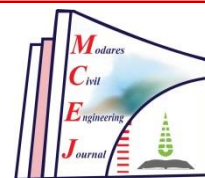




دانشگاه تربیت مدرس

دو ماهنامه

مهندسی عمران مدرّس



دوره ۲۵، شماره ۱، سال ۱۴۰۴ (شماره پیاپی: ۸۱)

نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول: فرهاد دانشجو

- بررسی کمانش دینامیکی ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب
امیرحسین طاهرخانی، مجید امین افشار
- بررسی تفسیرپذیری الگوریتم پروبیت ترتیبی در تجزیه و تحلیل تأثیر زمان وقوع بر شدت تصادفات در آزادراه‌های برون‌شهری
میثم عفتی، امیرمحمد رمضانپور
- بررسی میزان تأثیر عوامل هواشناسی و پیوستگی هیدرولوژیکی بر تبخیر از مخازن چاه‌نیمه‌های سیستان در دوره‌های هواشناسی مختلف
سعید ملکی، سیدحسین مهاجری، مجتبی مهرآیین
- شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان به کمک روش‌های خروجی-تنها
سیدرسول نبویان، سیدامین مصطفویان، بهرام نوائی نیا، محمدرضا داودی
- روش پیشنهادی جدید برای ارزیابی ظرفیت باربری پایه پل‌های بتنی آسیب‌دیده پس از زلزله‌های حوزه نزدیک
فرهاد دانشجو، مختار انصاری
- ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی - بتنی
هادی زرین طلا، احمد ملکی، محمد علی لطف الهی یقین
- بررسی تأثیر کربنات کلسیم بر فرآیند جامدسازی پایه‌سیمانی بتونیت و فلزسنگین
وحید رضا اوحدی، ریحانه صفادوست، بهنام یوسفی، زینب میرزازاده

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)
زهره خوثینی 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: زهره عزیزی
ویراستار انگلیسی: فاطمه ترابی
کارشناس اجرایی: زهره خوثینی 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 ۲۵، شماره ۱، سال ۱۴۰۴

اعتبار علمی - پژوهشی

اعتبار مجله علمی مهندسی عمران مدرس در جلسه مورخ ۱۳۸۸/۱۰/۰۹ کمیسیون نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری مورد ارزیابی قرار گرفت و با درجه علمی - پژوهشی به 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	بررسی کمانش دینامیکی ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب امیرحسین طاهرخانی، مجید امین افشار
۲۱	بررسی تفسیرپذیری الگوریتم پرویت ترتیبی در تجزیه و تحلیل تأثیر زمان وقوع بر شدت تصادفات در آزادراه‌های برون‌شهری میثم عفتی، امیرمحمد رمضانپور
۳۳	بررسی میزان تأثیر عوامل هواشناسی و پیوستگی هیدرولوژیکی بر تبخیر از مخازن چاه‌نیمه‌های سیستان در دوره‌های هواشناسی مختلف سعید ملکی، سیدحسین مهاجری، مجتبی مهرآیین
۴۵	شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان به کمک روش‌های خروجی-تنها سیدرسول نبویان، سیدامین مصطفویان، بهرام نوائی نیا، محمدرضا داودی
۵۹	روش پیشنهادی جدید برای ارزیابی ظرفیت باربری پایه پل‌های بتنی آسیب‌دیده پس از زلزله‌های حوزه نزدیک فرهاد دانشجو، مختار انصاری
۷۱	ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی - بتنی هادی زرین طلا، احمد ملکی، محمد علی لطف الهی یقین
۸۷	بررسی تأثیر کربنات‌کلسیم بر فرآیند جامدسازی پایه‌سیمانی بتونیت و فلزسنگین وحید رضا اوحدی، ریحانه صفادوست، بهنام یوسفی، زینب میرزازاده

Investigating The Dynamic Buckling of A Column with Variable Section and Viscous Damper under Intermittent Axial Load

Amir Hossein Taherkhani¹, Majid Amin Afshar^{2*} 

1. Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Abstract

The use of members with non-uniform cross-sections due to the reduction of the number of materials and the weight of the structure is widely used in industrial structures and metal bridges. Buckling is one of the major problems engineers face in the design of axial compression members (columns). For this reason, several researches have been conducted by researchers in the field of column buckling. Most of the previous research is limited to investigating stability and buckling in Non-prismatic elastic columns in the static state. During an earthquake, the structure is subjected to vertical and lateral earthquake loads. To evaluate the dynamic behavior of the structure during an earthquake, the stability and dynamic buckling of the column must be evaluated. The effect of the earthquake's vertical load and the dynamic axial load has an effect on the dynamic stability of the member in the form of the second-order effect of buckling. In this article, the dynamic buckling of a column with a variable section and viscous damper under alternating axial load is investigated in a comprehensive model. The alternating axial load effect is assumed as a cosine function and the viscous damping effect at the end of the member is assumed as a Dirac delta function. The changes in the moment of inertia along the length of the column are considered in three modes: linear, cubic, and fourth-order changes. The constituent differential equation includes column strain energy, second order effect of alternating axial load, inertia per unit length of the column, and damping of a viscous damper. To solve the constitutive equation, first the weak form of the governing differential equation is written. Lagrange interpolation functions are used as the shape function and the Fourier function (proposed by Bolotin) as the dynamic response of the equation. In the next step, the matrices of material hardness, geometric hardness, and mass are extracted. After extracting the above matrices, the eigenvalues (Buckling load factor, natural frequency) of the equation are checked. Muller root finding technique is used by coding in MATLAB software to calculate eigenvalues. For accuracy in calculations, the function of the form of the equation is checked by the Lagrange method with the number of thirty terms. Also, finding the roots of the equation to calculate the eigenvalue is done with a step of 0.05 using Mueller's method. The buckling load coefficient of the column is evaluated for different values of the expansion coefficient and the damping percentage of the viscous damper in different boundary conditions. The results show that the mentioned values have a significant effect on the changes in the buckling load factor in terms of excitation frequency and resonance frequency. Depending on the boundary conditions, increasing the opening factor causes the diagram to move to the right or left side of the dimensionless excitation frequency axis. Also, increasing the damping coefficient of the viscous damper causes the diagram to move to the left side of the dimensionless excitation frequency axis. Dimensionless parameters such as bar coefficient, excitation frequency, and opening coefficient have been used to report the dynamic behavior of the set in all the tables and figures. The results of this research can be generalized for the design of columns under periodic axial load. The results of this article are verified and compared with previous research. There is an acceptable agreement between the results of the present article and previous research.

Review History

Received: May 23, 2023

Revised: Oct 08, 2023

Accepted: Feb 28, 2024

Keywords

Dynamic Buckling

Dynamic Stability

Buckling Load Factor

Critical Load Capacity

Analysis EigenValue

* Corresponding Author Email: mj.afshar@eng.ikiu.ac.ir - ORCID: 0000-0003-3776-1009



بررسی کمانش دینامیکی ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب

امیرحسین طاهرخانی^۱، مجید امین افشار^{۲*} 

۱. کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین، قزوین، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین، قزوین، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

به‌کارگیری اعضای با مقطع غیریکنواخت به دلیل کاهش مقدار مصالح و وزن سازه به طور گسترده در سوله‌های صنعتی و پل‌های فلزی مرسوم است. کمانش از مشکلات عمده‌ای است که مهندسان در طراحی اعضای تحت فشار محوری (ستون‌ها) با آن مواجه‌اند. به همین دلیل، پژوهش‌های متعددی توسط پژوهشگران در زمینه کمانش ستون‌ها انجام شده است. بیشتر پژوهش‌های پیشین، محدود به بررسی کمانش استاتیکی در ستون‌های غیرمنشوری الاستیک است. در مقاله حاضر، در مدلی جامع کمانش دینامیکی ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب بررسی می‌شود. اثر بارمحوری متناوب به صورت تابع کسینوسی، اثر میراگر ویسکوز در انتهای عضو و تغییرات ممان اینرسی در سه حالت تغییرات خطی، مکعبی و مرتبه چهارم لحاظ می‌شود. برای حل معادله تشکیل شده، ابتدا شکل ضعیف معادله دیفرانسیل حاکم نوشته می‌شود. از توابع میان‌یابی لاگرانژ به‌عنوان تابع شکل و از تابع فوریه (پیشنهادی بولوتین) به‌عنوان پاسخ دینامیکی معادله استفاده می‌شود. در گام بعدی، ماتریس‌های سختی مصالح، سختی هندسی و جرم استخراج می‌شود. پس از استخراج ماتریس‌های فوق، مقادیر ویژه (ضریب بارکمانشی) معادله بررسی می‌شود. از تکنیک ریشه‌یابی مولر به‌وسیله کدنویسی در نرم‌افزار متلب برای محاسبه مقادیر ویژه استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی

کمانش دینامیکی
پایداری دینامیکی
ضریب بارکمانشی
ظرفیت بار بحرانی
تحلیل مقدار ویژه

ضریب بارکمانشی ستون به‌ازای مقادیر مختلفی از ضریب بازشوندگی و درصد میرایی میراگر ویسکوز در شرایط مرزی مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر مذکور تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس تحریک و فرکانس تشدید دارند. تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس تحریک به صورت تابع‌نمایی است. نتایج مقاله حاضر با پژوهش‌های پیشین درستی‌آزمایی و مقایسه می‌شود. هماهنگی قابل‌قبولی بین نتایج مقاله حاضر و پژوهش‌های پیشین برقرار است.

۱- مقدمه

نخستین بار تیموشنکو^۱ [1]، وانگ^۲ [2]، بازانت^۳ [3]، مورلی^۴ [4] به مطالعه ظرفیت بارکمانشی ستون‌های الاستیک بر مبنای روش‌های حل بسته معادله دیفرانسیل حاکم یا تقریبی عددی

اعضای با مقطع متغیر به علت به حداقل رساندن مصرف مصالح و وزن سازه و افزایش ظرفیت بار بحرانی کمانشی، کاربرد فراوانی در سازه‌های فولادی به ویژه سوله‌های صنعتی و پل‌های فلزی دارند. بدین منظور تحقیقات زیادی توسط پژوهشگران برای ارزیابی پایداری در ستون‌های غیر منشوری صورت گرفته است.

¹ Timoshenko

² Wang

³ Bazant

⁴ Morley

استفاده از ترکیب بسط مک لورن و روش سری‌های توانی بررسی شده است. سلطانی و عسگریان^{۱۱} [14] به بررسی پایداری ستونی غیر منشوری تیموشنکو با شرایط مرزی گیردار - آزاد بر مبنای روش سری توانی پرداختند. بر اساس تئوری تیر تیموشنکو، معادلات تعادل در زمینه جابه‌جایی‌های کوچک با در نظر گرفتن اثر کوپل بین انحراف عرضی و زاویه چرخش به دست آمده است. بولوتین^{۱۲} [15] نخستین بار به بررسی کماتش دینامیکی سیستم‌های مکانیکی پرداخت. ایشان با معرفی یک بارگذاری دینامیکی مشخص برای سیستم دینامیکی بر مبنای روش‌های تحلیلی به مطالعه پایداری دینامیکی سیستم پرداخت. در بخشی از پژوهش ایشان، به بررسی کماتش دینامیکی ستون‌های الاستیک منشوری تحت بار محوری دینامیکی پرداخت. ایشان بر مبنای روش تحلیلی و ارائه تابع سری فوریه به عنوان پاسخ، تغییر مکان دینامیکی ستون را بررسی کرد و نشان داد که فرکانس تحریک بر بار کماتشی دینامیکی اثرگذار است. دوویدی و همکاران^{۱۳} [16] به مطالعه و بررسی ناپایداری تیری ساندویچی سه لایه متقارن با هسته نرم و تحت یک نیروی محوری نوسانی پرداختند. ایشان از روش گالرکین تعمیم یافته برای استخراج معادلات حرکت به یک مجموعه از معادلات بی بعد متیو - هیل با ضرایب مختلط استفاده کرده‌اند. اوایانگ^{۱۴} [17] به بررسی پایداری دینامیکی تیری الاستیک اولر - برنولی تحت اثر جرم متحرک ساده پرداخت. ایشان از روش تئوری آشوب^{۱۵} و روش مقیاس چندگانه^{۱۶} برای بررسی اثر جرم متحرک بر پایداری تیر استفاده کرد. قنادپور^{۱۷} و همکاران [18] به بررسی کماتش و ارتعاشات تیر اولر - برنولی غیرمحملی به روش ریتز پرداختند. ژیرالدو - لندونیو و آریستیزابال - اوچوا^{۱۸} [19] به بررسی پایداری دینامیکی ستون لاغر الاستیک با اتصالات نیمه سخت، میرایی و اینرسی دورانی تحت بار محوری متناوب پرداختند. مطالعات پژوهش فوق نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی ستون‌ها تحت بارگذاری متناوب به شدت تحت تأثیر سختی خمشی اتصالات نیمه سخت و میرایی قرار می‌گیرد، اما لحاظ اینرسی دورانی در معادله متشکله تأثیر چندانی بر رفتار دینامیکی عضو

پرداختند. سیگینر^۱ [5] به بررسی پایداری ستون الاستیک با مقطع مخروطی پرداخت. ایشان، تغییرات ممان اینرسی در طول ستون را خطی پیوسته فرض کرده است و از توابع بسط برای محاسبه بار کماتشی ستون بهره گرفته است. لی^۲ [6] و ال سدر^۳ [7] به بررسی پایداری ستون‌های الاستیک غیر منشوری با استفاده از روش سری‌های توانی (ریتز) پرداختند. لو و هوآنگ^۴ [8] به بررسی ارتعاش آزاد تیر تیموشنکو باریک شونده با مواد مدرج تابعی پرداختند. ایشان از روش سری‌های توانی برای حل معادله متشکله بهره گرفتند. مواد تابعی مدرج، مواد مرکبی هستند شامل دو یا چند نوع ماده که خواص آنها به صورت تابعی تغییر کرده و به صورت درجه بندی کنار هم قرار می‌گیرند. حدیدی و همکاران^۵ [9] به تحلیل غیرخطی مرتبه دوم تیرهای با مقطع متغیر پرداختند. ایشان از روش سری‌های توانی برای حل معادله متشکله بهره گرفته‌اند. ایشان، اثر بارهای متمرکز در طول تیر را نیز در نظر گرفتند. صفوی و حق الهی^۶ [10] به بررسی بار کماتشی خمشی ارتجاعی ستون‌های با مقطع متغیر در قاب‌های شیب‌دار آزاد در برابر حرکت جانبی پرداختند. برای حل معادله حاکم از روش ترکیبی انرژی و تفاضل محدود استفاده شده است. بلیک و همکاران^۷ [11] به بررسی بار کماتشی، طول مؤثر ستون‌های با مقطع متغیر در یک سوله صنعتی پرداختند. از روش تحلیلی برای حل معادله دیفرانسیل حاکم استفاده شده است. پایداری ستون‌های قاب در حالت با مهاربند و مهارنشده بررسی شده است و برای درستی آزمایی، نتایج تحقیق با نرم افزار انسیس^۸ مقایسه شده است. فتحی و همکاران^۹ [12] به بررسی پایداری ستون‌های دارای اتصالات نیمه صلب، دارای نقص اولیه و تغییر شکل‌های برشی پرداختند. ایشان معادله دیفرانسیل حاکم را بر مبنای روش شیب افت استخراج کرده است. پس از حل معادله، پارامترهای بار کماتشی و لنگرهای ایجاد شده ستون‌های قاب به دست آمده است. عسگریان^{۱۰} [13] به بررسی پایداری ستون‌های مدرج تابعی با سطح مقطع متغیر نمایی پرداخت. در این پژوهش، معادله حرکت حاکم بر ارتعاش آزاد تیرهای ماهیچه‌ای با مقطع متغیر نمایی با

¹ Siginer² Lei³ Al Sadder⁴ Luo, Huang⁵ Hadidi et al⁶ Safavi, Haghollahi⁷ Bilyk et al⁸ Ansys⁹ Fathi et al¹⁰ Asgarian¹¹ Soltani, Asgarian¹² Bolotin¹³ Dwivedy et al¹⁴ Ouyang¹⁵ Perturbation method¹⁶ Method of Multiple Scales¹⁷ Ghannadpour et al¹⁸ Giraldo-Londoño, Aristizábal-Ochoa

می‌شود. فرض می‌شود ستون مورد نظر در زمان رخداد زلزله تحت بار دینامیکی زلزله مولفه قائم قرار می‌گیرد. برای لحاظ اثر بار قائم زلزله، بار محوری P به صورت مجموع بارمحوری هارمونیک و استاتیکی نوشته می‌شود.

شکل ۱. ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب

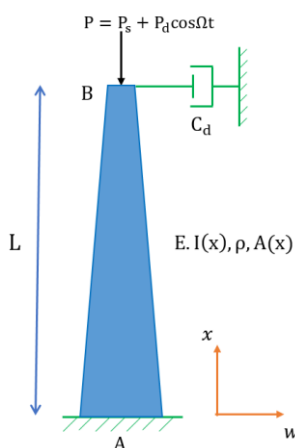


Fig. 1. A column with variable section and viscous damper under alternating axial load

۲-۱- استخراج معادله دیفرانسیل حرکت بر مبنای روش همیلتون

در این بخش با استفاده از روش همیلتون، معادله متشکله مجموعه موردنظر استخراج می‌شود. بدین منظور باید اصل همیلتون برای کارهای جنبشی، خارجی و پتانسیل ناشی از (اینرسی در واحد طول ستون، بار کمانش محوری، انرژی کرنشی ستون و میراگر ویسکوز و میرایی ذاتی) نوشته شود.

مطابق تئوری تیر اوپلر - برنولی، فرضیه‌های ذیل برقرار می‌باشند:

سطح مقطع ستون بعد از تغییر شکل مسطح باقی می‌ماند. یعنی ستون دارای یک تغییر مکان در پلان $x - z$ و یک دوران حول محور y است. از آثار اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی در پلان $x - z$ صرف نظر می‌شود. زاویه دوران کوچک بوده به گونه‌ای که فرضیه زوایای کوچک صادق است. بدین ترتیب، برای تیر اوپلر - برنولی میدان‌های جابه‌جایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\phi(x, z, t) = -z \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

$$w(x, z, t) = w(x, t) \quad (2)$$

در رابطه فوق فرض می‌شود که محورهای x و z به ترتیب در جهت طول و ضخامت هستند و z نسبت به تار خشی اندازه‌گیری می‌شود. w معرف جابه‌جایی عرضی ستون است. کرنش عرضی بر

ندارد. پوراصغر و کاماریان^۱ [20] به مطالعه پایداری دینامیکی ستون نانوکامپوزیت درجه‌بندی شده غیریکنواخت تقویت شده توسط نانولوله کربنی روی بستر وینکر پرداختند. آزاربنی و انصاری^۲ [21] به مطالعه پایداری دینامیکی نانولوله کربنی تحت بارگذاری استاتیکی و متناوب محوری با استفاده از روش فلوکت - لیاپانوف پرداختند. هنائو و همکاران^۳ [22] به مطالعه پایداری دینامیکی تیری تیموشنکو غیرمنشوری الاستیک پرداختند. آثار تغییر شکل برشی در امتداد عضو، نیروی برشی مرتبه دوم ناشی از بارمحوری در معادله متشکله لحاظ شده است. پایداری دینامیکی عضو در حالات مقطع مخروطی و پلکانی بررسی شده است. همان‌طور که بیان شد، پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی پایداری استاتیکی ستون‌های غیر منشوری انجام شده است. در صورتی که برای طراحی جامع باید مقاومت و پایداری ستون تحت انواع بارگذاری ثقلی و دینامیکی بررسی شد. با توجه به اینکه بیشتر تغییر مکان جانبی در سازه‌ها ناشی از بار جانبی زلزله و باد است و تغییر مکان جانبی ناشی از بار قائم زلزله جزئی است. به همین علت، در سازه‌ها از میراگر ویسکوز جانبی برای کنترل و کاهش ارتعاشات و تغییر مکان جانبی در مقابل بار جانبی زلزله و باد استفاده می‌شود. اما حضور میراگر ویسکوز جانبی علاوه بر کنترل تغییر مکان جانبی سازه بر پایداری دینامیکی نیز اثر گذار است. در این مقاله تاثیر میراگر ویسکوزخشی جانبی بر پایداری دینامیکی ستون غیرمنشوری در مقابل بار قائم زلزله بررسی می‌شود. در این تحقیق از معادله بولوتین به عنوان تابع پاسخ دینامیکی مجموعه و از تابع لاگرانژ مرتبه سی به عنوان تابع شکل برای حل معادله استفاده می‌شود. ممان اینرسی و مساحت عضو در سه حالت به صورت تابعی بر حسب ممان اینرسی ابتدایی و مساحت ابتدایی در معادله اعمال می‌شود. معادله هدف از نوع مقدار ویژه است. از تکنیک‌های ریشه‌یابی برای حل معادله و یافتن پارامترهای پاسخ از جمله (بارکمانشی و ضریب بارکمانشی) استفاده می‌شود.

۲-۲- مدل‌سازی و تعریف مسئله

مطابق شکل (۱) ستونی با مقطع متغیر با مشخصات گشتاور دوم سطح $I(x)$ ، مدول الاستیسیته E ، جرم واحد طول $\rho \times A(x)$ ، طول L ، سطح مقطع $A(x)$ و جرم مخصوص ρ فرض می‌شود. اثر میراگر ویسکوز با متغیر C_d و میرایی ذاتی با متغیر C لحاظ

¹ Pourasghar, Kamarian

² Azarboni, Ansari

³ Henao et al

$$\delta V_1 = - \int_0^{t_f} (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \left[\frac{\partial w}{\partial x} \delta w \right]_0^L dt + \int_0^L \left[\int_0^{t_f} (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta w dt \right] dx \quad (11)$$

در رابطه فوق، P_d و P_s و Ω به ترتیب معرف متغیر ضریب بار دینامیکی، ضریب بار استاتیکی و فرکانس تحریک است.

کار خارجی میراگر ویسکوز و میرایی ذاتی به صورت زیر بیان می‌شود. برای میراگر ویسکوز و میرایی ذاتی، عملگر وردشی زیر در بازه زمانی برای نقطه انتهایی برقرار می‌باشد. δ_d معرف تابع دلتای دیراک است.

$$\delta V_2 = \int_0^{t_f} C + C_d \delta_d(x-L) \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \delta w dx \quad (12)$$

با استفاده از حساب تغییرات و اصل بقای انرژی و اعمال شرایط مرزی طبیعی و زمانی، روابط زیر نتیجه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \delta \pi = \delta T - \delta U - \delta V = & - \int_0^{t_f} \int_0^L \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \delta w dx dt \\ & + \int_0^L \rho A(x) \left[\frac{\partial u}{\partial t} \delta w \right]_0^{t_f} dx \\ & - \int_0^{t_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \delta u - EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \right\}_0^L dt \\ & + \int_0^{t_f} (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \left[\frac{\partial w}{\partial x} \delta w \right]_0^L dt \\ & + \int_0^{t_f} C + C_d \delta_d(x-L) \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \delta w dx = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

بنابراین معادله (۱۳) شامل دو بخش است. در بخش اول معادله دیفرانسیل حاکم بر عضو و در بخش دوم شرایط مرزی مسئله استخراج شده است. شرایط مسئله باتوجه به شکل (۱) در تابع شکل اعمال می‌شود. معادله دیفرانسیل طبق رابطه زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (C + C_d \delta_d(x-L)) \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) = 0 \quad (14)$$

برای شرایط مرزی گیردار - آزاد شکل (۱)، روابط زیر برای شرایط مرزی هندسی و زمانی حاصل می‌شوند.

$$\begin{aligned} \theta(x=0) = \frac{\partial w(0,t)}{\partial x} &= 0 \\ w(0,t) = w(L,t) &= 0 \\ w(x,0) = w(x,t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

حسب جابه‌جایی عرضی به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود.

$$\varepsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{zz}(x,z) = \gamma_{xz}(x,z) = 0 \quad (4)$$

در رابطه فوق ε_{xx} بیانگر کرنش نرمال ایجاد شده در ستون است. با استفاده از اصل حساب تغییرات، تغییر در کار ناشی از انرژی کرنشی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\delta U = \int_0^{t_f} \left[\int_0^L \int_0^A \sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} dA dx \right] dt \quad (5)$$

t_f زمان نهایی است. روابط تنش-کرنش مطابق قانون هوک به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} \quad (6)$$

با جایگذاری معادلات (۳ و ۶) در رابطه‌ی (۵) و انتگرال‌گیری جزء به جزء، انرژی کرنشی ستون به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \delta U = & - \int_0^{t_f} \left[\int_0^L EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right] dt \\ = & \int_0^{t_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \delta w - EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \right\}_0^L dt \\ & - \int_0^{t_f} \left[\int_0^L \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \delta w dx \right] dt \end{aligned} \quad (7)$$

کار جنبشی ناشی از اینرسی در طول واحد ستون به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$T = \int_0^L \left[\int_0^{t_f} \frac{1}{2} \rho A(x) \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dt \right] dx \quad (8)$$

با اعمال عملگر تغییرات و انتگرال‌گیری جزء به جزء، تغییر در انرژی جنبشی به صورت رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \delta T = & \int_0^L \rho A(x) \left[\frac{\partial w}{\partial t} \delta w \right]_0^{t_f} dx \\ & - \int_0^L \left[\int_0^{t_f} \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \delta w dt \right] dx \end{aligned} \quad (9)$$

کار ناشی از نیروی خارجی بار کمانش محوری به صورت زیر بیان می‌شود.

$$V_1 = - \int_0^{t_f} \left[\int_0^L \frac{1}{2} (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] dt \quad (10)$$

با اعمال عملگر تغییرات و انتگرال‌گیری جزء به جزء، تغییر در کار ناشی از بار کمانش محوری به صورت زیر ارائه می‌شود.

۲-۲- معادله دیفرانسیل ستون غیر منشوری با میراگر ویسکوز

معادله دیفرانسیل ستونی با مقطع متغیر با لحاظ اثر جرم واحد طول ستون، میراگر ویسکوز، میرایی ذاتی، انرژی کرنشی ستون و اثر بارمحوری دینامیکی بر مبنای روش انرژی به صورت زیر بیان می‌شود. $w(x, t)$ خیز جانبی ستون موردنظر است.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) + (C + C_d \delta_d(x-L)) \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) + (P_s + P_d \cos(\Omega t)) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (16)$$

از معادله بولوتین [15] به عنوان تابع پیشنهادی برای پاسخ ارتعاشات سیستم‌های دینامیکی استفاده می‌شود. در رابطه زیر Ω معرف فرکانس تحریک، a_k, b_k ضرایب بسط، $u(x)$ بیان کننده تابع شکل معادله است.

$$w(x, t) = u(x) \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \left[a_k \sin\left(\frac{k\Omega t}{2}\right) + b_k \cos\left(\frac{k\Omega t}{2}\right) \right] \quad (17)$$

رابطه $P = P_s + P_d \cos(\Omega t)$ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$P = P_{cr} \left(\frac{P_s}{P_{cr}} + \frac{P_d}{P_{cr}} \cos(\Omega t) \right) = P_{cr} (\eta + \mu \cos(\Omega t)) \quad (18)$$

در رابطه فوق $\eta = \frac{P_s}{P_{cr}}$ ، $\mu = \frac{P_d}{P_{cr}}$ است. η و μ بار دینامیکی بی‌بعد، ضریب بار استاتیکی بی‌بعد، ضریب بار دینامیکی و ضریب بار استاتیکی است. با جای‌گذاری معادله (۱۷) و (۱۸) در معادله (۱۶)، معادله زیر بیان می‌شود.

$$-\frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \frac{d^2 u}{dx^2} \right) + \left(\frac{\rho A(x) \Omega^2}{4} \mp \frac{C_d \Omega}{2} \delta_d(x-L) \right) u \mp \frac{C \Omega}{2} u - P_{cr} (\eta \pm \frac{\mu}{2}) \left(\frac{d^2 u}{dx^2} \right) = 0 \quad (19)$$

شرایط مرزی هندسی و نیرویی برای هر دو انتهای اعضای

تحلیل شده به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$u(0) = 0, u(L) = 0 \quad \text{مفصلی - مفصلی} \quad (20)$$

$$\left(\frac{d^2 u(0)}{dx^2} \right) = 0, \left(\frac{d^2 u(L)}{dx^2} \right) = 0$$

$$u(0) = 0, u(L) = 0 \quad \text{گیردار - مفصلی}$$

$$\left(\frac{du(0)}{dx} \right) = 0, \left(\frac{d^2 u(L)}{dx^2} \right) = 0$$

$$u(0) = 0, u(L) = 0 \quad \text{گیردار - گیردار}$$

$$\left(\frac{du(0)}{dx} \right) = 0, \left(\frac{du(L)}{dx} \right) = 0$$

بر اساس فرض کوشی، میرایمیراگر ویسکوز متناسب با

ماتریس جرم آن لحاظ می‌شود [23].

$$C_d = 2\rho \int_0^L A(x) dx L \omega_1 \xi \quad (21)$$

در رابطه فوق C_d ضریب میرایی میراگر ویسکوز است که براساس فرکانس طبیعی مود اول ω_1 تعیین می‌شود. (ξ برابر با درصد میرایی است و مقادیری از ۵ تا ۲۰٪ را شامل می‌شود). همچنین بر اساس فرض رایلی، ماتریس میرایی ذاتی متناسب با ترکیب خطی ماتریس‌های جرم و سختی آن لحاظ می‌شود [23].

$$C = \alpha[(\rho A)] + \beta[K_S] \quad (22)$$

در رابطه فوق K_S و (ρA) و C به ترتیب ماتریس سختی ستون، ماتریس جرم، ماتریس میرایی هستند. α و β ضرایب میرایی هستند که براساس نسبت‌های میرایی مربوط به دو مود ارتعاشی مشخص سازه (ω_i, ω_j) یا در دو فرکانس مشخص تعیین می‌شوند. (ξ برابر با درصد میرایی است و مقادیری از ۱ تا ۵٪ دارد) [24].

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (23)$$

۲-۳- اثر مقطع غیر منشوری

در اعضای غیر منشوری به دلیل غیرثابت بودن مقادیر طول و عرض، گشتاور دوم سطح مقطع و مساحت مقطع در حال تغییر هستند. جهت اعمال اثر غیر یکنواختی مقطع، A_0 و I_0 به ترتیب سطح مقطع بزرگتر در ابتدای عضو و ممان اینرسی آن است. X فاصله هر نقطه از ستون، L طول ستون، β ضریب باریک شونده‌گی، b عرض، h ارتفاع مقطع هستند. ضریب β مقادیری از ۰ تا ۰٫۹ را دارد [17].

جدول ۱. معادلات حاکم بر تغییرات مساحت و ممان اینرسی مقطع

$I(x)$	$A(x)$	حالت
$I_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)$	$A_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)$	۱ طول مقطع مستطیلی به صورت خطی کاهش می‌یابد. اما عرض مقطع ثابت است.
$I_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)^3$	$A_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)$	۲ عرض مقطع در امتداد عضو با شیب β کاهش می‌یابد. اما طول مقطع ثابت است.
$I_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)^4$	$A_0 \left(1 - \frac{\beta x}{L}\right)^2$	۳ طول و عرض مقطع مستطیلی در راستای عضو و با شیب β به صورت هم‌زمان کاهش می‌یابد.

Table 1. Equations governing changes in area and moment of inertia of the section

۲-۴- حل معادله با روش لاگرانژ

حل معادله استفاده می‌شود.

$$u(x) = \sum_{j=1}^{30} (c_j \varphi_j) \quad (26)$$

$$V(x) = \sum_{j=1}^{30} (\varphi_j) \quad (27)$$

مدل لاگرانژ معادله حاکم با جایگزینی میان‌یابی لاگرانژ معادله (۲۶) برای u و φ_j برای تابع وزن v (۲۷) در شکل ضعیف معادله (۲۴) حاصل می‌شود. از آنجا که چهار متغیر گرهی موجود است. پس باید برای حل معادله، تابع شکل حداقل مرتبه سوم باشد. اما برای افزایش دقت، سی انتخاب مختلف برای v ، $v_1 = \varphi_1$ و ... و $v_{30} = \varphi_{30}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\sum_{i,j=1}^{30} \left[\int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2 \varphi_i}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \varphi_j}{dx^2} \right) \right. \quad (28)$$

$$\left. - P_{cr} \left(\eta \pm \frac{\mu}{2} \right) \left(\frac{d\varphi_i}{dx} \right) \left(\frac{d\varphi_j}{dx} \right) + \left(-\frac{\rho A(x) \Omega^2}{4} \mp \frac{C\Omega}{2} \right) \varphi_i \varphi_j \right] dx - Q_i = 0$$

$$K_{ij(S)} = \int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2 \varphi_i}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 \varphi_j}{dx^2} \right) dx \quad (29)$$

$$K_{ij(G)} = \int_0^L \left(\frac{d\varphi_i}{dx} \right) \left(\frac{d\varphi_j}{dx} \right) dx$$

$$M_{ij} = \int_0^L (\rho A(x)) \varphi_i \varphi_j dx$$

$$C_{ij} = \int_0^L C \varphi_i \varphi_j dx$$

$$\sum_{i,j=1}^{30} (K_{ij(S)} - P_{cr} \left(\eta \pm \frac{\mu}{2} \right) K_{ij(G)} - \frac{\Omega^2}{4} M_{ij} \mp \frac{C\Omega}{2} C_{ij}) X_{ij} - Q_i \quad (30)$$

$$= 0$$

$$[K_S - P_{cr} \left(\eta \pm \frac{\mu}{2} \right) K_G - \frac{\Omega^2}{4} M \mp \frac{C}{2} C] X - Q = 0$$

در رابطه (۲۹) $K_{ij(S)}$ و $K_{ij(G)}$ و M_{ij} و C_{ij} و Q_i و X_{ij} به ترتیب معرف ماتریس سختی مصالح، ماتریس سختی هندسی، ماتریس جرم، ماتریس میرایی، بردار نیروی جزء ستون و ماتریس بردار ویژه می‌باشد. رابطه (۳۰)، رابطه مورد نظر برای محاسبه مقدار ضریب بار دینامیکی بی بعد است. رابطه مذکور از نوع مقدار ویژه است. برای حل لازم است از روش‌های ریشه‌یابی عددی استفاده شود.

$$K_{ij} U_i = Q_i \quad (31)$$

$$K_{11} U_1 + K_{12} \theta_1 + \dots + K_{1n} \theta_n = 0$$

$$K_{21} U_1 + K_{22} \theta_2 + \dots + K_{2n} \theta_n = 0$$

$$\vdots$$

در بخش قبل معادله حاکم بر مجموعه (۱۹) و شرایط مرزی مسئله (۲۰) ارائه شد. در این بخش با استفاده از روش عددی توابع میان‌یابی لاگرانژ معادله مذکور بررسی می‌شود. بدین منظور لازم است ابتدا شکل ضعیف معادله تشکیل شود. در گام بعدی، توابع شکل از نوع درجه سی‌ام برای استخراج ماتریس‌های عضو فرض می‌شوند.

۲-۴-۱- شکل ضعیف شده معادله متشکله

در پژوهش حاضر از روش لاگرانژ برای حل معادله متشکله استفاده می‌شود. در این روش، تابع باقیمانده در تابع وزنی ضرب شده و از حاصل آن انتگرال‌گیری می‌شود. پاسخ به صورت معادله نمایش داده می‌شود. در این رابطه $v(x)$ تابع وزن است که باید نسبت به x حداقل دوبار مشتق پذیر باشد.

$$\int_0^L R(x) v(x) dx = 0 \quad (24)$$

$$\int_0^L v(x) \times \left[\frac{\rho A(x) \Omega^2 u}{4} \mp \frac{C_d \Omega u}{2} \delta_d(x-L) \mp \frac{C \Omega u}{2} - \frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \frac{d^2 u}{dx^2} \right) - P_{cr} \left(\pm \frac{\mu}{2} \right) \left(\frac{d^2 u}{dx^2} \right) \right] dx = 0$$

معادله (۲۴) دو بار انتگرال‌گیری جز به جز شده تا دومرتبه مشتق‌گیری با تابع وزن $v(x)$ مبادله شود و دو مرتبه مشتق‌گیری روی متغیر وابسته $u(x)$ باقی بماند. در نهایت شکل ضعیف معادله به شکل رابطه زیر محاسبه می‌شود. روش پیشنهادی روش تحلیل معادله در فضای گسسته است. با توجه به اینکه اثر میراگر ویسکوز تنها در نقطه انتهایی عضو اثر گذار است. بدین منظور اثر میراگر ویسکوز به عنوان شرایط مرزی انتهایی، در معادله متشکله اعمال می‌شود.

$$\int_0^L \left[-EI(x) \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right) \left(\frac{d^2 u}{dx^2} \right) + P_{cr} \left(\eta \pm \frac{\mu}{2} \right) \left(\frac{dv}{dx} \right) \left(\frac{du}{dx} \right) \right. \quad (25)$$

$$\left. + \left(-\frac{\rho A(x) \Omega^2}{4} \mp \frac{C \Omega}{2} \right) uv \right] dx - v(L) \left(\mp \frac{C_d \Omega}{2} \right) u(L) + v(0) \frac{d^3 u(0)}{dx^3} + \frac{dv(L)}{dx} \frac{d^2 u(L)}{dx^2} - \frac{dv(0)}{dx} \frac{d^2 u(0)}{dx^2} = 0$$

با توجه به اینکه در معادله (۲۵) چهار شرط در یک جز (برای هر گره دو عدد) برقرار است. ایجاب می‌کند که توابع میان‌یابی یک جز دارای مشتقات غیرصفر و تا مرتبه سه پیوسته باشند. برای افزایش دقت در محاسبات، از توابع میان‌یابی درجه سی‌ام برای

سری توانی مرتبه سی ام بررسی می شود. تمامی مراحل فوق به وسیله کدنویسی در نرم افزار متلب^۲ انجام می شود. باید ابتدا مقدار بارکمانشی استاتیکی محاسبه، به این صورت که ابتدا باید ضریب μ برابر صفر لحاظ شود و بارکمانشی P_{cr} مطابق رابطه (۳۲) محاسبه شود. بر مبنای بار کمانشی مقدار ضریب بار دینامیکی بی بعد μ به ازای فرکانس های تحریک مختلف ریشه یابی می شود. برای تعمیم پذیری نتایج به جای پارامتر μ از پارامتر ضریب بارکمانشی λ_{cr} برای ارائه نتایج استفاده می شود. تأثیر متغیرهای مقطع غیر منشوری و میراگر ویسکوز بر ضریب بار دینامیکی بی بعد و ضریب بار کمانشی برای ستونی با طول ستون $L = 15 \text{ m}$ ، سطح مقطع ستون $A = 6.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (INP 220)، ممان اینرسی ستون $I = 98 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ (INP 220)، مدول الاستیسیته $E_s = 210 \text{ GPa}$ ، جرم مخصوص فولاد $\rho_s = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ، ضریب بار استاتیکی $\eta = 0.5$ بررسی می شود. در شکل (۲) تغییرات ممان اینرسی و مساحت در طول مقطع در حالت های مختلف به ازای $\beta = 0.1$ (ضریب باریک شوندگی) نمایش داده می شود.

شکل ۲. تغییرات ممان اینرسی در طول مقطع در موارد مختلف

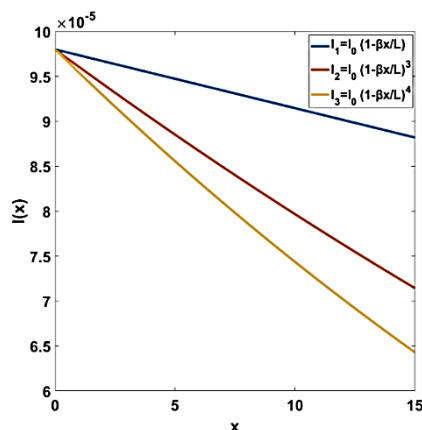


Fig. 2. Changes of the moment of inertia along the section in different cases

با توجه به شکل فوق مشخص است که در حالت ۱ تغییرات ممان اینرسی در طول مقطع به صورت خطی، حالت ۲ تغییرات ممان اینرسی به صورت سهمی درجه سوم، حالت ۳ تغییرات ممان اینرسی به صورت سهمی درجه چهارم است. مقدار ممان اینرسی در نقطه ابتدایی به ازای حالت های مختلف برابر مقدار ثابتی است. مقدار فوق با توجه به نوع توزیع ممان اینرسی در طول مقطع در

$$K_{(n-1)1}U_1 + K_{(n-1)1}\theta_1 + \dots + K_{(n-1)(n-1)}\theta_{(n)} \\ = \mp \frac{C_d \Omega}{2} U_{n-1} \\ K_{(n)1}U_1 + K_{(n)1}\theta_1 + \dots + K_{(n)(n)}\theta_{(n)} = 0$$

ماتریس $K = K_s + K_G + M + C$ معرف ماتریس کل است. ماتریس فوق از جمع تمامی ماتریس های سختی مصالح، سختی هندسی، ماتریس میرایی، جرم واحد طول محاسبه می شود. در این معادله، تغییر مکان U و دوران θ دو متغیر مجهول هستند. مطابق معادله (۳۱) مشخص است که اثر متغیر میراگر ویسکوز C_d به صورت شرایط مرزی در معادله و در بردار نیروی جزء ستون Q اعمال می شود. مقدار میراگر ویسکوز با ماتریس سختی کل جمع می شود. با توجه به اینکه مقدار میرایی ذاتی سازه در مقایسه با میرایی میراگر ویسکوز عدد کوچکتری است. در ادامه محاسبات، اثر میرایی ذاتی در محاسبات لحاظ نمی شود و تنها اثر میرایی میراگر ویسکوز در نظر گرفته می شود. چنانچه در رابطه (۳۰) اثر ضریب بار دینامیکی μ صفر منظور شود. رابطه ذیل برای محاسبه بارکمانشی استاتیکی ستون به دست می آید.

$$|K_s - P_{cr}K_G| = 0 \quad (32)$$

برای ساده سازی روابط از بی بعد سازی متغیرها استفاده می شود. $\bar{P}_{cr}$, λ_{cr} , $\bar{\Omega}$ ، به ترتیب معرف فرکانس تحریک بی بعد، ضریب بارکمانشی بی بعد و بارکمانشی بی بعد هستند.

$$\bar{\Omega} = \Omega \sqrt{\frac{\rho A_0 L^4}{EI_0}} \cdot \lambda_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_0}{P_{cr} L^2 \mu}} \cdot \bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr} L^2}{EI_0} \quad (33)$$

۳- بحث روی نتایج

رابطه (۳۰)، رابطه موردنظر برای محاسبه مقدار ضریب بار دینامیکی بی بعد μ است. ثابت شده که مقادیر سختی مصالح و میرایی میراگر ویسکوز بر مقدار متغیر فوق اثرگذار است. رابطه فوق یک معادله با مقادیر ویژه است. برای حل این معادله لازم است مقدار ضریب بار دینامیکی بی بعد به ازای مقادیر مختلف فرکانس تحریک ریشه یابی شود. بدین منظور از روش ریشه یابی مولر^۱ برای حل استفاده می شود. برای دقت در ریشه یابی تأثیر مقادیر فرکانس تحریک بر معادله متشکله با گام ۰.۱ بررسی می شود. همان طور که اشاره شد از روش لاگرانژ برای محاسبه تابع شکل معادله استفاده شده است. برای همگرایی پاسخ ها، معادله با

² MATLAB

¹ Muller

کتاب از وانگ [2] پایداری ستون‌های الاستیک غیرمنشوری بررسی شده است. ایشان با حل تحلیلی معادله دیفرانسیل متشکله، پاسخ دقیقی برای محاسبه بارکمانشی ستون‌ها ارائه کرده‌اند. محاسبه پارامترهای بارکمانشی بی‌بعد استاتیکی به‌عنوان فصل مشترک مقاله حاضر و تحقیق نامبرده تلقی می‌شود. بدین منظور، از نتایج این تحقیق برای درستی آزمایی مقاله حاضر استفاده می‌شود.

نقاط انتهایی برای حالت ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۸۸،۲ و ۷۱،۴۴ و ۶۴،۳۰ میکرومتر به توان چهارم می‌شود.

۳-۱- درستی آزمایی نتایج

نخست درستی آزمایی نتایج حاصل از این پژوهش، به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل‌های ارائه شده توسط پژوهشگران پرداخته می‌شود. همان‌طور که بیان شد، در بخشی

جدول ۲. مقادیر بارکمانشی بی‌بعد برای ستونی غیرمنشوری با تغییرات خطی، مکعبی و مرتبه چهارم ممان اینرسی برای شرایط مرزی مختلف

New results			Wang, Wang [2]		β	Boundary conditions
	$\overline{P}_{cr}$		$\overline{P}_{cr}$			
N=30	N=20	N=4				
Linear variations of the moment of inertia						
9.372	9.372	11.387	9.372	0.1	P-P	
8.343	8.343	10.681	8.343	0.3		
7.256	7.256	8.588	7.256	0.5		
19.169	19.169	27.750	19.17	0.1	C-P	
17.035	17.035	23.250	17.03	0.3		
14.740	14.740	18.750	14.74	0.5		
37.477	37.477	-	-	0.1	C-C	
33.373	33.373	-	-	0.3		
28.697	28.697	-	-	0.5		
0	0	44.78%	-	-	$\Delta_{max}\%$	
Cubic variations of the moment of inertia						
8.436	8.436	10.211	8.436	0.1	P-P	
5.840	5.840	6.799	5.840	0.3		
3.628	3.628	3.937	3.628	0.5		
17.252	17.252	23.803	17.252	0.1	C-P	
11.923	11.923	14.434	11.923	0.3		
7.362	7.362	8.437	7.362	0.5		
1.336	1.336	1.387	1.336	0.5	C-C	
33.729	33.729	-	-	0.1		
23.941	23.941	-	-	0.3		
14.349	14.349	-	-	0.5		
0	0	37.97%	-	-	$\Delta_{max}\%$	
Fourth order variations of the moment of inertia						
7.994	7.994	9.650	7.994	0.1	P-P	
4.836	4.836	5.503	4.836	0.3		
2.467	2.467	2.629	2.467	0.5		
16.354	16.354	22.075	16.354	0.1	C-P	
9.983	9.983	11.596	9.983	0.3		
5.048	5.048	6.161	5.048	0.5		
31.977	31.977	-	-	0.1	C-C	
19.345	19.345	-	-	0.3		
9.872	9.872	-	-	0.5		
-	-	34.98%	-	-	$\Delta_{max}\%$	

Table 2. Values of dimensionless buckling load for a non-radius column with Linear, Cubic, fourth order variations of moment of inertia for different boundary conditions

ماتریس‌های سختی مستخرج از مرتبه ۴ هستند و با توجه به شرایط مرزی، دو سطر و دو ستون از این ماتریس حذف می‌شوند و مقادیر ویژه تنها به ازای ماتریس دو در دو محاسبه می‌شوند. برای افزایش دقت، معادله متشکله به‌ازای جملات مرتبه بالاتر (۲۰ و ۳۰) جمله بررسی می‌شوند. با انتخاب جملات مراتب بالاتر، مقادیر این پارامتر در مقاله حاضر و مقاله پیشین منطبق می‌شود.

مطابق جدول فوق، مقادیر بارکمانشی بی‌بعد برای ستون غیرمنشوری برای شرایط مرزی مختلف محاسبه می‌شود. معادله متشکله به‌ازای توابع شکل (۴ و ۲۰ و ۳۰) جمله‌ای بررسی می‌شود. مبین است که اگر معادله به‌ازای ۴ جمله (مرتبه حداقل) بررسی شود، مقادیر بارکمانشی بی‌بعد مقاله حاضر در مقایسه مقاله پیشین اختلاف قابل توجهی خواهد داشت. به این دلیل که

بی بعد برای صفر لحاظ شود. مقدار ضریب بار دینامیکی بی بعد برابر ۱ می شود. نمودار فوق مبین این است که نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق پیشین هم خوانی دارد.

شکل ۳. نمودار تغییرات ضریب بار دینامیکی بی بعد بر حسب نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی مود اول بی بعد

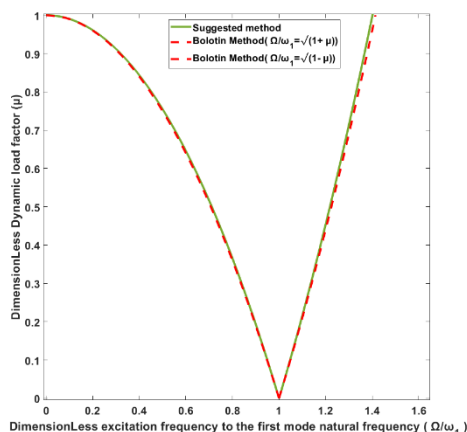


Fig. 3. The diagram of the changes of the dimensionless dynamic load coefficient according to the ratio of the excitation frequency to the natural frequency of the first dimensionless mode

۳-۲- تأثیر مقطع غیر منشوری بر ضریب بار کماتشی

در این بخش، تأثیر مقاطع غیر منشوری بر ضریب بار کماتشی در شرایط مرزی مختلف C-C (گیردار-گیردار)، C-P (گیردار-مفصلی)، P-P (مفصلی-مفصلی) بررسی می شود. تغییرات ممان اینرسی مطابق جدول (۱) به صورت خطی (مورد اول)، مکعبی (مورد دوم) و مرتبه چهارم (مورد سوم) در نظر گرفته می شود.

مطابق شکل مشخص است که تغییرات ضریب بار کماتشی بر حسب فرکانس تحریک بی بعد به صورت تابع نمایی است. در نقطه خاصی (نقطه تکینی) مقدار ضریب بار کماتشی برابر عدد بزرگی است. این نقطه خاص در بحث پایداری، فرکانس تشدید نام دارد. در واقع ستون تحت باری با مقدار فرکانس تشدید ناپایدار می شود. مشخص است که در موردهای مکعبی و مرتبه چهارم تغییر ممان اینرسی در طول عضو برای ستون گیردار - مفصلی، با افزایش β (ضریب باریک شونده) نمودار به سمت چپ میل می کند. در حالی که در مورد خطی ممان اینرسی، با افزایش β (ضریب باریک شونده) نمودار به سمت راست میل می کند. مبین است که نوع شرایط مرزی و نوع تغییرات ممان اینرسی در طول عضو بر پایداری دینامیکی و مقادیر فرکانس تشدید عضو اثرگذار است. تغییرات ضریب بار کماتشی بر حسب فرکانس تحریک بی بعد شامل

همانطور که ذکر شد از روش اجزاء محدود با توابع هرمیتی (لاگرانژ) برای حل معادله دیفرانسیل استفاده می شود. برای حل معادله از توابع لاگرانژ مرتبه ی سی ام برای محاسبه تابع شکل استفاده شده و دقت حل معادله به این وسیله فراهم می شود. در این رویکرد نیازی به تجمیع ماتریس سختی نیست. چون به یکباره ماتریس سختی به وسیله حدس تابع شکل از مرتبه ی سی ام محاسبه می شود. در این روش با توجه به استفاده از توابع شکل مرتبه بالا نیازی به تقسیم ستون به اجزای کوچکتر و تجمیع ماتریس سختی نیست. در بخشی دیگر از درستی آزمایی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج پژوهش بولوتین [15] مقایسه می شود. همان طور که بیان شد. در مدل بولوتین پایداری دینامیکی یک ستون منشوری مفصلی - مفصلی تنها با اثر جرم در واحد طول به روش تحلیلی بررسی شده است. در حالی که در پژوهش حاضر، پایداری دینامیکی ستون غیر منشوری با لحاظ اثر میراگر ویسکوز تحت بار متناوب به روش لاگرانژ بررسی می شود. مزیت روش مقاله حاضر این است که تمامی شرایط مرزی مختلف در تابع شکل معادله قابل اعمال است. برای درستی آزمایی پژوهش حاضر با مدل بولوتین باید اثر میراگر ویسکوز و مقطع غیر منشوری نادیده گرفته شود و رفتار دینامیکی ستون منشوری تنها به ازای شرایط مرزی گیردار - مفصلی و $\eta = 0$ (ضریب بار استاتیکی بی بعد) ارزیابی شود. شکل (۳) نمودار تغییرات ضریب بار دینامیکی بی بعد ستونی گیردار - مفصلی را بر حسب نسبت فرکانسی (فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی) بی بعد نمایش می دهد. محقق رابطه ذیل برای محاسبه ضریب بار دینامیکی بی بعد بر حسب نسبت فرکانسی ارائه کرده است. (k ، پارامتر مود کماتش است).

$$\frac{\Omega}{2\omega_k} = \frac{\sqrt{1 \pm \mu}}{k} \quad (34)$$

در شکل (۳) نمودار تغییرات ضریب بار دینامیکی بی بعد بر حسب نسبت فرکانسی بی بعد ستونی با شرایط مرزی گیردار مفصلی تنها با اثر جرم واحد طول ترسیم می شود. با توجه به نمودار مشخص می شود. اگر مقدار نسبت بی بعد فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی مود اول برابر $\frac{\Omega}{2\omega_1} = 1$ باشد. در این صورت ضریب پایداری دینامیکی برابر صفر است. این وضعیت که وضعیت تشدید نام دارد. در این حالت، مجموعه دچار وضعیت ناپایداری دینامیکی می شود. در صورتی که مقدار نسبت فرکانسی

کمانشی از فرکانس تشدید به بعد به صورت نزولی است. در این محدوده به ازای مقادیری از فرکانس تحریک بی بعد ضریب بارکمانشی مقداری کمتر از ضریب بار کمانشی استاتیکی را دارد. از لحاظ تجربی هیچ وقت ظرفیت کمانشی دینامیکی از ظرفیت کمانشی استاتیکی بزرگتر نیست.

سه بخش می شود. اگر مقدار فرکانس تحریک بی بعد صفر شود. مقدار ضریب بارکمانشی برابر ضریب بارکمانشی استاتیکی است. تغییرات ضریب بارکمانشی از فرکانس تحریک بی بعد ($\bar{\Omega} = 0$) تا فرکانس تشدید به صورت صعودی است و ضریب بار کمانشی به ازای فرکانس تشدید مقدار بسیار بزرگی دارد. تغییرات ضریب بار

شکل ۴. تغییرات ضریب بارکمانشی برحسب فرکانس تحریک ستونی غیر منشوری گیردار - مفصلی (a) تغییرات خطی ممان اینرسی، (b) تغییرات مکعبی ممان اینرسی، (c) تغییرات مرتبه چهارم ممان اینرسی

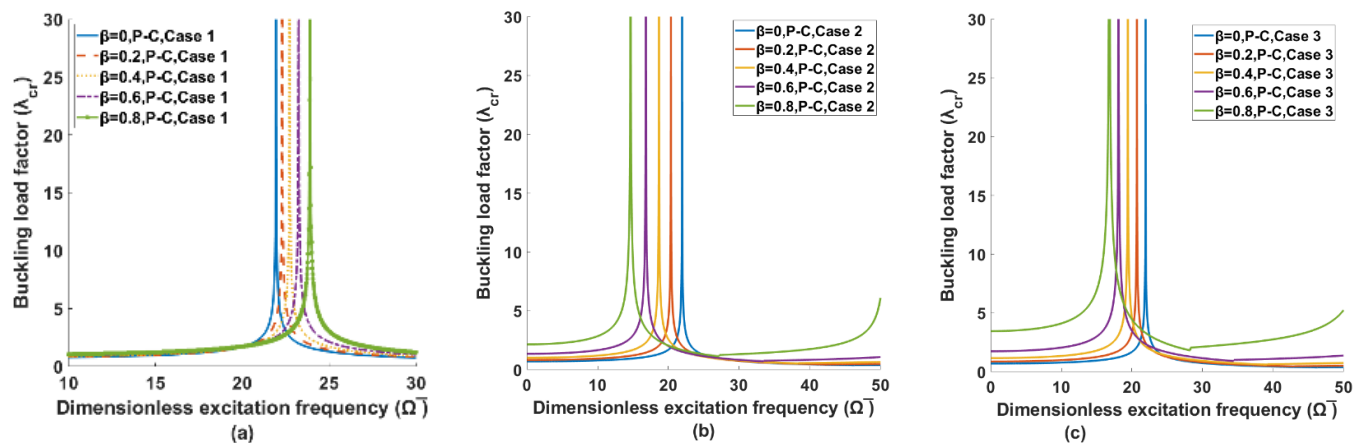


Fig.4. Variations of the buckling load factor according to the frequency of excitation of a non-prismatic column (P – C) A) linear variations of the moment of inertia, B) Cubic variations of the moment of inertia, C) Variations of the fourth order of the moment of inertia

در واقع ظرفیت بار کمانشی تابع مشخصات فیزیکی مقطع است و پارامتر فرکانس تحریک به عنوان عامل کاهنده بر ظرفیت بارکمانشی دینامیکی اثر گذار است. اگر در نواحی خاصی ضریب

بار کمانشی از ضریب بارکمانشی استاتیکی کمتر باشد. لازم است برای طراحی همان مقدار ضریب بار کمانشی استاتیکی مد نظر قرار گیرد.

