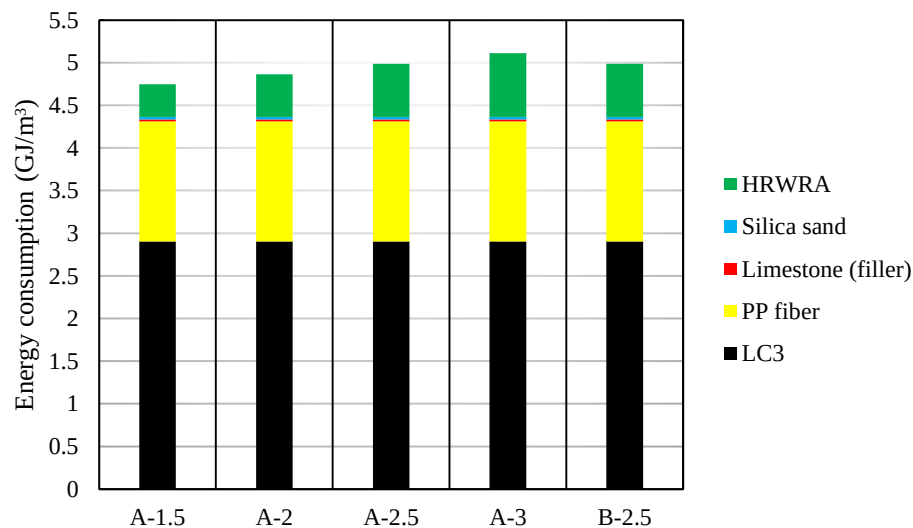
¹ Material Sustainability Index

² Life Cycle Assessment



شکل ۱۱. میزان تولید گاز کربن دی‌اکسید به ازای هر مترمکعب

Fig. 11. Carbon dioxide footprint of mix designs



شکل ۱۲. میزان مصرف انرژی به ازای هر مترمکعب

Fig. 12. Energy consumption of mix designs

میزان مصرف انرژی هر طرح اختلاط با استفاده از رابطه $\sum_{i=1}^n (m_i \times f_i^E)$ محاسبه شد. در این رابطه، m_i جرم جز نام از هر طرح اختلاط (تن بر مترمکعب) و f_i^E ضریب انرژی مصرف شده آن مطابق داده‌های جدول (۵) (گیگاژول بر تن) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی میزان تولید گاز کربن دی‌اکسید و مصرف انرژی افزایش می‌یابد. در نهایت امکان ساخت یک ماده پایه سیمانی الیافی توانمند، سازگار با محیط‌زیست و پاششی میسر شد. جدول (۶) تفاوت کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند پاششی

جدول ۵. شاخص عملکرد مواد [24]

Table 5. Embodied energy and carbon dioxide emissions of mix ingredients [24]

MSI	LC3	PP	SS	LS	HRWRA	Water
Energy (GJ/ton)	4	77.24	0.067	0.08	35	0
CO ₂ (Kg/ton)	560	3100	23.3	37.1	1667	0

از هر طرح اختلاط (تن بر مترمکعب) و $f_i^{CO_2}$ ضریب انتشار آن مطابق داده‌های جدول (۵) (کیلوگرم بر تن) می‌باشد. همچنین

ماتریس می‌توان اثر منفی هواگیری در هنگام فرآیند پاشش را کاهش داد.

۲- مقاومت فشاری نمونه‌های قالبی (درجا ریخته شده) نسبت به نمونه‌های اسپری شده به میزان ۱۱ درصد بالاتر می‌باشد. علت این امر تفاوت در چگالی ظاهری و به دنبال آن میزان تخلخل آن‌ها می‌باشد. به بیان بهتر به دلیل تخلخل کمتر نمونه‌های قالبی میزان مقاومت فشاری آن‌ها بیشتر است.

۳- مقاومت خمشی و کششی نمونه‌های قالبی (درجا ریخته شده) نسبت به نمونه‌های اسپری شده به میزان ۱۴ و ۲۲ درصد به ترتیب کمتر می‌باشند. با این حال ظرفیت تغییر شکل خمشی و ظرفیت کرنش کششی آن‌ها تقریباً برابر است. این را می‌توان با این حقیقت توضیح داد که به دلیل تراکم پنوماتیکی در هنگام فرآیند اسپری کردن، توزیع (پخش) الیاف در نمونه‌های پاششی یکنواخت‌تر بوده و سبب مقاومت خمشی و کششی بیشتر می‌شود.

