



نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۵۰

- ۱ ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی حاوی سیستم
قاب-ستون-پیوند دوگانه تحت زمین لرزه‌های متوالی
فرزانه تفرشی-الهام رجبی-یاسر گلستانی
- ۳۱ مطالعه تأثیر فعال کننده قلبی بر خصوصیات استاتیکی و
دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف
امیر حسین وارسته سیاه اسطلخی - سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد
- ۴۹ توسعه الگوریتم جستجوی نسبیّت خاص برای طراحی
بهینه سازه‌های خربایی
فرناز سلاجقه - وحید گودرزی مهر
- ۷۱ واکاوی دعاوی ساخت، علل و راهکارهای پیشگیری از
آنها در سیستم طرح و ساخت با روش تحلیل مضمون
مصطفی بداقی - مجید پرچمی جلال - علی محقر - عصمت‌الله نورزایی
- ۹۱ مقایسه روش‌های شناسایی سیستم جهت استخراج
پارامترهای مودال (مطالعه موردی: پل ۲۲ بهمن دانشگاه
فردوسی مشهد)
نیما کوثری - ظاهر رضایی - محمود حسن پور گلریز - احمد شوشتری
- ۱۱۵ بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های
باز یافتی و مواد جوانساز در مقابل خرابی رطوبتی
حمیدرضا افتخاری - پرهام حیاتی - علی منیری

سر دبیر: محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهبابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر ابوالفضل محمدزاده مقدم	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

ویراستار ادبی: الهام دهقان

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی باغبان- تکتّم هوشمند

<http://www.srlst.com>

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود.

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

وب سایت: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir> پست الکترونیکی: civil-ferdowsi@um.ac.ir شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۲۴

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

- ۱ **ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی حاوی سیستم قاب-ستون-پیوند دوگانه تحت زمین‌لرزه‌های متوالی**
فرزانه تفرشی- الهام رجبی - یاسر گلستانی
- ۳۱ **مطالعه تأثیر فعال کننده قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف**
امیر حسین وارسته سیاه اسطلخی - سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد
- ۴۹ **توسعه الگوریتم جستجوی نسبیت خاص برای طراحی بهینه سازه‌های خرابایی**
فرناز سلاجقه - وحید گودرزی مهر
- ۷۱ **واکاوی دعاوی ساخت، علل و راهکارهای پیشگیری از آنها در سیستم طرح و ساخت با روش تحلیل مضمون**
مصطفی بداقی - مجید پرچمی جلال - علی محقر - عصمت‌الله نورزایی
- ۹۱ **مقایسه روش‌های شناسایی سیستم جهت استخراج پارامترهای مودال (مطالعه موردی: پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد)**
نیما کوثری - ظاهر رضایی - محمود حسن پور گلریز - احمد شوشتری
- ۱۱۵ **بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های بازیافتی و مواد جوانساز در مقابل خرابایی رطوبتی**
حمیدرضا افتخاری - پرهام حیاتی - علی منیری



Seismic Evaluation of Steel Frames with Dual Linked-Column- Frame under Successive Earthquakes*

Research Article

Farzaneh Tafreshi¹, Elham Rajabi² , and Yaser Golestani³DOI: [10.22067/jfcej.2025.90190.1324](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.90190.1324)

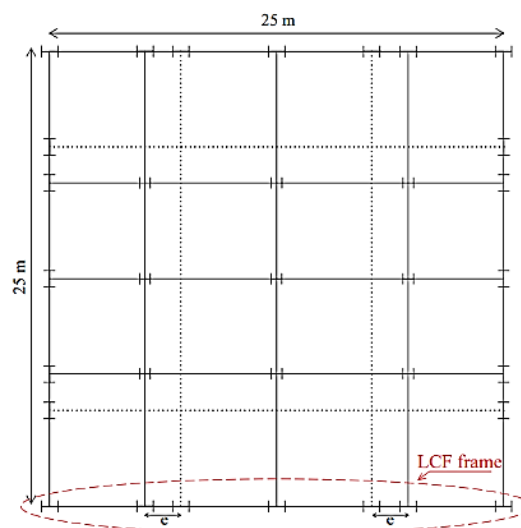
1- Introduction

Earthquakes are known as one of the most significant causes of structural damage. Since Iran is located in the high seismic belt, numerous major faults can lead to current severe earthquakes. In these zones, buildings are often subjected to successive earthquakes and substantial damage. This phenomenon typically occurs in short time intervals. Due to the limited time for repair and restoration, damages will be accumulated and casualties are more severe than single earthquakes. Although the seismic design codes primarily focus on main-shock events for "design earthquake", the performance of structures under successive earthquakes needs more comprehensive examinations. Because the caused damage by consecutive shocks is significantly greater than that caused by single earthquakes. Consequently, considering the effects of this destructive phenomenon in structural design and construction seems necessary. Steel structures are widely used system in the construction industry, and known as the key systems in managing earthquake-induced damage. To mitigate these damages, a novel dual lateral-load-resisting system known as the Linked Column Frame (LCF) has been introduced. This system consists of parallel columns connected by link beams, which play as structural fuses, dissipating the seismic energy absorbed by the structure. The LCF system's simplicity in construction, installation, and replaceable link beams make it economically option among engineering for building projects.

2- Research Methodology

In this study, after a comprehensive review in previous researches and design methods based on force and performance, four structural models consist of 3 and 6-story buildings equipped by dual span of linked column frames with flexural and shear link beams were designed and implemented in the OpenSees software according to

Fig. 1. In this regard, fiber elements were used for simulation of the nonlinear behavior, dividing member cross-sections into segments to accurately model material behavior. Mechanical properties of columns were defined using *Steel02* model, while link beams were designed with hysteretic materials to involve both flexural and shear behaviors under cyclic loading. As-recorded ground motions were used for nonlinear dynamic analysis under successive earthquakes because artificial simulations such as "back-to-back" and "random" often have less sufficient accuracy. Effective peak acceleration (EPA) was selected as the most reliable parameter for selection of the ground motions because Peak Ground Acceleration (PGA) is not always a suitable criterion. Sixteen successive earthquake records were selected from the PEER database and used in this study. A 30-second time gap between two shocks in each scenario was assumed based on previous researches.



* Manuscript received October 9, 2024, Revised December 8, 2024, accepted March 3, 2025.

¹ MSc. Student, Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran. Email: f.tafreshi1999@gmail.com

² Corresponding author. Assistant Professor, Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran. Email: rajabi@tafreshu.ac.ir

³ PhD Student, Department of Civil Engineering, Zanzan University, Zanzan, Iran, Email: yaser.golestani02@yahoo.com

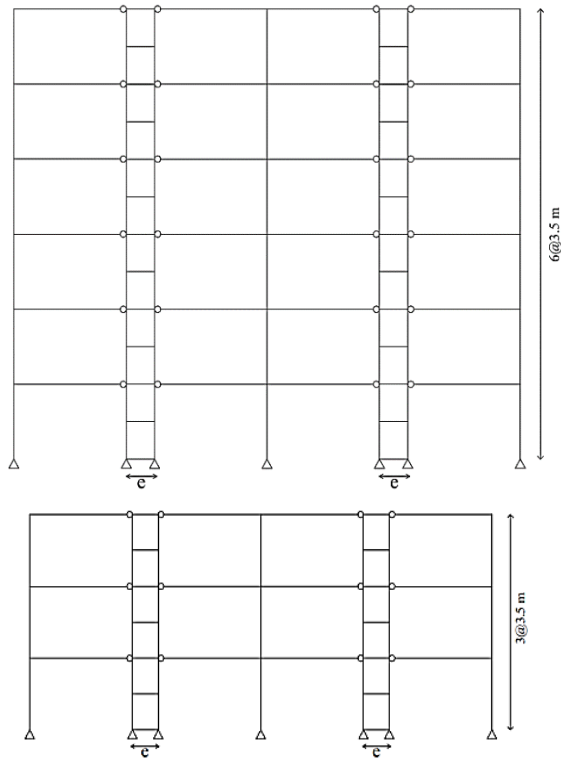


Fig. 1. Plan and schematic view of the studied models

First shocks were scaled according to *Standard 2800* seismic code, while the second shocks were scaled using a new spectrum based on prior studies.

3- Nonlinear Dynamic Analysis

After verification of the studied models in two steps consist of comparison of (1) period and (2) pushover curve in Fig. 2, nonlinear dynamic analysis was performed under single and successive shocks and some parameters including roof

and story drifts, base shear, and residual displacements were calculated and compared for single and successive cases. For a more comprehensive assessment, the Park and Ang damage index (1985) was selected as the primary parameter to evaluate seismic damage for seismic scenarios with/without sequence (Fig. 3):

$$DI = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

The results revealed that seismic sequence phenomenon has more destructive effects than single earthquakes, particularly for 3-story LCF frame with flexure link beams (Fig.3), which demonstrated superior performance in energy absorption and damage reduction. Maximum story drifts and damage indices were mostly concentrated in the lower stories and decreased with increasing height. The results also showed that the residual displacement due to seismic sequences in 3-story frames was less than 6-story frames (Fig. 4). Moreover, inter-story drifts caused by successive shocks were up to 3% higher than single earthquakes, especially in the lower stories. Base shear forces increased by up to 26%, indicating the impact of successive earthquakes on lateral loads. Generally, shear link beams have better performance than flexural link beams in structural damage reduction because of more stiffness and higher energy absorption capacity.

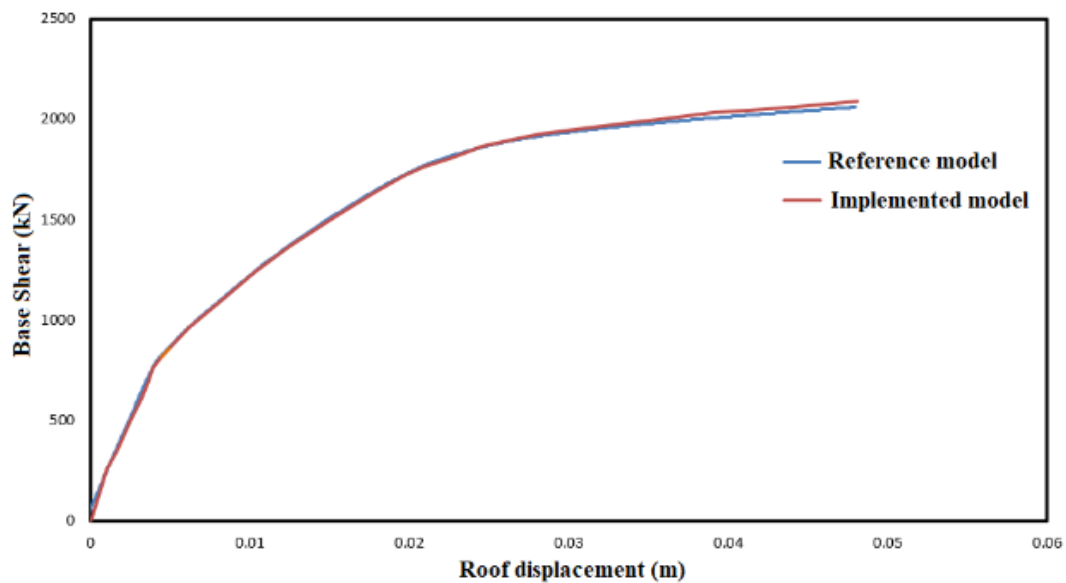


Fig. 2. Push-over curves for reference and implemented model

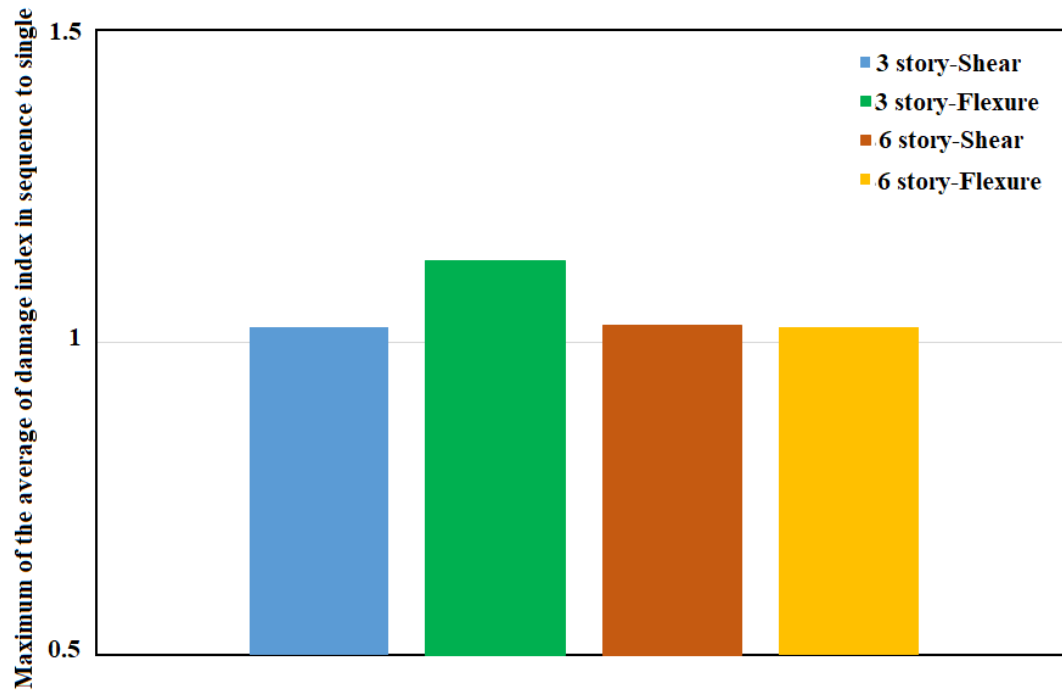


Fig. 3. Maximum of the average of $DI_{\text{Sequence/Single}}$

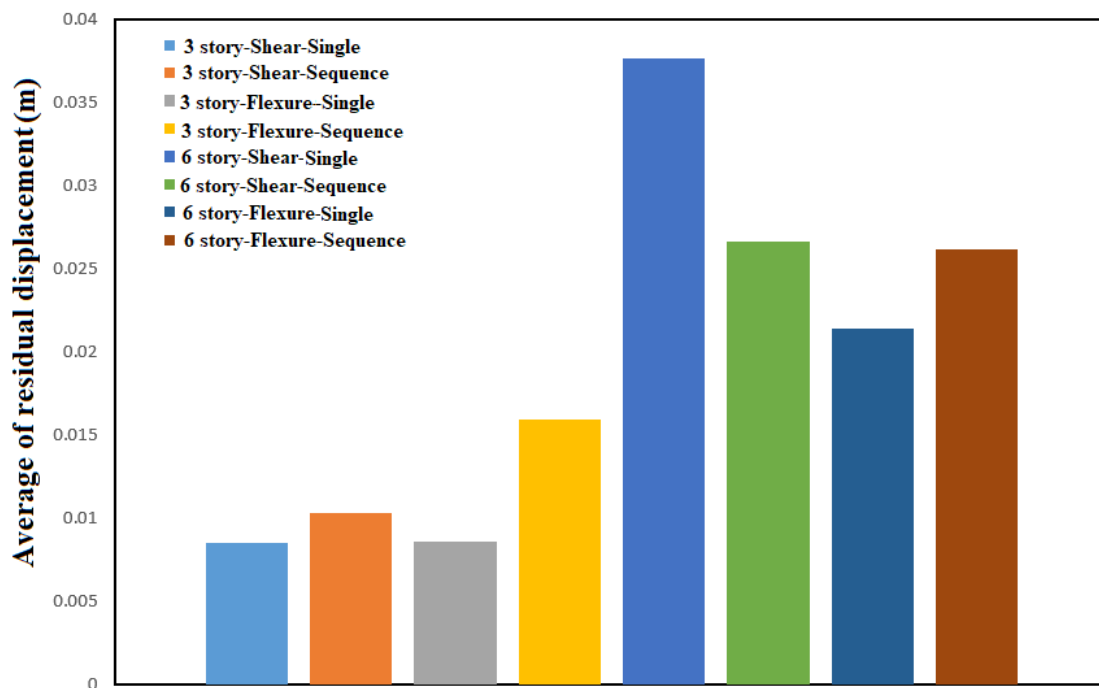


Fig. 4. Average of residual displacement under single and successive shocks

4- Results

The findings of this paper suggest that shear link beams are a more effective choice in severe seismic conditions, such as successive earthquakes. Since the appropriate performance of LCF system in reducing the structural damages caused by successive earthquakes (especially in high-rise buildings), it can be considered as a suitable

option for designing structures in seismic active zones. Also, shear link beams have a crucial role in minimizing the structural damage because they efficiently absorb seismic energy and prevent damage from propagating to other parts of the structure. Therefore, considering this system in the design of structures can significantly enhance structural safety and durability. The LCF system not only prevents severe damages from successive

earthquakes but also improves the structure's overall seismic performance, extends its lifespan, and reduces maintenance costs. Moreover, implementing this system in seismic-active zones can prevent the total collapse of structures and provide more safety for occupants during successive earthquakes. Some of the results are summarized as follows:

- Relative floor displacements under successive earthquakes are 2 to 3 percent greater than single case.
 - The damage index caused by successive earthquakes for LCF frames with flexural linked beam is about 38% more than LCF models with shear linked beam.
 - Generally, consecutive earthquakes have 2 to 38 percent more destructive effects on structures than single earthquakes. Six-story models with flexural performance are more affected by consecutive earthquakes than others.
-



ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی حاوی سیستم قاب-ستون-پیوند دوگانه تحت زمین‌لرزه‌های متوالی*

مقاله پژوهشی

یاسر گلستانی^(۳)

الهام رجبی^(۲)

فرزانه تفرشی^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.90190.1324

چکیده زلزله‌های متوالی به دلیل وقوع در فاصله زمانی کوتاه، باعث تجمع آسیب‌های لرزه‌ای در سازه‌ها می‌شوند. اخیراً در راستای مدیریت و کاهش آسیب‌های موجود به سازه، سیستم نوین برابر لرزه‌ای دوگانه سیستم قاب-ستون-پیوند (LCF) معرفی شده‌است. در این مقاله چهار قاب فولادی مجهز به LCF حاوی تیرهای پیوند با رفتار برشی و خمشی طراحی و در نرم‌افزار اپنسیس پیاده‌سازی شده‌است. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در دو حالت زلزله‌های با و بدون توالی لرزه‌ای، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی‌های نسبی طبقات و بام، نیروی برش پایه و شاخص خسارت پارک-انگ استخراج شده‌است. نتایج نشان می‌دهد زلزله‌های متوالی به نسبت منفرد آسیب لرزه‌ای بیشتری به سازه‌ها وارد نموده و قاب‌ها با رفتار برشی تیر پیوند بهترین عملکرد را دارند.

واژه‌های کلیدی سیستم قاب-ستون-پیوند دوگانه، پدیده توالی لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی، فیوز سازه‌ای، شاخص خسارت.

Seismic Evaluation of Steel Frames with Dual Linked-Column- Frame under Successive Earthquakes

Farzaneh Tafreshi

Elham Rajabi

Yaser Golestani³

Abstract Since successive shocks occur with short time interval, damage will accumulate in the structures. Recently, linked column frame system (LCF) as a new dual lateral-resisting system, has been introduced in order to manage and reduce the structural damage. In this paper, 4 steel frames equipped by dual LCF and shear/flexure link beams were designed and implemented in Opensees. After nonlinear static and dynamic analysis for single and consecutive earthquakes, parameters such as displacements of the roof and stories, base shear and Park-Ang damage index were investigated. The results showed that successive earthquakes cause more seismic damage to structures than single ones and the frames with the shear link beams have better performance.

Key Words Dual Linked-Column-Frame system, Seismic sequence phenomenon, Nonlinear dynamic analysis, Structural fuse, Damage index.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۷/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

Email: rajabi@tafreshu.ac.ir

(۳) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

مقدمه

زمین‌لرزه یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی است که در مناطق دارای گسل‌های بزرگ رخ می‌دهد. این گسل‌ها معمولاً با اولین گسیختگی همه تنش‌های موجود را تخلیه نمی‌کنند و در نتیجه لرزه‌های متوالی ایجاد می‌شوند. گسیختگی‌های پی‌درپی در امتداد گسل‌ها باعث وقوع لرزه‌های مختلف می‌شوند که تشخیص آن‌ها به‌عنوان لرزه اصلی و پس‌لرزه گاهی چالش‌برانگیز است [1]. پدیده توالی لرزه‌ای به رخداد زمین‌لرزه‌هایی اطلاق می‌شود که در فاصله زمانی کوتاهی مانند دقایق تا هفته‌ها در یک منطقه مشخص رخ می‌دهند. این زمین‌لرزه‌ها می‌توانند از پیش‌لرزه، زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها تشکیل شوند، که زلزله‌های متوالی پتانسیل تضعیف سازه‌های آسیب‌دیده را دارند و می‌توانند خسارات اقتصادی و تهدیدات جانی را افزایش دهند. همچنین با وجود فرصت محدود بین لرزه‌ها، اقدامات تعمیر یا بازسازی پس از لرزه اصلی معقول نیست و طراحی سازه‌های مهم باید با توجه به زلزله‌های متوالی ایمن‌تر شوند [2]. در آیین‌نامه‌های طراحی ایران، مانند استاندارد ۲۸۰۰، تمرکز بیشتر بر زلزله‌های منفرد بوده و بررسی جامع پدیده توالی لرزه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که خسارت‌های ناشی از پس‌لرزه‌ها معمولاً بیشتر از زلزله‌های منفرد است [3]. در ششم فوریه سال ۲۰۲۳، دو زمین‌لرزه متوالی با بزرگای $7/8$ و $7/6$ ریشتر جنوب شرقی ترکیه را لرزاندند که از قوی‌ترین زلزله‌های ۸۰ سال اخیر این کشور بودند. این زلزله‌ها در ۱۱ استان موجب کشته شدن بیش از ۴۱۰۲۰ نفر، آوارگی $1/2$ میلیون نفر، تخریب ۱۵۰۰۰ ساختمان و خسارت مالی حدود $32/2$ میلیارد دلار شدند [4]. در ۲۵ آوریل سال ۲۰۱۵، زلزله‌ای به بزرگای $7/8$ ریشتر در نیال رخ داد و پس از آن هزاران پس‌لرزه، از جمله بزرگ‌ترین آن‌ها با بزرگای $7/3$ و $6/3$ ، ثبت شد. این حادثه منجر به کشته شدن ۹۰۰۰ نفر، زخمی شدن ۲۳۰۰۰ نفر و ویرانی ۵۰۰۰۰۰ خانه شد [5]. نمونه دیگر مربوط به زلزله بزرگ سرپل ذهاب در استان کرمانشاه ایران است که در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ با بزرگای $7/3$ رخ داد و پس از آن دو پس‌لرزه بزرگ با بزرگای $5/9$ و $6/3$ ثبت شد. این زمین‌لرزه‌ها باعث مرگ ۴۳۰ نفر و زخمی شدن ۷۴۶۰ نفر شدند [6]. بنابراین به دلیل اهمیت پدیده توالی لرزه‌ای و اثرات جبران‌ناپذیر آن بر سازه‌ها در زلزله‌های گذشته و عدم

توجه به این پدیده در آیین‌نامه‌های زلزله ایران، نیاز به پژوهش‌های بیشتری در این زمینه احساس می‌شود. سازه‌های فولادی از مهم‌ترین سیستم‌های مورد مطالعه در مهندسی زلزله هستند. در سیستم‌های باربر مقاوم لرزه‌ای مانند قاب خمشی و مهاربندی‌شده، اعضای سازه‌ای به بدنه اصلی متصل‌اند و تحمل بارهای جانبی را بر عهده دارند. بازگشت به حالت سرویس‌دهی پس از آسیب، به‌ویژه زمانی که تعداد اعضای آسیب‌دیده زیاد باشد، فرآیندی دشوار و پرهزینه است. به همین دلیل، محققان در چند دهه اخیر سیستم‌هایی را پیشنهاد داده‌اند که تنها یک عضو خاص در هنگام زلزله نیاز به تعمیر دارد و به سرعت می‌توان به حالت سرویس‌دهی بازگشت و سیستم قاب ستون پیوند (Linked-Column-Frame) (LCF) یکی از این راهکارهاست [7]. اخیراً یکی از سیستم‌های نوین، قاب ستون پیوند است که به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی دوگانه معرفی شده‌است. این سیستم شامل دو ستون موازی و تیرهای پیوند قابل تعویض است که به‌عنوان یک فیوزسازه‌ای عمل می‌کنند و انرژی لرزه‌ای را به‌طور غیرکشسان جذب و از انتقال آن به سایر اعضای سازه جلوگیری می‌کنند تا آسیب به سازه کاهش یابد. از طرفی تعویض آسان فیوز سازه‌ای، ساخت و نصب آن را اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه می‌کند [8]. ایده ساخت قاب ستون پیوند ابتدا در پژوهشی توسط نادر و همکاران [9] در سال ۲۰۰۰ برای طراحی پل سن‌فرانسیسکو اوکلند مطرح شد. در این تحقیق، از تیرهای پیوند برشی قابل تعویض برای جلوگیری از فروریزش در زلزله‌های شدید استفاده شد. اولین تحقیقات بر روی سیستم قاب ستون پیوند توسط دوسیکا و ایوای [10] در سال ۲۰۰۷ انجام شد. آن‌ها بر روی قاب ستون پیوند فولادی مطالعه کردند تا قابی طراحی کنند که بتواند از فروریزش در زلزله جلوگیری و به سرعت به حالت بهره‌برداری بازگردد. شرایط تکیه‌گاهی ستون‌ها بر ظرفیت و برش پایه تأثیر می‌گذارد. طراحی سیستم باعث می‌شود که ستون‌های متصل به حالت مفصلی و تیر اضافه، از تسلیم شدن ستون‌های دارای بار ثقلی جلوگیری کنند.

همچنین در سال ۲۰۱۰، دوسیکا و لوییس [11] به بررسی استفاده از اتصالات پیچ و مهره در تیر پیوند پرداختند تا خرابی نامطلوب در اتصالات را به حداقل برسانند. یکی از نگرانی‌ها نوع اتصالات است که باید نصب و حذف آن آسان باشد و در

محب‌خواه و تذرو در سال ۲۰۲۱ به بررسی پارامتر میرایی ویسکوز معادل (EVD) در روش طراحی عملکردی تغییرمکان مستقیم برای سازه‌های قاب ستون‌پیوند پرداختند. آن‌ها با کمک تحلیل غیرخطی دینامیکی و بررسی پاسخ حلقه‌های هیستریک نشان دادند که میرایی ویسکوز به طول تیرهای پیوند و سطوح شکل‌پذیری وابسته است و با افزایش طول نسبی پیوندها، مقدار آن کاهش می‌یابد [19]. قلحکی و همکاران [20] قاب‌های ستون‌پیوند را تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک و دور بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشینه تغییرمکان در نیمه بالایی قاب‌ها و با افزایش تعداد طبقات افزایش پیدا می‌کند و جابه‌جایی نسبی میان طبقاتی در زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک کمتر از مقادیر روش‌های پیشنهادی ملکوتیان و شعبی است و طراحی این قاب‌ها مانع تشکیل طبقات نرم می‌شود. گلستانی و همکاران [21] به ارزیابی ضریب اصلاح پاسخ سازه‌های فلزی ستون‌پیوندشده تحت زلزله‌های حوزه دور پرداخته و نتایج نشان داد که میانگین ضریب رفتار با افزایش طول تیرهای پیوند کاهش می‌یابد و ضریب اصلاح پاسخ پیشنهادی برای این سیستم بین ۴ تا ۶/۵ است. همچنین جابه‌جایی بین طبقاتی برابر با ۲ تا ۲/۵ درصد برآورد شده است. در پژوهش دیگر توسط رجبی و گلستانی [22] قاب‌های ستون پیوند تحت زمین‌لرزه‌های متوالی بررسی شده و با استفاده از هوش مصنوعی، ضریب رفتار محاسبه گردیده و با توجه به نتایج، توالی لرزه‌ای موجب کاهش ۲۶ درصدی این ضریب نسبت به حالت منفرد می‌شود و ضریب رفتار با افزایش طول تیرهای پیوند برشی و خمشی کاهش می‌یابد. همچنین، تیرهای پیوند کوتاه‌تر در حالت برشی عملکرد بهتری دارند و پیشنهاد می‌شود که مقدار ضریب رفتار بیشتر از ۶ در نظر گرفته نشود. معروفی و همکاران [23] عملکرد لرزه‌ای قاب‌های ستون‌پیوند با آرایش دوتایی تحت شرایط تکیه‌گاهی و حرکات رفت و برگشتی بررسی کرده‌اند. نتایج نمایانگر آن است که خسارت احتمالی در سیستم قاب ستون پیوند ۵۵ درصد کمتر از سیستم قاب خمشی است. جابری [24] روشی جدید برای طراحی لرزه‌ای قاب ستون پیوند بر پایه فروپاشی سازه ارائه کرده که با تحلیل دینامیکی غیرخطی تا لحظه ریزش، رفتار پلاستیکی را دقیقاً

برابر برش و تقاضای خمشی مقاومت کند. ملکوتیان و همکاران [12] از کسانی بودند که با استفاده از روش طراحی مبتنی بر نیرو در سال ۲۰۱۳، سازه‌های فولادی را تحت تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی قرار دادند و دریافتند که طراحی ستون‌ها بر اساس ظرفیت تیرهای پیوند از تشکیل مفصل پلاستیک در ستون جلوگیری می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم توانایی محدود کردن توسعه مفاصل پلاستیک در پیوندها را دارد. پیشنهادات آنها برای پارامترهای طراحی لرزه‌ای شامل ضریب رفتار (R)، ضریب بزرگنمایی (Cd) و ضریب اضافه مقاومت (Ω_0) به ترتیب برابر ۸، ۵/۵ و ۳ می‌باشد [13]. همچنین ملکوتیان و همکاران [14] به بررسی مقادیر برش پایه، بیشینه نیرو هنگام تسلیم و برش الاستیک پرداختند و نشان دادند که نسبت شتاب طیفی میانگین متناظر با زلزله حداکثر برابر با ۱/۵ برابر ضریب رفتار است. شعبی و همکاران [15]، یک روش طراحی پارامتریک مبتنی بر عملکرد را برای این قاب ارائه دادند. این روش با جدا کردن قاب ستون پیوند به سیستم‌های مجزا، به اندرکنش بین دو قاب و اثرات متقابل آن‌ها پرداخته است. تحلیل‌های غیرخطی قاب‌ها در سه سطح عملکرد لرزه‌ای قابلیت استفاده بی‌وقفه، تعمیرپذیری سریع و آستانه فروریزش نشان دادند که تنها تیرهای پیوند تسلیم می‌شوند و سایر اعضای سازه به صورت الاستیک باقی می‌مانند. این رویکرد باعث افزایش کارایی و سرعت همگرایی سازه‌ها می‌شود.

در مطالعه دیگر از شعبی و همکاران [16] با روش طراحی مبتنی بر نیرو برای بررسی عملکرد قاب‌های ستون پیوند نشان داد که در زلزله‌های با احتمال ۵۰ درصد فراگذشت در ۵۰ سال، خسارت در قابهای خمشی ناچیز و جابه‌جایی‌ها کمتر از مقدارهدف بوده است. تذرو و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش طراحی مبتنی بر جابه‌جایی مستقیم شده (DDBD) به ارزیابی رفتاری قاب ستون پیوند پرداخته‌اند. که در این مطالعه، سازه‌ها تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان دادند که رانش توسعه‌یافته در طبقات کمتر از مقدار طراحی شده است، که موفقیت این روش را تأیید می‌کند. این پژوهش نیز نشان داد که هیچ تسلیمی در تیرهای خمشی رخ نداده و ضریب استحکام تیرپیوندها بیش از ۱/۲۵ می‌باشد [17,18].

بگیرند. زیرا علیرغم پتانسیل بالای خسارت‌زایی لرزه‌های متوالی، هنوز زلزله طراحی به صورت منفرد در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای پیشنهاد می‌گردد. در این راستا چهار قاب فولادی مجهز به LCF حاوی تیرهای پیوند با رفتار برشی و خمشی طراحی و در نرم‌افزار اپنسیس پیاده‌سازی شده‌است. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در دو حالت زلزله‌های با و بدون توالی لرزه‌ای، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی‌های نسبی طبقات و بام، نیروی برش پایه و شاخص خسارت پارک-انگ استخراج شده‌است.