شکل ۵. تغییرات ضریب بارکمانشی برحسب فرکانس تحریک ستونی غیر منشوری گیردار - گیردار

(a) تغییرات خطی ممان اینرسی، (b) تغییرات مکعبی ممان اینرسی، (c) تغییرات مرتبه چهارم ممان اینرسی

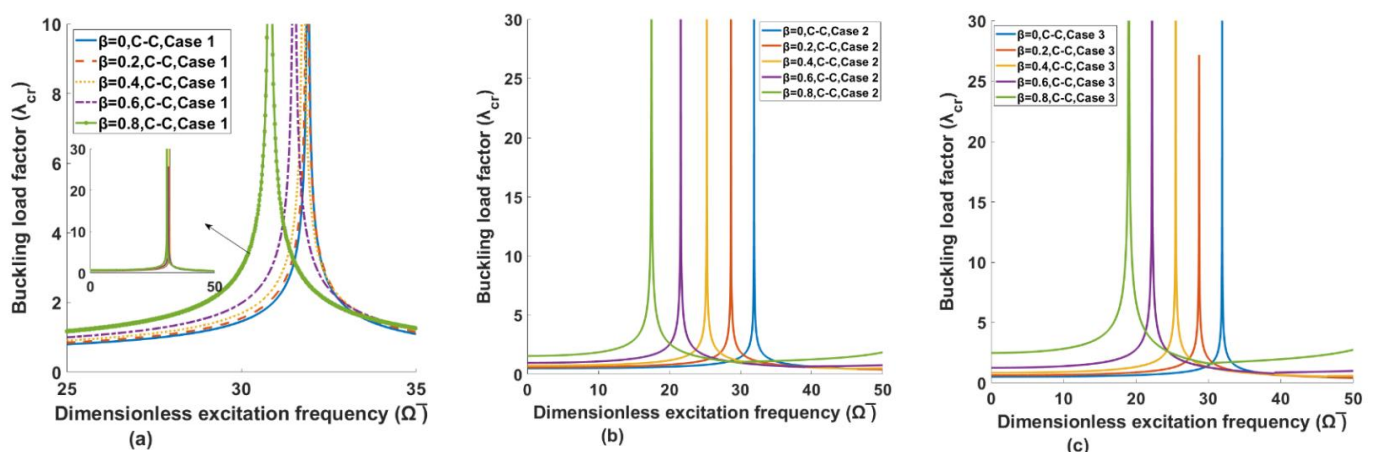


Fig.5. A) Variations of the buckling load factor according to the frequency of non-prismatic column (C-C) excitation A) linear changes in the moment of inertia, B) Cubic changes in the moment of inertia, C) Fourth-order changes in the moment of inertia

دوسرگیردار، با افزایش β (ضریب باریک‌شوندگی) نمودار به سمت چپ میل می کند.

مطابق شکل مشخص است که در تمامی حالت های تغییر ممان اینرسی در طول عضو (خطی - مکعبی - مرتبه چهارم) برای ستون

شکل ۶. تغییرات ضریب بارکمانشی برحسب فرکانس تحریک ستونی غیر منشوری مفصلی - مفصلی
(a) تغییرات خطی ممان اینرسی، (b) تغییرات مکعبی ممان اینرسی، (c) تغییرات مرتبه چهارم ممان اینرسی

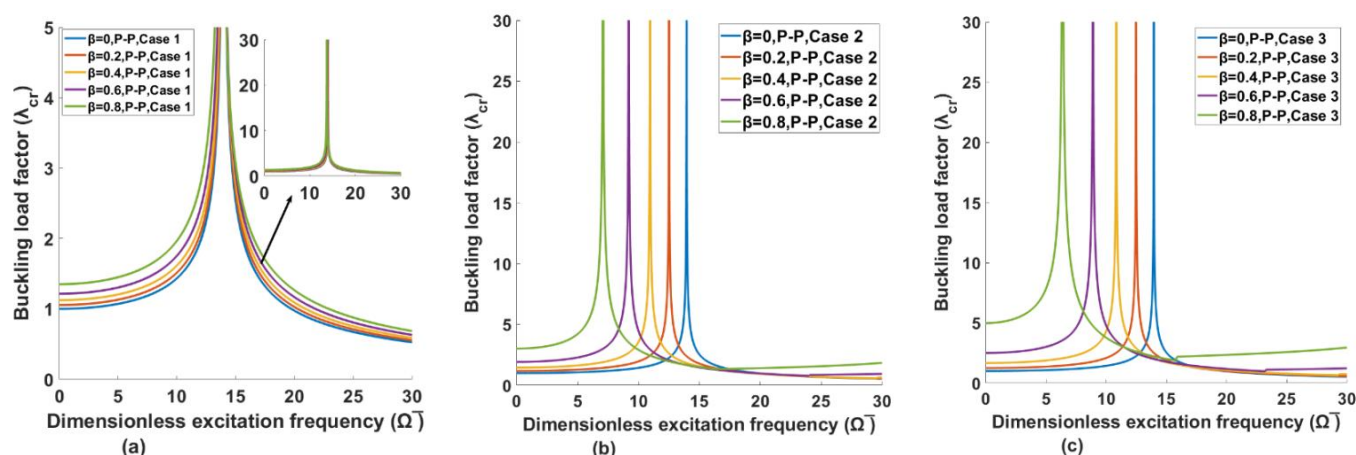


Fig. 6. Variations of the buckling load according factor to the frequency of a non-prismatic column (P-P) excitation A) linear variations of the moment of inertia, b) Cubic variations of the moment of inertia, c) Variations of the fourth order of the moment of inertia

مرزی گیردار-آزاد بررسی می شود. همانطور که ذکر شد. از اثر میرایی ذاتی سازه در مقابل میراگر ویسکوز صرف نظر شده و تنها اثر میراگر ویسکوز بر پایداری دینامیکی بررسی می شود. حضور میراگر ویسکوز تا ۲۰ درصد بر کنترل میرایی سازه اثر گذار است.

مطابق شکل مشخص است که حضور ضریب میرایی میراگر ویسکوز β تأثیر قابل توجهی در انتقال نمودار تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس تحریک بی بعد به سمت چپ محور دارد. اعمال اثر میراگر ویسکوز، در عمل اثر تغییرات فرکانس را برطرف می کند.

برای نمونه برای تغییرات خطی، در محدوده $1 < \bar{\Omega} < 30$ ضریب بار کمانشی دارای مقادیری کوچکتر از ضریب بارکمانشی استاتیکی است. با این حال، هیچ گاه ظرفیت بار کمانشی دینامیکی بزرگتر از ظرفیت بارکمانشی استاتیکی نیست. با توجه به این نکته می توان گفت که در تمامی حدود $1 < \bar{\Omega} < 30$ ظرفیت بار کمانشی استاتیکی و ظرفیت بارکمانشی دینامیکی برابر است.

همانطور که در متن ذکر شد. پدیده کمانش در حالت استاتیکی وابسته به مشخصات مصالح سازه است. اما با توجه به پژوهش بولوتین [15] و نتایج مقاله حاضر مشخص شد که پدیده کمانش در حالت دینامیکی علاوه بر مشخصات مصالح سازه بر فرکانس تحریک بارگذاری هارمونیک نیز وابسته است. در حالت خاصی که بارگذاری هارمونیک کسینوسی باشد با ارائه مسیر تعادل پایداری و تابع پاسخ دینامیکی (معادله ۱۷) مقدار ضریب طول موثر دینامیکی محاسبه شد. روش ارائه شده یک نوع تحلیل فرکانس بوده و رفتار دینامیکی ستون تنها برای بارگذاری خاص دینامیکی هارمونیک

در این حالت، فرکانس تشدید و ناپایداری دینامیکی به ازای فرکانس تحریک بی بعد کوچکتری رخ می دهد. افزایش β (ضریب باریک شوندگی) در حالت (دوم و سوم) تأثیر قابل توجهی در انتقال نمودار به سمت چپ محور تغییرات فرکانس تحریک بی بعد در مقایسه با مورد اول دارد.

مطابق شکل مشخص است که در تمامی حالت های تغییر ممان اینرسی در طول عضو (خطی - مکعبی - مرتبه چهارم) برای ستون دو سر مفصلی، با افزایش β (ضریب باریک شوندگی) نمودار تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس تحریک بی بعد به سمت چپ میل می کند. همان طور که مشخص است در صورتی که تغییرات ممان اینرسی خطی باشد. با افزایش ضریب β (ضریب باریک شوندگی) تغییرات ضریب بارکمانشی با آهنگ آهسته تری به سمت راست محور فرکانس تحریک بی بعد میل می کند. صلیب خمشی ستون با افزایش درجه تغییرات ممان اینرسی در طول عضو کاهش می یابد. هم چنین افزایش ضریب β (ضریب باریک شوندگی) نیز یک عامل کاهنده در صلیب خمشی ستون است.

۳-۳- تأثیر توأمان مقطع غیر منشوری و میراگر ویسکوز بر ضریب بارکمانشی

در این بخش به بررسی اثر توأمان مقطع غیر منشوری و میراگر ویسکوز بر کماتش دینامیکی ستون پرداخته می شود. بدین منظور پارامتر ضریب بارکمانشی ستون با مقطع غیر منشوری (خطی - مکعبی - مرتبه چهارم) و میراگر ویسکوز به ازای ضریب میرایی $\xi = 10$ برای شرایط

شکل ۷. تغییرات ضریب بارکمانشی برحسب فرکانس تحریک بی‌بعد ستونی غیر منشوری با میرایی ۱۰٪
(a) تغییرات خطی ممان اینرسی (b) تغییرات مکعبی ممان اینرسی (c) تغییرات مرتبه‌ی چهارم ممان اینرسی

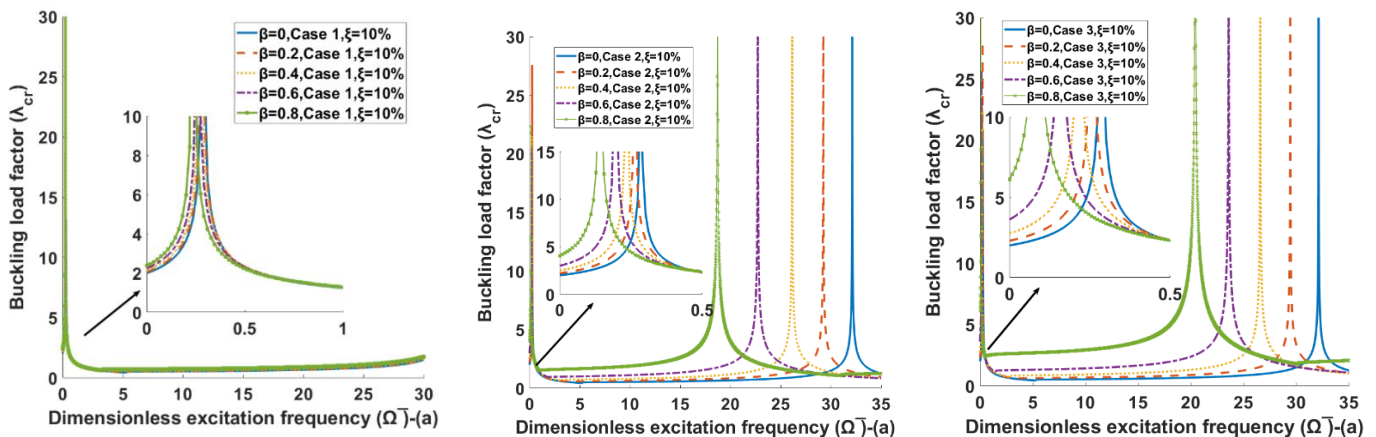


Fig. 7. Variations of the buckling load factor according to the frequency of excitation non-prismatic column with 10% damping A) linear variations of the moment of inertia, b) Cubic variations of the moment of inertia, c) Variations of the fourth order of the moment of inertia

افزایش این مقدار نمودار تغییرات به سمت چپ محور فرکانس تحریک بی‌بعد منتقل می‌شود.
۳- در تمامی جداول و شکل‌ها از پارامترهای بی‌بعد مانند ضریب بارکمانشی، فرکانس تحریک و ضریب بازشوندگی برای گزارش رفتار دینامیکی مجموعه استفاده شده است. نتایج این تحقیق برای طراحی ستون‌های تحت بارمحوری تناوبی قابلیت تعمیم دارد.

۵- مراجع

- [1] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 2009. *Theory of elastic stability*. Courier Corporation.
- [2] Wang, C.M. and Wang, C.Y., 2004. *Exact solutions for buckling of structural members* (Vol. 6). CRC press.
- [3] Bazant, Z.P., Cedolin, L. and Hutchinson, J.W., 1993. Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories. *Journal of Applied Mechanics*, 60(2), p.567.
- [4] Morley, A., 1917. Critical loads for long tapering struts. *Engineering*, 104, p.295.
- [5] Siginer, A., 1992. Buckling of columns of variable flexural rigidity. *Journal of engineering mechanics*, 118(3), pp.640-643.
- [6] Li, G.Q. and Li, J.J., 2002. A tapered Timoshenko–Euler beam element for analysis of steel portal frames. *Journal of constructional steel research*, 58(12), pp.1531-1544.
- [7] Al-Sadder, S.Z., 2004. Exact expressions for stability functions of a general non-prismatic beam–column member. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(11), pp.1561-1584.

(کسینوسی) قابل پیش بینی است. اما بارگذاری مولفه قائم زلزله و هر نوع بارگذاری دینامیکی با استفاده از روش تبدیل فوریه به فرم تابع هارمونیک (کسینوسی) قابل تبدیل است. پس نتایج مقاله حاضر برای محاسبه پایداری دینامیکی با شرط تبدیل بارگذاری مورد نظر به بارگذاری هارمونیک کسینوسی قابل استفاده است.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر نخستین بار بر مبنای روش عددی کمانش دینامیکی ستونی با مقطع متغیر و میراگر ویسکوز تحت بارمحوری متناوب بررسی شد. در گام اول، شکل ضعیف معادله دیفرانسیل حاکم نوشته شد. از توابع میان‌یابی لاگرانژ به عنوان تابع شکل معادله استفاده شود و بر این مبنا ماتریس‌های سختی مصالح، سختی هندسی و ماتریس جرم استخراج شد. پس از استخراج ماتریس‌های سختی مقادیر ویژه معادله بررسی شد. از تکنیک ریشه‌یابی مولر برای محاسبه مقادیر ویژه با کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شد. خلاصه نتایج پژوهش به شرح ذیل است:

۱- مقدار ضریب بازشوندگی تأثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس تحریک بی‌بعد دارد. افزایش ضریب بازشوندگی بسته به شرایط مرزی حاکم سبب انتقال نمودار به سمت راست یا چپ محور فرکانس تحریک بی‌بعد می‌شود.

۲- مقدار ضریب میرایی میراگر ویسکوز تأثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب بارکمانشی بر حسب فرکانس بی‌بعد دارد. با

- [17] Ouyang, H., 2011. Moving-load dynamic problems: A tutorial (with a brief overview). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(6), pp.2039-2060.
- [18] Ghannadpour, S.A.M., Mohammadi, B. and Fazilati, J., 2013. Bending, buckling and vibration problems of nonlocal Euler beams using Ritz method. *Composite Structures*, 96, pp.584-589.
- [19] Giraldo-Londoño, O. and Aristizábal-Ochoa, J.D., 2014. Dynamic stability of slender columns with semi-rigid connections under periodic axial load: verification and examples. *Dyna*, 81(185), pp.66-72.
- [20] Pourasghar, A. and Kamarian, S., 2015. Dynamic stability analysis of functionally graded nanocomposite non-uniform column reinforced by carbon nanotube. *Journal of Vibration and Control*, 21(13), pp.2499-2508.
- [21] Ramezannejad Azarboni, H. and Ansari, R., 2017. Dynamic stability analysis of CNTs under combined static and periodic axial loads using Floquet–Liapunov theory. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), pp.365-372.
- [22] Uribe-Henao, A.F., Zapata-Medina, D.G., Arboleda-Monsalve, L.G. and Aristizabal-Ochoa, J.D., 2018, August. Static and dynamic stability of a multi-stepped Timoshenko column including self-weight. In *Structures*, 15, pp.28-42.
- [23] Chopra, A.K. and McKenna, F., 2016. Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), pp.193-211
- [24] Carr, A.J., Puthanpurayil, A.M., Lavan, O. and Dhakal, R., 2017, January. Damping models for inelastic time history analysis: a proposed modelling approach. In *16th world conference in earthquake engineering*, Santiago .p.1488.
- [8] Huang, Y., Yang, L.E. and Luo, Q.Z., 2013. Free vibration of axially functionally graded Timoshenko beams with non-uniform cross-section. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), pp.1493-1498.
- [9] Hadidi, A., Azar, B.F. and Marand, H.Z., 2014. Second-order nonlinear analysis of steel tapered beams subjected to span loading. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, p.237983.
- [10] Safavi, A., Haghollahi, A. and Sahebi, M.M, 2017, Elastic Flexural Buckling Load for Tapered Columns in Gabled Frames for State of Free to Sway with Finite Differences and Virtual Work Methods.
- [11] Bilyk, S.I., Bilyk, A.S., Nilova, T.O., Shpynda, V.Z. and Tsyupyn, E.I., 2018. Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height. *Onir materialiv i teorija sporud*, (100), pp.140-154.
- [12] Fathi M, Shahlaei N, Parvizi M, 2018. Slope-deflection equations development for imperfect beam-column and semi-rigid connection, considering shear deformation. *Journal of Structure & Steel*, 12 (23), pp.65-74. [In Persian]
- [13] Asgarian, B., 2018. Buckling analysis of axially functionally graded columns with exponentially varying cross-section.
- [14] Soltani, M. and Asgarian, B., 2019. Finite Element Formulation for Linear Stability Analysis of Axially Functionally Graded Nonprismatic Timoshenko Beam. *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, 19(2).
- [15] Bolotin, V., 1962. Dynamic stability of elastic systems.
- [16] Dwivedy, S.K., Sahu, K.C. and Babu, S., 2007. Parametric instability regions of three-layered soft-cored sandwich beam using higher-order theory. *Journal of sound and vibration*, 304(1-2), pp.326-344.

Exploring the Interpretability of the Ordered Probit Algorithm on Analyzing the Influence of Time on Rural Freeways Crash Severity

Meysam Effati^{1*} , Amirmohammad Ramazampoor²

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering (Road and Transportation), Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
2. M.Sc., Department of Civil Engineering (Road and Transportation), Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

According to the World Health Organization report, Iran ranks 113th out of 175 countries with an estimated rate of 20.5 deaths per 100,000 population due to crashes. Additionally, road crash injuries are considered one of the top five leading causes of mortality in the country. Due to the efficiency of intelligent methods, statistical models have attracted a lot of attention in safety studies and crash analysis. Investigations show that few studies have been done regarding the specific effects of time periods of the day on the crash severity. Moreover, in most conducted researches for modeling crash severity, statistical models have been utilized, and determining the relationships between severity and influential factors with these models is challenging due to the complex relationships between variables that vary in different time intervals throughout the day. In recent studies, road lighting conditions have been considered as an important parameter in the frequency and severity of driving crashes. The lighting conditions, especially on rural roads, depend on various factors such as drivers' visibility to perceive road geometry, traffic, and roadside objects. The variables considered for analyzing crash severity include human factors, weather conditions, primary causes of crashes, intersection control, land use, lighting conditions, location of crash, time of crash (day, month, year, and hour), type and condition of road surface, road markings, road repairs, collision type, and road geometry. Therefore, the purpose of this research, while considering the interpretability of the Ordered Probit algorithm, is to investigate the effect of the conditions of different times of the day and night on the crash severity with six years data of Lushan-Qazvin rural freeway crashes. The Ordered Probit algorithm was implemented and evaluated separately in four time periods to predict the effects of various geometric, environmental and traffic factors on the severity of damage caused by crashes and the likelihood ratio test was used to justify the models. The results obtained from the research not only contribute to predicting preventive measures for crashes but also aid in reducing their severity and analyzing the relationships between various factors. One of the stages in conducting research on crash injuries involves identifying important factors affecting the severity of injuries. The estimation results indicate that the levels of crash severity in different time intervals are associated with various factors in different ways, and these differences cannot be discovered by estimating only one general model. The present study has shown that by interpreting machine learning algorithms, useful patterns can be extracted from a large volume of crash data and analyze crash severity. The ordinal probit algorithm is one of the powerful tools for modeling crash severity, which can demonstrate the complex relationship between input variables and crash severity by providing statistics such as z-test and marginal effect in the model output. The analysis results indicate that driver distraction during the morning, noon, evening, and night periods, with coefficients of 1.33, 1.21, 1.25, and 0.98 respectively, is the most significant factor contributing to the increased crashes severity on the studied road. Conversely, collisions with fixed objects during the same periods, with coefficients of -0.58, -1.83, -1.24, and -0.75 respectively, have an inverse relationship with the crashes severity.

Review History

Received: Mar 01, 2024

Revised: Aug 10, 2024

Accepted: Nov 25, 2024

Keywords

road safety
crash severity
ordered probit
likelihood ratio test
statistical analysis

* Corresponding Author Email: meysameffati@guilan.ac.ir - ORCID: 0000-0001-7399-6935



بررسی تفسیرپذیری الگوریتم پروبیت ترتیبی در تجزیه و تحلیل تأثیر زمان وقوع بر شدت تصادفات در آزادراه‌های برون‌شهری

میثم عفتی^{۱*} ID، امیرمحمد رمضانپور^۲

۱. دانشیار، گروه مهندسی عمران (راه و ترابری)، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲. کارشناسی ارشد مهندسی عمران (راه و ترابری)، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی

ایمنی راه

شدت تصادفات

پروبیت ترتیبی

آزمون نسبت احتمال

تحلیل آماری

با توجه به کارایی روش‌های هوشمند، مدل‌های آماری توجه زیادی را در مطالعات ایمنی و تحلیل تصادفات به خود جلب کرده است. از طرفی بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که مطالعات کمی در خصوص آثار خاص بازه‌های ساعتی شبانه‌روز بر روی شدت تصادفات انجام‌شده است. پس، هدف از این تحقیق ضمن لحاظ تفسیرپذیری الگوریتم پروبیت ترتیبی، بررسی تأثیر شرایط زمان‌های مختلف شبانه‌روز بر شدت آسیب تصادفات با استفاده از داده‌های شش سال تصادف آزادراه برون‌شهری لوشان‌قزوین است. در این راستا الگوریتم پروبیت ترتیبی به‌صورت جداگانه در چهار بازه زمانی برای پیش‌بینی آثار عوامل مختلف هندسی و محیطی و ترافیکی بر شدت آسیب ناشی از تصادفات روی داده‌های تصادفات پیشین پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت و از آزمون نسبت احتمال برای توجیه‌پذیری مدل‌ها استفاده شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که حواس‌پرتی راننده در بازه‌های زمانی صبح، ظهر، غروب و شب به ترتیب با ضریب ۱/۳۳، ۱/۲۱، ۱/۲۵ و ۰/۹۸ مهم‌ترین عامل افزایش شدت تصادفات در محور مورد مطالعه است. در مقابل، برخورد با شیء ثابت در همان بازه‌های زمانی به ترتیب با ضریب ۰/۵۸، ۱/۸۳، ۱/۲۴ و ۰/۷۵ با افزایش شدت تصادفات رابطه عکس دارد.

۱- مقدمه

مناطق پردرآمد است [1]. همچنین آسیب‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای در کشور، یکی از پنج علت مهم مرگ‌ومیر به شمار می‌رود؛ بنابراین در برنامه‌های توسعه کشور اهمیت این موضوع مورد توجه قرار گرفته و از دستگاه‌های مربوطه خواسته شده تا برای کاهش تلفات و حوادث جاده‌ای اقدامات لازم صورت گیرد. بر اساس گزارش شورای ملی ایمنی^۱ (NSC) در سال ۲۰۲۰ بیشترین تصادفات مرگبار (۲۳ درصد) در بازه ساعتی ۱۶ تا ۲۰

طبق آمار سازمان بهداشت جهانی (۲۰۲۳) در مورد تصادفات جاده‌ای در سال ۲۰۲۱، سالانه ۱/۱۹ میلیون نفر در جاده‌ها جان خود را از دست می‌دهند، یعنی از هر صد هزار نفر، پانزده نفر در تصادفات جاده‌ای کشته می‌شوند. همچنین بر اساس گزارش این سازمان، تلفات سرنشینان وسایل نقلیه در ایران و کشورهای مدیترانه شرقی نسبت به سال ۲۰۱۳، ۱۱ درصد افزایش یافته و میزان تصادفات منجر به مرگ در این مناطق کم‌درآمد دو برابر

¹ National Safety Council

برون‌شهری چین استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که رفتار راننده، نوع وسیله نقلیه و شرایط جاده به‌طور معناداری بر شدت تصادفات تأثیر می‌گذارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل پروبیت ترتیبی توانایی خوبی در پیش‌بینی شدت تصادفات دارد [18]. خان و همکاران برای بررسی تأثیر طرحی هندسی راه و خطرات کنار جاده بر شدت تصادفات خروج از جاده در راه‌های برون‌شهری استرالیا از مدل پروبیت ترتیبی سلسله‌مراتبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که طرح هندسی و وضعیت کنار جاده تأثیر زیادی بر شدت تصادفات دارند و مدل پروبیت ترتیبی توانسته است این آثار را به خوبی نشان دهد [19].

از طرفی، نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که عوامل محیطی ازجمله شرایط روشنایی، ارتباط نزدیکی با افزایش شدت آسیب تصادفات دارند [20-23]. تاماکوله و همکاران برای شناسایی عوامل مؤثر در شدت تصادفات وسیله نقلیه اتوبوس و مینی‌بوس در جاده‌های با روسازی ضعیف^۴، از یک رویکرد داده‌کاوی در شرایط روشنایی مختلف استفاده کردند. مطابق نتایج تحقیق، اغلب تصادفات مرگبار در برخورد با عابران پیاده و در مسیرهای با هندسه مستقیم و هموار در بازه زمانی شب رخ داده‌اند [20]. ابیدت و همکاران اثربخشی روشنایی جاده را بر کاهش تصادفات شبانه را در کشور اردن قبل و بعد از نصب سیستم روشنایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تأیید کننده این مطلب بود که روشنایی شدت تصادفات مورد انتظار را کاهش می‌دهد [21]. حسین و همکاران با استفاده از داده‌های تصادفات فوتی و جرحی عابر پیاده در لوئیزیانا (۲۰۱۰-۲۰۱۹)، به شناسایی الگوهای پنهان در عوامل مؤثر بر شدت تصادفات با توجه به سه شرایط روشنایی مختلف (نور روز، تاریکی با نور خیابان و تاریکی مطلق) پرداختند. نتایج نشان داد که تصادفات با عابر پیاده در نور روز بیشتر با کودکان زیر ۱۵ سال، عابران پیاده سالخورده بالای ۶۴ سال، رانندگان مسن‌تر از ۶۴ سال و رفتارهای رانندگی مانند بی‌توجهی، حواس‌پرتی، بیماری، خستگی و خواب‌آلودگی ارتباط دارد. همچنین، رانندگان جوان (۱۵ تا ۲۴ سال) در شرایط نور روز با افزایش شدت تصادفات با عابر پیاده ارتباط مستقیمی دارند [22]. انارکولی و حسینلو به بررسی تأثیر شرایط روشنایی مختلف بر شدت آسیب تصادفات در جاده‌های برون‌شهری دوخطه ایالت واشنگتن پرداختند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که شدت آسیب تصادفات تحت تأثیر هر یک از شرایط روشنایی (نور روز، تاریکی و تاریکی

عصر در آمریکا رخ داده است [2]. بر اساس گزارش پلیس راهور ایران در فروردین ۱۳۹۸ بیشترین تصادفات برون‌شهری بین ساعت ۱۶ تا ۲۰ با سهم ۲۸ درصدی رخ داده است؛ پس‌ازاین ساعت، ساعت ۱۲ تا ۱۶ بیشترین تصادفات را به خود اختصاص داده است. همچنین، طبق آمار شورای ملی ایمنی آمریکا در سال ۲۰۲۰، بیشترین تصادفات مرگبار در بازه‌های زمانی خاصی از شبانه‌روز رخ داده است.

گرچه در برخی مطالعات به بررسی مدل‌های شدت تصادفات پرداخته شده است اما هنوز ارتباط بین شدت تصادف و بازه زمانی شبانه‌روز به‌طور کامل درک و تحلیل نشده است. از طرفی در بیشتر تحقیقات انجام‌شده برای مدل‌سازی شدت تصادفات از مدل‌های آماری استفاده شد و تعیین روابط بین شدت و عوامل مؤثر با این مدل‌ها به دلیل وجود روابط پیچیده‌ای بین متغیرها دشوار است. در مطالعات جدید وضعیت روشنایی جاده به‌عنوان پارامتر مهمی در فراوانی و شدت تصادفات رانندگی در نظر گرفته شده است.

این پژوهش با استفاده از داده‌های تصادفات آزادراه برون‌شهری، توجیه‌پذیری مدل پروبیت ترتیبی^۱ را در تجزیه و تحلیل تأثیر زمان شبانه‌روز در شدت آسیب تصادف مورد بررسی قرار داده است. درواقع مدل پیشنهادی برای به دست آوردن درک بهتر از روابط پیچیده بین بازه‌های زمانی مختلف روز و عوامل مؤثر موجود در تصادفات این بازه‌ها استفاده می‌شود.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

در دو دهه گذشته، پژوهشگران ایمنی ترافیک از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین برای تحلیل شدت تصادفات استفاده کرده‌اند [3-11]. این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، توانایی مدیریت داده‌های گم‌شده و نویز دار و نیاز کم به فرضیات اولیه مورد توجه قرار گرفته‌اند [12].

در رویکردهای پژوهشی، مدل‌های انتخاب گسسته از کاربردی‌ترین تکنیک‌ها برای تحلیل شدت آسیب ناشی از تصادفات به شمار می‌روند [13-16]. مدل‌های لجستیک چندجمله‌ای^۲ و پروبیت ترتیبی^۳ شاخص‌ترین مدل‌های انتخاب گسسته برای تجزیه و تحلیل شدت تصادفات رانندگی هستند [17]. زای و همکاران از مدل پروبیت ترتیبی با پارامترهای تصادفی برای تحلیل عوامل مؤثر بر شدت تصادفات در جاده‌های دوخطه

¹ ordered probit

² Multinomial logit

³ ordered logit/probit

⁴ Poor pavement condition

برای اثبات توجیه‌پذیری تحلیل جداگانه بازه‌های زمانی استفاده شد. سپس، با استفاده از الگوریتم پروبیت ترتیبی توسعه‌یافته بر اساس بازه زمانی و شدت تصادف، متغیرهای مؤثر بر تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی در زمان‌های مختلف روز شناسایی شدند. این فرآیند برای هر بازه زمانی به صورت جداگانه انجام شد. در ادامه تفسیر و توجیه‌پذیری مدل پروبیت ترتیبی در پیش‌بینی شدت تصادفات بازه‌های زمانی مختلف روز با استفاده از متغیرهای مؤثر در شدت تصادفات مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۳-۱- داده و منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

بر مبنای روش محور مورد مطالعه در این پژوهش آزادراه لوشان قزوین در استان گیلان و قزوین است. این محور یک راه برون‌شهری دوخطه-دوطرفه جداشده به طول ۷۲ کیلومتر است. این آزادراه از کوه‌های البرز می‌گذرد و باهدف تقویت محور تهران-رشت-انزلی-آستارا که جزئی از مسیر کریدور بین‌المللی شمال-جنوب بوده و یکی از مهم‌ترین محورهای ارتباطی کشور محسوب می‌شود، احداث شده است. کریدور شمال-جنوب کوتاه‌ترین، ارزان‌ترین و مناسب‌ترین مسیر حمل‌کالا بین آسیا و اروپاست. آزادراه قزوین-رشت از نظر حمل‌ونقل جاده‌ای یکی از مهم‌ترین قطعات شبکه آزادراهی کشور است و استان‌های گیلان و اردبیل را به پایتخت کشور متصل می‌نماید که از دلایل اصلی انتخاب این محور برای انجام پژوهش بوده است.

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به سوابق شش سال تصادف (۱۳۹۰-۱۳۹۵) آزادراه برون‌شهری لوشان-قزوین است که از پلیس راه و سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای گرفته شده است. در مجموعه داده‌های تصادفات مورد تحلیل، در سه سطح شدت فوتی، جرحی و خسارتی تعریف می‌شوند؛ مجموعه داده شامل بیش از ۳۰ متغیر است. بر اساس هدف تحقیق و داده‌های در دسترس ۲۳ عامل مؤثر بر شدت تصادف به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. این متغیرها مرتبط با عوامل انسانی، آب‌وهوا، کنترل تقاطع، کاربری زمین، وضعیت روشنایی، محل تصادف، زمان تصادف (روز، ماه، سال و ساعت)، نوع و وضعیت روسازی، خط‌کشی راه، تعمیرات راه، نوع برخورد و هندسه راه می‌باشند.

به منظور تحلیل دقیق‌تر عوامل مؤثر بر شدت تصادفات، داده‌ها به چهار بازه زمانی تقسیم شدند تا امکان بررسی و شناسایی الگوهای زمانی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات فراهم شود. با توجه به داده‌های در دسترس، هدف تحقیق و همچنین نتایج مطالعات پیشین من جمله

با نور خیابان) به شکل‌های متفاوتی با عوامل مختلف مانند مکان تصادف، محدودیت سرعت، عرض شانه، رفتار راننده و نوع تصادف مرتبط است [23]. علاوه بر این، ژای و همکاران با استفاده از یک مدل لاجیت به بررسی شدت آسیب تصادفات وسیله نقلیه در جاده‌های برون‌شهری پرداختند. نتایج نشان داد که تاریکی هوا می‌تواند احتمال تصادفات بدون آسیب را افزایش دهد. آن‌ها همچنین ادعا کردند که رانندگان در هنگام غروب و شب با احتیاط بیشتری رانندگی می‌کنند [24].

بیشتر پژوهشگران از شرایط روشنایی به عنوان یک متغیر مستقل در کنار سایر عوامل در تحلیل شدت تصادفات استفاده کرده‌اند. درحالی‌که پاهوکولا و همکاران به بررسی تأثیر مستقیم زمان روز بر شدت تصادف پرداختند [25]. آن‌ها مدل‌های لجستیک ترکیبی را با استفاده از داده‌های سیستم ضبط اطلاعات تصادف^۱ (CRIS) در تگزاس (شامل تصادفات کامیون‌های سنگین در آزادراه‌های شهری بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰) ایجاد کردند. داده‌های تصادفات به پنج بازه زمانی مختلف شامل صبح زود، صبح، اواسط روز، بعدازظهر و عصر تقسیم‌بندی شدند. نتایج مطالعه نشان داد که مدل‌های تک زمانی تفاوت‌های قابل توجهی را در تأثیر متغیرها در هر بازه زمانی نشان می‌دهند و دوره‌های زمانی مختلف عوامل مؤثر خاص خود را در تعیین سطح‌های شدت آسیب دارند [25].

با توجه به پژوهش‌های پیشین، فقدان رویکردی که تأثیر عوامل مؤثر بر شدت تصادفات در شرایط روشنایی مختلف را بررسی کند، مشهود است. پژوهشگران به طور معمول شرایط روشنایی را به عنوان یک متغیر مستقل در تحلیل ایمنی راه در نظر گرفته‌اند که یک رویکرد دارای محدودیت است، زیرا عوامل مختلف تحت شرایط روشنایی متفاوت می‌توانند به طور پیچیده‌ای با یکدیگر تعامل داشته و بر شدت آسیب تأثیر بگذارند. با توجه به محدودیت‌های مطرح شده، هدف مطالعه حاضر این است که تأثیر عوامل مختلف بر شدت آسیب در بازه‌های ساعتی مختلف روز را از طریق مدل‌سازی جداگانه برای هر بازه زمانی بررسی کند.

۳- روش پژوهش

بر مبنای روش پیشنهادی در این تحقیق، ابتدا داده‌های تصادفات از پلیس راه جمع‌آوری شده و پایگاه داده ایجاد شده مورد پیش‌پردازش و تحلیل آماری قرار می‌گیرد. از آزمون نسبت احتمال

¹ Crash Records Information System

در مجموع ۲۱۲۵ داده تصادف، تعداد تصادفات فوتی، خسارتی و جرحی به ترتیب ۶۹، ۱۶۷۰ و ۳۸۶ مورد است. تحلیل آماری مجموعه داده‌های تصادفات در چهار بازه زمانی مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

۴- سنجش ویژگی‌های مدل

پس از توسعه مدل‌ها، از آزمون‌های نسبت احتمال به دلیل توانایی ارزیابی معناداری آماری برای تعیین توجیه‌پذیری استفاده از مدل‌های جداگانه بر اساس بازه‌های زمانی استفاده شد. در ابتدا مدل کامل با تمام مدل‌های بازه مختلف زمانی مقایسه، و سپس مدل‌ها به صورت جداگانه با یکدیگر مقایسه شدند. لگاریتم آزمون نسبت احتمال برای انتقال‌پذیری به شرح رابطه (۱) است [24 و 27].

$$x^2 = -2 \left[LL(\beta_T) - \sum_k^{k=j} LL(\beta_k) \right] \quad (1)$$

پاهالوکا و همکاران [25]، زو و همکاران [26] و مورگان و منرینگ [27] تجزیه و تحلیل شدت تصادفات در چهار بازه زمانی صبح از ۶:۰۰ تا ۱۰:۰۰، ظهر از ۱۰:۰۰ تا ۱۵:۰۰، غروب از ۱۵:۰۰ تا ۱۹:۰۰ و شب از ۱۹:۰۰ تا ۶:۰۰ مورد بررسی قرار گرفت؛ شکل (۱)، فراوانی تصادفات به تفکیک بازه‌های زمانی را نشان می‌دهد.

شکل ۱. فراوانی تصادفات با توجه به زمان روز

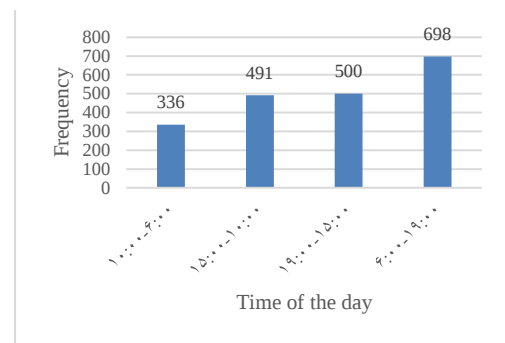


Fig 1. Crash frequency by time of the day

جدول ۱. تحلیل آماری متغیرهای ورودی و خروجی روش پیشنهادی به تفکیک بازه‌های زمانی شبانه‌روز در محور مورد مطالعه

Variables and description	Noon (10:00-15:00)		Sunset (15:00-19:00)		Night (19:00-6:00)		Morning (6:00-10:00)	
	mean	Std.dev	mean	Std.dev	mean	Std.dev	mean	Std.dev
Injury severity								
Fatal (1 if true; otherwise 0)	0.036		0.032		0.035		0.029	
Injury (1 if true; otherwise 0)	0.124		0.15		0.156		0.122	
Property Damage Only (1 if true; otherwise 0)	0.839		0.818		0.808		0.848	
Driver info								
Distraction (1 if true; otherwise 0)	0.179	0.383	0.186	0.389	0.189	0.391	0.181	0.385
Road condition								
Level terrain (1 if true; otherwise 0)	0.993	0.077	0.992	0.089	0.994	0.075	0.988	0.108
Mountainous terrain (1 if true; otherwise 0)	0.002	0.045	0.002	0.044	0.004	0.065	0.011	0.108
Crash location (1 if on roadway; otherwise 0)	0.90	0.299	0.874	0.331	0.873	0.331	0.727	0.452
Crash location (1 if near Ghazvin; otherwise 0)	0.810	0.391	0.846	0.360	0.790	0.406	0.830	0.375
Crash location (1 if near Kuhin; otherwise 0)	0.810	0.391	0.846	0.360	0.789	0.407	0.830	0.375
Divided road (1 if true; otherwise 0)	0.802	0.398	0.798	0.401	0.793	0.404	0.815	0.387
Road marking (1 if broken line; otherwise 0)	0.702	0.457	0.656	0.475	0.664	0.472	0.645	0.478
Non-residential land use (1 if true; otherwise 0)	0.792	0.405	0.77	0.420	0.762	0.425	0.773	0.418
Straight road (1 if true; otherwise 0)	0.857	0.349	0.844	0.362	0.828	0.806	0.806	0.395
Curve road (1 if true; otherwise 0)	0.142	0.349	0.156	0.362	0.171	0.193	0.193	0.395
Environmental factors								
Sunny weather (1 if true; otherwise 0)	0.839	0.374	0.812	0.390	0.813	0.389	0.809	0.392
Snowy weather (1 if true; otherwise 0)	0.052	0.223	0.086	0.280	0.065	0.248	0.053	0.225
Road surface (1 if dry; otherwise 0)	0.841	0.365	0.83	0.375	0.830	0.374	0.818	0.385
Road surface (1 if icy and snowy; otherwise 0)	0.050	0.219	0.064	0.244	0.045	0.209	0.086	0.280
Collision info								
Fixed-object collision (1 if true; otherwise 0)	0.397	0.489	0.262	0.480	0.345	0.475	0.473	0.499
Collision with a vehicle (1 if true; otherwise 0)	0.309	0.457	0.324	0.446	0.328	0.469	0.247	0.431
Collisions with animals (1 if true; otherwise 0)	0.010	0.100	0.016	0.125	0.011	0.106	0.011	0.108
Roadway departure (1 if true; otherwise 0)	0.078	0.268	0.086	0.280	0.067	0.250	0.065	0.247
Vehicle rollover (1 if true; otherwise 0)	0.134	0.341	0.154	0.360	0.166	0.372	0.175	0.380
Head-on (1 if true; otherwise 0)	0.134	0.361	0.15	0.367	0.140	0.247	0.163	0.369
Rear-end (1 if true; otherwise 0)	0.167	0.372	0.176	0.380	0.174	0.379	0.127	0.334

Table 1. Statistical analysis of the input and output variables of the proposed method to separate day and night time periods on the studied road

$LL(\beta_T)$ احتمال همگرایی برای مدل کامل است $LL(\beta_k)$ احتمال همگرا بودن مدل در بازه زمانی k (ظهر، غروب، شب، صبح) با استفاده از متغیرهای یکسان در مدل کلی است. k برابر با تعداد بازه‌های زمانی است $(\sum_{k=0}^K LL(\beta_k) = -950/18)$. آمار مربع گای برای آزمون نسبت احتمال با ۴۷ درجه آزادی، با ضریب اطمینان بالای ۹۹/۹۹ درصد $(\chi^2 = -1050/40)$ به دست آمد که به معنای رد فرضیه صفر است؛ به این معنی که فرض یکسان بودن پارامترهای مدل بازه‌های زمانی کلی و جداگانه، رد می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌ها دارای پارامترهای مؤثر متفاوت از نظر آماری هستند. برای توجیه بیشتر استفاده از مدل مجزا در هر بازه زمانی، دومین آزمون درست نمایی لگاریتمی برای آزمایش قابلیت انتقال ضرایب رگرسیون از مدل کلی به هر مدل بازه زمانی انجام می‌شود:

$$\chi^2 = -2[Lk\beta_{(k_1k_2)} - LU\beta_{(k_1)}] \quad (2)$$

$LL(\beta_{k_1k_2})$ لگاریتم درست نمایی در همگرایی یک مدل با استفاده از پارامترهای مدل k_2 برای داده‌های بازه زمانی k_1 است و $LL(\beta_{k_1})$ لگاریتم درست نمایی در همگرایی مدل با استفاده از داده‌های بازه زمانی k_1 (بدون محدودیت پارامترها) است. آمار χ^2 با درجات آزادی برابر با تعداد پارامترهای برآورد شده در $\beta_{k_1k_2}$ این احتمال را به همراه دارد که مدل‌ها دارای پارامترهای متفاوتی باشند. هر یک از آمارهای مربوط به تست بالاتر از مقدار χ^2 به ۴۷ درجه آزادی خاص در سطح اطمینان ۹۹/۹۹ درصد است $(P=0/0001)$. در نتیجه این نتایج توسعه مدل جداگانه در بازه‌های زمانی مختلف را توجیه می‌کند.

جدول (۲) نتایج دومین آزمایش قابلیت انتقال‌پذیری را نشان می‌دهد (رابطه ۲). ترکیبی از این دو آزمون نسبت احتمال، ارزیابی خوبی از تفاوت‌های آماری بازه‌های زمانی مختلف ایجاد می‌کند [27]؛ بنابراین، مشخص شد که چهار مدل جداگانه از نظر آماری توجیه‌پذیر هستند (با سطح اطمینان بیش از ۹۹/۹۹ درصد).

جدول ۲. آزمایش انتقال‌پذیری برای بررسی چهار مدل

k1	k2			
	Morning	Night	Sunset	Noon
Noon	10144/83 (df=16)	93/62 (df=22)	6174/93 (df=19)	0
Sunset	292/38 (df=16)	19/04 (df=22)	0	22/03 (df=21)
Night	4459/65 (df=16)	0	3063/10 (df=19)	36/18 (df=21)
Morning	4459/5 (df=16)	26/17 (df=22)	238/58 (df=19)	21/06 (df=21)

Table 2. Transferability test comparing the four models

می‌دهند و نتایج مدل پروبیت ترتیبی را بر اساس هریک از سطوح شدت تصادف (فوتی، جرحی و خسارتی) تفسیرپذیر می‌کنند.

۵-۱- نتایج مدل پیشنهادی در بازه زمانی ۰۰:۱۰ الی ۱۵:۰۰ به منظور تحلیل شدت تصادفات

جدول شماره (۳) نتایج برآورد شدت آسیب را در بازه زمانی ۱۰:۰۰ الی ۱۵:۰۰ نشان می‌دهد. سطح جاده یخ‌زده و برفی، آب‌وهوای برفی، حواس‌پرتی راننده، محل تصادف باند سواره‌رو و تصادف با شیء ثابت به ترتیب با ضریب‌های $-1/77$ ، $1/74$ ، $1/33$ ، $-0/87$ و $-0/58$ متغیرهای معنادار در تعیین سطح شدت تصادفات در بازه زمانی ظهر هستند.

جدول شماره (۳) همچنین نشان می‌دهد، در طی ظهر، جاده یخبندان و برفی با اثر حاشیه‌ای $0/3$ با تصادفات خسارتی ارتباط مستقیمی دارد. یک توضیح احتمالی برای این یافته این است که

۵- پیاده‌سازی و نتایج

از مدل پروبیت ترتیبی به صورت جداگانه برای هریک از بازه‌های زمانی استفاده شد و در نهایت به تفسیر نتایج مدل و تحلیل روابط بین عوامل تأثیرگذار در شدت تصادفات پرداخته شد. متغیرهایی که p -value آن‌ها کمتر از $0/05$ (سطح معمول پذیرفته شده) است، از نظر آماری معنی‌دار بوده و با سطح اطمینان ۹۵ درصد بر شدت آسیب تأثیر می‌گذارند. در نتایج به دست آمده مقدار ضریب مثبت برای یک متغیر مستقل بدین معناست که با شدت آسیب ارتباط مثبت داشته و با افزایش میزان آن، میزان شدت آسیب افزایش می‌یابد و برعکس. همچنین در ادامه آثار حاشیه‌ای برای هر یک از متغیرهایی که از نظر آماری در هر مدل دارای اهمیت هستند محاسبه می‌شود. آثار حاشیه‌ای، تأثیر تغییرات هر واحد متغیر را روی سطوح شدت آسیب، به صورت جداگانه نشان

ارتباط مستقیم دارد. حواس‌پرتی زمان عکس‌العمل راننده را در مقابل اتفاقات رخ داده در محیط پیرامون افزایش داده که به دنبال آن در این تصادفات برخورد با شدت بالا بیشتر رخ می‌دهد.

نتایج جدول (۳) مبین این مطلب است که متغیر محل تصادف باند سواره‌رو و برخورد با شیء ثابت با وقوع تصادفات منجر به فوت و جرح در بازه زمانی ظهر ارتباط عکس دارد. در این زمان، حجم ترافیک معمولاً کمتر از ساعات اوج است که باعث کاهش تراکم خودروها و در نتیجه کاهش احتمال تصادفات شدید می‌شود. همچنین نور روز و بهبود دید رانندگان امکان تشخیص بهتر خطرات و واکنش سریع‌تر را فراهم می‌کند.

علاوه بر تردد کمتر وسایل نقلیه در این شرایط، رانندگان معمولاً در جاده یخبندان و برفی با احتیاط بیشتری رانندگی می‌کنند و در نتیجه تصادفات فوتی و جرحی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، متغیر آب‌وهوای برفی، تأثیر مثبتی برافزایش شدت آسیب در آزادراه‌های برون‌شهری دارد. آب‌وهوای برفی باعث حواس‌پرتی راننده، کاهش دید و همچنین لغزنده شدن جاده می‌شود که می‌تواند دلیل این متغیر برافزایش شدت تصادفات باشد.

طبق آیین‌نامه ایمنی راه‌ها (وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۳) عامل انسانی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر ایمنی راه است. طبق نتایج جدول (۳)، حواس‌پرتی راننده در بازه زمانی ظهر، با صدمات فوتی و جرحی سرنشینان به ترتیب با اثر حاشیه‌ای ۰/۰۷ و ۰/۱۵

جدول ۳. نتایج مدل‌سازی شدت تصادفات به روش پروبیت ترتیبی در ظهر (۱۰:۰۰ الی ۱۵:۰۰)

Variable	Coefficient	Std.Error	Z-value	Marginal effects		
				PDO	Injury	Fatal
Level terrain	5.781736	191.4746	0.03	-1.00307	0.66685	0.336216
Mountainous terrain	2.636185	432.5434	0.01	-0.45735	0.30405	0.153298
Roadway crash location	-0.87517	0.222969	-3.93	0.151832	-0.10094	-0.05089
Ghazvin crash location	0.085518	0.221208	0.39	-0.01484	0.009863	0.004973
Divided road	-0.23755	0.213824	-1.11	0.041211	-0.0274	-0.01381
Broken line marking	0.101561	0.229517	0.44	-0.01762	0.011714	0.005906
Non-residential land use	0.088319	0.307861	0.29	-0.01532	0.010187	0.005136
Sunny weather	-0.22352	0.367139	-0.61	0.038778	-0.02578	-0.013
Snowy weather	1.741827	0.794918	2.19	-0.30219	0.200898	0.10129
Dry road surface	-0.03261	0.388817	-0.08	0.005657	-0.00376	-0.0019
Icy and snowy road surface	-1.77013	0.826067	-2.14	0.307098	-0.20416	-0.10294
Driver distraction	1.326082	0.179487	7.39	-0.23006	0.152947	0.077113
Straight road	0.264018	0.244417	1.08	-0.0458	0.030451	0.015353
Fixed-object collision	-0.57891	0.293078	-1.98	0.100435	-0.06677	-0.03366
Collision with a vehicle	-0.49095	0.299237	-1.64	0.085173	-0.05662	-0.02855
Collisions with animals	-4.32189	169.0745	-0.03	0.749798	-0.49847	-0.25132
Roadway departure	-0.13782	0.35872	-0.38	0.023911	-0.0159	-0.00801
Vehicle rollover	-0.38519	0.328679	-1.17	0.066825	-0.04443	-0.0224
Head-on collision	-0.06072	0.331216	-0.18	0.010535	-0.007	-0.00353
Rear-end collision	-0.53636	0.29619	-1.81	0.093052	-0.06186	-0.03119
Model statistics						
μ_1	5.954704	191.4753				
μ_2	7.026608	191.4754				
Log likelihood at convergence	-196.169					
Log likelihood ratio index (p2)	0.2426					
Number of observations	491					

Table 3. The results of crash severity modeling by ordered probit method at noon (10:00 to 15:00)

با ضریب ۱/۲۵، ۱/۲۴، ۱/۰۶- و ۰/۴۹ متغیرهای معنادار در تعیین سطح شدت تصادفات در بازه زمانی غروب هستند.

بر اساس نتایج مدل پیشنهادی در بازه زمانی غروب، متغیرهای حواس‌پرتی راننده و محل تصادف در نزدیکی شهر قزوین با افزایش شدت تصادفات ارتباط مستقیمی دارند. در این بازه زمانی، غروب خورشید باعث کاهش وضوح جاده و عوامل محیطی شده

۲-۵- نتایج مدل پیشنهادی در بازه زمانی ۱۵:۰۰ الی ۱۹:۰۰ به‌منظور تحلیل شدت تصادفات

نتایج برآورد شدت تصادفات در بازه زمانی ۱۵:۰۰ الی ۱۹:۰۰ بر اساس جدولی مشابه جدول (۳) از مدل پروبیت ترتیبی استخراج شده است. حواس‌پرتی، برخورد جلو با شیء ثابت، تصادف جلو به عقب و محل تصادف در نزدیکی قزوین به ترتیب

و میدان دید کاهش می‌یابد. حواس پرتی راننده، ترافیک بیشتر و وجود عوامل حادثه‌ساز بیشتر نزدیک شهر در کنار کاهش میدان دید، زمان عکس‌العمل را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و این تأخیر در واکنش می‌تواند باعث تصادفات شدیدتر و خطرناک‌تر شود.

با توجه به نتایج مدل پروبیت ترتیبی تصادفات جلو با شیء ثابت و جلو به عقب در هنگام غروب در آزادراه‌های برون‌شهری با افزایش شدت تصادفات ارتباط مستقیمی دارند. دلیل این اتفاق می‌تواند کاهش میدان دید ناشی از تغییرات روشنایی، خستگی رانندگان در پایان روز و رانندگی با سرعت زیاد در آزادراه‌ها باشد. در زمان غروب، تشخیص اشیاء ثابت و تغییرات سرعت خودروهایی جلویی دشوارتر می‌شود که می‌تواند منجر به برخوردهای شدیدتر شود. علاوه بر این، خستگی ناشی از رانندگی طولانی در مسیرهای برون‌شهری و کمبود روشنایی کافی در برخی قسمت‌های آزادراه‌ها، خطر و شدت این تصادفات را افزایش می‌دهد.

۳-۵- نتایج مدل پیشنهادی در بازه زمانی ۱۹:۰۰ الی ۶:۰۰ به‌منظور تحلیل شدت تصادفات

عوامل مؤثر بر شدت تصادفات در بازه زمانی ۱۹:۰۰ الی ۶:۰۰ بر اساس نتایج مدل پروبیت ترتیبی مانند جدول (۳) به دست آمده است. حواس پرتی، برخورد با شیء ثابت، برخورد با وسیله نقلیه، تصادف جلو به عقب، محل تصادف باند سواره به ترتیب با ضریب ۰/۹۸، ۰/۵۷، ۰/۵۳، ۰/۴۷، ۰/۷۳- متغیرهای معنادار در تعیین سطح شدت تصادفات در بازه زمانی شب هستند.

تحلیل‌های مدل پروبیت ترتیبی نشان می‌دهد که شدت تصادفات در باند سواره‌رو در ساعات شب کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد رانندگان در هنگام تردد شبانه در باند سواره‌رو با آگاهی از محدودیت‌های دید و خطرات بالقوه، تدابیر ایمنی بیشتری را اتخاذ می‌کنند. این رفتار محتاطانه بیشتر شامل کاهش سرعت و افزایش هوشیاری است که به‌طور مستقیم منجر به کاهش شدت آسیب‌های ناشی از تصادفات احتمالی می‌شود.

بر اساس نتایج مدل پروبیت ترتیبی برخورد با شیء ثابت، برخورد با وسیله نقلیه و تصادفات جلو به عقب در هنگام شب، رابطه معکوسی با افزایش شدت تصادفات دارند. افزایش هوشیاری

و احتیاط رانندگان در روشنایی کم شب، کاهش حجم ترافیک شبانه و افزایش زمان واکنش به دلیل سرعت کمتر و فاصله بیشتر بین خودروها می‌تواند از دلایل کاهش شدت این نوع تصادفات در بازه زمانی شب باشد.

۴-۵- نتایج مدل پیشنهادی در بازه زمانی ۶:۰۰ الی ۱۰:۰۰ به‌منظور تحلیل شدت تصادفات

مشابه جدول (۳) متغیرهای تأثیرگذار بر شدت تصادفات در بازه زمانی ۶:۰۰ الی ۱۰:۰۰ از مدل پروبیت ترتیبی به دست آمدند. برخورد با شیء ثابت، شرایط آب و هوایی صاف، حواس پرتی، برخورد با وسیله نقلیه، واژگونی و سقوط، محل تصادف باند سواره و محل تصادف در نزدیکی قزوین به ترتیب با ضریب ۱/۸۳، ۱/۶۱، ۱/۲۱، ۱/۴۳، ۱/۱۶، ۰/۷۶- و ۰/۶۵ متغیرهای معنادار در تعیین سطح شدت تصادفات در بازه زمانی صبح هستند. مطابق نتایج مدل پروبیت ترتیبی باند سواره‌رو ارتباط عکسی با افزایش شدت تصادفات دارد. شرایط نوری مطلوب صبحگاهی دید بهتری را فراهم می‌کند؛ ترافیک در این ساعات بیشتر روان‌تر و با سرعت یکنواخت‌تری جریان دارد و رانندگان در شروع حرکت که اغلب هنگام صبح است تمرکز بیشتری بر رانندگی دارند. همچنین، در صبح معمولاً شرایط جوی مساعدتر است و خطر خواب‌آلودگی کمتر از ساعات شب یا بعدازظهر است.

آب‌وهوای صاف طبق نتایج مدل پروبیت ترتیبی با افزایش شدت تصادفات رابطه مثبتی دارد. دلیل آن میل رانندگان به رانندگی به‌سرعت زیاد در این نوع آب‌وهوا و جاده خلوت هنگام صبح است. افزایش سرعت رانندگی موجب افزایش زمان عکس‌العمل راننده و افزایش شدت تصادفات است. همچنین حواس پرتی که می‌تواند به دلیل خواب‌آلودگی نیز باشد، موجب افزایش زمان عکس‌العمل راننده و در نتیجه افزایش شدت تصادفات می‌شود.