۴- می‌توان دریافت که آزمایش میز جریان یک روش ساده و عملی برای طراحی HPFRCC پاششی می‌باشد. شاخص روانی حداکثر برابر با ۲/۵ به منظور ضخامت لایه‌گذاری بدون چکیدن و شاخص روانی حداقل ۱/۸ برای کیفیت پودرسازی مناسب HPFRCC در نازل سفارش می‌شود. بدین منظور توصیه می‌شود نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند حاوی رس کلسینه شده مقدار ۲/۵ درصد برای پاشش انتخاب شود. در این نسبت مقدار روانی بعد از گذشت ۱۰ دقیقه (زمان سکون) به عدد ۲/۵ می‌رسد.

جدول ۶. تفاوت کامپوزیت سیمانی الیافی پاششی با کامپوزیت الیافی توانمند M45-ECC

Table 6. Comprehensive properties of A-2.5 and M45-ECC

	A-2.5	M45-ECC
Compressive strength	18 MPa	40 MPa
Peak stress	1.8 MPa	4 MPa
Strain capacity at the peak stress	3.5	3
CO ₂ emission	515 Kg/m ³	650 Kg/m ³
Energy consuption	4.9 GJ/m ³	6.2 GJ/m ³
Cost ratio	1	1.68

توسعه داده شده به کمک مصالح محلی در این تحقیق (A-2.5) با کامپوزیت الیافی توانمند M45-ECC را نشان می‌دهد. کامپوزیت M45-ECC یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین مواد پایه سیمانی الیافی توانمند بوده که معمولاً با سیمان پرتلند معمولی (۵۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب)، خاکستر بادی (۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، ماسه سیلیسی (۴۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب)، آب (۲۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب) و افزودن فوق‌روان‌کننده ساخته می‌شود. الیاف به کار برده شده در کامپوزیت M45-ECC الیاف PVA (۲ درصد حجمی) می‌باشد. نتایج نشان داد که این طرح با بهره‌گیری از سیمان LC3 و الیاف PP، در مقایسه با M45-ECC، حدود ۲۱ درصد انرژی مصرف شده و ۲۰ درصد انتشار گاز کربن دی‌اکسید کمتر دارد. این بهبود چشمگیر ناشی از کاهش میزان کلینکر مصرفی، جایگزینی الیاف کم‌انرژی و استفاده از منابع محلی است که موجب ارتقای همزمان پایداری و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند پاششی (HPFRCC) با استفاده از منابع محلی شامل سیمان LC3 و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی توسعه داده شد تا ضمن کاهش آثار زیست‌محیطی، عملکرد مکانیکی مناسبی نیز ارائه دهد. بررسی‌های اسلامپ نشان داد که طرح A-2.5 با شاخص روانی اولیه ۳ و افت کنترل شده در ۲۰ دقیقه، بهترین توازن بین قابلیت پاشش و لایه‌گذاری را دارد. در کنار دیگر ویژگی‌های این کامپوزیت، می‌توان به تولید کم، هزینه پایین و شکل‌پذیری بسیار بالا اشاره کرد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای تعمیرات و بهسازی زیرساخت‌ها تبدیل می‌کند. بنابراین، طرح A-2.5 را می‌توان به عنوان یک گزینه برتر در ترکیب خواص مکانیکی، مزایای زیست‌محیطی و صرفه اقتصادی معرفی کرد. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- فرآیند پاشش روی میزان هوای مخلوط (ماتریس) و خواص مکانیکی HPFRCC پاشیده شده اثر می‌گذارد. معمولاً با به حداقل رساندن حفرات هوا یا بیرون کردن هوای اضافی از

(آزمایشگاه سازه و زلزله) قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

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

سهم نویسندگان

در انجام این پژوهش سهم نویسندگان یکسان است.

منابع مالی

این پژوهش بدون استفاده از منبع و حمایت مالی صورت پذیرفته است.