روش تحقیق

مدل‌های مورد مطالعه

در این مطالعه، ۴ قاب فولادی مجهز به سیستم قاب-ستون-پیوند با آرایش دودخانه برای کاربری مسکونی با تعداد طبقات ۳ و ۶ که نشان‌دهنده سازه‌هایی با ارتفاع کوتاه، متوسط هستند، در پلان ۲۵ در ۲۵ متر با طول دهانه تیر پیوند ۲ متر و ارتفاع طبقات ۳/۵ متر در شهر تهران با شدت لرزه‌خیزی بسیار زیاد و خاک نوع ۲ در نرم‌افزار ایتبس برای دو رفتار عملکرد برشی و خمشی تیر پیوند به روش تحلیل استاتیکی معادل طراحی شده‌اند. شکل (۱) پلان و نمای قاب‌های مورد مطالعه را برای هر سازه نمایش می‌دهد. مصالح مورد استفاده در این سازه‌ها طبق مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان از نوع فولاد A992 می‌باشد. تنش تسلیم فولاد، تنش کشش نهایی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با $458/72$ ، $3518/02$ و 210000 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و ضریب پواسون برابر با 0.3 در نظر گرفته شده‌است. همانطور که در شکل (۱) مشخص است، دو دهانه تیر پیوند که شامل ستون و تیرهای پیوند طبقه و میان طبقه است، با اتصال مفصلی به قاب خمشی متصل هستند و همچنین اتصال ستون با پی به صورت مفصل تعریف شده است. در اتصالات تیرهای پیوند با ستون‌های متصل به خود و قاب خمشی اتصال گیردار تعیین شده است. اصول و ضوابطی که برای تیرهای پیوند در این نوع سازه استفاده شده‌است، همانند تیرهای پیوند در قاب مهاربند واگرا (EBF)، می‌باشد و طبق بند ۱۰-۳-۴-۳-۴ مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۴۰۱ تحلیل و طراحی شده‌اند. در حالت کلی تیرهای پیوند دارای سه حالت عملکردی برشی، خمشی و ترکیبی از برش و خمش می‌باشند. در این مطالعه، برای کلیه سازه‌های

مدل‌سازی می‌کند. این رویکرد پیچیدگی‌های تحلیل‌های لرزه‌ای را کاهش داده و امکان ارزیابی شتاب طیفی و زمان حرکت زمین را به طور جامع فراهم می‌کند. همچنین، این روش شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌ای مانند تحلیل IDA ممکن می‌سازد و بهبودهای قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای سازه به همراه دارد. لی و همکاران [25] برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم LCF و بهینه‌سازی مفصل پلاستیکی از یک پایه ستون در قاب فولادی مهاربندی‌شده متصل به فنر استفاده کرده‌اند. با تحلیل عددی و استفاده از اصل کار مجازی، عملکرد پسماند سیستم، تغییرشکل‌های برشی تیرهای پیوند و جابجایی قاب بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که آزادسازی مهار عمودی ستون‌ها باعث بهبود ظرفیت اتلاف انرژی و ایجاد رفتار غیرارتجاعی در تیرهای پیوند می‌شود. استفاده از فنرها در پای ستون موجب بهبود عملکرد چرخه‌ای سیستم قاب ستون پیوند شده است. از دیگر مطالعات در سال ۲۰۲۳، مونتیوری و همکاران [26] به تحلیل رفتار لرزه‌ای قاب‌های ستون پیوند بر اساس تئوری کنترل مکانیزم پلاستیکی (TPMC) پرداخته‌اند. در این روش، سازه‌ها طوری مدل‌سازی می‌شوند که مفصل پلاستیکی در مکان‌های مشخص و بهینه توزیع شوند تا در نهایت حداکثر انرژی لرزه‌ای جذب و به اتلاف انرژی منجر شود. این فرآیند کمک می‌کند تا سازه‌ها به‌طور مؤثری در برابر زلزله مقاومت کنند و آسیب کمتری به اعضای غیرپلاستیک وارد شود. نتایج نشان داد که تیرهای پیوند کوتاه عملکرد بهتری دارند. همچنین، تحلیل بار افزون کارایی TPMC را در توزیع مفصل پلاستیکی و هماهنگی با منحنی تعادل مکانیزم به طور مؤثری بهبود می‌دهد. تحقیقات انجام‌شده در زمینه سیستم‌های قاب ستون پیوند به وضوح اهمیت و ضرورت این موضوع را برای ادامه پژوهش‌ها نمایان می‌کند. این سیستم‌ها به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد در بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش خسارات ناشی از زلزله، در کانون توجه محققین می‌باشد. چرا که با بررسی تأثیرات مختلف بر روی این سیستم‌ها، می‌توان به نتایج ارزشمندی دست یافت که نشان‌دهنده کارایی بالای آنها در مقایسه با سیستم‌های قبلی است. اهمیت این موضوع زمانی دو چندان می‌شود که سازه‌ها در معرض زلزله‌های متوالی قرار

کنترل‌های مورد نیاز پس از تحلیل قاب‌ها، کنترل میزان تغییرمکان جابه‌جایی نسبی طبقات است که طبق بند (۵-۳) استاندارد ۲۸۰۰ مطابق با روابط (۷) و (۸) برای دو حالت قاب با تعداد طبقات کمتر و بیشتر از ۵ طبقه صورت گرفته است. مقدار ضریب بزرگنمایی (C_d) در این قاب‌ها برابر ۵/۵ می‌باشد.

برای قاب‌های ۳ طبقه:

$$\text{Drift} \leq \frac{0.025}{C_d} = \frac{0.025}{5.5} \quad (۷)$$

برای قاب‌های ۶ طبقه

$$\text{Drift} \leq \frac{0.020}{C_d} = \frac{0.020}{5.5} \quad (۸)$$

تغییرمکان جابه‌جایی نسبی (Drift) بدست آمده در هر طبقه، کمتر از مقادیر تعیین شده می‌باشد.

در شکل (۲) تصویری از قاب ۳ طبقه حاوی تیر پیوند برشی در حالت کنترل تنش به همراه نسبت مقاومت حاصله از طراحی در محیط نرم افزار ایتبس نشان داده شده است.

نحوه مدل‌سازی و اعتبارسنجی

قاب‌ها پس از طراحی اولیه و کنترل‌های موردنیز، در نرم‌افزار اپنسیس پیاده‌سازی شده‌اند. نرم‌افزار اپنسیس، یک شبیه‌ساز رایانه‌ای قدرتمند در مهندسی زلزله است که از روش المان محدود و تحلیل‌های پیچیده غیرخطی بهره می‌برد. این نرم‌افزار که رایگان و متن‌باز است، امکان مدل‌سازی دقیق سازه‌ها و تحلیل رفتار لرزه‌ای آنها را فراهم می‌کند. روش مورد استفاده برای مدل‌سازی غیرخطی قاب‌ها در این مطالعه، روش پلاستیسیته گسترده (فایبر) می‌باشد. مزیت استفاده از این روش تشکیل خودکار مفاصل پلاستیک و اندرکنش بین نیرو و لنگر در قاب‌ها است. این روش به دلیل در نظر گرفتن نیروهای محوری، خمشی، برشی و علاوه بر آن کنترل پاسخ رفتار غیرخطی، برای نمایش بهتر ویژگی‌های رفتار چرخه‌ای تیرهای پیوند قابل قبول می‌باشد. در این راستا، برای مدل‌سازی تیرهای پیوند، از مصالح هیسترتیک که طبق شکل (۳) از مصالح تک محوره موجود در اپنسیس که قابلیت نمایش رفتار چرخه‌ای پیوندها را به خوبی دارد با توجه به نتایج پژوهش گلستانی و همکاران [21] به روش پلاستیسیته گسترده استفاده شده است. با توجه به شکل (۴) تیرهای پیوند برشی بر اساس داده‌های نمونه S_2 از مطالعه دوسیکا و لویس [11] با مقادیر زوال و بیشینه مقدار کرنش برشی برای تیر پیوند برشی ۰/۱ رادیان کالیبره

مورد بررسی، یک بار سازه با تیر پیوند برشی و بار دیگر با تیر پیوند خمشی در نظر گرفته شده است. ضوابط تیر پیوند بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به شرح روابط (۱) تا (۳) می‌باشد:

چنانچه عملکرد برشی باشد:

$$e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (۱)$$

چنانچه عملکرد خمشی باشد:

$$e \geq 2.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (۲)$$

چنانچه ترکیبی از هر دو عملکرد باشد:

$$1.6 \frac{M_p}{V_p} < e < 2.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (۳)$$

در روابط فوق، e : طول تیر پیوند، M_p : لنگر پلاستیک مقطع، V_p : برش پلاستیک مقطع می‌باشند که از روابط (۴) و (۵) بدست می‌آیند:

$$M_p = Z_p \times F_y \quad (۴)$$

$$V_p = 0.6 \times F_y(d - 2t_f)tw \quad (۵)$$

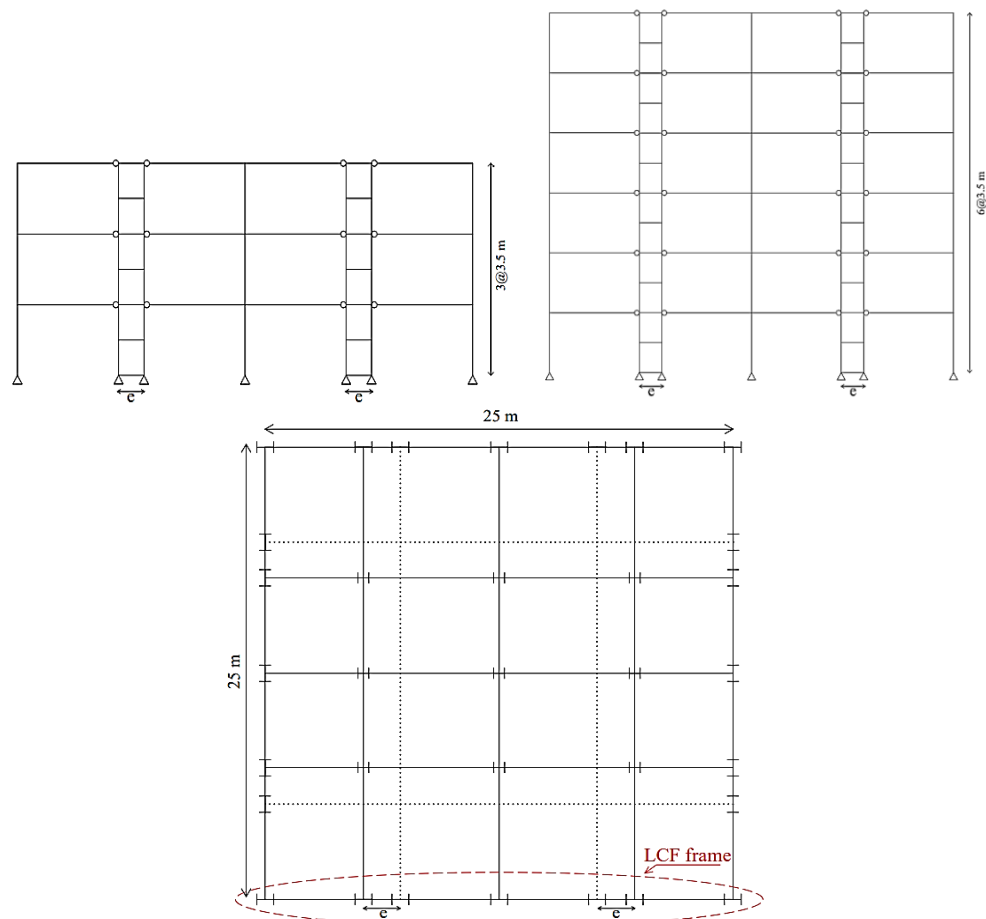
Z_p : اساس مقطع پلاستیک است که طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Z_p = b \times t_f(d - t_f) + 0.25 \times tw(d - 2t_f)^2 \quad (۶)$$

با توجه به مشخصات مقاطع فولادی تیرپیوند، مقدار پارامترهای d ، t_w ، b ، t_f و F_y به ترتیب نمایانگر عمق تیر، ضخامت جان، طول بال، ضخامت بال و تنش تسلیم مقطع می‌باشند. طبق مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۸، بار مرده طبقات و بام به ترتیب برابر با ۶۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشند. لازم به ذکر است که بار دیوارهای داخلی طبق ضوابط جدید به بار مرده طبقات اضافه شده‌اند. بار زنده طبقات، بام و بار برف به ترتیب برابر ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده‌اند. همچنین بار دیوارهای پیرامونی ۵۹۰ کیلوگرم بر متر می‌باشند. در جداول (۱) و (۲) به ترتیب مقاطع مربوط به سازه ۳ و ۶ طبقه حاوی تیرهای پیوند با عملکرد برشی و خمشی نمایش داده شده است. مقاطع مورد استفاده از نوع بال پهن هستند و همچنین برای تیرهای پیوند از مقاطع ساخته شده از تیورق استفاده شده است و اعداد نشان داده شده در جدول بر حسب سانتی‌متر می‌باشند. از جمله

فایبر در اپنسیس شبیه‌سازی شده‌اند و رفتار غیرخطی آنها به‌دقت بررسی شده‌است [21].

شده‌اند. فولاد مورد استفاده درکالیراسیون و محاسبه مقدار نیرو-تغییرمکان موردنظر از نوع A992 می‌باشد. همچنین، مطابق شکل (۵) تیرهای پیوند خمشی با نمونه LB از همان مطالعه با استفاده از مصالح خستگی و با بهره‌گیری از مقاطع



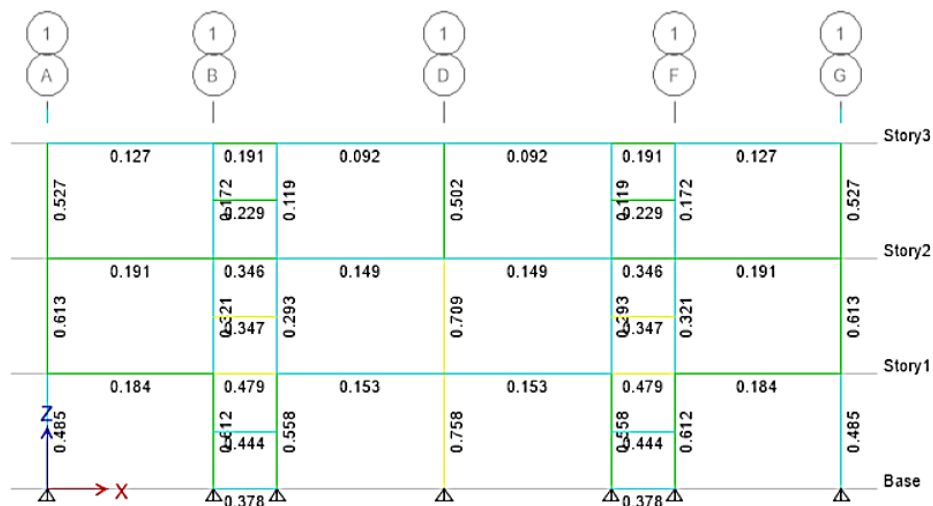
شکل ۱ پلان و نمای قاب‌های مورد مطالعه

جدول ۱ مقاطع سازه ۳ و ۶ طبقه قاب ستون پیوند برشی

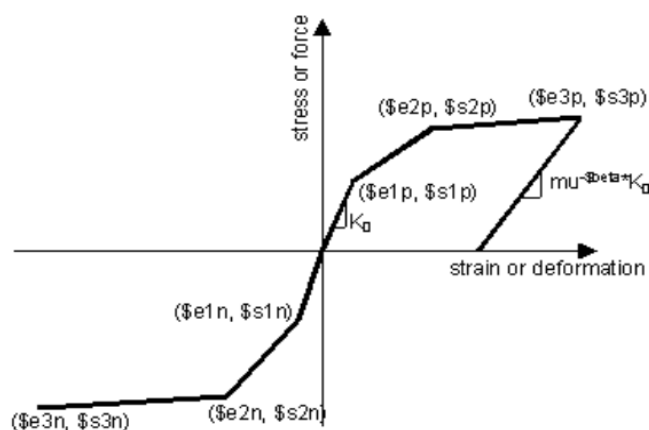
نام سازه	طبقه	سیستم قاب ستون پیوند			سیستم قاب خمشی		
		ستون	تیر پیوند	تیر پیوند میانی	تیر	ستون محیطی	ستون داخلی
طبقه ۳	۱	W14×109	I30×1-27.5×2	I30×1-27.5×2	W12×72	W14×43	W14×53
	۲	W14×109	I30×1-27.5×2	I30×1-27.5×2	W12×72	W14×43	W14×38
	۳	W14×109	I30×1-27.5×2	I30×1-27.5×2	W12×72	W14×43	W14×38
طبقه ۶	۱	W14×342	I44×1-28×2	I44×1-28×2	W12×120	W14×74	W14×82
	۲	W14×342	I44×1-28×2	I44×1-28×2	W12×120	W14×74	W14×82
	۳	W14×283	I38×1-27.5×2	I38×1-27.5×2	W12×120	W14×74	W14×82
	۴	W14×283	I35×1-28×2	I35×1-28×2	W12×106	W14×74	W14×82
	۵	W14×283	I32×1-27×2	I32×1-27×2	W12×106	W14×74	W14×82
	۶	W14×132	I32×1-27×2	I32×1-27×2	W12×106	W14×74	W14×82

جدول ۲ مقاطع سازه ۳ و ۶ طبقه قاب ستون پیوند خمشی

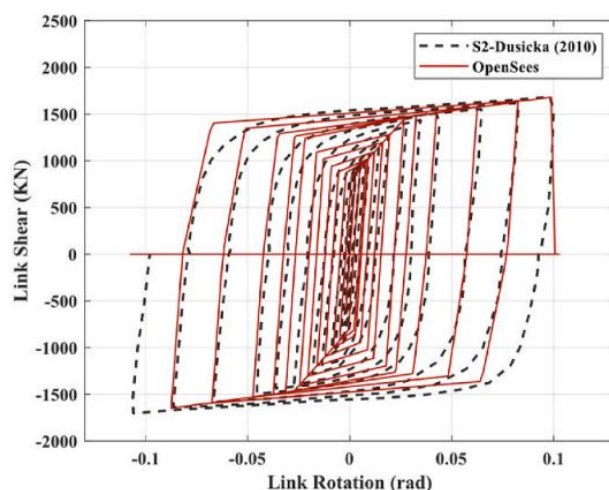
نام سازه	طبقه	سیستم قاب ستون پیوند			سیستم قاب خمشی		
		ستون	تیر پیوند	تیر پیوند میانی	تیر	ستون محیطی	ستون داخلی
طبقه ۳	۱	W14×109	I35×1.5-20×2	I35×1.5-20×2	W12×53	W14×38	W14×43
	۲	W14×109	I35×1.5-20×2	I35×1.5-20×2	W12×53	W14×34	W14×38
	۳	W14×109	I35×1.5-20×2	I35×1.5-20×2	W12×53	W14×34	W14×38
طبقه ۶	۱	W14×342	I46×2-17.5×2	I46×2-17.5×2	W12×96	W14×61	W14×61
	۲	W14×311	I46×2-17.5×2	I46×2-17.5×2	W12×96	W14×61	W14×61
	۳	W14×233	I40×1.2-20×2	I40×1.2-20×2	W12×96	W14×61	W14×61
	۴	W14×233	I40×1.2-20×2	I40×1.2-20×2	W12×87	W14×61	W14×53
	۵	W14×132	I35×1.5-20×2	I35×1.5-20×2	W12×87	W14×61	W14×53
	۶	W14×132	I35×1.5-20×2	I35×1.5-20×2	W12×87	W14×61	W14×53



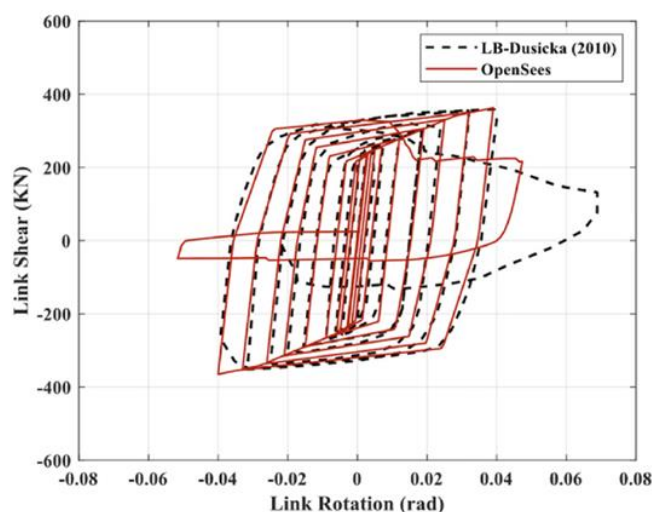
شکل ۲ نمای قاب ۳ طبقه برشی به همراه مقاومت حاصل از طراحی در محیط ایتبس



شکل ۳ رفتار مصالح هیسترتیک در نرم افزار اپنسیس



شکل ۴. نتایج عددی و آزمایشگاهی تیرپیوندبرشی کالیبره‌شده با مقاله دوسیکا و لوییس [11] توسط گلستانی و همکاران [21]



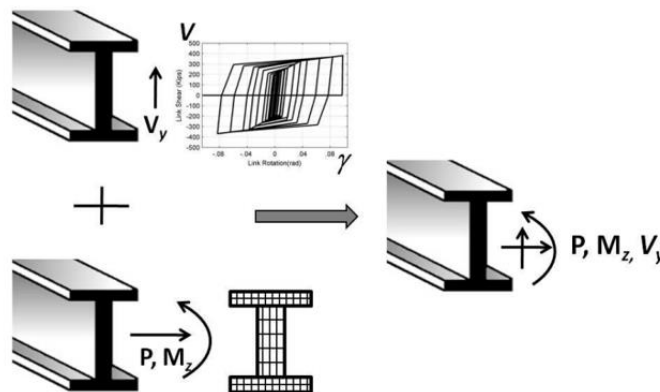
شکل ۵. نتایج عددی و آزمایشگاهی تیرپیوندخمشی کالیبره‌شده با مقاله دوسیکا و لوییس [11] توسط گلستانی و همکاران [21]

مقدار زوایی نخواهند داشت. یکی از مسائل بسیار مهم که باید در مدل‌سازی تیرهای خمشی برخلاف قاب ستون پیوند در نظر گرفته شود، جزئیات اتصالات خمشی مربوط به آن می‌باشد. با توجه به این که در این مطالعه از قاب‌های خمشی با شکل پذیری متوسط استفاده شده، دو نوع اتصال برای آن بررسی شده است. یکی از آن اتصال فلنجی با چهار پیچ بدون وجود ورق لچکی (BUEEP) و دیگری اتصال جوشی تقویت نشده به صورت مستقیم (WUFW) می‌باشد. شبیه‌سازی این اتصالات با کمک مقطع فایبر به صورت اتصال تیر به ستون بوده است. داده‌های موردنظر از نتایج مقاله گلستانی و همکاران [21] که مصالح تیرهای خمشی را مطابق با شکل (۸) با مدل اتصال چهارپیچی با ورق با مطالعه سامنز و مرای [27] کالیبره کردند،

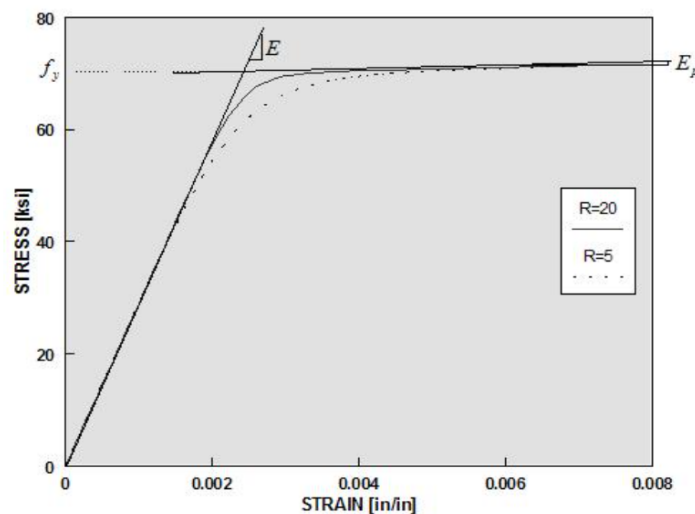
در شکل (۶)، مدل‌سازی تیر پیوند به روش فایبر نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی تیرهای خمشی و ستون‌ها، از المان تیر-ستون غیرخطی با مقاطع فایبر استفاده شده که توانایی مدل‌سازی رفتار غیرخطی تمامی نقاط اعضا را فراهم می‌کند. برای تعریف مصالح ستون‌ها از دستور Steel02 موجود در کتابخانه اپنسیس، مطابق با شکل (۷) استفاده شده است. طبق داده‌های موردنیاز در تعریف مصالح مقدار تنش تسلیم برابر با ۳۴۵ مگاپاسکال و مدول ینگ برابر با ۱۹۹۹۴۷/۹۸ مگاپاسکال بوده است. نسبت سخت‌شوندگی کرنشی برابر با ۰/۰۲ و مقادیر R0، R1 و R2 که پارامترهایی برای تبدیل از حالت الاستیک به پلاستیک هستند، به ترتیب برابر با ۲۰، ۰/۹۲۵ و ۰/۱۵ فرض شده‌اند. از آنجایی که ستون‌ها باید در حالت خطی باقی بمانند،

همکاران [21] بهره‌برداری شده‌است. مقادیر این مصالح بر اساس آزمایشات تجربی مربوط به اتصالات مفصلی که در سال ۲۰۰۴ توسط لیو و آستانه بررسی شده‌اند [28]، مطابق شکل (۱۰) کالیبره شده‌اند. مدل‌سازی ستون $P-\Delta$ نیز مطابق شکل (۱۱) برای سازه‌ها در نظر گرفته شده‌است. هدف لحاظ کردن اثر بارهای ثقلی بر سازه است، زیرا این بارها تأثیر قابل توجهی بر جابه‌جایی سازه دارند. ستون‌ها باید به‌صورت اتصال مفصلی تعریف شوند و برای تیرها از المان خرپا و برای ستون‌ها از المان تیرستون خطی استفاده شده‌است. اتصالات به پی نیز به‌صورت مفصلی طراحی شده‌اند تا بر بار جانبی تأثیری نداشته باشند و مقاومت و سختی بالایی داشته باشند.

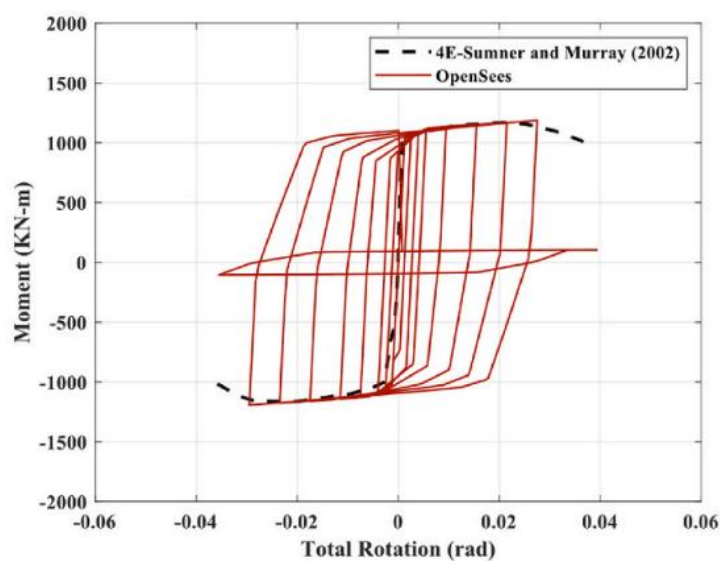
استفاده شده‌است. در این مطالعه، دو نوع اتصال برای قاب ستون پیوند طراحی شده است: (۱) اتصال صلب در ناحیه تقاطع تیرهای پیوند و تیرهای خمشی به ستون‌های محیطی و (۲) اتصال مفصلی برای تیرهای خمشی متصل به ستون‌های LC. علت استفاده از اتصالات مفصلی، جلوگیری از ورود زود هنگام تیرها به مرحله غیرارتجاعی است تا از افزایش جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل‌های زودرس جلوگیری شود. بنابراین، یک سر اتصال باید گیردار و دیگری مفصلی باشد. برای مدل‌سازی اتصالات مفصلی در نرم‌افزار اپنسیس، از مصالح هیسترتیک به‌صورت المان طول صفر مطابق با شکل (۹) استفاده شده است. سختی و مقاومت حالت‌های انتقالی المان‌ها کنترل شده و برای حالت چرخشی از داده‌های مقاله گلستانی و



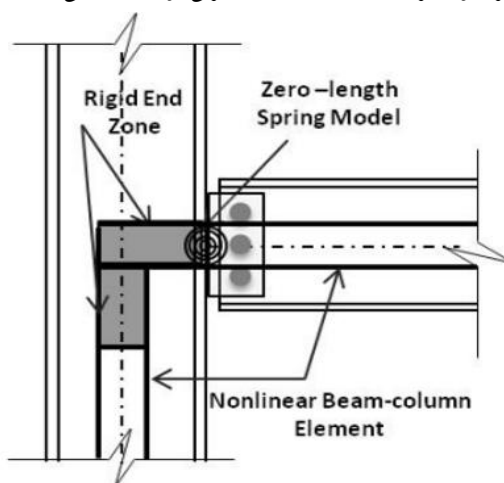
شکل ۶ روش فایبر مورد استفاده برای مدل‌سازی تیرهای پیوند [12]



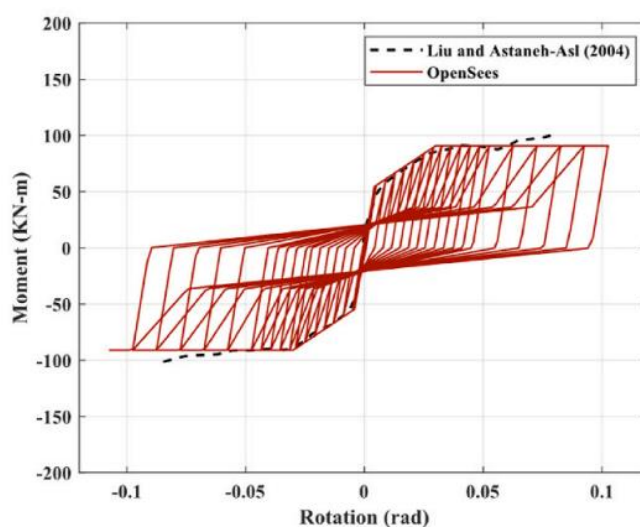
شکل ۷ نوع رفتار مصالح Steel02 در اپنسیس برای مدل‌سازی ستون‌ها



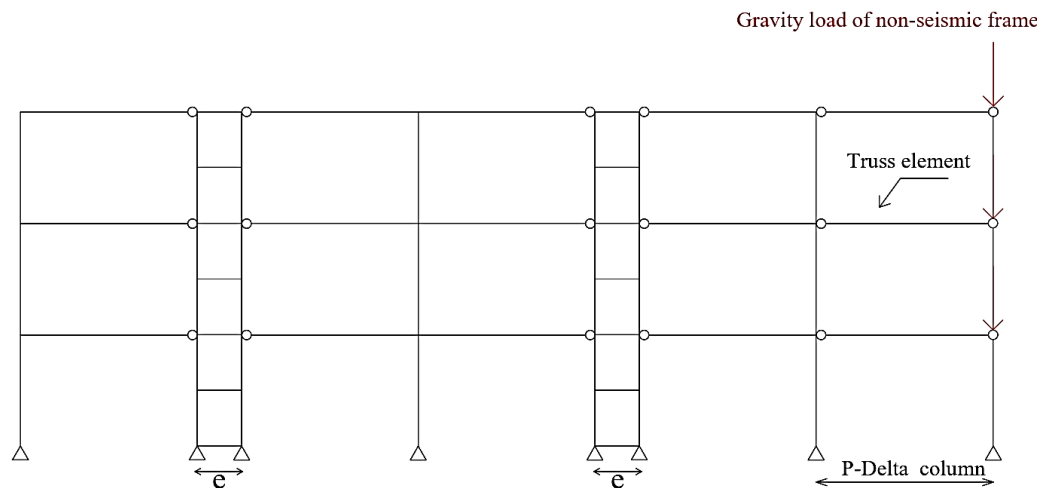
شکل ۸. نمودار کالیبراسیون تیرها و مقایسه آن با داده تجربی توسط گلستانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [21]



شکل ۹. نمایی از مدل‌سازی اتصال مفصلی تیرهای خمشی با ستون LC در اپنسیس ملکوتیان در سال ۲۰۱۶ [14]



شکل ۱۰. مقایسه بین نمودار کالیبره‌شده برای اتصال مفصلی با نمونه 2A توسط گلستانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [21]

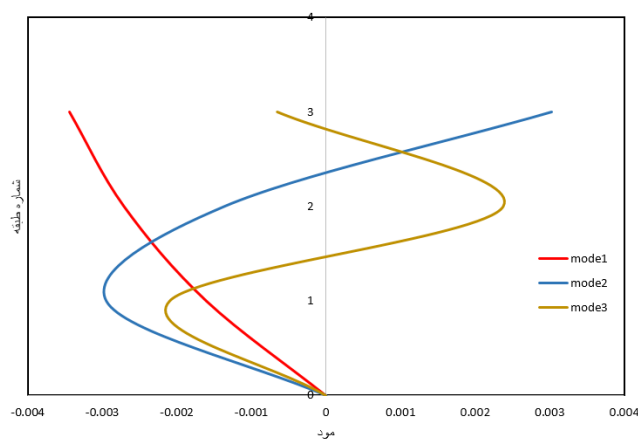


شکل ۱۱ جزئیات قاب ستون پیوند به همراه ستون P-Δ

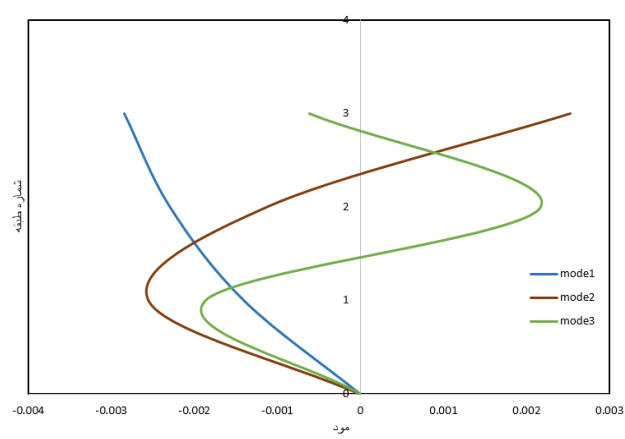
سناریوهای حاوی توالی لرزه‌ای

شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه به‌طور واقعی و در گذشته ثبت شده‌اند. زیرا شبیه‌سازی‌های مصنوعی برای زمین‌لرزه‌های متوالی دقت کافی نداشته و نتایج غیرواقع‌گرایانه‌ای تولید می‌کنند. در سال ۲۰۰۵، قدرتی امیری و منوچهری دانا [29] به بررسی پارامترهای لرزه‌ای مرتبط با انتخاب زمین‌لرزه‌ها پرداختند و دریافتند که پارامترهای PGV و EPA به‌عنوان بهترین گزینه‌ها شناخته می‌شوند. به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی مرتبط با پارامتر PGV از آنجایی که از جنس سرعت است، پارامتر EPA به‌عنوان بیشینه شتاب موثر بهترین گزینه برای ارزیابی شتابنگاشت‌ها انتخاب شده‌است. برعکس تصور برخی از مهندسان پارامتری مانند PGA (حداکثر شتاب زمین)، معیار کافی و مناسب برای انتخاب لرزه‌ها نیست. در سال ۲۰۲۰، رجبی و قدرتی امیری [30] تعدادی شتابنگاشت متوالی را از پایگاه داده PEER استخراج نمودند که از میان آن‌ها ۱۶ رکورد به‌عنوان مؤثرترین شتابنگاشت‌های متوالی انتخاب و در این مطالعه استفاده شدند. طبق جدول (۵)، شتابنگاشت‌های متوالی با مشخصات پارامترهای انتخابی و جزئیات مربوط به تاریخ و مکان وقوع زلزله‌ها ارائه شده‌است. این شتابنگاشت‌ها شامل دو لرزه اول و دوم هستند و زمین‌لرزه‌های متوالی ترکیبی از این دو لرزه با یک فاصله زمانی معین شتاب صفر بین آن‌ها می‌باشند.