در ساعات صبح، به‌ویژه در آزادراه‌هایی که به شهرهای بزرگ مانند قزوین منتهی می‌شوند، تلاقی ترافیک ورودی به شهر با خستگی ناشی از یک سفر طولانی می‌تواند عامل مهمی در افزایش شدت تصادفات باشد. همچنین دمای پایین صبحگاهی و احتمال یخ‌زدگی مقطعی جاده‌ها در فصل‌های سرد سال، به‌ویژه در مسیرهای کوهستانی اطراف قزوین، می‌تواند خطر لغزندگی و

تصادفات را بیشتر کند.

مطابق نتایج مدل پروبیت ترتیبی برخورد با وسیله نقلیه، واژگونی و سقوط و برخورد با شیء ثابت در بازه زمانی صبح و آزادراه‌های برون‌شهری مورد مطالعه رابطه عکسی با افزایش شدت تصادفات دارند. در این بازه، ترافیک صبحگاهی می‌تواند باعث کاهش سرعت متوسط وسایل نقلیه شود و در نتیجه، تصادفات رخ داده به شدت کمتری منجر شوند. همچنین، در ساعات ابتدایی صبح، رانندگان معمولاً به دلیل هوشیاری بیشتر و تمرکز بر رانندگی، قادر به واکنش سریع‌تر در مواجهه با شیء ثابت یا مانورهای خودروی جلویی هستند.

۶- ارزیابی و بحث

با توجه به نتایج پژوهش، حواس‌پرتی راننده با افزایش شدت آسیب در تمامی بازه‌های زمانی مورد تحلیل تحقیق ارتباط مثبت دارد. مطابق نتایج مدل پروبیت ترتیبی در بازه زمانی ظهر نسبت به زمان‌های دیگر، حواس‌پرتی راننده بیشتر موجب افزایش شدت تصادفات می‌شود. در بازه زمانی ظهر، افزایش حجم ترافیک و تنش ناشی از رانندگی در شرایط شلوغ، احتمال از دست رفتن تمرکز رانندگان را افزایش می‌دهد. این حواس‌پرتی، به‌ویژه در ساعات شلوغ، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های نادرست و کاهش تمرکز رانندگان شود که در نتیجه احتمال وقوع تصادفات شدیدتر افزایش می‌یابد. تحقیقات و اندرسیتز بر روی ۱۸۶ تصادف فوتی و جرحی در استرالایای جنوبی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ نشان داد که تقریباً یک‌سوم تصادفات شامل بی‌توجهی و حواس‌پرتی راننده بوده و بسیاری از این موارد می‌توانستند پیشگیری شوند. البته آن‌ها اثر زمان روز و صرفاً مسیر برون‌شهری را در این تحقیق در نظر نگرفتند [28].

بر اساس نتایج برآورد مدل پروبیت ترتیبی، تصادفات رخ داده در باند سواره‌رو در همه بازه‌های زمانی با شدت تصادفات رابطه عکس دارد. آثار حاشیه‌ای متغیر محل تصادف نشان می‌دهد که تصادفاتی که در باند سواره‌رو رخ می‌دهد اغلب خسارتی هستند. این مورد می‌تواند در حالت کلی به دلیل احتیاط بیشتر رانندگان در این باند باشد؛ بنابراین به دنبال احتیاط، سرعت برخورد کاهش یافته، شدت صدمات تصادفات در این نقاط از جاده

برون‌شهری مورد مطالعه کاهش می‌یابد. شینستاین و همکاران در مطالعه خود رابطه منفی تأثیر باند سواره‌رو بر شدت تصادفات را نشان دادند. البته در تحقیق مذکور بازه‌های زمانی مختلف در نظر گرفته نشده است [29].

دلیل رابطه معکوس بین انواع برخورد و شدت تصادفات در آزادراه برون‌شهری در تمام بازه‌های زمانی می‌تواند طراحی هندسی ایمن‌تر آزادراه‌ها (مسیرهای با قوس کمتر و عرض بیشتر)، کمتر بودن عوامل به هم زننده تمرکز رانندگان مانند عابران پیاده و چراغ‌های راهنمایی، شرایط جوی و دید بهتر در مسیرهای برون‌شهری و وجود عوامل حادثه‌ساز کمتر در این جاده‌ها باشد. هولدریج و همکاران به تحلیل شدت آسیب در تصادفات با اشیاء ثابت در سیستم جاده‌ای شهری ایالت واشنگتن انجام پرداختند. در این تحقیق، مشخص شد که تصادف با اشیاء ثابت مانند انتهای گاردریل‌ها و تیرک‌های چوبی (درختان و تیر برق) احتمال تصادفات فوتی و جرحی را افزایش می‌دهد درحالی‌که برخورد با وسط گاردریل‌ها و موانع بتنی با طراحی مناسب می‌توانند شدت جراحات را کاهش دهند [30].

بر اساس نتایج تحقیق آب‌وهوای برفی با افزایش شدت تصادفات در بازه زمانی ظهر رابطه مستقیم دارد، درحالی‌که سطح جاده یخبندان و برفی با افزایش شدت تصادفات در محور مورد مطالعه رابطه عکس دارد. در ساعات ظهر، ترافیک معمولاً بیشتر است و بارش برف می‌تواند شرایط جاده را به طور ناگهانی تغییر دهد و دید رانندگان را مختل کند. درحالی‌که جاده‌های یخبندان و برفی معمولاً از قبل اطلاع‌رسانی می‌شوند و اطلاع‌رسانی به موقع درباره وضعیت این جاده‌ها می‌تواند به کاهش ترافیک، افزایش احتیاط در رانندگی و استفاده از تجهیزات ایمنی مناسب در خودروها کمک کند. اودین و هوین به بررسی تأثیر شرایط جوی مختلف بر شدت آسیب تصادفات کامیون‌ها با استفاده از داده‌های تصادفات آزادراه‌های ایالت اوهایو در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ پرداختند. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها شرایط جوی برفی به‌ویژه در جاده‌های برون‌شهری موجب افزایش شدت تصادفات می‌شود. البته این تحقیق نیز تأثیر زمان بر شدت تصادفات را در نظر نگرفته بود [31].

۷- نتیجه گیری

پژوهش حاضر نشان داد که با تفسیر نتایج الگوریتم های آماری می توان از میان حجم زیادی از داده های تصادفات، الگوهای مفیدی استخراج کرده و شدت تصادفات را تحلیل کرد. الگوریتم پروبیت ترتیبی یکی از ابزارهای قدرتمند مدل سازی شدت تصادفات است که می تواند با ارائه آماره هایی همچون آزمون Z و اثر حاشیه ای در خروجی از مدل، رابطه پیچیده میان متغیرهای ورودی و شدت تصادفات را نشان دهد. در این مقاله، از مدل ثابت پروبیت ترتیبی برای بررسی تفاوت بازه های زمانی مختلف در شدت آسیب تصادفات برای آزادراه های برون شهری استفاده شده است. با استفاده از داده های محور لوشان-قزوین، مدل سازی جداگانه ای برای چهار بازه زمانی تهیه شد. مجموعه ای از آزمون های نسبت احتمال انجام شد تا توجیه پذیر بودن این مدل ها را بررسی نماید. نتایج برآورد نشان می دهد که سطوح شدت آسیب تصادف در بازه های زمانی مختلف با عوامل مختلف به طرق مختلف مرتبط است و این تفاوت ها را نمی توان با برآورد تنها یک مدل کلی کشف نمود.

روش پیشنهادی تحقیق و توسعه چهار مدل شدت تصادفات مجزا بر اساس بازه های زمانی برای تصادفات در آزادراه ها مورد مطالعه، اطلاعات جدیدی را از الگوهای مؤثر بر شدت تصادفات شناسایی نمود که در تحقیقات مربوط به ایمنی و تصادفات در آزادراه های کشور قابل به کارگیری و تعمیم است. با این حال، مانند بسیاری از مطالعات گذشته، مطالعه حاضر نیز دارای محدودیت هایی است، مانند استفاده از یک پایگاه داده واحد و متغیرهای محدود که به عنوان نمونه شرایط راننده در هنگام تصادف که یکی از عوامل مهم است در اختیار نیست؛ برای مطالعات آینده، بسته به اهداف مختلف تحقیقاتی، می توان شکل عمیق تری از تجزیه و تحلیل وضعیت بازه های مختلف تر روز یا روزهای هفته را با توجه به دسته های مختلف داده مانند منطقه، نوع تصادف، شرایط محیطی و غیره انجام داد. همچنین می توان به جای شرایط بازه های زمانی مختلف، سایر شرایط سطح جاده نیز به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

۸- قدردانی

سپاس و تشکر فراوان از اداره راهداری و حمل و نقل جاده ای و

پلیس راه کشور برای داده های متنی و توصیفی که در اختیار قرار دادند.

۹- مراجع

- [1] WHO, V., 2023. Global status report on road safety 2023. *World Health Organization*.
- [2] National Safety Council (NSC) analysis of National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Fatality., 2020. Analysis Reporting System (FARS) and Crash Report Sampling System (CRSS).
- [3] Effati, M., Thill, J.C. and Shabani, S., 2015. Geospatial and machine learning techniques for wicked social science problems: analysis of crash severity on a regional highway corridor. *Journal of Geographical Systems*, 17, pp.107-135.
- [4] Hasan, A.S., Kabir, M.A.B., Jalayer, M. and Das, S., 2023. Severity modeling of work zone crashes in New Jersey using machine learning models. *Journal of Transportation Safety & Security*, 15(6), pp.604-635.
- [5] Mittal, M., Gupta, S., Chauhan, S. and Saraswat, L.K., 2022. Analysis on road crash severity of drivers using machine learning techniques. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 13(2), pp.154-163.
- [6] Zhang, Z., Nie, Q., Liu, J., Hainen, A., Islam, N. and Yang, C., 2024. Machine learning based real-time prediction of freeway crash risk using crowdsourced probe vehicle data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 28(1), pp.84-102.
- [7] Effati, M. and Saheli, M.V., 2022. Examining the influence of rural land uses and accessibility-related factors to estimate pedestrian safety: The use of GIS and machine learning techniques. *International journal of transportation science and technology*, 11(1), pp.144-157.
- [8] Effati, M., Behbahani, H., Mortezaei, S. and Vahedi Saheli, M., 2021. Modelling and analyzing the severity of two-lane highway crashes using the spatial data mining, case study: Old Corridor of Qazvin-Loshan. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 51(105), pp.81-95.
- [9] Effati, M. and Asgari, A., 2020. Developing a model based on geospatial information systems (GIS) and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) for providing the spatial distribution map of landslide risk. Case study: Alborz Province. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 9(3), pp.185-200.
- [10] Saheli, M.V. and Effati, M., 2019. Investigation of factors contributing to pedestrian crash severity in rural roads. *Journal of Injury and Violence Research*, 11(4 Suppl 2).
- [11] Effati, M. and Abedi, F., 2018. Developping an

- [21] Obeidat, M.S., Khrais, S.K., Bataineh and, B.S. and Rababa, M.M., 2022. Impacts of roadway lighting on traffic crashes and safety in Jordan. *International journal of crashworthiness*, 27(2), pp.533-542.
- [22] Hossain, A., Sun, X., Thapa, R. and Codjoe, J., 2022. Applying association rules mining to investigate pedestrian fatal and injury crash patterns under different lighting conditions. *Transportation research record*, 2676(6), pp.659-672.
- [23] Anarkooli, A.J. and Hosseinlou, M.H., 2016. Analysis of the injury severity of crashes by considering different lighting conditions on two-lane rural roads. *Journal of safety research*, 56, pp.57-65.
- [24] Xie, Y., Zhao, K. and Huynh, N., 2012. Analysis of driver injury severity in rural single-vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 47, pp.36-44.
- [25] Pahukula, J., Hernandez, S. and Unnikrishnan, A., 2015. A time of day analysis of crashes involving large trucks in urban areas. *Accident Analysis & Prevention*, 75, pp.155-163.
- [26] Zou, W., Wang, X. and Zhang, D., 2017. Truck crash severity in New York city: an investigation of the spatial and the time of day effects. *Accident Analysis & Prevention*, 99, pp.249-261.
- [27] Morgan, A. and Mannering, F.L., 2011. The effects of road-surface conditions, age, and gender on driver-injury severities. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), pp.1852-1863.
- [28] Wundersitz, L., 2019. Driver distraction and inattention in fatal and injury crashes: Findings from in-depth road crash data. *Traffic injury prevention*, 20(7), pp.696-701.
- [29] Shinstine, D.S., Wulff, S.S. and Ksaibati, K., 2016. Factors associated with crash severity on rural roadways in Wyoming. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, 3(4), pp.308-323.
- [30] Holdridge, J.M., Shankar, V.N. and Ulfarsson, G.F., 2005. The crash severity impacts of fixed roadside objects. *Journal of Safety Research*, 36(2), pp.139-147.
- [31] Uddin, M. and Huynh, N., 2020. Injury severity analysis of truck-involved crashes under different weather conditions. *Accident Analysis & Prevention*, 141.
- Uncertainty Based Reasoning Approach for Bus Rapid Transit Systems Deployment Planning, Case Study: BRT Lane of Rasht City. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, 4(Special Issue).
- [12] Tang, J., Zheng, L., Han, C., Yin, W., Zhang, Y., Zou, Y. and Huang, H., 2020. Statistical and machine-learning methods for clearance time prediction of road incidents: A methodology review. *Analytic Methods in Accident Research*, 27.
- [13] Chang, F., Haque, M.M., Yasmin, S. and Huang, H., 2022. Crash injury severity analysis of E-Bike Riders: A random parameters generalized ordered probit model with heterogeneity in means. *Safety Science*, 146.
- [14] Kang, Y. and Khattak, A.J., 2022. Deep learning model for crash injury severity analysis using SHapley Additive exPlanation values. *Transportation research record*, 2676(12), pp.242-254.
- [15] Kitali, A.E., Kidando, E., Alluri, P., Sando, T. and Salum, J.H., 2022. Modeling severity of motorcycle crashes with Dirichlet process priors. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14(1), pp.24-45.
- [16] Adanu, E.K., Agyemang, W., Islam, R. and Jones, S., 2022. A comprehensive analysis of factors that influence interstate highway crash severity in Alabama. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14(9), pp.1552-1576.
- [17] Savolainen, P.T., Mannering, F.L., Lord, D. and Quddus, M.A., 2011. The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), pp.1666-1676.
- [18] Xie, S., Ji, X., Yang, W., Fang, R. and Hao, J., 2020. Exploring Risk Factors with Crash Severity on China Two-Lane Rural Roads Using a Random-Parameter Ordered ProbitModel. *Journal of advanced transportation*, 2020(1), p.8870497.
- [19] Khan, S.A., Afghari, A.P., Yasmin, S. and Haque, M.M., 2023. Effects of design consistency on run-off-road crashes: An application of a Random Parameters Negative Binomial Lindley model. *Accident Analysis & Prevention*, 186, p.107042.
- [20] Tamakloe, R., Sam, E.F., Bencekri, M., Das, S. and Park, D., 2022. Mining groups of factors influencing bus/minibus crash severities on poor pavement condition roads considering different lighting status. *Traffic injury prevention*, 23(5), pp.308-314.

Investigating the Impact of Hydrological Connectivity on Evaporation from Sistan's Chah Nimeh Reservoirs during Different Meteorological Periods

Saeid Maleki¹, Seyed Hossein Mohajeri^{2*} , Mojtaba Mehraein²

1. Graduated Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran.

Abstract

Among the various factors that affect evaporation, both climatic indicators and hydrological indicators, such as the hydrological connectivity of a particular region, play significant roles. With advancements in remote sensing technology, satellite image data can now be utilized to monitor the evaporation of lakes. In this particular research, the focus is on investigating the climatic factors that impact evaporation in the Chaah Nimeh reservoirs situated in the Sistan and Baluchistan province of Iran. Initially, the water surface temperature is estimated using Landsat 8 images through the Split window method. Subsequently, meteorological data, including Net radiation, Wind speed, and Air pressure, are obtained from the nearest meteorological synoptic station in close proximity to the Chaah Nimeh location. These meteorological data, along with the water surface temperature data derived from Landsat 8 images, are then inputted into the PM FAO 56 equation. This formula is recognized as one of the most reliable relationships for calculating lake evaporation. Furthermore, the environmental conditions of the region are examined by assessing the hydrological connectivity. This examination provides insights into the region's conductivity for water and sediment transfer and is determined by indicators such as flow length and topographic wetness index. The values of these indicators are obtained from a Digital elevation model satellite image and processed using image processing software. To estimate the contribution of each environmental element to evaporation values, machine learning methods are employed. The available data is categorized in two ways: one classification is based on the wind of 120 days periods and no wind in the region, while the other classification considers periods of Flood discharge periods or high inflow and Water storage periods or low inflow. By utilizing the available data machine learning techniques can be applied to determine the impact of each environmental element on evaporation. This operation is done with the help of Garson's method, which assigns a percentage value to each parameter based on the weights assigned to each parameter in the neural network, which is known as the percentage of relative importance. The higher the percentage of relative importance, the greater the effect of that measure on evaporation. Results highlight the significant influence of the topographic wetness and flow length indices on evaporation, especially during flood discharge periods where their impact is 5% higher than in water storage periods. Additionally, meteorological indices have a 10% greater effect during windy conditions, with wind speed being notably more influential during the wind of 120 days period. This research underlines the importance of integrating meteorological and hydrological data for comprehensive water resource management and suggests the potential of using similar approaches in other regions and under different climatic conditions, paving the way for future studies in water conservation and management strategies in response to global environmental changes.

Review History

Received: Feb 08, 2024

Revised: Aug 02, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Hydrological connectivity
Evaporation
Water surface temperature
Artificial neural network
Relative importance
Wind of 120 days

* Corresponding Author Email: hosseini.mohajeri@khu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8056-293X



بررسی میزان تأثیر عوامل هواشناسی و پیوستگی هیدرولوژیکی بر تبخیر از مخازن چاه نیمه‌های سیستان در دوره‌های هواشناسی مختلف

سعید ملکی^۱، سیدحسین مهاجری^{۲*}، مجتبی مهرآیین^۲

۱. دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

تبخیر از مخازن می‌تواند به کمک دمای به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده زمینی توسط روابط تجربی مشابه روش PM FAO 56 محاسبه شود. همچنین، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می‌توان تأثیر ورودی‌های مختلف را روی یک خروجی مانند تبخیر بررسی نمود. به این منظور، در این تحقیق تأثیر شاخص‌های محیطی مختلف روی تبخیر با برآورد درصد اهمیت نسبی آن‌ها تعیین شده است. دسته اول این معیارها، شاخص‌های هواشناسی منطقه، شامل سرعت باد، فشار هوا، رطوبت نسبی، تابش و دمای سطح آب مخازن است، و دسته دوم شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. پیوستگی هیدرولوژیکی به عنوان یکی از عوامل موثر در پدیده‌های هیدرولوژیکی و عناصر چرخه آب به کمک شاخص‌های آن یعنی شاخص طول جریان و شاخص رطوبت توپوگرافیک تعریف و بررسی می‌شود. در این پژوهش، اهمیت نسبی معیارهای هواشناسی و شاخص‌های پیوستگی در تبخیر تخمین زده شده از چاه نیمه‌ها در استان سیستان و بلوچستان در شرایط هواشناسی مختلف، یعنی دوره وزش بادهای ۱۲۰ روزه و دوره عدم وزش آن و هم چنین دوره خشکسالی و ترسالی، برآورد شده است. نتایج نشان دهنده تأثیر بالای شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص طول جریان بر تبخیر می‌باشد، به شکلی است که در همه شرایط، بیشترین درصد اهمیت نسبی متعلق به این دو شاخص می‌باشد. در بین معیارهای هواشناسی نیز دمای سطح آب بیشتر از سایر معیارها موثرتر می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر شاخص‌های پیوستگی روی تبخیر در دوره‌های ترسالی نسبت به دوره‌های خشکسالی ۵٪ بیشتر است و این در حالی است که در دوره وزش باد ۱۲۰ روزه شاخص‌های هواشناسی نسبت به شرایط عدم وزش باد ۱۰٪ تأثیر بیشتری روی تبخیر دارند. به علاوه تأثیر سرعت باد در دوره‌های وزش باد ۱۲۰ روزه ۵٪ بیشتر از دوره‌های عدم وزش آن است.

کلمات کلیدی

پیوستگی هیدرولوژیکی

تبخیر

دمای سطحی آب

شبکه عصبی مصنوعی

اهمیت نسبی

بادهای ۱۲۰ روزه

۱- مقدمه

مهمی را در زندگی مردم ایفا می‌کند، به طوری که بررسی عوامل محیطی و شرایط آب و هوایی موثر بر تبخیر می‌تواند زمینه ساز شناخت و مدیریت بهتر منابع آب شود. در سال‌های آینده، تعداد

تبخیر^۱ به عنوان یکی از عناصر اصلی رابطه بیلان آب نقش

¹ Evaporation

ویژه در دامنه شیب و کانال تأکید می‌کند. اگر زیرسیستم‌ها جفت شوند، انتقال رسوب ممکن است در سراسر مرز متقابل آنها انجام شود و یک ناحیه شیبدار خالص وجود داشته باشد [7]. در صورت عدم برقراری اتصال هیدرولوژیکی، ذخیره‌سازی رخ می‌دهد. جفت شدن و پیوستگی هر دو دارای یک بعد زمانی مهم هستند و ممکن است در طول زمان در پاسخ به تغییرات آب و هوایی یا مداخلات انسانی در حوضه، تغییر کنند [8].

برای بررسی پیوستگی هیدرولوژیکی در یک منطقه باید شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی مناسب مانند شاخص طول جریان^۶ و شاخص رطوبت توپوگرافیک^۷ را تعیین کرد. طول جریان فاصله هر نقطه از حوضه تا خروجی را منعکس می‌کند. طول جریان (FL) اهمیت ویژگی‌های توپوگرافی را در اتصال رواناب سطحی برجسته می‌کند و به طور گسترده برای توصیف پیوستگی مناطق منبع رواناب سطحی استفاده شده است [6]. طول جریان، اتصال مناطق مختلف را با توجه به پوشش گیاهی و توپوگرافی منطقه اندازه‌گیری می‌کند. شاخص طول جریان به عنوان طول متوسط تمام مسیرهای بالقوه رواناب در منطقه هدف تعریف می‌شود. بنابراین، مقدار بالای شاخص، نشان دهنده اتصال هیدرولوژیکی بالاتر مناطق حوضه است. مقدار بالاتر طول جریان نشان‌دهنده طول متوسط بالاتر مسیرهای رواناب و در نتیجه اتصال هیدرولوژیکی بالاتر است. طول جریان پتانسیل به عنوان یک متغیر توضیحی برای بازدهی رواناب و رسوب توسط طیف وسیعی از تحقیقات مورد آزمایش قرار گرفته است [9]. طیف گسترده‌ای از شاخص‌های رطوبتی مبتنی بر توپوگرافی نیز ایجاد شده‌اند. شاخص‌های رطوبتی اولیه بر این فرض تکیه می‌کردند که، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک، کنترل‌گرهای درجه اول و دوم آب کم عمق داخل خاک هستند. ویژگی‌های توپوگرافی اولیه مانند شیب سطح، مساحت شیب یا انحنای به صورت جداگانه یا ترکیبی برای پیش‌بینی محتوای آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سایر عوامل موثر بر محتوای آب و خاک مانند ویژگی‌های خاک یا انرژی قابل دسترس از تابش خورشید نیز در فرمول برخی از شاخص‌های توپوگرافی ادغام شده‌اند. افزایش در دسترس بودن مدل‌های رقومی ارتفاع^۸ منجر به توسعه شاخص‌های توپوگرافی پیچیده‌تر شده است که رایج‌ترین آن‌ها شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) است، که در مدلی از

قابل توجهی از مردم دنیا تحت تاثیر کمبود آب زندگی خواهند کرد، به ویژه در مناطقی که تغییرات آب و هوا و افزایش دما تأثیر قابل توجهی دارد [1, 2]. در این مناطق، بیشترین جمعیت، به مخازن آب سطحی متکی هستند که از تلفات قابل توجه آب ناشی از تبخیر، به ویژه در مناطق خشک تأثیر می‌پذیرد. کمبود آب و وقوع بارندگی با توزیع نامناسب در این مناطق می‌تواند منجر به نرخ تبخیر بالا و نوسانات شدید سطح آب در محیط‌های شامل آب‌های راکد مانند مخازن شود [2]. در نتیجه بررسی عوامل موثر بر تبخیر در مناطق خشک اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در هیدرولوژی، استفاده از سنجش از دور^۱ با استفاده از مادون قرمز حرارتی^۲ برای تخمین تبخیر از جذابیت بالایی در تحقیقات و مطالعات برخوردار است. این روش شامل ترکیب اندازه‌گیری‌های زمینی پارامترهای هواشناسی با تصاویر حرارتی به دست آمده از حسگرهای ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر است. دمای سطح بازتابی شده از تصاویر ماهواره‌ای حرارتی را می‌توان به همراه رابطه‌های نظری یا تجربی تخمین تبخیر برای دریاچه‌ها و مخازن استفاده کرد [3].

یکی از نکات قابل تأمل تعیین تاثیر عناصر محیطی و شرایط هیدرولوژیکی منطقه بر تبخیر می‌باشد. از شاخص‌های موثر بر چرخه هیدرولوژیکی منطقه، پیوستگی هیدرولوژیکی^۳ را می‌توان نام برد. اتصال یا پیوستگی هیدرولوژیکی به تماس مکانی، در دامنه‌های تپه‌ها، مناطق با قدرت رسانایی و هدایت کنندگی بالا، و سایر عناصر طبیعت اشاره دارد [4]، این مسئله در مباحث مربوط به مدیریت و مهندسی آب، مانند انتقال رسوبات همراه با فرسایش خاک، و ارزیابی‌های زیست محیطی برای سیستم‌های دشت سیلابی بزرگ [5]، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تغییر در اتصالات هیدرولوژیکی بر مسیر جریان و انتقال آلاینده در مقیاس‌های مکانی و زمانی تأثیر می‌گذارد [4]، پیوستگی هیدرولوژیکی که در دید خیلی کلی‌تر پتانسیل حرکت یک ذره خاص در سیستم را نشان می‌دهد، نمایانگر میزان انتقال رسوب و مواد مغذی توسط جریان آب در یک سیستم است و میزان انتقال، پخش، و توزیع مجدد آلاینده‌ها را تعیین می‌کند [6]. یک اصطلاح مرتبط که بیشتر در ارزیابی سیستم‌های ژئومورفیک^۴ استفاده می‌شود، جفت یا زوج^۵ است که بر پیوند بین دو زیرسیستم^۶، به

¹ Remote sensing² Thermal infrared (TIR)³ Hydrological connectivity⁴ Geomorphic⁵ Coupling⁶ Subsystems⁷ Flowlength (FL)⁸ Topographic wetness index (TWI)⁹ Digital elevation model (DEM)

طول جغرافیایی ۵۹ تا ۷۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ تا ۳۴ درجه شمالی را در بر می‌گیرد. مخازن چهار قسمتی چاه‌نیمه‌ها در ۵۰ کیلومتری شهر زابل و ۵ کیلومتری شهر زهک و در معرض وزش بادهای ۱۲۰ روزه قرار دارد. شکل (۱) تصویری از موقعیت قرارگیری چاه‌نیمه‌ها را نشان می‌دهد که از تصویر لندست ۸ در تاریخ ۲۴/۴/۲۰۱۳ به دست آمده است.

شکل ۱. محل قرارگیری چاه‌نیمه‌ها
به همراه محل ایستگاه هواشناسی (مربع زرد)

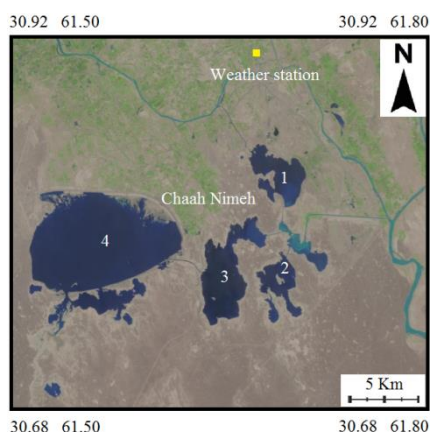


Fig. 1. The location of the Chaah Nimeh along with the location of the meteorological station (Yellow square)

۲-۳- داده‌ها

داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده زمینی شامل تابش یا تشعشع خالص روزانه (R_n)، سرعت باد (u) و فشار هوا (p) است، که به صورت روزانه از آپریل ۲۰۱۳ تا ژوئن ۲۰۲۱، مطابق با تاریخ تصاویر انتخابی از ایستگاه سینوپتیکی سازمان هواشناسی کشور در شهر زهک (مربع زرد در شکل ۱) در عرض جغرافیایی ۳۰/۹ درجه و طول جغرافیایی ۶۱/۶۸ درجه جمع‌آوری شده است. رطوبت نسبی (RH)، از حسابگر پارامتر تصحیح جوی^۵ موجود در (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) به دست آمده است. این حسابگر از پروفایل‌های NCEP/GDAS و مدل انتقال تابشی MODTRAN استفاده می‌کند و به ورودی‌های زمان و طول و عرض جغرافیایی نیاز دارد [17]. بیشترین و کمترین، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر پارامتر به کار رفته در این مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. در این مطالعه، از تصاویر مجموعه یک^۶ و سطح ماهواره لندست ۸ برای تخمین دمای سطح آب استفاده

بارش- رواناب ایجاد شده است [10]. شاخص رطوبت توپوگرافی، تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک و پتانسیل تشکیل رواناب سطحی را منعکس می‌کند و تغییرات توپوگرافی و تأثیر آنها بر رواناب سطحی را توصیف می‌کند که نشان‌دهنده پیوستگی هیدرولوژیکی حوضه است [7, 11].

انتخاب روش مناسب برای تشخیص تأثیر ویژگی‌های آب و هوایی منطقه و اتصال هیدرولوژیکی بر تبخیر اهمیت ویژه‌ای دارد. رویکردهای آماری مرسوم، مانند رگرسیون خطی چندگانه^۱ می‌تواند این اثر را با فرض یک مدل داده مناسب و تخمین پارامترهای مدل بر اساس داده‌ها، بررسی کنند [12]. با این حال، معیارهای هواشناسی منطقه و معیارهای پیوستگی هیدرولوژیکی با یکدیگر همبستگی زیادی دارند و متغیرهای مستقلی نیستند، در نتیجه در صورت استفاده از تکنیک‌های رگرسیون چند متغیره مرسوم، نتایج گمراه‌کننده یا مغرضانه را به همراه دارد. از مزایای یادگیری ماشینی^۲، اجتناب از شروع با یک مدل داده و استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای یادگیری رابطه بین پاسخ و پیش‌بینی‌کننده‌های آن است و نیازی به در نظر گرفتن تعامل و همبستگی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد [13]. شبکه عصبی مصنوعی^۳ می‌تواند برای تعیین اهمیت نسبی اتصال هیدرولوژیکی و ویژگی‌های منطقه در تبخیر مورد استفاده قرار بگیرد. این فرآیند می‌تواند با تشکیل یک شبکه از داده‌های موجود و تعیین تأثیر هر کدام از پارامترها در تشکیل این شبکه یعنی اهمیت نسبی^۴ هر متغیر انجام شود، هرچه اهمیت نسبی یک متغیر بیشتر باشد، تأثیر متغیر بر پیش‌بینی شبکه قوی‌تر است [14]. در گذشته تحقیقات بسیاری به تعیین اهمیت نسبی با شبکه عصبی مصنوعی پرداخته‌اند [15, 16].

۲- اهداف

هدف اصلی این مطالعه، کشف تأثیر پیوستگی هیدرولوژیکی و بقیه ویژگی‌های آب و هوایی منطقه بر تبخیر مخزن چاه‌نیمه‌ها در استان سیستان و بلوچستان می‌باشد.

۳- داده‌ها و روش‌ها

۳-۱- موقعیت منطقه

مخازن چاه‌نیمه‌ها در استان سیستان و بلوچستان واقع شده و

¹ Multiple linear regression

² Machine learning

³ Artificial neural network

⁴ Relative Importance (RI)

⁵ Atmospheric correction parameter calculator

⁶ Collection 1

⁷ Level 1

۳-۳- روش تحقیق

شکل (۲). به طور مختصر چارچوب فرآیند تحقیق و بینشی از هر مرحله از فرآیند را ارائه می‌دهد. این تحقیق در چهار مرحله کلیدی سازمان دهی شده است: مرحله اولیه مستلزم جمع‌آوری داده‌هاست که توضیح داده شد. مرحله دوم شامل استخراج داده‌های دمای سطح آب و به دست آوردن مقادیر تبخیر است. در مرحله سوم، مقادیر FL و TWI به دست می‌آیند و آخرین مرحله چهارم اهمیت نسبی هر پارامتر محاسبه می‌شود. جزئیات مربوط به مراحل ۲ تا ۴ در این قسمت توضیح داده خواهد شد. لازم به ذکر است که روش مورد استفاده در این مقاله برای برآورد دما و تبخیر توسط همین نویسندگان در مقاله [18]، مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است و مقادیر دما و تبخیر به دست آمده از روش مورد استفاده در این مقاله، در مقایسه با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در محل، دقت بالایی را از خود نشان می‌دهند.

شده است. پس از حذف تصاویر تحت تاثیر ابر، همه تصاویر باقی مانده در شرایط آسمان صاف برای چاه‌نیمه‌ها از آپریل ۲۰۱۳ تا ژوئن ۲۰۲۱ تهیه شد. این فرآیند در نهایت منجر به جمع‌آوری ۱۳۷ تصویر از وب سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS) ————— آدرس <http://www.earthexplorer.usgs.gov> شد. پیش پردازش تصاویر شامل تصحیحات جوی و شناسایی آب از خشکی با استفاده از نرم افزار QGIS و نرم افزار ACOLITE انجام شد.

جدول ۱. بیشترین و کمترین میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای پارامترهای استفاده شده

Inputs	Max	Min	Average	SD	CV
u (m/s)	18.0	1.0	7.8	4.4	56.7%
Rn ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)	98.6	8.5	25.7	12.4	48.2%
p (kpa)	97.0	94.0	95.4	0.8	0.8%
RH (%)	61.0	5.0	18.7	11.0	58.5%

Table 1. The maximum, minimum, average, standard deviation, and coefficient of variation for each parameter employed

شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام تحقیق به صورت خلاصه

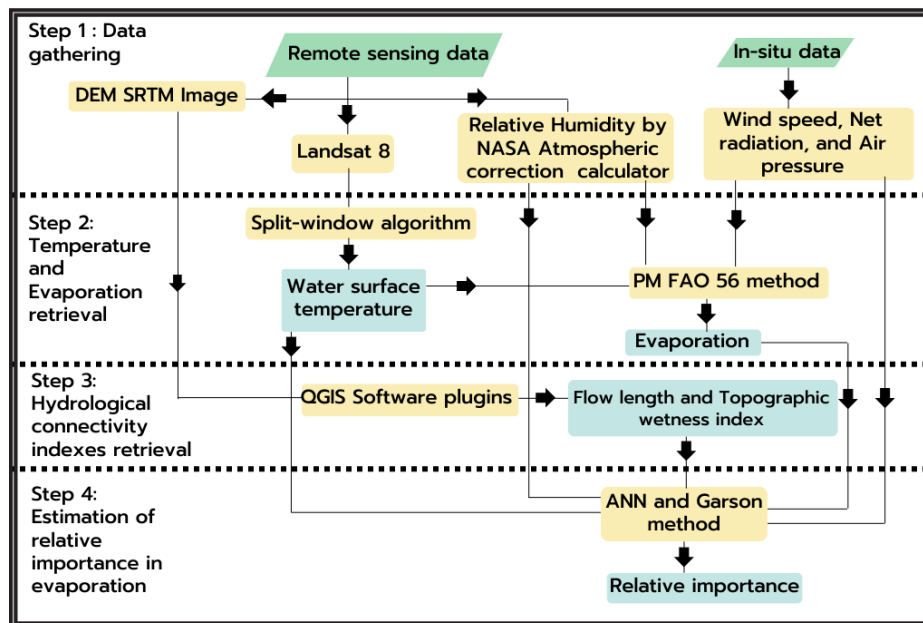


Fig. 2. Flowchart of summarized research steps

۳-۳-۱- برآورد دما

ابزاری مناسب برای محاسبه دمای سطح آب، با استفاده از دو باند مادون قرمز حرارتی (باندهای ۱۰ و ۱۱) ماهواره لندست ۸ در بسیاری از تحقیقات گذشته استفاده شده است [19]. الگوریتم پنجره مجزا بر اساس معادله انتقال تابش رادیواکتیو (۲۰)، رابطه (۱) را برای تکمیل فرآیند تصحیح پیشنهاد می‌کند [21].

تا به امروز به منظور استخراج دمای سطح آب از تصاویر ماهواره‌ای، ترکیبی از ماهواره‌های مختلف و روش‌های مختلف به کار گرفته شده است، به عنوان نمونه تکنیک پنجره مجزا^۱ به عنوان

¹ Split-window

می شود. روش PM FAO 56 یا فائو پنمن مانیتث یعنی رابطه (2) به عنوان یک روش تشعشعی رایج برای تخمین تبخیر در بیشتر مناطق در نظر گرفته می شود [24-26]. لازم به ذکر است که شار گرمای روزانه آب^۳ اغلب متعادل، خشی و مساوی صفر می شود، زیرا انرژی جذب شده در طول روز با تلفات شبانه جبران می شود [27]. در نتیجه ذخیره انرژی^۴ یا G دارای مقدار ناچیزی است که می توان آن را نادیده گرفت [24]. فشار بخار آب اشباع روی سطح آب با استفاده از کدنویسی رابطه (3) در MATLAB، فشار بخار با رابطه (4)، شیب منحنی فشار بخار اشباع با رابطه (5) و ثابت روان سنجی (سایکومتری)^۵ با رابطه (6) محاسبه می شود [3].

$$E = \frac{0.408 \times s \times (R_n - G) + \frac{\gamma \times 900 \times u \times (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma \times (1 + 0.34 \times u)} \quad (2)$$

$$e_s = 6.1078 \exp\left(\frac{17.269 \times T}{237.3 + T}\right) \quad (3)$$

$$e_a = \frac{RH}{100} \times e_s \quad (4)$$

$$s = \frac{4098 \times e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (5)$$

$$\gamma = p \times \frac{C_p}{0.622} \times L_E \quad (6)$$

که در آن e_s و e_a فشار بخار و فشار بخار اشباع (kpa) هستند، T دمای سطح آب (C°) که برای دستیابی به نتیجه بهتر، دمای سطح آب مورد استفاده، متوسط دمای سطح آب در کل چاه نیمه هاست، RH رطوبت نسبی (%،)، E تبخیر (mm/day)، u سرعت باد (m/s)، Rn از داده های هواشناسی، تابش خالص^۶ (MJ m⁻² day⁻¹)، p فشار هوا (kpa)، s شیب منحنی فشار بخار اشباع، γ ثابت روان سنجی هوا (hPa/°C)، L_E گرمای نهان تبخیر یا 2.26 (MJ kg⁻¹) و C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت (J/Kg*°C) است.

۳-۳-۳- برآورد شاخص های پیوستگی هیدرولوژیکی

به منظور به دست آوردن مقادیر شاخص های پیوستگی هیدرولوژیکی، تصویر مدل ارتفاعی دیجیتالی (DEM) از رادار ماموریت توپوگرافی شاتل^۷ با ابعاد ۳۰ متر از چاه نیمه ها تهیه شده است. این تصویر در شکل (۳) به همراهی جانمایی چاه نیمه ها قابل

$$LST = b_0 + \left(b_1 + b_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}\right) \frac{T_i - T_j}{2} + \left(b_4 + b_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}\right) \frac{T_i - T_j}{2} + b_7 (T_i - T_j)^2 \quad (1)$$

که در آن T_i و T_j دمای روشنایی بالای اتمسفر هستند، ε یا گسیلندگی به معنای میانگین انتشار دو باند است $\Delta \varepsilon$ ، $(\varepsilon = 0.5(\varepsilon_i + \varepsilon_j))$ اختلاف انتشار دو باند، $(\Delta \varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j)$ ، $\varepsilon_{band10} = 0.9926$ و $\varepsilon_{band11} = 0.9877$ (۲۰) می باشد. هم چنین b_k ضرایب این الگوریتم است که با توجه به مطالعات گذشته متناسب با مقادیر ستون بخار آب^۱ که از محاسبه گر پارامتر تصحیح اتمسفر ناسا مشابه RH به دست می آید، برآورد می شود و طبق مطالعات مذکور برای این شرایط در منطقه به صورت زیر است [21]:

$$b_0 = -2.78009, \quad b_1 = 1.01408, \quad b_2 = 0.15833, \quad b_3 = 0.34991, \quad b_4 = 4.04487, \quad b_5 = 3.55414, \quad b_6 = -8.88394, \quad b_7 = 0.09152$$

در این تحقیق، از نرم افزار ACOLITE برای اجرای الگوریتم پنجره مجزا یعنی رابطه (۱) استفاده شده، که فرآیند تصحیح اتمسفری یعنی حذف آثار اتمسفر از تصاویر، کاملاً تصویر محور بوده، یعنی تنها به کمک خود تصویر انجام می شود و به ورودی داده های خارجی اضافه متکی نیست [20]. این نرم افزار با پردازش مجموعه داده های لندست ۸ برای هر روز معین، مقادیر دمای روشنایی بالای جو را به طور مشخص برای باندهای ۱۰ و ۱۱ محاسبه می کند.

با استفاده از این تصاویر و با ادغام آن در رابطه (۱) به وسیله کدنویسی در MATLAB، بقیه مراحل محاسبه دما پیمایش می شوند که به استخراج نقشه های دمای سطح آب ختم می شود.

۳-۳-۲- برآورد تبخیر

فرآیند تخمین تبخیر در این مطالعه بر مبنای دمای سطح آب مشتق شده از تصاویر لندست ۸ و پارامترهای آب و هوایی محیط که از اندازه گیری های زمینی به دست آمده، بنا شده است. لازم به ذکر است که تبخیر بالقوه^۲ بیانگر بیشترین مقدار آبی است که می تواند بدون محدودیت از آب یا خاک تبخیر شود [22, 23]. با توجه به ظرفیت بالای تبخیر از سطح بدنه های آبی، در این مطالعه از اصطلاح تبخیر به معنای تبخیر بالقوه تخمین زده شده، استفاده

³ Daily water heat flux

⁴ Energy storage

⁵ Psychometric

⁶ Net Radiation

⁷ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

¹ Column water vapor

² Potential evaporation

توسط پلاگین SAGA flow path length در QGIS تعیین شد. شاخص رطوبت توپوگرافی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right) \quad (7)$$

که در آن TWI شاخص رطوبت توپوگرافیک، α سطح شیب محل در واحد طول (ناحیه شیب ویژه^۳) در مبنای متر، و β زاویه شیب سطح محل در مبنای درجه است. α مقدار آبی را نشان می‌دهد که به سمت یک مکان خاص جریان می‌یابد در حالی که β انتقال جانبی زیرسطحی را منعکس می‌کند [26]. در واقع در این رابطه با استفاده از پارامترهای توپوگرافی ساده مانند α و β مناطق با رطوبت بالای خاک که احتمالاً به دلیل اشباع خاک به جریان سطحی کمک می‌کنند، مشخص می‌شوند [29, 30] مناطق خطی با مقادیر TWI به طور مداوم بالا به عنوان مسیرهای بالقوه رواناب سطحی در نظر گرفته می‌شوند، که نشان‌دهنده اتصال سطحی بین بخش‌های بالای شیب و پایین شیب است. تکه‌های جدا شده با مقادیر TWI بالا نشان‌دهنده سینک‌های هیدرولوژیکی محلی هستند، که در آن آب ورودی یا ذخیره می‌شود و به آرامی توسط تبخیر از بین می‌رود، یا به زیرسطح هدایت می‌شود [31, 32] در این تحقیق برای تعیین شاخص TWI ابتدا با استفاده از تصویر مدل ارتفاعی دیجیتالی در نرم افزار QGIS و با دستور Slop تصویر شیب منطقه یعنی مقادیر β به دست می‌آید، سپس این تصویر شیب که مقادیر آن بر مبنای درجه می‌باشند به تصویری در واحد رادیانس تبدیل می‌شود، که با کمک پلاگین Flow Accumulation تبدیل به تصویر مقادیر α می‌شود. سپس با کد نویسی رابطه (۷) در Raster Calculator، مقادیر TWI محاسبه می‌شود.

۳-۴-۳- برآورد اهمیت نسبی

در این تحقیق از ANN برای بررسی میزان تأثیر ورودی‌های مختلف مدل تبخیر در سناریوهای مختلف اقلیمی استفاده شده است. به منظور تعیین تأثیر هر معیار بر روی مقادیر تبخیر، اهمیت نسبی هر پارامتر محاسبه شده است. این فرآیند به کمک تشکیل یک شبکه عصبی مصنوعی از داده‌ها و برقراری رابطه تعیین اهمیت نسبی گارسون بر اساس وزن‌های تخصیص داده شده به هر پارامتر توسط شبکه، انجام می‌شود. سازماندهی ساختار ANN شامل

مشاهده است. از دو معیار طول جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی برای بررسی اتصال هیدرولوژیکی مخازن استفاده شد. طول جریان از پلاگین‌های ارائه شده در نرم افزار QGIS به دست می‌آید. این پلاگین‌ها طول پتانسیل مسیر رواناب از هر سلول را، در یک نقشه باینری^۱ با پیکسل‌های خاک برهنه به عنوان منابع رواناب و پیکسل‌های پوشش گیاهی به عنوان مخزن رواناب، محاسبه می‌کند.

شکل ۳. تصویر DEM مورد استفاده به همراه جانمایی چاه‌نیمه‌ها

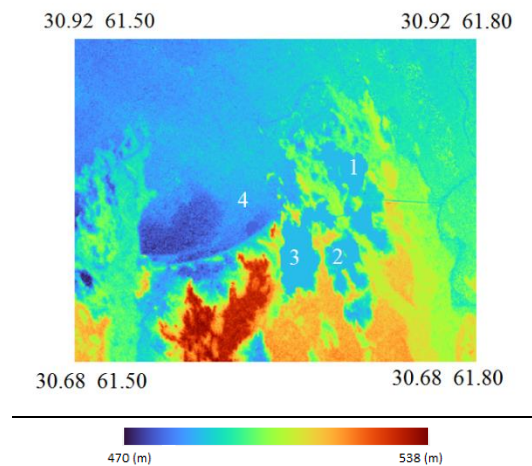


Fig. 3. Image of used DEM along with the placement of Chaah Nimeh

مسیرهای جریان با استفاده از یک الگوریتم جهت جریان یک طرفه^۲ و با در نظر گرفتن جهت نزولی تعیین شده از مدل ارتفاع دیجیتالی، روی نقشه باینری تعریف می‌شوند. بر خلاف پوشش گیاهی، چاه‌های توپوگرافی در ابتدا در نقشه هدف شناسایی نمی‌شوند. در عوض، الگوریتم مسیر جریان را زمانی به پایان می‌رساند که به پیکسلی رسیده و تمام پیکسل‌های همسایه یا در ارتفاع بالاتری قرار دارند یا بیشتر توسط آن مسیر بازدید شده‌اند. بنابراین، مسیر به گونه‌ای محدود می‌شود که از طریق شیب‌دارترین پیکسل نزولی همسایه با شیب رو به پایین، از پیکسلی به پیکسل دیگر، در جهت اصلی یا مورب پیش برود، تا زمانی که به یک پیکسل گیاهی، و یا یک فرورفتگی کوچک سطحی برسد و یا تا زمانی که از محدوده مورد بررسی خارج شود. طول جریان از مرکز یک سلول معین تا مرکز سلول بعدی در امتداد شیب، با در نظر گرفتن اختلاف پیکسل‌ها در ارتفاع و مقادیری که با زاویه شیب افزایش می‌یابند، محاسبه می‌شود. طول جریان با تصویر DEM موجود

¹ Binary map

² Single flow direction (SFD)

³ Specific catchment area

لایه‌های ورودی^۱، پنهان^۲ و خروجی^۳ است. هر لایه شامل واحدهای به هم پیوسته‌ای است که به عنوان نورون^۴ شناخته می‌شوند. در مرحله آزمایش^۵، ساختار شبکه بر اساس ویژگی‌های داده‌ها تعیین می‌شود. داده‌ها به لایه ورودی ارائه می‌شود تا انتشار اطلاعات در سراسر شبکه را آغاز کنند. در طول فرآیند آموزش، شبکه ورودی‌هایی را در خود جای می‌دهد که در وزن‌های قابل تنظیم^۶ ضرب می‌شوند. سپس این ورودی‌های وزن‌دار با عبارات بایاس^۷ جمع می‌شوند و از یک تابع فعال سازی عبور می‌کنند که از بزرگ شدن بیش از حد خروجی جلوگیری می‌کند. در ادامه شبکه وزن‌ها را تطبیق می‌دهد و از یک الگوریتم یادگیری برای کشف ترکیبی از وزن‌ها استفاده می‌کند که خطا را به کمترین می‌رساند [33]. روش گارسون وزن‌های متصل کننده نورون‌های پنهان به نورون‌های خروجی را تشریح می‌کند و اجزای خاصی را به هر نورون ورودی نسبت می‌دهد. این تجزیه به هر متغیر یک مقدار منحصر به فرد اختصاص می‌دهد تا رابطه آن با متغیر پاسخ روشن شود. روش گارسون یعنی رابطه (8) روشی برای تقسیم وزن اتصالات شبکه عصبی به منظور تعیین اهمیت نسبی هر متغیر ورودی در شبکه می‌باشد [34, 35].

$$RI_i = \sum_{j=1}^n \frac{|W_{ij}W_{jk}|}{\sum_{j=1}^m |W_{ij}W_{jk}|} \quad (8)$$

که در آن RI_i اهمیت نسبی پارامتر i (هر پارامتر) در تبخیر، W_{ij} وزن اتصال بین هر ورودی و لایه‌های پنهان، W_{jk} وزن اتصال بین لایه پنهان و خروجی، j تعداد کل لایه‌های پنهان و k تعداد لایه‌های خروجی است. این الگوریتم اهمیت نسبی هر متغیر ورودی را با تأثیر آن بر خروجی به صورت درصد محاسبه می‌کند [36]. مقادیر وزن بالاتر نشان دهنده اهمیت بیشتر آن متغیر ورودی است. در این تحقیق از ANN برای بررسی سهم ورودی‌های مدل تبخیر در سناریوهای مختلف اقلیمی، یعنی دوره‌های وزش باد ۱۲۰ روزه و عدم وزش آن و هم چنین دوره‌های خشکسالی و ترسالی استفاده شده است. به این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های وزش

باد که در ۱۳۷ روز از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ جمع آوری شده بود، میانگین وزش باد برای هر ماه تعیین شد، همان طور که در شکل (۴) قسمت (الف) قابل مشاهده می‌باشد، مقادیر سرعت باد در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست بیشتر از بقیه ماه‌های سال می‌باشد و به بیش از ده متر در ثانیه می‌رسد که نشان دهنده وزش باد ۱۲۰ روزه در این بازه زمانی می‌باشد. با توجه به این نتایج می‌توان داده‌های هواشناسی ورودی و خروجی شبکه را به دو دسته تقسیم نمود. یک شبکه با استفاده از داده‌هایی تشکیل می‌شود که در روزهای وزش باد ۱۲۰ روزه قرار دارند و شبکه دیگر برای داده‌هایی که در دسته روزهای عدم وزش باد ۱۲۰ روزه قرار می‌گیرند. از همین رویه برای تعیین دوره ترسالی^۸ و خشکسالی^۹ نیز استفاده می‌شود. همان طور که در شکل (۴) قسمت (ب) قابل مشاهده است، میانگین نسبت دبی ورودی آب به چاه نیمه‌ها به کل حجم مخزن برای هر ماه از سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نشان داده شده است. نسبت آب ورودی به مخزن به حجم مخزن در شش ماه اول سال میلادی بسیار بیشتر از نیمه دوم سال که مقادیر نزدیک به صفر را به خود اختصاص داده اند، می‌باشد. در نتیجه می‌توان دو شبکه مصنوعی مجزا یکی با استفاده از داده‌هایی که در محدوده روزهای خشکسالی سال قرار می‌گیرند و دیگری با داده‌هایی که مختص به روزهای محدوده ترسالی می‌باشند، تشکیل داد.

ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی ANN عبارتند از: u , RH , Rn ، p ، تصاویر T یا تصاویر دمای سطح آب در واحد درجه سانتی‌گراد، تصویر FL یا تصویر مقادیر طول جریان به دست آمده در واحد متر، و تصویر TWI یا تصویر شاخص رطوبت توپوگرافیک بدون واحد. خروجی شبکه نیز تصاویر تبخیر به دست آمده از روش $PM\ FAO$ 56 در واحد میلی‌متر در روز می‌باشد. داده‌های هواشناسی u , RH , Rn ، p و FL به صورت ورودی‌های عددی وارد شبکه می‌شوند. داده‌های TWI با تقسیم تصویر بر سلول‌هایی با اضلاع برابر و محاسبه میانگین هر سلول به شبکه وارد می‌شود. داده‌های T و E نیز برای هر ۱۳۷ روز تهیه شده و سپس به صورت میانگینی از مقادیر سلولی متناظر با سلول FL و TWI به شبکه وارد می‌شود. در ادامه با استفاده از با کدنویسی رابطه (8) یعنی رابطه ی گارسون تأثیر هر پارامتر در شکل‌دهی هر شبکه عصبی مصنوعی و سهم آن در خروجی تبخیر و

¹ Inputs layers

² Hidden layers

³ Output layers

⁴ Neurons

⁵ Training

⁶ Adjustable weights

⁷ Bias terms

⁸ Flood discharge periods (FDPs)

⁹ Water storage periods (WSPs)

شکل ۵. قسمت (الف) تصویر FL و قسمت (ب) تصویر TWI تهیه شده در محدوده ی ورود آب به چاه نیمه‌ها

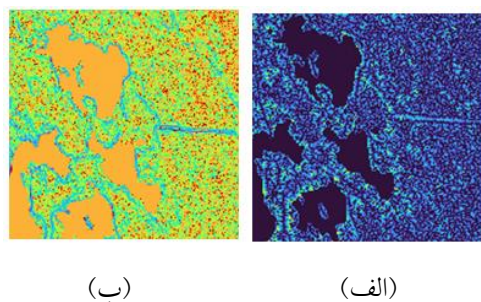


Fig. 5. Part (a) the FL image and part (b) the TWI image in the area of entering water to the Chaah Nimeh.

همان طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است، در دوره‌های FDPs (دوره‌های تخلیه سیل و دبی زیاد جریان) اهمیت نسبی برای R_n , R_h , T , p , u , FL و TWI به ترتیب به این صورت می‌باشد: $۱۲,۷\%$, $۵,۷۵\%$, $۸,۴۳\%$, $۶,۱۵\%$, $۱۷,۷۵\%$, $۲۴,۸۶\%$ و $۲۹,۹۴\%$. در دوره‌های WSPs (دوره‌های ذخیره آب و دبی کم جریان) این درصدهای اهمیت نسبی به ترتیب به این صورت می‌باشند: $۱۰,۷۶\%$, $۴,۷۲\%$, $۱۰,۶۳\%$, $۵,۴۶\%$, $۱۸,۶۲\%$, $۲۲,۶۰\%$ و $۲۷,۲۱\%$.

شکل ۶. اهمیت نسبی معیارهای R_n , R_h , T , p , u , FL و TWI بر مقادیر تبخیر بر حسب درصد، در دو محدوده ی ترسالی (FDPs) و خشکسالی (WSPs)

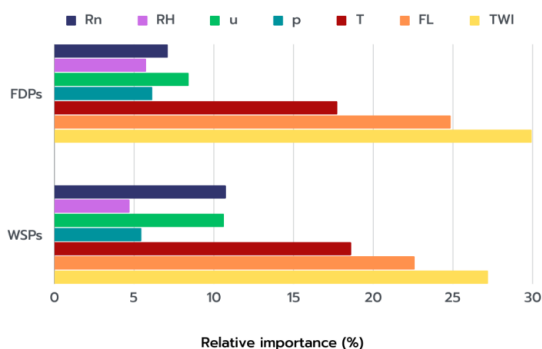


Fig. 6. The relative importance of (R_n), (R_h), (u), (p), (T), (FL), and (TWI) on the evaporation values in percentage, in two ranges of FDPs and WSPs

با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت که برای روزهایی از سال که باد ۱۲۰ روزه اتفاق می‌افتد، اهمیت نسبی شاخص‌های ذکر شده به ترتیب به این صورت می‌باشد: $۱۲,۰۲\%$, $۸,۳۵\%$, $۱۴,۳۴\%$, $۲,۴۵\%$, $۲۰,۷۱\%$, $۱۹,۹۹\%$ و $۲۲,۱۴\%$. برای روزهایی از سال که باد ۱۲۰ روزه نمی‌وزد نیز به صورت زیر می‌باشد: $۱۰,۷۱\%$, $۵,۸۷\%$, $۹,۲۱\%$, $۵,۹۱\%$, $۱۶,۳۲\%$, $۲۴,۷۷\%$ و $۲۷,۲۱\%$.