۵- میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف انرژی نمونه‌های پاششی نسبت به نمونه‌های قالبی بیشتر می‌باشد. دلیل این موضوع میزان مصرف فوق‌روان‌کننده زیاد برای رسیدن به لزجت مناسب در نمونه‌های پاششی است. به عنوان نمونه در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند حاوی رس کلسینه شده می‌توان نمونه‌های قالبی با میزان نسبت ۱/۵ درصد فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی ساخت این درحالی است که حداقل میزان نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی برای ساخت نمونه‌های پاششی ۲/۵ درصد می‌باشد.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های دانشگاه تربیت مدرس

References

- [1] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2019. Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers. *Advances in Materials Research*, 8(2), pp.137-154. <http://dx.doi.org/10.12989/amr.2019.8.2.137>.
- [2] Dopko, M., Najimi, M., Shafei, B. and et al., 2018. Flexural performance evaluation of fiber-reinforced concrete incorporating multiple macro-synthetic fibers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672, pp.1-12.
- [3] Yazıcı, S., Inan, G. and Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, pp.1250-1253.
- [4] Thomas, J. and Ramaswamy, A., 2007. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, pp.385-392.
- [5] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2021. Fracture of fiber-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 73(14), pp.701-713. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00401>.
- [6] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. and et al., 2015. A review on basalt fiber and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, pp.74-94.
- [7] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2021. Computing the fracture energy of fiber reinforced cementitious composites using response surface methodology. *Advances in Computational Design*, 6(3), pp.225-239. <http://dx.doi.org/10.12989/acd.2021.6.3.225>.
- [8] Yang, E. and Li, V.C., 2010. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. *Construction and Building Materials*, 24, pp.130-9. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.014>.
- [9] Yu, K., Yu, J., Dai, J. and et al., 2018. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. *Construction and Building Materials*, 158, pp.217-27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>.
- [10] Mirzamohammadi, S. and Mazloom, M., 2021. Monitoring the required energy for the crack propagation of fiber-reinforced cementitious composite. *Structural Monitoring and Maintenance*, 8(3), pp.279-294. <https://doi.org/10.12989/smm.2021.8.3.279>.
- [11] Zhu, H.B., Yan, M.Z., Wang, P.M. and et al., 2015. Mechanical performance of concrete combined with a novel high strength organic fiber. *Construction and Building Materials*, 78, pp. 289-294.
- [12] Khaliq, W. and Kodur, V., 2011. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41.
- [13] Ding, Y., Azevedo, C., Aguiar, J.B. and et al., 2012. Study on residual behavior and flexural toughness of fiber cocktail reinforced self-compacting high-performance concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, 26, pp.21-31.
- [14] Zhu, He., Yu, K. and Li, V.C., 2021. Sprayable engineered cementitious composites (ECC) using calcined clay limestone cement (LC3) and PP fiber. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103868>.
- [15] Longhi, M.A., Rodríguez, E.D., Walkley, B. and et al., 2020. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation. *Composites Part B: Engineering*, 182, 107671.
- [16] Panda, B., Ruan, S., Unluer, C. and et al., 2020. Investigation of the properties of alkali-activated slag

- mixes involving the use of nanoclay and nucleation seeds for 3D printing. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107826.
- [17] Muzenda, T.R., Hou, P., Kawashima, S. and et al., 2020. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. *Cement and Concrete Composites*, 103516.
- [18] Gbozee, M., Zheng, K., He, F. and et al., 2018. The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes. *Applied Clay Science*, 158, pp.186-194.
- [19] Dhandapani, Y. and Santhanam, M., 2017. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. *Cement and Concrete Composites*, 84, pp.36-47.
- [20] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M. and et al., 2018. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, pp.136-151.
- [21] Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. and et al., 2012. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), pp.1579-1589.
- [22] Shi, Z., Geiker, M.R., De Weerd, K. and et al., 2017. Role of calcium on chloride binding in hydrated Portland cement–metakaolin– limestone blends. *Cement and Concrete Research*, 95, pp.205-216.
- [23] Zhang, D., Jaworska, B., Zhu, H. and et al., 2020. Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Composites*, 114.
- [24] Zhu, H., Zhang, D., Wang, T. and et al., 2020. Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers. *Construction and Building Materials*, 259.
- [25] Li, Y., Li, W., Deng, D. and et al., 2018. Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement matrices. *Cement and Concrete Composites*, 88, pp.139-149.
- [26] Q. Du, J. Wei, and Lv J., 2017. Effects of High Temperature on Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composites. *International Journal of Civil Engineering*. <http://doi.org/10.1007/s40999-017-0245-0>.
- [27] Al-Qadi, A.N. and Al-Zaidyeen, S.M., 2014. Effect of fiber content and specimen shape on residual strength of polypropylene fiber self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Journal of King Saud University*, 26(1), pp.33-39.
- [28] Huang, B.T., Li, O.H., Xu, S.L. and et al., 2019. Strengthening of reinforced concrete structure using sprayable fiber reinforced cementitious composites with high ductility. *Composite Structures*, 220, pp.940-952.
- [29] Feng, J., Yang, F. and Qian, S.h., 2021. Improving the bond between polypropylene fiber and cement matrix by nano calcium carbonate modification. *Construction and Building Materials*, 269.
- [30] Felekoglu, B., Felekoglu, K.T., Ranade, R. and et al., 2014. Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. *Composites Part B: Engineering*, 60, pp.359-370.
- [31] ASTM C1437-15, 2015. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [32] Karimpour, H. and Mazloom, M., 2022. Pseudo-strain hardening and mechanical properties of green cementitious composites containing polypropylene fibers. *Structural Engineering and Mechanics*, 8(2), pp.575-589.
- [33] ASTM C109/C109M-20a, 2020. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [34] JSCE (Japan Society of Civil Engineers), 2008. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks, pp.1-16. Tokyo.
- [35] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Development of a green high-performance fiber-reinforced cementitious composite using local ingredients. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(4). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16362>.
- [36] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Impacts of interfacial bonding between concrete substrate and cast/sprayed HPFRCC on flexural behaviour. *Magazine of Concrete Research*, 76(16), pp.933-945. <https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00249>.
- [37] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Mechanical behavior of HPFRCC using limestone calcined clay cement (LC3) and oxygen plasma treated PP fibers. *Structural Engineering and Mechanics*, 89(4), pp.349-362. <https://doi.org/10.12989/2024.89.4.349>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mirzamohammadi, S. and Soltani Mohammadi, M. 2026. Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.95-109.