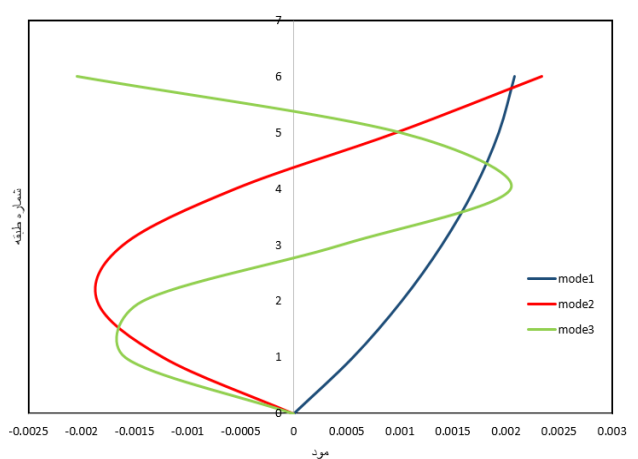
از طرفی، تحلیل مودال (Modal Analysis) یکی از روش‌های رایج در مهندسی سازه و دینامیک است که برای بررسی و تحلیل رفتار دینامیکی سازه‌ها در مواجهه با ارتعاشات استفاده می‌شود. نتایج حاصل شده از این تحلیل، برای هر ۴ قاب ستون پیوند به صورت مجزا در قالب ۳ شکل مودی (Mode Shapes) در شکل (۱۲) نمایش داده و در جدول (۳)، فرکانس‌های طبیعی حاصل از ارتعاش سازه هر قاب ارائه شده‌است. لازم به ذکر است که مدل‌سازی قاب‌های ستون پیوند با استفاده از نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی مقاله گلستانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [21] اعتبارسنجی شده‌است. بدین جهت برای مدل‌سازی طبق مقاله مرجع برای اعضا سازه از مصالح A992 استفاده و مقدار مدول الاستیسیته و تنش تسلیم نیز به ترتیب برابر با ۱۹۹۹۴۷/۹۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌است. قاب انتخابی، یک سازه ۳ طبقه به ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر و با طول دهانه ۱٫۲۵ متر تیرپیوند است که نمای آن در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. جزئیات مقاطع اعضا در جدول (۴) ارائه شده و مقدار زمان تناوب مدل مورد مطالعه و مدل مرجع به ترتیب برابر با ۰/۶۶۸ و ۰/۶۳۷ ثانیه با میزان اختلاف کمتر از ۵ درصد قابل قبول واقع شده‌است. همچنین، نمودار بارافزون مدل مرجع با مدل قاب مورد مطالعه در شکل (۱۴) مقایسه شده که نشان از انطباق قابل قبول دارد.



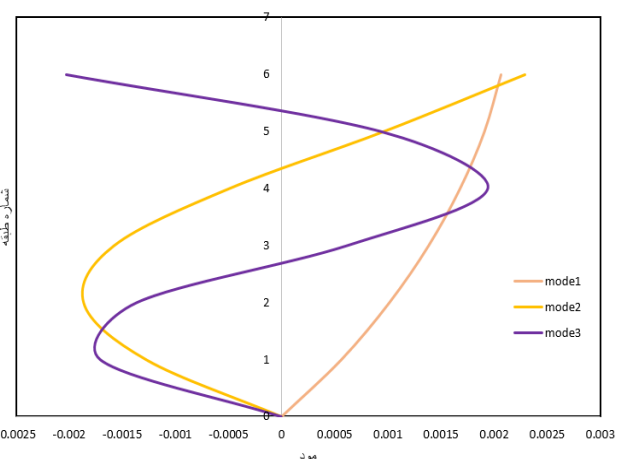
(ب)



(الف)



(د)

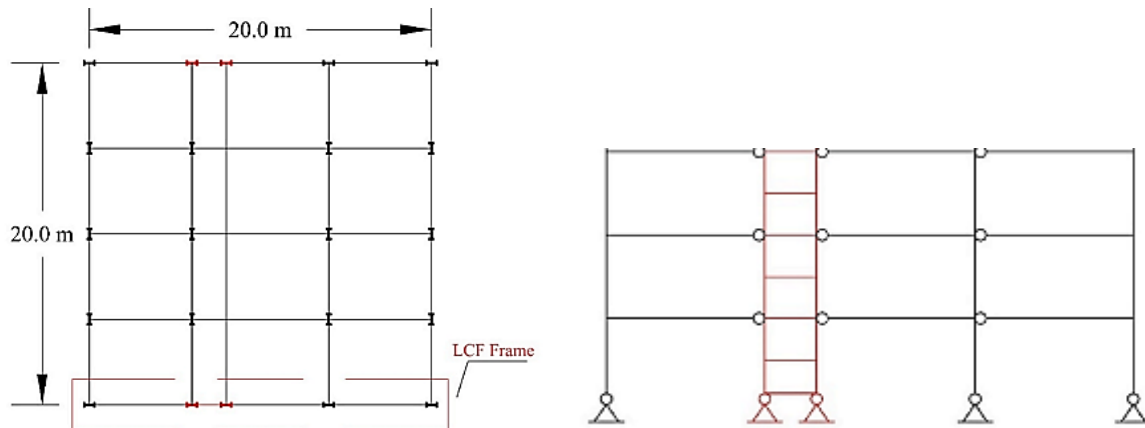


(ج)

شکل (۱۲) شکل‌های مودی قاب (الف) طبقه برشی، (ب) طبقه خمشی، (ج) ۶ طبقه برشی و (د) قاب ۶ طبقه خمشی

جدول ۳ فرکانس‌های طبیعی قاب‌ها حاصل از تحلیل مودال

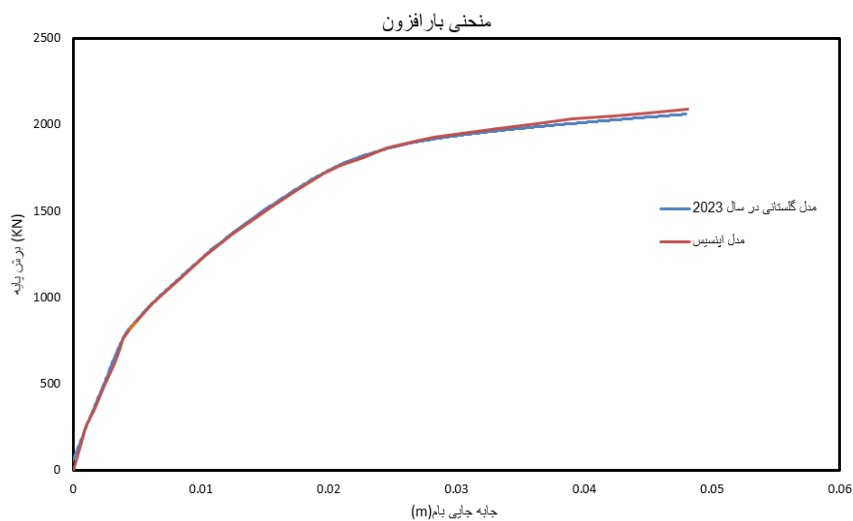
نام سازه	فرکانس ۱ (Hz)	فرکانس ۲ (Hz)	فرکانس ۳ (Hz)
۳ طبقه برشی	0.90139	4.03607	8.81666
۳ طبقه خمشی	0.95989	4.47805	10.49387
۶ طبقه برشی	0.657228	2.43501	5.42435
۶ طبقه خمشی	0.59176	2.20023	4.76001



شکل ۱۳ نما و پلان قاب انتخابی از مدل گلستانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [21]

جدول ۴ مقاطع سازه ۳ طبقه مدل مرجع [21]

نام سازه	طبقه	سیستم قاب ستون پیوند			سیستم قاب خمشی	
		ستون	تیر پیوند	تیر پیوند میانی	تیر	ستون محیطی
طبقه ۳	۱	W14×145	I35×1-20×2	I35×1-22×2	W12×58	W14×38
	۲	W14×120	I35×1-20×2	I35×1-20×2	W12×58	W14×38
	۳	W14×120	I30×1-20×2	I30×1-20×2	W12×53	W14×38



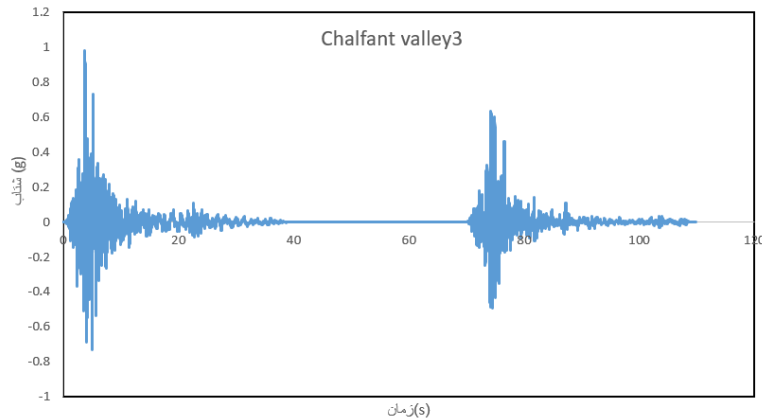
شکل (۱۴) مقایسه بین منحنی بارافزون قاب مدل شده و مدل مرجع [21]

به منظور مقیاس گذاری شتابنگاشت های لرزه اول، از آیین نامه ایران (استاندارد ۲۸۰۰) ویرایش چهارم استفاده شده است. طبق روش استاندارد ۲۸۰۰، طیف میانگین پاسخ شتاب لرزه اول باید در محدوده 0.2T تا 1.5T از طیف طرح استاندارد برای خاک نوع ۲ و خطر لرزه خیزی بسیار زیاد، کمتر نشود.

با اینکه زمین لرزه ها معمولا فاصله زمانی بالایی دارند، اما زمان زیاد بین لرزه ها باعث افزایش حجم تحلیل و محاسبات می شود. به همین دلیل، در این مطالعه، فاصله زمانی بین لرزه ها بر اساس پیشنهاد وانگ [31] و همکاران در سال ۲۰۲۳ برابر با ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل (۱۵) نمونه ای از شتابنگاشت متوالی چفنت ولی ۳ در سال ۱۹۸۶ را نشان می دهد.

جدول ۵ مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه [30]

شماره	نام	تاریخ	EPA	PGA	ایستگاه
1	Chalfant Valley3	7/20/1986	0.2451	0.2382	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch
		7/21/1986	0.4854	0.4246	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch
2	Coalinga	7/22/1983	0.0993	0.1539	CDMG 46617 Coalinga-14th & Elm (Old CHP)
		7/25/1983	0.3513	0.5813	CDMG 46617 Coalinga-14th & Elm (Old CHP)
3	Mammoth4	5/27/1980	0.1722	0.2178	USC 37 USC McGee Creek Inn
		5/31/1980	0.2767	0.3689	USC 37 USC McGee Creek Inn
4	Mammoth5	5/25/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		5/27/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
5	Mammoth6	5/26/1980	0.1117	0.0926	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		5/27/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
6	Chalfant Valley9	7/20/1986	0.088	0.1105	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St
		7/21/1986	0.2197	0.2058	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St
7	Livermore	1/24/1980	0.086	0.1066	CDMG 57187 San Ramon - Eastman Kodak
		1/27/1980	0.2119	0.1917	CDMG 57187 San Ramon - Eastman Kodak
8	Mammoth1	5/25/1980	0.2387	0.2818	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.
		5/25/1980	0.4091	0.4143	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.
9	Mammoth7	5/25/1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
		5/25/1980	0.2618	0.4156	CDMG 54099 Convict Creek
10	Mammoth9	5/25/1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
		5/27/1980	0.2207	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
11	Mammoth10	5/25/1980	0.2041	0.2172	CDMG 54099 Convict Creek
		5/25/1980	0.2618	0.4156	CDMG 54099 Convict Creek
12	Mammoth12	5/25/1980	0.2041	0.2172	CDMG 54099 Convict Creek
		5/27/1980	0.2207	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
13	Mammoth15	5/26/1980	0.0912	0.1234	CDMG 54099 Convict Creek
		5/27/1980	0.2207	0.3169	CDMG 54099 Convict Creek
14	Mammoth17	5/25/1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		5/25/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
15	Mammoth20	5/25/1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		5/27/1980	0.4287	0.6293	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
16	Mammoth21	5/25/1980	0.0884	0.1369	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		5/25/1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)



شکل ۱۵ نمونه شتابنگاشت متوالی چفلنت ولی ۳ در سال ۱۹۸۶ با بازه زمانی شتاب صفر ۳۰ ثانیه

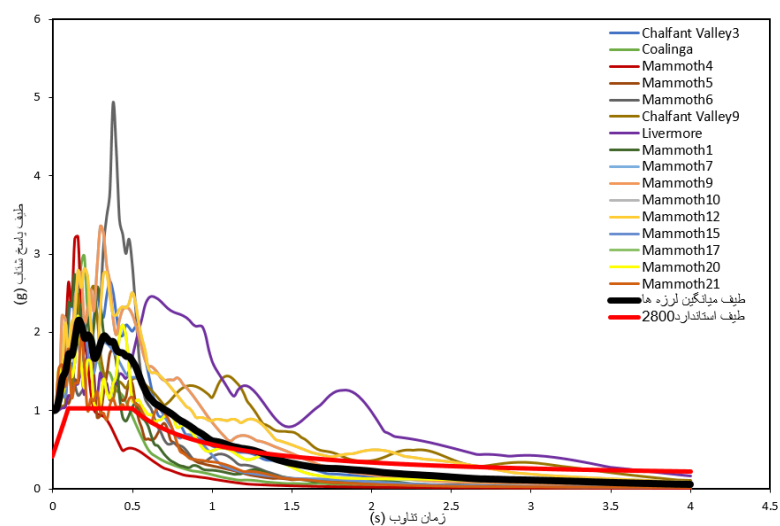
همراه نمودار رفتاری تیرهای پیوند به صورت دو عملکرد رفتاری برشی و خمشی برای هر چهار سازه در طبقات اول نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای هیستریزس، می توان نتیجه گرفت که حلقه های تشکیل شده تیرهای پیوند به خوبی توانسته اند در بازه مورد نظر مانند نمودار رفتاری خود عمل کنند. تفاوت های رفتاری تیرهای پیوند خمشی و برشی به نحوه عملکرد آنها تحت بارهای دینامیکی و شکل پذیری مرتبط است. تیرهای پیوند خمشی به دلیل شکل پذیری بالاتر، معمولاً عملکرد بهتری در برابر بارهای چرخه ای و تغییر شکل های بزرگ دارند و در نمودارهای هیستریزس، حلقه های بزرگتری تشکیل می دهند که نشان دهنده جذب و اتلاف انرژی زیاد است. این تیرها می توانند انرژی بیشتری را جذب کرده و از آسیب های شدید جلوگیری کنند. در مقابل، تیرهای پیوند برشی به دلیل وابستگی به مقاومت برشی، انعطاف پذیری کمتری دارند و بیشتر در نواحی خاصی از تیر مانند اتصال ها دچار شکست برشی می شوند، بنابراین شکل پذیری کمتری دارند. در ادامه پس از تحلیل قاب های مورد مطالعه در معرض زلزله های با و بدون توالی لرزه ای، پارامترهایی از قبیل جابجایی نسبی بام و طبقات، جابجایی پسماند، برش پایه و شاخص خسارت پارک-انگ (۱۹۸۵) استخراج شده که در ادامه به تفکیک معرفی شده اند.

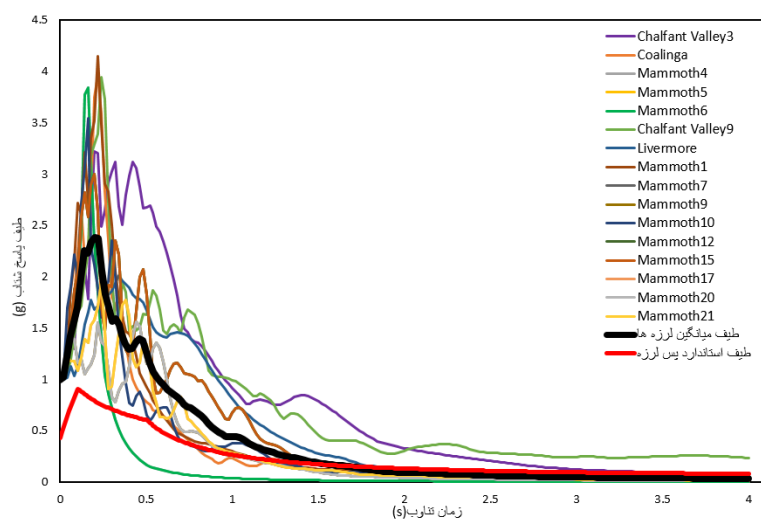
همچنین مقدار زمان تناوب T سازه بر اساس رابطه موجود در بند (۱-۳-۳) قاب های فولادی استاندارد ۲۸۰۰ با توجه به ارتفاع سازه از تراز پایه محاسبه شده است. برای مقیاس شتابنگاشت های لرزه دوم، از طیف طرح جدیدی بر اساس روشی که در مطالعه عبدالله زاده و همکاران در سال ۲۰۱۹ [32] ارائه شده، مقیاس بندی همانند طیف نخست صورت گرفته است. در شکل های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب مقیاس بندی شتابنگاشت های لرزه اول و دوم نمایش داده شده است. در آخر قاب های مورد نظر تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در معرض لرزه های فوق الذکر به ۲ صورت منفرد (لرزه نخست) و زلزله حاوی توالی لرزه ای (لرزه نخست و لرزه دوم) قرار گرفته اند.

نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی غیرخطی

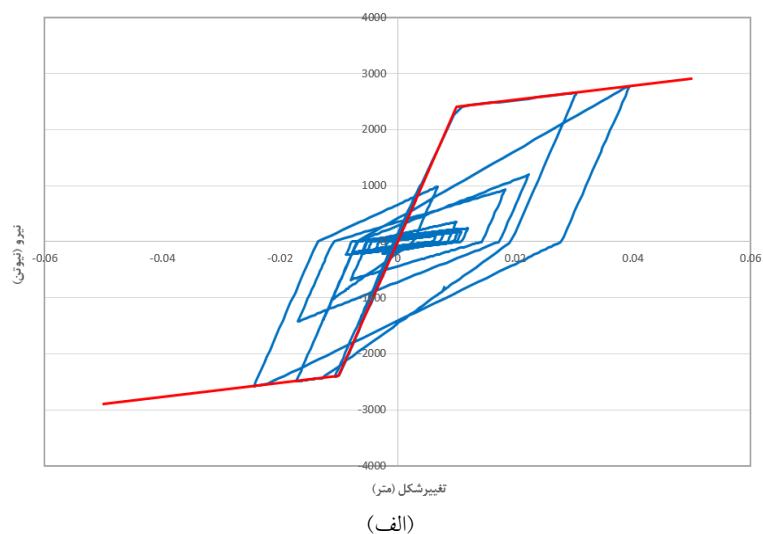
به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه ها، قاب ها باید تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گیرند. ابتدا بارهای ثقیلی به سازه ها اعمال شده و سپس تحلیل غیرخطی دینامیکی با دستورات همگرایی در محیط اپنسیس انجام می شود. به جهت اطمینان از صحت عملکرد صحیح تیرهای پیوند با توجه به مدل رفتاری خود، قاب ها تحت زلزله ای نورتریج در سال ۱۹۹۴ با مقدار حداکثر شتاب زمین (PGA) برابر با 1g قرار گرفته و در شکل (۱۸) نمونه هایی از عملکرد تیرهای پیوند به صورت حلقه های چرخه ای نیرو- تغییر شکل به

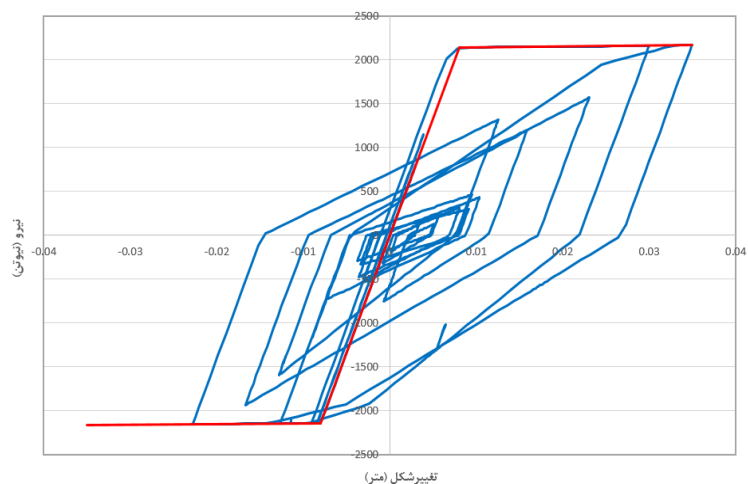


شکل ۱۶ نمودار مقیاس شده لرزه‌های اول طبق طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰

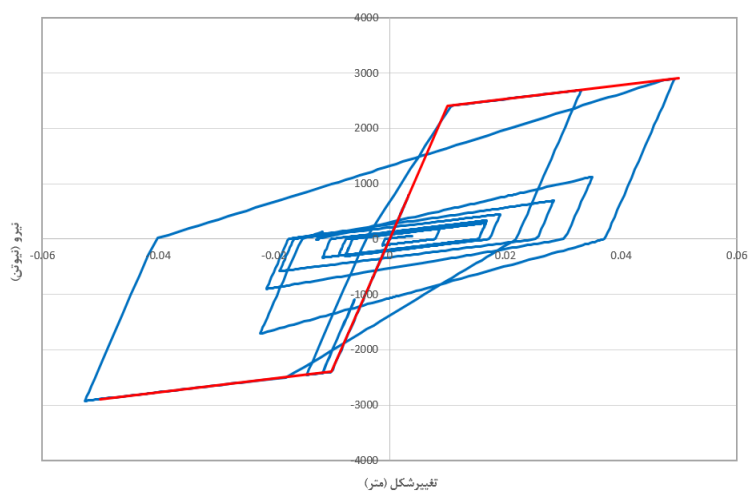


شکل ۱۷ نمودار مقیاس شده لرزه‌های دوم طبق طیف ارائه شده توسط عبدالله زاده و همکاران در سال ۲۰۱۹ [32]

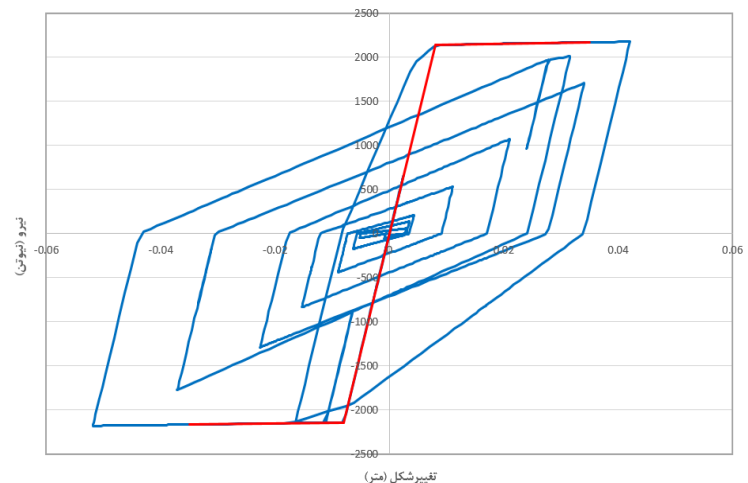




(ب)



(ج)



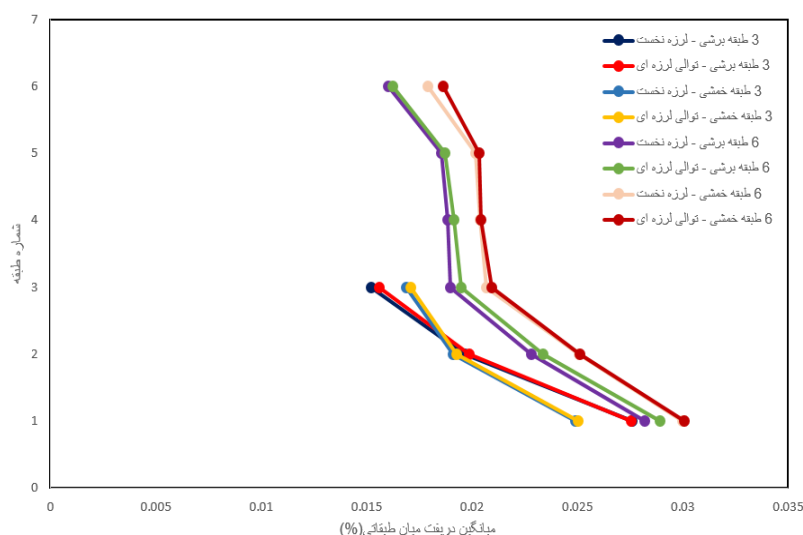
(د)

شکل ۱۸ نمودار هیستریزیس به همراه منحنی رفتاری تیر پیوند (الف) قاب ۳ طبقه با رفتاربرشی در طبقه اول، (ب) قاب ۳ طبقه با رفتارخمش در طبقه اول، (ج) قاب ۶ طبقه با رفتاربرشی در طبقه اول و (د) قاب ۶ طبقه با رفتارخمش در طبقه اول

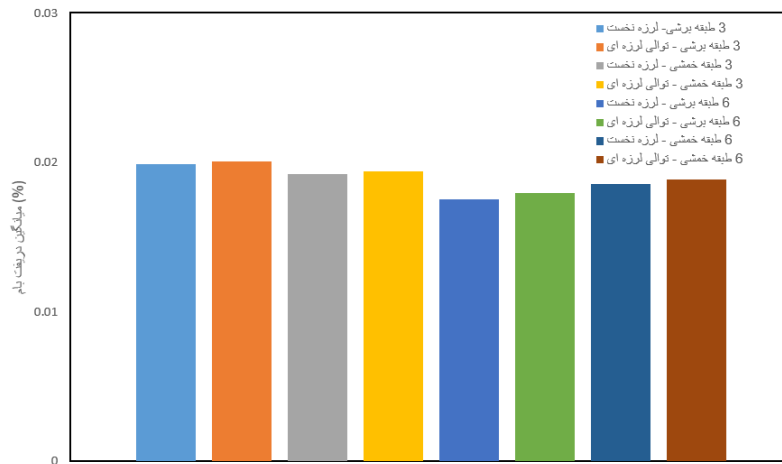
جابه‌جایی نسبی بام و طبقات

مقدار جابه‌جایی نسبی بام برابر با میزان جابه‌جایی در بام به ارتفاع کل سازه می‌باشد. از طرفی اگر اختلاف مقادیر جابه‌جایی در هر طبقه با طبقه پایین‌تر خود به ارتفاع آن بدست بیاید به آن نیز جابه‌جایی نسبی میان طبقاتی می‌گویند. مطابق شکل (۱۹)، بیشترین مقدار جابه‌جایی نسبی طبقات در زلزله لیورمور رخ داده و با افزایش ارتفاع طبقات، این جابه‌جایی کاهش یافته‌است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که در حالت زلزله‌های متوالی، جابه‌جایی نسبی در تمام قاب‌ها بیشتر از حالت زلزله منفرد است. نسبت حداکثر میانگین جابه‌جایی در زلزله‌های متوالی به منفرد در قاب‌های ۳ و ۶ طبقه با عملکرد برشی تیرپیوند به ترتیب برابر $1/0.256$ و $1/0.28$ و در عملکرد خمشی تیرپیوند برابر $1/0.119$ و $1/0.399$ بوده‌است. با افزایش تعداد طبقات، جابه‌جایی نسبی نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۲۰)، حداکثر میانگین جابه‌جایی نسبی بام برای قاب‌ها تحت توالی لرزه‌ای و لرزه اول نشان داده شده‌است. بیشترین مقدار جابه‌جایی برای سازه ۳ طبقه برشی در حالت متوالی برابر با ۰/۰۲ درصد و کمترین مقدار برای سازه ۶ طبقه برشی در حالت منفرد برابر با ۰/۰۱۷۵ درصد است. همچنین نسبت جابه‌جایی

توالی لرزه‌ای به منفرد در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه برشی به ترتیب برابر با $1/0.008$ و $1/0.239$ و در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه خمشی برابر با $1/0.0087$ و $1/0.159$ محاسبه شده‌است. به طور کلی، با افزایش تعداد طبقات، مقدار جابه‌جایی نسبی بام کاهش می‌یابد. قاب‌های ۶ طبقه در مقایسه با قاب‌های ۳ طبقه، جابه‌جایی نسبی بیشتری را در طبقات بالاتر تجربه کرده‌اند. این افزایش نشان می‌دهد که طبقات بالاتر در سازه‌های بلندتر (۶ طبقه) در برابر زلزله‌های متوالی آسیب‌پذیرتر هستند و این پدیده به دلیل افزایش تغییرشکل تجمعی در طی پدیده توالی لرزه‌ای است. قاب‌های حاوی تیرهای پیوند برشی مقدار جابه‌جایی نسبی کمتری به نسبت قاب‌ها با تیر پیوند خمشی دارند. این رفتار بیانگر مقاومت بالاتر قاب‌های برشی در برابر جابه‌جایی‌های نسبی طبقات است که معمولاً ناشی از سختی بیشتر این سیستم‌ها است. از طرف دیگر، قاب‌های خمشی جابه‌جایی بیشتری دارند که می‌تواند به دلیل شکل‌پذیری بالاتر آن‌ها باشد. در طبقات پایین، جابه‌جایی نسبی میان قاب‌های ۳ طبقه و ۶ طبقه تفاوت زیادی ندارد. این نشان می‌دهد که بخش‌های پایین‌تر سازه عمدتاً تحت اثر رفتار سختی کل سازه قرار دارند و تغییرات اصلی در طبقات بالاتر رخ می‌دهد.



شکل ۱۹ میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات برای ۴ قاب تحت زلزله منفرد و متوالی

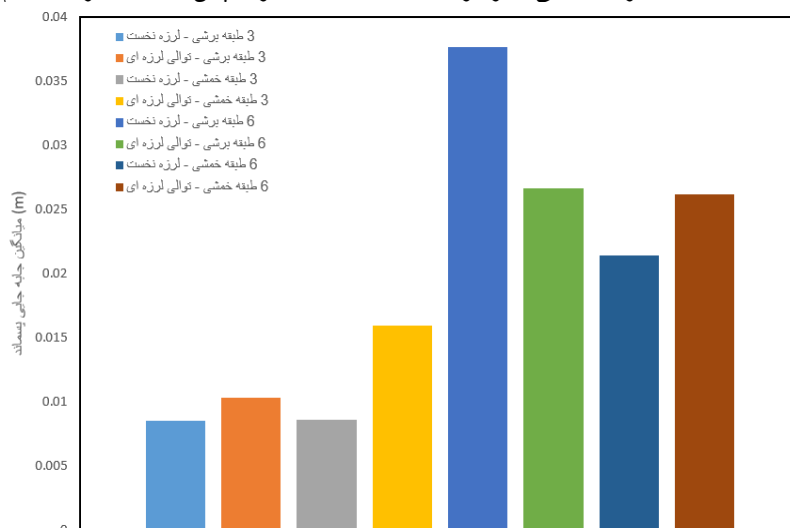


شکل ۲۰ میانگین حداکثر جابه‌جایی بام برای ۴ قاب تحت زلزله منفرد و متوالی

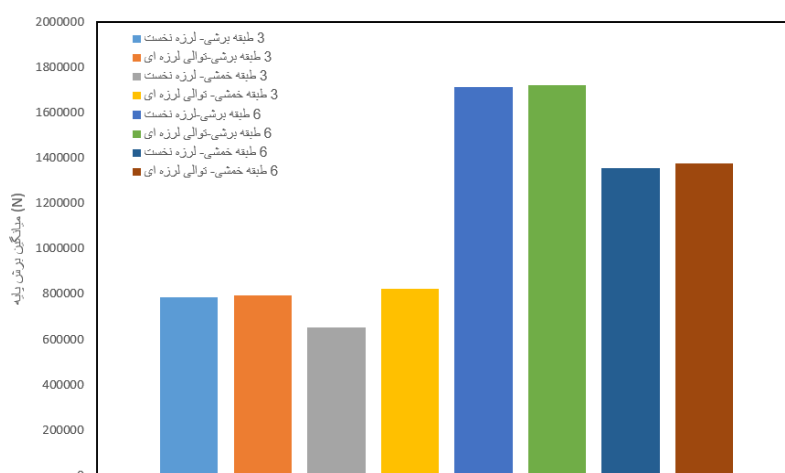
جابه‌جایی پسماند

دوم شدیدتر بوده‌است. جابجایی پسماند ناشی از زلزله‌های متوالی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از زلزله‌های منفرد است. برای مثال، قاب برشی ۳ طبقه تحت زلزله متوالی بیشترین مقدار جابجایی را نشان می‌دهد این امر نشان می‌دهد که اثر تجمعی زلزله‌های متوالی می‌تواند باعث باقی‌ماندن تغییر شکل دائمی در سازه شود. تیرهای پیوند خمشی به دلیل تغییر شکل پذیری بالا، انرژی بیشتری در بارگذاری چرخه‌ای جذب و اتلاف می‌کنند. در قاب‌های ۳ طبقه، سهم این تیرها در جذب انرژی افزایش یافته و جابجایی پسماند تحت توالی لرزه‌ای نسبت به لرزه نخست بیشتر است. در سازه‌های ۶ طبقه، توزیع پیچیده نیروها و تمرکز انرژی در طبقات بالا، جابجایی پسماند طبقات پایین را کاهش می‌دهد. رفتار فداشونده این تیرها امکان بازگشت به تعادل بهتر پس از زلزله دوم را فراهم می‌کند.