یا به عبارتی اهمیت نسبی هر پارامتر، با استفاده از وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی تعیین می‌شود.

شکل ۴. قسمت (الف) نشان دهنده میانگین مقادیر سرعت باد از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ به صورت ماهانه در واحد متر بر ثانیه به همراه جداسازی محدوده ی وزش باد ۱۲۰ روزه، و قسمت (ب) نشان دهنده میانگین نسبت آب ورودی به چاه نیمه به حجم کل مخزن به صورت ماهانه از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ به همراه جداسازی محدوده ترسالی (FDPs)

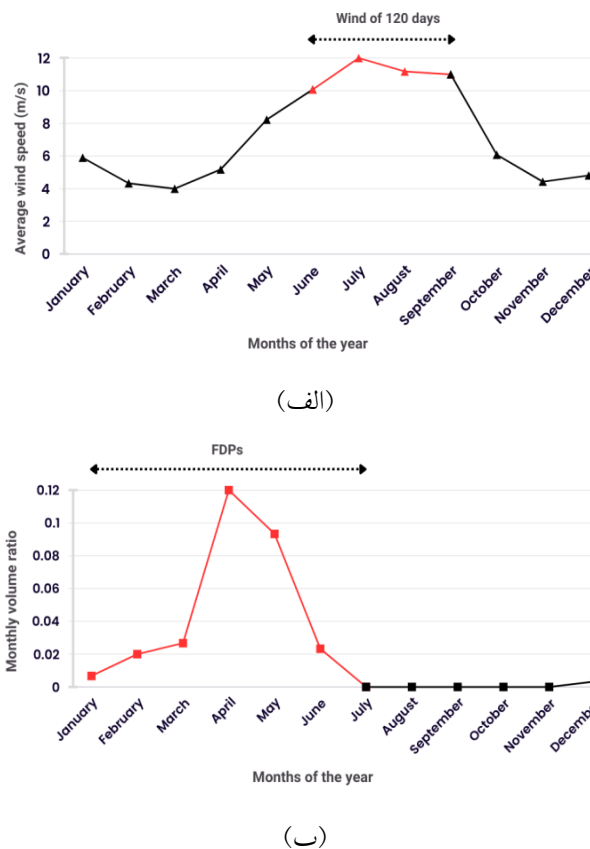


Fig. 4. Part (a) the average of wind speed values (m/s) from 2013 to 2021 on a monthly basis along with the separation of wind of 120 days range, and part (b) the average ratio of incoming discharge water to Chaah Nimeh to the total volume of the lakes on a monthly basis from 2005 to 2020 along with the separation of the FDPs range

۴- نتایج

همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است تصاویر FL و TWI به کمک QGIS تهیه شده است. شکل (۵) قسمتی از این دو تصویر را در محدوده ورود آب به چاه نیمه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان مقادیر بالای TWI و مقادیر پایین FL را در محل قرار گیری چاه‌نیمه‌ها به عنوان سینک توپوگرافیک محل مشاهده نمود. هم چنین محل قرارگیری رودخانه ورودی به چاه نیمه‌ها قابل تشخیص می‌باشد.

شاخص‌های هواشناسی روی مقادیر تبخیر دارند. در حالی که در دوره‌های خشکسالی تأثیر این دو دسته شاخص تقریباً برابر می‌شود. می‌توان گفت که تأثیر شاخص‌های پیوستگی روی تبخیر در دوره‌های ترسالی نسبت به دوره‌های خشکسالی ۵٪ بیشتر است. که می‌تواند ناشی از احتمال بیشتر جریان رواناب در دوره‌های ترسالی باشد. در قسمت (ب) شکل (۸) نیز می‌توان مشاهده نمود که در دوره‌های وزش باد ۱۲۰ روزه شاخص‌های هواشناسی تأثیر بیشتری روی مقادیر تبخیر دارند، در حالی که در

شکل ۷. اهمیت نسبی معیارهای R_n , RH , p , T , FL و TWI بر مقادیر تبخیر بر حسب درصد، در دو محدوده ی وزش بادهای ۱۲۰ روزه و عدم وزش بادهای ۱۲۰ روزه

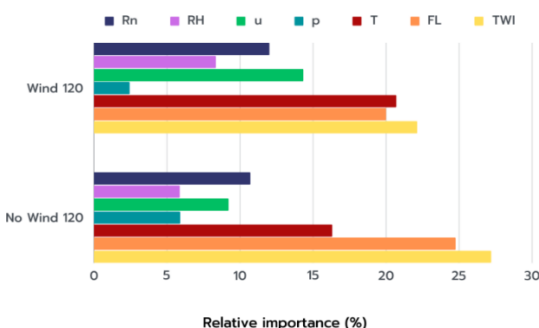


Fig. 7. The relative importance of (R_n), (RH), (u), (p), (T), (FL), and (TWI) on the evaporation values in percentage, in two ranges of occurrences of wind of 120 days and the days without it

شکل ۸. قسمت (الف) درصد اهمیت نسبی مجموعه شاخص‌های آب و هوایی با رنگ آبی و مجموعه ی شاخص‌های پیوستگی توپوگرافیک با رنگ قرمز در دو محدوده ی خشکسالی و ترسالی، و قسمت (ب) درصد اهمیت نسبی در محدوده ی وزش باد ۱۲۰ روزه و محدوده ی عدم وزش آن

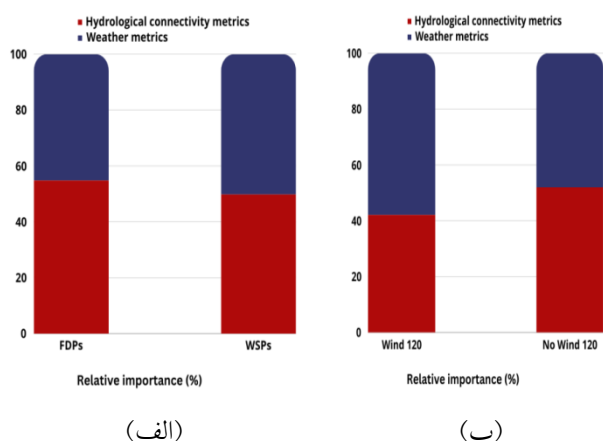


Fig. 8. Part (a) the percentage of relative importance of the set of climate indicators with blue color and the set of topographic connectivity indexes with red color in two ranges of FDPs and WSPs, and Part (b) these percentages in the range of wind of 120 days wind blowing and its absence

با توجه به شکل (۸) قسمت (الف) می‌توان مشاهده نمود که اهمیت نسبی ترکیبی برای ویژگی‌های آب و هوایی منطقه یعنی مجموع درصد اهمیت نسبی پارامترهای هواشناسی یعنی R_n , u , RH , p و T در طول FDPs ۴۵,۱۹٪ و برای مجموع درصد اهمیت‌های نسبی معیارهای اتصال هیدرولوژیکی یعنی FL و TWI ۵۴,۸۱٪ است، اما این مقادیر در دوره WSPs به ترتیب ۵۰,۲۰٪ و ۴۹,۸۰٪ است. در قسمت (ب) نیز مشاهده می‌شود که اهمیت نسبی ترکیبی ویژگی‌های آب و هوایی منطقه در محدوده‌ای از سال که باد ۱۲۰ روزه اتفاق می‌افتد ۵۷,۸۷٪ و برای مجموع معیارهای اتصال هیدرولوژیکی ۴۲,۱۳٪ است اما در بخشی از سال که باد ۱۲۰ روزه اتفاق نمی‌افتد این مقادیر به ترتیب ۴۸,۰۳٪ و ۵۱,۹۷٪ است.

۵- بحث

شکل (۶) نشان می‌دهد که در دوره ترسالی FL , TWI و دمای سطح آب به ترتیب بیشترین تأثیر را روی تبخیر داشته‌اند، در حالی که R_n , p و RH در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. به همین شکل مشاهده می‌شود که در دوره‌های خشکسالی مجدداً سه رتبه اول متعلق به FL , TWI و T می‌باشد، و R_n , u , p و RH در رتبه‌های بعدی قرار دارند. شکل (۷) نیز نشان می‌دهد که در دوره‌های وزش باد ۱۲۰ روزه TWI , T و FL بیشترین تأثیر را روی تبخیر دارند، و R_n , u , RH و p به ترتیب در رتبه‌های بعدی هستند. در شرایطی که باد ۱۲۰ روزه رخ نمی‌دهد نیز FL , TWI و T به ترتیب بیشترین تأثیر را روی مقادیر تبخیر دارند، سپس در رتبه‌های بعدی R_n , u , p و RH قرار می‌گیرند. از بررسی این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که TWI موثرترین شاخص بر مقادیر تبخیر در همه شرایط هیدرولوژیکی می‌باشد و بعد از آن دیگر شاخص پیوستگی هیدرولوژیکی یعنی FL تأثیر زیادی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی شاخص‌های پیوستگی از شاخص‌های هواشناسی اهمیت نسبی بیشتری در تبخیر دارند. در بین شاخص‌های هواشناسی دمای سطح آب از دیگر شاخص‌ها تأثیر بیشتری در تبخیر دارد. همین طور می‌توان مشاهده نمود که در دوره وزش باد ۱۲۰ روزه معیار سرعت باد ۵٪ تأثیر بیشتری در تبخیر نسبت به دوره عدم وزش باد دارد که تأثیر باد در تبخیر را نشان می‌دهد.

در قسمت (الف) شکل (۸) مشاهده می‌شود که در دوره‌های ترسالی شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی تأثیر بیشتری از

حالی که بین عناصر هواشناسی، دمای سطح آب دریاچه بیشترین تاثیر را بر تبخیر آب مخازن دارد.

۷- اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان این پژوهش اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۸- مراجع

- [1] Pomázi, I., 2009. OECD Environmental Outlook to 2030. *Hungarian Geographical Bulletin*, 58(2), pp.139-140.
- [2] Zhao, G. and Gao, H., 2019. Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 226, pp.109-124.
- [3] Oroud, I.M., 2019. The utility of thermal satellite images and land-based meteorology to estimate evaporation from large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 45(4), pp.703-714.
- [4] Saco, P.M., Rodríguez, J.F., Moreno-de las Heras, M., Keesstra, S., Azadi, S., Sandi, S., Baartman, J., Rodrigo-Comino, J. and Rossi, M.J., 2020. Using hydrological connectivity to detect transitions and degradation thresholds: Applications to dryland systems. *Catena*, 186, p.104354.
- [5] Li, Y., Tan, Z., Zhang, Q., Liu, X., Chen, J. and Yao, J., 2021. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: Framework and implications for eco-environmental assessments. *Water Research*, 195, p.117005.
- [6] Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., Javaux, M., Lode, E., Smetanová, A., Vericat, D. and Brardinoni, F., 2018. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187, pp.77-108.
- [7] Jancewicz, K., Migoń, P. and Kasprzak, M., 2019. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. *Science of the Total Environment*, 656, pp.1046-1062.
- [8] Fryirs, K., 2013. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), pp.30-46.
- [9] Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33(2), pp.309-319.
- [10] Güntner, A. and Bronstert, A., 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, 297(1-4), pp.136-161.
- [11] Lane, S.N., Reaney, S.M. and Heathwaite, A.L., 2009.

دوره‌های عدم وزش باد ۱۲۰ روزه، دو مجموعه شاخص‌ها اهمیت نسبی تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهند. می‌توان نتیجه گرفت که در دوره ی وزش باد ۱۲۰ روزه شاخص‌های هواشناسی به اندازه ۱۰٪ تاثیر بیشتری روی تبخیر نسبت به شرایط عدم وزش باد دارند که می‌تواند نشان دهنده تاثیر پدیده‌های محیطی خاصی مانند وزش باد ۱۲۰ روزه روی تبخیر باشد.

نکته قابل توجه در مورد محل این مطالعه، ویژگی‌های خاص فیزیوگرافی آن، شیب پایین سطح زمین‌های اطراف، و وجود زمین‌های مسطح می‌باشد، که می‌تواند با تغییر شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی تاثیر بالایی در تبخیر منطقه از خود نشان دهد. به علاوه این منطقه رسوب‌گذاری بالایی دارد، که در مواقعی که دبی کمتری مشاهده می‌شود، بیشتر رسوب‌ها در جای خود ته‌نشینی می‌شوند که این امر در کنار وجود ریزگردهای زیاد در منطقه می‌تواند موجب تغییرات سریع و زیاد در سطح منطقه شود و مسیرهای حرکت آب را تغییر دهد که این امر با تغییر پیوستگی هیدرولوژیکی منطقه روی تبخیر تاثیر بالایی دارد و می‌تواند تاییدی بر تاثیر زیاد پیوستگی هیدرولوژیکی و شاخص‌های آن در این منطقه با این شرایط خاص باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شده که داده‌های هواشناسی و داده‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای مانند دمای سطح آب و تبخیر به همراه شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی به کمک ابزارهای مناسبی مانند شبکه عصبی مصنوعی می‌توانند اطلاعات مناسبی در زمینه شرایط هیدرولوژیکی محیط ارائه دهند. در این پژوهش تاثیر بالای پیوستگی هیدرولوژیکی در تبخیر با تعیین اهمیت نسبی معیارها نشان داده شد. شاخص‌های پیوستگی در شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی مختلف مانند وزش و عدم وزش باد ۱۲۰ روزه و دوره‌های ترسالی و خشکسالی اهمیت نسبی بالا و در نتیجه تاثیر زیادی در تبخیر از خود نشان دادند. تاثیر زیاد شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی بر تبخیر به علت فیزیوگرافی خاص این منطقه قابل توجه است. وجود شیب کم و زمین‌های مسطح زیاد که به صورت تغییر در شاخص‌های پیوستگی هیدرولوژیکی نمود پیدا می‌کند، تاثیر بالایی در نرخ و حجم تبخیر مناطق گرم و خشکی همچون منطقه قرارگیری چاه‌نیمه‌ها دارند. هم‌چنین عنصر باد در دوره‌های وزش باد ۱۲۰ روزه بیشتر از روزه‌های دیگر سال تاثیر خود را روی تبخیر اعمال می‌کند، در

- Wright, J.L., 2000. Revised FAO procedures for calculating evapotranspiration: irrigation and drainage paper no. 56 with testing in Idaho. In *Watershed Management and Operations Management 2000*, pp. 1-10.
- [25] McMahon, T.A., Finlayson, B.L. and Peel, M.C., 2016. Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), pp.788-818.
- [26] Zhao, G., Gao, H. and Cai, X., 2020. Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 251.
- [27] Abreham Kibret, A., 2009. Open water evaporation estimation using ground measurements and satellite remote sensing: a case study of lake Tana, Ethiopia.
- [28] Anderson, T.R., Groffman, P.M. and Walter, M.T., 2015. Using a soil topographic index to distribute denitrification fluxes across a northeastern headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 522, pp.123-134.
- [29] Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N. and Tagg, A.F., 1984. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. *Journal of hydrology*, 69(1-4), pp.119-143.
- [30] Warburton, J., Holden, J. and Mills, A.J., 2004. Hydrological controls of surficial mass movements in peat. *Earth-Science Reviews*, 67(1-2), pp.139-156.
- [31] Bracken, L.J., Wainwright, J., Ali, G.A., Tetzlaff, D., Smith, M.W., Reaney, S.M. and Roy, A.G., 2013. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, pp.17-34.
- [32] Thomas, I.A., Jordan, P., Mellander, P.E., Fenton, O., Shine, O., Ó hUallacháin, D., Creamer, R., McDonald, N.T., Dunlop, P. and Murphy, P.N., 2016. Improving the identification of hydrologically sensitive areas using LiDAR DEMs for the delineation and mitigation of critical source areas of diffuse pollution. *Science of the Total Environment*, 556, pp.276-290.
- [33] Muluaalem, G.M. and Liou, Y.A., 2020. Application of artificial neural networks in forecasting a standardized precipitation evapotranspiration index for the Upper Blue Nile basin. *Water*, 12(3), p.643.
- [34] Garson, G.D., 1991. A comparison of neural network and expert systems algorithms with common multivariate procedures for analysis of social science data. *Social Science Computer Review*, 9(3), pp.399-434.
- [35] Garson GD. 1991. Interpreting neural-network connection weights. *AI expert*, 6(4), pp.46-51.
- [36] Goh, A.T., 1995. Back-propagation neural networks for modeling complex systems. *Artificial intelligence in engineering*, 9(3), pp.143-151.
- Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index. *Water Resources Research*, 45(8).
- [12] Dunn, P.K. and Smyth, G.K., 2018. *Generalized Linear Models With Examples in R*. Springer.
- [13] Huang, R., Ma, C., Ma, J., Huangfu, X. and He, Q., 2021. Machine learning in natural and engineered water systems. *Water Research*, 205, pp.117666-117666.
- [14] Cheng, S., Cheng, L., Qin, S., Zhang, L., Liu, P., Liu, L., Xu, Z. and Wang, Q., 2022. Improved understanding of how catchment properties control hydrological partitioning through machine learning. *Water Resources Research*, 58(4).
- [15] Londhe, S.N. and Shah, S., 2019. A novel approach for knowledge extraction from artificial neural networks. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(3), pp.269-281.
- [16] Nourani, V. and Fard, M.S., 2012. Sensitivity analysis of the artificial neural network outputs in simulation of the evaporation process at different climatologic regimes. *Advances in Engineering Software*, 47(1), pp.127-146.
- [17] Barsi, J.A., Barker, J.L. and Schott, J.R., 2003, July. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. In *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)* (Vol. 5, pp. 3014-3016). IEEE.
- [18] Maleki, S., Mohajeri, S.H., Mehraein, M. and Sharafati, A., 2024. Lake evaporation in arid zones: Leveraging Landsat 8's water temperature retrieval and key meteorological drivers. *Journal of Environmental Management*, 355.
- [19] Sharaf, N., Fadel, A., Bresciani, M., Giardino, C., Lemaire, B.J., Slim, K., Faour, G. and Vinçon-Leite, B., 2019. Lake surface temperature retrieval from Landsat-8 and retrospective analysis in Karaoun Reservoir, Lebanon. *Journal of applied remote sensing*, 13(4).
- [20] Vanhellemont, Q., 2020. Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS. *Remote Sensing of Environment*, 237.
- [21] Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J. and Zhao, S., 2015. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote sensing*, 7(1), pp.647-665.
- [22] Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), pp.120-145.
- [23] Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), pp.55-94.
- [24] Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D. and

Output-only Structural Identification of a Double-layer Grid with ball joint system

Seyed Rasoul Nabavian^{1,*} , Seyedamin Mostafavian², Bahram Navayi Neya³, Mohammad Reza Davoodi⁴

1. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.
2. Assistant professor, Department of Civil Engineering Payame Noor University, Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshivani University of Technology, Babol, Iran.
4. Associate professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshivani University of Technology Babol, Iran.

Abstract

A double-layer grid has a complex behavior due to a large number of elements and a particular type of joints; hence, structural identification of this type of structure is an important issue, which refers to the determination of natural frequencies, mode shapes, and damping ratios. These results are necessary to complete the structural health monitoring, finite element model updating and damage detection. Due to the limitations of input-output methods, modal parameters of civil engineering structures such as bridges, dams, tall buildings, and double layer grids are determined mainly by output-only modal identification. In this work, physical model of a ball jointed double-layer grid with dimensions of 2.8 m at 2.8 m, which is supported on four steel pipes in four corners was made in the laboratory. The grid consists of 32 members connected together with 13 balls, each having ten threaded holes at different angles. Each member consists of a middle pipe and connecting parts including conical piece, sleeve and high strength bolt at both ends of the pipe. The middle pipe has the nominal length, diameter and thickness of 120 cm, 7.64 cm and 0.35 cm, respectively. The horizontal center to center distance of adjacent balls in each layer of the grid is 1.414 m and the total height of the structure includes the column length (1.3 m) and the distance between the top and bottom layers (1 m), which is equal to 2.3 m in total. The approximate weight of the structure is 3532 N. All the members and the balls used in the grid are identical. After all the members of the grid have been assembled, the bolt at each joint is tightened in a series of steps by twisting the corresponding sleeve. Exciting the grid, its acceleration response was measured. The modal parameters were obtained using four output-only modal identification techniques; namely enhanced frequency decomposition (EFDD), curve-fit frequency domain decomposition (CFDD), data-driven stochastic subspace identification (SSI-DD) and covariance-driven stochastic subspace identification (SSI-Cov). Two types of excitations were used in output-only modal tests, namely direct and indirect excitations. Since the modal parameters obtained via input-output modal analysis have less uncertainty compared to the output-only modal analysis techniques, an input-output modal test was also performed and the results are considered as reference values. The results showed that the natural frequencies and mode shapes of the double-layer grid were estimated with a high accuracy via the four methods. The greatest relative difference between the natural frequencies belonged to the second mode and equaled 2.07%. The dispersion of estimated damping was much higher compared to natural frequencies and mode shapes. Among the 4 methods, SSI-Cov had the least error in damping estimation of the double-layer grid. The values of estimated modal damping ratios were relatively low (fraction of 1%). The mean relative error of the identified parameters showed that the time-domain methods estimated the damping ratios with less error; While the frequency-domain methods identified natural frequencies and mode shapes with higher accuracy.

Review History

Received: Feb 25, 2024

Revised: Apr 26, 2024

Accepted: July 10, 2024

Keywords

Double-layer grid

Structural identification

OMA

Time-domain methods

Frequency-domain methods

* Corresponding Author Email: nabavian@abru.ac.ir - ORCID: 0009-0008-5679-3245

شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان به کمک روش‌های خروجی-تنها

سیدرسول نبویان^{۱*} , سیدامین مصطفویان^۲، بهرام نوائی نیا^۳، محمدرضا داودی^۴

۱. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ... العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران، تهران، ایران.

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

شبکه‌های دولایه ساخته شده با سیستم پیونده گویسان که دسته مهمی از سازه‌های فضاکار هستند، از جمله سازه‌های رایج و پرکاربرد برای اجرای سقف‌ها می‌باشند. شناسایی مشخصات دینامیکی این سازه‌ها برای تکمیل فرآیند پایش سلامت سازه‌ای، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود و تشخیص آسیب ضروری است. محدودیت‌های روش

کلمات کلیدی

شبکه دولایه

پیونده گویسان

شناسایی سازه‌ای

آزمایش مودال خروجی-تنها

روش‌های حوزه‌ی زمان

روش‌های حوزه بسامد

شناسایی ورودی-خروجی باعث شده که در سازه‌های مهندسی از روش خروجی-تنها استفاده شود. در این مطالعه، مدل فیزیکی یک شبکه دولایه به صورت تمام مقیاس در آزمایشگاه ساخته شد. با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها و با استفاده از دو روش حوزه بسامد تجزیه در حوزه بسامد تعمیم یافته (EFDD) و تجزیه در حوزه بسامد با برازش منحنی (CFDD) و نیز دو روش حوزه زمان شناسایی زیرفضای تصادفی با داده خام (SSI-DD) و شناسایی زیرفضای تصادفی با کوواریانس داده‌ها (SSI-Cov)، پارامترهای مودال این شبکه‌ی دولایه تعیین شدند. برای تحریک شبکه از دو نوع بارگذاری تحریک مستقیم و تحریک غیرمستقیم استفاده شد. به منظور بررسی دقت پارامترهای شناسایی شده، یک آزمایش مودال ورودی-خروجی نیز روی شبکه انجام و نتایج به دست آمده به عنوان مبنا انتخاب شدند. نتایج نشان داده که دقت پارامترهای شناسایی شده با بارگذاری مستقیم بالاتر از نتایج مشابه با بارگذاری غیرمستقیم بوده است. بیشترین اختلاف نتایج بسامدهای طبیعی شبکه‌ی دولایه با نتایج مبنا مربوط به مود دوم شبکه و برابر ۲/۰۷٪ بوده است. میانگین خطای نسبی پارامترهای شناسایی شده نشان داده که روش‌های حوزه زمان، نسبت میرایی را با خطای کمتری تخمین زدند؛ درحالی‌که روش‌های حوزه بسامد، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی را با دقت بالاتری شناسایی نمودند.

۱- مقدمه

مودی و نسبت‌های میرایی می‌باشد. یکی از کاربردهای شناسایی سازه‌ای، تکمیل چرخه پایش سلامت سازه‌ای و تشخیص آسیب می‌باشد. با وجود توسعه این مباحث در سازه‌های مختلف مهندسی از یک طرف و نیز کاربرد روزافزون شبکه‌های دولایه در پوشش

شناسایی سازه‌ای یکی از مباحث مهم مهندسی است که همواره مد نظر پژوهشگران قرار داشته است. منظور از شناسایی سازه‌ای، تعیین مشخصات مودال سازه یعنی بسامدهای طبیعی، شکل‌های

* رایانامه نویسنده مسئول: nabavian@abru.ac.ir - ORCID: 0009-0008-5679-3245

سقف سازه‌های با دهانه‌های بزرگ از طرف دیگر، همچنان مطالعات بسیار اندکی در زمینه‌ی شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه صورت پذیرفته است و تقریباً همه مطالعات انجام گرفته در زمینه تشخیص آسیب شبکه‌های دولایه به صورت تئوری و عددی بوده است [1-2]؛ در حالی که گزارشات متعددی در مورد آسیب شبکه‌های دولایه ساخته شده وجود دارد [3-5].

روش‌های شناسایی سازه‌ای تجربی به دو دسته روش‌های ورودی-خروجی و روش‌های خروجی-تنها تقسیم‌بندی می‌شوند. به دلیل محدودیت‌های روش شناسایی ورودی-خروجی [6-7]، عملاً پیاده‌سازی این روش فقط در محیط آزمایشگاه امکان‌پذیر بوده و برای سازه‌های واقعی در مهندسی عمران از روش شناسایی خروجی-تنها استفاده می‌شود [8-9]. در روش شناسایی خروجی-تنها امکان تخمین آزمایشگاهی مشخصات دینامیکی سازه، تنها با اندازه‌گیری پاسخ ارتعاش فراهم می‌باشد. مراجع متعددی در مورد کاربرد روش‌های متعدد شناسایی خروجی-تنها در انواع مختلف سازه‌ها وجود دارد که برای نمونه می‌توان به استفاده از روش‌های جستار قله^۱ (PP) و زیرفضای تصادفی بر مبنای داده‌های خام^۲ (SSI-DD) برای یک ساختمان بتنی ۱۵ طبقه [10]، روش SSI-DD برای یک ساختمان فولادی سه طبقه [11]، روش تجزیه در حوزه‌ی بسامد^۳ (FDD) برای یک خرپای فلزی [12]، روش PP برای ساختمان مرکز جهانی مالی شانگهای [13]، روش تحریک طبیعی^۴ (NExT) برای شش فانوس دریایی [14]، روش‌های FDD و SSI-DD برای یک ساختمان چوبی [15]، روش SSI-DD برای یک برج با مصالح بنایی [16]، روش بیزین برای یک پل کابلی [17]، روش زیرفضای تصادفی بر مبنای کواریانس داده‌ها^۵ (SSI-Cov) برای یک سد بتنی [18]، روش SSI-DD برای یک برج بلند ۲۳۰ متری [19]، روش SSI-DD برای یک پل قوسی با مصالح بنایی [20]، روش‌های FDD، تجزیه در حوزه بسامد بهبود یافته^۶ (EFDD) و SSI-DD برای یک پل بتنی [21] و روش FDD برای ساختمان‌های تاریخی [22] اشاره نمود. لی و همکاران [23] به کمک ۶ حسگر شتاب‌سنج ۶ جهته و با اندازه‌گیری ۳۶ نقطه از یک ساختمان صنعتی چند طبقه نشان دادند که چگونه با تعداد حسگرهای محدود می‌توان مشخصات سازه‌ای یک سازه را تعیین

نمود. سیورا و همکاران [24] یک الگوریتم جدیدی به منظور شناسایی خودکار مودال سازه‌ها ارائه داده و کارایی آن را برای پل تمام مقیاس Z24 در سوئیس مورد ارزیابی و تایید قرار دادند. هوانگ و همکاران [25] با ارائه روش جدید تجزیه مودی عملکردی توانستند اطلاعات مودال سازه‌ها را شناسایی نمایند. مزیت روش آن‌ها این بود که دیگر الزامی به برقراری شرط ایستا بودن اطلاعات ورودی و خروجی به منظور شناسایی سازه‌ای وجود ندارد. مصطفایی و همکاران [26] با معرفی یک الگوریتم توسعه یافته‌ای بر مبنای روش SSI-DD توانستند مشخصات مودال سد گرانشی کوبنا را با دقت مناسبی تعیین نمایند. مئونی و همکاران [27] با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها روی دو دیوار بنایی آسیب دیده با مقیاس کامل در محیط آزمایشگاه و به کمک روش‌های EFDD و NExT توانستند همبستگی مناسبی بین تغییرات در ویژگی‌های مودال سازه و ظرفیت باقیمانده سازه برای تحمل بار ارائه دهند.

مطالعات زیادی در زمینه مقایسه پارامترهای شناسایی شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها در سازه‌ها انجام گرفته است. کیویل و همکاران [28] با استفاده از روش تحلیل مودال خروجی-تنها و به‌کارگیری روش‌های FDD، SSI-DD و SSI-Cov به بررسی پارامترهای سازه‌ای در پل برگساندر در کشور نروژ پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که هر دو روش حوزه زمان شناسایی زیرفضای تصادفی از عملکرد بهتری نسبت به روش تجزیه در حوزه‌ی بسامد برخوردار بوده است. کابوی و همکاران [29] با استفاده از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov به شناسایی دینامیکی در یک پل راه‌آهن پرداختند. نتایج به دست آمده از دو روش حوزه‌ی زمان در این تحقیق نشان داد که روش SSI-Cov نسبت به روش SSI-DD در شناسایی مدهای سازه موفق‌تر بوده است. دیورد و همکاران [30] با استفاده از روش تحلیل مودال خروجی-تنها به شناسایی پارامترهای بسامد طبیعی و نسبت‌های میرایی در یک سقف ورزشگاه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که درصد اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی شناسایی شده میان روش‌های مختلف نسبت به مقادیر مشابه بسامد طبیعی بیشتر است. آلتانسیک و همکاران [31] با انجام آزمایش مودال خروجی-تنها با استفاده از تحریک محیطی، به شناسایی پارامترهای مودال در یک سازه دو طبقه در آزمایشگاه با شرایط سالم، آسیب‌دیده، تعمیر شده و تقویت شده پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از روش SSI-DD و EFDD برای تعیین بسامدهای طبیعی، میرایی و شکل مدهای سازه موردنظر استفاده کردند. نتایج به دست آمده از دو روش

¹ Peak Picking

² Stochastic Subspace Identification-Data Driven

³ Frequency Domain Decomposition

⁴ Natural Excitation Method

⁵ Stochastic Subspace Identification-Covariance Driven

⁶ Enhanced Frequency Domain Decomposition

حوزه زمان و بسامد نشان می‌دهد که مقادیر بسامدهای طبیعی و اشکال مودی تا اندازه‌ی زیادی بر هم منطبق بوده، اما مقادیر میرایی به‌دست‌آمده از دو روش دارای اختلافات زیادی می‌باشد. باجریک و همکاران [32]، به برآورد میرایی مودال در یک برج توربین بادی دریایی با روش خروجی-تنها پرداختند. آن‌ها از روش‌های حوزه زمان SSI-Cov و تحریک طبیعی-الگوریتم ارزیابی سیستم ویژه^۱ (NExT-ERA) و همچنین EFDD برای تخمین میرایی استفاده نمودند. پس از انجام مطالعات تئوری روش SSI-Cov مناسب‌ترین روش برای برآورد میرایی در برج توربین بادی دریایی تعیین شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مطالعات اندکی در زمینه شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه انجام گرفته است. مصطفویان و همکاران [33] به کمک روش شناسایی ورودی-خروجی توانستند بسامدهای طبیعی یک شبکه دولایه ۲/۴ در ۳/۶ متری را تعیین نمایند. نتایج آن‌ها نشان داده که همبستگی مناسبی میان نتایج روش‌های مختلف شناسایی وجود دارد. صالحی و همکاران [34] در کار خود به تعیین نسبت‌های میرایی یک شبکه دولایه به کمک ۴ روش مختلف ورودی-خروجی و ۵ روش مختلف خروجی-تنها پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش ورودی-خروجی به طور میانگین ۶۵٪ بیشتر از نتایج مشابه از روش خروجی-تنها است. نبویان و همکاران [35] نسبت میرایی یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان را با روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها تخمین زدند. آن‌ها در کار خود نشان دادند که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش‌های EFDD و تجزیه در حوزه بسامد با برازش منحنی^۲ (CFDD) و SSI-DD سازگاری مطلوبی با هم دارند. صالحی و همکاران [36] به بررسی تأثیر گام بسامدی بر نتایج تخمین میرایی ۶ مود اول یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان از روش‌های EFDD و CFDD پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میان نسبت‌های میرایی مودی و گام بسامدی در هر مود رابطه تقریباً خطی برقرار است.

در این تحقیق، شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان مد نظر قرار گرفت. این موضوع به دلیل پیچیدگی رفتار پیونده [37-38] و تعداد زیاد درجات آزادی از یک سو و نیز مطالعات اندک در زمینه شناسایی سازه‌ای این نوع از سازه‌ها از سوی دیگر مورد توجه قرار گرفت. یک شبکه دولایه مربعی با ابعاد ۲/۸ متر در ۲/۸ متر با سیستم پیونده گویسان ساخته شد. برای

حوزه زمان و بسامد نشان می‌دهد که مقادیر بسامدهای طبیعی و اشکال مودی تا اندازه‌ی زیادی بر هم منطبق بوده، اما مقادیر میرایی به‌دست‌آمده از دو روش دارای اختلافات زیادی می‌باشد. باجریک و همکاران [32]، به برآورد میرایی مودال در یک برج توربین بادی دریایی با روش خروجی-تنها پرداختند. آن‌ها از روش‌های حوزه زمان SSI-Cov و تحریک طبیعی-الگوریتم ارزیابی سیستم ویژه^۱ (NExT-ERA) و همچنین EFDD برای تخمین میرایی استفاده نمودند. پس از انجام مطالعات تئوری روش SSI-Cov مناسب‌ترین روش برای برآورد میرایی در برج توربین بادی دریایی تعیین شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مطالعات اندکی در زمینه شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه انجام گرفته است. مصطفویان و همکاران [33] به کمک روش شناسایی ورودی-خروجی توانستند بسامدهای طبیعی یک شبکه دولایه ۲/۴ در ۳/۶ متری را تعیین نمایند. نتایج آن‌ها نشان داده که همبستگی مناسبی میان نتایج روش‌های مختلف شناسایی وجود دارد. صالحی و همکاران [34] در کار خود به تعیین نسبت‌های میرایی یک شبکه دولایه به کمک ۴ روش مختلف ورودی-خروجی و ۵ روش مختلف خروجی-تنها پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش ورودی-خروجی به طور میانگین ۶۵٪ بیشتر از نتایج مشابه از روش خروجی-تنها است. نبویان و همکاران [35] نسبت میرایی یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان را با روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها تخمین زدند. آن‌ها در کار خود نشان دادند که نسبت‌های میرایی شناسایی شده از روش‌های EFDD و تجزیه در حوزه بسامد با برازش منحنی^۲ (CFDD) و SSI-DD سازگاری مطلوبی با هم دارند. صالحی و همکاران [36] به بررسی تأثیر گام بسامدی بر نتایج تخمین میرایی ۶ مود اول یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان از روش‌های EFDD و CFDD پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میان نسبت‌های میرایی مودی و گام بسامدی در هر مود رابطه تقریباً خطی برقرار است.

در این تحقیق، شناسایی سازه‌ای یک شبکه دولایه با سیستم پیونده گویسان مد نظر قرار گرفت. این موضوع به دلیل پیچیدگی رفتار پیونده [37-38] و تعداد زیاد درجات آزادی از یک سو و نیز مطالعات اندک در زمینه شناسایی سازه‌ای این نوع از سازه‌ها از سوی دیگر مورد توجه قرار گرفت. یک شبکه دولایه مربعی با ابعاد ۲/۸ متر در ۲/۸ متر با سیستم پیونده گویسان ساخته شد. برای

شکل ۱. روند انجام تحقیق

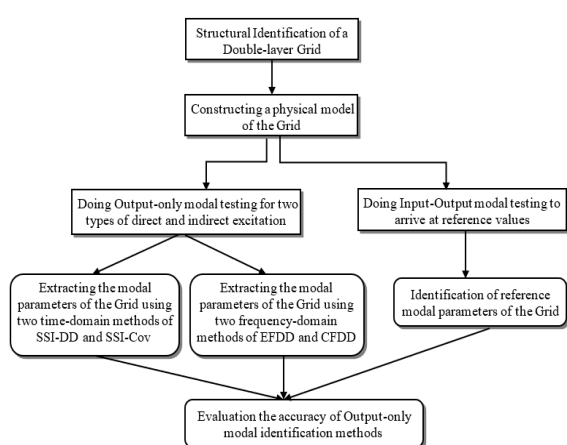


Fig. 1. The research flowchart

۲- شبکه دولایه ساخته شده

شبکه دولایه مورد مطالعه دارای دو دهانه در دو دهانه بوده و روی ۴ لوله فولادی به عنوان ستون‌های تکیه‌گاهی قرار دارد (شکل ۲). مدل سازه مورد مطالعه در شکل (۳) قابل ملاحظه می‌باشد. لایه‌های بالایی و پایینی شبکه با خطوط ضخیم و اعضای مورب اتصال دهنده این دولایه با خطوط نازک نشان داده شده است. اعضای این شبکه، لوله‌هایی به طول ۱/۴۱ متر با ضخامت ۳/۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۷۵/۴ میلی‌متر بوده که از طریق پیونده گویسان به هم متصل شده‌اند (شکل ۴-الف). طول ستون‌های تکیه‌گاهی ۱/۳ متر می‌باشد که محل قرارگیری این ستون‌ها در شکل (۳) با دایره‌های توپر قابل مشاهده است. مطابق شکل (۴-ب) اتصال پای ستون‌ها به صفحه‌ستون به صورت گیردار (جوش همراه با لچکی) ایجاد شده است. ارتفاع کلی سازه برابر مجموع ارتفاع ستون (۱/۳ متر) و فاصله بین دولایه (۱ متر) بوده که مساوی ۲/۳ متر می‌باشد. طول و ابعاد هندسی به‌کار رفته در این شبکه بر اساس نتایج مرجع [37] انتخاب شده است.

¹ Natural Excitation technique-Eigensystem Realization Algorithm

² Curve-fitting Frequency Domain Decomposition

۳- آزمایش مودال خروجی-تنها

برای استخراج پارامترهای سازه‌ای شبکه مورد مطالعه از آزمایش مودال استفاده شده است. در آزمایش مودال خروجی-تنها، سیستم مورد مطالعه تحت یک سازوکار تحریک قرار گرفته و پاسخ خروجی آن اندازه‌گیری شده و با جمع‌آوری داده‌ها و پردازش سیگنال، مشخصات مودال آن سیستم به دست آمد.

به کمک اطلاعات مراجع [11 و 40]، دو نوع تحریک برای این سازه در نظر گرفته شد. در اولین نوع تحریک، بار به طور مستقیم با ضربه‌های متوالی در جهت و مکان تصادفی به نقاط مختلف سازه اعمال شد. در نوع دوم، تحریک به صورت غیرمستقیم و با اعمال ضربه‌های متوالی در جهت و مکان تصادفی به نقاط مختلف صفحه‌ستون‌ها (تکیه‌گاه‌های سازه) ایجاد شد. برای اندازه‌گیری پاسخ از چهار حسگر شتاب مدل A/120/V ساخت کارخانه DJB استفاده شد. سه حسگر به عنوان حسگرهای مرجع در تمام اندازه‌گیری‌ها ثابت نگه داشته شد که موقعیت و جهت آنها در شکل (۳) با علامت های X، Y و Z نشان داده شده که گره‌های دارای بیشترین شتاب مودی هستند و حسگر چهارم، متحرک بوده که در سایر گره‌های شبکه و در جهات مختلف در گردش بود. برای آزمایش کامل این سازه، با توجه به تعداد درجات آزادی، در مجموع ۳۶ اندازه‌گیری انجام گرفت. برای این سازه، با توجه به آزمایش‌های اولیه و پیشنهاد برینکر و ونچورا [41] مودهای با بسامد طبیعی زیر ۱۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفته و عملیات شناسایی تجربی نیز برای همین مودها انجام شد. مدت زمان اندازه‌گیری پاسخ این سازه بر اساس بسامد طبیعی و ضریب میرایی مودی مربوط به مود اول این شبکه از آزمایش‌های اولیه و رابطه پیشنهادی در مرجع [41]، ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین گام زمانی ثبت اطلاعات بر اساس رابطه نایکوئیست-شانون [41]، برابر ۰/۰۰۱۹۵۳۱۲۵ ثانیه انتخاب شد.

۴- تحلیل مودال خروجی-تنها

برای تخمین پارامترهای مودال شبکه مورد بررسی از روش‌های شناسایی خروجی-تنها استفاده شد. در انتخاب روش‌ها سعی شد که از هر یک از حوزه‌های زمان و بسامد، دو روش انتخاب شود؛ بدین منظور از روش‌های EFDD [42-43]، CFDD [44]، SSI-DD [45-47] و SSI-Cov [48] استفاده شد. برای انجام تحلیل مودال خروجی-تنها با استفاده از سه روش EFDD، CFDD

شکل ۲. شبکه دولایه ساخته شده در محیط آزمایشگاه



Fig. 2. The double layer Grid made in a Laboratory

شکل ۳. پلان مدل شبکه‌ی دولایه مورد مطالعه

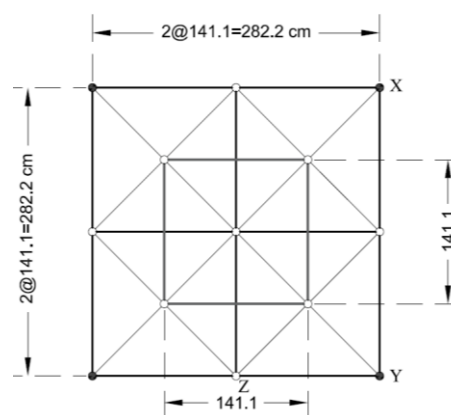


Fig. 3. Plan of the double layer Grid

شکل ۴. دو نوع پیونده به کار رفته در شبکه دولایه: الف-پیونده گویسان ب- پیونده گیردار



الف- A



ب- B

Fig. 4. The two types of joints used in the double layer Grid: A) ball joint, B) clamped joint

طبیعی شبکه در دو نوع بارگذاری بسیار به هم نزدیک بوده؛ در حالی که پراکندگی نتایج میرایی شبکه بسیار بیشتر از نتایج بسامد طبیعی است. این نتیجه به دلیل عدم قطعیت بیشتر میرایی [41] قابل توجیه است و با نتایج مراجع [28، 30 و 31] مطابقت دارد. مطابق جدول (۲)، نسبت میرایی شناسایی شده با افزایش شماره مود، عموماً کاهش می‌یابد. این نتیجه در هر دو نوع بارگذاری مشاهده شده است. این موضوع به دلیل تیزتر بودن نمودار طیف پاسخ در نزدیکی موقعیت بسامدهای مربوط به مودهای بالاتر می‌باشد. همچنین مقادیر میرایی به دست آمده از هر دو روش نشان‌دهنده کوچک بودن میرایی شبکه دولایه مورد بررسی می‌باشد، به طوری که در هر دو روش EFDD و CFDD بیشترین مقدار میرایی نزدیک به یک درصد می‌باشد، که با نتایج به دست آمده از مراجع [50-52] مطابقت دارد.

جدول ۱. بسامدهای طبیعی (هرتز) شناسایی شده شبکه از روش‌های EFDD و CFDD

Mode Number	EFDD		CFDD	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	7.92	7.92	7.92	7.94
2	8.00	8.13	8.00	8.14
3	12.73	12.75	12.73	12.75
4	71.40	71.37	71.30	71.37
5	77.02	77.75	77.02	77.13
6	78.43	78.32	78.43	78.30
7	101.05	101.00	101.00	101.00

Table 1. Natural frequencies (Hz) of the gird identified via EFDD and CFDD

جدول ۲. نسبت‌های میرایی (درصد) شناسایی شده شبکه از روش‌های EFDD و CFDD

Mode Number	EFDD		CFDD	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	0.55	0.48	0.59	1.10
2	0.36	0.46	0.36	0.38
3	0.31	0.31	0.29	0.34
4	0.17	0.17	0.17	0.16
5	0.18	0.21	0.19	0.10
6	0.12	0.16	0.13	0.12
7	0.05	0.05	0.08	0.05

Table 2. Damping ratios (%) of the gird identified via EFDD and CFDD

نتایج بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی شناسایی شده شبکه دولایه با روش‌های SSI-DD و SSI-COV در جداول (۳ و ۴) ارائه شده است. مانند روش‌های حوزه بسامد در روش‌های حوزه زمان نیز تطابق مناسب نتایج بسامدهای طبیعی و پراکندگی نتایج

و SSI-DD از نرم‌افزار ARTeMIS Modal 6.0 [49] و برای استخراج نتایج روش SSI-Cov از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۵- نتایج شناسایی حاصل از روش‌های خروجی-تنها

برای حصول اطمینان از کیفیت آزمایش مودال خروجی-تنها، از تعریف تابع همبستگی [41] استفاده شد. یک نمونه از تابع PSD شتاب‌های ثبت شده شبکه به همراه تابع همبستگی مربوطه در شکل‌های (۵ و ۶) ارائه شد. در موقعیت ماکزیمم‌های نمودار PSD یعنی محل بسامدهای طبیعی در شکل (۵)، مقدار تابع همبستگی مطابق شکل (۶) بسیار نزدیک به یک می‌باشد که نشان‌دهنده درستی آزمایش مودال خروجی-تنها است.

شکل ۵. یک نمونه از تابع PSD شتاب شبکه

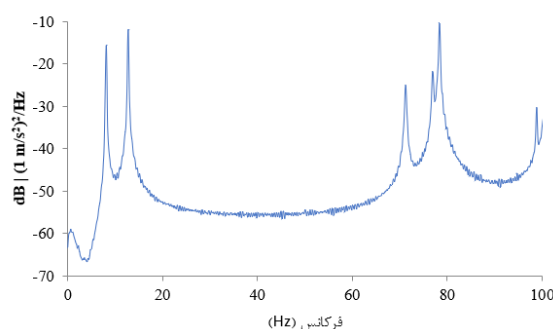


Fig. 5. A sample of Acceleration PSD for the grid

شکل ۶. تابع همبستگی مربوط به تابع PSD از یک نمونه شتاب شبکه

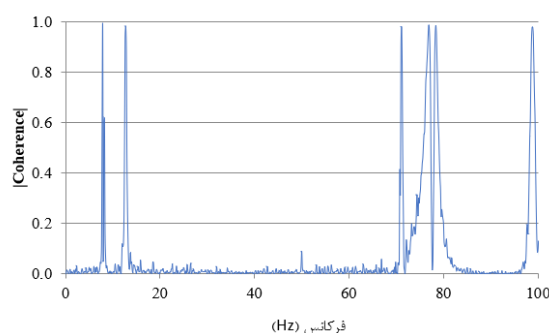


Fig. 6. The correlation function related to the PSD of Fig. 4

نتایج مربوط به بسامد طبیعی و نسبت میرایی ۷ مود اول شبکه با روش‌های EFDD و CFDD در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است. از آنجاکه دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم به سازه اعمال شده، پس نتایج برای هر کدام به تفکیک در این جداول آورده شده است. همان‌طور که از این جداول قابل ملاحظه است نتایج بسامدهای

جدول ۵. میانگین نتایج بسامدهای طبیعی (هرتز) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در هر دو نوع تحریک

Mode Number	Direct		Indirect	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	7.94	0.02	7.93	0.01
2	8.07	0.09	8.14	0.01
3	12.75	0.02	12.75	0.00
4	72.08	0.84	71.34	0.05
5	77.63	0.70	77.27	0.32
6	79.13	0.82	78.38	0.09
7	101.06	0.06	101.05	0.06

Table 5. The averages of natural frequencies (Hz) as well as their standard deviations for both types of loading

جدول ۶. میانگین نتایج نسبت‌های میرایی (درصد) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در هر دو نوع تحریک

Mode Number	Direct		Indirect	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	0.55	0.03	0.62	0.32
2	0.37	0.01	0.36	0.08
3	0.28	0.03	0.32	0.04
4	0.17	0.01	0.18	0.01
5	0.16	0.03	0.15	0.05
6	0.12	0.01	0.13	0.02
7	0.06	0.01	0.07	0.02

Table 6. The averages of damping ratios (%) as well as their standard deviations for both types of loading

به منظور مقایسه پارامترهای تخمین زده شده مربوط به هر دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم از روش‌های حوزه بسامد (EFDD و CFDD) با نتایج مشابه از روش‌های حوزه زمان (SSI- و DD و SSI-Cov)، مقادیر میانگین و انحراف استاندارد مربوط به بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه‌ی دولایه در جداول (۷ و ۸) قابل ملاحظه است. با توجه به این جداول، پراکندگی نتایج بسامد طبیعی و میرایی در روش‌های حوزه بسامد عمدتاً کمتر از روش‌های حوزه زمان است.

۶- مقایسه و بحث

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده مربوط به تحلیل مودال خروجی-تنها از آزمایش مودال ورودی-خروجی استفاده شد. از آنجاکه آزمایش مودال ورودی-خروجی دارای قابلیت اطمینان بالاتری است [39]، نتایج آن به عنوان مبنا فرض شده و تخمین‌های به دست آمده از چهار روش SSI-، CFDD، EFDD و DD و SSI-Cov با نتایج مبنا مقایسه شدند.

میرایی مشاهده شد. با توجه به جدول (۴) ملاحظه می‌شود که میرایی به‌دست‌آمده با روش‌های SSI-DD در سه مود اول شبکه، مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به مودهای بعدی ارائه می‌دهند چراکه مودهای بالاتر به هم نزدیک شده و قله‌های نمودار تیزتر می‌شوند.

جدول ۳. بسامدهای طبیعی (هرتز) شناسایی شده‌ی شبکه از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov

Mode Number	SSI-DD		SSI-Cov	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	7.97	7.93	7.95	7.93
2	8.18	8.13	8.08	8.14
3	12.76	12.75	12.76	12.75
4	72.79	71.36	72.82	71.27
5	78.28	77.08	78.18	77.11
6	79.98	78.40	79.68	78.50
7	101.14	101.10	101.04	101.10

Table 3. Natural frequencies (Hz) of the gird identified via SSI-DD and SSI-Cov

جدول ۴. نسبت‌های میرایی (درصد) شناسایی شده‌ی شبکه از روش‌های SSI-DD و SSI-Cov

Mode Number	SSI-DD		SSI-Cov	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect
1	0.51	0.47	0.55	0.43
2	0.37	0.30	0.38	0.30
3	0.23	0.36	0.27	0.27
4	0.19	0.19	0.16	0.18
5	0.15	0.16	0.13	0.12
6	0.11	0.11	0.10	0.11
7	0.06	0.09	0.06	0.08

Table 4. Damping ratios (%) of the gird identified via SSI-DD and SSI-Cov

جداول (۵ و ۶) مربوط به میانگین نتایج بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه به همراه مقادیر انحراف استانداردشان برای چهار روش فوق‌الذکر در دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم می‌باشند. مقادیر کم ستون انحراف استاندارد در جدول (۵) نشانگر سازگاری خوب میان نتایج شناسایی شده بسامدهای طبیعی می‌باشد.

با توجه به جدول (۶)، میرایی در همه مودها عمدتاً در بارگذاری غیرمستقیم نسبت به بارگذاری مستقیم بیشتر شده است. از آنجاکه مشارکت تکیه‌گاه خارجی در مقدار میرایی سازه‌ها قابل توجه است و با توجه به این‌که در تحریک غیرمستقیم بار ورودی از طریق تکیه‌گاه به سازه اعمال شده، پس نقش تکیه‌گاه قابل توجه بوده و مقدار میرایی در تحریک غیرمستقیم عمدتاً بیشتر از تحریک مستقیم است. مقایسه مقادیر انحراف استاندارد نشان می‌دهد که سازگاری نتایج میرایی در روش مستقیم بیشتر از روش غیرمستقیم است.

جدول ۷. میانگین نتایج بسامدهای طبیعی (هرتز) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در روش‌های حوزه‌ی زمان و بسامد

Mode Number	Time Domain		Frequency Domain	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	7.95	0.02	7.93	0.01
2	8.13	0.04	8.07	0.08
3	12.76	0.01	12.74	0.01
4	72.06	0.86	71.36	0.04
5	77.66	0.66	77.23	0.35
6	79.14	0.81	78.37	0.07
7	101.10	0.04	101.01	0.02

Table 7. The averages of natural frequencies (Hz) as well as their standard deviations for both time and frequency methods

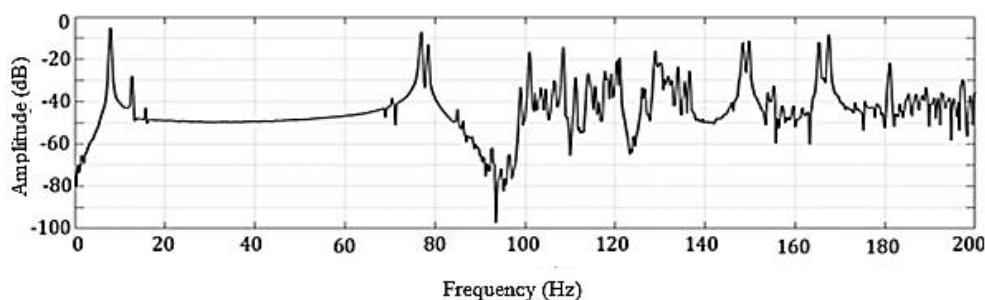
جدول ۸. میانگین نتایج نسبت‌های میرایی (درصد) شبکه‌ی دولایه به همراه مقادیر انحراف استاندارد در روش‌های حوزه‌ی زمان و بسامد

Mode Number	Time Domain		Frequency Domain	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
1	0.68	0.28	0.49	0.05
2	0.39	0.05	0.34	0.04
3	0.31	0.02	0.28	0.06
4	0.17	0.01	0.18	0.01
5	0.17	0.05	0.14	0.02
6	0.13	0.02	0.11	0.01
7	0.06	0.02	0.07	0.02

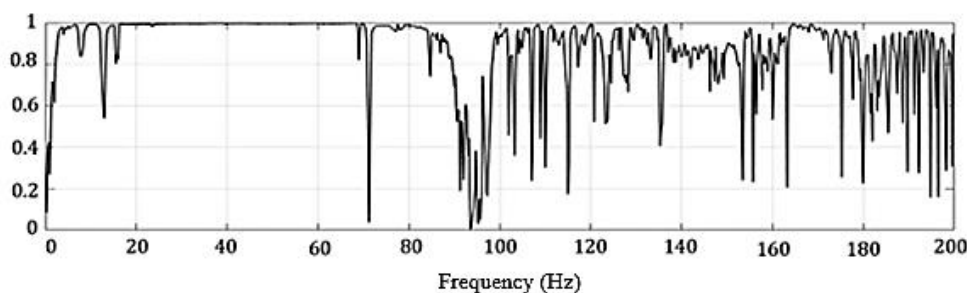
Table 8. The averages of damping ratios (%) as well as their standard deviations for both time and frequency methods

در آزمایش مودال ورودی-خروجی از روش شتاب‌سنج ثابت-نیروی متحرک استفاده شد به طوری که شبکه دولایه تحت یک سازوکار تحریک قرارگرفته تا نیروی ورودی و پاسخ خروجی آن اندازه‌گیری شود. سه شتاب‌سنج با مشخصات گفته شده در بخش ۳، در جهات مختلف یکی از گره‌های شبکه نصب شده (گره سمت راست پایینی در شکل ۳) و نیروی ضربه چکش در تمامی گره‌ها و همه جهات اعمال شد. چکش مورد استفاده برای انجام این آزمایش، ساخت کارخانه DYTRAN و مدل 5802A با سر قهوه‌ای (که نرم‌ترین سر چکش بوده) [53] بوده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و پردازش سیگنال، توابع پاسخ بسامد به دست آمده و پارامترهای مودال سازه از همین توابع تعیین شدند. شکل (۷) یک نمونه از تابع پاسخ بسامد اندازه‌گیری شده شبکه مورد بررسی را به همراه تابع وابستگی مربوطه نشان می‌دهد. یکی از نشانه‌های حصول کیفیت مطلوب در اندازه‌گیری توابع پاسخ بسامدی، رسیدن به عدد یک برای تابع وابستگی مربوطه در نواحی دور از ضد تشدیدها است که در شکل (۷-ب) مشخص می‌باشد.

شکل ۷. الف) یک نمونه از تابع پاسخ بسامدی شبکه‌ی مورد بررسی و ب) تابع همبستگی مربوط به آن



(الف) / (a)



(ب) / (b)

Fig. 7. (a): A sample of Frequency Response Function (FRF) of the grid, (b): their correlation function

روش‌های شناسایی خروجی-تنهای حوزه زمان تخمین بالاتری از بسامد طبیعی نسبت به نتایج مبنا می‌زند. با توجه به این جداول در مجموع می‌توان گفت که بسامدهای طبیعی با دقت قابل قبولی یعنی با بیشینه خطای ۲/۶۳٪ نسبت به مقدار مبنا شناسایی شدند.