Content

Article Title and Authors Names	Page
Assessing Experimental Relationships and Numerical Modeling for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weirs using Response Surface Methodology 7 <i>Akbar Safarzadeh, Houshang Velayati</i>	7
Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience 19 <i>Maryam Khalajzadeh, Safoora Morshed-Shekarchi , Afshin Meshkat-Dini, Ali Massumi</i>	19
Prediction of Accidents at Rail-Road Grade Crossings Using the Poisson Mode 33 <i>Seyed Ali Mosayebi, Mohammad Hosseini, Reza Mohammad Hasany</i>	33
Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City 49 <i>Koosha Aghazadeh, Reza Attarnejad</i>	49
Solving Viscoelastic Problems Using Complex Fourier Boundary Element Method 65 <i>M. Bahrampour, S. Hamzehei-Javaran, S. Shojaee</i>	65
Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete 79 <i>H. Nasaj Moghadam, F. Jandaghi Alaei</i>	79
Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement 95 <i>Sajjad Mirzamohammadi, Masoud Soltani Mohammadi</i>	95

Guide for authors

Authors are requested to follow the instructions below in the submitted manuscripts.

- 1- It must be noticed that Modares civil journal is officially a Persian journal and manuscripts must be provided in Farsi.
- 2- Manuscripts to be submitted in Modares civil journal include the research papers expressing the authors investigations in civil engineering branches (Structural Engineering, Earthquake Engineering, Hydraulic Structures, Water resource and coastal engineering, Geotechnical Engineering Road construction Transportation Management, water and environmental engineering). The journal is indexed in scientific database of ISC and SID.
- 3- Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint) or is not under review by another journal. Authors are responsible for the points which are mentioned through the text and the journal has the official right for accepting or rejecting the manuscripts.
- 4- Manuscripts to be published in this journal are of two types:
 - a. Original research papers: preferably no more than 12 pages of journal format including tables and illustrations with minimum and maximum of 2500 and 3500 words, respectively.
 - b. Short communications: no more than 10 pages of journal format including tables and illustrations with maximum of 2500 words.

Note 1: Review papers are accepted if written by experienced authors having special publications on the reviewed topics.

Note 2: Translated papers are not considered in review process.

- 5- Ensure that the following items are provided in your manuscript:
 - a. Title, Abstract, Keywords (4 words), all in Farsi Authors Names. They must be introduced by their full name and their affiliation. One author has been designated as the corresponding author with contact details: E mail address, Full postal address, Telephone and Fax number.
 - b. Body of the manuscript including introduction, description of the applied or proposed research approach, analysis and discussion, conclusion, acknowledgment and references.
 - c. Title, Keywords (4 words), Author names and addresses all in English. English Extended Abstract (maximum of one page and 500 words).
- 6- Please check the following notes in the body of your manuscript:
 - a. Fundamental expressions and terms must be represented by best phrases in Farsi. Abbreviations are to be referenced in footnotes.
 - b. Figures, graphs and tables must be represented by their referred order. Figures are to be sent individually with the resolution of 300 dpi in black and white format. Title of the figures and tables must be presented in both Farsi and English, at the lines up and bottom of the objects, respectively.
 - c. Using grid and border lines are not accepted for tables and graphs.
- 7- Under the "Reference" section, referred publications must be sorted by their appearance through the text. The way in which the references are introduced is as below:
 - a. Books: Last name, First name of the author(s), Title, Translator's name, Publication country (city), Publication company, Year of publication, Number of pages.
 - b. Papers: Last name, First name of the author(s), Title, Journal Name, Series (Volume), Year of publication, page numbers.