جابه‌جایی پسماند، یکی دیگر از پارامترهای بدست آمده است که برابر با میزان جابه‌جایی اضافی باقی‌مانده در سازه بعد از ارتعاش نهایی سازه می‌باشد. در این مطالعه، میانگین جابه‌جایی پسماند نیز بررسی شده و نمودارهای آن برای تمام قاب‌ها در دو حالت لرزه‌ای در شکل (۲۱) ارائه شده‌است. حداکثر و حداقل مقادیر جابه‌جایی پسماند به ترتیب در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه با رفتار برشی در حالت زلزله نخست برابر با ۳۷/۶۴ و ۸/۵۲۳ میلی‌متر ثبت شده‌است. نسبت‌های جابه‌جایی پسماند برای قاب‌های ۳ و ۶ طبقه با رفتار برشی به ترتیب برابر ۱/۲۰۷ و ۰/۷۰۸ و برای سازه‌های ۳ و ۶ طبقه با رفتار خمشی برابر با ۱/۸۵۶ و ۱/۲۲۳ است. این اختلاف در جابه‌جایی باقی‌مانده نشان می‌دهد که در قاب ۳ طبقه با عملکرد خمشی، اثر لرزه



شکل ۲۱ میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند برای ۴ قاب تحت زلزله منفرد و متوالی



شکل ۲۲ میانگین حداکثر نیروی برش پایه برای ۴ قاب تحت زلزله منفرد و متوالی

افزایش نیروی برشی ناشی از زلزله است. زلزله‌های متوالی منجر به افزایش نیروی برش پایه در تمامی قاب‌ها شده است که نشان‌دهنده اثر تجمعی زلزله‌های متوالی در افزایش نیروهای داخلی سازه می‌باشد.

شاخص خسارت (Park-Ang (1985)

عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها با مدل آسیب یا شاخص خرابی ارزیابی می‌شود. انتخاب پارامتر مناسب برای توصیف میزان آسیب سازه، گامی اساسی در بهبود عملکرد آن تحت زمین‌لرزه‌های متعدد است. شاخص خسارت به عنوان معیاری کمی برای اندازه‌گیری آسیب و تعیین سطوح خسارت ناشی از نیروهای خارجی بر سازه استفاده می‌شود. در ادبیات فنی و مهندسی سازه، شاخص‌های خسارت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: یکی بر اساس حداکثر تغییرشکل یا تغییرمکان نسبی سازه و دیگری بر اساس انرژی تلف شده ناشی از پاسخ‌های هیستریک. همچنین، شاخص‌های ترکیبی وجود دارند که تأثیرات تغییرشکل و اتلاف انرژی را به‌طور همزمان برای ارزیابی بارهای چرخه‌ای نشان می‌دهند، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، شاخص خسارت پارک و آنگ است [33]. شاخص خسارت پارک و آنگ در سال ۱۹۸۵ برای ارزیابی خسارت لرزه‌ای سازه‌ها طراحی شده و اثر ترکیبی بارگذاری‌های چرخه‌ای و تغییرشکل‌های بیش از اندازه را مدنظر قرار می‌دهد. این شاخص (D) طبق رابطه (۹) مجدداً بازنویسی شده است [34]:

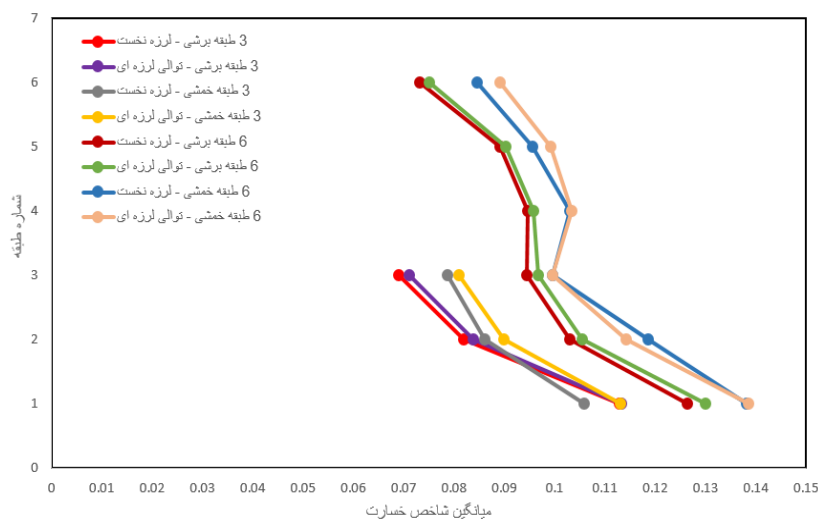
نیروی برش پایه

نیروی برش پایه برابر با کل نیروی جانبی واردشده به تراز پایه سازه در زمان وقوع زمین‌لرزه است. حداکثر میانگین مقدار برش پایه سازه‌ها در شکل (۲۲) برای لرزه اول و توالی لرزه‌ای نشان داده شده است. بیشترین نیروی برش پایه در قاب ۶ طبقه برشی با مقدار ۱۷۲۱/۴۴ کیلونیوتن در حالت توالی لرزه‌ای و کمترین نیروی برش پایه در قاب ۳ طبقه خمشی با مقدار ۶۵۱/۷۲ کیلونیوتن محاسبه شده است. نسبت‌های برش پایه در حالت توالی لرزه‌ای به منفرد در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه برشی به ترتیب ۱/۰۰۸۷ و ۱/۰۰۵ و در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه خمشی برابر با ۱/۲۶۲ و ۱/۱۴۷ به دست آمده است. این نتایج نشان‌دهنده افزایش اثرات لرزه‌ای در زلزله‌های متوالی نسبت به زلزله‌های منفرد است و همچنین با افزایش تعداد طبقات، مقادیر نیروی برش پایه نیز افزایش می‌یابد. نیروی برش پایه در زلزله‌های متوالی بیشتر از زلزله‌های منفرد است. این افزایش نشان می‌دهد که اثرات تجمعی زلزله‌های متوالی می‌تواند باعث افزایش تقاضای نیروی برش در پایه سازه شود. قاب‌ها با رفتار برشی در مقایسه با قاب‌ها با رفتار خمشی تحت زلزله‌های منفرد و متوالی نیروی برش پایه بیشتری را تجربه می‌کنند. این مسئله ناشی از سختی بالاتر قاب‌های برشی است که باعث انتقال نیروی بیشتری به پایه می‌شود. همچنین قاب‌های ۶ طبقه، نیروی برش پایه بیشتری نسبت به قاب‌های ۳ طبقه تجربه می‌کنند. این رفتار ناشی از افزایش جرم سازه و در نتیجه

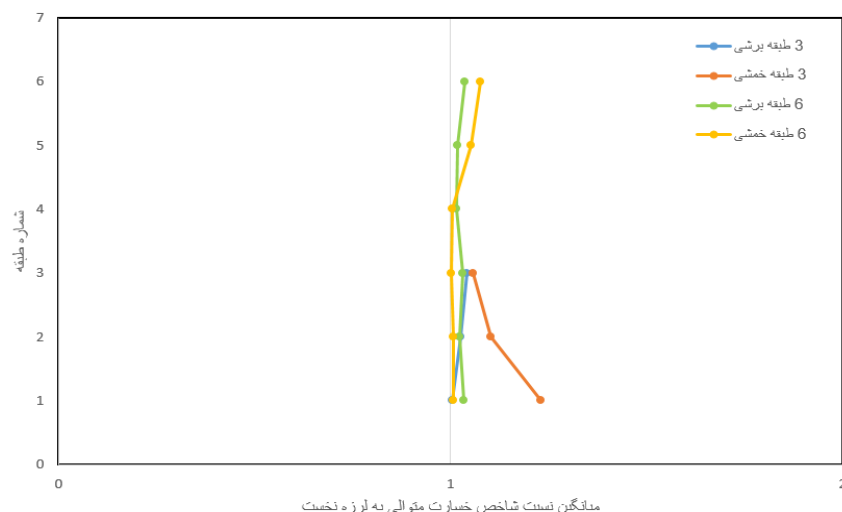
نسبت‌های خرابی سازه‌ها در طبقات مختلف چهار سازه را نمایش می‌دهد. مقادیر این نسبت‌ها عمدتاً بالاتر از یک است و در قاب ۳ طبقه خمشی، تفاوت بین زلزله اول و توالی زلزله‌ای بیشتر به چشم می‌خورد. شکل (۲۵)، نمودار حداکثر مقدار میانگین نسبت حالت‌های لرزه‌ای را برای مقایسه بهتر نشان می‌دهد. به‌طور کلی، سازه‌های کوتاه‌مرتبه نسبت‌های لرزه‌ای بیشتری نسبت به سازه‌های میان‌مرتبه دارند. بر اساس طبقه‌بندی شدت آسیب لرزه‌ای، شاخص خسارت سازه‌ها در هر رکورد لرزه‌ای نشان می‌دهد که عمدتاً آسیب‌ها کم بوده و در برخی موارد به میزان متوسط کمتر از ۰/۴ رسیده‌اند. همچنین، با تعویض تیرهای پیوند، سازه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب تیرهای پیوند در قاب LCF است. نتایج حاصل از قاب‌های ستون‌پیوند دودهانه تحت توالی لرزه‌ای نشان‌دهنده اثرات قابل توجه زمین‌لرزه‌های متوالی است، که باید در استانداردهای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها مد نظر قرار گیرد. این موضوع حائز اهمیت است، زیرا خسارت‌های شدید در حالت تک‌زلزله ممکن است فرصت بازسازی را کاهش دهد و با وقوع زلزله دیگر، خطر خرابی و فروپاشی سازه‌ها افزایش می‌یابد. با این حال، قاب‌های ستون‌پیوند نیاز به بررسی‌های بیشتر دارند، اما به‌طور کلی، این سیستم به‌دلیل رفتارهای فداشونده تیرهای پیوند قابل تعویض، عملکرد مناسبی در برابر زلزله از خود نشان می‌دهد.

$$DI = \frac{\delta M}{\delta u} + \frac{\beta}{Q_y \delta u} \int dE \quad (9)$$

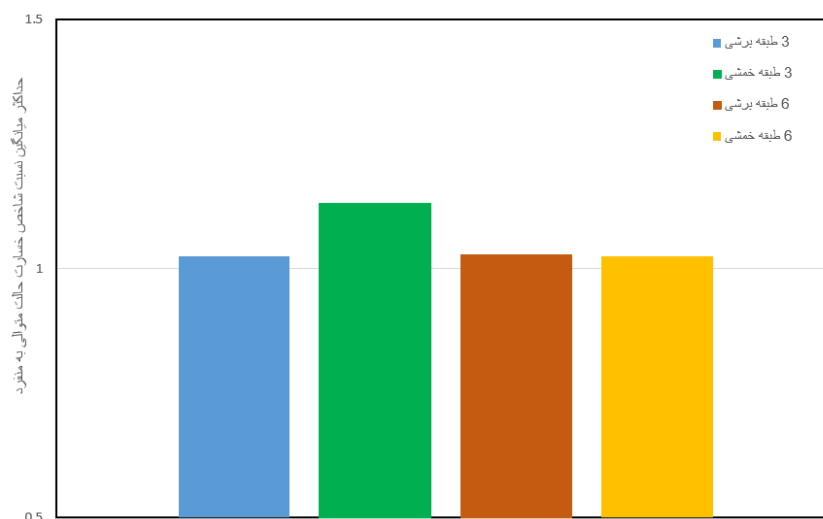
با توجه به رابطه (۹)، δM برابر با مقدار حداکثر تغییر شکل عضو ناشی از نیروی‌های جانبی زلزله، δu برابر با مقدار ظرفیت نهایی تغییر شکل عضو، β ضریبی ثابت برای شاخص خسارت که در مرتبط با سطح آسیب و انرژی اتلاف‌شده ساختمان می‌باشد. این ضریب بسته به نوع ساختمان برای سازه‌های بتنی و فولادی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۲۵ بدست آمده‌است. $\int dE$ برابر با مقدار انرژی انباشته یا تلف‌شده در سازه تحت نیروهای زلزله و Q_y نیز نیرو یا مقاومت برشی تسلیم ساختمان می‌باشد. شاخص خسارت سازه‌ها به پنج سطح آسیب طبقه‌بندی می‌شود: DI کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده عدم آسیب، DI بین ۰/۱ و ۰/۲۵ آسیب جزئی، D بین ۰/۲۵ و ۰/۴ آسیب متوسط، DI بین ۰/۴ تا ۱ آسیب شدید و عدم قابلیت تعمیر، و DI بیشتر از ۱ نشان‌دهنده فروپاشی کامل سازه است [33]. مطابق شکل (۲۳)، میانگینی از شاخص خرابی‌های ارزیابی‌شده در تمامی طبقات قاب‌ها را در دو حالت متوالی و منفرد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر خرابی در قاب‌های ۶ طبقه بیشتر از قاب‌های ۳ طبقه بوده و تیرهای پیوند با رفتار خمشی تأثیر بیشتری بر افزایش میزان خرابی دارند؛ به‌طوری‌که عملکرد لرزه‌ای قاب‌های برشی بهتر از خمشی است. همچنین، در طبقات ۴ به بالاتر در سازه‌های ۶ طبقه، میزان خسارت لرزه‌ای به‌طور جزئی افزایش یافته و قاب ۶ طبقه خمشی بالاترین مقادیر خرابی را دارد. شکل (۲۴)، میانگینی از



شکل ۲۳ میانگین شاخص خسارت برای ۴ قاب ستون پیوند تحت زلزله منفرد و متوالی



شکل ۲۴ میانگین نسبت شاخص خسارت در هر طبقه تحت توالی لرزه‌ای به لرزه اول برای ۴ قاب ستون پیوند



شکل ۲۵ میانگین نسبت حداکثر شاخص خسارت تحت توالی لرزه‌ای به منفرد در ۴ قاب ستون پیوند

نتیجه گیری

۱. در این مطالعه به منظور ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های فولادی حاوی سیستم قاب-ستون-پیوند دوگانه در معرض زلزله‌های متوالی، چهار قاب فولادی مجهز به LCF حاوی تیرهای پیوند با رفتار برشی و خمشی طراحی و در نرم‌افزار اپنسیس پیاده‌سازی شده‌است. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در دو حالت زلزله‌های با و بدون توالی لرزه‌ای، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی‌های نسبی طبقات و بام، نیروی برش پایه و شاخص خسارت پارک-انگ استخراج شده‌است. مهم‌ترین نتایج حاصله در ذیل به صورت مختصر بیان شده‌است:
۲. حداکثر نیروی برش پایه نیز در زلزله‌های متوالی افزایش یافته است؛ به‌طور میانگین در سازه‌های ۳ و ۶ طبقه، این نسبت بین ۱ تا ۲۶ درصد بیشتر از حالت زلزله منفرد بوده‌است.
۳. شاخص خسارت در زلزله‌های متوالی برای سازه‌های قاب ستون پیوند با رفتار تیرپیوند خمشی به‌طور میانگین تا ۳۸ درصد بیشتر از سازه‌ها با رفتار تیرپیوند برشی است، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر سازه‌ها با عملکرد خمشی در برابر زلزله‌های متوالی است.
۴. قاب‌های ۳ طبقه در حالت لرزه منفرد و متوالی تفاوت کمتری در شاخص خسارت نشان داده‌اند. اما با افزایش تعداد طبقات، این تفاوت‌ها بیشتر می‌شود. در سازه‌های ۶

در این مطالعه به منظور ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های فولادی حاوی سیستم قاب-ستون-پیوند دوگانه در معرض زلزله‌های متوالی، چهار قاب فولادی مجهز به LCF حاوی تیرهای پیوند با رفتار برشی و خمشی طراحی و در نرم‌افزار اپنسیس پیاده‌سازی شده‌است. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در دو حالت زلزله‌های با و بدون توالی لرزه‌ای، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی‌های نسبی طبقات و بام، نیروی برش پایه و شاخص خسارت پارک-انگ استخراج شده‌است. مهم‌ترین نتایج حاصله در ذیل به صورت مختصر بیان شده‌است:

۱. زلزله‌های متوالی در بسیاری از مقادیر بدست‌آمده اثرات مخرب‌تری نسبت به زلزله‌های منفرد دارند. به‌طور میانگین، جابه‌جایی‌های نسبی طبقات در حالت زلزله‌های متوالی ۲ تا

۳. بررسی اندرکنش بین خاک و سازه برای قاب‌های ستون پیوندشده

۴. بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای قاب‌ها در ترکیب با میراگرهای سازه‌ای تحت زمین لرزه‌های متوالی

فهرست علائم

R	ضریب رفتار
C ^d	ضریب بزرگنمایی
Ω_0	ضریب اضافه مقاومت
e	طول تیرپیوند
M _p	لنگر پلاستیک مقطع
V _p	برش پلاستیک مقطع
Z _p	اساس مقطع پلاستیک
F _y	تنش تسلیم
tf	ضخامت بال
tw	ضخامت جان
b	طول بال
d	عمق تیر
R0, R1, R2	پارامتر کنترل حالت الاستیک به پلاستیک
D	شاخص خسارت
δm	حداکثر تغییر شکل عضو
δu	ظرفیت نهایی تغییر شکل عضو
β	ضریب ثابت شاخص خسارت
$\int dE$	انرژی انباشته شده در عضو
Q _y	نیروی برش تسلیم

واژه نامه

پل سنفرانسیسکو اوکلند

San Francisco Oakland Bay Bridge

Dusicka and Lewis دوسیکا و لویس

Dusicka and Iwai دوسیکا و ایوای

Li et al. لی و همکاران

Montuori et al. مونتوری و همکاران

Park-ang پارک انگ

Etabs ایتبس

Opensees اپنسیس

طبقه، میزان جابه‌جایی نسبی و شاخص خسارت در زلزله‌های متوالی به‌طور میانگین ۲ تا ۴ درصد بیشتر از حالت زلزله منفرد است.

۵. در قاب ۶ طبقه برشی، میزان جابه‌جایی نسبی در طبقات پایین‌تر حدود ۳ درصد بیشتر از طبقات بالاتر است. همچنین، نیروی برش پایه در این قاب‌ها در حالت زلزله‌های متوالی به حدود ۱۷ درصد بیشتر از زلزله منفرد رسیده است.

۶. قاب‌ها با عملکرد خمشی در زلزله‌های متوالی نسبت به زلزله‌های منفرد، شاخص خسارت بالاتری را نشان داده‌اند. به‌طور خاص، شاخص خسارت در طبقات پایین‌تر قاب ۶ طبقه خمشی تا ۳۸ درصد بیشتر از حالت منفرد بوده است.

۷. مقادیر شاخص خسارت در اکثر سازه‌ها کمتر از ۴۰ درصد بوده و آسیب‌ها بیشتر در حدود کم تا متوسط بدست آمده‌اند. با تعویض تیرهای پیوند، سازه‌ها به حالت اولیه بازمی‌گردند، که نشان‌دهنده عملکرد مناسب قاب‌های ستون پیوندشده است. این سیستم با ساختار مدل خود و رفتار فداشونده تیرهای پیوند قابل تعویض، عملکرد لرزه‌ای خوبی دارد.

۸. در کل زلزله‌های متوالی به‌طور میانگین بین ۲ تا ۳۸ درصد اثرات مخرب‌تری نسبت به زلزله‌های منفرد بر سازه‌ها دارند. سازه ۶ طبقه با عملکرد خمشی بیشتر از سازه‌های دیگر تحت تأثیر زلزله‌های متوالی قرار می‌گیرند.

۹. سیستم قاب‌های ستون‌پیوند (LCF)، با توجه به نتایج بیان‌شده عملکرد لرزه‌ای مناسبی را از خود نشان داده است و از تخریب کامل سازه جلوگیری می‌کند. نیاز به بهبود استانداردهای لرزه‌ای برای مواجهه با زلزله‌های متوالی وجود دارد تا از آسیب‌های بیشتر و فروریزش سازه‌ها جلوگیری شود.

پیشنهادهای

برای مطالعات آتی در بحث سیستم‌های قاب ستون پیوند، چند موضوع به صورت پیشنهاد بیان شده است:

۱. بررسی عملکرد سازه‌ها با وجود نامنظمی در ارتفاع برای تیرهای پیوند دو دهانه تحت توالی لرزه‌ای

۲. ارزیابی اثرات توالی لرزه‌ای بر پارامترهایی مانند انرژی و شاخص تاب‌آوری

Hysteresis	هیستریزیس	Fiber	فایبر
Inter-story Drift	جاب‌جایی میان طبقاتی	Hysteretic	هیسترتیک
Livermore	لیورمور	Sumner and Murray	سامنر و مرای
		Liu and Astaneh-Asl	لیو و آستانه اصل
		Modal Analysis	آنالیز مودال
		Chalfant Valley3	چفلنت ولی ۳
		Northridge	نورتریج

سیاسگزاری

مراجع

- [1] F. Hosseinpour and A. E. Abdelnaby, "Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, no. 1, pp. 706–725, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.006>
- [2] A.H. Farivarrad, H.E. Estekanchi, "Seismic Performance Assessment of SMRF Structures Subjected to Mainshock-Aftershock Seismic Sequences by Endurance Time Method," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 26, no. 7, pp. 3281-3299, 2022. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1798828>
- [3] E.Rajabi , Gh. Ghodrati Amiri, "Generation of critical aftershocks using stochastic neural networks and wavelet packet transform," *Journal of Vibration and Control*, vol. 26, no. 5-6, pp. 331-351, 2019. <https://doi.org/10.1177/1077546319879536>
- [4] S. V. Baranov, P. N. Shebalin et al. "Automated assessment of hazards of aftershocks of the Mw 7.8 earthquake in Turkey of February 6, 2023," *Physics of the Solid Earth*, vol. 59, no. 6, pp. 133–141, 2023. <https://doi.org/10.1134/S1069351323060046>
- [5] S. D. Parekar, D. Datta, "Seismic behaviour of stiffness irregular steel frames under mainshock-aftershock," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no.1, pp. 857-870, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00245-z>
- [6] B. M. Asayesh, H. Zafarani, S. Hainzl, Sh. Sharma, "Effects of large aftershocks on spatial aftershock forecasts during the 2017–2019 western Iran sequence," *Geophysical Journal International*, vol. 232, no. 1, pp. 147-161, 2023. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac333>
- [7] J. Tazarv, A. Mohebkah, "Direct displacement-based design of the linked column steel frame system, Part 2: Development and verification," *Structures*, vol. 31, no. 1, pp. 29-48, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.075>
- [8] S. Shoeibi, M. A. Kafi, M. Gholhaki, "Performance-Based Seismic Design and Parametric Assessment of Linked Column Frame System," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 62, no. 3, pp. 1092029-48, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPci.10920>
- [9] A. Pires Lopes, "Seismic Behavior and Design of the Linked Column Steel Frame System for Rapid Return to Occupancy," Doctor of Philosophy (Ph.D.) thesis, Portland State University, 2016. <https://doi.org/10.15760/etd.3007>

- [10] P. Dusicka, R. Iwai, "Development of Linked Column Frame System for Seismic Lateral Loads," *Structural Engineering Research Frontiers*, 2007, pp. 1-13. [https://doi.org/10.1061/40944\(249\)63](https://doi.org/10.1061/40944(249)63)
- [11] P. Dusicka, G. R. Lewis, "Investigation of replaceable sacrificial steel links," *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, vol. 1659, 2010.
- [12] M. Malakoutian, J. W. Berman, P. Dusicka, "Seismic response evaluation of the linked column frame system," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 42, no. 1, pp. 795-814, 2012. <https://doi.org/10.1002/eqe.2245>
- [13] M. Malakoutian, J.W. Berman, P. Dusicka, A. Lopes, "Seismic Design Parameters for the Link Column Frame System," *Structures Congress*, vol. 42, no. 6, pp. 795-814, 2013. <https://doi.org/10.1061/9780784412848.150>
- [14] M. Malakoutian, J. W. Berman, P.R. Dusicka, A. Lopes, "Quantification of Linked Column Frame Seismic Performance Factors for Use in Seismic Design," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 535-558, 2016. <https://doi.org/10.1080/13632469.2015.1104750>
- [15] S. Shoeibi, M. Ali Kafi, M. Gholhaki, "New performance-based seismic design method for structures with structural fuse system," *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 745-760, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.002>
- [16] S. Shoeibi, M. Gholhaki, M. Ali Kafi, "Simplified force-based seismic design procedure for linked column frame system," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 121, no. 1, pp. 87-101, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.003>
- [17] J. Tazarv, A. Mohebkah, "Direct displacement-based design of the linked column steel frame system, Part 2: Development and verification," *Structures*, vol. 31, no. 1, pp. 29-48, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.075>
- [18] J. Tazarv, A. Mohebkah, "Direct displacement-based design of the linked column steel frame System, Part 1: Modeling and yield drift evaluation," *Structures*, vol. 31, no. 1, pp. 341-356, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.076>
- [19] A. Mohebkah, J. Tazarv, "Equivalent viscous damping for linked column steel frame structures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 179, p. 106506, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106506>
- [20] M. Gholhaki, B. Eshrafi, M. Gorji Azandariani, O. Rezaifar, "Seismic assessment of linked-column frame structural system considering soil-structure effects," *Structures*, vol. 33, pp. 2264-2272, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.005>
- [21] Y. Golestani, E. Rajabi, R. Rajabi Soheyli, "Evaluation of the response modification factor of steel buildings with linked columns frame system," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 164, p. 107581, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107581>
- [22] E. Rajabi, Y. Golestani, "Study of steel buildings with LCF system under critical mainshock-aftershock sequence: Evaluation of fragility curves and estimation of the response modification factor by artificial intelligence," *Structures*, vol. 56, p. 105044, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105044>
- [23] E. Maroofi, M. R. Mansoori, A. S. Moghadam, "Introducing a new seismic resisting system with dual linked column frame and rocking motion," *Structures*, vol. 47, pp. 2148-2161, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.040>

- [24] V. Jaber, “ Collapse-based design method for simple seismic design of complex structural systems such as linked column frame system,” *Structures*, vol. 55, pp. 482-479, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.059>
- [25] F. Li, B. Cheng Zhao, Y. Li , G. Wang, “Seismic response of linked column steel braced frame with mechanical springs,” *Structures*, vol. 53, pp. 240-252, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.044>
- [26] R. Montuori, E. Nastri, V. Piluso , A. pisapia, “Design procedure for failure mode control of linked column frames,” *Engineering Structures*, vol. 296, p. 116937, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116937>
- [27] E. A. Sumner , T. M. Murray, “Behavior of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 501-508, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(501\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(501))
- [28] J. Liu, M. ASCE , A. Astaneh-Asl, M. ASCE, “Moment-Rotation Parameters for Composite Shear Tab Connections,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 9, pp. 1371-1380, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:9\(1371\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:9(1371))
- [29] G. G. Amiri, F. M. Dana, “Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake,” *Computers & Structures*, vol. 83, no. 8-9, pp. 613-626, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.10.010>
- [30] E. Rajabi, G. Ghodrati Amiri, “Generation of critical aftershocks using stochastic neural networks and wavelet packet transform,” *Journal of vibration and control*, vol. 26, no. 5-6, pp. 331-351, 2020. <https://doi.org/10.1177/1077546319879536>
- [31] L. Wang, Y. Zhou, W. Shi, “Seismic Response Control of a Nonlinear Tall Building Under Mainshock-Aftershock Sequences Using Semi-Active Tuned Mass Damper,” *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 23, no. 16n18, p. 2340027, 2023. <https://doi.org/10.1142/S0219455423400278>
- [32] G. Abdollahzadeh, A. Mohammadgholipour, E. Omranian, “Seismic Evaluation of Steel Moment Frames under Mainshock–Aftershock Sequence Designed by Elastic Design and PBPD Methods,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 1605-1628, 2019. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387198>
- [33] F. Turchetti, E. Tubaldi, E. Patelli, P. Castaldo, C. Málaga-Chuquitaype, “Damage modelling of a bridge pier subjected to multiple earthquakes: a comparative study,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 21, no. 9, pp. 4541–4564, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01678-y>
- [34] Y. J. Park A. H. S. Ang et al., “Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 4, pp. 722–739, 1985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers

Research Article

Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi¹, Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad² 

DOI: [10.22067/jfcej.2025.88923.1312](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.88923.1312)

1- Introduction

Cement is one of the most widely used construction materials globally, yet its production significantly contributes to CO₂ emissions and environmental pollution. In response to these challenges, researchers are exploring alternative materials such as geopolymers, which exhibit high durability, lower CO₂ emissions, and enhanced mechanical properties. Among these alternatives, Ferrock, an iron-based compound made from industrial by-products, has emerged as a sustainable substitute due to its ability to sequester CO₂ while offering superior strength and durability. Additionally, incorporating polypropylene fibers into mortar mixtures can improve tensile strength, impact resistance, and durability.

Geopolymers rely on aluminosilicate precursors that react with alkaline solutions to form a robust and chemically stable matrix. Ferrock, when combined with geopolymer technology, has the potential to create high-performance, environmentally friendly construction materials. Despite its promising characteristics, limited studies exist on the behavior of geopolymer mortars activated with alkaline solutions and reinforced with Ferrock and fibers. This study investigates the influence of alkaline activators on the static and dynamic properties of geopolymer mortars containing Ferrock and polypropylene fibers, aiming to enhance both mechanical properties and sustainability in construction applications.

2- Materials and Experimental Program

The primary materials used in this study included ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as the base binder, Ferrock as a supplementary material, sodium silicate and sodium hydroxide as alkaline activators, and polypropylene fibers as reinforcement. Fine silica sand was used as aggregate, and potable water was used for mixing. Sodium hydroxide (NaOH) flakes with 98% purity

were dissolved in water to prepare the alkaline solution. The chemical composition of Ferrock included iron-based industrial waste combined with reactive binders, which contributed to its strength and durability. The polypropylene fibers were 6 mm in length and were added in different volume fractions to evaluate their impact on mechanical properties.

The experimental work was conducted in three phases. The first phase involved preparing control mixtures with different liquid-to-binder ratios (0.4 and 0.5) and sodium silicate-to-sodium hydroxide ratios (1.5 and 2). In the second phase, Ferrock replaced slag at 5%, 8%, 12%, and 15% weight fractions. The third phase introduced polypropylene fibers at 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.5% by volume. The mechanical and durability properties of the samples were evaluated through compressive and flexural strength tests, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, impact resistance, and water absorption tests. The samples were subjected to both water and ambient curing conditions.

The mixing process was carefully controlled to ensure uniform dispersion of fibers and Ferrock in the geopolymer matrix. The samples were cast into molds and demolded after 24 hours before being subjected to their respective curing conditions. Compressive strength tests were conducted at 7 and 28 days, while flexural strength tests provided insights into the toughness and crack resistance of the mortar. Additionally, the impact resistance test was performed using the drop-weight method to evaluate the energy absorption capacity of fiber-reinforced samples.

The final mixture proportions for the optimized compositions used in this study are presented in Table 1.

*Manuscript received July 13, 2024, Revised December 8, 2024, Accepted March 16, 2025.

¹ MSc Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email:** h.mosavi@guilan.ac.ir

² Associate professor department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Table 1. Final Mix Proportions (kg/m³)

Mix ID	Slag	Sand	Ferrock	Polypropylene Fibers	Sodium Silicate	Sodium Hydroxide	Silicate to Hydroxide Ratio	Liquid to Binder Ratio
1.5RF8P0.1	584	1270	51	0.91	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.2	584	1270	51	1.82	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.3	584	1270	51	2.73	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.5	584	1270	51	4.55	191	127	1.5	0.5
2RF8P0.1	584	1270	51	0.91	212	106	2	0.5
2RF8P0.2	584	1270	51	1.82	212	106	2	0.5
2RF8P0.3	584	1270	51	2.73	212	106	2	0.5
2RF8P0.5	584	1270	51	4.55	212	106	2	0.5

3- Results and Discussion

The results demonstrated that ambient curing provided better performance compared to water curing. The optimum composition was identified as 8% Ferrock replacement with 0.1% polypropylene fibers, which achieved the highest compressive strength of 75.2 MPa after 28 days and flexural strength of 5.52 MPa. Electrical resistivity tests indicated a maximum value of 144.6 kΩ·cm, suggesting excellent resistance to chloride ion penetration. Ultrasonic pulse velocity results showed that increased fiber content reduced wave propagation speed, affecting material density. Impact resistance tests revealed that fiber addition significantly enhanced the material's toughness, with up to a 57% increase in resistance to crack propagation.

Further analysis showed that the geopolymerization process was influenced by the alkaline activator ratio, with a higher sodium silicate content improving mechanical performance. However, excessive fiber addition led to reduced workability and increased porosity, negatively impacting compressive strength. The study also confirmed that Ferrock improved the sustainability aspect of the mortar by reducing the carbon footprint associated with cementitious materials. The observed results align with previous research on geopolymer materials, reinforcing the potential of Ferrock-based binders in construction applications.

durability aspects, including resistance to freeze-thaw cycles, sulfate attack, and carbonation, to further validate the applicability of Ferrock-geopolymer composites in real-world conditions. With increasing global efforts to minimize construction-related carbon emissions, this study provides valuable insights into the potential of alternative binder systems.

4- Conclusion

This study confirmed that using Ferrock in geopolymer mortars can significantly enhance mechanical properties while reducing environmental impact. The incorporation of polypropylene fibers further improved impact resistance and toughness, although excessive fiber content negatively affected compressive strength. The findings suggest that geopolymer mortars with optimized Ferrock and fiber content present a viable alternative to conventional cementitious materials, contributing to the development of sustainable construction materials.

Moreover, the experimental results highlight the importance of selecting appropriate activator ratios and fiber dosages to balance strength, durability, and workability. Future research should explore long-term



مطالعه تأثیر فعال کننده قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف*

مقاله پژوهشی

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^(۲)

امیر حسین وارسته سیاه اسطلخی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.88923.1312

چکیده سیمان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. فرایند تولید این ماده آلاینده بوده و موجب انتشار گاز دی اکسید کربن در هوا می‌شود. علاوه بر تولید دی اکسید کربن، فرایند تولید سیمان سالانه میلیون‌ها تن گرد و غبار کوره سیمان را تولید می‌کند که موجب خطرات بهداشتی تنفسی و آلودگی می‌شود. فراک، یک ترکیب نوآورانه مبتنی بر آهن، جایگزینی بدون کربن برای سیمان است که از پسماندهای صنعتی برای یک مصالح ساختمانی چندمنظوره استفاده می‌کند. بر این اساس در پژوهش حاضر، به تأثیر فعال‌کننده قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف پلی‌پروپیلن پرداخته شد. متغیرهای این پژوهش شامل دو نسبت محلول به ماده پایه (۰/۴ و ۰/۵)، دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید سدیم (۱/۵ و ۲)، درصد‌های مختلف جایگزینی فراک (۵، ۱۲، ۱۵ و درصد) و الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ درصد) در سه گام بود. نتایج نشان داد که عمل‌آوری در محیط نسبت به آب عملکرد بهتری دارد. نمونه‌های حاوی ۸ درصد فراک و ۰/۱ درصد الیاف بهترین عملکرد را نشان دادند. مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز به (MPa) ۷۵/۲ رسید و مقاومت خمشی (۵/۵۲ MPa) ثبت شد. همچنین، در آزمایش مقاومت الکتریکی مقدار (۱۴۴/۶ kohm.cm) به‌عنوان بیشترین مقاومت الکتریکی ثبت گردید. استفاده از الیاف حتی در مقادیر کم، مقاومت ضربه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد و در بهترین حالت، افزایش ۵۷ درصدی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فراک و الیاف پلی‌پروپیلن راهکاری مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و زیست‌محیطی ملات‌های ساختمانی است.