جدول ۱۰. اختلاف نسبی مقادیر بسامد طبیعی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری مستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-0.13	-0.13	0.5	0.25
2	0.38	0.38	2.63	1.38
3	0.16	0.16	0.39	0.39
4	-0.24	-0.38	1.70	1.75
5	-0.23	-0.23	1.40	1.27
6	-0.31	-0.31	1.67	1.28
7	0.05	0.00	0.14	0.04

Table 10. The relative difference between natural frequencies estimated via output-only identification methods and base values in direct-typed loading

جدول ۱۱. اختلاف نسبی مقادیر بسامد طبیعی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-0.13	0.13	0.00	0.00
2	2.01	2.13	2.01	2.13
3	0.31	0.31	0.31	0.31
4	-0.28	-0.28	-0.29	-0.42
5	0.71	-0.09	-0.16	-0.12
6	-0.44	-0.47	-0.34	-0.22
7	0.00	0.00	0.10	0.10

Table 11. The relative difference between natural frequencies estimated via output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

۶-۲- مقایسه نسبت‌های میرایی

مقادیر اختلاف نسبی مقادیر نسبت میرایی شناسایی شده بین دو روش خروجی-تنها و ورودی-خروجی در جدول‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. مطابق این جداول، سازگاری مطلوبی میان نتایج میرایی شبکه از روش‌های مختلف وجود ندارد.

جدول ۱۲. اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری مستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-11.30	-4.84	-17.7	-11.29
2	-10.00	-10.00	-7.50	-5.00
3	0.00	-6.45	-25.8	-12.9
4	21.43	21.43	35.71	14.29
5	38.46	46.15	15.38	0.00
6	71.43	85.71	57.14	42.86
7	-16.70	33.33	0.00	0.00

Table 12. The relative difference between damping ratios estimated via output-only identification methods and base values in direct-typed loading

تحلیل مودال ورودی-خروجی به کمک نرم‌افزار ME' scope انجام گرفته است. جدول (۹) مربوط به بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی ۷ مود اول شبکه دولایه مورد آزمایش بوده که از روش تحلیل مودال ورودی-خروجی تعیین شدند. مطابق این جدول، مقادیر میرایی به‌دست آمده شبکه کم بوده؛ به طوری‌که بیشترین مقدار میرایی مربوط به مود اول بوده و برابر ۰/۰۶۲٪ است.

جدول ۹. نتایج شناسایی شبکه از روش تحلیل مودال ورودی-خروجی

Mode Number	Natural Frequency (Hz)	Damping Ratio (%)
1	7.93	0.62
2	7.97	0.40
3	12.71	0.31
4	71.57	0.14
5	77.20	0.13
6	78.67	0.07
7	101.00	0.06

Table 9. The identification results of the grid using input-output modal analysis

۶-۱- مقایسه بسامدهای طبیعی

نمودارهای مقایسه نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های خروجی-تنها با نتایج متناظر مبنا مربوط به هر دو بارگذاری مستقیم و غیرمستقیم در شکل (۸) قابل مشاهده است. مطابق این نمودار سازگاری مطلوبی میان نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های مختلف وجود دارد.

شکل ۸. نتایج بسامدهای طبیعی شناسایی شده از روش‌های مختلف

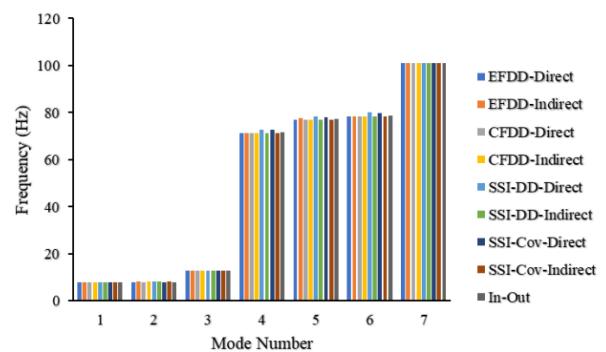


Fig. 8. Natural frequencies identified via various methods

مقدار درصد اختلاف نسبی میان بسامدهای طبیعی شناسایی شده شبکه از سه روش خروجی-تنها با مقدار مبنا از روش تحریک مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. علامت منفی در این جداول نشان دهنده آن است که مقدار تخمین زده شده از روش خروجی-تنها کمتر از مقدار متناظر مبنا است. نتایج تحریک مستقیم نشان می‌دهد که

جدول ۱۳. اختلاف مقادیر نسبت‌های میرایی روش‌های خروجی-تنها با مقادیر مینا در بارگذاری غیرمستقیم (%)

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	-22.60	77.42	-24.20	-30.65
2	15.00	-5.00	-25.00	-25.00
3	0.00	9.68	16.13	-12.90
4	21.43	14.29	35.71	28.57
5	61.54	-23.08	23.08	-7.69
6	128.6	71.43	57.14	57.14
7	-16.70	-16.67	50.00	33.33

Table 13. The relative difference between damping ratios estimated via output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

از آنجاکه میرایی نسبت به بسامد طبیعی و شکل مود دارای درجه‌ی عدم قطعیت بالاتری است، پراکندگی نتایج شناسایی‌شده‌ی میرایی قابل پیش‌بینی بود. میرایی شناسایی‌شده‌ی موده‌های پایین و در روش تحریک مستقیم از روش خروجی-تنها عمدتاً بیشتر یا مساوی مقدار متناظر مینا است که با نتایج به دست آمده در مراجع [55] و [56] مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند که میرایی شناسایی‌شده خروجی-تنها به دلیل وجود خطاهای تصادفی بیشتر به خصوص در موده‌های پایین‌تر، بالاتر از تخمین میرایی از روش ورودی-خروجی است.

مقادیر میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها و روش ورودی-خروجی (In-Out) مربوط به بارگذاری‌های مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، پراکندگی نسبی نتایج میرایی در هر دو نوع بارگذاری مشهود است.

شکل ۹. نمودار میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف تحلیل مودال مربوط به بارگذاری مستقیم

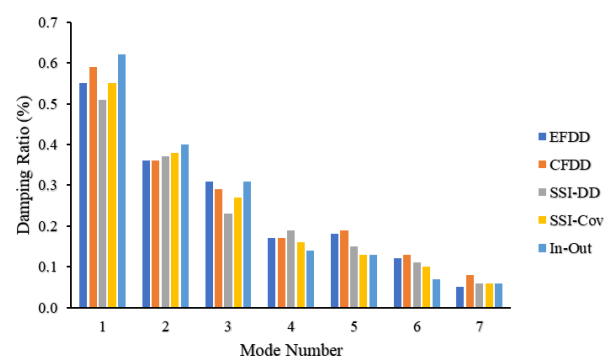


Fig. 9. Damping ratios identified via various methods in direct-typed loading

شکل ۱۰. نمودار میرایی شناسایی‌شده از روش‌های مختلف تحلیل مودال مربوط به بارگذاری غیرمستقیم

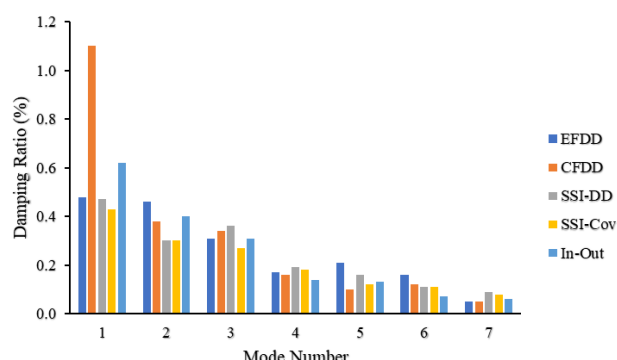


Fig. 10. Damping ratios identified via various methods in indirect-typed loading

۳-۶- مقایسه شکل‌های مودی

برای مقایسه شکل موده‌های شناسایی‌شده از روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مینا (روش ورودی-خروجی) از معیار ^۱MAC [57] استفاده شده است. مقدار MAC بین هریک از موده‌های شناسایی‌شده شبکه از چهار روش EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov با مود متناظر شناسایی‌شده از روش ورودی-خروجی در جداول (۱۴ و ۱۵) ارائه شده است. اعداد نزدیک به یک در این جدول نشان‌دهنده آن است که روش‌های شناسایی خروجی-تنها موفق به شناسایی صحیح شکل موده‌های شبکه شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج این دو نوع بارگذاری نشان می‌دهد که مقادیر MAC در بارگذاری غیرمستقیم عمدتاً کمتر یا مساوی مقادیر متناظر از بارگذاری مستقیم می‌باشد که همان‌طور که اشاره شد به دلیل بیشتر بودن انرژی تحریک مودها در بارگذاری مستقیم نسبت به بارگذاری غیرمستقیم است. مطابق این جدول، بیشترین مقدار MAC در هر روش مربوط به موده‌های ۳ و ۴ می‌باشد که غیر متقارن هستند.

جدول ۱۴. مقادیر MAC روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مینا در بارگذاری مستقیم

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	0.87	0.89	0.86	0.88
2	0.88	0.89	0.87	0.88
3	0.99	0.99	0.99	0.99
4	0.99	0.98	0.97	0.99
5	0.91	0.90	0.89	0.87
6	0.93	0.93	0.95	0.89
7	0.89	0.90	0.87	0.89

Table 14. The MAC values between output-only identification methods and base values in direct-typed loading

¹ Modal Assurance Criterion

شد. شکل مودهای شبکه نیز با دقت نسبتاً مناسبی شناسایی شدند. اما نسبت‌های میرایی شناسایی شده این شبکه خطای قابل توجهی از خود نشان دادند. همچنین با توجه به نتایج میرایی می‌توان گفت که نتایج مربوط به تحریک مستقیم با خطای کمتری نسبت تحریک غیرمستقیم شناسایی شدند که به دلیل انرژی تحریک بالاتر این نوع بارگذاری بوده است. با توجه به نتایج بسامد طبیعی و شکل مود شناسایی شده می‌توان نتیجه گرفت روش‌های حوزه بسامد EFDD و CFDD دقت بالاتری نسبت به روش‌های حوزه زمان از خود

شکل ۱۱. نمودار MAC بین شکل مودهای روش EFDD و مقادیر متناظر مبنا در بارگذاری مستقیم

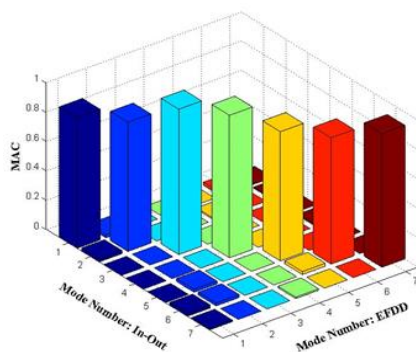


Fig. 11. The MAC diagram between identified mode shapes by EFDD and the corresponding base values in direct-typed loading

شکل ۱۲. نمودار MAC بین شکل مودهای روش EFDD و مقادیر متناظر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم

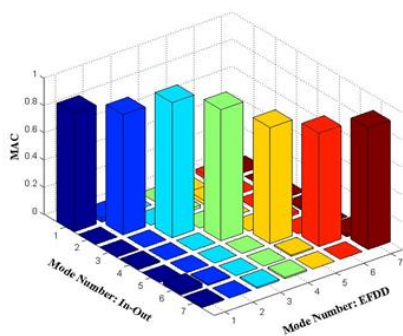


Fig. 12. The MAC diagram between identified mode shapes by EFDD and the corresponding base values in indirect-typed loading

جدول ۱۶. میانگین خطای نسبی (%) بسامدهای طبیعی و نسبت‌های میرایی و نیز میانگین مقادیر MAC از روش‌های مختلف شناسایی در مقایسه با نتایج متناظر مبنا

Parameter	EFDD		CFDD		SSI-DD		SSI-Cov	
	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect
Natural Frequency	0.21	0.56	0.23	0.49	1.21	0.46	0.91	0.47
Damping Ratio	24.18	37.97	29.7	31.08	22.76	33.04	12.33	27.9
MAC	0.92	0.91	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91

Table 16. The average relative error of natural frequencies and damping ratios as well as MAC values identified via various methods and the corresponding base values

جدول ۱۵. مقادیر MAC روش‌های مختلف خروجی-تنها با مقادیر مبنا در بارگذاری غیرمستقیم

Mode Number	EFDD	CFDD	SSI-DD	SSI-Cov
1	0.86	0.87	0.85	0.87
2	0.87	0.88	0.86	0.86
3	0.97	0.99	0.99	0.98
4	0.99	0.98	0.98	0.99
5	0.89	0.89	0.90	0.88
6	0.90	0.92	0.93	0.89
7	0.89	0.89	0.87	0.88

Table 15. The MAC values between output-only identification methods and base values in indirect-typed loading

برای بررسی درستی شکل‌های مودی شناسایی شده از روش خروجی-تنها باید علاوه بر شرط انطباق، شرط تعامد نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد. اگر مقدار MAC میان یک شکل مود روش خروجی-تنها و شکل مود دیگر از روش ورودی-خروجی صفر یا نزدیک به آن باشد، میان آن دو مود شرط تعامد برقرار است. بدین منظور برای نمونه، نمودار MAC یکی از روش‌های خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) ارائه شده است. اعداد نزدیک به یک روی قطر اصلی و نزدیک به صفر روی سایر خانه‌های ماتریس، بیانگر شناسایی درست شکل مودهای شبکه از روش EFDD می‌باشد.

۴-۶- مقایسه دقت روش‌های مختلف خروجی-تنها

نتایج مربوط به مقایسه دقت روش‌های مختلف خروجی-تنها در شناسایی شبکه دولایه مورد بررسی در جدول (۱۶) ارائه شده است. در این جدول، مقادیر نوشته شده در سطرها مربوط به بسامد طبیعی و نسبت میرایی بیانگر میانگین خطای نسبی ۷ مود اول شناسایی شده شبکه دولایه با روش‌های مختلف خروجی-تنها بوده که در جداول (۱۰ الی ۱۳) ارائه شده بود. همچنین سطر آخر، میانگین مقادیر MAC مودهای مختلف در هر روش را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۱۶) می‌توان گفت که مقادیر بسامد طبیعی با میانگین خطای بیشینه ۱/۲۱٪ نسبت به مقادیر مبنا تخمین زده

نشان داده که در مقایسه با بسامد طبیعی و شکل مودی، پراکندگی نتایج میرایی بسیار بیشتر است. همچنین نتایج نشان داده که مقدار میرایی عمدتاً با افزایش شماره‌ی مود کاهش می‌یابد. مقادیر تخمین زده شده میرایی در بارگذاری مستقیم کمتر از بارگذاری غیرمستقیم می‌باشد. میانگین اختلاف میان نتایج شناسایی روش‌های مختلف خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی نشان داده که با وجود این که روش‌های حوزه بسامد EFDD و CFDD دقت بالاتری در شناسایی بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی شبکه از خود نشان دادند، اما روش‌های حوزه‌ی زمان SSI-DD و SSI-Cov، میرایی را با دقت بالاتری شناسایی نمودند. از بین ۴ روش مورد بررسی، روش SSI-Cov کمترین خطا را در شناسایی نسبت میرایی شبکه دولایه داشت.

۸- مراجع

- [1] Teimouri, H., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. and Khanmohammadi, L., 2021. Damage detection in double layer grids with modal strain energy method and Dempster-Shafer theory. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), pp.253-266.
- [2] Teimouri, H., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. 2020. Detecting damage location and severity in a double layer grid using modal strain energy method and data fusion. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), pp.35-54. Doi: 10.22065/jsce.2018.126917.1518. [In Persian]
- [3] Tüfekci, M., Tüfekci, E. and Dikicioğlu, A., 2020. Numerical investigation of the collapse of a steel truss roof and a probable reason of failure. *Applied Sciences*, 10(21).
- [4] Fu, F. and Parke, G.A.R., 2018. Assessment of the progressive collapse resistance of double-layer grid space structures using implicit and explicit methods. *International Journal of Steel Structures*, 18, pp.831-842. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0030-1>
- [5] Hamid Y. S., Disney P., and Parke G. a R., 2011. Progressive Collapse of Double-Layer Space Trusses. *Conference: IABSE-IASS SYMPOSIUM LONDON*, At London.
- [6] Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A., Nabavian, S.R. and Jahangiry, G.H., 2020. Determining minimum number of required accelerometer for output-only structural identification of frames. *arXiv preprint arXiv:2010.07490*.
- [7] Rainieri, C. and Fabbrocino, G., 2011. Operational modal analysis for the characterization of heritage structures. *GEOFIZIKA*, 28(1), pp.109-126.
- [8] Giraldo, D.F., Song, W., Dyke, S.J. and Caicedo, J.M.,

نشان دادند اما در مورد نسبت میرایی نتیجه عکس اتفاق افتاد. بدین معنا که نسبت میرایی شبکه از روش‌های حوزه زمان با دقت بالاتری شناسایی شدند. در هر دو نوع بارگذاری، میرایی شناسایی شده از روش SSI-Cov کمترین اختلاف را با مقادیر متناظر مبنا دارند که با نتایج مراجع [14 و 32] مطابقت دارد. دقت بالای روش SSI-Cov در تخمین میرایی به دلیل استفاده از کوواریانس داده‌ها در عملیات شناسایی می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

عملیات شناسایی سازه‌ای شبکه‌های دولایه از یک طرف به دلیل تعداد زیاد المان‌ها و نوع خاص اتصالات آن که دارای رفتاری پیچیده بوده و از طرف دیگر به دلیل نیاز به تعیین شکل مودهای آن به دلیل وجود تعداد زیاد درجات آزادی حائز اهمیت است. در این تحقیق به شناسایی سازه‌ای خروجی-تنهای یک شبکه دولایه با سیستم اتصال گویسان از ۴ روش مختلف EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov پرداخته شد. بدین ترتیب یک شبکه دولایه با سیستم پیونده‌ی گویسان ساخته شد و تحت آزمایش مودال خروجی-تنها و با دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم قرار گرفت. همچنین به دلیل ارزیابی روش‌های مختلف شناسایی خروجی-تنها یک آزمایش مودال ورودی-خروجی نیز انجام گرفت و نتایج آن مبنای مقایسه قرار گرفت.

نتایج به دست آمده نشان داده که هر چهار روش EFDD، CFDD، SSI-DD و SSI-Cov توانستند در هر دو نوع تحریک مستقیم و غیرمستقیم، بسامدهای طبیعی شبکه دولایه‌ی مورد بررسی را با دقت قابل قبولی شناسایی کنند به طوری که بیشینه اختلاف نتایج تخمین زده شده بین روش‌های خروجی-تنها با روش ورودی-خروجی مربوط به مود دوم و حدود ۲٪ می‌باشد. نتیجه مشابهی برای شکل مودهای شناسایی شده‌ی شبکه حاصل شد. بدین ترتیب که کمینه مقدار MAC میان شکل مودهای شناسایی شده از روش خروجی-تنها با شکل مود مشابه از روش ورودی-خروجی برابر ۸۵٪ به دست آمد. مقادیر MAC میان شکل مودهای شناسایی شده از روش‌های خروجی-تنها و روش ورودی-خروجی برای مودهای مقارن اول و دوم و نیز پنجم و ششم کمتر از سایر مودها بوده است؛ یعنی شکل مودهای مربوط به این مودها با دقت کمتری شناسایی شدند. نتایج شناسایی شبکه

- modal analysis: A structural health monitoring application to masonry arch bridges. *Structural Control & Health Monitoring*, 29(10).
- [21] Saidin, S.S., Kudus, S.A., Jamadin, A., Anuar, M.A., Amin, N.M., Ibrahim, Z., Zakaria, A.B. and Sugiura, K., 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of ultra-high-performance concrete bridge based on ambient vibration test. *Case Studies in Construction Materials*, 16.
- [22] Providakis, C.P., Mousteraki, M.G. and Providaki, G.C., 2023. Operational modal analysis of historical buildings and finite element model updating using α laser scanning vibrometer. *Infrastructures*, 8(2), p.37.
- [23] Li, B., Wang, P., Zhu, Z., Li, Z. and Xiao, Y., 2024. Ambient Vibration Test and Retest of a Multistory Factory Building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 38(4).
- [24] Civera, M., Sibille, L., Fragonara, L.Z. and Ceravolo, R., 2023. A DBSCAN-based automated operational modal analysis algorithm for bridge monitoring. *Measurement*, 208.
- [25] Huang, K., Yuen, K.V., Ma, Y. and Wang, L., 2024. Online operational modal decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 214.
- [26] Mostafaei, H., Mostofinejad, D., Ghamami, M. and Wu, C., 2023, April. A new approach of ensemble learning in fully automated identification of structural modal parameters of concrete gravity dams: A case study of the Koyuna dam. In *Structures* (Elsevier), 50, pp.255-271.
- [27] Meoni, A., D'Alessandro, A., Mattiacci, M., García-Macías, E., Saviano, F., Parisi, F., Lignola, G.P. and Ubertini, F., 2024. Structural performance assessment of full-scale masonry wall systems using operational modal analysis: Laboratory testing and numerical simulations. *Engineering Structures*, 304.
- [28] Kvåle, K.A., Øiseth, O. and Rønnquist, A., 2017. Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge. *Engineering Structures*, 148, pp.410-423.
- [29] Cabboi, A., Magalhães, F., Gentile, C. and Cunha, Á., 2017. Automated modal identification and tracking: Application to an iron arch bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(1).
- [30] Diord, S., Magalhães, F., Cunha, Á. and Caetano, E., 2017. High spatial resolution modal identification of a stadium suspension roof: Assessment of the estimates uncertainty and of modal contributions. *Engineering Structures*, 135, pp.117-135.
- [31] Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydin, M., Kalkan, E. and Adanur, S., 2018. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions. *Measurement*, 124, pp.260-276.
2009. Modal identification through ambient vibration: comparative study. *Journal of engineering mechanics*, 135(8), pp.759-770. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:8(759).
- [9] Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S., 2017. System Identification of Arch Dams Using Balanced Stochastic Subspace Identification. *Modares Civil Engineering journal*, 17(1), pp.53-64
- [10] Ventura, C.E. and Horyna, T., 2000. Measured and calculated modal characteristics of Heritage Court Tower in Vancouver, BC. *Experimental Techniques*, 24, pp.44-47.
- [11] Kudu, F.N., Uçak, Ş., Osmancikli, G., Türker, T. and Bayraktar, A., 2015. Estimation of damping ratios of steel structures by Operational Modal Analysis method. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, pp.61-68.
- [12] Maliar, L., Kuchárová, D. and Daniel, L., 2019. Operational Modal Analysis of the Laboratory Steel Truss Structure. *Transportation Research Procedia*, 40, pp.800-807.
- [13] Shi, W., Shan, J. and Lu, X., 2012. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient vibration response. *Engineering Structures*, 36, pp.14-26.
- [14] Brownjohn, J.M.W., Raby, A., Bassitt, J., Antonini, A., Hudson, E. and Dobson, P., 2018. Experimental modal analysis of British rock lighthouses. *Marine Structures*, 62, pp.1-22.
- [15] Min, K.W., Kim, J., Park, S.A. and Park, C.S., 2013. Ambient Vibration Testing for Story Stiffness Estimation of a Heritage Timber Building. *The Scientific World Journal*, 2013, pp.1-9
- [16] Shabani, A., Feyzabadi, M. and Kioumars, M., 2022. Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 16.
- [17] Ni, Y.C., Alamdari, M.M., Ye, X.W. and Zhang, F.L., 2021. Fast operational modal analysis of a single-tower cable-stayed bridge by a Bayesian method. *Measurement*, 174.
- [18] Li, J., Bao, T. and Ventura, C.E., 2022. An automated operational modal analysis algorithm and its application to concrete dams. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168.
- [19] Avci, O., Alkhamis, K., Abdeljaber, O., Alsharo, A. and Hussein, M., 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of a 230 m tall tower. *Structure*, 37, pp.154-167.
- [20] Civera, M., Mugnaini, V. and Zanotti Fragonara, L., 2022. Machine learning-based automatic operational

- Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique. In *Conference Proceedings: IMAC-XXVI: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*. Society for Experimental Mechanics.
- [45] Tarinejad, R. and Pourgholi, M., 2015. Processing of Ambient Vibration Results using Stochastic Subspace Identification based on Canonical Correlation Analysis. *Modares Mechanical Engineering*, 15(7), pp.107-118.
- [46] Nabavian, S.R., Davoodi, M.R., Navayi Neya, B. and Mostafavian, S.A., 2020. Effect of noise on output-only structural identification of beams. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), pp.20-34. doi: 10.22065/jsce.2018.130329.1555
- [47] Brincker, R. and Andersen, P., 2006. Understanding stochastic subspace identification. In *Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*. Society for Experimental Mechanics.
- [48] Peeters, B., 2000. System identification and damage detection in civil engineering.
- [49] ARTeMIS Modal 4, Issued by Structural Vibration Solutions AVS. NOVI Science Park, Niles Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark.
- [50] Pashaei, M.H., Davoodi, M.R. and Nooshin, H., 2006. Effects of tightness of bolts on the damping of a MERO-type double layer grid. *International Journal of Space Structures*, 21(2), pp.103-110.
- [51] Park, Y.M. and Kim, K.J., 2013. Semi-active vibration control of space truss structures by friction damper for maximization of modal damping ratio. *Journal of Sound and Vibration*, 332(20), pp.4817-4828.
- [52] Zhang, H., Han, Q., Wang, Y. and Lu, Y., 2016. Explicit modeling of damping of a single-layer latticed dome with an isolation system subjected to earthquake ground motions. *Engineering Structures*, 106, pp.154-165.
- [53] <https://www.dytran.com/Model-5802A-Impulse-Sledge-Hammer-P2578.aspx>
- [54] <https://www.vibetech.com/mescope>
- [55] Avitabile, P., 2006. MODAL SPACE: Someone Told me that Operating Modal Analysis Produces Better Results and that Damping is Much More Realistic. *Experimental Techniques*, 30(6), pp.25-26. doi:10.1111/j.1747-1567.2006.00102.x.
- [56] Lauwagie, T., Van Assche, R., Van der Straeten, J. and Heylen, W., 2006, September. A comparison of experimental, operational, and combined experimental-operational parameter estimation techniques. In *Proceedings of the International Noise and Vibration Conference, ISMA*, pp.2997-3006.
- [57] Allemang, R.J., 2003. The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and vibration*, 37(8), pp.14-23. doi:10.1016/j.chemgeo.2006.02.014.
- [32] Bajrić, A., Høgsberg, J. and Rüdinger, F., 2018. Evaluation of damping estimates by automated operational modal analysis for offshore wind turbine tower vibrations. *Renewable Energy*, 116, pp.153-163.
- [33] Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R., Vaseghi Amiri, J. and Gholampour, S., 2012. Experimental determination of the natural frequencies of a full scale double layer grid with ball joint system. *15th World Conf. Earthq. Eng.*
- [34] Salehi, S., Davoodi, M.R. and Mostafavian, S., 2020. Estimation of Damping for a Double-Layer Grid Using Input-Output and Output-Only Modal Identification Techniques. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(2), pp.295-311. doi: 10.22059/ceij.2019.284169.1594
- [35] Nabavian, S.R., Davoodi, M.R., Navayi Neya, B. and Mostafavian, S.A., 2021. Damping estimation of a double-layer grid by output-only modal identification. *Scientia Iranica*, 28(2), pp.618-628. doi: 10.24200/sci.2019.51919.2424
- [36] Salehi, S., Mostafavian, S.A. and Davoodi, M.R., 2021. Effect of the frequency spacing on modal damping estimation of a double-layer grid. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37(1.1), pp.105-115.
- [37] Davoodi, M.R., Amiri, J.V., Gholampour, S. and Mostafavian, S.A., 2012. Determination of nonlinear behavior of a ball joint system by model updating. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, pp.52-62. doi:10.1016/J.JCSR.2011.11.011.
- [38] Mostafavian, S.A., Davoodi, M.R. and Amiri, J.V., 2012. Ball joint behavior in a double layer grid by dynamic model updating. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, pp.28-38.
- [39] Magalhães, F., Cunha, Á., Caetano, E. and Brincker, R., 2010. Damping estimation using free decays and ambient vibration tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), pp.1274-1290.
- [40] Orlowitz, E. and Brandt, A., 2017. Comparison of experimental and operational modal analysis on a laboratory test plate. *Measurement*, 102, pp.121-130. doi:10.1016/j.measurement.2017.02.001.
- [41] Brincker, R. and Ventura, C., 2015. *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons.
- [42] Mostafavian, S., Nabavian, S.R., Davoodi, M.R. and Navayi Neya, B., 2019. Output-only modal analysis of a beam via frequency domain decomposition method using noisy data. *International Journal of Engineering*, 32(12), pp.1753-1761. doi: 10.5829/ije.2019.32.12c.08
- [43] Brincker, R., Zhang, L.M. and Andersen, P., 2001. Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), pp.441-445. doi:10.1088/0964-1726/10/3/303.
- [44] Jacobsen, N.J., Andersen, P. and Brincker, R., 2008.

A new approach to assessment of load carrying capacity of damage concrete bridge piers on near-fault earthquakes

F. Daneshjoo¹, M. Ansari^{2*}

1. Professor of Civil Eng., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor of Civil Eng., Faculty of Engineering, Bozorghmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.

Abstract

When bridges undergo inelastic deformations in near-fault earthquakes, they mostly do not return to the original vertical direction and undergo significant residual deformations. Even though these bridges have not collapsed, they are mostly not any more functional in the immediate aftermath of the ground shaking and generally deemed irreparable. These relatively large residual displacements observed in damaged bridges by near-fault strong ground motions jeopardize the operability of the bridge after the seismic event partly due to the introduction of the additional moments in the columns induced by the offset of vertical gravity loads. Therefore, it is of great significance to be able to accurately predict the demand and capacity of residual drifts for bridges exposed to near-field ground motions for decision-making about their serviceability upon a major seismic event. In this research, on the contrary to the design code requirements and the previous studies, an analytical model is proposed which can account for the bridge pier properties and the ground motion characteristics. The proposed model takes the variation in the stiffness and strength of the bridge pier which is proportional to the incurred damages in different earthquake shaking levels into account in order for the prediction of permanent drift capacity.

Review History

Received: Mar 3, 2024

Revised: Apr 20, 2024

Accepted: May 27, 2024

Keywords

residual drift
near-field earthquake
P-Delta effects
bridge serviceability
stiffness and strength
variation
earthquake levels

* Corresponding Author Email: ansari@buqaen.ac.ir

روش پیشنهادی جدید برای ارزیابی ظرفیت باربری پایه پل های بتنی آسیب دیده پس از زلزله های حوزه نزدیک

فرهاد دانشجو^۱، مختار انصاری^{۲*}

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

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

هنگامی که پل ها دچار تغییر شکلهای غیرالاستیک در زلزله های نزدیک گسل می شوند عمدتاً به راستای قائم اولیه برنمی گردند و دچار تغییرشکلهای پس ماند قابل توجهی می شوند. این تغییر شکل پس ماند زیاد باعث می شود که پل ها با وجود عدم فروریزش، غیر قابل تعمیر باشند و امکان استفاده از آنها پس از زلزله مقدور نباشد. جابه جایی های ماندگار قابل توجه در پل های آسیب دیده در زلزله های نزدیک گسل باعث می شود بهره برداری از آنها پس از زلزله تحت اثر بارهای ثقلی به دلیل ممان های قابل توجه ناشی از آثار پی-دلتا به مخاطره بیفتد. بنابراین تخمین تقاضا و ظرفیت دینامیکی بر اساس جابه جایی پس ماند پل ها در زلزله های نزدیک گسل از موضوعات مهم ارزیابی سرویس پذیری پل ها پس از زلزله است. در این تحقیق برخلاف آئین نامه ها و تحقیقات قبلی، در پیشنهاد یک مقدار مشخص برای جابه جایی ماندگار مجاز، روشی تحلیلی برای محاسبه ظرفیت باربری پایه پل های آسیب دیده براساس جابه جایی ماندگار با توجه به نسبت های مختلف ابعادی پایه و شدت زلزله های وارد شده معرفی می شود. در این روش تغییرات سختی و مقاومت پایه های بتن مسلح، در سطوح مختلف زلزله، بر اساس میزان آسیب وارده در محاسبه ظرفیت دررفت ماندگار در نظر گرفته می شود.

کلمات کلیدی

جابه جایی ماندگار
زلزله نزدیک گسل
آثار پی-دلتا
سرویس پذیری پل
تغییرات سختی و مقاومت
سطوح زلزله

۱- مقدمه

شکل های غیر الاستیک زیادی را تحمل می کنند [1-3]. پس از تحریک های زلزله های نزدیک گسل مانند زلزله سال ۱۹۹۹ Chi-Chi و ۱۹۹۵ Kobe تعداد زیادی از پایه های پل دچار تغییر شکل های جانبی پسماند قابل ملاحظه ای شدند. برای نمونه پس از زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه ژاپن بیش از ۱۰۰ پل به دلیل جابه جایی نسبی پس ماند بیش از حد مجاز و عدم شرایط سرویس پذیری مناسب، تخریب شدند. این تغییر شکل های جانبی پسماند باعث می شود که سرویس پذیری پل پس از زلزله تحت بارهای ترافیکی دچار مشکل شود و این عوامل در نهایت منجر به تعمیر و

زلزله های نزدیک به گسل دارای پالس های شدید در موج سرعت هستند که باعث آزاد شدن انرژی زیادی به صورت ناگهانی می شود. زلزله های نزدیک به گسل به دلیل رفتار خاص و اثر برای پیشرو، جابه جایی های ماندگار زیادی ایجاد می کنند. در سال های اخیر ستون های بتنی واقع در مناطق با لرزه خیزی زیاد با شکل پذیری بالا طراحی و اجرا می شوند تا در مقابل حرکت های شدید زمین لرزه دچار فروریزش نشوند. اما این ستون های بتنی بدون اینکه دچار کاهش ظرفیت باربری جانبی و قائم شوند تغییر

* رایانامه نویسنده مسئول: ansari@buqaen.ac.ir

برای آنالیز پل در بارهای ثقلی جدید نیاز است تا مشخصات مفصل پلاستیک اصلاح شود، تا ظرفیت برآورد شده دقیق و به واقعیت نزدیک باشد [17,18]. این موضوع خود باعث سخت تر شدن محاسبه ظرفیت جابه جایی پس ماند می شود. در این تحقیق با استفاده از نتایج تست آزمایشگاهی و توصیه آئین نامه های موجود، مشخصات مفصل پلاستیک سازه پس از زلزله اصلاح می شود تا ظرفیت جابه جایی ماندگار دارای دقت کافی باشد.

۲- کلیات روش پیشنهادی

ظرفیت جابه جایی ماندگار پایه پل، جابه جایی جانبی باقی مانده پس از زلزله است که در حضور آن با لحاظ آثار ثانوی ناشی از بارهای ثقلی موجود، پل به آستانه خرابی برسد. برای تشریح بیشتر این پارامتر شکل (۱) را در نظر بگیرید. شکل (۱) a، وضعیت عادی ستون پل را با طول L را نشان می دهد. شکل (۱) b، وضعیت ستون پل پس از زلزله را نشان می دهد، در این شکل Δ_r و $\theta_{residual}$ به ترتیب جابه جایی پس ماند و دوران پس ماند ایجاد شده پس از زلزله می باشند. شکل (۱) c، وضعیت ستون پس از زلزله و اعمال بار زنده جدید را نشان می دهد که در آن $\Delta\delta$ و $\theta\delta$ به ترتیب اضافه تقاضای جابه جایی پس ماند و دوران پس ماند ایجاد شده پس از زلزله و ناشی از بار زنده است که پایه را در آستانه خرابی قرار می دهد. بنابراین جابه جایی ماندگار نهایی پایه $(\Delta_r + \Delta\delta)$ جمع جابه جایی ماندگار اولیه Δ_r و جابه جایی ماندگار ایجاد شده جدید $\Delta\delta$ است.

شکل ۱. وضعیت ستون (a) حالت عادی، (b) پس از زلزله و (c) پس از اعمال بار زنده جدید

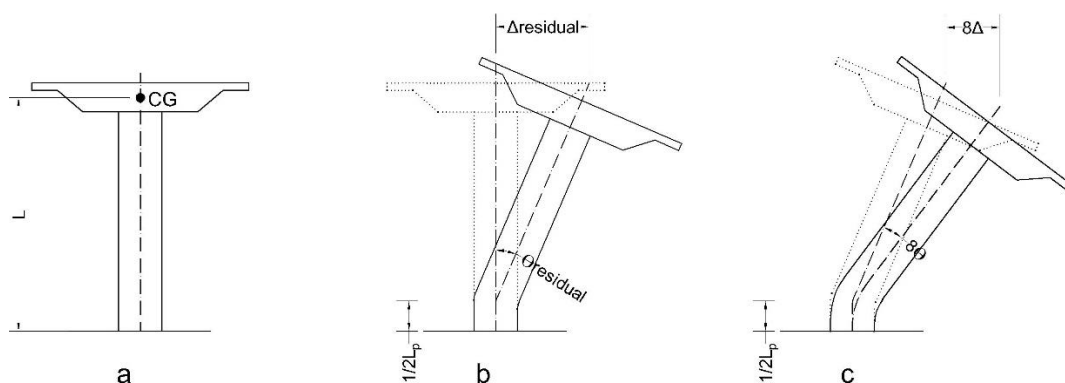


Fig. 1. The bridge pier status: (a) normal condition (b) after the ground shaking, and (c) after applying the live load.

ارائه می شود. این چارچوب شامل ۲ ضابطه کنترل لنگر خمشی تقاضا و دوران تقاضا در پایه پل است. در قسمت اول (کنترل لنگر خمشی تقاضا) در هر مرحله از تحلیل دینامیکی افزاینده بیشترین

جایگزینی پایه پل خواهد شد [4-6]. در بیشتر آئین نامه های طراحی لرزه ای پل ضابطه ای برای کنترل جابه جایی پس ماند وجود ندارد و این آئین نامه ها در مناطق نزدیک به گسل تنها به پیشنهاد افزایش برش پایه یا شتاب طیفی تا $1/2$ برابر اکتفا نموده اند [7] و تنها آئین نامه ژاپن دریافت پس ماند را به مقدار ثابت ۱ درصد در سطوح مختلف زلزله محدود نموده است [8]. تحقیقات متنوعی در خصوص روش های کاهش جابه جایی پس ماند و عوامل موثر بر آن انجام شده است که عمده آنها بر اساس استفاده از تاندون های پیش تنیده چسبیده و نجسبیده استوار شده است [9-16]، لیکن به دلیل سختی های اجرایی و عملکرد نامشخص در مناطق لرزه خیز، کمتر اجرایی شده است. در این تحقیق روشی مبتنی بر دینامیک سازه، برای محاسبه ظرفیت جابه جایی پس ماند لرزه ای ارائه می شود. ظرفیت جابه جایی پس ماند، جابه جایی ماندگاری است که پس از زلزله، پایه پل در حضور آن و بارهای ثانوی ثقلی، شرایط سرویس بی وقفه اش به مخاطره می افتد و در آستانه خرابی قرار می گیرد. در صورتی که مقدار این جابه جایی قابل ملاحظه باشد، خدمات رسانی پس از زلزله دچار اختلال می شود، زیرا ممکن است پل با توجه به جابه جایی ماندگار قابل ملاحظه و اثر بارهای ثانوی ثقلی شامل بار عرشه پل و بار زنده وسایل خدمات رسان مانند ماشین آتش نشانی و آمبولانس و ... به ظرفیت نهایی خود برسد. بنابراین جابه جایی ماندگاری قابل قبول است که در حضور آن و بارهای ثقلی و ایجاد آثار ثانویه، پل به آستانه خرابی برسد. از طرفی با توجه به خرابی و آسیب های احتمالی پل در زلزله اصلی،

در این روش با استفاده از تحلیل دینامیکی افزاینده، روش دقیقی برای محاسبه حد مجاز دریافت پس ماند بر اساس ظرفیت بار محوری ستون های بتنی پل پس از آسیب های جدی در زلزله

$$M_{cap}^i = \lambda_q^i \cdot M_p \quad (2)$$

در فرمول فوق λ_q^i ضریب کاهش ظرفیت ممان در هر گام شتابی و M_{cap}^i ممان پلاستیک کاهش یافته پس از هر گام شتابی زلزله وارده است. برای تخمین ضریب کاهش ممان پلاستیک مقطع بتن مسلح λ_q^i از مفاهیم بند ۳، استفاده می‌شود.

۲-۲- محاسبه ظرفیت دررفت ماندگار بر اساس ظرفیت دوران باقی مانده

عبور بار زنده اضافی وسایط نقلیه اضطراری، در صورتی که ممان پلاستیک کاهش یافته پایه، M_{cap}^i از تقاضای ممان جدید ناشی از بار ثقلی در هر گام شتابی، M_{postEQ}^i بیشتر باشد، امکان پذیر است. تفاضل ظرفیت ممان پلاستیک کاهش یافته و تقاضای ممان جدید (ممان ناشی از آثار P-DELTA)، ظرفیت ممان باقیمانده است. در این روش برای طراحی بر اساس جابه‌جایی پس‌ماند، هر دو پارامتر ظرفیت ممان باقی‌مانده و ظرفیت دوران باقی‌مانده را کنترل می‌کند. ظرفیت ممان باقی‌مانده δM_i بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\delta M_i = M_{cap}^i - M_{postEQ}^i \quad (3)$$

اگر ظرفیت ممان δM_i منفی باشد نشان‌دهنده رسیدن پل به ظرفیت نهایی است و مشخص می‌کند بار زنده اضافی نباید به پل اعمال شود. در این صورت پل، باید روی بارهای ترافیک و بارهای اضطراری عبوری، بسته شود. برای تعیین مقدار بار زنده مجاز اعمالی به پایه، باید پارامتر جابه‌جایی ماندگار جدید $\delta \Delta_i$ محاسبه شود.

$$\delta F_i = \frac{\delta M_i}{L} \quad (4)$$

$$\delta \Delta_i = \frac{\delta F_i}{\lambda_k^i k} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه ۵، ظرفیت جابه‌جایی رزرو در هر گام شتابی محاسبه می‌شود. تبدیل ظرفیت نیرو رزرو به جابه‌جایی رزرو از طریق سختی انجام می‌شود. در رابطه بالا L ، طول پایه پل و λ_k^i ضریب کاهش سختی پایه است. با توجه به اینکه پایه در هر گام شتابی با توجه به زلزله اعمالی، دچار آسیب شده است، فرض می‌شود که سختی سازه از سختی الاستیک اولیه کمتر است. سختی سازه آسیب دیده در هر گام شتابی در تحلیل دینامیکی افزایش یافته

تقاضای لنگر خمشی در پایه‌های پل با ظرفیت ممان پلاستیک پایه بتنی مقایسه می‌شود. البته ظرفیت ممان پلاستیک در هر مرحله از تحلیل دینامیکی با توجه به تقاضای شکل‌پذیری ماکزیمم و آسیب‌های وارد شده بر آن مرحله کاهش می‌یابد. با توجه به تقاضای لنگر خمشی، دررفت پس‌ماند در هر مرحله و ظرفیت ممان پلاستیک کاهش یافته، بیشترین بار عبوری مجاز از روی پل تعیین می‌شود. جزئیات این روش در قسمت ۲-۱ آورده شده است. در قسمت دوم (کنترل دوران تقاضا) دوران تقاضا شامل دوران پس‌ماند و دوران پایه با ظرفیت دورانی عضو که از منحنی لنگر و انحنا بدست می‌آید مقایسه می‌شود و بر اساس آن بیشترین بار عبوری و محدوده مجاز دررفت پس‌ماند محاسبه می‌شود. جزئیات کامل روش در قسمت ۲-۲ آورده شده است.

۲-۱- محاسبه ظرفیت دررفت ماندگار بر اساس ممان پلاستیک

در این روش برای محاسبه ظرفیت جابه‌جایی ماندگار پایه‌های پل، ابتدا پایه‌های انتخاب شده با زمان تناوب‌های متفاوت، تحت رکوردهای نزدیک گسل قرار می‌گیرند. برای محاسبه ظرفیت پس‌ماند از تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده می‌شود. در تحلیل دینامیکی افزایشی انجام شده، پارامتر اندازه شدت (IM) بیشینه شتاب زمین لرزه (PGA) انتخاب می‌شود و برای پارامتر اندازه خسارت (DM) ۲ پارامتر ماکزیمم دررفت پایه و دررفت ماندگار پایه، در نظر گرفته می‌شود. تحلیل دینامیکی افزایشی در گام‌های 0.1g انجام می‌شود و در هر گام با توجه به جابه‌جایی پس‌ماند Δr_i تحلیل، مقدار تقاضای ممان پس از زلزله M_{postEQ}^i ، ناشی از وزن روسازه و پایه پل محاسبه می‌شود و این تقاضای ممان جدید با ممان پلاستیک پایه آسیب دیده مقایسه می‌شود. رابطه ۱، تقاضای ممان پس از زلزله ناشی از بارهای ثقلی موجود، در حضور جابه‌جایی ماندگار ایجاد شده در هر گام شتابی را نشان می‌دهد.

$$M_{postEQ}^i = \Delta r_i \left(DL_{superst} + \frac{1}{2} DL_{column} \right) \quad (1)$$

در رابطه ۱، $DL_{superst}$ بار مرده سهم ستون حاصل از جرم عرشه و روسازه است. DL_{column} بار مرده ناشی از جرم پایه است. برای محاسبه ظرفیت جدید پایه پس از زلزله، مطابق بخش ۳، فرض می‌شود با توجه به شدت زلزله در هر گام شتابی و شدت خسارت متناظر با آن، ممان پلاستیک کاهش یافته (ممان پلاستیک مقطع آسیب دیده) نسبتی از ممان پلاستیک اولیه مقطع باشد (رابطه ۲).

با بار زنده معیار که برابر با بار دو ماشین آتش‌نشانی است که این بار از لحاظ مقدار با بار وسیله نقلیه HL-93 در آئین‌نامه آشتو برابر است مقایسه می‌شود. دلیل در نظر گرفتن این بار به عنوان بار زنده معیار به این دلیل است، که پس از زلزله و ایجاد خرابی در سازه‌های مختلف، پل به عنوان شریان اصلی برای خدمات‌رسانی بعد از زلزله استفاده می‌شود. با وجود آسیب‌های متعدد، باید پل پس از زلزله بتواند بارهای زنده وسایل خدمات‌رسان ضروری مانند آمبولانس و ماشین‌آتش‌نشانی را تحمل کند. در این مقاله برای اطمینان از کارکرد روش ارائه شده، بار ۲ ماشین آتش‌نشانی به عنوان بار معیار در نظر گرفته شده است. فرض این است که بار دو ماشین به صورت پشت‌سرهم و با فاصله خاصی از روی پل مفروض عبور می‌کنند. با توجه به اینکه دهانه باربر پل، از طول بار اعمالی وسایل نقلیه بیشتر است، لذا می‌توان برای سادگی، بار عبوری را به صورت یک بار متمرکز (W_{Truck}) مانند شکل (۳) در نظر گرفت. در حالت اول شکل (۳) بار اعمالی بدون خروج از مرکزیت اثر داده می‌شود، طوری که بار از مرکز جرم عرشه می‌گذرد و در حالت دوم شکل (۳) بار اعمالی با خروج از مرکزیت e ، اعمال می‌شود.

مشابه سختی وتری است و از تقسیم سختی الاستیک k بر تقاضای شکل‌پذیری μ_i در هر گام محاسبه می‌شود (شکل ۲). سختی اولیه سیستم از تحلیل بار افزون بدست می‌آید.

شکل ۲. سختی کاهش یافته معادل براساس تقاضای شکل‌پذیری

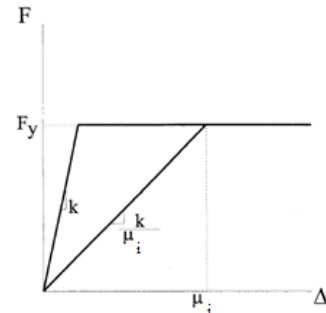


Fig. 2. The equivalent reduced stiffness based on ductility demand.

در این روش، از سختی معادل که نسبتی از سختی الاستیک است، استفاده می‌شود. سختی معادل مطابق رابطه ۶ از ضرب فاکتور کاهش سختی در سختی الاستیک بدست می‌آید. برای محاسبه فاکتور کاهش سختی عضو، مطابق مفاهیم بخش ۳ عمل می‌شود.

$$K_{eq}^i = \lambda_k^i k = \frac{1}{\mu_i} k \quad (6)$$

پس از محاسبه ظرفیت جابه‌جایی باقی مانده، بیشترین بار زنده ای که می‌تواند از روی پل عبور کند محاسبه می‌شود. این بار زنده

شکل ۳. شرایط بار زنده ناشی از عبور ماشین آتش‌نشانی با و بدون خروج از مرکزیت

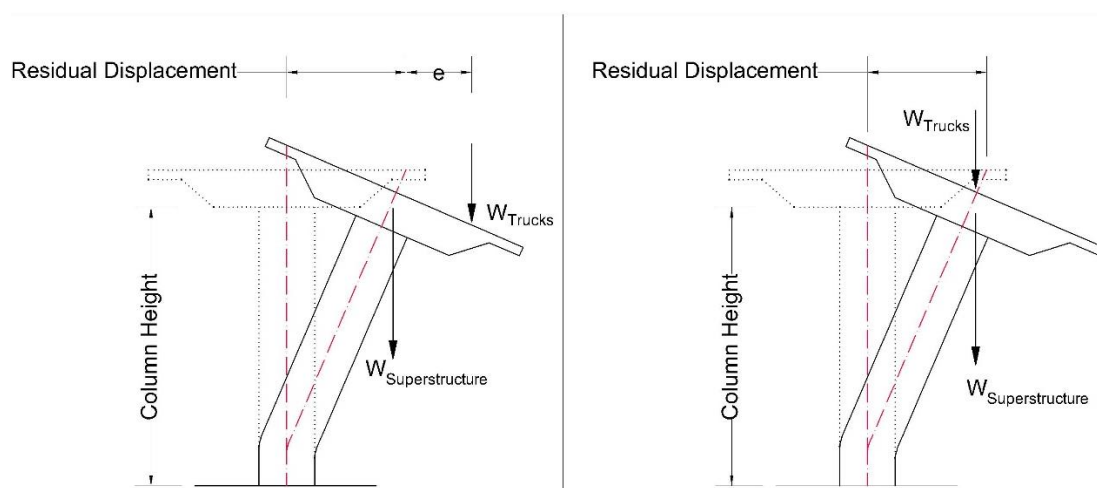


Fig. 3. The condition of the live load due to moving firefighting truck in presence and absence of the eccentricity.

ممان زرزو δM و ظرفیت جابه‌جایی زرزو $\delta \Delta$ بیان می‌کند. در رابطه بالا M_{postEq}^i لنگر خمشی اعمالی به پایه در هر گام شتابی و $\Delta_{residual}^i$ جابه‌جایی پس‌ماند حادث شده در هر گام است. با

$$LL_{allowable}^i = \frac{M_{postEq}^i + \delta M_i}{\Delta_{residual}^i + \delta \Delta_i} - (DL_{supstr} + \frac{1}{2} DL_{column}) \quad (7)$$

رابطه ۷ بار زنده مجاز عبوری از روی پل را بر اساس ظرفیت

المان‌های خمشی مفاصل پلاستیک ممان-دوران به وسیله ممان و دوران تسلیم (M_y, θ_y) و ممان و دوران نهایی (M_u, θ_u) تعریف می‌شوند. دوران تسلیم با استفاده از سختی موثر El_{eff} که از مشخصات مقطع ترک نخورده است محاسبه می‌شود و دوران نهایی از جمع دوران تسلیم و دوران پلاستیک بدست می‌آید. برای ارزیابی سازه‌های آسیب دیده به دلیل ترک خوردگی بتن پوسته و انهدام قسمتهایی از بتن هسته، مقاومت و سختی المان‌های مختلف سازه کاهش می‌یابد. پس برای تحلیل غیرخطی باید سختی و مقاومت اعضا با توجه به میزان تقاضای شکل‌پذیری وارد شده اصلاح شود. برای نمونه در شکل (۴) کاهش سختی و مقاومت مفاصل پلاستیک و تأثیر آن در منحنی ظرفیت پل بتنی نمایش داده می‌شود. تغییر مشخصات اصلی سازه مانند مقاومت و سختی و به عبارتی تغییر مشخصات مفاصل پلاستیک سازه آسیب دیده، باعث تغییر و کاهش منحنی ظرفیت سازه آسیب‌دیده می‌شود [19 و 20]. در این تحقیق نیز پس از زلزله اصلی وارد شده به سازه، مقاومت و سختی سازه اصلی کاهش می‌یابد تا باعث شود، تحلیل ثانوی ثقلی با دقت بیشتری انجام شود.

توجه به شرح فوق می‌توان میزان بار زنده مجاز برای عبور از روی پل را در هر گام شتابی زلزله، بدست آورد و مقدار مزبور را با بار زنده معیار (بار ماشین آتش نشانی) مقایسه نمود. زمانی که بار زنده مجاز عبوری LL_{allow}^i در هر گام شتابی به بار زنده معیار ماشین آتش نشانی رسید، جابه‌جایی پس‌ماند متناظر با آن Δ_p^i ، ظرفیت جابه‌جایی ماندگار پل در نظر گرفته می‌شود. در ضوابط طرح لرزه‌ای در تعدادی از آئین نامه‌ها، در صورت عدم ارضا ضابطه جابه‌جایی پس‌ماند امکان استفاده و تردد از روی پل بعد از زلزله را نمی‌دهد اما در این تحقیق این ضابطه عددی به یک نمودار تبدیل شده و در سطوح مختلف شدت زلزله، این مقدار حدی محاسبه می‌شود.

۳- آثار ناپودی مقاومت و کاهش سختی روی مشخصات مفاصل پلاستیک بتنی

هنگامی که سازه‌های بتنی در معرض زلزله‌های شدید قرار می‌گیرند به تناسب بار لرزه‌ای وارد شده در آنها مفاصل پلاستیک ایجاد می‌شود. تعریف مفاصل پلاستیک بتنی در اعضای بتن مسلح با استفاده از آئین‌نامه ASCE-SEI41-23 [۱۸] صورت می‌گیرد. در

شکل ۴. تغییر مشخصات مفاصل پلاستیک، کاهش سختی و مقاومت پایه بتنی پس از زلزله اولیه

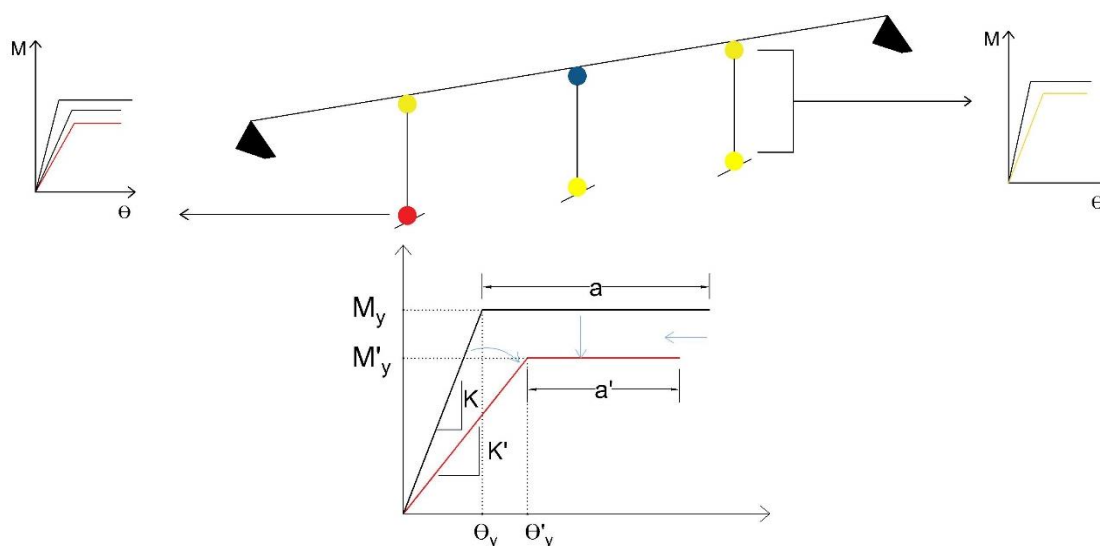


Fig. 4. Plastic hinge properties change including strength and stiffness reduction of the bridge pier after the primary ground shaking.