- 8- Journal format contains single line, double column (with 1 cm space between) manuscripts written by Narrow B Lotus font (12pt) for Persian contents and Times New Roman (10pt) for English contents in Microsoft Word 2010 and A4 Paper with 1.5cm margins from left and right.
- 9- Papers extracted from the PhD or MSc dissertations, are published with the names of student, supervisor and advisors. In this case, the supervisor is introduced as corresponding author.
- 10- To submit the paper, an author have to:
 - a. Register in journal's web page.
 - b. Follow the step by step procedure of uploading the required information.
 - c. Upload the manuscript and related files.
 - d. Obtain the submission code and save it for further use.

Editorial office of Journal:

Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Jalal e al e Ahmad highway,
Tehran.

Post box: 14115-143

Phone and Fax: +98 21 82884950

Website: <http://civil.journals.modares.ac.ir>

Email: civiljournal@modares.ac.ir

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Scientific Research Quarterly

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

Founder and Publisher: Tarbiat Modares University
Executive Manager: Farhad Daneshjoo (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Editor-in-Chief: Masoud Ghodsian (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Assistant Director: Zahra khoiniha

Editorial Board:

Dr. Abas	Afshar	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Ali Akbar	Aghakochak	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Mohammad Taghi	Ahmadi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hamid	Behbahani	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Farhad	Daneshjoo	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hossein	Ganjidoust	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. GholamReza	Ghodrati Amiri	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Masoud	Ghodsian	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Aboalfazl	Hassani	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Shahrokh	Malek	Assist.Prof. of Civil Eng. University of Tehran
Dr. Shervin	Maleki	Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Seyed Ahmad	MirBagheri	Assoc.Prof. of Civil Eng. K.N.Toosi University of Science and Tech.
Dr. MajdAldin	Hosseini	Assoc.Prof. of Civil Eng. Amirkabir University of Technology
Dr. Mahmood	Safarzadeh	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Ali Akbar	Salehi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Masoud	Tajrishi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Shahaboddin	Yasrobi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University

Editorial Arbitrators Board:

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

Technical Editor: Zahra Azizi
English Editor: Fateme Torabi

Executive Expert: Zahra khoiniha
Type and Layout: Masoud Sarvari

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

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

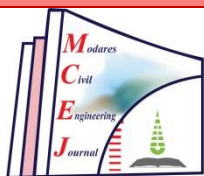
Post Box: 14117-13116.

Tel & Fax: +98 (21) 82884950

Email: civiljournal@modares.ac.ir

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

www.ISC.ir & www.SID.ir



Modares Civil Engineering Journal



Scientific Journal

Volume 26, Issue 2, 2026 (Serial: 88)

Executive Manager: Farhad Daneshjoo

Owner and Publisher: Tarbiat Modares University

- **Assessing Experimental Relationships and Numerical Modeling for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weirs using Response Surface Methodology**
Akbar Safarzadeh, Houshang Velayati
- **Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience**
Maryam Khalajzadeh, Safoora Morshed-Shekarchi, Afshin Meshkat-Dini, Ali Massumi
- **Prediction of Accidents at Rail-Road Grade Crossings Using the Poisson Mode**
Seyed Ali Mosayebi, Mohammad Hosseini, Reza Mohammad Hasany
- **Implementation of an Advanced Modern System for Seawater Desalination and Transportation: A Case Study of Chalus City**
Koosha Aghazadeh, Reza Attarnejad
- **Solving Viscoelastic Problems Using Complex Fourier Boundary Element Method**
M. Bahrapour, S. Hamzehei-Javaran, S. Shojaee
- **Experimental investigation on mechanical and durability properties of twisted basalt fiber reinforced concrete**
H. Nasaj Moghadam, F. Jandaghi Alaei
- **Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement**
Sajjad Mirzamohammadi, Masoud Soltani Mohammadi

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