واژه‌های کلیدی فعال کننده قلیایی، فراک، سیمان سبز، ژئوپلیمر، الیاف.

Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers

Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad

Abstract Cement is one of the most widely used construction materials in the world. Its production process is highly polluting and leads to the release of carbon dioxide (CO_2) into the atmosphere. In addition to CO_2 emissions, cement production generates millions of tons of kiln dust annually, causing respiratory health risks and environmental pollution. Ferrock, an innovative iron-based compound, is a carbon-free alternative to cement that utilizes industrial waste for a versatile construction material. Accordingly, this study investigated the effect of alkaline activators on the static and dynamic properties of geopolymer mortars containing ferrock and polypropylene fibers. The variables in this study included two liquid-to-binder ratios (0.4 and 0.5), two sodium silicate-to-sodium hydroxide ratios (1.5 and 2), various replacement percentages of ferrock (5%, 8%, 12%, and 15%), and polypropylene fibers (0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.5%) across three steps. The results showed that curing in ambient conditions performed better than water curing. Samples containing 8% ferrock and 0.1% fibers exhibited the best performance. The compressive strength of the samples after 28 days reached 75.2 MPa, and the flexural strength was recorded at 5.52 MPa. Furthermore, in the electrical resistivity test, a maximum value of 144.6 $k\Omega \cdot cm$ was observed. The inclusion of fibers, even in small amounts, significantly improved impact resistance, with a maximum increase of 57% being observed. These findings demonstrate that the use of ferrock and polypropylene fibers is an effective strategy for enhancing the mechanical and environmental properties of construction mortars.

Key Words Alkaline Activator, Ferrock, Green Cement, Geopolymer, Fibers.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: h.mosavi@guilan.ac.ir

مقدمه

امروزه روش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، در اتمسفر به یک حوزه تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. تغییرات اقلیمی باعث شده که دانشمندان به دنبال یافتن جایگزین‌های جدید برای مصالح ساختمانی باشند. سیمان که جزء اصلی بتن است، پس از آب دومین ماده پرکاربرد در جهان محسوب می‌شود و یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای کربنی ناشی از فعالیت‌های انسانی است. سیمان با اینکه در صنعت ساخت‌وساز جایگاه ویژه‌ای دارد، با مصرف بالای انرژی و انتشار گسترده دی‌اکسید کربن همراه است. برای هر تن سیمان تولید شده، مقدار قابل توجهی دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود که تأثیرات منفی بر محیط زیست دارد. از سوی دیگر، ژئوپلیمرها به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان‌های پرتلند در نظر گرفته می‌شوند. ژئوپلیمرها مزایایی از جمله کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، هزینه‌های پایین‌تر تولید، دوام بالا در برابر عوامل خورنده و کسب مقاومت مکانیکی در زمان کوتاه دارند. این ویژگی‌ها ژئوپلیمرها را به یک گزینه پایدار و دوستدار محیط زیست برای جایگزینی سیمان پرتلند تبدیل کرده است. فراک، یک ماده نوآورانه مبتنی بر پودر آهن است که به عنوان یک جایگزین بدون کربن برای سیمان شناخته می‌شود. این پودر آهن، که به عنوان یک پسماند صنعتی از فرایندهای فولادی به وجود می‌آید، با دی‌اکسید کربن و رطوبت واکنش می‌دهد و یک ماده کربناته قوی به نام فراک تولید می‌کند [1,2]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته فراک به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان شناخته می‌شود، زیرا منجر به کاهش ۸ تا ۱۱ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود و در ساخت و ساز مقرون به صرفه است [3]. فراک در مقایسه با سیمان پرتلند که در حال حاضر یکی از مصالح اصلی ساخت و ساز در سطح جهان است، پنج برابر استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد و قادر به تحمل فشار بالاتری قبل از شکستن است و همچنین به طور قابل توجهی انعطاف‌پذیرتر است [4]. فراک در برابر زنگ زدگی، اکسیداسیون، اشعه ماوراء بنفش، پوسیدگی و خوردگی مقاوم است. بنابراین، فراک را می‌توان برای کاربردهای دریایی مانند موج شکن، دیوارهای دریایی، اسکله‌ها، شمع‌های سازه‌ای، فونداسیون‌ها و سایر سازه‌های در معرض آب دریا استفاده کرد. همچنین دوام زیست محیطی آن باعث استفاده از آن در ساخت لوله‌هایی می‌شود که برای انتقال آب و دفع

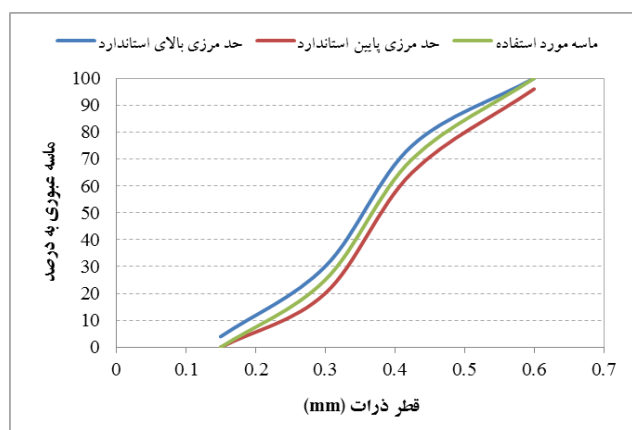
فاضلاب استفاده می‌شوند. فراک تحت تأثیر اجزای تشکیل دهنده آب‌های فاضلاب مانند سولفید هیدروژن و اسید سولفوریک قرار نمی‌گیرد که این موضوع باعث خوردگی لوله‌های سیمانی معمولی می‌شود. علاوه بر این، از آنجایی که فراک در مقایسه با بتن معمولی شکنندگی کمتری دارد، اتصال لوله‌ها به یکدیگر بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه آسیب کمتری در تراز و نصب مقاطع وارد می‌کند [5]. یکی از اشکالات اصلی بتن مقاومت کششی پایین آن است. از این نظر مشخص شده است که بتن معمولی از نظر شکل پذیری، ظرفیت خستگی، ظرفیت باربری پس از ترک، چقرمگی، سایش و مقاومت در برابر ضربه عملکرد ضعیفی دارد. استفاده از الیاف توزیع شده تصادفی در بتن یکی از مؤثرترین روش‌های مورد استفاده برای بهبود مقاومت فشاری و کششی، ظرفیت جذب انرژی و خواص ضعیف ذکر شده در بالا می‌باشد. یکی دیگر از جنبه‌های منفی نمونه‌های بتن، ترک‌های ناشی از پایداری ابعادی ضعیف است که استفاده از الیاف در بتن این ترک‌ها را کاهش می‌دهد [6]. در بتن معمولی که ماده‌ای شکننده است، گسیختگی ابتدا از نواحی ضعیف بین ملات و سنگدانه‌ها آغاز می‌شود، جایی که ترک‌هایی حتی پیش از بارگذاری وجود دارند. برای بهبود این نقص مکانیکی، چندین دهه است که از انواع الیاف در بتن استفاده می‌شود. همچنین، به دلیل ظرفیت پایین تحمل تغییر شکل در بتن معمولی، ترک‌ها به سرعت گسترش یافته و منجر به شکست آن می‌شوند. استفاده از الیاف در بتن نه تنها گسترش ترک‌ها را کاهش می‌دهد بلکه شکل پذیری آن را نیز افزایش می‌دهد [7]. الیاف پلی پروپیلن نسل جدیدی از الیاف شیمیایی است. کاربرد این الیاف در ساخت و ساز تا حد زیادی افزایش یافته است زیرا افزودن الیاف در بتن باعث بهبود استحکام کششی، مقاومت خمشی، چقرمگی، مقاومت ضربه ای و همچنین حالت شکست بتن می‌شود [8]. هنگامی که الیاف پلی پروپیلن به بتن اضافه می‌شود، ساختار شبکه توزیع تصادفی سه بعدی را می‌توان در بتن تشکیل داد که به طور مؤثری از تولید و توسعه ریزترک جلوگیری می‌کند. در نتیجه، الیاف پلی پروپیلن می‌تواند از ورود آب و سایر یون‌های مضر به بتن جلوگیری کند و دوام بتن را بهبود می‌بخشد [9]. همچنین بر اساس تحقیقات صورت گرفته الیاف پلی پروپیلن به عنوان یک شتاب دهنده در بتن عمل میکند و باعث تسریع در واکنش هیدراتاسیون می‌شود [10].

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی

ترکیب شیمیایی	درصدهای تشکیل دهنده
SiO ₂	۳۵/۷
Al ₂ O ₃	۱۱/۲
Fe ₂ O ₃	۱/۲
CaO	۳۷
MgO	۱۱
K ₂ O	۰/۶۸
Na ₂ O	۰/۶
Cl	۰/۰۰۲
Mno	۱/۵۸

ماسه

ماسه مصرفی از نوع سیلیکاتی طبیعی و رودخانه‌ای ۰-۳ میلی‌متر از کارخانه قطعات پیش‌ساخته شمال تهیه گردید. همچنین ماسه مورد استفاده به منظور زدودن ذرات رس و لای شسته شد. دانه بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات مطابق با استاندارد [12] ASTM C778 انجام شد. حدود دانه بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات‌ها، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ حدود دانه بندی ماسه

الیاف

الیاف پلی پروپیلن (پ پ) یک افزودنی بتن تولید شده از مواد ترکیبی پلیمری مختلف با پایه پروپیلن متشکل از رشته‌های بسیار نازک تک رشته‌ای است که باعث ایجاد یک سیستم بتن الیافی با کیفیت بالا می‌شود. این الیاف در دو اندازه ۱۲ و ۶ میلیمتری تولید

با توجه به اینکه فراک یک ماده بتنی جدید است و مطالعات محدودی بر روی آن انجام شده، نوآوری این پژوهش در استفاده از محلول‌های قلیایی در ترکیب با مواد فراک نهفته است که نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. در این مقاله، تأثیر فعال‌کننده‌های قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی مواد فراک و الیاف بررسی شده است تا مشخص شود ترکیب مواد فراک با الیاف پلی پروپیلن در درصدهای مختلف چه نتایجی ارائه می‌دهد و تا چه اندازه در بهبود کیفیت این نوع ملات مؤثر است.

ساخت ملات ژئوپلیمری الیافی

معمولاً ملات مسلح به الیاف همانند ملات ساده ریخته و متراکم می‌شود. روش طراحی مخلوط‌های ملات مسلح به الیاف اساساً شبیه طراحی ملات ساده است. با وجود این، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداسازی یا پدیده گلوله‌های شدن و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، تراکم و پرداخت ملات به عمل آید. الیاف به خاطر آسانی پخش باید به صورت خشک وارد مخلوط شوند. مشکل گلوله ای شدن اغلب به دلیل استفاده از مقادیر زیاد الیاف و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد به وجود می‌آید. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده، سبب کاهش کارایی مخلوط و در نتیجه کاهش مقاومت و نرمی ملات سخت شده می‌گردد [11].

مصارف مصرفی

سرباره کوره آهن گدازی

سرباره نیز با توجه به وجود کارخانه‌های صنعتی بسیار در ایران امکان بهره‌برداری و تولید آن در ایران بسیار می‌باشد. از این رو سرباره مصرفی در این تحقیق به صورت پودر آماده شده از شرکت دانش بنیان بنا بنیان زیست فناوری تهیه شده است که پس از عبور از الک نمره ۴۰ از آن استفاده می‌شود. مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) قابل مشاهده است.

می‌شود که اندازه ۶ میلیمتری برای ملات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هیدروکسید سدیم

هیدروکسید سدیم مصرفی بصورت پرک شده و با درجه خلوص ۹۸ درصد از شرکت کیمیا پارس شایانکار تهیه شده است.

سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم یا آب شیشه (Na_2SiO_3) مصرفی در این تحقیق از شرکت صنایع سیلیکات ایران تهیه شده است.

آب

آب مورد استفاده در این پژوهش آب شرب شهر رشت می‌باشد.

فراک

برای ساخت فراک از مصالح جدول (۲) استفاده شده است. جدول ۲ مصالح مورد نیاز برای تولید فراک [5]

مصالح	درصد (بر حسب وزن)
پودر آهن	۶۰%
خاکستر بادی	۲۰%
سنگ آهک	۱۰%
متاکائولن	۸%
اگزالیک اسید	۲%

طرح اختلاط

جدول ۳ طرح اختلاط گام اول (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5R0.4	665	1330	160	106	1.5	0.4
2	1.5R0.5	635	1270	191	127	1.5	0.5
3	2R0.4	665	1330	177	89	2	0.4
4	2R0.5	635	1270	212	106	2	0.5

جدول ۴ طرح اختلاط گام دوم (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	فراک	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5RF5	603	1270	32	191	127	1.5	0.5
2	1.5RF8	584	1270	51	191	127	1.5	0.5
3	1.5RF12	572	1270	64	191	127	1.5	0.5
4	1.5RF15	559	1270	76	191	127	1.5	0.5
5	2RF5	603	1270	32	212	106	2	0.5
6	2RF8	584	1270	51	212	106	2	0.5
7	2RF12	572	1270	64	212	106	2	0.5
8	2RF15	559	1270	76	212	106	2	0.5

جدول ۵ طرح اختلاط گام نهایی (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	فراک	الیاف پلی پروپیلن	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5RF8P0.1	584	1270	51	0.91	191	127	1.5	0.5
2	1.5RF8P0.2	584	1270	51	1.82	191	127	1.5	0.5
3	1.5RF8P0.3	584	1270	51	2.73	191	127	1.5	0.5
4	1.5RF8P0.5	584	1270	51	4.55	191	127	1.5	0.5
5	2RF8P0.1	584	1270	51	0.91	212	106	2	0.5
6	2RF8P0.2	584	1270	51	1.82	212	106	2	0.5
7	2RF8P0.3	584	1270	51	2.73	212	106	2	0.5
8	2RF8P0.5	584	1270	51	4.55	212	106	2	0.5

نحوه اختلاط و آماده سازی نمونه ها

قبل از ساخت ملات، محلول هیدروکسید با مولاریته ۱۲ با یک لیتر آب و ۴۸۰ گرم هیدروکسید مخلوط و به خوبی هم زده می شود. به علت گرمازا بودن این محلول بهتر است از یک روز قبل ساخته شود. برای ساخت ملات، ابتدا مطابق طرح اختلاط وزن کشی انجام شده، مصالح شامل ماسه و الیاف را درون استانبولی ریخته و به مدت یک دقیقه ماسه و الیاف را به صورت خشک مخلوط می شود و سپس مقدار آب اشباع با سطح خشک (ssd) را به صورت تدریجی به مصالح اضافه کرده و به مدت دو دقیقه هم زده و سپس سرباره اضافه می گردد. پس از هم زدن مخلوط، مواد فراک را به آن اضافه و مجدد هم زده می شود. در ظرفی جداگانه سیلیکات را به همراه محلول هیدروکسید و آب اضافه ریخته و بعد از هم زدن کامل، به ملات اضافه کرده و کل

مصالح را با هم مخلوط می کنیم. پس از ساخت ملات آن را در سه مرحله در قالب از پیش آماده شده ریخته و در هر مرحله به وسیله میله فولادی (تخماق) ملات را متراکم و پس از آن ویریه و در نهایت به وسیله ماله سطح آن را صاف می کنیم. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن ملات در شرایط دمایی و رطوبتی ثابت، نگهداری شده و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب ها خارج می گردد.

آزمایش های انجام شده

آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد [13]ASTM C109 جهت اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۵×۵×۵ سانتیمتر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده در سن ۷ و

- p: نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن
 b: عرض مقطع بر حسب میلی متر
 h: ارتفاع مقطع بر حسب میلی متر
 l: فاصله بین دو تکیه گاه بر حسب میلی متر



شکل ۴ نحوه قرار گیری نمونه



شکل ۵ لحظه شکست نمونه

آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد ASTM [15] C1202-10 جهت اندازه گیری مقاومت الکتریکی روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه توسط دستگاه تست مقاومت الکتریکی انجام می‌گردد. این آزمایش برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی که یکی از پارامترهای مهم مربوط به خوردگی بتن است استفاده می‌گردد. هر چه مقاومت الکتریکی بالاتر باشد، نفوذپذیری کمتر خواهد بود. مقاومت الکتریکی با قرار دادن نمونه بین دو صفحه مسی در

۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. نحوه قرار گیری و شکست نمونه در شکل (۲ و ۳) آورده شده است.



شکل ۲ نحوه قرار گیری نمونه



شکل ۳ لحظه شکست نمونه

آزمایش مقاومت کششی ناشی از خمش (مقاومت خمشی)

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای بر اساس استاندارد [14] ASTM C348-08 جهت اندازه گیری مقاومت خمشی نمونه‌های مکعب مستطیلی ۴×۴×۱۶ سانتیمتر بعد از شرایط استاندارد عمل آوری در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. در پایان آزمایش، مقاومت خمشی نمونه با استفاده از معادله زیر به دست آمد. نحوه قرار گیری و شکست نمونه در شکل (۴ و ۵) آورده شده است.

$$S_f = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (1)$$

S_f : مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

U = سرعت عبور امواج التراسونیک (km/s)
 ρ = چگالی بتن (kg/m^3)
 g = گرانش زمین (9.81 m/s^2)

$$E_s = 1.25E_d - 19 \quad (۴)$$

E_s : مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)

E_d : مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)



شکل ۷ کالیبره کردن دستگاه



شکل ۸ انجام آزمایش التراسونیک

آزمایش مقاومت ضربه ای

آزمایش تعیین مقاومت ضربه ای بر اساس استاندارد [18] ACI 544-2R بر روی نمونه‌های استوانه ای با قطر ۱۵ و ضخامت ۶,۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق با روش Drop-weight test (آزمایش سقوط وزنه) انجام می‌شود. قرارگیری نمونه، ترک اولیه

تماس با سطح نمونه و اندازه گیری جریان با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید همچنین نحوه انجام آزمایش در شکل (۶) آورده شده است.

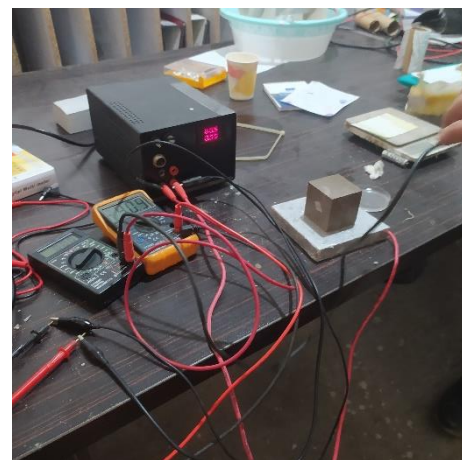
$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (۲)$$

ρ : مقاومت الکتریکی

R : نسبت ولتاژ به جریان

A : سطح مقطع نمونه

L : طول قطعه



شکل ۶ انجام آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش التراسونیک

آزمایش التراسونیک بتن یکی از آزمایش های بتن از نوع غیر مخرب و برای سنجش میزان مقاومت بتن می‌باشد. آزمایش التراسونیک بر اساس استاندارد [16] ASTM C597-22 صورت می‌گیرد. مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی را میتوان به کمک دستگاه التراسونیک به دست آورد بدین صورت که بوسیله دستگاه التراسونیک، مدت زمان عبور امواج صوتی در جهت طولی نمونه- های بتنی اندازه گیری می‌شود و با توجه به ابعاد نمونه، سرعت عبور امواج التراسونیک مطابق با معادلات [17] زیر به دست می‌آید. برای انجام این آزمون از نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه استفاده می‌گردد. کالیبره کردن دستگاه و انجام آزمایش در شکل (۷ و ۸) آورده شده است.

$$E_d = \left[\frac{U^2 \rho}{g} \right] \times 10^{-2} \quad (۳)$$

E_d = مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)

آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب بر روی آزمون‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C948 [19] انجام می‌شود. درصد جذب آب با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد. همچنین وزن‌کشی نمونه‌ها در حالت اشباع و قرارگیری در آون آزمایشگاهی در شکل (۱۲ و ۱۳) آورده شده است.

$$\text{جذب آب} = \frac{B-C}{C} \times 100 \quad (5)$$

B: جرم اشباع با سطح خشک

C: جرم خشک شده در آون



شکل ۱۲ وزن‌کشی نمونه‌ها



شکل ۱۳ قرار دادن نمونه‌ها در آون

آزمایش جرم حجمی

آزمایش جرم حجمی بر روی آزمون‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C948 [19] انجام می‌شود.

و شکست نهایی در شکل (۹ و ۱۰ و ۱۱) آورده شده است.



شکل ۹ نحوه قرارگیری نمونه



شکل ۱۰ لحظه ایجاد ترک اولیه

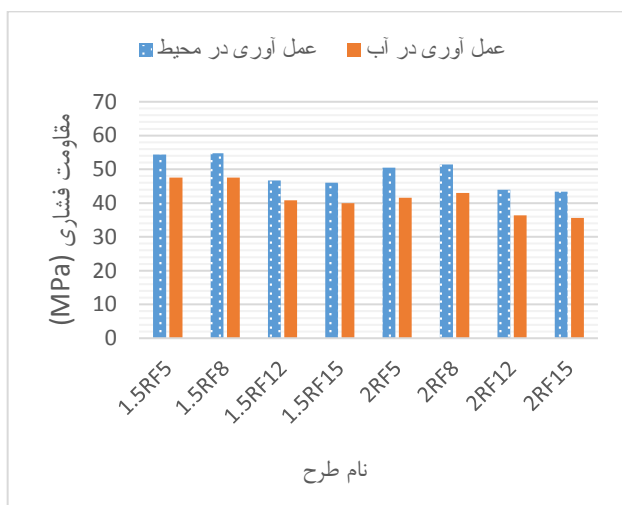


شکل ۱۱ لحظه شکست نهایی

است، نتایج عمل آوری در آب کمتر از عمل آوری در محیط بوده و در نتیجه، نتایج عمل آوری در آب را حذف کرده و در ادامه از نتایج عمل آوری در محیط استفاده می شود. طرح های شماره ۲ و ۶ به واسطه مقاومت های بالاتر برای گام نهایی انتخاب می شوند.

جدول ۷ نتایج شکست ۷ روزه گام دوم

شماره	نام طرح	تنش (MPa)	
		عمل آوری در آب	عمل آوری در محیط
1	1.5RF5	47.6	54.4
2	1.5RF8	47.6	54.8
3	1.5RF12	40.8	46.7
4	1.5RF15	40	46
5	2RF5	41.6	50.5
6	2RF8	43	51.4
7	2RF12	36.4	44
8	2RF15	35.6	43.4



شکل ۱۵ مقایسه نتایج شکست گام دوم

در گام نهایی، نمونه ها پس از گذشت ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول (۸)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی، که کمترین درصد الیاف را داراست، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به دیگر طرح ها از خود نشان داده است. با مقایسه نتایج گام دوم با گام نهایی، می توان اشاره کرد که افزودن الیاف پلی پروپیلن منجر به افزایش ۱۲٫۶ درصدی مقاومت فشاری

جرم حجمی با استفاده از معادله زیر محاسبه می گردد همچنین وزن کردن نمونه ها در حالت اشباع در شکل (۱۴) آورده شده است.

$$(۶) \quad \text{جرم حجمی} = \frac{B}{B-A}$$

A: جرم غوطه وری

B: جرم اشباع با سطح خشک



شکل ۱۴ وزن کردن نمونه

ارائه و تفسیر نتایج مقاومت فشاری

در گام اول پس از گذشت ۷ روز از ساخت نمونه ها آن ها را در جک فشاری قرار داده و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به اینکه طرح های شماره ۲ و ۴ تنش بالاتری دارند آن ها برای گام دوم انتخاب شدند.

جدول ۶ نتایج شکست ۷ روزه گام اول

شماره	نام طرح	تنش (MPa)
1	1.5R0.4	57.8
2	1.5R0.5	60.4
3	2R0.4	54
4	2R0.5	56.4

در گام دوم، نیمی از نمونه ها را در آب و نیمی دیگر را در محیط قرار داده شد و پس از ۷ روز از ساخت نمونه ها، نتایج زیر حاصل شده است. همانطور که در جدول (۷) و شکل (۱۵)، از نتایج مشخص

می‌شود. همچنین در تحقیقات پیشین [2] نیز مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی فراک نسبت به نمونه‌های بتن معمولی در سن ۷ و ۲۸ روزه افزایش داشته که نشانگر همسو بودن تحقیقات می‌باشد.

جدول ۹ نتایج مقاومت خمشی

شماره	نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)
1	1.5RF8P0.1	5.52
2	1.5RF8P0.2	4.73
3	1.5RF8P0.3	5.17
4	1.5RF8P0.5	5.3
5	2RF8P0.1	3.41
6	2RF8P0.2	2.79
7	2RF8P0.3	3.07
8	2RF8P0.5	4.17

مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه توسط دستگاه تست مقاومت الکتریکی انجام می‌گردد. با بالا رفتن مقاومت الکتریکی، جریان عبوری از بتن کاسته شده و خوردگی کمتر می‌شود. با توجه به نتایج موجود در جدول (۱۰)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده و بر اساس آیین نامه آشتو [21] احتمال خوردگی ندارد. همچنین با مقایسه دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید در شکل (۱۶) نیز مشاهده می‌شود که طرح‌هایی با حداقل الیاف، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها دارند.

جدول ۱۰ نتایج مقاومت الکتریکی

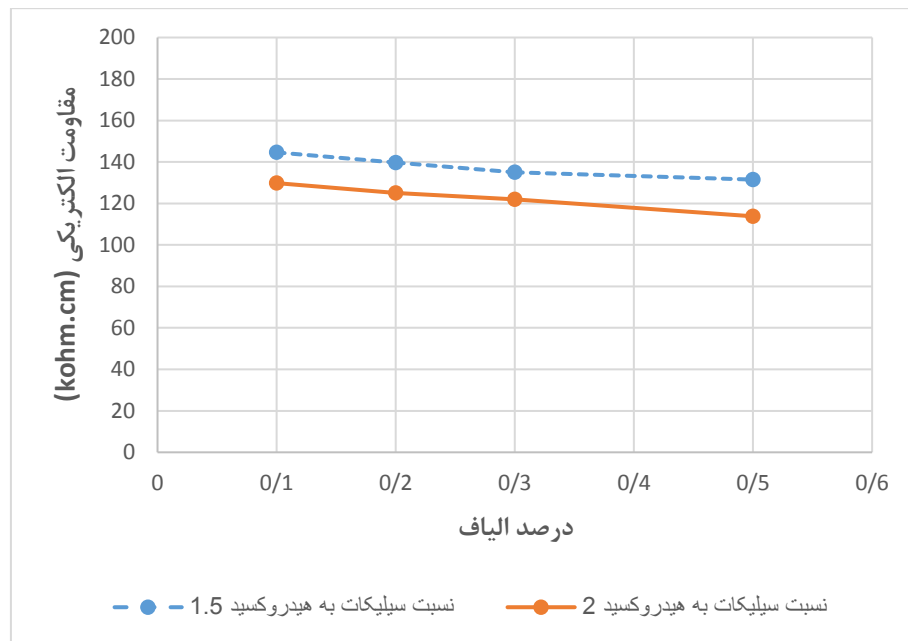
شماره	نام طرح	مقاومت الکتریکی (kohm.cm)	جریان (mA)	ولتاژ (v)
1	1.5RF8P0.1	144.6	1.4	40.5
2	1.5RF8P0.2	139.7	1.45	40.5
3	1.5RF8P0.3	135	1.5	40.5
4	1.5RF8P0.5	131.5	1.54	40.5
5	2RF8P0.1	129.8	1.56	40.5
6	2RF8P0.2	125	1.62	40.5
7	2RF8P0.3	122	1.66	40.5
8	2RF8P0.5	113.8	1.78	40.5

جدول ۸ نتایج شکست ۷ و ۲۸ روزه گام نهایی

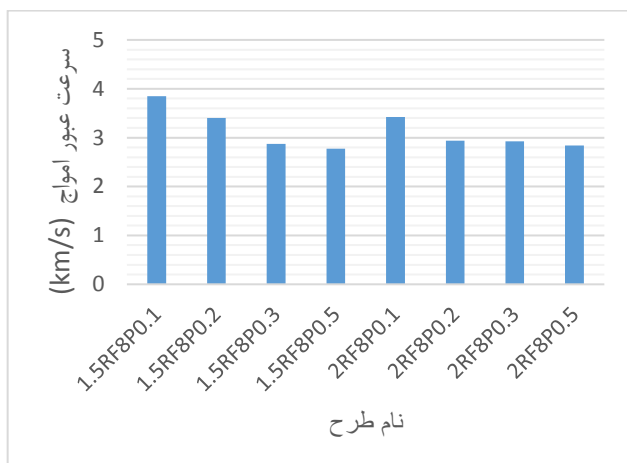
شماره	نام طرح	تنش (MPa)	
		نتایج شکست ۲۸ روزه	نتایج شکست ۷ روزه
1	1.5RF8P0.1	75.2	61.73
2	1.5RF8P0.2	58.4	48.13
3	1.5RF8P0.3	70.2	44.8
4	1.5RF8P0.5	60	42.93
5	2RF8P0.1	58.53	45.87
6	2RF8P0.2	55.33	44.67
7	2RF8P0.3	65.6	40.8
8	2RF8P0.5	61.8	34

مقاومت کششی ناشی از خمش (مقاومت خمشی)

در آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های مکعب مستطیلی ۴×۴×۱۶ سانتیمتر را درون دستگاه تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار دادیم و پس از انجام محاسبات نتایج در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به نتایج موجود طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی مقاومت خمشی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده است. بر اساس تحقیقات شیوانی و همکاران [20]، مقاومت خمشی نمونه‌های



شکل ۱۶. مقاومت الکتریکی بر حسب درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن



شکل ۱۷. نتایج آزمایش التراسونیک

جدول ۱۱. طبقه بندی کیفیت بر اساس آزمایش اولتراسونیک [22]

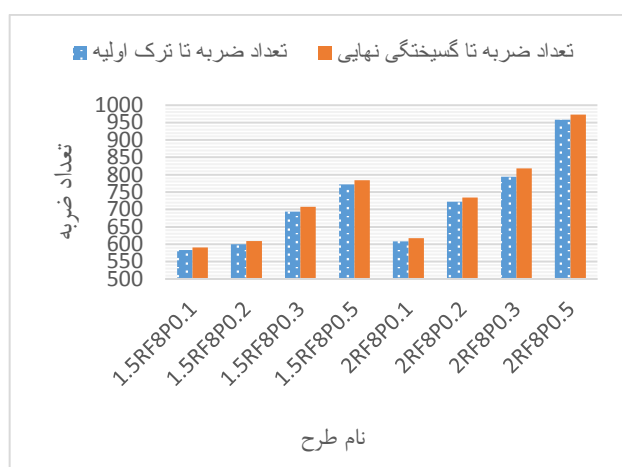
کیفیت	سرعت (km/s)
عالی	< ۴.۵
خوب	۴.۵ - ۳.۵
مشکوک	۳.۵ - ۳
ضعیف	۳ - ۲
خیلی ضعیف	> ۲

التراسونیک

آزمایش التراسونیک یکی از آزمایش های غیر مخرب است که اغلب در ارزیابی سازه های بتنی استفاده می شود. این روش به طراحان و متخصصان در زمینه هایی مانند مقاوم سازی، تقویت و اعتبارسنجی عملیات، امکان تصمیمگیری درست را میدهد. از طریق این آزمایش تعیین یکنواختی بتن در یک عضو سازه یا بین اعضای آن، کشف وجود ترک و اندازه گیری عمق آن و دیگر نارساییها مانند منافذ، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون دینامیکی و ... را میتوان بررسی کرد. اساس کار این آزمایش بر مبنای سرعت عبور امواج پالسی ماورای صوت از میان نمونه ها است. نتایج آزمایش التراسونیک در شکل (۱۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود سرعت عبور امواج با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن کاهش می یابد. همچنین میتوان کیفیت بتن را بر اساس نتایج آزمایش سرعت تعیین کرد. مطابق جدول (۱۱) و بر اساس نتایج بدست آمده طرح شماره ۱ در رده با کیفیت خوب طبقه بندی می شود. همچنین با توجه به طرح شماره ۱ که سرعت امواج عبوری آن ۳.۸۴۶ کیلومتر بر ثانیه است این طرح با توجه به تحقیقات وایت هرست [22] از مقاومت خوبی برخوردار می باشد.