کاهش سختی و مقاومت دیوارهای بتنی در سطوح مختلف آسیب ناشی از زلزله با ضرایب کاهنده بیان می‌شود. سطوح آسیب کم، متوسط و سنگین تقسیم می‌شود. سطح آسیب قابل صرف‌نظر برای دیوارهای لاغر دارای عملکرد خمشی مربوط به زمانی است که

برای تغییر مشخصات سختی و مقاومت اعضا بتنی پل پس از آسیب اولیه آیین‌نامه خاصی وجود ندارد، تنها FEMA 306 و FEMA 307 برای دیوارهای بتنی و آجری آسیب دیده، توصیه‌هایی در این خصوص انجام داده است [21 و 22]. در این آیین‌نامه‌ها،

در این روابط λ_k ضریب کاهش سختی، λ_q ضریب کاهش مقاومت، θ_y دوران تسلیم و θ_u دوران نهایی و θ دوران تقاضا در پایه است. شکل ۵. منحنی ضریب کاهش سختی و مقاومت بر اساس تقاضای شکل پذیری دوران [26-23]

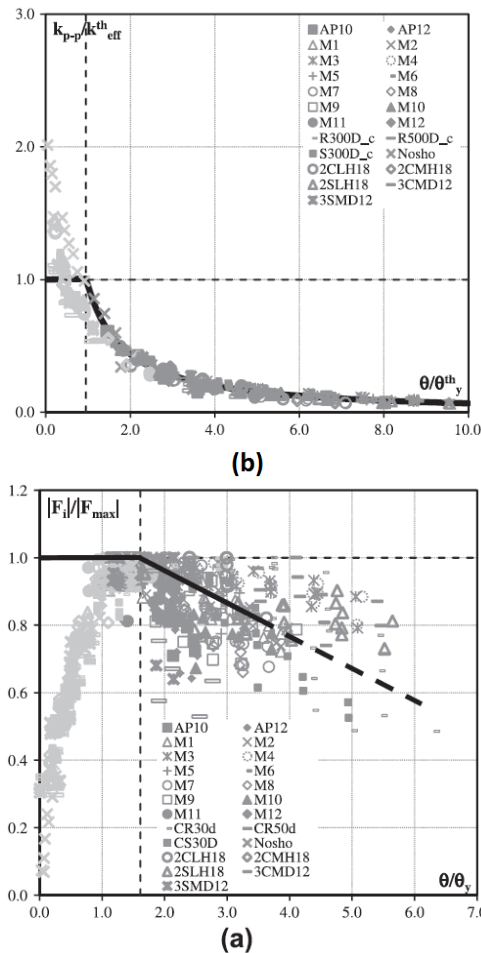


Fig. 5. The curve of the coefficient of strength and stiffness reduction according to the rotational ductility demand.

$$\lambda_k = 1.0 \quad \text{for} \quad \theta / \theta_y \leq 1.0 \quad (10)$$

$$\lambda_k = 1 - [1.01 - 0.96(\theta / \theta_y)^{-1.10}] \quad \text{for} \quad 1.0 \leq \theta / \theta_y \leq \theta / \theta_u \quad (11)$$

$$\lambda_q = 1.0 \quad \text{for} \quad \theta / \theta_y \leq 1.6 \quad (12)$$

$$\lambda_q = 1 - 0.10(\theta / \theta_y - 1.6) \quad \text{for} \quad 1.6 \leq \theta / \theta_y \leq \theta / \theta_u \quad (13)$$

نسبت‌های ابعادی مختلف و به دنبال آن دارای زمان تناوب‌های متفاوت هستند. پایه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که دارای عملکرد خمشی بوده و در آنها از تغییر شکل‌های برشی صرف‌نظر می‌شود. در

تقاضای شکل‌پذیری زلزله μ_D زیر ۳ است. سطح آسیب کم، مربوط به زمانی است که تقاضای شکل‌پذیری بین ۴ تا ۸ است. سطح آسیب متوسط مربوط به زمانی است که تقاضای شکل‌پذیری بین ۳ تا ۱۰ است. در این دستورالعمل مقادیر فاکتورهای کاهش مقاومت λ_q ، سختی λ_k و جابه‌جایی ماندگار λ_D را در سطوح مختلف آسیب بر اساس تقاضای شکل‌پذیری برای ستون خمشی لاغر نشان داده شده است. برای اعضای بتنی پس از خرابی و آسیب، مشخصات مفصل، شامل سختی و مقاومت عضو کاهش می‌یابد. شکل (۴) مشخصات منحنی ممان-دوران تغییر یافته را نشان می‌دهد و با توجه به آن سختی k' ، مقاومت تسلیم M'_y و دوران پلاستیک سازه آسیب دیده با روابط ۸ و ۹ اصلاح می‌شود.

$$K' = \lambda_k K \quad (8)$$

$$M'_y = \lambda_q M_y \quad (9)$$

در این روابط K سختی اولیه، M_y ممان تسلیم یا مقاومت اولیه و a دوران پلاستیک اولیه و K' سختی سازه آسیب دیده، M'_y ممان تسلیم یا مقاومت سازه آسیب‌دیده و a' دوران پلاستیک سازه آسیب دیده است. در این تحقیق به جای استفاده از نتایج تقریبی آیین‌نامه FEMA برای اعمال کاهش سختی و مقاومت به پایه‌های پل آسیب دیده، از نتایج آزمایش ۲۳ نمونه ستون بتنی انتخاب در شکل (۵) استفاده شده است.

منحنی و پوش استخراج شده از نتایج آزمایش‌های سیکلی گردآوری شده در شکل (۵) برای محاسبه ضریب کاهش سختی و مقاومت بر اساس شکل‌پذیری مرتبط با هر گام در تحلیل دینامیکی افزاینده، استفاده می‌شود. در برنامه تحلیل دینامیکی افزاینده برای محاسبه ظرفیت جابه‌جایی ماندگار از روابط ۱۰ تا ۱۳ استفاده می‌شود.

۴- مدل‌سازی و نمونه عددی

پایه‌های انتخاب شده بر اساس آیین‌نامه AASHTO طراحی و بر اساس آیین‌نامه Caltrans کنترل لرزه‌ای شده‌اند. پایه‌های پل دارای

هرچه دقیق‌تر ویژگی شتاب‌نگاشت‌ها را منعکس کند شاخص بهتری است و همچنین یکی از معیارهای مهم انتخاب شاخص شدت مناسب، پراکندگی منحنی‌های IDA است به عبارت دیگر شاخص شدتی مناسب است که پراکندگی کمتری را نشان می‌دهد [28-30]. در این تحقیق از PGA به عنوان شاخص شدت استفاده می‌شود. برای نمونه تاریخچه دریافت پایه پل در گام‌های 0.5g و 1g زلزله Los Gatos در شکل (۶) نمایش داده شده است. با انجام تحلیل دینامیکی در هر گام زمانی نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده را برای دریافت ماکزیمم و دریافت پس ماند می‌توان به صورت شکل (۷) رسم کرد و در هر گام دریافت مجاز پایه پل را محاسبه نمود.

شکل ۶. تاریخچه پاسخ جابه‌جایی پایه در شتاب 0.5g و 1g برای پایه با نسبت

ابعادی ۸

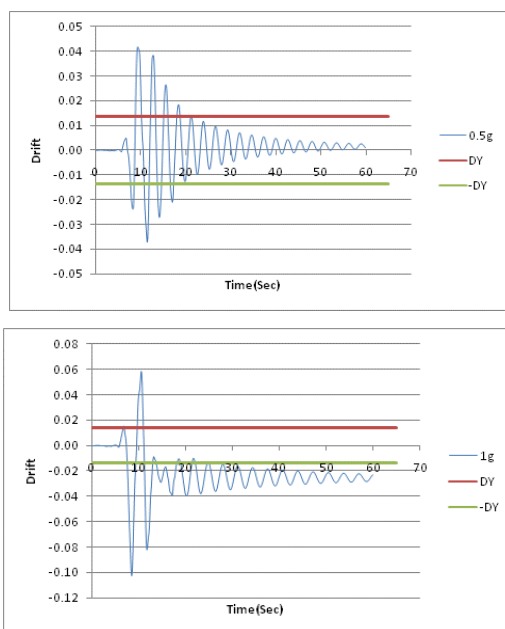


Fig. 6. The time history of the displacement bridge pier with an aspect ratio of 8 at 0.5g and 1.0g level of shaking.

شکل ۷. تغییرات دریافت ماکزیمم و پس ماند پایه پل با نسبت طول به قطر ۸

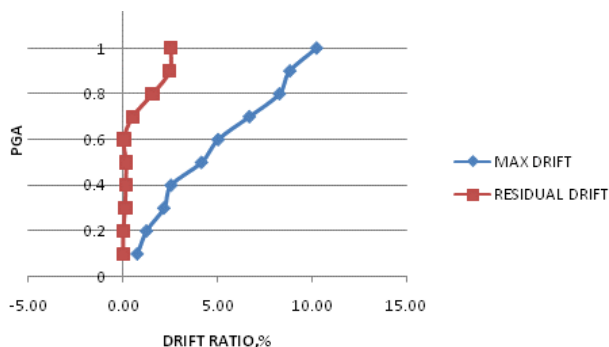


Fig. 7. Variation of the maximum drifts and residual drifts for the bridge pier with an aspect ratio of 8.

این راستا می‌توان پایه‌هایی با نسبت ابعادی مختلف انتخاب نمود. در این بخش ستونی با نسبت ابعادی ۸ با ارتفاع ۱۴/۶۳ متر و قطر دایره‌ای ۱/۸۳ متر و ۴۸ آرماتور ساینز ۳۲ میلی‌متر انتخاب شده است.

استفاده از المان‌های فایبر تیر-ستون مبتنی بر نیرو، به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی پلاستیسیته گسترده در طول ستون با استفاده از تنها یک المان و تعدادی نقاط انتگرال‌گیری برای مدل‌سازی پایه پل مورد استفاده قرار گرفته است ولی حساسیت این روش به پارامترهای مدل‌سازی و مدل‌های رفتاری مصالح باعث شده است تا برآورد تقاضای لرزه‌ای جابه‌جایی پس ماند در این روش مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار باشد. جزئیات مدل‌سازی پایه پل و پارامترهای مهم آن بصورت مبسوط در مرجع شماره [27] از نویسندگان همین مقاله آمده است اما در اینجا به اختصار نتایج آن ذکر می‌شود. برای مدل‌سازی پایه از ۱۵ المان تیر-ستون غیرخطی با پلاستیسیته گسترده و تعداد ۵ نقطه انتگرال‌گیری در هر المان در نرم افزار opensees استفاده شده است. برای شبیه‌سازی مقطع دایره‌ای از ۲۵۲ فایبر برای مدل‌سازی بتن پوسته، بتن هسته و میلگردهای طولی استفاده شده است. برای بتن پوسته از مدل Concrete02، برای بتن هسته از Concrete with Sitr و برای میلگردهای طولی از مدل Reinforcing Steel استفاده شده است. در مدل‌سازی بتن هسته انتخاب کرنش بارگذاری مجدد در مدل Concrete With Sitr که بر اساس مدل رفتاری Stanton-McNiven می‌باشد، بسیار مهم است که در این تحقیق پس از کالیبره کردن مدل ۰,۳ در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱- محاسبه ظرفیت دریافت پس ماند براساس ظرفیت ممان

پلاستیک پایه پل

همانطور که پیشتر گفته شد تحلیل دینامیکی در هر گام زمانی با فواصل شتابی 0.1g انجام می‌شود. در این قسمت از زلزله Loma Prieta در سال ۱۹۸۹ در ایستگاه Los Gatos با بزرگی ۷ ریشتر با فاصله ۳,۵ کیلومتر از رومرکز و مولفه عمود بر گسل با بیشینه شتاب ۰,۴ متر بر مجزور ثانیه برای تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود.

شاخصی که اثر یک زلزله را در یک مدل سازه‌ای به صورت کمی بیان می‌کند شاخص شدت نامیده می‌شود عملکرد یک شاخص شدت مناسب ایجاد ارتباط میان مراحل تحلیل خطر و تحلیل تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد معیار انتخاب شاخص شدت به نحوی است که آثار شتاب‌نگاشت‌های انتخابی را به شکل کامل‌تری منعکس کند یعنی

شده است و مقادیر محاسبه شده هنوز ظرفیت جابه‌جایی ماندگار نیستند و در ادامه شرط دوم که محاسبه ظرفیت جابه‌جایی ماندگار بر اساس دوران است باید کنترل شود. کمترین ظرفیت جابه‌جایی ماندگار، جابه‌جایی محاسبه شده در دو مرحله است. با توجه به اینکه در قسمت قبل، ظرفیت جابه‌جایی ماندگار برای پایه‌ای با نسبت ابعادی ۸ و در زلزله Los Gatos بدست آمد، برای تعمیم روش پیشنهادی، می‌توان محاسبات بالا را برای پایه‌هایی با نسبت ابعادی ۶، ۱۰ و ۱۲ در سایر زلزله‌های انتخاب شده نزدیک گسل تکرار کرد.

۴-۲- کنترل ظرفیت پس‌ماند بر اساس ظرفیت دوران رزرو یا

باقیمانده

در ۴-۱ به محاسبه ظرفیت دررفت پس‌ماند بر اساس ظرفیت ممان ذخیره پرداخته شد. در تعدادی از پایه‌ها این ضابطه کنترل می‌شود، لیکن برای محاسبه ظرفیت باید علاوه بر کنترل بار زنده اعمالی و محاسبه ظرفیت جابه‌جایی پس‌ماند بر اساس آن، ضابطه دوران نیز کنترل شود. تقاضای دوران پایه پل در سطوح مختلف زلزله بر اساس رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\theta_i = \theta_{residual}^i + \delta\theta_i \quad (14)$$

در رابطه فوق $\theta_{residual}^i$ دوران پس‌ماند لرزه‌ای در هر گام شتابی و $\delta\theta_i$ ظرفیت رزرو دوران برای بارهای زنده بعدی و θ_i تقاضای نهایی دوران پایه پل است. ظرفیت دوران رزرو $\delta\theta_i$ به طور مستقیم از روی $\delta\Delta_i$ (بدست آمده از رابطه ۵) محاسبه می‌شود در صورتی که پس از زلزله ستون به حالت تسلیم برسد این فرض برای سطوح بالای زلزله که عمدتاً دارای جابه‌جایی پس‌ماند هستند، فرض درستی است.

$$\delta\theta_i = \frac{\delta\Delta_i}{L_p - \frac{L_p}{2}} \quad (15)$$

در فرمول فوق L_p طول مفصل پلاستیک ستون است. معادله فوق فرض می‌کند هنگامی که ستون تسلیم می‌شود، طول مفصل پلاستیک ثابت می‌ماند و انحنا در طول مفصل پلاستیک تغییر نمی‌کند. اگر ظرفیت دورانی از تقاضای دورانی بیشتر باشد ($\theta_i \leq \theta_p$)، بار زنده محاسبه شده در قسمت قبل و دررفت پس‌ماند معادل آن ملاک کنترل خواهد بود، در غیر این صورت

پس از این مرحله می‌توان با استفاده از رابطه ۷ نمودار بار مجاز عبوری در برابر دررفت ماندگار را رسم نمود. شکل (۸) بار زنده مجاز عبوری از روی پل را با توجه به مقادیر دررفت پس‌ماند، در سطوح مختلف زلزله نشان می‌دهد محل تقاطع بار ماشین آتش‌نشانی با نمودار موجود، ظرفیت دررفت پایه مفروض را در زلزله مفروض نشان می‌دهد. شکل زیر برای محاسبه ظرفیت جابه‌جایی ماندگار، برای پایه با نسبت ابعادی ۸ و در زلزله Los Gatos رسم شده است.

شکل ۸ بار زنده مجاز عبوری از پل در دررفت های پس‌ماند مختلف در پایه با نسبت ابعادی ۸ و زلزله Los Gatos (بدون خروج از مرکزی و با خروج از مرکزی بار)

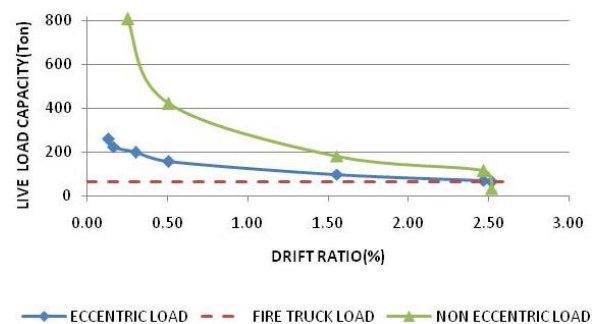


Fig. 8. The allowable moving load on the bridge for different residual displacements of the pier with an aspect ratio of 8 and exposed to Los Gatos ground motion (with and without the eccentricity of the load).

در صورت در نظر گرفتن خروج از مرکزیت (e) برای بار عبوری از روی پل، مطابق شکل (۸) بار زنده مجاز عبوری از روی پل کاهش می‌یابد. با توجه به مشخصات پل‌های طراحی شده و در نظر گرفتن خروج از مرکزیت تقریبی ۱۸ فوت (۵/۵ متر)، مطابق روش شرح داده شده در بالا برای محاسبه بار زنده مجاز عبوری، مجدداً محاسبات تکرار می‌شود. شکل (۸) بار زنده مجاز عبوری از روی پل را برای دو حالت، بدون در نظر گرفتن خروج از مرکزی و با در نظر گرفتن خروج از مرکزی نشان می‌دهد.

شکل (۸) نشان می‌دهد که در سطوح بالای زلزله، بار مجاز عبوری از روی پل، به بار معیار دو ماشین آتش‌نشانی رسیده است و به عبارتی پل به ظرفیت نهایی خود در دررفت ۲/۵ درصد رسیده است. در این شکل بار زنده مجاز عبوری از روی پل با در نظر گرفتن خروج از مرکزیت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت لحاظ کردن خروج از مرکزیت، پل در دررفت حدود ۲ درصد به ظرفیت نهایی رسیده است. ذکر این نکته ضروری است که ظرفیت جابه‌جایی ماندگار پل تاکنون به صورت نیرویی محاسبه

نتایج برای پایه با نسبت ابعادی ۸ نشان می‌دهد در سطوح بالای زلزله میزان تقاضای نهایی دوران مقطع زیاد است و در سطح زلزله ۰.۸g، این تقاضا با ظرفیت دورانی مقطع برابری می‌کند. تغییرات نشان می‌دهد، در سطح زلزله مورد نظر جابه‌جایی پس‌ماند متناظر با ظرفیت دورانی مقطع همان ظرفیت جابه‌جایی ماندگار پایه پل خواهد بود. شکل (۱۱) تغییرات تقاضای دوران نهایی پایه پل را در برابر تغییرات جابه‌جایی پس‌ماند منتج از تحلیل دینامیکی افزایشنده در سطوح مختلف زلزله نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد ظرفیت پس‌ماند پایه پل مورد نظر با نسبت ابعادی ۸، در زلزله معرفی شده حدود ۱/۷ درصد است.

شکل ۱۱. تغییرات تقاضای دوران پایه با نسبت ابعادی ۸ در سطوح مختلف زلزله Los Gatos و مقایسه آن با ظرفیت دورانی مقطع

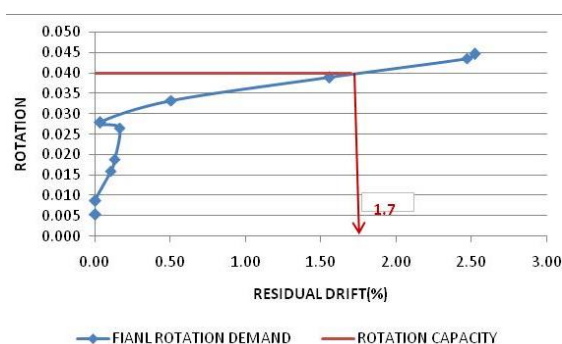


Fig. 11. Variation of rotational demand of the pier with an aspect ratio of 8 in different levels of Los Gatos ground motion and comparison with a rotational capacity of the section.

۵- نتیجه‌گیری

۱- برای محاسبه ظرفیت جابه‌جایی پس‌ماند (ظرفیت باربری ثقلی) پایه پل روش جدیدی بر مبنای تحلیل دینامیکی افزایشنده توسعه داده شده که با توجه به تقاضای شکل‌پذیری جابه‌جایی در هر گام شتابی با اصلاح خواص مفاصل و کاهش سختی و مقاومت قادر است تا ظرفیت باقیمانده پایه پل را بعد از آسیب زلزله اولیه تعیین نماید.

۲- در روش پیشنهادی اول با توجه به سطح زلزله اعمالی فاکتورهای کاهش ممان پلاستیک محاسبه می‌شود و بر اساس آن ظرفیت پس‌ماند پل تعیین می‌شود که برای کاربردهای مهندسی سریع و دارای دقت مناسبی است.

۳- در روش پیشنهادی دوم هر دو ضابطه کنترل ممان رزرو و دوران رزرو برای محاسبه ظرفیت دریافت پس‌ماند بکاربرده

ظرفیت دورانی ملاک محاسبه بار زنده مجاز و دریافت پس‌ماند خواهد بود. ظرفیت دورانی هر پایه θ_{cap} ، از جمع دوران تسلیم θ_y و دوران پلاستیک θ_p مطابق روابط ۱۶ تا ۱۸ قابل محاسبه است.

$$\theta_y = \frac{d_y}{h} = \frac{\phi_y h}{3} \quad (16)$$

$$\theta_p = L_p \times (\phi_u - \phi_y) \quad (17)$$

$$\theta_{cap} = \theta_y + \theta_p \quad (18)$$

اساس روابط محاسبه ظرفیت دورانی، مقادیر انحنا تسلیم و انحنا پلاستیک است که از آنالیز لنگر-انحنا مقطع با بار محوری مشخص بدست می‌آید. با توجه به بار محوری موجود با یک آنالیز لنگر-انحنا، دوران تسلیم و دوران نهایی قابل محاسبه است. شکل (۹) نتایج را برای پایه انتخابی نشان می‌دهد.

شکل ۹. نمودار ممان-انحنا مقاطع محصورشده بتن با نسبت‌های مختلف نیروی محوری

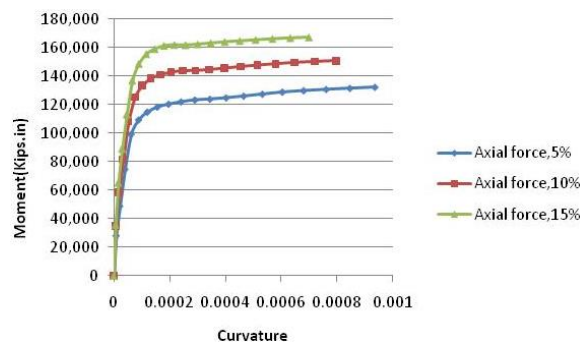


Fig. 9. The moment-curvature of the confined for different levels of loading

شکل (۱۰) تغییرات تقاضای دوران نهایی پایه پل در سطوح مختلف زلزله به همراه مقایسه آن با ظرفیت دوران مقطع پایه نشان داده شده است. ظرفیت دورانی مقطع بتنی بر اساس روابط ۱۶ تا ۱۸ محاسبه می‌شود.

شکل ۱۰. تغییرات تقاضای دوران نهایی پایه با نسبت ابعادی ۸ در سطوح مختلف زلزله Los Gatos و مقایسه آن با ظرفیت دورانی مقطع

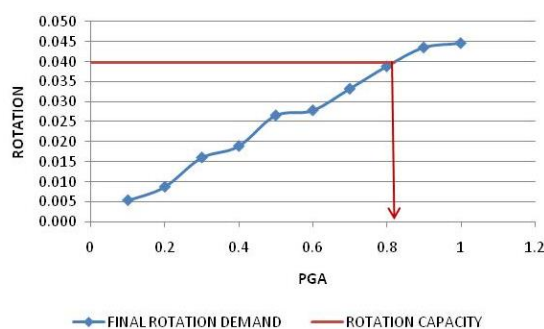


Fig. 10. Variation of the ultimate rotation demand of the bridge with an aspect ratio of 8 in different levels of Los Gatos ground shaking and comparison with the rotational capacity of the section.

- seismic design), 2017. Japan Road Association, Japan.
- [9] Rai, M., ElGawady, M.A. and Rodriguez-Marek, A., 2019. Probabilistic Seismic Demand Analysis of a Bridge with Unbonded, Post-Tensioned, Concrete-Filled, Fiber-Reinforced Polymer Tube Columns. *Fibers*, 7(3), p.23.
- [10] Li, X., Zhang, Z., Zhou, T., Xiao, Y. and Sun, Y., 2023. Hysteretic behavior of post-tensioned precast segmental CFT double-column piers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 22(3), pp.747-762
- [11] Ahmadi, E., Kocakaplan, S. and Kashani, M.M., 2022. Nonlinear seismic fragility analysis of a resilient precast post-tensioned segmental bridge pier. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(6), pp.823-841.
- [12] Shen, Y., Freddi, F., Li, Y. and Li, J., 2022. Parametric experimental investigation of unbonded post-tensioned reinforced concrete bridge piers under cyclic loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(15), pp.3479-3504.
- [13] Tarfan, S., Banazadeh, M. and Esteghamati, M.Z., 2019. Probabilistic seismic assessment of non-ductile RC buildings retrofitted using pre-tensioned aramid fiber reinforced polymer belts. *Composite Structures*, 208, pp.865-878.
- [14] RavanshadNia, H., Shakib, H., Ansari, M. and Safiey, A., 2022. The use of cost-benefit analysis in performance-based earthquake engineering of steel structures. *Earthquakes and Structures*, 22(6), pp.561-570.
- [15] Yamashita, R. and Sanders, D.H., 2009. Seismic Performance of Precast Unbonded Prestressed Concrete Columns. *Structural Journal*, 106(6), pp.821-830.
- [16] Kwan, W.P. and Billington, S.L., 2003. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. I: Monotonic and cyclic analyses. *Journal of Bridge Engineering*, 8(2), pp.92-101.
- [17] Sanada, Y., Maeda, M., Niousha, A. and Ghayamghamian, M.R., 2004. Reconnaissance Report on Building Damage Due to Bam Earthquake of 26 December 2003. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 5(4), pp.91-100
- [18] ASCE SEI 41-23. 2023. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, ASCE standard, published by the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [19] Das, P.K. and Dutta, S.C., 2002. Effect of strength and stiffness deterioration on seismic behaviour of R/C asymmetric buildings. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 7(2), pp.527-564.
- [20] Das, P.K. and Dutta, S.C., 2000. Controlling می‌شود. با توجه به اعمال کاهش سختی و مقاومت سازه آسیب دیده، این روش دقت بیشتری نسبت به روش اول دارد اما زمان تحلیل و محاسبه آن طولانی‌تر است.
- ۴- نتایج بررسی برای نمونه عددی نشان داد که دریفت مجاز ۱ درصد برای همه پل‌ها با ارتفاع و مقاطع مختلف نمی‌تواند دقیق باشد و نسبت به روش پیشنهادی دست‌بالا است. روش پیشنهادی بر اساس ظرفیت و دوران باقیمانده تخمین صحیح‌تری دارد و نشان داد که پایه پل گاهی می‌تواند دوران ۱/۷ درصد را تحمل کند بدون اینکه دچار فروریزش ثقلی شود.
- ۶- تشکر و قدردانی
- این مقاله با حمایت مالی دانشگاه بزرگمهر قائنات و با شماره طرح ۳۹۲۶۸ تهیه و ارسال شده است.
- ۷- منابع
- [1] Ansari, M., Ansari, M. and Safiey, A., 2018. Evaluation of seismic performance of mid-rise reinforced concrete frames subjected to far-field and near-field ground motions. *Earthquakes and Structures*, 15(5), pp.453-462.
- [2] Ansari, M., Pour, H.G. and Safiey, A., 2019. Seismic performance of mid-rise code-conforming X-braced steel frames. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 6(2), pp.279-29.
- [3] Ansari, M., Safiey, A. and Abbasi, M., 2020. Fragility-based performance evaluation of mid-rise reinforced concrete frames in near field and far field earthquakes. *Structural Engineering and Mechanics*, 76(6), pp.751-763.
- [4] Kawashima, K., 2000. Seismic design and retrofit of bridges. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), pp.265-285.
- [5] MacRae, G.A. and Kawashima, K., 1997. Post-earthquake residual displacements of bilinear oscillators. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(7), pp.701-716.
- [6] Ansari, M., Daneshjoo, F. and Mohammadi, M.S., 2017. On Estimation of Seismic Residual Displacements in Reinforced Concrete Single-Column Bridges Through Force-Displacement Method. *International Journal of Civil Engineering*, 15, pp.473-486.
- [7] Seismic Design Criteria V2.0, 2019. California Department of Transportation (Caltrans). Sacramento, CA, 116 pp.
- [8] Specification for Highway Bridges (Specification for

- reinforcement. Part II: Cyclic tests. *Engineering structures*, 30(9), pp.2289-2300.
- [26] Acun, B. and Sucuoglu, H., 2010. Performance of reinforced concrete columns designed for flexure under severe displacement cycles. *ACI Structural Journal*, 107(3), pp.364-371.
- [27] Ansari, M., Daneshjoo, F. and Mohammadi, M.S., 2017. On Estimation of Seismic Residual Displacements in Reinforced Concrete Single-Column Bridges Through Force-Displacement Method. *International Journal of Civil Engineering*, 15, pp.473-486.
- [28] Mahdavi, N., Ahmadi, H.R. and Mahdavi, H., 2012. A comparative study on conventional push-over analysis method and incremental dynamic analysis (IDA) approach. *Sci. Res. Essays*, 7(7), pp.751-773.
- [29] Ahmadi, H.R., Mahdavi, N. and Bayat, M., 2020. Applying adaptive pushover analysis to estimate incremental dynamic analysis curve. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 14(04), p.2050016.
- [30] Shafigh, A., Ahmadi, H.R. and Bayat, M., 2021. Seismic investigation of cyclic pushover method for regular reinforced concrete bridge. *Struct. Eng. Mech*, 78(1), pp.41-52.
- Deterioration of RC Asymmetric Buildings under Seismic Loadings. In: Proceedings of ICI-Asian Conference on Ecstasy in Concrete, 20-22 November, 2000, Bangalore, India, pp: 295-303.
- [21] FEMA 306. 1998. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings – basic procedures manual. *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- [22] FEMA 307. 1998. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings – technical resources. *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- [23] Di Ludovico, M., Verderame, G.M., Prota, A., Manfredi, G. and Cosenza, E., 2013. Experimental behavior of nonconforming RC columns with plain bars under constant axial load and biaxial bending. *Journal of Structural Engineering*, 139(6), pp.897-914.
- [24] Di Ludovico, M., Verderame, G.E.R.A.R.D.O., Prota, A., Manfredi, G. and Cosenza, E., 2009. Experimental investigation on non-conforming full scale RC columns. In *L'Ingegneria Sismica in Italia* (pp. ID-S02).
- [25] Verderame, G.M., Fabbrocino, G. and Manfredi, G., 2008. Seismic response of rc columns with smooth

Evaluation and improvement of the behavior of steel plate shear walls using steel-concrete stiffeners

Hadi Zarrintala¹, Ahmad Maleki^{2*} , Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin³

1. Ph.D. Student, School of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

Abstract

Steel shear walls have been used in various buildings as a system to resist lateral loads. The special advantage of this type of wall is its good malleability, high initial hardness, and high energy consumption power. But due to its special geometry, the steel shear wall undergoes buckling in the elastic range. To prevent steel sheet buckling in steel shear walls, there are two general solutions: using metal stiffeners or using concrete cover that is connected to steel sheet through shears. Based on this research, a solution has been proposed to improve the seismic performance of modern steel-concrete composite shear walls. The composite steel shear wall is a modern lateral bearing system consisting of a steel sheet with a reinforced concrete cover, which is connected to the sheet from one side or both sides by clips. In the composite steel shear wall, the reinforced concrete cover, by restraining the steel sheet and preventing its buckling, increases the shear capacity of the steel shear wall to the point of yielding in shearing inside the plate instead of tension in the direction of the tensile field. The composite steel shear wall, while increasing the shear capacity of the system, increases the resistance of the panel against destructive factors such as corrosion, fire, impact, explosion, and other cases and causes a reduction of more than 25 to 50 percent in the consumption of steel in medium and large buildings. In the new composite steel shear wall system, a distance is created between the concrete cover and the boundary beams and columns. Tests on conventional and modern composite steel shear walls show that the modern system has little damage compared to the conventional system. From nonlinear static analysis using the finite element method and with the help of ABAQUS software, the influence of the geometric characteristics of steel stiffeners on the seismic performance of the modern steel-concrete composite shear wall has been investigated. After modeling the steel-concrete composite shear wall and validating the numerical model with laboratory results, the effect of parameters such as the number of stiffeners, the type of arrangement, including vertical, horizontal, diagonal, and combined, on the maximum bearing capacity of the composite shear wall, ductility coefficient, additional strength, energy consumption, compressive damage of the concrete hardener, and failure modes have been investigated. The results of this research show that the use of T-shaped steel stiffeners and their arrangement have a significant effect on the bearing capacity of steel-concrete composite shear walls and cause the overall buckling of the steel sheet to become local buckling between the stiffeners. The use of diagonal stiffeners increases the capacity of steel shear walls by 25%. The ductility factor and added strength factor of the steel frame with diagonal stiffeners are about 26 and 124% higher than the ductility factor and added strength factor of the base sample without the use of stiffeners, respectively. The use of diagonal stiffeners in composite shear walls compared to composite shear walls without steel stiffeners increases energy consumption by about 18%. The use of T-shaped steel diagonal stiffeners in composite shear walls compared to composite shear walls without steel stiffeners causes a significant reduction in the damage and failure of the concrete stiffener.

Review History

Received: Mar 18, 2024

Revised: Aug 12, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

composite shear wall
T-shaped steel stiffener
concrete stiffener
finite element method

* Corresponding Author Email: A.maleki@iau-maragheh.ac.ir - ORCID: 0000-0002-4649-4347



ارزیابی و بهبود رفتار دیوارهای برشی صفحه فولادی با استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی - بتنی

هادی زرین طلا^۱، احمد ملکی^{۲*} ID، محمد علی لطف الهی یقین^۳

۱. دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران.

۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دیوارهای برشی فولادی در ساختمان‌های مختلف به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برتری ویژه این نوع دیوارها، قابلیت شکل‌پذیری مناسب، سختی اولیه بالا و قدرت استهلاک انرژی زیاد است و لیکن دیوار برشی فولادی به علت هندسه خاص خود، دچار کماتش در محدوده ارتجاعی می‌شود. برای جلوگیری از کماتش ورق فولادی در دیوارهای برشی فولادی دو راه‌حل کلی وجود دارد استفاده از سخت‌کننده‌های فلزی و یا بهره‌گرفتن از پوشش بتنی که از طریق برشگیرها به ورق فولادی متصل می‌شود. براین اساس، در تحقیق حاضر به ارائه راهکاری به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب نوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS، به بررسی تأثیر مشخصات هندسی سخت‌کننده‌های فولادی بر عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی مرکب نوین فولادی - بتنی پرداخته شده است. پس از مدل‌سازی دیوار برشی کامپوزیتی فولادی - بتنی و درستی آزمایشی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، اثر پارامترهایی مانند تعداد سخت‌کننده‌ها، نوع چیدمان شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی بیشترین ظرفیت باربری دیوار برشی مرکب، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، توزیع تنش و حالت‌های خرابی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی T شکل و چگونگی چیدمان آنها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری دیوارهای برشی کامپوزیت فولادی - بتنی دارد. استفاده از سخت‌کننده‌های مورب ظرفیت دیوارهای برشی فولادی را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. استفاده از سخت‌کننده‌های قطری T شکل فولادی در دیوارهای برشی کامپوزیت نسبت به دیوار برشی کامپوزیت بدون سخت‌کننده فولادی، باعث کاهش چشمگیر در آسیب سخت‌کننده بتنی و همچنین باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و استهلاک انرژی به ترتیب حدود ۲۶، ۱۲۴ و ۱۸ درصد می‌شود.

کلمات کلیدی

دیوار برشی کامپوزیت
سخت‌کننده فولادی T شکل
سخت‌کننده بتنی
روش المان محدود

۱- مقدمه

فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باعث ایجاد خطوط کشش قطری در صفحه فولادی می‌شود. به دنبال افزایش و توزیع یکنواخت‌تر این خطوط، ظرفیت برشی سیستم بهبود می‌یابد. استفاده از این ظرفیت

دیوارهای برشی فولادی یکی از سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر نیروهای جانبی است. در این نوع دیوار، کماتش خارج از صفحه ورق

* رایانامه نویسنده مسئول: A.maleki@iau-maragheh.ac.ir - ORCID: 0000-0002-4649-4347

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



با بهبود عملکرد، به دو شیوه کلی امکان‌پذیر است استفاده از شبکه‌های فلزی که به ورق فولادی متصل می‌شود و به عنوان سخت‌کننده به منظور تقویت جانبی دیوار برشی فولادی استفاده می‌شود یا استفاده از پوشش بتنی پیش‌ساخته یا درجا، برای به تأخیرانداختن کماتش که توسط برشگیرها به ورق فولادی متصل می‌شود. تبدیل دیوار برشی از نوع فولادی به مرکب باعث کاهش میزان تغییر مکان‌های جانبی یا به عبارت بهتر باعث افزایش سختی جانبی می‌شود. علت افزایش سختی جانبی در این سیستم، گسترش میدان کشش قطری و تأخیر در کماتش صفحه فولادی است. با افزایش ضخامت پوشش بتنی سختی دیوار برشی مرکب افزایش ولی با افزایش فاصله بین برشگیرها سختی کاهش می‌یابد [1]. دیوار برشی فولادی کامپوزیت یک سیستم نوین برابر جانبی و متشکل از یک ورق فولادی به همراه پوشش بتن آرمه است که این پوشش به یک سمت یا هر دو سمت آن توسط برش‌گیرهایی متصل شده است. در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتنی مسلح با مهار کردن ورق فولادی و جلوگیری از کماتش آن باعث افزایش ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی تا حد تسلیم برش شود [2]. در دیوار برشی فولادی، برش طبقه توسط عمل میدان کششی ورق فولادی بعد از کماتش ناشی از فشار قطری تحمل می‌شود اما در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتن آرمه ورق فولادی را مقید کرده و از کماتش آن قبل از تسلیم برشی داخل صفحه جلوگیری می‌کند. در نتیجه، ورق فولادی برش طبقه را با تسلیم برشی تحمل می‌نماید. ظرفیت تسلیم برشی ورق فولادی می‌تواند به اندازه قابل توجهی بیش از ظرفیت آن در مقابله با برش ناشی از تسلیم در اثر میدان کششی قطری باشد [3]. دیوار برشی فولادی کامپوزیت ضمن افزایش ظرفیت برشی سیستم، مقاومت پانل را در برابر عوامل مخرب مانند خوردگی، آتش‌سوزی، ضربه، انفجار و دیگر موارد افزایش داده و باعث کاهش بیش از ۲۵ تا ۵۰ درصدی در مصرف فولاد در ساختمان‌های میان و بلند مرتبه می‌شود [5]. کاربرد این نوع دیوار به دلیل سختی، مقاومت بالا، شکل‌پذیری عالی و رفتار مناسب در مقابل بارهای لرزه‌ای رو به افزایش است [5]. با حضور سخت‌کننده بتنی در سیستم دیوار برشی فولادی و استفاده از اتصالات مناسب بین ورق‌های فولادی و سخت‌کننده بتنی، کماتش خارج از صفحه ورق‌های فولادی محدودتر شده و ورق‌های فولادی به ظرفیت برشی کامل خود می‌رسند و عملکرد لرزه‌ای سیستم به شدت بهبود می‌یابد. در واقع در هر دو سیستم دیوار برشی فولادی و مرکب پدیده کماتش وجود خواهد داشت با این تفاوت که در دیوار برشی فولادی، کماتش به صورت کلی است و از

مقاومت ناحیه محدودی از سطح ورق فولادی استفاده می‌شود در حالی که در دیوار برشی مرکب، کماتش از حالت کلی به موضعی تبدیل می‌شود و بدین ترتیب از بیشترین مقاومت برشی صفحه‌های فولادی استفاده می‌شود. با وجود اجزاء مرزی متصل به پانل بتنی و تغییر شکل‌های ایجاد شده، نیروهای بسیار بزرگی ناشی از تنش‌های فشاری به صورت قطری باعث ایجاد کماتش کلی پانل بتنی خواهد شد که این موضوع باعث ترک‌خوردگی بتن و جدا شدن برشگیرها و در نهایت کماتش ورق فولادی قبل از مقاومت تسلیم می‌شود، بنابراین وجود یک درز در حدود ۵-۲/۵ سانتی‌متر در اطراف پانل بتنی می‌تواند این تنش‌ها را کاهش داده و بسیار کارآمد باشد. این اختلاف به ظاهر ساده نتایج مهمی در عملکرد سیستم، مانند افزایش شکل‌پذیری و کاهش تخریب در پی خواهد داشت [4, 6]. ژائو و آستانه اصل، مطالعاتی را به صورت تحلیلی و تجربی روی رفتار چرخه‌ای سیستم‌های دیوار برشی مرکب انجام دادند [7]. نتایج تجربی نشان داد که وجود رویه بتنی مسلح در یک طرف دیوار برشی فولادی که با بولت متصل شده است، از کماتش ورق فولادی جلوگیری می‌کند. همچنین در صورت تعبیه درز بین قاب و رویه بتنی، رفتاری پایدارتر حاصل شده و آسیب کمتری به رویه بتنی وارد می‌شود. طبق مطالعات ژائو و آستانه اصل [7]، یک راهنمای طراحی در آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا وجود دارد [8]. از زمان گنجاندن این سیستم در AISC آیین نامه طراحی لرزه‌ای آمریکا [9]، مطالعات مختلفی در مورد جنبه‌های مختلف دیوارهای برشی مرکب انجام شده است. حاتمی و رهایی به بررسی اثر فاصله برشگیرها و اثر تغییرات ضخامت پوشش بتنی در دیوارهای برشی مرکب در دو حالت با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده پرداختند [10]. آنها به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی دیوار برشی مرکب با ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم و با فاصله بین برشگیرها نسبت عکس دارد. شفایی و همکاران به این نتیجه رسیدند که ضخامت پانل بتن مسلح تأثیر مستقیم بر ظرفیت برشی و مقاومت نهایی در سیستم دیوار برشی مرکب می‌گذارد و در طراحی ضخامت ورق‌های فولادی بسیار موثر است [11]. رهنورد و همکاران به بررسی سختی جانبی سیستم دیوار برشی مرکب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که ورقه‌ای فولادی در دو طرف پانل بتنی قرار گیرد سختی بیشتر از حالتی است که ورق فولادی در یک طرف پانل بتنی قرار گیرد [12]. زانگ و همکاران عملکرد دیوار برشی های فولادی را با اضافه کردن پوشش‌های بتن مسلح روی صفحات فولادی پرکننده مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به تحقیقات آنها پوشش‌های بتنی مستعد جدا شدن از صفحات فولادی

استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدلسازی شده است و برای تأیید نتایج نرم افزار مقایسه‌ای با نتایج بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. در ادامه، جزئیات مدلسازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی یک نمونه دیوار آزمایشگاهی به منظور درستی آزمایی مدل ذکر شده و سپس به تحلیل دیوارهای مورد مطالعه در این تحقیق پرداخته می‌شود.

۲- مدل سازی عددی و درستی آزمایی با نمونه آزمایشگاهی

دیوار برشی آزمایشگاهی ژائو و آستانه اصل [7] به علت وجود بانک اطلاعات رفتاری آن، مناسب‌ترین گزینه برای مدلسازی المان محدود اولیه و تعیین فرضیات مدلسازی و ارزیابی دقت است. به همین لحاظ، برای درستی آزمایی مدل نرم‌افزاری از نمونه فوق استفاده شده [3] که نما و جزئیات آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

به دلیل چسبندگی ضعیف آنها می‌باشد [13]. با وجود تحقیقات قبلی، برای شناسایی دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر ارزیابی و بهبود عملکرد دیوارهای برشی صفحه فولادی با حضور همزمان سخت‌کننده‌های بتنی و فولادی T شکل، تحقیقات بیشتری لازم است. یکی از مباحث مهمی که نادیده گرفته می‌شود، استفاده تنها از سخت‌کننده بتنی در دیوار برشی صفحه فولادی (دیوار برشی کامپوزیت) بدون حضور سخت‌کننده‌های فولادی است. بر این اساس، در مقاله حاضر، به بررسی و ارزیابی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل روی دیوار برشی صفحه فولادی با سخت‌کننده بتنی به روش المان محدود پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا مجموعه‌ای از نمونه‌های دیوار برشی صفحه فولادی کامپوزیت با و بدون سخت‌کننده مدلسازی و تحلیل می‌شود. نتایج نمونه فاقد سخت‌کننده به عنوان نمونه پایه و مقایسه‌ای با نمونه‌های دارای سخت‌کننده در نظر گرفته شده است. مدل‌های عددی با

شکل ۱. (الف) نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی مرکب (ب) هندسه دیوار برشی مرکب فولادی با روکش بتنی متداول و نوین با لحاظ کردن فاصله بین پوشش بتنی و المان‌های مرزی مورد بررسی (ج) اجزای مختلف دیوار برشی مرکب فولادی-بتنی [7]

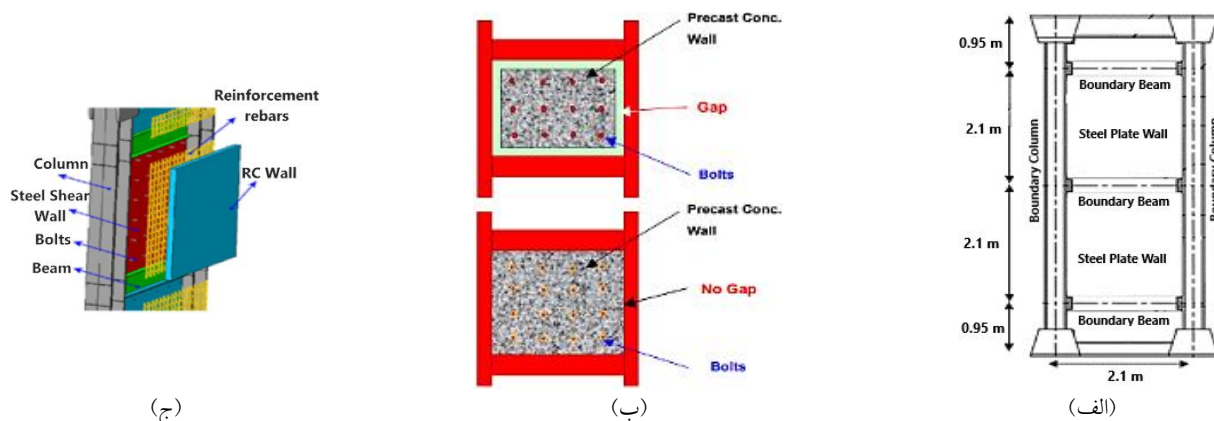


Fig. 1. (a) Laboratory sample of composite shear wall; (b) Geometry of steel composite shear wall with conventional and modern concrete coating, taking into account the distance between the concrete coating and the investigated boundary elements (c) Different components of a steel-concrete composite shear wall [7].

جدول ۱. ابعاد اجزای دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی (میلیمتر) [۷]

Steel Plate Thickness	Pre-cast R/C wall			Wall Bolts Dia.	Beam Section	Column Section
	Thickness of Conc. Wall	Rebar Dia.	Rebar Spacing			
4.8	76	10	100	13	W12×26	W12×120

Table 1. Dimensions of laboratory composite [7] shear wall components (mm)

جای المان سه‌بعدی Solid زمان تحلیل را بسیار کاهش می‌دهد. همچنین برای مدل کردن رویه بتنی از المان Solid استفاده شده است. استفاده از این المان امکان مدلسازی دقیق‌تر تماس با قاب اطراف و مشاهده تغییر شکل واقعی آن را بعد از تحلیل میسر می‌سازد. برای تعریف آرماتورهای درون بتن و بولت‌های برشگیر، این اجزا به صورت Wire که یک المان یک‌بعدی است مدل شده و به بولت‌ها

برای مدلسازی این دیوار برشی در نرم‌افزار از اطلاعاتی که در جدول (۱) آمده استفاده شده است. مشخصات بتن و فولاد مصرفی که در مدلسازی دیوار برشی مرکب آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته در جداول (۲ و ۳) آورده شده است. برای مدل کردن تیر و ستون و صفحه فلزی در محیط نرم‌افزار Abaqus [14] از المان دوبعدی Shell استفاده شده است. هر جا که امکان‌پذیر باشد، استفاده از این المان به

جدول ۲. مشخصات بتن مصرفی [۷]

Poisson's ratio	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	compressive strength (MPa)
0.17	24,900	2.6	28

Table 2. Characteristics of concrete used [7]

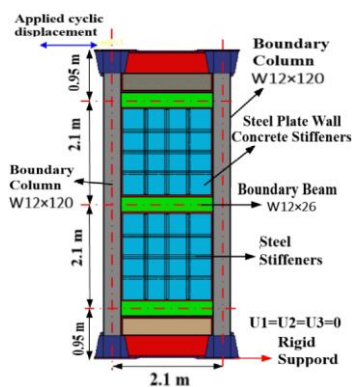
جدول ۳. مشخصات فولاد مصرفی [۷]

Poisson's ratio	Modulus of elasticity (MPa)	Yielding stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	components
0.3	200000	345	500	Beams and columns
0.3	140000	248	370	Steel Plates and stiffeners Rebars
0.3	200000	623	823	Bolts

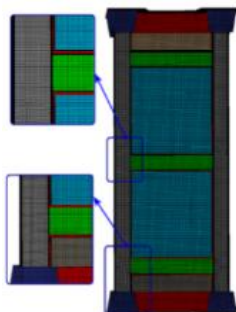
Table 3. Characteristics of used steel [7]

مدل‌های المان محدود اعمال شده است. در خصوص اجرای روکش بتنی بر روی دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده T شکل فولادی، لازم به توضیح است ابتدا اتصال جوشی سخت‌کننده‌های فولادی به ورق فولادی انجام و سپس ورق فولادی با سخت‌کننده‌های فولادی جوش شده به صورت افقی قرار گرفته و عمل بتن ریزی روی دیوار انجام می‌گیرد و بعد از خودگیری و سفت شدن بتن، مونتاژ ورق فولادی به صورت جوشی به المان‌های مرزی انجام می‌گیرد.

شکل ۲. (الف) مشخصات هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر قاب فولادی دارای سخت‌کننده فولادی (ب) نمونه‌ای از مدل مش‌بندی شده قاب فولادی بدون سخت‌کننده مجهز شده به دیوار برشی مرکب نوین ارائه شده توسط محقق



(الف)



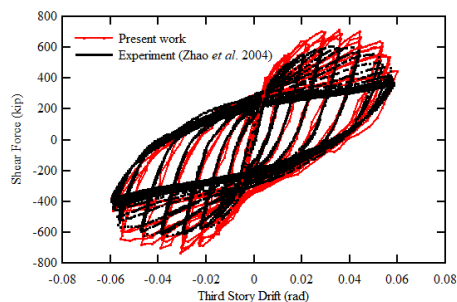
(ب)

Fig. 2. (a) Geometric specifications, boundary conditions, and applied loading on the steel frame with steel stiffeners; (b) An example of the meshed model of the steel frame without stiffeners equipped with a new composite shear wall provided by the researcher

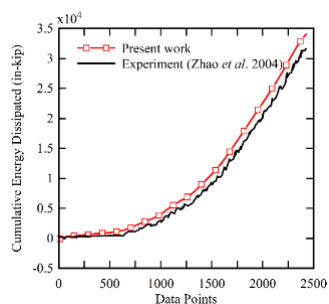
مقطع Beam با امکان خمش و به آرماتورها مقطع Truss فقط با امکان تغییر شکل طولی نسبت داده شده است. در بخش مونتاژ نرم‌افزار، تیر و ستون‌ها و صفحه فلزی به یکدیگر بسته (Merge) شدند تا به صورت یکپارچه عمل نمایند. برای هماهنگ کردن شرایط مرزی مدل ساخته شده در نرم‌افزار با نمونه آزمایشگاهی، در پای ستون‌ها جابه‌جایی در هر سه جهت انتقالی بسته شد [14] و در بالای دیوار جابه‌جایی در راستای افقی در صفحه دیوار آزاد شد. در شکل (۲-الف) مشخصات هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری نمونه به صورت اعمال جابه‌جایی افقی بر قاب فولادی دارای سخت‌کننده دیوار برشی مرکب جدید و در شکل (۲-ب) مدل مش‌بندی شده دیوار برشی آزمایشگاهی در تحقیق حاضر نشان داده شده است. این مدل نهایی است که پس از بررسی کردن همگرایی نتایج تحلیل حرکت جانبی دیوار با ریزتر کردن تدریجی ابعاد المان‌ها به دست آمده است. به دلیل قرار گرفتن سخت‌کننده‌ها و برشگیرهای فولادی داخل بتن برای در نظر گرفتن اندرکنش بتن و قطعات فولادی از روش Embedded region و برای جلوگیری از فرو رفتن قطعات فولادی در داخل بتن به علت تغییر شکل‌های سازه‌ای از اندرکنش تماس سخت (Hard Contact) استفاده شده است. ابعاد تمام المان‌ها در قسمتهای مختلف دیوار برشی برابر ۵ میلی‌متر است. تعداد المان رویه بتنی ۳۱۲۳۸، صفحه فلزی ۱۷۴۵۵، تیرها ۱۴۰۷۶، سخت‌کننده ۲۲۹۷ و ستون‌ها ۳۰۳۲۴ است. در شکل (۳) پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمالی ATC-24 بر قاب‌های فولادی مجهز به دیوار برشی مرکب نشان داده شده است [7, 17]. با اعمال این بارگذاری چرخه‌ای به طبقه بالای قاب فولادی تحت بررسی، منحنی‌های پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای استخراج شده و تأثیر پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. بارگذاری شامل بارگذاری جانبی در بالای ستون در طبقه آخر می‌باشد که در مدل المان محدود استفاده شده است. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر اساس نمونه‌های آزمایش [14, 16] و نوع بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان به

همچنین، بیشترین انرژی جذب شده به دست آمده از شبیه‌سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر 3.4 kip.in و 3.2 kip.in می‌باشد که در حدود ۶ درصد خطا دارد.

شکل ۵. (الف) مقایسه منحنی هیستریزس به دست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی (ب) منحنی انرژی جذب شده بدست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی [7]



(الف)

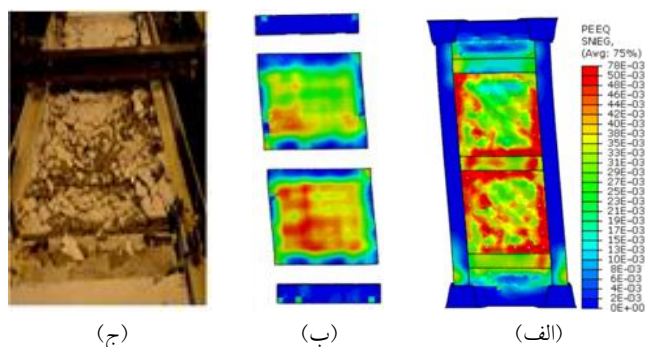


(ب)

Fig. 5. (a) Comparison of the hysteresis curve obtained from the present research and laboratory tests (b) Absorbed energy curve obtained from the present research and laboratory tests [7]

در شکل (الف و ب) به ترتیب تنش تسلیم قاب فولادی و خرابی سخت کننده بتنی مدل المان محدود، و در شکل (ج) خرابی نمونه آزمایشگاهی مدل ژائو و آستانه اصل را نشان داده شده است.

شکل ۶. مقایسه سازوکار خرابی (الف) و (ب) به دست آمده از تحقیق حاضر و (ج) تست آزمایشگاهی ژائو و همکاران [7]



(ج)

(ب)

(الف)

Fig. 6. Comparison of the failure mechanism (a) and (b) obtained from the present research and (c) laboratory test by Zhao et al [7]

شکل ۳. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمالی بر قاب‌های فولادی مجهز به دیوار برشی مرکب تحت بررسی [7, 17]

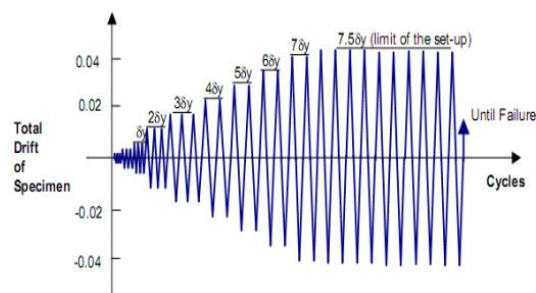


Fig. 3. Cyclic loading protocol applied to steel frames equipped with composite shear walls under investigation [7, 17]

یکی از اهداف اصلی تحقیق بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب است. براین اساس، هندسه‌های مختلفی برای سخت‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است که در شکل (۴) هندسه برخی از این نمونه‌ها نشان داده شده است.

شکل ۴. مشخصات هندسه‌ی سخت‌کننده‌های فولادی و بتنی مورد استفاده در تحقیق حاضر

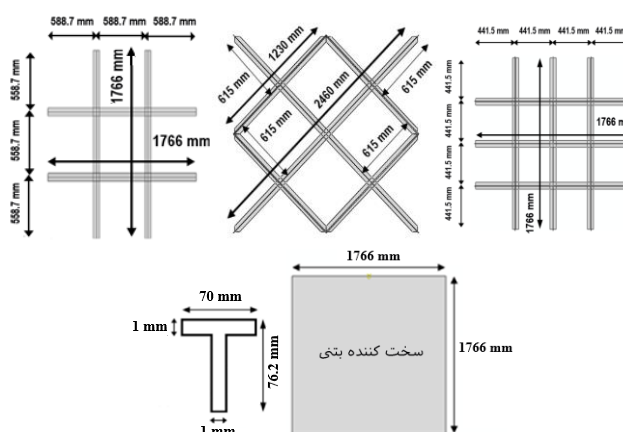


Fig. 4. Geometry specifications of steel and concrete stiffeners used in this research

شکل (۵ الف) مقایسه منحنی هیستریزس به دست آمده از تحقیق حاضر و تست‌های آزمایشگاهی مدل دیوار برشی مرکب ژائو و آستانه اصل [7] را نشان می‌دهد. در این شکل دقت و سازگاری مدل المان محدود و در شکل (۵ ب) منحنی انرژی جذب شده در طی بارگذاری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطای بین مدل عددی ارائه شده در تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع [7] برای بیشترین نیرو و بیشترین جذب انرژی کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد [3]. بیشترین نیروی به دست آمده از شبیه‌سازی تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع به ترتیب برابر 705 kip و 620 kip می‌باشد که در حدود ۱۳ درصد خطا دارد.

بتواند بینشی جامعی از رفتار این دیوارها بدست آورد. دسته‌بندی بکار رفته برای مدل‌های ساخته شده شامل موارد زیر است که در شکل (۷) مشخصات هندسی تعدادی از قاب‌های مورد مطالعه نشان داده شده است:

۱- دیواره برشی فولادی بدون سخت‌کننده (CSPSW-NS): این مدل همان نمونه اعتبار سنجی است و به عنوان مدل پایه انتخاب شده که در شکل (۷ الف) نشان داده شده است.

۲- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده افقی (CSPSW-0VnH): این مدل شامل n سخت‌کننده افقی است. که n شامل تعداد سخت‌کننده می‌باشد، که از ۱ تا ۳ است، و حروف V و H به ترتیب نشان دهنده جهت قائم و افقی می‌باشند. یعنی این مدل‌ها فقط دارای سخت‌کننده افقی هستند. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ب) آورده شده است.

۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده عمودی (CSPSW-mV0H): این مدل شامل m سخت‌کننده عمودی می‌باشد که از ۱ تا ۳ است، یعنی این مدل‌ها فقط دارای سخت‌کننده قائم هستند. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ پ) نشان داده شده است.

۴- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت‌کننده افقی و عمودی (CSPSW-mVnH): این مدل شامل n و m سخت‌کننده‌های افقی و عمودی است. که n و m شامل تعداد سخت‌کننده‌ها می‌باشد که از ۱ تا ۳ است. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ت) به تصویر کشیده شده است.

۵- دیواره برشی فولادی کامپوزیت با سخت‌کننده مورب (CSPSW-kD): این مدل شامل k سخت‌کننده مورب است، که k شامل تعداد سخت‌کننده‌ها می‌باشد، که از ۱ تا ۳ است، و حرف D نشان دهنده جهت مورب می‌باشد. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۷ ث) آورده شده است.

۶- دیوار برشی فولادی کامپوزیت با ترکیبی از سخت‌کننده افقی، عمودی و مورب (CSPSW-1D1V1H): این مدل شامل یک سخت‌کننده مورب، یک عمودی و یک افقی است که در شکل (۷ ج) نشان داده شده است.

با مقایسه مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی در شکل‌های (۶ و ۵) می‌توان گفت که مدل المان محدود دیوار برشی مرکب بادقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند. شکل (۶ الف) نواحی که قسمت‌های فولادی دیوار برشی به حد تسلیم رسیده و خرابی اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد و در شکل (۶ ب) خرابی پانل بتنی به تصویر کشیده شده که در طبقات اول و دوم این خرابی به‌وضوح دیده می‌شود که ناشی از کمانش خارج از صفحه ورق فولادی است و باعث خرابی کلی در دیوار بتونی شده است. شکل (۶ ج) خرابی نمونه آزمایشگاهی را در دریافت ۴/۴ درصد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خرابی قسمت‌های زیادی از سخت‌کننده بتنی به همراه ورق فولادی و نواحی از تیرهای قاب فولادی به تصویر کشیده شده است. با اضافه کردن سخت‌کننده‌های فولادی می‌توان به اندازه زیادی از آسیب پانل بتنی جلوگیری کرد. باتوجه به شکل مذکور، مدل المان محدود دیوار برشی مرکب، با دقت خوبی نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند.

۳- مطالعه پارامتری

۳-۱- اطلاعات پارامتری

بعد از مدل‌سازی المان محدود و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی، برای بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل در دیوار برشی مرکب مدل‌های جدیدی ایجاد شدند. متغیرها متشکل از تعداد و چیدمان سخت‌کننده‌های فولادی T شکل که به‌صورت عمودی، افقی، مورب و ترکیبی که با مجموع ۲۰ مدل عددی که در جدول (۴) نشان داده شده است به ورق متصل شدند بررسی و با مدل پایه (بدون سخت‌کننده) مقایسه شده است. برای مطالعات پارامتریک، شش دسته بندی برای استفاده از سخت‌کننده‌های T شکل با استفاده از روش المان محدود انتخاب و مدل‌سازی شده است. مدل‌های المان محدود مطالعات پارامتریک بر اساس نمونه آزمایش تست شده توسط ژائو و آستانه اصل [7] توسعه داده شده‌اند. این بخش سعی دارد با بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی، رفتار و عملکرد CSPSW با سخت‌کننده‌های فولادی T شکل را مطالعه کرده تا

جدول ۴. پارامترهای هندسی و حداکثر ظرفیت باربری مدل‌های پارامتری

Strategies	Models	Type and number of stiffeners			Max Load (kN)	Improve (%)
-	CSPSW-NS	-	-	-	2810	Basic Model
(I)	CSPSW-0V1H	1	-	-	2924	4.01
	CSPSW-0V2H	2	-	-	2974	5.84
	CSPSW-0V3H	3	-	-	3004	6.90
(II)	CSPSW-1V0H	-	1	-	2898	3.13
	CSPSW-2V0H	-	2	-	2954	5.12
	CSPSW-3V0H	-	3	-	2978	5.98
(III)	CSPSW-1V1H	1	1	-	2970	5.70
	CSPSW-1V2H	2	1	-	3023	7.58
	CSPSW-1V3H	3	1	-	3059	8.86
	CSPSW-2V1H	1	2	-	3026	7.69
	CSPSW-2V2H	2	2	-	3091	10
	CSPSW-2V3H	3	2	-	3059	8.86
	CSPSW-3V1H	1	3	-	3067	9.14
	CSPSW-3V2H	2	3	-	3142	11.81
	CSPSW-3V3H	3	3	-	3188	13.45
(IV)	CSPSW-1D	-	-	1	3336	18.71
	CSPSW-2D	-	-	2	3297	17.33
	CSPSW-3D	-	-	3	3516	25.12
(V)	CSPSW-1D1V1H	1	1	1	3426	21.92

Table 4. Geometric parameters and maximum load capacity of parametric models

شکل ۷. مشخصات هندسی تعدادی از قاب‌های مورد مطالعه



Fig. 7. Geometric characteristics of a number of studied frames

دسته بندی (I) در مدل‌های بهبود یافته این دسته بندی رفتار یکنواختی مشابه مدل CSPSW-NS دیده می‌شود و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن‌ها مطابق جدول (۴) مشاهده نمی‌شود. میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی، نسبت به مدل پایه ۴/۰۱ درصد تا ۶/۹ درصد است که میانگین مقدار نیروی برشی پایه برای این حالت استراتژی معادل ۵/۸ درصد می‌باشد.

با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتری برای شکل (۸ ب) دسته‌بندی (II)، رفتار یکنواختی مشابه مدل پایه است و تغییرات قابل توجهی در ظرفیت آن‌ها مطابق جدول (۴) مشاهده نمی‌شود، و میزان ماکزیمم افزایش نیروی برشی نسبت به مدل پایه ۳/۱۳ درصد تا ۵/۹۸ درصد است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۴/۷۴ درصد است. با توجه به شکل (۸ الف و ب)،

نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک مدل‌های المان محدود تحت پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج شامل تاثیر سخت‌کننده‌ها بر شکل پذیری قاب فولادی، استهلاک انرژی، بررسی آسیب فشاری بر پانل بتنی و حالت‌های شکست است. در ادامه، نتایج مورد بحث قرار گرفته و استراتژی‌های در نظر گرفته شده با مدل اصلی مقایسه می‌شوند.

۳-۲- نتایج تحلیل

۳-۲-۱- رفتار دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده فولادی-بتنی

در شکل (۸ تا ۱۰)، منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های المان محدود ارائه شده و مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه انجام شده است. با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های پارامتری در شکل (۸ الف)

مقاطع به دیوار برشی فولادی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۵ درصد افزایش نشان می‌دهد [18]. همچنین نتایج آزمایشگاهی وانگ در صورت استفاده از دیوار برشی کامپوزیت به جای دیوار برشی بتنی، بیشترین ظرفیت باربری ۱۰۶ درصد افزایش نشان می‌دهد [19]. با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل (۱۰) افزایش نیرو نسبت به مدل‌های قبلی بیشتر می‌باشد.

شکل ۹. نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های دسته بندی (III)

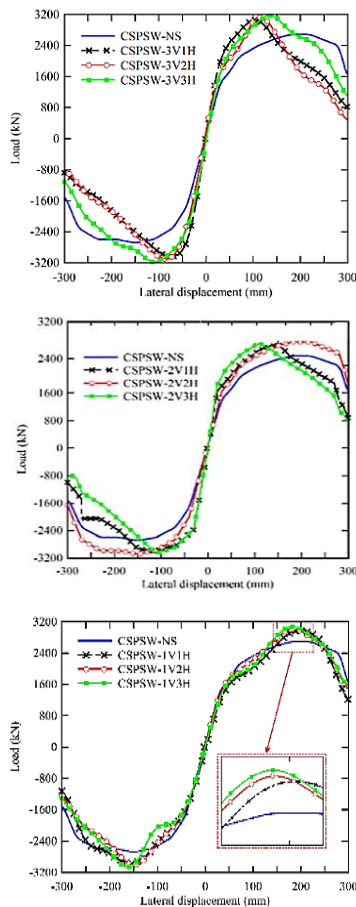


Fig. 9. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (III)

شکل ۱۰: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های دسته بندی (IV)

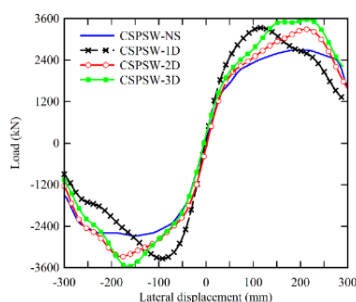
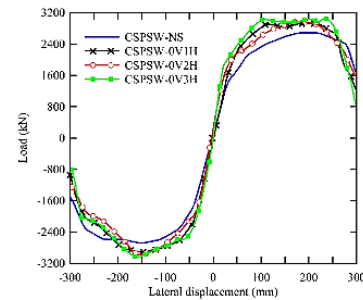


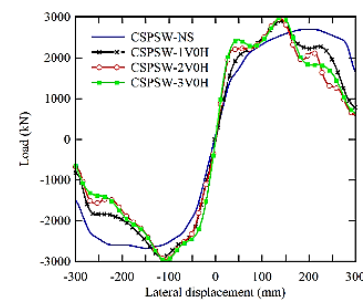
Fig. 10. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (IV)

شکل ۸: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای (الف) مدل‌های دسته بندی

(I) و (ب) مدل‌های دسته بندی (II)



(الف) دسته بندی (I)



(ب) دسته بندی (II)

Fig. 8. Push diagram resulting from cyclic loading of (a) category (I) and (b) category (II) models

مقایسه مدل‌های بهبود یافته با مدل پایه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها عمودی یا افقی به تنهایی، تأثیر کمی روی بیشترین نیروی برشی پایه دیوارهای برشی ورق فولاد کامپوزیت دارد. مطابق شکل (۹)، میزان افزایش ماکزیم نیروی برشی مدل‌های دسته بندی (III) نسبت به مدل پایه ۵/۷ درصد تا ۱۳/۴۵ درصد است که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی برابر با ۹/۲۳ درصد است.

دسته بندی (III) ترکیبی از سخت‌کننده‌های افقی و عمودی می‌باشد و متناسب با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، ظرفیت برشی پایه نیز افزایش می‌یابد، اما مطابق با شکل (۹) این افزایش قابل توجه نیست ولی نسبت به نمودار شکل (۸) افزایشی می‌باشد. مطابق با مقادیر بیشترین برش پایه ارائه شده در جدول (۴)، برای مدل‌های دسته بندی (IV)، بیشترین نیروی جانبی در مقایسه با مدل پایه به ترتیب ۱۸/۷۱ درصد، ۱۷/۳۳ درصد و ۲۵/۱۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. که میانگین مقدار برای این حالت استراتژی معادل ۲۰/۳۸ درصد است. در مقایسه با کار آزمایشگاهی جیانگ، با اضافه کردن سخت‌کننده‌های فولادی گیردار صلیبی با مهارهای

حاصل از بارگذاری چرخه‌ای به بررسی تأثیر سخت‌کننده‌ها بر مشخصه‌های شکل‌پذیری قاب‌های فولادی تحت بررسی پرداخته می‌شود. میزان شکل‌پذیری قاب‌های فولادی بر اساس نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان مانند اولین تسلیم شدگی بدست آمده از نمودار پوش نیرو-جابجایی مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [21]:

$$\mu = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (1)$$

که در آن Δ_y تغییر مکان تسلیم و $\Delta_{0.85}$ تغییر مکان متناظر با هشتاد و پنج درصد بار نهایی است. در شکل (۱۲) منحنی پوش بار-جابجایی نمونه CSPSW-NS به منظور تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار-جابجایی شامل بار تسلیم P_y ، نیروی نهایی P_{max} ، تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان نهایی نشان داده شده است. به منظور مطالعه تأثیر حالت‌های مختلف استفاده از سخت‌کننده‌ها، پارامترهای جابجایی تسلیم، جابجایی نهایی، نیروی تسلیم، نیروی نهایی و پارامتر شکل‌پذیری با استفاده از منحنی‌های پوش نیرو-جابجایی شکل‌های (۸ تا ۱۱) استخراج شده و نتایج در جدول (۵) نشان داده شده است. باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای نمونه پایه، شکل‌پذیری $8/47$ است و بار نهایی متناظر 2810 کیلونیوتن است.

شکل ۱۲. تعریف پارامترهای مهم منحنی پوش بار-جابجایی شامل بار تسلیم، بار نهایی، تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان نهایی برای مدل پایه (CSPSW-NS)

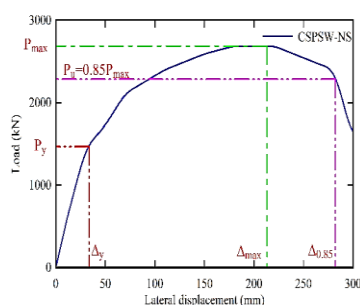


Fig. 12. Definition of the important parameters of the load-displacement curve, including the yield load, ultimate load, yield displacement, and ultimate displacement for the base model (CSPSW-NS)

به ازای برخی از حالت‌های تقویت، ضریب شکل‌پذیری و بار نهایی نسبت به نمونه مبنا بدون سخت‌کننده فولادی افزایش می‌یابد و این نشان دهنده تأثیر مطلوب استفاده از سخت‌کننده‌ها در هسته بتنی دیوارهای برشی می‌باشد. در مقابل، برخی از آرایش‌های

شکل ۱۱: نمودار پوش حاصل از بارگذاری چرخه‌ای

مدل‌های دسته‌بندی (V)

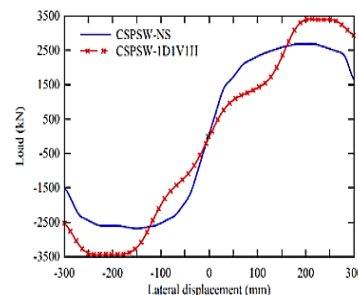


Fig. 11. Push diagram resulting from cyclic loading of classification models (V)

مطابق شکل (۱۱) با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی دسته‌بندی (V) و مدل بهبود یافته با مدل پایه، $21/92$ درصد افزایش در حداکثر برش پایه مشاهده می‌شود. با مقایسه بین مدل‌های بهبود یافته و مدل پایه مطابق جدول (۴) نشان می‌دهد که نیروی جانبی نهایی مدل CSPSW-3D با $25/12$ درصد بیشتر در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه (مدل مبنا) را نشان می‌دهد [7]. با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، مدل‌های بهبود یافته دسته‌بندی (IV و V) رفتار متفاوتی را در مقایسه با سایر مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهند. این تفاوت در رفتار سیستم‌های پیشنهادی به دلیل عملکرد و سازوکار تسلیم می‌تواند باشد. افزایش ظرفیت برشی نهایی دیوار برشی کامپوزیت به طور کلی به دلیل وجود سخت‌کننده‌های مورب فولادی و سخت‌کننده بتنی است. این سخت‌کننده‌ها باعث به تعویق افتادن کمانش ورق دیوار برشی می‌شوند که منجر به افزایش ظرفیت برشی نهایی می‌شود. سخت‌کننده بتنی به تنهایی تا حدی ظرفیت دیوار برشی کامپوزیت را افزایش می‌دهد با اضافه شدن سخت‌کننده‌های فولادی T شکل این ظرفیت باز هم افزایش می‌یابد که مانند نتایج آزمایشگاهی قله‌کی و همکارانش، سخت‌کننده‌ها با محدود کردن تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌های مختلف و افزایش سختی سازه، ظرفیت دیوار برشی صفحه فولادی در تحمل بار جانبی افزایش می‌یابد [20]. در تأیید این مسأله افت مقاومت در نمونه مبنا (بدون سخت‌کننده فولادی) که ناشی از کمانش ورق فولادی در اندرکنش با ستون‌های فولادی می‌باشد.

۳-۲-۲- تأثیر سخت‌کننده‌ها بر شکل‌پذیری قاب‌های تحت بررسی

در این بخش با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی پوش

آید. برای مدل بدون سخت کننده فولادی، ضریب اضافه مقاومت طبق جدول (۵) برابر ۱/۹ و بیشترین اضافه مقاومت مربوط به مدل CSPSW-1D1V1H برابر ۴/۲۵ می‌باشد که حدود ۱۲۴ درصد افزایش در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه را نشان می‌دهد [7]. با مقایسه ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت، مدل‌های با سخت کننده‌های قطری و ترکیبی قطری و صلیبی دسته بندی (IV و V) بیشترین ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت را نسبت به مدل پایه دارند.

جدول ۵. تأثیر پارامترهای هندسی بر ضریب شکل پذیری و اضافه مقاومت مدل‌های مورد بررسی

Strategies	Models	Yielding		Ultimate		Ductility		Over strength
		Py (kN)	Δy (mm)	P _{max} (kN)	Δ _{max} (mm)	μ	Δ _{0.85}	Ω
(I)	CSPSW-0V0H	1471.5	33.25	2810	210.45	281.74	8.47	1.90
	CSPSW-0V1H	1685.6	32.08	2924	210.02	281.16	8.76	1.73
	CSPSW-0V2H	2018.2	35.92	2974	181.32	242.74	6.75	1.47
	CSPSW-0V3H	1820.1	33.73	3004	230.1	265.00	7.85	1.65
(II)	CSPSW-1V0H	1955.3	40.04	2989	139.9	157.01	3.89	1.53
	CSPSW-2V0H	2107.6	25.61	2954	137.7	152.07	5.94	1.40
	CSPSW-3V0H	2100.4	25.89	2978	141.9	161.05	6.22	1.42
	CSPSW-1V1H	920.3	33.86	2970	200.6	251.10	7.41	3.22
(III)	CSPSW-1V2H	924.7	32.78	3023	198.9	247.50	7.55	3.27
	CSPSW-1V3H	929.4	37.07	3059	198.9	238.00	6.42	3.29
	CSPSW-2V1H	1667.8	21.71	3026	148.00	185.14	8.53	1.81
	CSPSW-2V2H	1685.3	31.54	3091	180.65	235.13	7.45	1.83
	CSPSW-2V3H	1857.6	20.33	3059	110.57	163.40	8.04	1.65
	CSPSW-3V1H	1990.3	30.25	3067	107.56	188.90	6.24	1.54
	CSPSW-3V2H	1371.2	20.78	3142	115.13	151.70	7.30	2.29
	CSPSW-3V3H	1476.3	25.64	3188	135.03	177.10	6.90	2.16
(IV)	CSPSW-1D	1598.4	18.05	3336	120.29	160.00	8.86	2.09
	CSPSW-2D	1478.2	29.41	3297	211.76	249.54	8.48	2.30
	CSPSW-3D	1443.5	24.68	3516	217.63	264.27	10.70	2.44
(V)	CSPSW-1D1V1H	806.8	31.04	3426	210.16	290.01	9.34	4.25

Table 5. The effect of geometrical parameters on the plasticity factor and the added strength of the investigated models

کند. مساحت زیر نمودار چرخه‌ای مدل‌ها به روش دوزنقه‌ای محاسبه شده است. بیشترین سخت کننده‌های مستهلک انرژی، سخت کننده‌های قطری و ترکیبی قطری، عمودی و افقی و کمترین مستهلک انرژی مدل بدون سخت کننده فولادی می‌باشد.

شکل ۱۳. نمودار میله‌ای استهلاک انرژی مدل‌های عددی

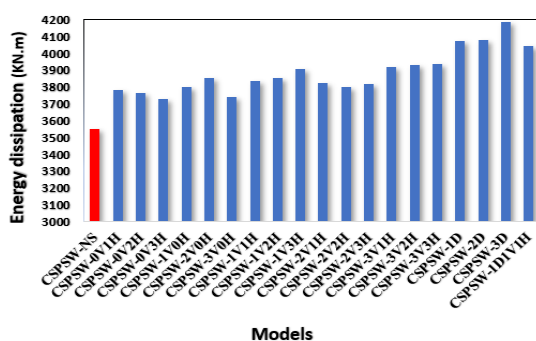


Fig. 13. Bar chart of energy consumption for numerical models

مختلف سخت کننده‌ها باعث کاهش شکل پذیری نسبت به نمونه مبنا می‌شوند. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که مدل‌های بهبود یافته دسته بندی (IV و V) دارای ضریب شکل پذیری بالاتری بوده و مدل CSPSW-3D دارای بیشترین ضریب شکل پذیری است که حدود ۲۶ درصد افزایش شکل پذیری در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه [7]. ضریب اضافه مقاومت (Ω), یکی دیگر از پارامترهایی است که در جدول (۵) بررسی شده است. ضریب اضافه مقاومت از تقسیم نیروی نهایی به نیروی تسلیم بدست می

۳-۲-۳- تأثیر سخت کننده‌ها بر استهلاک انرژی قاب‌های تحت بررسی

در شکل (۱۳) نمودار میله‌ای استهلاک انرژی مدل‌های عددی ارائه شده است. مساحت زیر نمودار منحنی‌های چرخه‌ای نشانگر میزان استهلاک انرژی می‌باشد. مفهوم چرخه‌ای (هیسترزیس) اصطلاحی که در ادبیات مهندسی عمران به ویژه در مهندسی زلزله به چشم می‌خورد و با اصطلاحاتی خصوصاً پاسخ لرزه‌ای مناسب، قابلیت جذب انرژی چرخه‌ای، حلقه‌های چاق و یا لاغر، کاهش سختی و افت مقاومت در منحنی چرخه‌ای شناخته می‌شود. منحنی بار- تغییر شکل تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی منحنی چرخه‌ای یا همان هیسترزیس نامیده می‌شود [2]. هر چه مساحت زیر نمودار چرخه‌ای بزرگتر باشد میزان استهلاک انرژی بیشتر خواهد بود و می‌تواند انرژی نیروهای جانبی مثل زلزله را بیشتر مستهلک نماید و از شدت و آسیب‌های مخرب زلزله کم

۳-۲-۴- تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی T شکل بر آسیب فشاری سخت کننده بتنی

حالت‌های کانتر آسیب فشاری بتن (DAMAGEC) مدل‌های المان محدود در شکل (۱۷) برای تعدادی از مدل‌ها با شماره (۱) تا (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در مدل (۱) CSPSW-NS (مدل پایه) دیده می‌شود، آسیب فشاری کل پانل بتنی در طبقات اول و دوم به وضوح دیده می‌شود که ناشی از کماتش خارج از صفحه ورق‌های فولادی می‌باشد و باعث خرابی کلی در دیوار بتونی شده است. با اضافه کردن سخت‌کننده‌های T شکل افقی یا عمودی به تنهایی، آسیب و خرد شدن بتن فقط در مسیرهایی که سخت‌کننده حضور دارد از بین رفته یا کمتر شده است. همانند مدل‌های (۲) و (۳)، اضافه کردن سخت‌کننده‌های افقی یا عمودی به تنهایی تأثیر زیادی در جلوگیری از شکست بتن ندارند. در مدل‌های با سخت‌کننده‌های افقی و عمودی ترکیبی، همانطور که در شکل برای مدل‌های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است، شکست فشاری بتن محدود به مابین سخت‌کننده‌ها شده و سطح پیوسته آسیب بتن در مدل پایه، به سطوح کوچکتری مابین سخت‌کننده‌ها کاهش پیدا کرده است. این سخت‌کننده‌ها نیز تأثیر زیادی در جلوگیری از آسیب و خرابی بتن ندارند. ولی در مدل‌های (۷) تا (۱۰) با سخت‌کننده‌های مورب و ترکیبی، آسیب و خرد شدن بتن به سطوح کوچک‌تر مابین سخت‌کننده‌ها محدود شده و به صورت چشمگیری از شکست پانل بتنی کاسته شده است. شکست و خرابی بتن در مدل CSPSW-3D، آسیب بسیار کمتری نسبت به سایر مدل‌ها پیدا کرده و در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه بسیار کمتر می‌باشد [7]. فلسفه استفاده از پوشش بتنی در این گونه دیوارها، جلوگیری از کماتش ورق فولادی نازک و تغییر مود باربری ورق از حالت مقاومت پس کماتشی (میدان کششی قطری) به مقاومت برشی داخل صفحه بوده که بدین ترتیب مقاومت جانبی سیستم افزایش می‌یابد. که مانند نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکارانش بتن نقش مهمی در مقاومت کماتشی صفحه فولادی دارد [19]. علت اصلی کاهش خرابی دیوارهای بتونی کماتش کمتر خارج از صفحه پانل است، بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌های مورب نسبت به سخت‌کننده‌های افقی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کماتش ورق فولادی می‌شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب در دیواره بتن می‌شود، همانطور که در شکل (۱۵) برای مدل (۹) نشان داده شده است.

در جدول (۶) درصد بهبود استهلاک انرژی مدل‌های عددی نسبت به مدل پایه آورده شده است. مدل CSPSW-3D دارای بیشترین استهلاک انرژی است که در مقایسه با نتایج مدل ژائو و آستانه حدود ۱۸ درصد بیشتر استهلاک انرژی را نشان می‌دهد [7]. نتایج بررسی مدل عددی مومنی نیز حکایت از افزایش استهلاک انرژی توسط دیوار برشی مرکب می‌باشد [19]. نمودار چرخه‌ای تعدادی از مدل‌های عددی در شکل (۱۴) آورده شده است.

جدول ۶. درصد بهبود استهلاک انرژی مدل‌های عددی نسبت به مدل پایه

Strategies	Models	Energy depreciation (KN.m)	Improve (%)
-	CSPSW-NS	3550	Basic Model
(I)	CSPSW-0V1H	3784	6.6
	CSPSW-0V2H	3763	6
	CSPSW-0V3H	3727	5
(II)	CSPSW-1V0H	3798	7
	CSPSW-2V0H	3852	8.5
	CSPSW-3V0H	3742	5.4
(III)	CSPSW-1V1H	3834	8
	CSPSW-1V2H	3855	8.6
	CSPSW-1V3H	3905	10
	CSPSW-2V1H	3823	7.7
	CSPSW-2V2H	3798	7
	CSPSW-2V3H	3816	7.5
	CSPSW-3V1H	3919	10.4
	CSPSW-3V2H	3930	10.7
	CSPSW-3V3H	3940	11
(IV)	CSPSW-1D	4072	14.7
	CSPSW-2D	4082	15
	CSPSW-3D	4189	18
(V)	CSPSW-1D1V1H	4047	14

Table 6. Percentage improvement of energy consumption of numerical models compared to the base model

شکل ۱۴. نمودار چرخه‌ای تعدادی از مدل‌های عددی

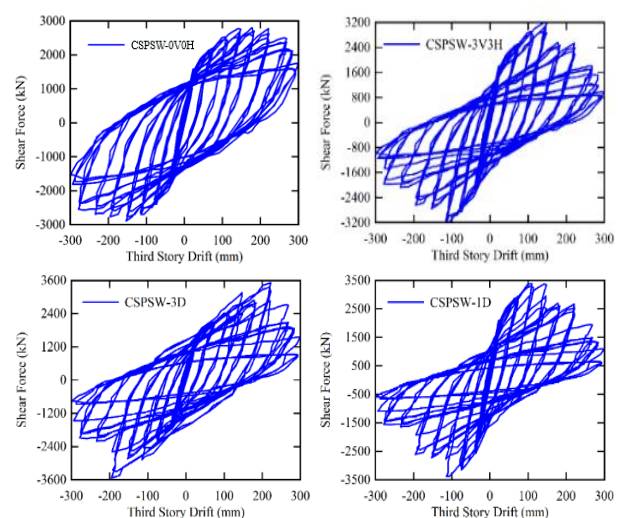


Fig 14. Cyclic diagram of a number of numerical models

شکل ۱۵. حالت‌های آسیب فشاری سخت کننده بتنی برای مدل‌های مطالعات پارامتریک از تحلیل‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای

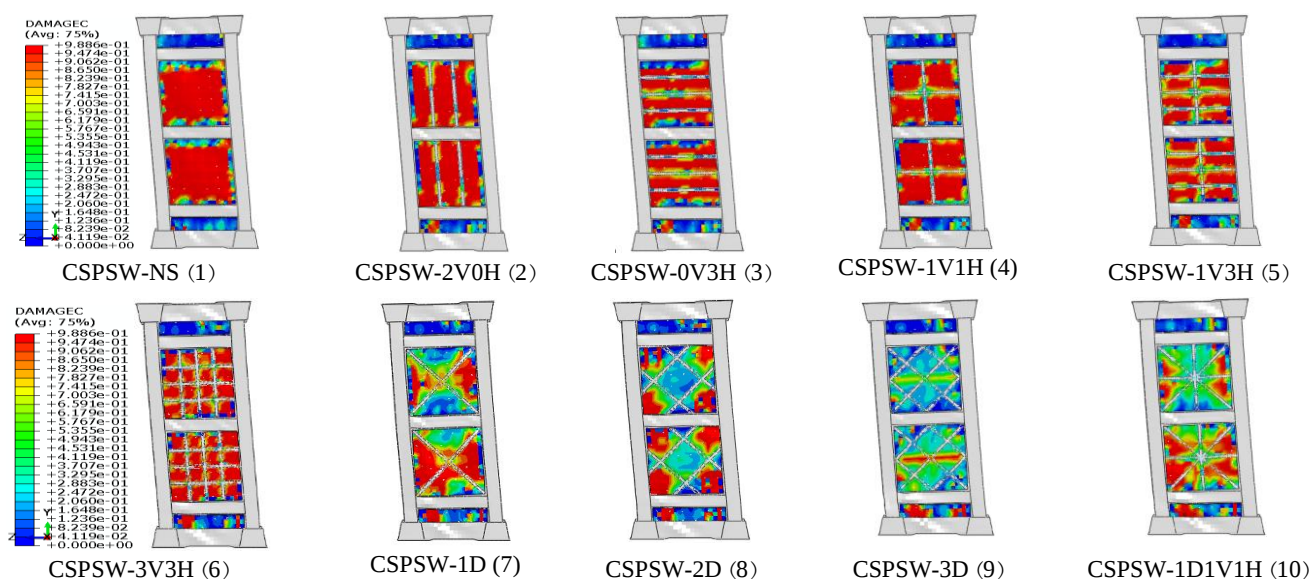


Fig. 15. Concrete compressive damage modes for parametric study from cyclic loading analyses

در شکل (۱۷) مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل‌های

حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیت‌های مختلف روی نمودار نیرو-جابجایی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود تا نقطه A نمودار به صورت خطی می‌باشد و در این بخش هیچ قسمت از سازه وارد ناحیه پلاستیک نمی‌شود. با افزایش بیشتر نیرو، در نقطه A خرابی به صورت تسلیم در بخش‌های فولادی سازه آغاز شده که در شکل قابل مشاهده می‌باشد. تا این مرحله به علت وجود فاصله کناری بین پوشش‌های بتنی و ستون‌های قاب، نیروی زیادی به پوشش بتنی وارد نمی‌شود. افزایش بیشتر نیرو سبب می‌شود تا نیرو از طریق تقویت‌کننده‌ها به پوشش بتنی وارد شده و در نتیجه آن سختی سازه دوباره به صورت افزایشی می‌یابد. در این مرحله تخریب پوشش بتنی آغاز شده و در موقعیت B تخریب در پوشش بتنی دهانه بالایی شدت می‌یابد. در ادامه با درگیر شدن پوشش بتنی طبقه پایینی، مجدداً سختی سازه حالت افزایش پیدا کرده و مقاومت سازه در برابر تغییر شکل افزایش می‌یابد. تا رسیدن به نقطه C خرابی پوشش بتنی طبقه پایینی نیز رشد پیدا کرده و در نتیجه تخریب کامل پوشش‌های بتنی از نقطه D به بعد سازه مقاومت خود را از دست داده و دچار تخریب در ستون‌ها می‌شود. چنین رفتار مشابهی با توجه به شکل (۱۸) که مراحل خرابی در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیت‌های مختلف روی نمودار نیرو - جابجایی را نشان می‌دهد قابل ملاحظه است.

۳-۲-۵- بررسی روند خرابی

در شکل (۱۶) مراحل خرابی مدل CPSW-0V0H نشان داده شده است. این مراحل خرابی بر اساس مشاهدات به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود استنباط شده است همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدا بخشی از تیرهای میانی وارد ناحیه پلاستیک شده و در ادامه آن اعضای فولادی این قسمت‌ها دچار تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود. در ادامه، این تغییر شکل‌های بزرگ به پوشش‌های بتنی انتقال داده شده و سبب ایجاد تخریب در این پوشش‌ها می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که قبل از تخریب کامل پوشش‌های بتنی، ستون‌ها نیز وارد فاز پلاستیک می‌شوند. در نهایت در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر پوشش بتنی به صورت کامل تخریب شده و از بدنه دیوار برشی جدا می‌شود.

شکل ۱۶. مراحل خرابی بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-0V0H

(ترتیب مراحل خرابی از راست به چپ می‌باشد)

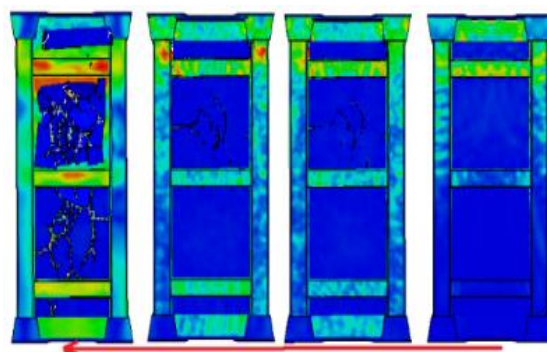


Fig. 16. Cyclic loading failure stages in the CPSW-0V0H sample (the order of failure stages is from right to left)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار جانبی دیوار برشی مرکب با سخت‌کننده فولادی T شکل مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهایی مانند تعداد سخت‌کننده‌های T شکل، نوع چیدمان شامل عمودی، افقی، مورب و ترکیبی، روی سختی سیستم، ضریب شکل‌پذیری، ظرفیت نهایی دیوار برشی مرکب، و حالت‌های خرابی بررسی و مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- استفاده از سخت‌کننده‌های قطری T شکل فولادی در دیوارهای برشی کامپوزیت نسبت به دیوار برشی کامپوزیت بدون سخت‌کننده فولادی، باعث کاهش چشمگیر در آسیب سخت‌کننده بتنی می‌شود.

۲- سخت‌کننده‌های مورب نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی تنها، افقی تنها و ترکیبی افقی و عمودی، ماکزیمم برش پایه را تا ۲۵ درصد بیشتر افزایش می‌دهند. این تفاوت در رفتار سیستم‌های پیشنهادی به دلیل عملکرد و سازوکار تسلیم می‌باشد.

۳- افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها نباید ملاک افزایش ماکزیمم برش پایه در دیوار برشی مرکب باشد بلکه انتخاب یک دسته بندی مناسب برای سخت‌کننده‌ها می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش ماکزیمم برش پایه داشته باشد.

۴- با اضافه شدن سخت‌کننده‌ها، میدان کششی محدود به ناحیه بین سخت‌کننده‌ها شده است و کماتش کلی ورق به کماتش موضعی تبدیل می‌شود.

۵- استفاده از سخت‌کننده‌های مورب نسبت به سخت‌کننده‌های افقی و عمودی منجر به جلوگیری بیشتری از کماتش ورق فولادی می‌شود که در نتیجه باعث کاهش آسیب و شکست در پانل بتن می‌شود.

۶- سخت‌کننده‌ها با آرایش قطری نسبت به دیگر سخت‌کننده‌ها بیشتر مستهلک کننده انرژی می‌باشند و مدل قطری CPSW-3D ۱۸ درصد بیشتر مستهلک کننده انرژی نسبت به مدل پایه است.

۷- بیشترین ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت قاب فولادی دارای سخت‌کننده، برای مدل‌های CPSW-3D و CPSW-1D1V1H بدست آمده است که به ترتیب حدود ۲۶ و ۱۲۴ درصد بیشتر از نمونه مبنای بدون استفاده از سخت‌کننده‌ها می‌باشد.

شکل ۱۷. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-1D1V1H برحسب موقعیت‌های مختلف روی نمودار نیرو - جابه‌جایی

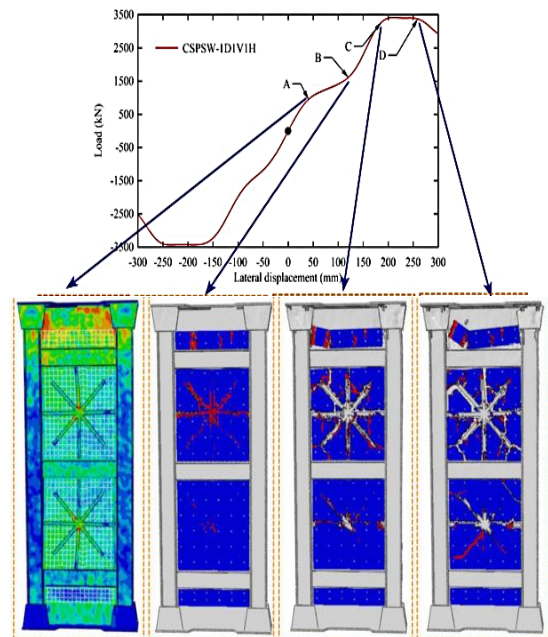


Fig. 17. Failure stages obtained from the analysis of cyclic loading in the CPSW-1D1V1H sample according to different positions on the force-displacement diagram

شکل ۱۸. مراحل خرابی به دست آمده از تحلیل‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در نمونه CPSW-3V3H برحسب موقعیت‌های مختلف بر روی نمودار نیرو - جابه‌جایی

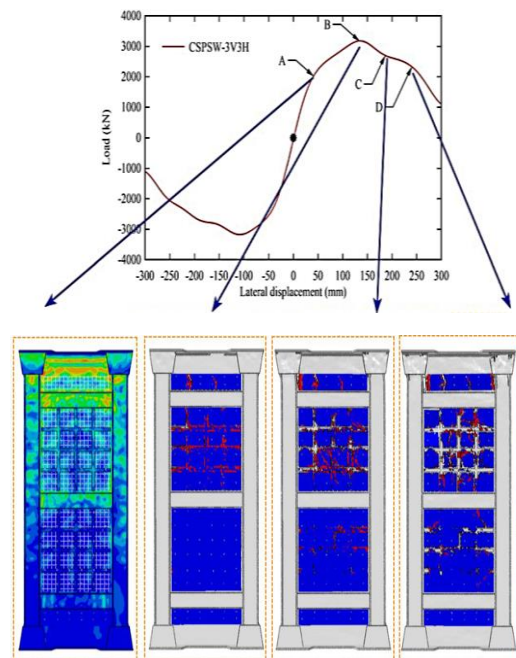


Fig. 18. Failure stages obtained from the analysis of cyclic loading in the CPSW-3V3H specimen according to different positions on the force-displacement diagram

- Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 74(2), pp.267-282.
- [10] Hatami F., 2009. A. Rahaei, Behavior of composite shear walls under seismic loading. *Journal of Sharif University of Technology*, 46, pp.21-31. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117263>.
- [11] Shafaei, S., Ayazi, A. and Farahbod, F., 2016. The effect of concrete panel thickness upon composite steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp.81-90.
- [12] Rahnavard, R., Hassanipour, A. and Mounesi, A., 2016. Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, pp.441-456.
- [13] Zhang, Y., Song, Y., Zhu, G. and Jiang, Z., 2020. Hysteretic performance and shear deformation of external ring stiffened joint between composite CFST column and steel beam. *Journal of Building Structures*, 41, pp.154-164. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2018.0131>.
- [14] Zhou, J., Fang, X. and Jiang, Y., 2021. Cyclic behavior of concrete-encased high-strength concrete-filled steel tube composite walls: An experiment. *Structural Concrete*, 22(2), pp.691-708.
- [15] Seyed Kolbadi, S.M., Hassani, N., Seyed-Kolbadi, S.M. and Mirtaheri, M., 2021. Analyzing Parametric Sensitivity on the Cyclic Behavior of Steel Shear Walls. *Shock and Vibration*, 2021, pp.1-10.
- [16] Usefvand, M., Maleki, A. and Alinejad, B., 2022. An innovative system of coupled steel plate shear wall with pin FUSE in link beam: Cyclic behavior and energy dissipation. *Advances in Structural Engineering*, 25(3), pp.473-490.
- [17] Bypour, M., Yekrangnia, M. and Kioumars, M., 2024. Predicting the shear capacity of composite steel plate shear wall with the application of RSM. *Engineering Structures*, 301, pp.1-17.
- [18] Yu, J.G., Feng, X.T., Li, B. and Hao, J.P., 2018. Cyclic performance of cross restrained steel plate shear walls with transverse braces. *Thin-Walled Structures*, 132, pp.250-264. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.020>.
- [19] Wang, W., Wang, Y. and Lu, Z., 2018. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear wall. *Engineering Structures*, 160, pp.281-292. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.08.020>.
- [20] Gholhaki, M. and jalilzadeh afshari, M., 2018. Effect of Different Configurations of Stiffeners on the Shear Capacity and Stiffness of Stiffened Steel Plate Shear Walls. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(4.2), pp.3-12. <https://doi.org/10.24200/j30.2018.1060>.
- [21] Zhang, H., Dong, J., Duan, Y., Lu, X. and Peng, J., 2014. Seismic and Power Generation Performance of U-Shaped Steel Connected PV-Shear Wall under Lateral Cyclic Loading. *International Journal of Photoenergy*, 2014, pp.1-15. <https://doi.org/10.1155/2014/362638>.
- عناوین زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:
- ۱- توصیه می‌شود نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گیرند.
 - ۲- بررسی تأثیر ضخامت پانل بتنی و ورق فولادی در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
 - ۳- بررسی فاصله گل‌میخ‌های اتصال بتن به ورق فولادی با وجود سخت‌کننده‌های فولادی.
 - ۴- بررسی تأثیر سخت‌کننده‌های فولادی دیگر مانند ناودانی، نبشی و غیره بر روی دیوار برشی‌های فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
 - ۵- مطالعه رفتار تأثیر سخت‌کننده‌های پانل بتنی در دو سمت ورق فولادی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
 - ۶- بررسی تأثیر بتن با مقاومت بالا بر روی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های بتنی - فولادی.
- ۵- مراجع
- [1] Rahai, A. and Hatami, F., 2009. Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings. *Journal of constructional steel research*, 65(7), pp.1528-1537.
 - [2] Rahimi, T., Kheyroddin, A., and Gholhaki, M., 2020. An Analytical and Numerical Study on Effect of Thickness and Concrete Type of Panels on Behavior of Composite Steel Plate Shear Walls. *Amirkabir J. Civil Eng*, 53, pp.3623-3648. <http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2020.17929.6713>. [In Persian]
 - [3] Momeni, S., Siahpolo, N. and Jahanpour, A., 2024. Numerical study on semi-supported steel composite shear wall at the edges under near and far-fault loading. *Sharif Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.24200/j30.2023.62420.3223>.
 - [4] Astaneh-Asl, A., 2002. *Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls* (pp. 7-8). Moraga, CA, USA: Structural Steel Educational Council.
 - [5] Sabouri, S., 2001. Lateral load resisting systems an introduction to steel shear walls. *Anguizeh Poblising Co*, pp.220-227.
 - [6] Astaneh-Asl, A., 2001. *Seismic behavior and design of steel shear walls*. Moraga, CA: Structural Steel Educational Council.
 - [7] Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A., 2007. Seismic behavior of composite shear wall systems and application of smart structures technology. *Steel Structures*, 7(2007), pp.69-75.
 - [8] American Institute of Steel Construction, 2002. *Seismic provisions for structural steel buildings* (No. 2). American Institute of Steel Construction.
 - [9] Fathy, E., 2020. Seismic assessment of thin steel plate shear walls with outrigger system. *Structural*

Investigation of the Effect of Calcium Carbonate on the Solidification Process of Bentonite and Heavy Metals in Cementitious Base

Vahid Reza Ouhadi^{1*} , Rayhaneh Safadoust², Yousefi Behnam², Zeinab Mirzazadeh³

1. PhD., Faculty of Engineering of Bu-Ali Sina University & School of civil Engineering University of Tehran, Iran.
2. Master of Science, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Master of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Abstract

The solidification/stabilization of bentonite and heavy metals is among the conventional methods in geo-environmental projects. Among the various methods used for the solidification/stabilization process, cement-based systems are widely used due to their relatively low cost, availability, and environmental compatibility. The efficiency of solidification/stabilization technology can be improved through certain modifications. The objective of this paper is to determine the effect of substituting calcium carbonate on improving the solidification/stabilization process of bentonite and heavy metals towards reducing cement consumption.

To achieve this goal, samples of bentonite containing 100 cmol/kg-soil concentration of lead nitrate with different compositions of cement and calcium carbonate were solidified/stabilized. To determine the appropriate concentration of added contamination to the soil, a series of tests for heavy metal retention using the soil suspension equilibrium method, based on EPA standards, has been conducted. These tests were performed on bentonite suspensions at heavy metal lead concentrations ranging from 0 to 250 cmol/kg-soil. The mechanism of contaminant retention was evaluated through XRD, TCLP, pH, and UCS tests. In this study, the amount of immobility of heavy metals after stabilization and solidification process using the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) based on EPA-1311 method has been evaluated. In the first stage of the aforementioned experiment, the solidified/stabilized contaminated sample was adjusted to pH 8.2 with a 0.1 molar hydrochloric acid solution and prepared as a suspension with an S:W ratio (solid:water) of 1:20. All suspensions were continuously shaken for 18 hours using a mechanical shaker, and after measuring the pH of the samples and centrifuging them, the liquid phase was separated and the contaminant concentration was measured using a GBC932 AB Plus atomic absorption spectrophotometer. Unconfined compressive strength (UCS) can be used as a criterion for assessing hydration reaction progress. In this study, samples were subjected to curing for 7 and 28 days in a closed system and placed in a humid chamber at 23 degrees Celsius and 95% humidity according to ASTM D1633-17 standard, with a uniform density of 1.85 g/cm³ for testing unconfined compressive strength. Furthermore, X-ray diffraction (XRD) analysis was utilized to investigate the microstructure of the samples and the progress of the cement hydration process and its interaction with contaminated clay minerals.

According to the results of this study, replacing 15% calcium carbonate instead of cement preserves the necessary conditions for the establishment of stabilization and solidification mechanisms. For instance, for a sample containing 1.4% optimum moisture, the desorption amount of lead ions in the TCLP test is equal to 2 milligrams per liter, and the uniaxial resistance of the sample is equal to 1.45 MPa, meeting both EPA standards. In fact, the achieved results indicate that substituting up to 15% calcium carbonate instead of ordinary Portland cement not only reduces cement consumption but also improves the contaminant retention capability in the cementitious solidification process. The reason for the improvement in these conditions is attributed to the simultaneous role of calcium carbonate filling and nucleation alongside the increase in the range of carbonate compound sedimentation.

Review History

Received: Mar 29, 2024

Revised: Jun 01, 2024

Accepted: Jul 10, 2024

Keywords

Calcium Carbonate
Stabilization/Solidification
Cement
Contaminant Retention
TCLP
Bentonite

* Corresponding Author Email: 0000000 - ORCID: 0000-0002-9370-612X



بررسی تأثیر کربنات کلسیم بر فرآیند جامدسازی پایه‌سیمانی بتونیت و فلزسنگین

وحید رضا اوحدی^{۱*}، ریحانه صفادوست^۲، بهنام یوسفی^۲، زینب میرزازاده^۳

۱. دکتری دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا و دانشکده عمران دانشگاه تهران، ایران.

۲. کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳. کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

تثبیت/جامدسازی پایه‌سیمانی بتونیت و فلزسنگین از روش‌های متعارف در پروژه‌های مهندسی محیط‌زیست است. در میان روش‌های مختلفی که برای فرآیند تثبیت/جامدسازی استفاده می‌شود، سیستم‌های مبتنی بر پایه سیمان با توجه به هزینه نسبتاً کم، و دسترسی مناسب، به‌طور گسترده استفاده می‌شود. کارایی تکنولوژی تثبیت/جامدسازی را می‌توان با استفاده از تغییراتی بهبود بخشید. هدف از این مقاله، تعیین تأثیر جایگزینی کربنات کلسیم بر بهبود فرآیند تثبیت/جامدسازی پایه‌سیمانی بتونیت و فلزسنگین در راستای کاهش مصرف سیمان است. برای این منظور نمونه‌های بتونیت دارای غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil نیترات سرب با درصدهای مختلف ترکیب سیمان و کربنات کلسیم تثبیت/جامدسازی شده‌اند. ارزیابی ساز و کار نگهداری آلاینده با انجام آزمایش‌های pH، TCLP، XRD و UCS مورد مطالعه قرار گرفته‌است. شرط رسوب هیدروکسیدی، قرارگیری pH محیط در محدوده ۱۰ تا ۱۲ است. بر اساس نتایج این تحقیق، جایگزینی ۱۵ درصد کربنات کلسیم به‌جای سیمان، سبب حفظ شرایط لازم برای ایجاد مکانیزم تثبیت و جامدسازی شده‌است. به‌طوری‌که برای نمونه حاوی ۱/۴ درصد رطوبت بهینه، مقدار واجبی یون سرب در آزمایش TCLP برابر با ۲ میلی گرم بر لیتر و مقاومت تک‌محوری نمونه برابر با ۱/۴۵ MPa بدست آمده و هر دو معیار EPA احراز شده‌است. در واقع نتایج این تحقیق حاکی از آن است که جایگزینی تا ۱۵ درصد کربنات کلسیم به‌جای سیمان پرتلند معمولی ضمن کاهش مصرف سیمان، سبب بهبود قابلیت نگهداری آلاینده در تثبیت/جامدسازی پایه‌سیمانی شده‌است. علت بهبود شرایط رفتاری فوق، نقش همزمان پرکنندگی و هسته‌زایی کربنات کلسیم در کنار افزایش بازه رسوب ترکیبات کربناتی بوده‌است.

کلمات کلیدی

کربنات کلسیم
تثبیت/جامدسازی
سیمان
نگهداری آلاینده
TCLP
بتونیت

۱- مقدمه

ژئوتکنیکی خاک، بر عملکرد اکوسیستم اثرگذار است [3]. روی (Zn)، مس (Cu)، کروم (Cr) و سرب (Pb) به‌عنوان شایع‌ترین آلاینده‌های فلز سنگین شناخته شده‌اند. در این میان یون سرب (Pb) به صورت ویژه‌ای مورد توجه است و این به دلیل سمیت و گستردگی وسیع آن در طبیعت است [4].

فعالیت‌های صنعتی و تولید مواد شیمیایی سالانه مقادیر زیادی ضایعات حاوی فلزات سنگین ایجاد کرده‌است [1]. ورود آلاینده‌ها به خاک سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی شده‌است [2]. انباشت بیش از حد فلز سنگین در خاک، ضمن تغییر در مشخصات

* رایانامه نویسنده مسئول: vahidouhadi@yahoo.ca - ORCID: 0000-0002-9370-612X

کپی‌رایت © ۲۰۲۵. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، 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.



وسیع برای به کارگیری سایر افزودنی‌ها در مخلوط‌های سیمانی به منظور بهبود خواص آن و کاهش مصرف سیمان صورت گیرد [12]. آسیاب کردن سنگ آهک یا مخلوط کردن کربنات کلسیم با سیمان پرتلند موجب تولید سیمان پرتلند آهکی (PLC) شده و برای دهه‌ها در کشورهای اروپایی و کانادا مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [13]. حضور ذرات ریز پودر سنگ آهک در سراسر خمیر سیمان ضمن تغییر در سینتیک هیدراسیون سیمان، به دلیل اثر پرکنندگی فضاهای متخلخل منجر به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی می‌شود. از طرفی کاهش محتوای سیمان همراه با جایگزینی کربنات کلسیم باعث کاهش محصولات هیدراسیون شده و در نتیجه بر مقاومت فشاری اثر منفی می‌گذارد [13]. براین اساس استانداردهای اروپا (EN-197) و کانادا (CSA) مقادیر مشخصی را برای اضافه کردن سنگ آهک به سیمان پرتلند معمولی ارائه کرده‌اند [14]. بسیاری از پژوهشگران تحقیقاتی را پیرامون تأثیر پودر سنگ آهک بر هیدراسیون سیمان پرتلند انجام داده‌اند. بر این مبنا که سرعت هیدراسیون C_3S با افزایش مقدار و نرمی کلسیم کربنات ($CaCO_3$) تسریع می‌شود. اصلی‌ترین دلیل افزایش سرعت هیدراسیون، اثر هسته‌زایی سنگ آهک است [15, 16]. در تحقیقات گذشته، به موضوع تأثیر مقدار جایگزینی کربنات کلسیم در سیمان پرتلند آهکی بر pH محلول سیال حفره‌ای و تشکیل فازهای رسوب و پیشرفت هیدراسیون به منظور جامدسازی آلاینده توجه کمتری صورت گرفته‌است. هدف این مقاله به تعیین تأثیر درصد رطوبت، pH محلول سیال حفره‌ای و بررسی تغییرات جامدسازی آلاینده در مقادیر مختلف کربنات کلسیم و نگهداشت فلز سنگین سرب تحت فرآیند تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی معطوف شده‌است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد مورد استفاده

بتونیت به دلیل ظرفیت زیاد نگهداشت آلاینده، به عنوان پرکاربردترین خاک رسی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [6]. در این مقاله از بتونیت تجاری با نام "بتونیت فلات ایران" تهیه شده توسط شرکت "ایران باریت"، استفاده شده است. برخی مشخصات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی نمونه بتونیت در جدول (۱) ذکر شده‌است.

خاک‌های رسی به دلیل داشتن بار منفی به عنوان یک عامل مهم برای نگهداشت آلاینده‌های فلزسنگین و جلوگیری از انتقال آن‌ها در محیط‌زیست عمل می‌کنند [5]. برای اصلاح خاک آلوده شده با فلزات سنگین، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد [6]. برخی از این روش‌ها شامل شستشوی شیمیایی، تثبیت و جامدسازی، پوشش خاک، سیستم زهکشی و رقیق‌سازی است؛ اساس کاربرد تمام این روش‌ها، تبدیل مواد سمی به مواد بی‌اثر و پایدار از نظر فیزیکی و شیمیایی است به شکلی که از انتقال آنها به لایه‌های زیرین خاک و آب زیرزمینی ممانعت شود [7].

سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (US.EPA) بیان کرده‌است که تثبیت و جامدسازی با استفاده از مواد سیمانی به عنوان "بهترین تکنولوژی موجود اثبات شده"^۱ برای دفن بسیاری از عناصر سمی از جمله فلزات سنگین موجود در طبیعت است [8]. اگرچه تثبیت و جامدسازی برای پسماندهای خطرناک صنعتی به وفور استفاده می‌شود ولی موارد بسیاری از استفاده از این روش در خاک‌های آلوده گزارش شده است. در این راستا می‌توان به تثبیت و جامدسازی خاک آلوده در ماساچوست [9] و در ایالت ونکوور کانادا [10] اشاره کرد. تثبیت و جامدسازی هر کدام آثار متفاوتی بر نگهداشت آلاینده دارند. تثبیت به فرآیند تغییر مواد سمی به شکل‌های پایدارتر از لحاظ شیمیایی و فیزیکی اطلاق می‌شود. به شکلی که با تغییر خاصیت شیمیایی مواد خطرناک، شکل‌های ثابت یا غیرسمی تولید می‌شود [6]. مقدار pH نقش مؤثری در تثبیت بسیاری از فلزات سمی توسط واکنش‌های رسوب دارد و تشکیل رسوب و انحلال رسوب فلزات، تابع تغییرات pH است. جامدسازی شامل فرآیندهایی است که مصالح آلوده را به شکل مصالح جامد، کپسوله کرده و از طریق کاهش مساحت سطحی که در معرض آبشویی است و یا با پوشش مصالح آلوده با موادی که نفوذپذیری کمی دارند، مانع انتقال آلودگی می‌شود [11]. سیمان پرتلند از طریق دو عامل افزایش pH باعث عدم تحرک آلاینده (تثبیت) و واکنش‌های پوزولانی (تشکیل ژل C-S-H و C-A-S-H)، سبب جامدسازی آلاینده‌های حاوی فلزات سنگین می‌شود [9].