جدول ۱۲ نتایج مدول الاستیسیته با استفاده از التراسونیک

شماره	نام طرح	سرعت (km/s)	مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)	مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)
1	1.5RF8P0.1	3.846	33.172	22.465
2	1.5RF8P0.2	3.401	25.939	13.423
3	1.5RF8P0.3	2.873	18.510	4.1375
3	1.5RF8P0.5	2.777	17.294	2.617
5	2RF8P0.1	3.424	26.291	13.863
6	2RF8P0.2	2.941	19.397	5.246
7	2RF8P0.3	2.923	19.160	4.950
8	2RF8P0.5	2.840	18.087	3.608



شکل ۱۸ نتایج مقاومت ضربه ای

جذب آب

برای محاسبه جذب آب به دو جرم اشباع با سطح خشک و جرم خشک نمونه در آون نیاز است. ابتدا نمونه‌ها را وزن کرده و سپس درون آب به مدت حداقل ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها را با یک پارچه خشک کرده و وزن آن یادداشت می‌شود. جهت تعیین جرم خشک در آون، نمونه‌ها پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، در داخل آون با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از آون خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتالی توزین شدند و به عنوان جرم خشک نمونه یادداشت شد. مقدار درصد جذب آب با استفاده از روابط موجود محاسبه گردید. همانطور که مشخص است، بتن‌هایی با نفوذپذیری بالا منجر به ضعف مقاومتی و عدم کارآمدی مناسب می‌شوند و بزرگترین مشکل نفوذپذیری، مناسب بودن شرایط

مدول الاستیسیته

آزمایش التراسونیک بر روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه صورت گرفت و پس از یادداشت نتایج از آن‌ها برای دست یابی به مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی استفاده به عمل آمد که نتایج مدول الاستیسیته در جدول (۱۲) قابل مشاهده است. همانطور که در نتایج مشاهده می‌شود طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱،۵ و الیاف با ۰،۱ درصد حجمی مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده است. همچنین برای نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۲ میتوان عنوان کرد که پس از طرح شماره ۱ با نسبت ۱،۵ طرح شماره ۵ مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی بالایی دارد.

مقاومت ضربه ای

آزمایش سقوط وزنه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ضخامت ۶،۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه انجام گرفت، بدین صورت که وزنه‌ای با وزن ۴،۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلیمتری بر روی نمونه رها شده و این پرتاب آنقدر تکرار می‌شود تا ابتدا ترک اولیه و سپس شکست رخ دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل (۱۸)، افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در طرح‌ها باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر ضربه می‌شود و از ترک خوردگی جلوگیری می‌کند.

محاسبه گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۱۴)، تمامی طرح‌ها جرم حجمی قابل قبولی دارند.

جدول ۱۴ نتایج جرم حجمی

شماره	نام طرح	جرم حجمی (t/m ³)
1	1.5RF8P0.1	2.240
2	1.5RF8P0.2	2.224
3	1.5RF8P0.3	2.198
4	1.5RF8P0.5	2.195
5	2RF8P0.1	2.212
6	2RF8P0.2	2.208
7	2RF8P0.3	2.200
8	2RF8P0.5	2.200

نتیجه گیری

در این مقاله خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های حاوی مواد فراک و الیاف پلی پروپیلن با درصد های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج به شرح زیر است:

۱. جایگزینی ۸ درصدی مواد فراک با سرباره و همچنین استفاده ۰٫۱ درصد حجمی از الیاف پلی پروپیلن نتایج مطلوبی را در تمامی آزمایش های انجام شده از خود نشان داد.
۲. نمونه‌هایی که درصد کمتری از الیاف پلی پروپیلن (۰٫۱ درصد) به آن‌ها اضافه شد، مقاومت فشاری بیشتری را پس از ۲۸ روز (۷۵٫۲ MPa) کسب کردند.
۳. استفاده از درصد حجمی بالاتر الیاف پلی پروپیلن در ملات، باعث کاهش مقاومت فشاری و برخی دیگر از نتایج آزمایش‌ها شد.
۴. با توجه به نتایج مقاومت الکتریکی تمامی نمونه‌ها در برابر خوردگی و نفوذ یون کلرید مقاوم هستند. همچنین مقدار (۱۴۴/۶ kohm.cm) به عنوان بیشترین مقاومت الکتریکی ثبت شد.
۵. نتایج آزمایش التراسونیک نشان داد که سرعت عبور امواج با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن کاهش می‌یابد.
۶. نتایج مدول الاستیسیته نشان داد که با افزایش درصد الیاف، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱/۵

حمله مخرب‌های شیمیایی مانند کلرید می‌باشد. با توجه به نتایج موجود در جدول (۱۳)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی، کمترین مقدار جذب آب را نسبت به دیگر طرح‌ها دارد. با توجه به تحقیقات ویلسون و همکاران [23]، درصد جذب آب بین ۴ تا ۶ درصد خوب تلقی می‌شود که این یافته با نتایج به‌دست‌آمده مطابقت دارد.

جدول ۱۳ نتایج جذب آب

شماره	نام طرح	درصد جذب آب
1	1.5RF8P0.1	4.64
2	1.5RF8P0.2	5.36
3	1.5RF8P0.3	5.86
4	1.5RF8P0.5	5.92
5	2RF8P0.1	5.03
6	2RF8P0.2	5.13
7	2RF8P0.3	5.26
8	2RF8P0.5	5.54

جرم حجمی

برای محاسبه جرم حجمی، به دو مقدار جرم اشباع با سطح خشک و جرم غوطه‌وری نمونه در آب نیاز است. مطابق استاندارد، ابتدا باید جرم غوطه‌وری نمونه اشباع با سطح خشک در آب تعیین شود. برای این منظور، پس از قرارگیری نمونه‌ها برای خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، آن‌ها به مخزن آبی با دمای $23 \pm 2^\circ \text{C}$ بازگردانده شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از مخزن خارج شده و رطوبت سطحی آن‌ها با حوله خشک شد و سپس توزین شدند. برای تعیین جرم غوطه‌وری، نمونه در ظرف آبی که وزن آب و ظرف از قبل مشخص است، به کمک یک توری پلاستیکی فاقد خاصیت جذب آب، به حالت غوطه‌ور قرار گرفت. اختلاف وزن به‌دست‌آمده، جرم غوطه‌وری نمونه محسوب شد. در ادامه، مطابق استاندارد، نمونه از آب خارج شده و رطوبت سطحی آن به سرعت توسط حوله خشک شد و توزین گردید. مقدار توزین شده به عنوان جرم اشباع با سطح خشک ثبت شد. سپس، با استفاده از روابط موجود، جرم حجمی نمونه

واژه نامه		و الیاف با ۰/۱ درصد حجمی، به ترتیب 33.172 GPa و 22.465 GPa را به عنوان بیشترین مدول الاستیسیته ثبت شد.
Na ₂ SiO ₃	سیلیکات سدیم	۷. استفاده حداقلی از الیاف پلی پروپیلن مقاومت ضربه ای تا ظهور اولین ترک و رسیدن به مقاومت نهایی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد. حتی مقدار کم الیاف (۰/۱ درصد) نیز تأثیر چشمگیری در بهبود مقاومت ضربه ای داشت. در بهترین حالت، استفاده از ۰/۵ درصد الیاف منجر به افزایش ۵۷ درصدی مقاومت ضربه‌ای شد.
Ssd	اشباع با سطح خشک	۸. نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که تمامی طرح‌ها درصد جذب آب پایین و دوام قابل قبولی دارند.
ASTM	انجمن آمریکایی آزمایش و مواد	۹. نتایج آزمایش جرم حجمی نشان می‌دهد تمامی نتایج مقدار قابل قبولی دارند.
ACI	موسسه بتن آمریکا	
GPa	گیگاپاسکال	
MPa	مگاپاسکال	
kohm.cm	کیلو اهم- سانتی متر	
سپاسگزاری		

مراجع

- [1] L. Vickers, A. Van Riessen, and W. D. Rickard, *Fire-resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties*. Singapore: Springer, 2015.
- [2] D. S. Vijayan, S. Arvindan, and T. S. Janarthanan, "Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 781–787, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.147>
- [3] V. Jose and R. Vasudev, "Ferrock: Carbon negative substitute for cement—A review," *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 2023. <https://doi.org/10.7770/safer-V12N-art784>
- [4] K. A. V. I. T. A. Singh, "Compressive strength study of green concrete by using ferrock," *Multidisciplinary International Research Journal, Gujarat Technological University*, vol. 2, pp. 63–80, 2020.
- [5] A. L. Garcia, A. T. Achaiah, J. Bello, and T. Donovan, "Ferrock: A life cycle comparison to ordinary Portland cement," *Industrial Ecology*, Denver, CO, USA, 2017.
- [6] M. R. Latifi, Ö. Biricik, and A. M. Aghabaglou, "Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 345–369, 2022. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1922221>
- [7] S. H. G. Mousavinejad, A. Darvishalinezhad, and M. S. BazKiagourabi, "Effect of polypropylene fibers versus macrobarchip on the characteristics of plastic concrete," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 99–122, 2024. <https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.80952.1215>
- [8] T. C. Madhavi, L. S. Raju, and D. Mathur, "Polypropylene fiber reinforced concrete-a review," *International journal of emerging technology and advanced engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 114–118, 2014.
- [9] Y. Liu, L. Wang, K. Cao, and L. Sun, "Review on the durability of polypropylene fibre-reinforced concrete," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–13, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6652077>
- [10] S. Elkatatny, R. Gajbhiye, A. Ahmed, and A. A. Mahmoud, "Enhancing the cement quality using polypropylene fiber," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 1097–1107, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s13202-019-00804-4>

- [11] M. R. Mehr and H. Bakhshi, "Effect of steel fibers and concrete strength on mechanical specifications of steel fiber reinforced concrete," *Concrete Research*, vol. 8, no. 1, pp. 101–112, 2015.
- [12] ASTM C778, *Standard Specification for Standard Sand*, ASTM International, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/C0778-21>.
- [13] ASTM C109, *Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/c0109_c0109m-20.
- [14] ASTM C348-08, *Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*, ASTM International, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/c0348-08>.
- [15] ASTM C1202-10, *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*, ASTM International, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/C1202-10>.
- [16] ASTM C597-22, *Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM International, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/c0597-22>.
- [17] M. M. Rahman, M. Usman, and A. A. Al-Ghalib, "Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 630–637, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116>
- [18] ACI Committee 544.2R, *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, Detroit, MI, USA: American Concrete Institute, 1989.
- [19] ASTM C948, *Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of Glass-Fiber reinforced concrete*, ASTM International, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/C0948-81R23>.
- [20] A. Shivani, N. Nihana, A. Gowri, H. Jalal, R. Arjun, and M. Jinudarsh, "Experimental investigation of ferro rock by complete and partial replacement of cement in concrete," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 855–862, 2022.
- [21] AASHTO-TP-95-14, *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, American Association of State and Highway Transportation Officials, 2014.
- [22] E. A. Whitehurst, "Soniscope tests concrete structures," *Journal Proceedings*, vol. 47, no. 2, pp. 433–444, 1951.
- [23] M. L. Wilson and P. D. Tennis, *Design and control of concrete mixtures*. Portland, OR, USA: Portland Cement Association, 2021.



Improved Special Relativity Search Algorithm for Optimal Design of Truss Structures

Research Article

Farnaz Salajegheh¹, Vahid Goodarzimehr² DOI: [10.22067/jfpei.2025.88012.1297](https://doi.org/10.22067/jfpei.2025.88012.1297)

1-Introduction

Optimum design of structural engineering problems, especially truss structures, is a very challenging task due to the presence of design constraints such as stress and displacement. In most cases, these constraints are defined in a nonlinear and dynamic way, which makes the optimization algorithms local in the optimum. Classical high precision causal methods take time to arrive at the answer. This increases the number of calculations. On the other hand, meta-heuristic algorithms produce acceptable answers for this type of problems using special programming techniques and operators. The standard special relativity search algorithm is unsuccessful in solving this group of problems due to the lack of coordination between the two important cases of exploitation and exploration, and the local optimum converges. In this research, two new techniques are introduced and implemented to improve the performance of this algorithm. The descending modification algorithm has been used as a complementary algorithm for gravity search. The movement step of the algorithm is controlled using special coefficients. Also, studies show that creating a dynamic population proportional to the convergence rate improves the performance of the algorithm. To prove the effectiveness and method of the proposed method compared to other advanced methods, their results are compared. The results show that the proposed algorithm has constant evaluation compared to other previous methods and has created a suitable balance between exploitation and exploration.

2- Formulation of the Optimization Problem for Sizing

Objective functions that can be used to measure the quality of a design include minimizing construction costs, minimizing lifecycle costs, minimizing weight, maximizing stiffness, and many others. Typically, the design is constrained by factors such as material selection, applicable strength, node displacements, natural frequencies, loading conditions, support conditions, and

technical limitations (such as the type and size of available structural members and cross-sections, etc.). Therefore, it must be decided which parameters can be varied during the optimization process. These parameters are then transformed into optimization variables. As a result, the truss optimization method is formulated as follows:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & W = \sum_{e=1}^{N_m} \gamma_e \cdot l_e \cdot A_e \\ \text{subject to} \quad & \sigma^l < \sigma_e < \sigma^u \\ & A^l < A_e < A^u \\ & \delta^l < \delta_e < \delta^u \end{aligned} \quad (1)$$

3- Development of the Special Relativity Search Algorithm

The Special Relativity Search (SRS) algorithm is an intelligent algorithm inspired by the interaction of particles in a magnetic field and simulated using the principles of special relativity. The optimization variables in the algorithm are essentially charged particles moving with velocity v in a magnetic field. The force that drives the movement of particles in the magnetic field results from their interactions with one another. The main step equation of the algorithm is calculated using Eq. (12).

$$\begin{aligned} x_i = \left(\frac{v}{c}\right)^2 x_i + \left[\mu \frac{Q_i Q_j}{m R_{ij}^2} v_j \right] t_j \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} + \dots \\ R_{ij} \sin(\omega_n) \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

In the context of optimization, the gradient refers to the vector of partial derivatives of a function with respect to its variables. It indicates both the direction and magnitude of the steepest ascent or descent of the function at a given point. Mathematically, if we have a multivariable function

*Manuscript received May 10, 2024 , Revised January 19, 2025, Accepted March 16, 2025.

¹ PhD Candidate, department of structural engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

² Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. **Email:** v.goodarzimehr@scu.ac.ir

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, the gradient is denoted as ∇f or $\text{grad}(f)$ and is defined as follows:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (13)$$

Each component of the gradient represents the rate of change of the function with respect to the corresponding variable. The convergence changes for the alpha coefficient are shown in Figures 1 and 2.

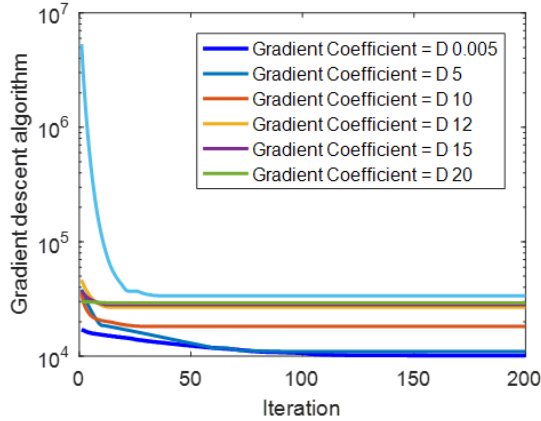


Fig. 1. Convergence of the Algorithm with Very Large Values of α

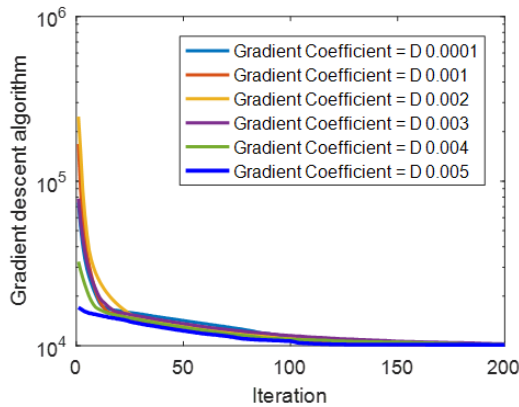


Fig. 2. Convergence of the Algorithm with Very Small Values of α

4- Evaluation of Structural Engineering Applications

In this paper, a total of three truss structural systems with various loading conditions and design constraints have been selected as benchmarks to demonstrate the effectiveness of the SRS algorithm. The computer codes for the algorithm and structures were developed in the MATLAB environment, and the truss structures were analyzed using the direct stiffness method. The best design is determined through 10 independent runs for each problem. To evaluate the performance of the SRS method, three well-known structural engineering problems were considered: a 52-member planar truss (with discrete variables), a 72-member space truss (with both continuous and discrete variables), and a 160-member space truss (with discrete variables). In this study, the algorithms are evaluated based on the best, worst, average, and standard

deviation of the results, as well as the convergence speed, and are compared.

6-Conclusion

In this study, one of the latest metaheuristic algorithms, called Special Relativity Search, was developed for optimal structural design. The Special Relativity Search algorithm is a single-objective, population-based metaheuristic that, inspired by the interaction of particles in a magnetic field, has successfully developed an optimized algorithm. The mathematical equations used in this algorithm were first developed for practical application based on the theory of special relativity. Due to the effective application of this algorithm in the past two years, it has been widely used to solve various scientific problems worldwide. However, considering the background of metaheuristic algorithms, these types of algorithms are incapable of optimizing all problems. Therefore, they require revision and development to solve new problems. In this research, the gradient descent algorithm was used to increase the accuracy of local search. The performance of the gradient descent algorithm is dependent on various coefficient values. For this purpose, a sensitivity analysis was developed to select the best coefficient. Finally, to prove the effectiveness of the proposed method, several structural engineering optimization problems were solved. The results show that this method performs more effectively than other past methods. It is worth mentioning that with this algorithm, a new range of problems can be optimized in the future.



توسعه الگوریتم جستجوی نسبیت خاص برای طراحی بهینه سازه‌های خرابی*

مقاله پژوهشی



وحید گودرزی مهر^(۲)

فرناز سلاجقه^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.88012.1297

چکیده طراحی بهینه مسائل مهندسی سازه به طور مشخص سازه‌های خرابی به دلیل وجود قیدهای طراحی از جمله تنش و جابجایی کار بسیار چالش بر انگیزی می‌باشد. این قیدها در بیشتر موارد به صورت غیرخطی و دینامیکی تعریف می‌شوند که باعث به دام افتادن الگوریتم‌های بهینه سازی در بهینه محلی می‌شوند. در مقابل الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از تکنیک‌ها و اپراتورهای خاص برنامه نویسی پاسخ‌های قابل قبولی برای این نوع از مسائل تولید می‌کنند. الگوریتم استاندارد جستجوی نسبیت خاص به دلیل عدم هماهنگی میان دو پارامتر مهم بهره برداری و اکتشاف در حل این دسته از مسائل ناموفق است و به بهینه محلی همگرا می‌گردد. در این تحقیق برای بهبود عملکرد این الگوریتم دو تکنیک جدید معرفی و پیاده سازی می‌گردد. الگوریتم گرادینان نزولی به عنوان مکمل الگوریتم جستجوی نسبیت خاص استفاده گردیده است. گام حرکت الگوریتم با استفاده از ضرایب خاص کنترل می‌گردد. برای اثبات اثربخشی و موثر بودن روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های پیشرفته نتایج آنها با یکدیگر مقایسه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های قبلی نرخ همگرایی بالایی دارد و توازن مناسبی بین پارامترهای بهره برداری و اکتشاف ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی طراحی بهینه، الگوریتم جستجوی نسبیت خاص، الگوریتم‌های فراابتکاری، محاسبات نرم، SRS.

Improved Special Relativity Search Algorithm for Optimal Design of Truss Structures

Farnaz Salajegheh

Vahid Goodarzimehr

Abstract Optimal design of structural engineering problems, particularly truss structures, is highly challenging due to the presence of design constraints such as stress and displacement. These constraints are often defined in a nonlinear and dynamic manner, which causes optimization algorithms to become trapped in local optima. In contrast, metaheuristic algorithms generate acceptable solutions for such problems using specialized programming techniques and operators. The standard Special Relativity Search (SRS) algorithm fails to solve these types of problems effectively due to the lack of coordination between two crucial parameters: exploitation and exploration, leading to convergence to local optima. In this study, two new techniques are introduced and implemented to enhance the performance of this algorithm. The gradient descent algorithm is employed as a complementary method to the SRS algorithm, with the movement step controlled using specific coefficients. To demonstrate the effectiveness of the proposed method compared to other advanced approaches, their results are compared. The findings indicate that the proposed algorithm has a higher convergence rate than previous methods and successfully establishes a proper balance between exploitation and exploration parameters.

Key words Optimal Design, Special Relativity Search Algorithm, Metaheuristic Algorithm, Soft Computing, SRS.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۲/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۲۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار عمران سازه، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. Email: v.goodarzimehr@scu.ac.ir

مقدمه

الگوریتم‌های متنوعی در سال‌های اخیر برای طراحی بهینه سازه‌های خرابایی توسعه داده شده است. این روش‌های که در اکثر موارد موفق هم بوده اند را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: الف) بهینه سازی اندازه خرابا. ب) بهینه سازی شکل خرابا و. پ) بهینه سازی توپولوژی خرابایی. در روش اول، وزن المانهای سازه به عنوان تابع هدف و سطح مقطع اعضا به عنوان متغیرهای طراحی تعریف می‌شوند. در روش دوم مختصات اتصال گره‌ها به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شوند و در روش آخر متغیرهای طراحی تغییر در هندسه سازه می‌باشد.

در این تحقیق مباحث و تئوری مرتبط با بهینه سازی اندازه مورد توجه می‌باشد. در این روش تابع هدف کمینه کردن وزن المانهای سازه می‌باشد. از آنجایی که وزن سازه ارتباط مستقیم با پایداری آن دارد به همین جهت محدودیت‌هایی در کمینه کردن وزن سازه وجود دارد. استراتژی اصلی در این روش کمینه کردن سطح مقطع اعضا می‌باشد. چونکه با کمینه کردن سطح مقطع عرضی وزن سازه نیز کاهش می‌یابد. پارامترهایی مانند طول و وزن مخصوص المانها در فرآیند بهینه سازی ثابت می‌باشند [1]. در دو دهه اخیر الگوریتم‌های موثر متنوعی برای بهینه سازی اندازه توسعه داده شده است که در این تحقیق تعدادی از مهمترین‌ها ذکر می‌گردد. مارتینز و همکاران [2] یک روش رشد جدید برای طراحی بهینه به روشی متوالی از نظر اندازه، هندسه و توپولوژی خراباهای صفحه بدون نیاز به سازه زمین ارائه کردند. این روش برای مسائل تحت تک بار با محدودیت‌های تنش و اندازه اعمال شده است. کاوه و همکاران [3] یک الگوریتم ترکیبی جدید بر مبنای دو الگوریتم بهینه ساز هریس هاکس و الگوریتم رقابتی امپریالیستی را برای دستیابی به یک استراتژی جستجوی بهتر توسعه دادند. یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید مبتنی بر جمعیت و الهام‌گرفته از طبیعت است که از رفتار مشارکتی هریس هاوکز و سبک تعقیب در طبیعت به نام هجوم غافلگیرکننده تقلید می‌کند. گودرزی مهر و همکاران [4,5] دو روش نوین برای بهینه سازی سازه‌های خرابایی مسطح و فضایی بر مبنای روشهای هوش جمعی پیشنهاد دادند و بهینه سازی اندازه را انجام دادند. دهقانی و همکاران [6,7] یک روش جدید برای بهینه سازی اندازه سازه‌های خرابایی و فریم‌ها توسعه دادند. آنها با استفاده از این روش دو نوع متفاوت از سازه‌ها را با

موفقیت بهینه سازی کردند.

دونگ و همکاران [8] یک تکنیک تقریب چند نقطه‌ای شاخه‌ای برای کاهش تعداد تحلیل‌های ساختاری با ایجاد توابع تقریبی به جای تحلیل‌های ساختاری در الگوریتم ژنتیک معرفی کردند که در آن الگوریتم ژنتیک به متغیرهای اندازه پیوسته و متغیرهای توپولوژی گسسته می‌پردازد. برای خراباهای مقیاس بزرگ با تعداد زیادی متغیر طراحی، یک تغییر عظیم در متغیرهای توپولوژی در الگوریتم ژنتیک باعث از دست رفتن دقت تقریب می‌شود و سپس همگرایی بهینه سازی را دشوار می‌کند. آنها یک روش تقریبی برای رفع این مشکل پیشنهاد کردند. جاویدی و همکاران [9] برای اولین بار توابع وزن و انرژی فروپاشی ره به صورت مشترک برای مقاصد بهینه سازی پیشنهاد دادند و مسئله به عنوان یک مسئله بهینه سازی چند هدفه تعریف گردید. آنها برای حل چنین مسائلی، دو الگوریتم چندهدفه جدید بر اساس الگوریتم جستجوی کلاغ که اخیراً معرفی شده است، پیشنهاد کردند. گودرزی مهر و همکاران [10,11] دو روش فراکاوشی جدید بر مبنای الگوریتم جستجوی نسبیت خاص و الگوریتم بازی آشوب برای بهینه سازی سازه اندازه سازه‌های فریم و کامپوزیتی توسعه دادند. امیری و همکاران [12] یک فرمول جدید و ساده برای محاسبه مشتقات مرتبه اول و دوم تابع هدف بر مبنای روش نیوتن برای بهینه سازی اندازه پیشنهاد کردند. داستان و همکاران [13] یک روش ترکیبی جدید بر مبنای الگوریتم‌های جستجوی سیستم ذرات شارژ شده و یادگیری مبتنی بر آموزش برای بهینه سازی اندازه فریم‌ها پیشنهاد نمودند.

همانطور که اشاره شد روش‌های فراکاوشی به دلیل تنوع و انعطاف پذیری در سطح گسترده‌ای مورد استقبال محققین قرار گرفته اند. یک الگوریتم فراابتکاری یک روش جستجو است که برای یافتن راه‌حل مناسبی برای یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده و دشوار که تا حد بهینه حل شود به ار رفته می‌شود. یافتن راه حل تقریباً بهینه بر اساس اطلاعات ناقص یا پراکنده در این دنیای واقعی از منابع محدود (مانند قدرت محاسباتی و زمان) ضروری است. ظهور فراابتکاری برای حل چنین مسائل بهینه سازی یکی از برجسته ترین دستاوردهای دو دهه اخیر در تحقیقات عملیات است. چالش‌هایی وجود دارد که توجه را به توسعه راه حل‌های بهتر نسبت به رویکردهای سنتی موجود می‌طلبد. الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف توسط نویسندگان توصیف شده‌اند که برای

حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی غیرمحدب بسیار گسترده هستند. در ادامه تعدادی از مهمترین این روشها معرفی می‌گردد. گودرزی مهر و همکاران [14,15] یک الگوریتم فراکاوشی جدید تحت عنوان الگوریتم جستجوی نسبت خاص توسعه دادند. ساختار این الگوریتم از دو بخش متفاوت تشکیل شده است. در بخش اول رفتار ذرات در یک میدان مغناطیس به عنوان الگوی بهینه انتخاب و در بخش دوم برای اولین بار تمام معادلات بر مبنای فیزیک نسبت خاص استاندارد سازی گردیده است. ارول و اکسین [16] یک روش بهینه‌سازی جدید را بر اساس یکی از تئوری‌های تکامل جهان تکیه دارد پیشنهاد نمودند. یعنی تئوری بیگ بنگ و بیگ کرانچ. در فاز بیگ بنگ، اتلاف انرژی بی نظمی ایجاد می‌کند و تصادفی بودن ویژگی اصلی این فاز است. در حالی که، در مرحله بیگ کرانچ، ذرات به طور تصادفی توزیع شده به یک ترتیب کشیده می‌شوند. هشیم و همکاران [17] یک الگوریتم فراابتکاری جدید به نام بهینه‌سازی حلالیت گاز هنری پیشنهاد نمودند که رفتار حاکم بر قانون هنری برای حل مسائل چالش برانگیز بهینه‌سازی را تقلید می‌کند. قانون هنری یک قانون گاز ضروری است که مقدار گاز معینی را که در یک دمای ثابت به نوع و حجم معینی از مایع حل می‌شود، مرتبط می‌کند. این الگوریتم رفتار تجمع گاز را تقلید می‌کند تا بهره برداری و اکتشاف را در فضای جستجو متعادل کند و از بهینه محلی جلوگیری کند. کاوه و اسلاملو [18] یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید با الهام از طبیعت را تحت عنوان الگوریتم راهرو آب پیشنهاد نمودند. ابوالیق و همکاران [19] یک روش جدید تحت عنوان آکویلا الگوریتم برای مقاصد بهینه‌سازی توسعه دادند. فرامرزی و همکاران [20] یک روش جدید بر مبنای سیستم‌های دانش بنیان توسعه دادند.

تحقیقات اخیر به بررسی الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف برای بهینه‌سازی سیستم‌های سازه‌ای پرداخته‌اند. به عنوان مثال، اسماعیلی اقدام و ایمانی کله سر (۲۰۲۴) روشی مبتنی بر الگوریتم‌های فراکاوشی برای تعیین موقعیت بهینه کابل‌ها در دکل‌های مهاری ارائه داده‌اند که نتایج امیدوارکننده‌ای در مقایسه با روش‌های سنتی نشان داده است [41]. همچنین، بنایی و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر ضرایب وزنی تابع هدف بر عملکرد الگوریتم ژنتیک در کنترل فعال سازه‌ها را بررسی کرده‌اند [42]. در حالی که بنایی و علامتیان (۲۰۱۸) از الگوریتم ژنتیک

بهبودیافته برای کمینه‌سازی تابع هدف چندمتغیره در کنترل نوسانات فعال سازه‌ها استفاده کرده‌اند [43]. در تحقیق دیگری، اکبرزایی و احمدی ندوشن (۲۰۱۸) بهبودهای در نمودار پارتو در بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفه با استفاده از المان‌های چندضلعی غیریکنواخت را ارائه داده‌اند [45] و جهانگیری و احمدی ندوشن (۲۰۱۷) به شناسایی خسارت در سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه MOPSO و MOEA/D پرداخته‌اند [46]. همچنین، گودرزی مهر و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی موانع استانداردسازی مصالح ساختمانی در استان لرستان پرداخته‌اند [44]. در حالی که تحقیقات اخیر گودرزی مهر و همکاران (۲۰۲۴) به مسائل بهینه‌سازی در صفحات مرکب پیروزلامینه شده با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته پرداخته‌اند [47-49]. کتابداری و محترم (۲۰۱۰) قاب‌های بادبند دار تحت بار دینامیکی طیفی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مهاجرتی بهینه‌سازی کردند [50]. در حالی که داعی و همکاران (۲۰۱۵) ماتریس پایه پوچی برای تحلیل بهینه سازه‌ها را با استفاده از الگوریتم جستجوی سیستم ذرات باردار توسعه دادند [51].

در این تحقیق به منظور طراحی بهینه سازه‌های خرپایی الگوریتم جستجوی نسبت خاص [14] توسعه داده شد است. مفاهیم مغناطیس و فیزیک نسبت الگوری بهینه الگوریتم جستجوی نسبت خاص است. در این الگوریتم، عوامل جستجوگر به عنوان ذرات منفرد با بار الکتریکی خاص در نظر گرفته می‌شوند در حالی که هر ذره در سیستم از طریق نیروی مغناطیس با اجسام دیگر تعامل دارد. موقعیت هر عامل راه حل کاندید برای حل مسئله است، در حالی که جرم عامل با استفاده از یک هدف تخصیص داده می‌شود. به طور همزمان، نیروی مغناطیس باعث حرکت تمام ذرات به سمت راه حل‌های بهینه می‌گردد. الگوریتم جستجوی نسبت خاص می‌تواند در مسائل بهینه‌سازی بسیار غیرخطی و پیچیده بهتر عمل کند. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که این الگوریتم توانایی جستجوی محلی ضعیف و سرعت جستجوی آهسته برای دستیابی به همگرایی خود دارد. به منظور رفع این مشکل از دو تکنیک متفاوت و جدید برای بهبود عملکرد الگوریتم اصلی استفاده شده است. برای بهبود سرعت جستجوی این الگوریتم از روش گرادیان نزولی با ضرایب متغیر استفاده شده است. همچنین برای حل

که در آن W وزن کل سازه است. γ_e وزن واحد حجم مصالح است؛ l_e طول هر عضو است. A_e سطح مقطع عرضی المانها است. این مدل طراحی همچنین باید محدودیت‌های تنش σ_e و انحراف هر عضو را در هر اتصال c برآورده کند. برای کنترل این محدودیت‌ها می‌توان از روش تابع جریمه به صورت زیر استفاده کرد:

$$\text{if } \sigma^l < \sigma_e < \sigma^u \text{ then } \varphi_\sigma^e = 0$$

$$\text{if } \sigma_e < \sigma^l \text{ or } \sigma_e > \sigma^u$$

$$\text{then } \varphi_\sigma^e = \left| \frac{\sigma_e - \sigma^{l,u}}{\sigma^{l,u}} \right| \quad (2)$$

$$\varphi_\sigma^k = \sum_{e=1}^{N_m} \varphi_\sigma^e \quad (3)$$

به منظور کنترل پایداری سازه جابجایی نقاط گره ای را نیز باید کنترل نمائیم. با کاهش وزن استقامت سازه نیز کاهش می‌یابد، این کاهش استقامت منجر به افزایش جابجایی سازه تحت بارگذاری‌های خارجی می‌شود. در صورتی که با استفاده از یک تکنیک مناسب این جابجایی‌ها را کنترل نمائیم منجر به فروپاشی سازه می‌گردد. فرمولبندی زیر برای کنترل جابجایی‌ها پیشنهاد گردیده است.

$$\text{if } \delta^l \leq \delta_{c(x,y,z)} \leq \delta^u$$

$$\text{then } \varphi_{\delta(x,y,z)}^e = 0$$

$$\text{if } \delta_{c(x,y,z)} < \delta^l \text{ or } \dots$$

$$\delta_{c(x,y,z)} > \delta^u \text{ then } \varphi_{\delta(x,y,z)}^e = \left| \frac{\delta_{c(x,y,z)} - \delta^{l,u}}{\delta^{l,u}} \right| \quad (4)$$

$$\varphi_\delta^k = \sum_{c=1}^{N_m} [\varphi_{\delta_x}^c + \varphi_{\delta_y}^c + \varphi_{\delta_z}^c] \quad (5)$$

تابع جریمه نهایی ترکیبی از محدودیت‌های تنش و جابجایی می‌باشد که با معادله (۶) تعریف می‌شود.

$$\psi^k = (1 + \varphi_\sigma^k + \varphi_\delta^k)^\epsilon \quad (6)$$

پس از محاسبه مقادیر جریمه در گام بعد با استفاده از معادله (۷) تابع هدف اصلاح می‌گردد.

$$F^k = \psi^k \cdot W^k \quad (7)$$

مشکل جستجوی محلی ضعیف از جمعیت پویا استفاده گردیده است. برای اثبات کاربندی بودن و موثر بودن روش پیشنهادی سه مسئله سازه ای در زمینه طراحی بهینه سازه ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها در حل این دسته از مسائل عملکرد بهتری دارد.

فرمولبندی مسئله بهینه سازی اندازه

توابع هدف که می‌توانند برای اندازه گیری کیفیت طراحی مورد استفاده قرار گیرند عبارتند از: حداقل هزینه ساخت، حداقل هزینه چرخه عمر، حداقل وزن و حداکثر سختی، و خیلی موارد دیگر. به طور معمول، طراحی با محدودیت‌هایی مانند انتخاب مصالح، استحکام قابل اجرا، جابجایی گره‌ها، فرکانس‌های ویژه، موارد بارگذاری، شرایط پشتیبانی و محدودیت‌های فنی (مانند نوع و اندازه اعضای سازه‌ای موجود و سطوح مقطع و غیره) محدود می‌شود. از این رو، باید تصمیم گرفت که کدام پارامترها را می‌توان در طول فرآیند بهینه سازی تغییر داد. سپس این پارامترها به متغیرهای بهینه سازی تبدیل می‌شوند. ساختارهای همسانگرد را معمولاً می‌توان با سه نوع مختلف از متغیرهای طراحی توصیف کرد: (۱) متغیرهای اندازه، (۲) متغیرهای هندسی و (۳) متغیرهای توپولوژیکی. بهینه سازی اندازه به تعیین اندازه مقطع با استفاده از یک هندسه معین مربوط می‌شود. بهینه سازی پیکربندی مجموعه ای از متغیرهای هندسی و اندازه را با استفاده از یک توپولوژی معین جستجو می‌کند. بهینه‌سازی توپولوژی از میان انواع مختلف ساختاری انتخاب می‌شود. به طور کلی بهینه سازی توپولوژی یک بهینه سازی ترکیبی است

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای بهینه‌سازی سازه‌های خرابایی، به حداقل رساندن سطح مقطع المانها است که منجر به کاهش هزینه قابل قبول ساخت می‌شود. در بهینه سازی سازه‌های خرابایی باید محدودیت‌هایی مانند مقاومت برای هر عضو و جابجایی برای هر اتصال گره ای بررسی شود. در نتیجه، روش بهینه سازی خرپا به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\min \text{imize } W = \sum_{e=1}^{N_m} \gamma_e \cdot l_e \cdot A_e$$

$$\text{subject to } \sigma^l < \sigma_e < \sigma^u \\ A^l < A_e < A^u \quad \delta^l < \delta_e < \delta^u$$

(۱)

مختصات جدید ذرات در هر مرحله بر اساس فرکانس زاویه ای و با استفاده از معادلات (۱۰ و ۱۱) تعیین می شود. در مرحله بعد، با اعمال دو پدیده مهم فیزیک نسبیت خاص، پدیده انقباض طول و اتساع زمانی، معادله گامی الگوریتم به سمت نقطه بهینه توسعه می یابد.

$$Q_j^t = \frac{fit_j^t - worst^t}{Best^t - worst^t} \quad (8)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi m}{Q_B} \Rightarrow \omega_n = \frac{Q_B}{m} \quad (9)$$

$$x_{new} = x_{old} + \frac{v}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (10)$$

$$\omega_n = \frac{Q_i B}{m} \xrightarrow{B = \mu \frac{Q_j v_j}{R_{ij}^3}} \mu \frac{Q_i Q_j v_j}{m r_{ij}^3} \quad (11)$$

حرکت کل پاسخ های احتمالی که شامل تمام ذرات می شود با معادله (۱۲) محاسبه می شود که شامل مختصات اولیه، سرعت و مختصات ثانویه است. در واقع این معادله گام اصلی است که در هر تکرار با به روز رسانی موقعیت پاسخ های احتمالی بهینه آنها را به سمت نقاط بهینه سراسری سوق می دهد. از این رو توسعه یک معادله که تمام حالت های یک حرکت را دارا باشد می تواند مقایسه دقیقی برای جستجوی پاسخ بهینه باشد. فاصله ذرات از یکدیگر با استفاده از نرم اقلیدوسی اندازه گیری می شود. فرمول پیشنهادی برای تعیین اندازه میان ذرات به شکل معادله (۱۳) می باشد. چگونگی اعمال نیرو بر روی یکدیگر در میدان مغناطیسی در شکل (۱) نشان داده شده است. نحوه تعیین علامت حرکت ذرات به سمت نقطه بهینه در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$x_i = \left(\frac{v}{c}\right)^2 x_i + \left[\mu \frac{Q_i Q_j}{m R_{ij}^2} v_j \right] t_j \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} + \dots$$

$$R_{ij} \sin(\omega_n) \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (12)$$

$$r_{ij}^t = \frac{\text{norm}(X_i^t - X_j^t)}{X_i^t + X_j^t} \quad (13)$$

توسعه الگوریتم جستجوی نسبیت خاص

الگوریتم جستجوی نسبیت خاص یک الگوریتم هوشمند است که از برهمکنش ذرات در میدان مغناطیسی الهام گرفته شده و با استفاده از فیزیک نسبیت خاص شبیه سازی شده است. ذرات میدان مغناطیسی با سرعت بسیار بالایی در حال حرکت هستند. سرعت ذرات تقریباً نزدیک به سرعت نور است [14]. برای شبیه سازی رفتار ذرات، لازم است محاسباتی اتخاذ شود که حرکت با سرعت بالا را مدلسازی نماید. فیزیک نسبیت خاص بهترین گزینه برای این منظور است. سرعت ذرات در فیزیک نسبیت خاص بر اساس سرعت نور ارزیابی می گردد. دلیل این موضوع به این خاطر است که سرعت نور مطلق و از سرعت همه ذرات بیشتر است. در فیزیک نسبیت خاص سرعت ذرات نسبت به سرعت نور اندازه گیری می شود. هر چه سرعت ذرات به سرعت نور نزدیکتر باشد، دقت محاسبات بالاتر است. بنابراین، در فیزیک نسبیت خاص، معادلات به نسبت سرعت ذره به سرعت نور بستگی دارد.

متغیرهای بهینه سازی در واقع همان ذرات الکتریکی هستند که در میدان مغناطیس با سرعت v در حال حرکت هستند. عاملی که باعث حرکت ذرات در میدان مغناطیسی می شود، نیرویی است که به یکدیگر وارد می کنند. برهمکنش بین ذرات با استفاده از نیروی لورنتز محاسبه می شود. ذرات با بار الکتریکی یکسان که به موازات مسیری بهینه حرکت می کنند، یکدیگر را جذب می کنند. همچنین ذرات با بارهای الکتریکی مخالف یکدیگر را دفع می کنند. کاملاً بدیهی است که همگرایی ذرات به سمت نقطه بهینه بستگی به بار الکتریکی ذرات دارد. در الگوریتم SRS، بار ذرات بر اساس تناسب تابع هدف تعیین می شود (معادل (۸)). لازم به ذکر است برای ایجاد یک مدل ایده آل یکسری ساده سازی ها در کدنویسی صورت گرفته است.

در میدان های مغناطیس مسیر حرکت ذرات به صورت دورانی می باشد. لذا، از آنجایی که حرکت ذرات دایره ای است و بردارهای سرعت و نیرو بر یکدیگر عمود هستند، لازم است نیروی لورنتس را با یک نیروی مرکزگرا شبیه سازی نمائیم. با استفاده از اطلاعات مربوط به نیروی بین ذرات، فرکانس زاویه ای را می توان با استفاده از معادله (۹) محاسبه کرد. تعیین

در این تحقیق به منظور توسعه عملکرد الگوریتم استاندارد جستجوی نسبیت خاص برای مقاصد طراحی بهینه مسائل مهندسی سازه از الگوریتم گرادیان نزولی استفاده شده است. ایده اصلی گرادیان نزولی، تنظیم مداوم پارامترهای یک سیستم در جهت شیب دارترین نزول تابع هدف است. تابع هدف اختلاف بین خروجی پیش بینی شده مدل و خروجی واقعی را اندازه گیری می‌کند. با به روز رسانی مداوم پارامترها در جهتی که هزینه را کاهش می‌دهد، الگوریتم به دنبال یافتن مجموعه بهینه پارامترهایی است که تابع هزینه را به حداقل می‌رساند. در زمینه بهینه سازی گرادیان به بردار مشتقات جزئی یک تابع با توجه به متغیرهای آن اشاره دارد. جهت و بزرگی تندترین صعود یا فرود تابع در یک نقطه خاص را نشان می‌دهد. از نظر ریاضی، اگر تابع چند متغیره $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ داشته باشیم، گرادیان به صورت ∇f یا $\text{grad}(f)$ نشان داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (14)$$

هر جزء از گرادیان نشان دهنده نرخ تغییر تابع نسبت به متغیر مربوطه است.

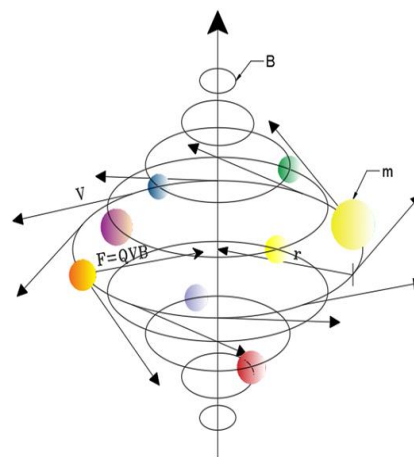
در الگوریتم استاندارد جستجوی نسبیت خاص به دلیل عدم کنترل مکانیزم مناسب روی سرعت ذرات باعث همگرایی زودرس می‌گردد. با توجه به بررسی‌های انجام شده اعمال گرادیان نزولی به همراه یک جمعیت پویا می‌تواند نتایج مطلوبی تولید نماید. پیاده سازی الگوریتم نزولی متناسب با الگوریتم جستجوی نسبیت خاص براساس گام‌های شماره یک تا پنج صورت می‌گیرد.

گام اول: تولید یک جمعیت تصادفی اولیه اعمال الگوریتم جستجوی نسبیت خاص

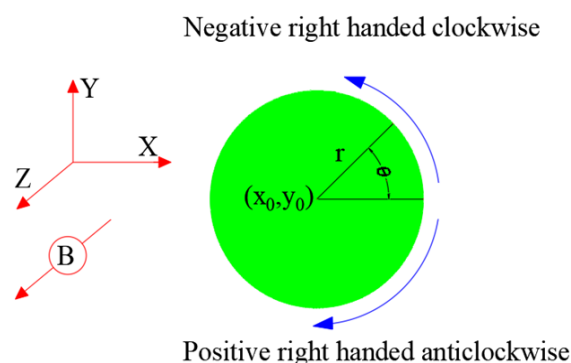
گام دوم: تابع هدف را با استفاده از مقادیر پارامتر فعلی ارزیابی می‌نمائیم. این تابع اختلاف بین خروجی پیش بینی شده مدل و خروجی واقعی را اندازه گیری می‌کند.

گام سوم: با انجام یک سری ساده سازی‌ها به دلیل وجود مشکلات برنامه نویسی گرادیان نزولی در سرعت ذرات باردار اعمال می‌گردد.

گام چهارم: مقادیر ضرایب جدید را با استفاده از اطلاعات گرادیان تنظیم می‌نمائیم. این کار با برداشتن یک گام کوچک در جهت مخالف گرادیان انجام می‌شود که با نرخ یادگیری α مقیاس می‌شود. نرخ یادگیری α اندازه به روز رسانی را کنترل می‌کند. معمولاً یک مقدار مثبت کوچک است و باید با دقت

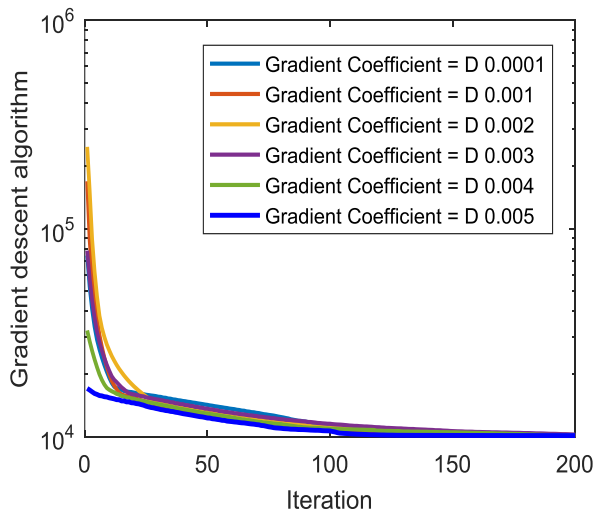


شکل ۱ نمایش نیروی بین ذرات در میدان مغناطیس



شکل ۲ شیوه تعیین مختصات ذرات

گودرزی مهر و همکاران ابتدا الگوریتم [14] جستجوی نسبیت خاص را برای ارزیابی هشتاد و سه تابع عددی چالش برانگیز توسعه دادند. به منظور ارزیابی استفاده از الگوریتم اولیه در حل مسائل مقید، گودرزی مهر و همکاران. [15] ۲۹ تابع عددی مقید و ۱۲ مسئله مهندسی مقید را با متغیرهای گسسته و ترکیبی با حذف محدودیت‌های مربوط به مسائل مقید بهینه نمودند. اما برای بهینه سازی مسائل دنیای واقعی به دلیل تعداد زیاد متغیرهای طراحی و بهینه محلی، لازم است الگوریتم به گونه ای توسعه یابد که با سرعت متعادلی به بهینه سراسری همگرا شود. حل مسائل با ابعاد بزرگ در فضای جستجوی گسسته یک مسئله چالش برانگیز است که برخی از الگوریتم‌های استاندارد ممکن است نتوانند بهترین پاسخ بهینه را پیدا کنند. دلیل اصلی این امر وجود محدودیت‌های مسئله است که باعث می‌شود الگوریتم در بهینه محلی به دام بیفتد. بنابراین لازم است تغییراتی در الگوریتم‌های اصلی ایجاد شود.



شکل ۴ همگرایی الگوریتم با مقادیر بسیار کوچک α

ارزیابی مسائل کاربردی مهندسی سازه

در این مقاله، در مجموع سه سیستم سازه خرابایی با شرایط بارگذاری متعدد و محدودیت‌های طراحی به عنوان معیار برای نشان دادن اثربخشی الگوریتم SRS انتخاب شده‌اند. کدهای کامپیوتری الگوریتم و سازه‌ها در محیط نرم افزار متلب تهیه شده و سازه‌های خرابایی با استفاده از روش سختی مستقیم تحلیل گردیده‌اند. بهترین طراحی با ۱۰ اجرا مستقل از هر مسئله تعیین می‌شود. برای ارزیابی عملکرد روش SRS، سه مسئله شناخته شده مهندسی سازه شامل خرپا مسطح ۵۲ عضوی (با متغیرهای گسسته)، خرپا فضایی ۷۲ عضوی (با متغیرهای پیوسته و گسسته) و سازه خرپا فضایی ۱۶۰ عضوی (با متغیرهای گسسته) در نظر گرفته شده است. در این تحقیق الگوریتم‌ها بر اساس بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار نتایج و همچنین سرعت همگرایی ثبت و مقایسه می‌شوند.

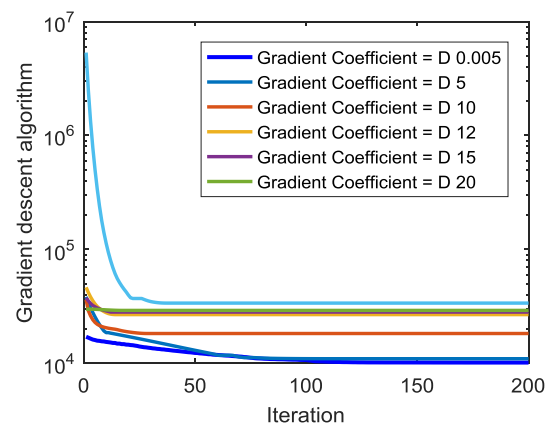
طراحی بهینه سازه مسطح ۵۲ عضوی

در این بخش یک سازه خرابایی مسطح ۵۲ عضوی که در شکل (۵) نمایش داده شده ارزیابی می‌گردد. اعضای این سازه خرابایی در ۱۲ گروه طبقه بندی می‌شوند: ۱- $A(1)-A(4)$ ، ۲- $A(5)-A(10)$ ، ۳- $A(11)-A(13)$ ، ۴- $A(14)-A(17)$ ، ۵- $A(18)-A(23)$ ، ۶- $A(24)-A(26)$ ، ۷- $A(27)-A(30)$ ، ۸- $A(31)-A(36)$ ، ۹- $A(37)-A(39)$ ، ۱۰- $A(40)-A(43)$ ، ۱۱- $A(44)-A(49)$ ، ۱۲-

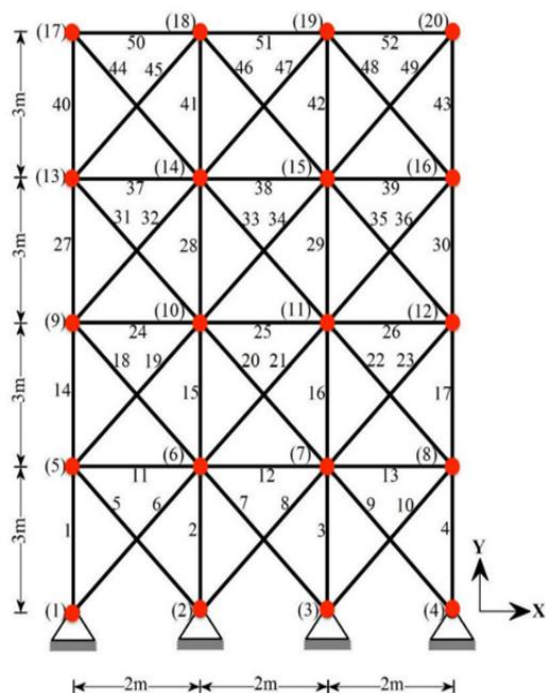
انتخاب شود. اگر α خیلی بزرگ باشد، ممکن است الگوریتم همگرا نشود. اگر α خیلی کوچک باشد، همگرایی ممکن است کند باشد. در این تحقیق مقدار $\alpha=0.005$ انتخاب گردیده است. ضریب α تاثیر مستقیم روی عملکرد الگوریتم دارد و عدم انتخاب یک مقدار مناسب منجر به تولید نتایج بهینه نمی‌گردد. به منظور انتخاب یک مقدار منطقی یک آنالیز حساسیت طراحی شده است. در این آنالیز سعی شده است که موثرترین مقدار برای پرامتر α انتخاب گردد.

همانطور که ذکر شد نرخ همگرایی الگوریتم ارتباط مستقیم با مقدار پرامتر کنترلی α دارد. مطابق شکل (۳) انتخاب مقادیر بزرگ برای این پرامتر باعث کاهش نرخ همگرایی می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود انتخاب مقدار $\alpha=0.005$ در مقایسه با سایر حالتها عملکرد بهتری دارد و نرخ همگرایی را افزایش می‌دهد. این در حالی است که مقادیر بزرگ باعث کندتر شدن نرخ همگرایی می‌گردد. در شکل (۴) انتخاب مقادیر کوچکتر از ۰.۰۰۵ باز هم باعث کاهش نرخ همگرایی و کوتاه شدن گام حرکتی می‌گردد. این موضوع بیانگر اینست که الگوریتم گرادیان نزولی با گام‌های خیلی کوچک با سرعت پائین تری به بهینه سراسری همگرایی می‌گردد و حتی در مواردی هرگز به بهینه سراسری همگرا نمی‌گردد.

گام پنجم: تابع هدف را با پارامترهای به روز شده محاسبه می‌نمائیم و فرآیند را به تعداد حداکثر تکرار، اجرا می‌نمائیم. الگوریتم به روز رسانی پارامترها بر اساس گرادیان را ادامه می‌دهد تا زمانی که مجموعه ای از مقادیر پرامتر را پیدا کند که تابع هزینه را به حداقل می‌رساند یا تا زمانی که به معیار توقف برسد.



شکل ۳ همگرایی الگوریتم با مقادیر بسیار بزرگ α



شکل ۵ سازه ۵۲ عضوی مسطح

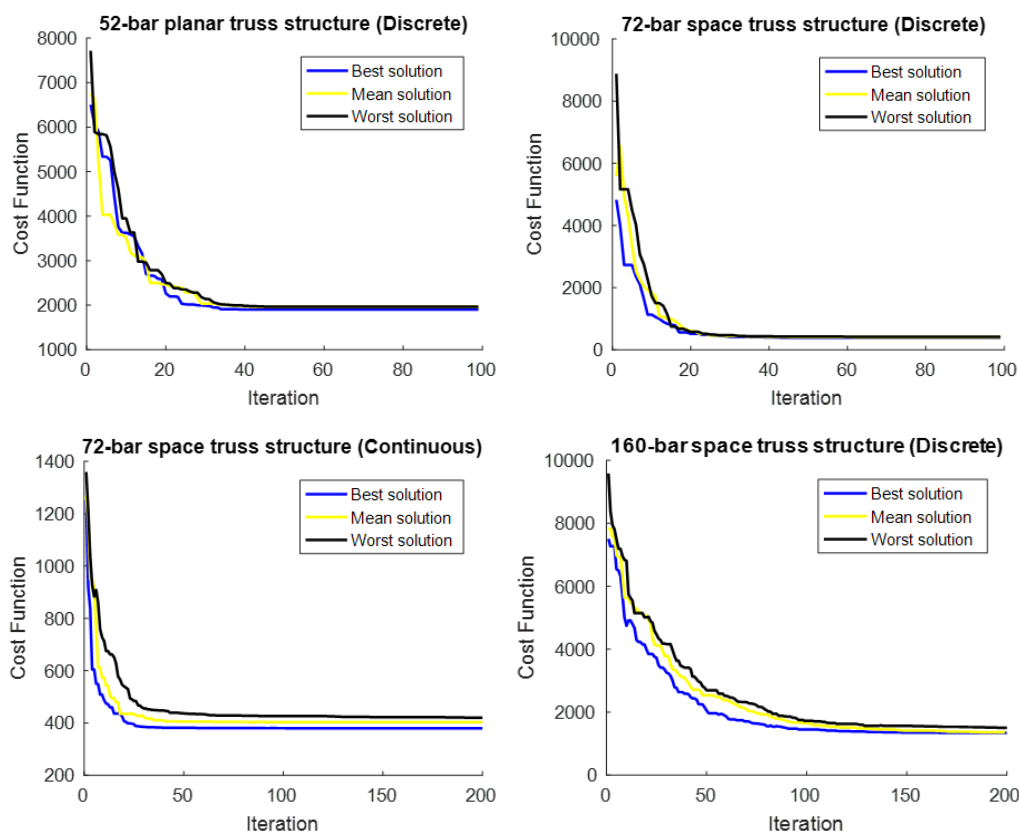
A(50)-A(52) مربوط به ۱۲ متغیر طراحی است. متغیرهای طراحی از مجموعه مقادیر گسسته فهرست شده در جدول (۱) انتخاب می‌گردند. وزن مخصوص واحد حجم مصالح ۷۸۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته 2.0×10^4 مگاپاسکال است. حداکثر تنش مجاز از نظر کشش و فشار برای همه اعضا ۱۸۰ مگاپاسکال است. بارهای $P_x = 100\text{kN}$ و $P_y = 200\text{kN}$ هر دو در چهار گره بالا اعمال می‌شوند. اندازه جمعیت برای سازه خرابایی ۵۲ میله ای ۵۰ تنظیم شده است. در فرآیند بهینه سازی، حداکثر تعداد تکرارها ۱۰۰ انتخاب می‌شود. نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از سایر رقبا بهتر عمل نموده و نتایج موثرتری تولید نموده است. در شکل (۶) نمودار همگرایی برای مقادیر بهترین، بدترین و میانگین ترسیم شده است.

جدول ۱ سطح مقطع گسسته مورد نیاز

شماره	in. ²	mm ²	شماره	in. ²	mm ²	شماره	in. ²	mm ²	شماره	in. ²	mm ²
1	0.111	71.613	17	1.457	939.998	33	3.840	2477.414	49	11.500	7419.340
2	0.141	90.968	18	1.563	1008.385	34	3.870	2496.769	50	13.500	8709.660
3	0.196	126.451	19	1.620	1045.159	35	3.880	2503.221	51	13.900	8967.724
4	0.250	161.290	20	1.800	1161.288	36	4.180	2696.769	52	14.200	9161.272
5	0.307	198.064	21	1.990	1283.868	37	4.220	2722.575	53	15.500	9999.980
6	0.391	252.258	22	2.130	1374.191	38	4.490	2896.768	54	16.000	10322.560
7	0.442	285.161	23	2.380	1535.481	39	4.590	2961.284	55	16.900	10903.204
8	0.563	363.225	24	2.620	1690.319	40	4.800	3096.768	56	18.800	12129.008
9	0.602	388.386	25	2.630	1696.771	41	4.970	3206.445	57	19.900	12838.684
10	0.766	494.193	26	2.880	1858.061	42	5.120	3303.219	58	22.000	14193.520
11	0.785	506.451	27	2.930	1890.319	43	5.740	3703.218	59	22.900	14774.164
12	0.994	641.289	28	3.090	1993.544	44	7.220	4658.055	60	24.500	15806.420
13	1.000	645.160	29	3.380	2180.641	45	7.970	5141.925	61	26.500	17096.740
14	1.130	729.031	30	3.470	2238.705	46	8.530	5503.215	62	28.000	18064.480
15	1.228	792.256	31	3.550	2290.318	47	9.300	5999.988	63	30.000	19354.800
16	1.266	816.773	32	3.630	2341.931	48	10.850	6999.986	64	33.500	21612.860

جدول ۲ نتایج طراحی بهینه سازه ۵۲ عضویی

متغیرهای طراحی (mm^2)	SGA [21]	HPSO [22]	HS [23]	DHPSACO [24]	RBAS [25]	SRS
A_1-A_4	4658.055	4658.055	4658.055	4658.055	4658.055	4658.055
A_5-A_{10}	1161.288	1161.288	1161.288	1161.288	1161.288	1161.288
$A_{11}-A_{13}$	645.160	363.225	506.451	494.193	494.193	494.193
$A_{14}-A_{17}$	3303.219	3303.219	3303.219	3303.219	3303.219	3303.219
$A_{18}-A_{23}$	1045.159	940.000	940.000	1008.385	939.998	939.998
$A_{24}-A_{26}$	494.193	494.193	494.193	285.161	494.193	494.193
$A_{27}-A_{30}$	2477.414	2238.705	2290.318	2290.318	2238.705	2238.705
$A_{31}-A_{36}$	1045.159	1008.385	1008.385	1008.385	1008.385	1008.385
$A_{37}-A_{39}$	285.161	388.386	2290.318	388.386	494.193	494.193
$A_{40}-A_{43}$	1696.771	1283.868	1535.481	1283.868	1283.868	1283.868
$A_{44}-A_{49}$	1045.159	1161.288	1045.159	1161.288	1161.288	1161.288
$A_{50}-A_{52}$	641.289	792.256	506.451	506.451	641.289	494.193
وزن بهینه (lb)	1970.142	1905.495	1906.76	1904.83	1903.366	1902.6055
وزن میانگین (lb)	-	-	-	-	-	1904.4047
بدترین وزن (lb)	-	-	-	-	-	1907.9661
انحراف معیار (lb)	-	-	-	-	-	1.891
تعداد آنالیز	-	-	-	-	-	5760

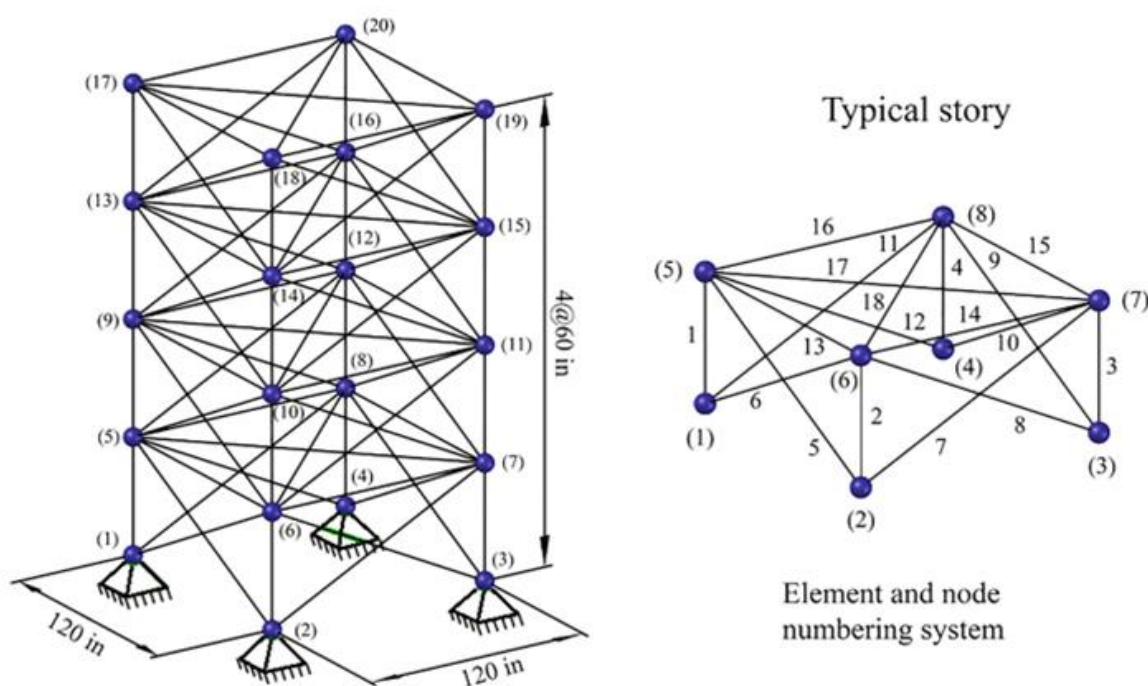


شکل ۶ نمودار همگرایی بهترین پاسخ بهینه برای مثال‌های مهندسی

انتخاب می‌شود. این مثال در دو حالت طراحی گسسته و پیوسته طراحی بهینه شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر روشها برای طراحی گسسته در جدول (۵) و برای طراحی پیوسته در جدول (۶) ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم توسعه داده شده نتایج موثرتری تولید نموده است. در شکل (۶) نمودار همگرایی برای مقادیر بهترین، بدترین و میانگین ترسیم شده است.