تولید سیمان منجر به انتشار کمتر از ۵ الی ۸ درصد گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده در دنیا می‌شود. از طرفی مضرات تولید روز افزون سیمان باعث شده که در سال‌های اخیر تحقیقات

¹ Best demonstrated available technology (BDAT)

جدول ۱. برخی مشخصات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی بتونیت

Parameter	Quantity	Method
CEC (cmol/kg-soil)	62.2	[5]
SSA (m ² /g)	418	[6]
Carbonate content (%)	10	[18]
Liquid limit (LL) (%)	319	[17]
Plasticity index (PI) (%)	275	[17]
pH	9.8	[19]
Gs	2.79	[18]

Table 1. Some of the geotechnical and geoenvironmental eng. properties of bentonite

مواد مورد استفاده شامل کربنات کلسیم با فرمول شیمیایی (CaCO₃) و جرم مولی ۱۰۰/۰۸۷ گرم بر مول بوده و از سرب نیترات با فرمول شیمیایی (Pb(NO₃)₂) و جرم مولی ۳۳۱/۲ گرم بر مول، به عنوان ماده شیمیایی حاوی فلز سنگین استفاده شده است. سیمان مورد استفاده نیز سیمان پرتلند تیپ دو، محصول شرکت "سیمان هگمتان ایران" است.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

برای ارزیابی قابلیت نگهداری فلز سنگین توسط بتونیت، آزمایش نگهداشت و اندازه‌گیری pH صورت گرفته است (شکل ۱). بیشترین ظرفیت جذب آلودگی سرب، توسط نمونه بتونیت مورد مطالعه معادل ۹۰ cmol/kg-soil است که با نتایج سایر پژوهشگران هماهنگی دارد [16]. بنابراین به منظور بررسی مستقیم عملکرد چسباننده سیمانی حاوی کربنات کلسیم در تثبیت و جامدسازی، خاک آلوده با غلظتی برابر با ۱۰۰ cmol/kg-soil تهیه شده است؛ بدین منظور ابتدا نمک نیترات سرب به صورت سوسپانسیون و با نسبت S:W (آب: مواد جامد) برابر با ۱:۱۰ به خاک اضافه شده و سپس نمونه‌ها ۹۶ ساعت، هر ۲۴ ساعت به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده مکانیکی برای حصول تعادل، کاملاً هم‌زده شده است. در نهایت نمونه‌ها در گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و آسیاب شده‌اند. بتونیت مصرفی دارای ظرفیت نگهداشت حدود ۹۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک است؛ این در حالی است که آلاینده اعمالی به خاک ۱۰۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک است و مقدار آلاینده آزاد، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک است که این مقدار آلاینده بسیار بیش از محدوده استاندارد آلاینده سرب (۵ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد. بر این اساس انجام آزمایش نگهداشت آلاینده، بیانگر آزادسازی مقادیر قابل‌توجهی از سرب اعمالی است که این امر منجر به عملکرد فرآیند تثبیت و جامدسازی شده است. از طرفی پژوهشگران بیان کرده‌اند که بتونیت در غلظت ۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک، در آزمایش TCLP بدون حضور سیمان مقدار واجدبی حدود ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر داشته است و باید توسط

سیمان تثبیت و جامدسازی شود [5, 1]. از سوی دیگر، نتایج آزمایش‌های تثبیت و جامدسازی صورت گرفته توسط سایر پژوهشگران، روی بتونیت آلوده (در شرایط مشابه مقاله حاضر) نشان داده که افزودن ۱۵ درصد سیمان، کمترین میزان چسباننده‌ای است که معیار استاندارد EPA را تأمین کرده است [5]. بنابراین در این مقاله نمونه‌ها با در نظر گرفتن مقدار چسباننده (۱۵ درصد) و با هدف کاهش سیمان مصرفی (جایگزینی کربنات کلسیم) تهیه شده‌اند.

در استاندارد EN197 دو نوع سیمان پرتلند آهکی با نام‌های II/A-L و II/B-L معرفی شده است که به ترتیب شامل ۶ تا ۲۰ درصد و ۲۱ تا ۳۵ درصد کربنات کلسیم هستند [18]. بر این اساس در پژوهش حاضر، کربنات کلسیم تا ۲۵ درصد وزنی چسباننده، جایگزین سیمان پرتلند معمولی شده است و ترکیب سیمان و کربنات کلسیم به عنوان چسباننده، مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیبات مختلف سیمان پرتلند معمولی و کربنات کلسیم، به عنوان چسباننده مطابق با الگوی جدول (۲) کاملاً همگن شده و به میزان ۱۵ درصد وزنی خاک خشک آلوده به نمونه‌ها اضافه شده است. انتخاب درصد رطوبت به دلیل حضور همزمان خاک و سیمان، بر اساس استاندارد ASTM D1633-17 و مقالات معتبر [20] و با تعیین درصد رطوبت بهینه لحاظ شده است. نمونه‌ها در چهار درصد رطوبت به صورت ضرایبی از درصد رطوبت بهینه (OWC) ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ ساخته شده‌اند.

جدول ۲. ترکیبات متفاوت سیمان- کربنات کلسیم

Binder	Specimen ID	Cement	Calcium carbonate	Water content: %	Curing time	Method
15% by weight of contaminated soil	C100-Ca0	100%	0%	(0.8,1,1.2,1.4) OWC	7 days	TCLP; UCS
	C95-Ca5	95%	5%		28 days	
	C90-Ca10	90%	10%			
	C85-Ca15	85%	15%			
	C75-Ca25	75%	25%			

Table 2. Different mixtures of calcium carbonate – cement

۲-۳- چگونگی انجام آزمایش‌ها

برای تعیین غلظت مناسب آلودگی اضافه‌شده به خاک، آزمایش نگهداشت فلز سنگین به روش تعادل سوسپانسیون خاک، بر اساس استاندارد EPA در غلظت‌های ۰-۲۵۰ mol/kg-soil فلز سنگین سرب انجام شده است [19]. انحلال‌پذیری یون‌های Pb به میزان قابل‌توجهی به pH وابسته است و تحت عنوان رفتار آمفوتریک نامیده شده است. کربنات کلسیم در آب به مقدار ناچیز حل می‌شود

¹ Optimum Water Content

۳- بحث و بررسی

۳-۱- جذب و نگهداری آلایند سرب توسط خاک بنتونیت

آلاینده فلز سنگین در خاک توسط فازهای مختلفی همچون: جذب ذرات رسی، رسوب اکسید و هیدروکسیدی، هیدروکسید کربناتی و جذب شده به مواد آلی و دیگر ترکیبات شیمیایی نگهداری می‌شود [21].

ه منظور مطالعه رفتار بنتونیت در میزان جذب و نگهداری فلز سنگین، در این تحقیق یک سری آزمایش جذب صورت گرفته که نتایج آن در شکل (۱) ارائه شده‌است. با توجه به شکل (۱) بیشترین میزان نگهداری فلز سنگین سرب در بنتونیت حدود 90 cmol/kg-soil است. مقدار pH خاک بنتونیت با حل شدگی فلز سنگین در آب و آزادسازی یون H^+ ، از $pH 9/8$ در شرایط عدم حضور آلودگی تا $pH 4$ در غلظت‌های زیاد آلودگی کاهش یافته‌است.

شکل ۱. قابلیت نگهداری فلز سنگین سرب توسط بنتونیت

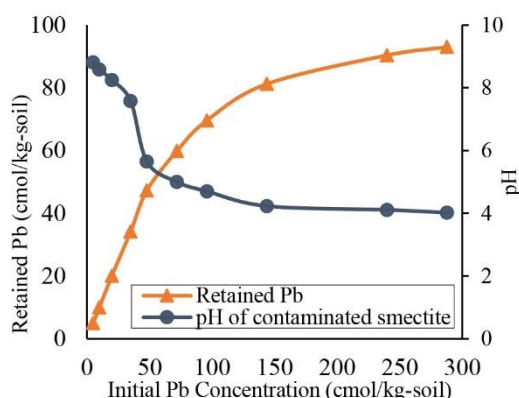


Fig. 1. Pb retention and pH variations of the bentonite sample.

۳-۲- انحلال پذیری کربنات کلسیم در pHهای متفاوت

کانی‌های کربناتی نقش مهمی در جذب و نگهداشت فلز سنگین ایفا می‌کنند [21]. کربنات موجود در خاک ضمن عملکرد با عنوان بافر، با آلاینده فلز سنگین وارد واکنش شده و فلز سنگین به صورت هیدروکسید کربنات فلزی در فاز جامد رسوب می‌کند [22].

با توجه به نتایج شکل (۲) با افزایش غلظت آلاینده در حدود 100 cmol/kg.soil و قرارگیری در محدوده $pH 5$ ، تقریباً تمامی کلسیم کربنات موجود در خاک انحلال یافته و سبب تشکیل رسوبات کربناتی شده‌است.

[6]. با توجه به حضور کربنات کلسیم در سیمان پرتلند آهکی و ایجاد محیط قلیایی توسط سیمان، باید رسوب همزمان فلز سنگین سرب و کربنات کلسیم در مقادیر مختلف pH بررسی شود. بر این اساس، تغییرات رسوب آلاینده سرب در حضور کربنات کلسیم و با تغییر pH اندازه‌گیری شده است. برای این منظور، ابتدا یک لیتر محلول استاندارد Pb با غلظت 500 ppm به نحوی آماده شد که نسبت وزنی $(Pb(NO_3)_2)$ به $(CaCO_3)$ برابر با ۴ باشد. سپس مقدار 20 ml از محلول استاندارد، همراه با محلول سدیم هیدروکسید یک مولار (1M) در محدوده $pH 2$ تا 12 تنظیم شد. به منظور ایجاد شرایط تعادل، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده مکانیکی تکان داده شده و به مدت ۲۴ ساعت به طور ثابت نگهداری شدند. در ادامه، pH نهایی محلول اندازه‌گیری شده و پس از سانتریفیوژ، فاز مایع نمونه از کاغذ صافی با استفاده از دستگاه مکش EPEC عبور داده شده‌است. در مرحله بعد، فاز مایع فوق در لوله آزمایش ریخته شده و غلظت کاتیون‌های Pb در محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شده‌است. با روش مشابه، انحلال‌پذیری کربنات کلسیم نیز در بازه‌های مختلف pH مورد بررسی قرار گرفته و درصد انحلال آن اندازه‌گیری شده‌است. همچنین در این تحقیق مقدار عدم تحرک فلزات سنگین بعد از انجام فرآیند تثبیت و جامدسازی با استفاده از آزمایش آبتیو آلودگی (TCLP)^۱ بر اساس روش EPA-1311 ارزیابی شده‌است و مقدار غلظت آلاینده توسط دستگاه جذب اتمی مدل GBC932 AB Plus اندازه‌گیری شده‌است.

مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) می‌تواند به عنوان معیاری برای پیشرفت واکنش هیدراسیون استفاده شود [5]. در این پژوهش، نمونه‌ها پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در سیستم بسته و قرارگیری در اتاقک مرطوب با دمای 23°C درجه سانتی‌گراد و درصد طوبت ۹۵٪ طبق استاندارد ASTM D1633-17 و با دانسیته یکسان $1/85$ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته‌اند.

همچنین از آزمایش اشعه ایکس (XRD) برای بررسی پیشرفت فرآیند هیدراسیون چسباننده و برهمکنش چسباننده با کانی‌های رسی آلوده استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت پودری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. به منظور انجام آزمایش‌های XRD از دستگاه Siemens- Diffractometer D8 Advance استفاده شده‌است.

¹ Toxicity Characteristic Leaching Procedure

شرط شروع سازوکار جامدسازی، قرارگیری pH محیط معادل با کمترین مقدار انحلال‌پذیری آلاینده است [23]. در شکل (۳)، با توجه به الگوی انحلال سرب در حضور کربنات کلسیم، نمودار تغییرات به ۵ ناحیه تفکیک شده است. به طوری‌که در ناحیه C بیشترین رسوب سرب صورت گرفته است.

۳-۴- پایش تغییرات pH نمونه‌های تثبیت / جامدسازی شده

بر اثر فرآیند هیدراسیون سیمان و تولید پرتلندیت (CH) و آزاد شدن یون OH^- ، pH محیط افزایش می‌یابد [23]. اگرچه حضور فلز سنگین در خاک باعث اسیدی شدن محیط می‌شود اما با افزودن سیمان و پیشرفت فرآیند هیدراسیون، pH محیط قلیایی می‌شود. با توجه به تأثیر pH بر الگوی رسوب آلاینده‌های فلز سنگین، انتخاب مقدار مصالح چسباننده (ترکیب سیمان و کربنات کلسیم) باید به شکلی باشد که pH محیط در محدوده رسوب سرب قرار گیرد. در واقع اگر مقدار آلاینده بیش از ظرفیت نگهداشت خاک باشد لازم است آلاینده آزاد قبل از فرآیند جامدسازی توسط محصولات سیمانی تثبیت (رسوب) شود. از سوی دیگر، افزایش مقدار آلاینده سرب به کاهش بیشتر pH می‌انجامد به طوری‌که با افزایش بیشتر مقدار آلاینده، مقاومت یونی الکترولیت افزایش یافته و برای حصول یک pH مشخص در محدوده رسوب سرب، مقدار سیمان بیشتری لازم خواهد بود [۵]. بر این اساس انتخاب مقدار مصالح به شکلی است که با تغییر pH محیط، سبب رسوب آلاینده سرب شود و در ادامه شرایط برای جامدسازی آلاینده رسوب کرده آماده شود. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، pH تمامی نمونه‌های جدول (۲) در محدوده رسوب حداکثری سرب قرار دارند. در واقع می‌توان بیان کرد که شرایط برای سازوکار جامدسازی و کپسوله کردن آلاینده فراهم شده است.

با توجه به شکل (۴)، در درصد رطوبت‌های متفاوت و مقدار جایگزینی کربنات کلسیم مختلف، مقدار pH در طی زمان در بازه رسوب (۱۰-۱۲) قرار گرفته است. با توجه به شکل (۲) این مقدار pH محیط در محدوده رسوب کربنات کلسیم قرار گرفته است. بنابراین کربنات کلسیم موجود در سیمان پرتلند آهکی انحلال نیافته و در نمونه‌های فوق دارای نقش پرکنندگی است. به بیان دیگر، به دلیل حضور آلاینده آزاد و لزوم تثبیت آلاینده سرب مقدار سیمان در چسباننده مورد استفاده به شکلی است که pH محیط در

شکل ۲. حلالیت و رسوب کلسیم کربنات در pH های مختلف

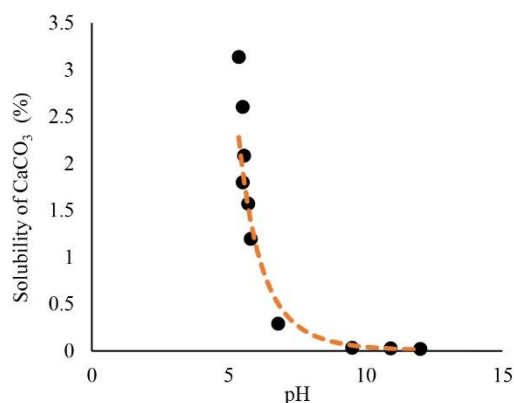


Fig. 2. pH influence on the solubility of calcium carbonate and precipitation pattern of Ca ions

شکل ۳. تأثیر pH بر انحلال پذیری سرب در حضور کلسیت

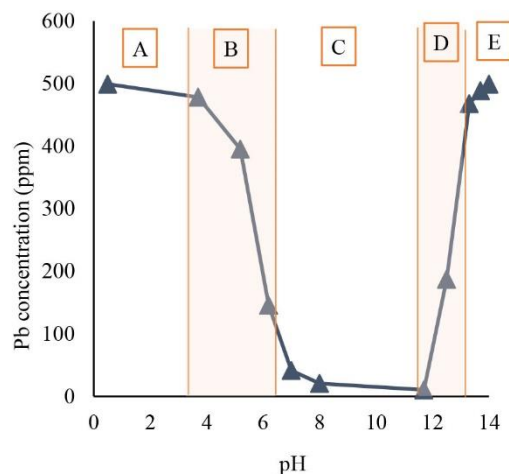


Fig. 3. pH influences on the solubility pattern of Pb at the presence of calcium carbonate

۳-۳- رسوب سرب در حضور کلسیت و در pH های مختلف

رسوب فلز سنگین (تثبیت) به دو روش رسوب کربناتی و هیدروکسیدی امکان‌پذیر است. از نکات مهم در تثبیت و جامدسازی فلز سنگین سرب، ایجاد شرایط برای رسوب سرب است [6]. بنابراین برای ارزیابی همزمان رفتار سرب و کلسیم کربنات با تغییرات pH، یک مجموعه آزمایش رسوب انجام شده است. خاصیت آمفوتریک فلز سنگین سرب بیان می‌کند که شرط رسوب هیدروکسیدی، قرارگیری pH محیط در محدوده ۱۰ تا ۱۲ است [22].

شکل (۳) نشان می‌دهد که با حضور کلسیم کربنات نیز روند کلی رسوب هیدروکسیدی فلز سنگین سرب تغییر نمی‌کند. اما محدوده pH رسوب گسترش یافته و به ۷/۵ تا ۱۲ رسیده است.

در طی زمان عمل آوری و بین بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روز انتظار می‌رود که حضور کربنات کلسیم ضمن رفتار پرمکنندگی به صورت هسته‌زایی نیز عمل کرده و باعث افزایش مقاومت نمونه شود. بنابراین لازم است که تغییرات همزمان واجدبی در آزمایش TCLP و مقاومت تک محوری مورد توجه قرار گیرد.

۳-۵- آبتیابی آلودگی (TCLP) و مقاومت فشاری (UCS)

در آزمایش TCLP، معیار EPA در ارزیابی نمونه‌های جامدسازی شده حاوی یون سرب، میزان واجدبی کمتر از ۵ ppm است [19]. مقاومت تک محوری معیاری برای تشکیل ژل‌های C-S-H و C-A-S-H بوده که روش مناسبی برای بررسی نرخ جامدسازی است [24]. در آزمایش مقاومت تک محوری نیز معیار EPA در ارزیابی نمونه‌های جامدسازی شده حاوی یون سرب، حصول حداقل مقاومت MPa ۰/۳۵ است [19]. درصد رطوبت ساخت نمونه‌ها بر مقاومت و فرآیند تثبیت و جامدسازی اثرگذار است [16]. بنابراین ضمن بررسی مقاومت نمونه‌ها باید نتایج TCLP نیز بررسی شود. بدین منظور در شکل (۵-الف) و شکل (۵-ب) به ترتیب نتایج مقاومت تک‌محوری و واجدبی آزمایش TCLP برای نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد سیمان در مدت زمان ۷ روز و ۲۸ روز ارائه شده است. بر اساس شکل (۵-الف)، مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد سیمان در مدت زمان عمل آوری ۷ روز با افزایش رطوبت بهینه کاهش یافته است. در نتایج TCLP، نمونه‌های ۷ روز معیار EPA را احراز نکرده‌اند و با تغییر درصد رطوبت بهینه نتایج تغییر نکرده است. در واقع، در مدت زمان ۷ روز، فقط سازوکار تثبیت در نمونه‌ها حاکم بوده است [16]. اگرچه این استدلال به معنای تفکیک کامل فرایند تثبیت و جامدسازی در دو بازه مختلف زمانی نیست.

در شکل (۵-ب) پیشرفت واکنش‌های پوزولانی در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روز، سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده و همزمان افزایش فرایند جامدسازی باعث کاهش مقدار واجدبی نمونه‌ها در آزمایش TCLP شده است. با توجه به کاهش اندک مقدار pH نمونه‌ها و تغییرات واجدبی در نمونه‌های ۲۸ روز، به نظر می‌رسد سازوکار جامدسازی شرایط احراز معیار EPA نمونه‌ها را فراهم کرده است. سایر پژوهشگران نیز بر نقش پیشرفت فرایند جامدسازی بر کاهش واجدبی از نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده تأکید کرده‌اند [24].

محدوده رسوب سرب (pH محدوده ۱۰ تا ۱۲) قرار گرفته است. در pH بیش از ۱۰ نیز نمودار انحلال‌پذیری (شکل ۲)، کربنات کلسیم نامحلول است.

شکل ۴. تغییرات pH نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده بتونیت آلوده به 100 cmol/kg-soil فلز سنگین سرب همراه با ۱۵٪ سیمان در درصدهای مختلف رطوبت

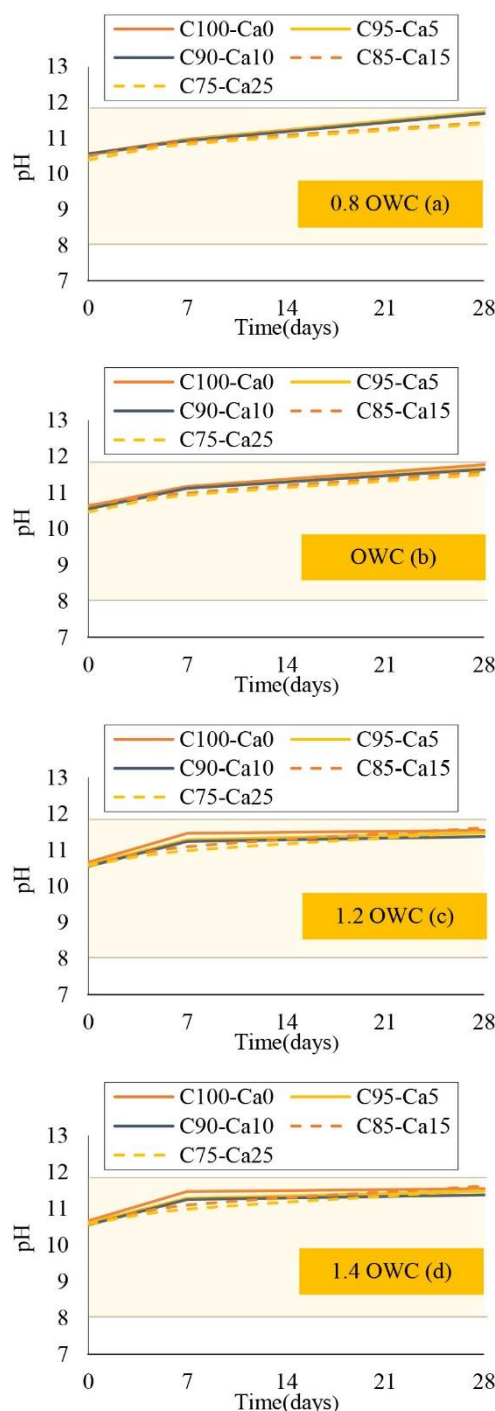


Fig. 4. Changes in pH of solidified samples of bentonite contaminated with 100 cmol/kg-soil pb with 15% cement in different moisture content.

شکل ۵. تغییرات مقاومت و واجدبی یون سرب
الف- نمونه های ۷ روز ب- نمونه های ۲۸ روز در درصد رطوبت بهینه متفاوت

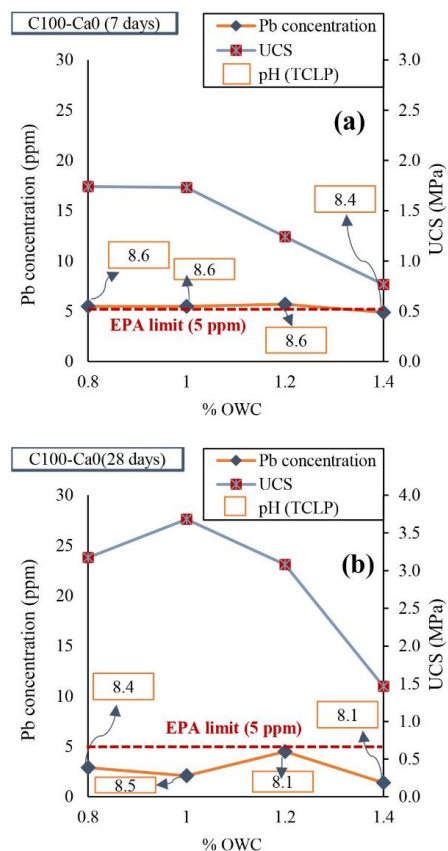


Fig. 5. Variations of UCS and released lead at different OWC
a. 7 days – b. 28 days.

در شکل (۶) نتایج مقاومت تک محوری و آزمایش TCLP در درصدهای جایگزینی کربنات کلسیم مختلف مطابق با جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس شکل (۶)، با جایگزینی کربنات کلسیم تا مقادیر ۱۵٪، مقاومت تک محوری تمامی نمونه ها پس از ۷ روز از حداقل مقاومت مورد نظر در استاندارد EPA بزرگتر بوده است.

در واقع بر اساس شکل (۲)، در مقادیر pH بزرگتر از ۱۰، کربنات کلسیم موجود در سیمان پرتلند آهکی قابلیت انحلال ندارد و نقش پرکنندگی آن و عملکرد هسته زایی آن، غالب است. ضمن آنکه بر اساس شکل (۳)، در این محدوده از تغییرات pH، رسوب یون سرب حداکثر بوده و مقدار واجدبی یون سرب کاهش یافته است.

به منظور بررسی سازوکار جامدسازی، در شکل (۷) نتایج مقاومت تک محوری و TCLP نمونه های ۲۸ روز ارائه شده است.

شکل ۶. تغییرات مقاومت و واجدبی یون سرب
در نمونه ۷ روز برای درصد رطوبت متفاوت

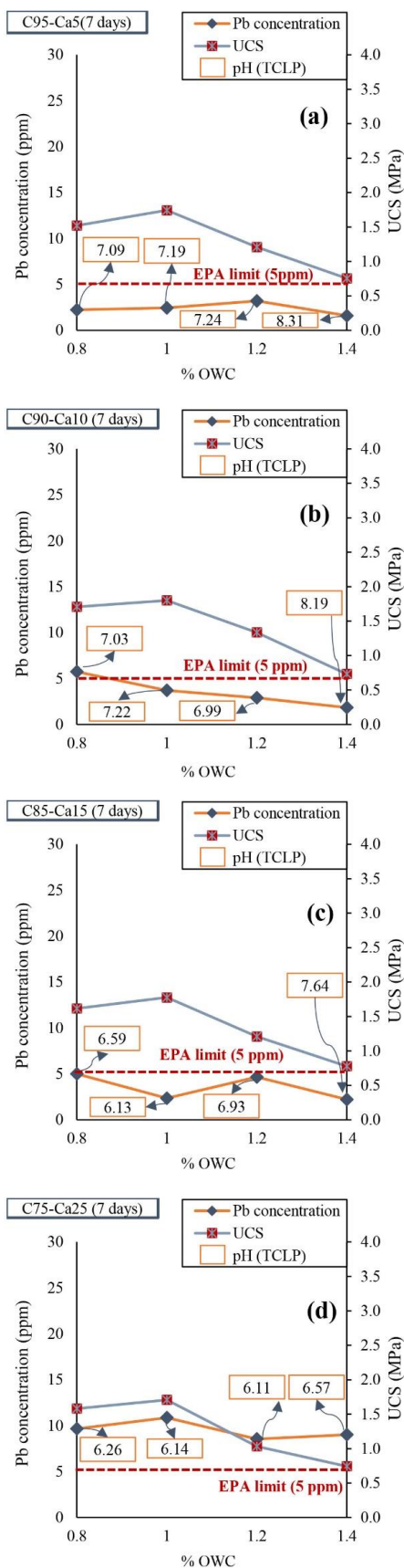


Fig. 6. UCS and released lead at different OWC

شکل ۷. تغییرات مقاومت و واجذبی یون سرب نمونه ۲۸ روز

برای درصد رطوبت بهینه متفاوت

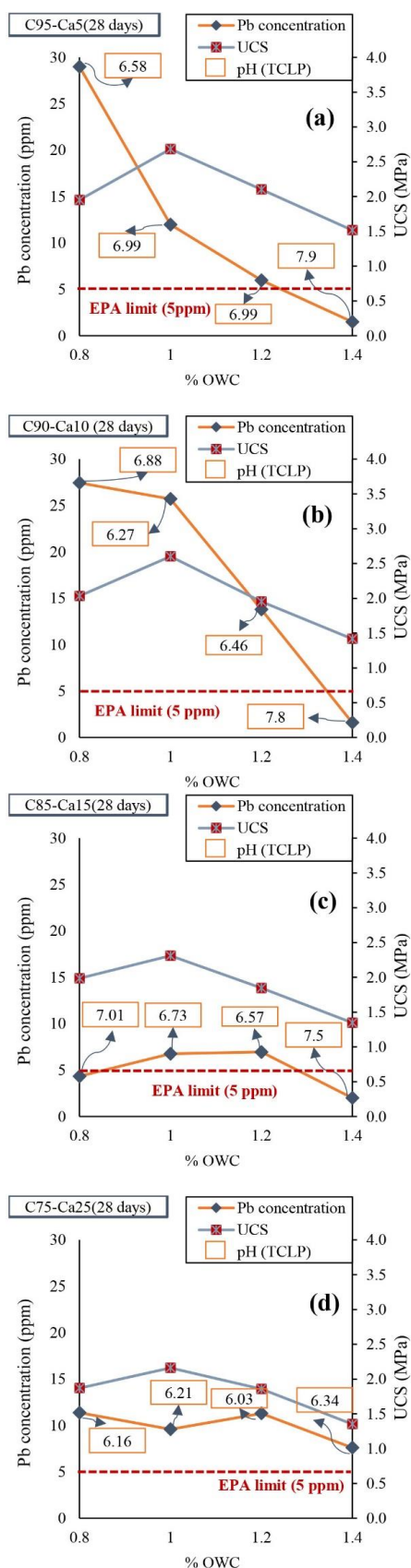


Fig. 7. Variations of UCS and released lead at different OWC in 28 days.

با افزایش مدت زمان از ۷ به ۲۸ روز و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی، افزایش مقاومت در تمامی نمونه‌ها صورت گرفته است. در تمامی موارد جایگزینی کربنات کلسیم، مشاهده می‌شود که افزایش درصد رطوبت باعث کاهش مقدار واجذبی شده است به طوری که در ۱/۴ درصد رطوبت بهینه و ۱۵ درصد جایگزینی کربنات کلسیم، معیار EPA تأمین شده است.

از سوی دیگر، ظرفیت بافری به مقاومت در برابر تغییرات pH مرتبط است. اگرچه انتظار می‌رود که افزایش درصد کربنات کلسیم سبب افزایش ظرفیت بافری خاک شود [5]، با این وجود بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۶ و ۷)، افزایش درصد کربنات کلسیم سبب تغییرات جزئی در مقدار نشت (واجذبی) سرب از نمونه شده است به طوری که حتی با افزایش درصد کربنات کلسیم به مقادیر بیش از ۱۵٪، مقدار یون سرب واجذبی شده در آزمایش TCLP تا حدودی افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر سازوکار افزایش ظرفیت بافری در حالت افزایش درصد کربنات کلسیم، که در شرایط عادی مورد انتظار است و در برخی نمونه‌ها احراز نشده است، سازوکار دیگری دخیل بوده است. از آنجا که بر اساس نتایج شکل (۴)، مقادیر pH نمونه‌ها یکسان است می‌توان نتیجه‌گیری نمود که سازوکار جامدسازی در حضور جایگزینی بخشی از سیمان با مقادیر بیش از ۱۵٪ کربنات کلسیم عملکرد مناسبی نداشته است. با توجه به نتایج شکل‌های (۶ و ۷)، برای بررسی نرخ پیشرفت واکنش‌های پوزولانی، لازم است تا نرخ رشد سازوکار جامدسازی از طریق ارزیابی درصد رشد مقاومت نمونه‌های ۲۸ روز نسبت به نمونه‌های فاقد کلسیم کربنات بررسی شود. به عبارت دیگر درصد رشد مقاومت بیانگر سازوکار جامدسازی است [24].

بر اساس نتایج شکل (۸) به طور کلی با افزایش درصد حضور کربنات کلسیم، مقاومت نمونه‌های ۲۸ روز نسبت به نمونه‌های فاقد کربنات کلسیم کاهش یافته است. می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در نمونه‌های دارای رطوبت کمتر از ۱/۴ برابر رطوبت بهینه، کربنات کلسیم به عنوان پرکننده (فیلر) عمل کرده و به بیان دیگر، پدیده هسته‌زایی که باعث افزایش مقاومت می‌شود شکل نگرفته است. در حالی که در نمونه‌های حاوی ۱/۴ برابر درصد رطوبت بهینه، ابتدا افزایش درصد مقاومت در ۵ درصد جایگزینی و مقاومت برابر با نمونه فاقد کربنات کلسیم تا ۱۵ درصد جایگزینی

و C75-Ca25 تقریباً برابر است.

با توجه به شکل‌های (۲ و ۴)، pH محیط پس از اختلاط در محدوده ۱۰ تا ۱۲ قرار گرفته‌است. در این شرایط، کربنات کلسیم موجود در ترکیبات سیمان و کربنات کلسیم اضافه شده به نمونه، انحلال نیافته‌است. بنابراین کربنات کلسیم به عنوان فیلر عمل کرده و تأثیری بر شدت قله رسوبات کربناتی نداشته‌است. در نتیجه با توجه به قرارگیری pH نمونه‌ها در محدوده رسوب فلز سنگین سرب شکل (۳) و برابری تقریبی شدت قله رسوبات کربناتی، فاز تثبیت در سه نمونه مورد مطالعه برابر است. در حالات فوق انتظار می‌رود که فرآیند جامدسازی با تشکیل محصولات هیدراسیون سیمان (C-A-S-H, ICDD 022-0518), (C-S-H, ICDD 042-0538)

صورت گرفته‌است [16]. لازم به تأکید است با وجود آنکه آزمایش FTIR از بهترین آزمایش‌ها برای شناسایی روند شکل‌گیری ترکیبات آمورف است، ولی با وجود باور رایج، ژل‌های CSH کاملاً آمورف نیستند و با اصطلاح نیمه بلوری معرفی می‌شوند [26]. در واقع، ژل CSH محدوده وسیعی از مواد را به خود اختصاص داده‌است. ساختار و ترکیب شیمیایی، آمورف و کریستالی بودن وابسته به نسبت Ca/Si است [27]. به طور مشخص در ترکیب خاک رسی بتونیت و سیمان، شکل‌گیری کریستال‌های CSH توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [5]. پژوهشگران نشان داده‌اند که فاز نیمه کریستالی CSH(I) که می‌تواند در اندرکنش بین هیدروکسید کلسیم و یون سیلیکا و همچنین با ترکیب سیلیکات سدیم و نمک‌های کلسیمی شکل گیرد دارای ساختار کریستالی شبیه کانی توبرموریت است. به طوری که این ساختار کریستالی در نسبت مولاریته ۰/۸ تا ۱/۵ Ca/Si تشکیل می‌شود. تحقیقات نشان داده است که با افزایش نسبت Ca/Si درجه کریستالی CSH(I) کاهش می‌یابد [28]. همچنین تعداد زیادی از پژوهشگران که نمونه‌های سیمان آسیاب شده و یا نمونه‌های دارای سن زیاد سیمان-خاک را مطالعه کرده‌اند شکل‌گیری قله‌های CSH را در پراش پرتو ایکس گزارش نموده‌اند. به عنوان نمونه در استفاده از سرباره فعال شده برای ممانعت از انتقال آلاینده فلز سنگین [29]، تثبیت کننده‌های حاوی رس و کلسیم [30]، اندرکنش سیمان و خاکستر بادی [31] و نیز اندرکنش بتونیت، سیمان و فلز سنگین [5] تشکیل ساختار کریستالی CSH گزارش شده است.

شکل ۸. درصد رشد مقاومت نمونه‌های ۲۸ روز

نسبت به نمونه‌های فاقد کلسیم کربنات

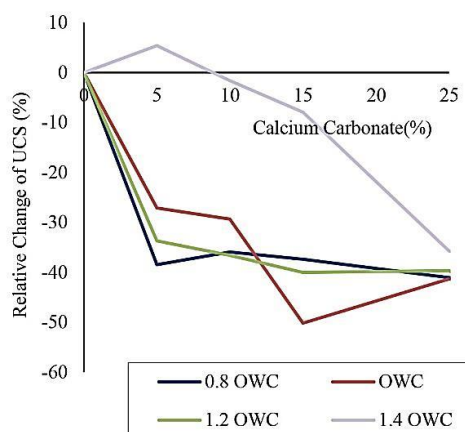


Fig. 8. The strength growth percentage of 28-day samples compared to samples without CaCO_3

مشاهده می‌شود. در نمونه‌های فاقد آلاینده، سایر پژوهشگران نیز نتایج مشابهی را در حالت سیستم عمل‌آوری بسته ارائه کرده‌اند [25]. این مسئله بیانگر اهمیت درصد رطوبت ساخت نمونه‌ها در استفاده از سیمان پرتلند آهکی است.

۳-۶- آنالیز پراش پرتو ایکس

به منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌ها، آنالیز (XRD) روی نمونه‌های با ۱/۴ برابر درصد رطوبت بهینه (بیشترین جامدسازی) انجام شده است. بر این اساس نمونه‌های C90-Ca10, C100-Ca0 و C75-Ca25 انتخاب شده و پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری، پراش پرتو ایکس آن‌ها تهیه شده‌است. نتایج شکل (۹) با استفاده از پرتو Cu-Kα در محدوده ۲θ ۴ تا ۷۰ درجه تهیه شده‌است. همچنین برای تحلیل نتایج پراش پرتو ایکس از نرم‌افزار X-Pert High Score Plus بر مبنای پایگاه داده‌ها (PDF-2/ICDD (2017 release) استفاده شده‌است. تفکیک فازهای تثبیت و جامدسازی، با شناسایی فازهای رسوبات کربناتی سرب شامل:

کربنات سرب (PbCO_3 , ICDD 017-0732)، کربنات اکسید سرب ($\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{PbO}$, ICDD 019-0681) و کربنات هیدروکسید سرب ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$, ICDD 019-0680) انجام شده است. نتایج زیر قابل تحلیل و استخراج است:

مقدار شدت قله‌های مانند رسوبات کربناتی حاوی سرب (قله‌های با شماره ۱، ۴ و ۶) در شکل (۹) به واسطه کربنات اولیه موجود در رس جدول (۱) در نمونه‌های C9-Ca10, C100-Ca0

تغییر نسبت‌های استوکیومتری Ca/Si و در نتیجه افزایش سرعت هیدراسیون می‌شود [33]، همین موضوع می‌تواند سبب افزایش پیشرفت واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های حاوی کربنات کلسیم در شکل (۹) شده باشد.

بر اساس شکل (۹)، شدت قله ترکیبات پوزولانی در نمونه‌های C90-Ca10 و C75-Ca-25 نسبت به نمونه C100-Ca0 در کوتاه مدت و درازمدت افزایش یافته است. از آنجا که افزودن کربنات کلسیم و جایگزینی آن با سیمان علاوه بر ایجاد مکان‌هایی به‌عنوان هسته شکل‌گیری برای رسوب محصولات هیدراسیون [32]، سبب

شکل ۹. نتایج منحنی پراش پرتو ایکس

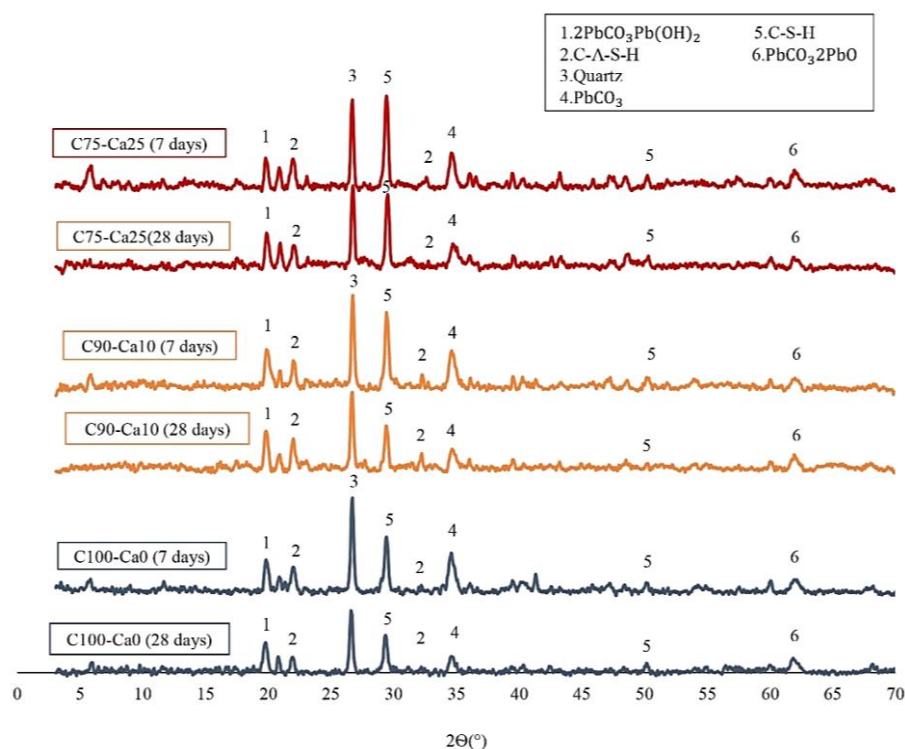


Fig. 9. XRD Results

هیدراسیون می‌شود [34]. ضمن آنکه کربنات کلسیم با اثر هسته‌زایی و ایجاد مکان‌هایی به‌عنوان هسته شکل‌گیری و رسوب محصولات هیدراسیون، موجب تسريع واکنش هیدراسیون و پیشرفت درجه هیدراسیون می‌شود [35]. با این وجود با توجه به pH اولیه در ساخت نمونه‌ها که با هدف رسوب آلایندة آزاد صورت گرفته‌است؛ کربنات کلسیم انحلال نیافته و این امر منجر به شکل‌گیری فاز کریستالی جدید نشده و تغییری در موقعیت قله‌ها صورت نگرفته‌است.

همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۹) مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه جامدسازی شده با استفاده از ترکیب چسباننده حاوی کربنات کلسیم در فاصله ۷ تا ۲۸ روز عمل‌آوری، مقادیر رسوبات کربناتی کاهش جزئی یافته‌است. از سوی دیگر بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۶ و ۷)، برای هر دو نمونه

در واقع، حضور کربنات کلسیم در کنار سیمان پرتلند که به‌عنوان سیمان پرتلند آهکی شناخته می‌شود، سبب آثار همزمان فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌ها می‌شود. این اثر از دو جنبه قابل بررسی و تأکید است. از یک سو از آنجا که سیمان در واقع به‌عنوان یک پوزولان فعال رفتار می‌کند به محض دریافت رطوبت، محصولات مرتبط با هیدراسیون را تولید می‌کند. لیکن کربنات کلسیم اگرچه خواص قابل قبولی دارد اما یک ترکیب فعال شده نیست و بنابراین با جایگزینی آن به جای سیمان، روند هیدراسیون و میزان محصولات آن دچار اختلال خواهد شد. از سوی دیگر، در صورت کوچک‌تر بودن اندازه ذرات کربنات کلسیم نسبت به سیمان، توزیع اندازه ذرات در دامنه وسیع‌تری قرار گرفته و منجر به پراکندگی دانه‌های سیمان می‌شود. در نتیجه با جلوگیری از لخته شدن سیمان، موجب انحلال بهتر مواد سیمانی و بهبود فرآیند

افزایش درصد کربنات کلسیم از مقدار بهینه، و محبوس شدن بخشی از این کربنات کلسیم اضافی در فضای هسته‌ای شکل گرفته، قابلیت محبوس کردن آلاینده توسط ترکیبات پوزولانی کاهش یافته و در نتیجه، آزمایشات TCLP واجدبی بزرگتری را نشان داده‌اند.

- با افزایش درصد کربنات کلسیم به مقادیر بیش از ۱۵٪، مقدار یون سرب واجدبی شده در آزمایش TCLP تا حدودی افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر سازوکار افزایش ظرفیت بافری در حضور افزایش درصد کربنات کلسیم که در شرایط عادی مورد انتظار است، سازوکار دیگری نقش تعیین‌کننده داشته است. از آنجا که برای نمونه‌های فوق، مقادیر pH نمونه‌ها یکسان است می‌توان نتیجه‌گیری نمود که سازوکار جامدسازی در حضور جایگزینی بخشی از سیمان با مقادیر بیش از ۱۵٪ کلسیم کربنات تأثیر مطلوبی نداشته‌است.
- با توجه به نتایج آزمایش TCLP، بیش‌ترین مقدار جایگزینی سیمان با کربنات کلسیم که معیار EPA برای فلز سنگین سرب را تأمین کرده‌است، ۱۵ درصد می‌باشد. این موضوع سبب صرفه‌جویی قابل توجه در میزان سیمان در فرایند جامدسازی پایه سیمانی می‌شود.
- جایگزین کردن ۲۵٪ از سیمان مصرفی با کربنات کلسیم، اگرچه باعث سرعت بخشیدن به فرآیند هیدراسیون می‌شود، اما به دلیل مقدار زیاد این ماده به نظر می‌رسد قرارگیری کلسیم کربنات در داخل ژل‌های حاصل از هیدراسیون، مانع کپسوله کردن رسوبات فلزسنگین شده‌است.

۵- مراجع

- [1] Chen, L., Nakamura, K. and Hama, T., 2023. Review on stabilization/solidification methods and mechanism of heavy metals based on OPC-based binders. *Journal of Environmental Management*, 332.
- [2] Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y.S., Tack, F.M., Rinklebe, J. and O'Connor, D., 2020. Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment international*, 134.
- [3] Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., Hall, M.H., Guo, R., Wang, H., Cui, J. and He, X., 2013. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma*, 192, pp.50-58.
- [4] Muthu, M., Santhanam, M. and Kumar, M., 2018. Pb

فوق، افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز تا ۲۸ روز سبب کاهش غلظت آلاینده در آزمایش TCLP شده‌است. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش زمان عمل‌آوری، ضمن کاهش شدت قله مانند ترکیبات پوزولانی، مقادیر بیشتری از رسوبات کربناتی از طریق سازوکار کپسوله شدن نگهداری شده‌اند. از سوی دیگر، افزایش مقدار جایگزینی کربنات کلسیم اگرچه باعث افزایش سرعت هیدراسیون سیمان و افزایش شدت قله ژل‌های حاصل از هیدراسیون می‌شود، اما به نظر می‌رسد که با عبور درصد کربنات کلسیم از مقدار بهینه، اثر هسته‌زایی کربنات کلسیم در افزایش تجمع ژل‌های پوزولانی در اطراف آن [26] و پرشدن توده اسفنجی ژل‌های C-S-H و C-A-S-H توسط کربنات کلسیم امکان کپسوله کردن رسوبات آلاینده را کاهش داده‌است. به شکلی که با افزایش جایگزینی درصد کربنات کلسیم از مقدار بهینه، میزان واجدبی در آزمایش TCLP بیش از مقدار استاندارد استاندارد EPA (۵ ppm) شده‌است.

۴- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایشات این تحقیق حاکی از آن است که جایگزینی ۱۵ درصد کلسیم کربنات به جای سیمان، سبب حفظ شرایط لازم برای وقوع رسوب آلاینده (سازوکار تثبیت) و جامدسازی شده‌است. به طوری که برای نمونه حاوی ۱/۴ درصد رطوبت بهینه، مقدار واجدبی یون سرب در آزمایش TCLP برابر با ۲ میلی گرم بر لیتر و مقاومت تک‌محوری نمونه برابر با ۱/۴۵ MPa بدست آمده و هر دو معیار EPA احراز شده است.
- با توجه به آنکه مقدار pH نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده با ۱۵ درصد چسباننده (سیمان، ترکیب سیمان و کربنات کلسیم) در محدوده رسوب فلز سنگین سرب قرار گرفته‌است، در واقع در نمونه‌های حاوی درصد رطوبت مختلف، فاز نگهداری آلاینده از طریق سازوکار رسوب در تمام نمونه‌های مورد مطالعه برابر بوده‌است. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در نمونه حاوی حاوی ۱/۴ درصد رطوبت بهینه، تفاوت در میزان واجدبی در آزمایش (TCLP) به علت تشکیل ژل‌های C-S-H و C-A-S-H در طی فرآیند هیدراسیون (جامدسازی) و چگونگی عملکرد آن است. به طوری که با

- method on the stabilization/solidification process of cement base in bentonite contaminated with lead ion. *Sharif Civil Engineering Journal*. [In Persian]
- [17] ASTM, 2017. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Vol. 8.
- [18] European Committee for Standardization [EN 197-1], 2000. Cement-part 1, composition, specifications and uniformity criteria for common cements, Brussels, Belgium.
- [19] U.S. Environmental Protection Agency [USEPA], Fate, 2008. transport and transformation test guidelines. OPPTS 835.1230 Adsorption/Desorption (Batch Equilibrium). *Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances USEPA*, Washington DC.
- [20] Behnood, A., 2018. Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, pp.14-32.
- [21] Plassard, F., Winiarski, T. and Petit-Ramel, M., 2000. Retention and distribution of three heavy metals in a carbonated soil: comparison between batch and unsaturated column studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, 42(2-4), pp.99-111.
- [22] Malviya, R. and Chaudhary, R., 2004. Study of the treatment effectiveness of a solidification/stabilization process for waste bearing heavy metals. *Journal of material cycles and waste management*, 6, pp.147-152.
- [23] Liu, Y., Molinari, S., Dalconi, M.C., Valentini, L., Bellotto, M.P., Ferrari, G., Pelay, R., Rilievo, G., Vianello, F., Salviulo, G. and Chen, Q., 2023. Mechanistic insights into Pb and sulfates retention in ordinary Portland cement and aluminous cement: Assessing the contributions from binders and solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, 458.
- [24] Zhao, Z., Liu, W., Jiang, Y., Wan, Y., Du, R. and Li, H., 2022. Solidification of heavy metals in lead smelting slag and development of cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 359.
- [25] Ramezaniapour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M. and Moodi, F., 2009. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), pp.715-720.
- [26] Mesecke, K., Warr, L.N. and Malorny, W., 2022. Structure modeling and quantitative X-ray diffraction of C-(A)-SH. *Journal of applied crystallography*, 55(1), pp.133-143.
- [27] Richardson, I.G., 2014. Model structures for c-(a)-sh (i). *Structural Science*, 70(6), pp.903-923.
- [28] Beaudoin, J. and Odler, I., 2019. Hydration, setting and hardening of Portland cement. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 5, pp.157-250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8>.
- removal in pervious concrete filter: Effects of accelerated carbonation and hydraulic retention time. *Construction and Building Materials*, 174, pp.224-232.
- [5] Ouhadi, V.R., Yong, R.N. and Deiranlou, M., 2021. Enhancement of cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay. *Journal of Hazardous Materials*, 403.
- [6] Mulligan, C.N. and Yong, R.N., 2004. Natural attenuation of contaminated soils. *Environment international*, 30(4), pp.587-601.
- [7] Rajendran, S., Priya, T.A.K., Khoo, K.S., Hoang, T.K., Ng, H.S., Munawaroh, H.S.H., Karaman, C., Orooji, Y. and Show, P.L., 2022. A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. *Chemosphere*, 287.
- [8] Xia, W.Y., Feng, Y.S., Du, Y.J., Reddy, K.R. and Wei, M.L., 2018. Solidification and stabilization of heavy metal-contaminated industrial site soil using KMP binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6).
- [9] Carleo, C., Clark, T., and Wilk, C.M., 2006. Phoenix-award winning Kendall square rises from cement-treated Brownfield site. Publication No. SR854, I11, *Portland Cement Association*.
- [10] Bates, E., and Hills, C., 2016. Stabilization and solidification of contaminated soil and waste: A manual of practice. www.hyggemedia.com and Cluin, USA.
- [11] Reddy, V.A., Solanki, C.H., Kumar, S., Reddy, K.R. and Du, Y.J., 2020. Stabilization/solidification of zinc-and lead-contaminated soil using limestone calcined clay cement (LC3): An environmentally friendly alternative. *Sustainability*, 12(9), pp.1-13.
- [12] Hossain, M.U., Wang, L., Chen, L., Tsang, D.C., Ng, S.T., Poon, C.S. and Mechtcherine, V., 2020. Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong. *Environment International*, 145.
- [13] Hu, X., He, P. and Shi, C., 2024. Carbonate binders: Historic developments and perspectives. *Cement and Concrete Research*, 175.
- [14] Mohammad Eisa, H., Vaezi, I. and Mahboubi Ardakani, A., 2020. Evaluation of solidification/stabilization in arsenic-contaminated soils using lime dust and cement kiln dust. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(4), pp.1683-1692.
- [15] McGrath, R. J., 2008. The Canadian cement industry and innovation towards sustainable development, Cement Association of Canada, Ontario, Canada.
- [16] Ouhadi, V.R., Yousefi B., Safadoost R., 2003. Microstructural evaluation of the effect of processing

- T.S., Cummins, T.K. and Weiss, J., 2013. Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. *Cement and Concrete Composites*, 44, pp.41-49.
- [33] Ramachandran, V.S. and Zhang, C.M., 1986. Influenza del CaCO_3 sulla idratazione e sulle caratteristiche microstrutturali del silicato tricalcio. *II Cemento*, 3, pp.129-152.
- [34] Nadelman, E.I., 2016. Hydration and microstructural development of portland limestone cement-based materials. Dissertation, Doctor of Philosophy in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [35] Craeye, B., De Schutter, G., Desmet, B., Vantomme, J., Heirman, G., Vandewalle, L., Cizer, Ö., Aggoun, S. and Kadri, E.H., 2010. Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(6), pp.908-913.
- [29] Jin, F. and Al-Tabbaa, A., 2014. Evaluation of novel reactive MgO activated slag binder for the immobilisation of lead and zinc. *Chemosphere*, 117, pp.285-294.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.027>.
- [30] Latifi, N., Meehan, C.L., Abd Majid, M.Z. and Horpibulsuk, S., 2016. Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calcium-based non-traditional additive: A micro-level study. *Applied Clay Science*, 132, pp.182-193.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.06.004>.
- [31] Liu, X., Zhao, X., Yin, H., Chen, J. and Zhang, N., 2018. Intermediate-calcium based cementitious materials prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: hydration characteristics and heavy metals solidification behavior. *Journal of hazardous materials*, 349, pp.262-271.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.072>.
- [32] Sun, H., Hohl, B., Cao, Y., Handwerker, C., Rushing,

Content

Article Title and Authors Names	Page
Investigating The Dynamic Buckling of A Column with Variable Section and Viscous Damper under Intermittent Axial Load <i>Amir Hossein Taherkhani, Majid Amin Afshar</i>	7
Exploring the Interpretability of the Ordered Probit Algorithm on Analyzing the Influence of Time on Rural Freeways Crash Severity <i>Meysam Effati, Amirmohammad Ramazampoor</i>	21
Investigating the Impact of Hydrological Connectivity on Evaporation from Sistan's Chah Nimeh Reservoirs during Different Meteorological Periods..... <i>Saeid Maleki, Seyed Hossein Mohajeri, Mojtaba Mehraein</i>	33
Output-only Structural Identification of a Double-layer Grid with ball joint system <i>Seyed Rasoul Nabavian, Seyedamin Mostafavian, Bahram Navayi Neya, Mohammad Reza Davoodi</i>	45
A new approach to assessment of load carrying capacity of damage concrete bridge piers on near-fault earthquakes..... <i>F. Daneshjoo, M. Ansari</i>	59
Evaluation and improvement of the behavior of steel plate shear walls using steel-concrete stiffeners <i>Hadi Zarrintala, Ahmad Maleki, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin</i>	71
Investigation of the Effect of Calcium Carbonate on the Solidification Process of Bentonite and Heavy Metals in Cementitious Base..... <i>Vahid Reza Ouhadi, Rayhaneh Safadoust, Yousefi Behnam, Zeinab Mirzazadeh</i>	87

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	Executive Expert:	Zahra khoiniha
English Editor:	Fateme Torabi	Type and Layout:	Masoud Sarvari

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

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

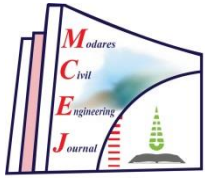
Post Box: 14117-13116.

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 25, Issue 1, 2025 (Serial: 81)

Executive Manager: Farhad Daneshjoo

Owner and Publisher: Tarbiat Modares University

- **Investigating The Dynamic Buckling of A Column with Variable Section and Viscous Damper under Intermittent Axial Load**
Amir Hossein Taherkhani, Majid Amin Afshar
- **Exploring the Interpretability of the Ordered Probit Algorithm on Analyzing the Influence of Time on Rural Freeways Crash Severity**
Meysam Effati, Amirmohammad Ramazampoor
- **Investigating the Impact of Hydrological Connectivity on Evaporation from Sistan's Chah Nimeh Reservoirs during Different Meteorological Periods**
Saeid Maleki, Seyed Hossein Mohajeri, Mojtaba Mehraein
- **Output-only Structural Identification of a Double-layer Grid with ball joint system**
Seyed Rasoul Nabavian, Seyedamin Mostafavian, Bahram Navayi Neya, Mohammad Reza Davoodi
- **A new approach to assessment of load carrying capacity of damage concrete bridge piers on near-fault earthquakes**
F. Daneshjoo, M. Ansari
- **Evaluation and improvement of the behavior of steel plate shear walls using steel-concrete stiffeners**
Hadi Zarrintala, Ahmad Maleki, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin
- **Investigation of the Effect of Calcium Carbonate on the Solidification Process of Bentonite and Heavy Metals in Cementitious Base**
Vahid Reza Ouhadi, Rayhaneh Safadoust, Yousefi Behnam, Zeinab Mirzazadeh

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