طراحی بهینه سازه فضایی ۷۲ عضوی

پیکربندی سازه خرپایی فضایی ۷۲ میله ای در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای طراحی و شرایط بارگذاری اعمال شده در سازه خرپایی به ترتیب در جدول (۳) و جدول (۴) آورده شده است. تعداد اعضا ۷۲ عضو است که به ۱۶ گروه تقسیم گردیده اند. متغیرهای گسسته از جدول (۱) انتخاب می‌گردند. اندازه جمعیت برای سازه خرپایی فضایی ۷۲ عضوی ۸۰ تنظیم شده است. در فرآیند بهینه سازی، حداکثر تعداد تکرارها ۱۰۰



شکل ۷ شماتیک سازه ۷۲ عضوی

جدول ۳ مشخصات مصالح مصرفی سازه ۷۲ عضوی

مشخصات	مقادیر
مدول الاستیسیته	۱۰۰۰۰ ksi
وزن مخصوص مصالح	۰٫۱ lb/in. ³
حداقل سطح مقطع مورد نیاز	۰٫۱ in. ²
حداکثر سطح مقطع مورد نیاز	۴ in. ²
مقدار جابجایی مجاز نقاط گره ای	±۰٫۲۵ in.
تنش مجاز المانهای سازه	±۲۵ ksi

جدول ۴ ترکیبات بارگذاری وارد بر سازه ۷۲ عضوی

گره‌ها	ترکیبات بارگذاری	بارها (kips)		
		P_x	P_y	P_z
۱۷	ترکیب بار اول	۵	۵	-۵
۱۸		۰	۰	۰
۱۹		۰	۰	۰
۲۰		۰	۰	۰
۱۷	ترکیب بار دوم	۰	۰	-۵
۱۸		۰	۰	-۵
۱۹		۰	۰	-۵
۲۰		۰	۰	-۵

جدول ۵ نتایج طراحی گسسته سازه ۷۲ عضوی

متغیرهای طراحی (in.^2)	SGA [21]	HPSO [22]	MBA [26]	DHPSACO [24]	ECBO [27]	HACOHS-T [28]	SRS
A_1-A_4	0.196	4.970	0.196	1.800	0.196	1.563	1.990
A_5-A_{12}	0.602	1.228	0.563	0.442	0.563	0.563	0.563
$A_{13}-A_{16}$	0.307	0.111	0.442	0.111	0.111	0.111	0.111
$A_{17}-A_{18}$	0.766	0.111	0.602	0.111	0.111	0.111	0.111
$A_{19}-A_{22}$	0.391	2.880	0.442	1.228	1.228	1.266	1.228
$A_{23}-A_{30}$	0.391	1.457	0.442	0.563	0.442	0.563	0.442
$A_{31}-A_{34}$	0.141	0.141	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111
$A_{35}-A_{36}$	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111
$A_{37}-A_{40}$	1.800	1.563	1.266	0.563	0.563	0.391	0.563
$A_{41}-A_{48}$	0.602	1.228	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563
$A_{49}-A_{52}$	0.141	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111
$A_{53}-A_{54}$	0.307	0.196	0.111	0.250	0.111	0.111	0.111
$A_{55}-A_{58}$	1.563	0.391	1.800	0.196	0.196	0.196	0.196
$A_{59}-A_{66}$	0.766	1.457	0.602	0.563	0.563	0.563	0.563
$A_{67}-A_{70}$	0.141	0.766	0.111	0.442	0.391	0.391	0.391
$A_{71}-A_{72}$	0.111	1.563	0.111	0.563	0.563	0.602	0.563
وزن بهینه (lb)	427.203	933.09	390.73	390.380	389.33	390.18	389.3342
وزن میانگین (lb)	-	-	395.432	-	391.59	-	390.2501
بدترین وزن (lb)	-	-	399.49	-	-	-	391.9601
انحراف معیار (lb)	-	-	3.04	-	-	-	0.982
تعداد آنالیز	60000	50000	11600	-	17010	-	7020

جدول ۶ نتایج طراحی پیوسته سازه ۷۲ عضوی

متغیرهای طراحی (in. ²)	PSO [29]	BB-BC [30]	SAHS [31]	CNNT-PSO [32]	HTS [33]	EHOC [34]	CBO [27]	SRS
A ₁ -A ₄	1.7427	1.8577	1.860	1.8861	1.9001	1.8911	1.9170	1.8904
A ₅ -A ₁₂	0.5185	0.5059	0.521	0.5123	0.5131	0.5051	0.5031	0.5138
A ₁₃ -A ₁₆	0.1000	0.1000	0.100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A ₁₇ -A ₁₈	0.1000	0.1000	0.100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1001	0.1000
A ₁₉ -A ₂₂	1.3079	1.2476	1.271	1.2685	1.2456	1.2778	1.2721	1.2652
A ₂₃ -A ₃₀	0.5193	0.5269	0.509	0.5117	0.5080	0.5082	0.5050	0.5112
A ₃₁ -A ₃₄	0.1000	0.1000	0.100	0.1000	0.1000	0.1004	0.1000	0.1000
A ₃₅ -A ₃₆	0.1000	0.1012	0.100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A ₃₇ -A ₄₀	0.5142	0.5209	0.485	0.5236	0.5550	0.5297	0.5184	0.5228
A ₄₁ -A ₄₈	0.5464	0.5172	0.501	0.5171	0.5227	0.5343	0.5362	0.5160
A ₄₉ -A ₅₂	0.1000	0.1004	0.100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A ₅₃ -A ₅₄	0.1095	0.1005	0.100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A ₅₅ -A ₅₈	0.1615	0.1565	0.168	0.1565	0.1566	0.1566	0.1569	0.1565
A ₅₉ -A ₆₆	0.5092	0.5507	0.584	0.5456	0.5407	0.5431	0.5374	0.5460
A ₆₇ -A ₇₀	0.4967	0.3922	0.433	0.4103	0.4084	0.4069	0.4062	0.4105
A ₇₁ -A ₇₂	0.5619	0.5922	0.520	0.5697	0.5669	0.5500	0.5741	0.5681
وزن بهینه (lb)	381.91	379.85	380.62	379.6148	379.73	379.72	379.75	379.6168
وزن میانگین (lb)	-	382.08	-	379.6149	382.26	380.39	380.03	379.6264
بدترین وزن (lb)	-	-	-	379.6155	-	-	-	379.6393
انحراف معیار (lb)	-	1.912	-	0.0002	1.94	0.54	0.278	0.0081
تعداد آنالیز	-	19621	13742	-	13166	8400	18000	33570

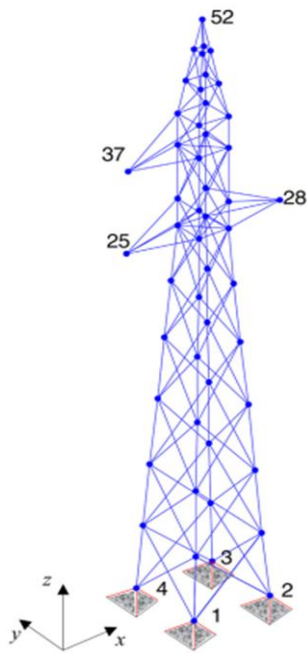
طراحی بهینه سازه فضایی ۱۶۰ عضوی

آخرین مسئله بهینه‌سازی بررسی شده در این مقاله، سازه خربایی ۱۶۰ عضوی است که در شکل (۸) نشان داده شده است. وزن واحد حجم مصالح ۰,۰۰۷۸۵ کیلو گرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته مصالح ۲,۰۴۷ × ۱۰^۶ می‌باشد. مختصات گره ای و چیدمان اعضای این خرپا به ترتیب در جداول (۷) و (۸) آورده شده است. ترکیبات بارگذاری اعمال شده به سازه در جدول (۹) ارائه گردیده است. در این مسئله، سطح مقطع ۱۶۰ عضو به ۳۸ متغیر طراحی مستقل تقسیم شده و از یک مجموعه انتخاب شده است. S={1.84, 2.26, 2.66, 3.07, 3.47, 3.88, 4.79, 5.27, 5.75, 6.25, 6.84, 7.44, 8.06, 8.66, 9.40, 10.47, 11.38, 12.21, 13.79, 15.39, 17.03, 19.03, 21.12, 23.20, 25.12,

27.50, 29.88, 32.76, 33.90, 34.77, 39.16, 43.00, 45.65, 46.94, 51.00, 52.10, 61.82, 61.90, 68.30, 76.38, 90.60, 94.13} (cm²)

سازه به گونه ای طراحی شده است که تحت ۸ ترکیب بار مستقل ارائه شده در جدول (10) قرار گیرد. در این مسئله، محدودیت‌های تنش کمانشی برای اعضای فشاری در نظر گرفته شده است. برای یک عضو تحت فشار، تنش کمانش σ_b به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_b = \begin{cases} 1300 - \frac{(\frac{kl}{r})^2}{24} \text{ if } \frac{kl}{r} \leq 120 \\ \frac{10^7}{(\frac{kl}{r})^2} \text{ if } \frac{kl}{r} > 120 \end{cases} \quad (15)$$



شکل ۸ شماتیک سازه ۱۶۰ عضوی

که در آن l طول عضو در نظر گرفته شده، r شعاع مربوط به ژیراسیون، و k ضریب طول موثر است. در این مسئله، $1.0=k$ فرض شده است. شعاع چرخش ژیراسیون متناظر برای ۴۲ بخش گسسته اعمال شده است. $r=\{0.47, 0.57, 0.67, 0.77, 0.87, 0.97, 0.97, 1.06, 1.16, 1.26, 1.15, 1.26, 1.36, 1.46, 1.35, 1.36, 1.45, 1.55, 1.75, 1.95, 1.74, 1.94, 2.16, 2.36, 2.57, 2.35, 2.56, 2.14, 2.33, 2.97, 2.54, 2.93, 2.94, 2.94, 2.92, 3.54, 3.96, 3.52, 3.51, 3.93, 3.92, 3.92\}$ (cm) جمعیت برای سازه خرابایی ۱۶۰ میله ای ۱۰۰ تنظیم شده است. در فرآیند بهینه سازی، حداکثر تعداد تکرار ۵۰۰ انتخاب می شود. نتایج حاصل از طراحی بهینه گسسته برای این مثال در جدول (۱۰) ارائه گردیده است. نتایج ارائه شده بیانگر موثر بودن الگوریتم جستجوی نسبت خاص نسبت به سایر روشها می باشد. نمودار همگرایی در شکل (۶) ترسیم شده است.

جدول ۷ مختصات گره ای سازه ۱۶۰ عضوی

گره.	مختصات-X	مختصات-Y	مختصات-Z	گره.	مختصات-X	مختصات-Y	مختصات-Z
1	-105	-105	0	27	40	-40	1027.5
2	105	-105	2000	28	214	0	1027.5
3	105	105	0	29	40	40	1027.5
4	-105	105	0	30	-40	40	1027.5
5	-93.929	-93.929	175	31	-40	-40	1105.5
6	93.929	-93.929	175	32	40	-40	1105.5
7	93.929	93.929	175	33	40	40	1105.5
8	-93.929	93.929	175	34	-40	40	1105.5
9	-82.859	-82.859	350	35	-40	-40	1256.5
10	82.859	-82.859	350	36	40	-40	1256.5
11	82.859	82.859	350	37	-207	0	1256.5
12	-82.859	82.859	350	38	40	40	1256.5
13	-71.156	-71.156	535	39	-40	40	1256.5
14	71.156	-71.156	535	40	-40	-40	1346.5
15	71.156	71.156	535	41	40	-40	1346.5
16	-71.156	71.156	535	42	40	40	1346.5
17	-60.085	-60.085	710	43	-40	40	1346.5
18	60.085	-60.085	710	44	-26.592	-26.592	1436.5
19	60.085	60.085	710	45	26.592	-26.592	1436.5
20	-60.085	60.085	710	46	26.592	26.592	1436.5
21	-49.805	-49.805	872.5	47	-26.592	26.592	1436.5
22	49.805	-49.805	872.5	48	-12.737	-12.737	1526.5
23	49.805	49.805	872.5	49	12.737	-12.737	1526.5
24	-49.805	49.805	872.5	50	12.737	12.737	1526.5
25	-214	0	1027.5	51	-12.737	12.737	1526.5
26	-40	-40	1027.5	52	0	0	1615

جدول ۸ شماره گذاری گره‌های سازه ۱۶۰ عضوی

شماره المان	گره		A_i	شماره المان	گره		A_i	شماره المان	گره		A_i	شماره المان	گره		A_i
	1	2			1	2			1	2			1	2	
1	1	5	1	41	13	18	8	81	25	31	17	121	36	40	29
2	2	6	1	42	14	17	8	82	28	32	17	122	38	41	29
3	3	7	1	43	14	19	8	83	28	33	17	123	39	42	29
4	4	8	1	44	15	18	8	84	25	34	17	124	35	43	29
5	1	6	2	45	15	20	8	85	26	31	18	125	40	41	30
6	2	5	2	46	16	19	8	86	27	32	18	126	41	42	30
7	2	7	2	47	16	17	8	87	29	33	18	127	42	43	30
8	3	6	2	48	13	20	8	88	30	34	18	128	43	40	30
9	3	8	2	49	17	21	9	89	26	32	19	129	35	36	31
10	4	7	2	50	18	22	9	90	27	31	19	130	36	38	31
11	4	5	2	51	19	23	9	91	29	34	19	131	38	39	31
12	1	8	2	52	20	24	9	92	30	33	19	132	39	35	31
13	5	9	3	53	17	22	10	93	27	33	20	133	40	44	32
14	6	10	3	54	18	21	10	94	29	32	20	134	41	45	32
15	7	11	3	57	19	24	10	95	30	31	20	135	42	46	32
16	8	12	3	58	20	23	10	96	26	34	20	136	43	47	32
17	5	10	4	55	18	23	11	97	26	29	21	137	40	45	33
18	6	9	4	56	19	22	11	98	27	30	21	138	41	46	33
19	6	11	4	59	20	21	11	99	31	35	22	139	42	47	33
20	7	10	4	60	17	24	11	100	32	36	22	140	43	44	33
21	7	12	4	61	21	26	12	101	33	38	22	141	44	45	34
22	8	11	4	62	22	27	12	102	34	39	22	142	45	46	34
23	8	9	4	63	23	29	12	103	33	39	23	143	46	47	34
24	5	12	4	64	24	30	12	104	32	35	23	144	44	47	34
25	9	13	5	65	21	27	13	105	31	36	23	145	44	48	35
26	10	14	5	66	22	26	13	106	34	38	23	146	45	49	35
27	11	15	5	67	23	30	13	107	32	38	24	147	46	50	35
28	12	16	5	68	24	29	13	108	33	36	24	148	47	51	35
29	9	14	6	69	22	29	14	109	34	35	24	149	45	48	36
30	10	13	6	70	23	27	14	110	31	39	24	150	46	49	36
31	10	15	6	71	24	26	14	111	37	35	25	151	47	50	36
32	11	14	6	72	21	30	14	112	37	39	25	152	44	51	36
33	11	16	6	73	26	27	15	113	37	40	26	153	48	49	37
34	12	15	6	74	27	29	15	114	37	43	26	154	49	50	37
35	12	13	6	75	29	30	15	115	35	40	27	155	50	51	37
36	9	16	6	76	30	26	15	116	36	41	27	156	48	51	37
37	13	17	7	77	25	26	16	117	38	42	27	157	48	52	38
38	14	18	7	78	27	28	16	118	39	43	27	158	49	52	38
39	15	19	7	79	25	30	16	119	35	38	28	159	50	52	38
40	16	20	7	80	29	28	16	120	36	39	28	160	51	52	38

جدول ۹ ترکیبات بارگذاری سازه ۱۶۰ عضوی

گره	ترکیبات بارگذاری	P_x (N)	P_y (N)	P_z (N)	گره	ترکیبات بارگذاری	P_x (N)	P_y (N)	P_z (N)
52	1	-868	0	-491	52	5	-917	0	-491
37		-996	0	-546	37		-951	0	-546
25		-1091	0	-546	25		-1015	0	-546
28		-1091	0	-546	28		-636	1259	-428
52	2	-493	1245	-363	52	6	-917	0	-491
37		-996	0	-546	37		-572	1303	-428
25		-1091	0	-546	25		-1015	0	-546
28		-1091	0	-546	28		-1015	0	-546
52	3	-917	0	-491	52	7	-917	0	-491
37		-951	0	-546	37		-951	0	-546
25		-1015	0	-546	25		-1015	0	-546
28		-1015	0	-546	28		-636	1303	-428
52	4	-917	0	-546	52	8	-498	1460	-363
37		-572	1259	-428	37		-951	0	-546
25		-1015	0	-546	25		-1015	0	-546
28		-1015	0	-546	28		-1015	0	-546

جدول ۱۰ نتایج طراحی بهینه سازه ۱۶۰ عضوی

متغیرهای طراحی (cm^2)	SDR [35]	RGA [36]	RBAS [37]	aeDE [38]	EFA [39]	mSOS [40]	SRS
A_1	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03
A_2	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
A_3	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03
A_4	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
A_5	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03
A_6	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
A_7	17.03	15.39	15.39	15.39	15.39	15.39	15.39
A_8	6.25	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
A_9	13.79	13.79	13.79	13.79	13.79	13.79	13.79
A_{10}	6.25	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
A_{11}	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
A_{12}	12.21	13.79	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21
A_{13}	6.84	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
A_{14}	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
A_{15}	2.66	2.66	3.47	3.88	3.88	3.88	3.88
A_{16}	7.44	7.44	7.44	7.44	7.44	7.44	7.44
A_{17}	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
A_{18}	8.66	8.66	9.40	8.66	8.66	8.66	8.66
A_{19}	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66
A_{20}	3.07	3.07	3.47	3.07	3.07	3.07	3.88
A_{21}	2.66	2.66	3.07	2.66	2.66	2.66	2.66
A_{22}	8.06	8.06	8.06	8.06	8.06	8.06	8.06
A_{23}	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
A_{24}	7.44	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25

ادامه جدول ۱۰ نتایج طراحی بهینه سازه ۱۶۰ عضویی

متغیرهای طراحی (cm^2)	SDR [35]	RGA [36]	RBAS [37]	aeDE [38]	EFA [39]	mSOS [40]	SRS
A ₂₅	6.25	5.75	5.75	5.75	6.25	5.75	5.75
A ₂₆	1.84	1.84	2.26	2.26	2.26	2.26	1.84
A ₂₇	4.79	4.79	4.79	4.79	4.79	4.79	4.79
A ₂₈	2.66	2.66	3.07	2.66	2.66	2.66	3.07
A ₂₉	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47
A ₃₀	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
A ₃₁	2.26	2.26	3.88	2.26	2.26	2.26	2.26
A ₃₂	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88
A ₃₃	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
A ₃₄	1.84	1.84	2.26	1.84	1.84	1.84	1.84
A ₃₅	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88
A ₃₆	1.84	1.84	2.26	1.84	1.84	1.84	1.84
A ₃₇	1.84	1.84	3.47	1.84	1.84	1.84	1.84
A ₃₈	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88
وزن بهینه (lb)	1359.781	1337.442	1348.905	1336.634	1336.704	1336.634	1336.3502
وزن میانگین (lb)	-	-	1367.5275	1355.875	1372.551	1338.245	1338.3399
بدترین وزن (lb)	-	-	1401.6323	1410.611	-	-	1345.4180
انحراف معیار (lb)	-	-	-	18.805	34.706	10.49	2.7087
تعداد آنالیز	-	-	90000	23925	16870	24000	60800

نتیجه‌گیری

جدید نیازمند بازنگری و توسعه می‌باشند. در این تحقیق از الگوریتم گرادیان نزولی به منظور افزایش دقت جستجوی محلی استفاده گردید. عملکرد الگوریتم گرادیان نزولی به مقادیر ضرایب مختلف وابسته است. به همین منظور یک آنالیز حساسیت برای انتخاب بهترین ضریب توسعه داده شد. در پایان به منظور اثبات موثر بودن روش پیشنهادی تعدادی از مسائل مهندسی سازه بهینه سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که این روش نسبت به سایر روشهای گذشته عملکرد موثرتری دارد. لازم به ذکر است که با استفاده از این الگوریتم می‌توان طیف جدید از مسائل را در آینده بهینه سازی نمود.

سپاسگزاری

در این تحقیق یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی تحت عنوان جستجوی نسبیت خاص برای طراحی بهینه سازه توسعه داده شد. الگوریتم جستجوی نسبیت خاص یک الگوریتم فراکاوشی تک هدفه و مبتنی بر جمعیت می‌باشد که با الهام از اندرکنش ذرات در یک میدان مغناطیس توانسته یک الگوریتم بهینه توسعه دهد. معادلات ریاضی استفاده شده در این الگوریتم برای اولین بار به صورت کاربردی بر مبنای تئوری فیزیک نسبیت خاص توسعه داده شده اند. به دلیل کاربرد موثر این الگوریتم در دو سال گذشته تا کنون به طور وسیعی برای حل مسائل مختلف علوم در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. اما با توجه به پیشینه الگوریتم‌های فراکاوشی این دسته از الگوریتم‌ها در بهینه سازی همه مسائل ناتوان هستند. از این رو برای حل یک مسئله

مراجع

- [1] V. Goodarzimehr, S. Shojaee, S. Talatahari, and S. Hamzehei-Javaran, "Generalized displacement control analysis and optimal design of geometrically nonlinear space structures," *International Journal of Computational Methods*, vol. 20, no. 7, p. 2143018, 2023. <https://doi.org/10.1142/S0219876221430180>.

- [2] P. Martinez, P. Marti, and O. Querin, "Growth method for size, topology, and geometry optimization of truss structures," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 33, no. 1, pp. 13–26, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0043-9>.
- [3] A. Kaveh, P. Rahmani, and A. D. Eslamlou, "An efficient hybrid approach based on Harris Hawks optimization and imperialist competitive algorithm for structural optimization," *Engineering with Computers*, vol. 38, pp. 1555–1583, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01258-7>.
- [4] V. Goodarzimehr, S. Talatahari, S. Shojaee, and A. H. Gandomi, "Computer-aided dynamic structural optimization using an advanced swarm algorithm," *Engineering Structures*, vol. 300, p. 117174, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117174>.
- [5] V. Goodarzimehr, U. Topal, A. K. Das, and T. Vo-Duy, "SABO algorithm for optimum design of truss structures with multiple frequency constraints," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 52, no. 10, pp. 7745–7777, 2024. <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2308652>.
- [6] A. Dehghani, V. Goodarzimehr, S. Shojaee, and S. Hamzehei Javaran, "Modified adolescent identity search algorithm for optimization of steel skeletal frame structures," *Scientia Iranica*, 2023. <https://doi.org/10.24200/sci.2023.60555.6868>.
- [7] A. Dehghani, S. Hamzehei Javaran, S. Shojaee, and V. Goodarzimehr, "Optimal analysis and design of large-scale problems using a Modified Adolescent Identity Search Algorithm," *Soft Computing*, vol. 28, pp. 9405–9432, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-09689-w>.
- [8] T. Dong, S. Chen, H. Huang, C. Han, Z. Dai, and Z. Yang, "Large-scale truss topology and sizing optimization by an improved genetic algorithm with multipoint approximation," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, p. 407, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12010407>.
- [9] A. Javidi, E. Salajegheh, and J. Salajegheh, "Optimization of weight and collapse energy of space structures using the multi-objective modified crow search algorithm," *Engineering with Computers*, vol. 38, pp. 2879–2896, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01276-5>.
- [10] V. Goodarzimehr and F. Salajegheh, "Optimal design of tall steel moment frames using special relativity search algorithm," *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 61–81, 2024. <https://doi.org/10.22068/ijoc.2024.14.1.575>.
- [11] V. Goodarzimehr, U. Topal, T. Vo-Duy, and S. Shojaee, "Improved chaos game optimization algorithm for optimal frequency prediction of variable stiffness curvilinear composite plate," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 42, no. 19–20, pp. 1054–1066, 2023. <https://doi.org/10.1177/07316844221145642>.
- [12] A. Amiri, P. Torkzadeh, and E. Salajegheh, "A new improved Newton metaheuristic algorithm for solving mathematical and structural optimization problems," *Evolutionary Intelligence*, vol. 17, pp. 2749–2789, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12065-024-00911-0>.
- [13] M. Dastan, V. Goodarzimehr, S. Shojaee, et al., "Optimal design of planar steel frames using the hybrid teaching–learning and charged system search algorithm," *Iran Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 3357–3373, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01124-8>.

- [14] V. Goodarzimehr, S. Shojaee, S. Hamzehei-Javaran, and S. Talatahari, "Special relativity search: A novel metaheuristic method based on special relativity physics," *Knowledge-Based Systems*, vol. 257, p. 109484, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2022.109484>.
- [15] V. Goodarzimehr, S. Talatahari, S. Shojaee, and S. Hamzehei-Javaran, "Special relativity search for applied mechanics and engineering," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 403, p. 115734, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115734>.
- [16] O.K. Erol and I. Eksin, "A new optimization method: Big bang–big crunch," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 2, pp. 106–111, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.04.005>.
- [17] F.A. Hashim, E.H. Houssein, M.S. Mabrouk, et al., "Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm," *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, pp. 646–667, 2019.
- [18] A. Kaveh and A. Dadras Eslamlou, "Water strider algorithm: A new metaheuristic and applications," *Structures*, vol. 25, pp. 520–541, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.033>.
- [19] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A.A. Ewees, M.A.A. Al-qaness, and A.H. Gandomi, "Aquila optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 157, p. 107250, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250>.
- [20] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, and S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 191, p. 105190, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.105190>.
- [21] S.J. Wu and P.T. Chow, "Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses," *Computers & Structures*, vol. 56, pp. 979–991, 1995. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(94\)00551-D](https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)00551-D).
- [22] L.J. Li, Z.B. Huang, and F. Liu, "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables," *Computers & Structures*, vol. 87, pp. 435–443, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.01.004>.
- [23] K.S. Lee, Z.W. Geem, S.H. Lee, and K.W. Bae, "The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization," *Engineering Optimization*, vol. 37, no. 7, pp. 663–684, 2005. <https://doi.org/10.1080/03052150500211895>.
- [24] A. Kaveh and S. Talatahari, "A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 1558–1568, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.04.021>.
- [25] P.V.S.Z. Capriles, L.G. Fonseca, H.J.C. Barbosa, and A.C.C. Lemonge, "Rank-based ant colony algorithms for truss weight minimization with discrete variables," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, pp. 553–575, 2007. <https://doi.org/10.1002/cnm.912>.
- [26] A. Sadollah, A. Bahreininejad, H. Eskandar, and M. Hamdi, "Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables," *Computers & Structures*, vol. 102–103, pp. 49–63, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.03.013>.
- [27] A. Kaveh and M.I. Ghazaan, "A comparative study of CBO and ECBO for optimal design of skeletal structures," *Computers & Structures*, vol. 153, pp. 137–147, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.02.028>.
- [28] M.H. Talebpour, A. Kaveh, and V.R. Kalatjari, "Optimization of skeletal structures using a hybridized ant colony-harmony search-genetic algorithm," *Iran Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*,

- vol. 38, pp. 1–20, 2014.
- [29] R.E. Perez and K. Behdinan, "Particle swarm approach for structural design optimization," *Computers & Structures*, vol. 85, pp. 1579–1588, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.10.013>.
- [30] C.V. Camp, "Design of space trusses using big bang-big crunch optimization," *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, pp. 999–1008, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:7\(999\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:7(999)).
- [31] S.O. Degertekin, "Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures," *Computers & Structures*, vol. 92–93, pp. 229–241, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.10.022>.
- [32] T.H. Kim and J.I. Byun, "Truss sizing optimization with a diversity-enhanced cyclic neighborhood network topology particle swarm optimizer," *Mathematics*, vol. 8, no. 7, p. 1087, 2020. <https://doi.org/10.3390/math8071087>.
- [33] S.O. Degertekin, L. Lamberti, and M.S. Hayalioglu, "Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 3, pp. 373–397, 2017. <https://doi.org/10.1590/1679-78253297>.
- [34] M. Jafari, E. Salajegheh, and J. Salajegheh, "An efficient hybrid of elephant herding optimization and cultural algorithm for optimal design of trusses," *Engineering Computations*, vol. 35, pp. 781–801, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0631-5>.
- [35] A.A. Groenwold and N. Stander, "Optimal discrete sizing of truss structures subject to buckling constraints," *Structural Optimization*, vol. 14, pp. 71–80, 1997. <https://doi.org/10.1007/BF01812508>.
- [36] A.A. Groenwold, N. Stander, and J.A. Snyman, "A regional genetic algorithm for the discrete optimal design of truss structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 44, pp. 749–766, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990228\)44:6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990228)44:6).
- [37] P.V.S.Z. Capriles, L.G. Fonseca, H.J.C. Barbosa, and A.C.C. Lemonge, "Rank-based ant colony algorithms for truss weight minimization with discrete variables," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, pp. 553–575, 2007. <https://doi.org/10.1002/cnm.912>.
- [38] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Vo-Duy, T. Nguyen-Trang, "An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables," *Computers and Structures*, vol. 165, pp. 59–75, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.11.014>.
- [39] D.T. Le, D.K. Bui, T.D. Ngo, Q.H. Nguyen, H. Nguyen-Xuan, "A novel hybrid method combining electromagnetism-like mechanism and firefly algorithms for constrained design optimization of discrete truss structures," *Computers and Structures*, vol. 212, pp. 20–42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.017>.
- [40] D.T. Do, J. Lee, "A modified symbiotic organisms search (mSOS) algorithm for optimization of pin-jointed structures," *Applied Soft Computing*, vol. 61, pp. 683–699, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.08.002>.
- [41] A. Esmaili Aghdam and R. Imani Kalesar Hoshy, "Determination of optimal position of cables in guyed masts by using meta-heuristic algorithms," *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 93–107, 2024. <https://doi.org/10.22067/jfcej.2024.75849.1131>.
- [42] A. Banaei, J. Alamiyany, and R. Zia Toohidi, "Investigation of the effect of weighting coefficients in the objective function on the performance of genetic algorithm in active structural control," *Ferdowsi Journal of Civil*

- Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 1–20, 2023. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.77364.1159>.
- [43] A. Banaei and J. Alamatyian, “Multi-objective Function Minimization Using an Improved Genetic Algorithm for Active Vibration Control of Structures,” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 21–40, 2018. <https://doi.org/10.22067/civil.v31i4.61547>.
- [44] F. Omidinasab, V. Goodarzimehr, H. Babaali, and A. Dalvand, “Investigating barriers and problems affecting the standardization of industrial construction materials of Lorestan Province (with an emphasis on concrete and concrete’s aggregates),” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 67–80, 2020. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2021.68601.1017>.
- [45] M. Akbarzadeh and B. Ahmadi Nadooshan, “Improvement of Pareto Front in Multi-objective Topology Optimization with Non-uniform Polygonal Elements,” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 89–102, 2018. <https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.57563>.
- [46] M. Jahangiri and B. Ahmadi Nadooshan, “Damage Identification in Structures Using Multi-objective Evolutionary Optimization Algorithms MOPSO and MOEA/D,” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 63–78, 2017. <https://doi.org/10.22067/civil.v1i30.53204>.
- [47] V. Goodarzimehr, U. Topal, and M. Bohlooly Fotovat, “Optimal frequency of stiffened piezolaminated composite plates implementing a hybrid special relativity search and hill climbing optimization algorithm,” *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 10, 2024. <https://doi.org/10.22055/jacm.2024.47914.4837>
- [48] V. Goodarzimehr, U. Topal, M. Bohlooly Fotovat, “A novel approach for buckling optimization of stiffened piezolaminated composite plates,” *Journal of Composite Materials*, vol. 58, no. 28, pp. 2975–2991, 2024. <https://doi.org/10.1177/00219983241288569>.
- [49] V. Goodarzimehr, M. Fazli, N. Fanaie, Amir H. Gandomi, “Enhanced Special Relativity Search Algorithm-Based Lorentz Force for Structural Optimization,” *International Journal of Computational Methods*, p. 2450064, 2024. <https://doi.org/10.1142/S0219876224500646>.
- [50] M. J Ketabdari and S. Mohtaram, “Optimization of Braced Frames under Spectral Dynamic Load Using Migratory Genetic Algorithm,” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 1–16, 2010. <https://doi.org/10.22067/civil.v22i1.8370>.
- [51] M. Daei, S. Tamjidzadeh, and S. H. Mir Mohammadi, “Formation of Sparse Null Bases for Optimal Force Method Analysis Using Charged System Search Algorithm,” *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 75–84, 2015. <https://doi.org/10.22067/civil.v27i2.33680>



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Thematic Analysis of Construction Disputes, Their Causes and Prevention Resolution in the Design-Build Project Delivery System*

Research Article

Mostafa Bodaghi¹, Majid Parchamijalal² , Ali Mohaghar³, Esmatullah Noorzai⁴

DOI: [10.22067/jfcee.2025.91033.1333](https://doi.org/10.22067/jfcee.2025.91033.1333)

1- Introduction

The construction industry, as one of the most important parts of the global economy, plays a key role in economic development, especially in developing countries. However, this industry constantly faces numerous challenges such as endless disputes, low productivity, and poor information and communication management. Multiple disputes in construction projects not only reduce project efficiency but also hinder the achievement of project goals. These conflicts can lead to strained relationships, project delays, increased costs, and ultimately, reduced quality and unsuccessful project completion. Therefore, investigating the root causes of disputes and developing strategies to prevent them is of great importance.

This research aims to identify the causes of disputes in design-build projects and propose preventive measures. To achieve this goal, a qualitative research method using thematic analysis was employed. The design-build system, as one of the project delivery methods, has a relatively short history in Iran and faces unique challenges. Thus, this study seeks to answer the question: What factors cause disputes in design-build projects, and how can these disputes be prevented?

2-Research Methodology:

This study used a qualitative research approach with thematic analysis to examine and analyze data. In the first step, a collection of causes of disputes in the construction industry was gathered through a review of numerous articles. In the second step, semi-structured interviews with experts in claim and contract management were

conducted to identify and differentiate the most significant disputes and their causes. In the third step, a matrix questionnaire was used to assess the impact of each cause on the occurrence of the aforementioned disputes, and the relationship between disputes and their causes was specified. In the fourth step, additional semi-structured interviews were conducted to identify practical ways to prevent disputes in design-build projects. Finally, in the fifth step, the validity and reliability of the results were verified using three different methods (negative case analysis, member checking, and external audit).

3- Results and Findings:

In this study, 71 primary causes of disputes were identified and categorized based on the relationships among the four key stakeholders in design-build projects (client, contractor, client's consultant, and contractor's consultant). These causes were refined into 11 main disputes and 22 causes for their occurrence. The 11 main disputes identified are:

1. Deficiencies in initial studies and errors in the Request for Proposal (RFP) documents, along with a lack of proper understanding of the client's requirements.
2. Delays in approving and issuing drawings, work orders, and meeting minutes.
3. Disagreements over excusable and non-excusable delays by the contractor.
4. Disagreements over delay costs in the project.
5. Insufficient payments to the contractor.
6. Ambiguous and interpretable contract terms.

*Manuscript received December 1, 2024, Revised December 31, 2024, Accepted March 3, 2025.

¹ Ph.D. Student Department of project and construction management, University of Tehran.

Email: mostafabodaghi@ut.ac.ir

² Corresponding author. Associate Professor, Department of project and construction management, University of Tehran.

Email: parchamijalal@ut.ac.ir

³ Professor, Department of industry management, faculty of management, university of Tehran, Tehran, Iran.

Email: amohaghar@ut.ac.ir

⁴ Department of industry management, faculty of management, university of Tehran, Tehran, Iran

Email: noorzai@ut.ac.ir

7. Delays in delivering materials, facilities, and equipment that are the client's responsibility.
8. Disagreements over the valuation of new work items.
9. Defective construction.
10. Excessive change orders from the client.
11. Changes in the client's consultant or key decision-makers.

Alongside these disputes, 22 causes of disputes were identified, some of the most important being "weak client management and leadership," "weak client consultant in understanding client needs, preparing the RFP, and drafting clear contracts," "lack of agreed-upon bases for progress calculations, controls, and delays," and "conflicts of interest and opportunistic behavior due to lack of transparency."

Additionally, the relationships between the 11 disputes and the 22 causes were illustrated through diagrams and charts, which significantly aided in identifying preventive measures. In the final stage, through further interviews with experts, strategies to prevent these disputes were detailed, stemming from the root causes of each dispute. In total, 29 practical strategies were identified, categorized according to the project's progress stages. Examples include:

- Determining the location and amount of financial resources during the pre-approval phase.
- Selecting a professional client consultant after project approval.
- Drafting clear and unambiguous contracts during the agreement with the design-build company.
- Holding high-level management meetings during the occurrence of managerial challenges.
- Implementing phased project delivery during project execution.

It is worth noting that each of these strategies, presented in a timeline table, has prerequisites. For example, "detailed planning and setting project milestones are prerequisites for phased project delivery," and "good faith and a win-win approach are prerequisites for holding high-level management meetings to resolve managerial challenges."

4-Conclusion:

This research provides a comprehensive examination of disputes, their root causes, and preventive measures in design-build projects in Iran. While some causes of disputes, such as excessive changes or lack of financial resources, are common across all types of projects, some disputes and their causes are unique to the design-build project delivery system. This highlights the importance of further research in other project delivery systems within Iran's construction industry.

The findings of this study can assist project managers, clients, contractors, and consultants in reducing the likelihood of disputes by identifying their root causes and implementing the proposed strategies. These strategies not only improve project management but also foster more collaborative relationships among stakeholders.



واکاوی دعاوی ساخت، علل و راهکارهای پیشگیری از آنها در سیستم طرح و ساخت با روش تحلیل مضمون*

مقاله پژوهشی

مصطفی بدآقی^(۱) مجید پرچمی جلال^(۲) علی محقر^(۳) عصمت‌الله نورزایی^(۴)

DOI: 10.22067/ijfeci.2025.91033.1333

چکیده ادعاها و دعاوی امروزه تأثیر زیادی در کاهش کارایی پروژه‌های صنعت ساخت دارند. از آنجائیکه هر یک از سیستم‌های انجام پروژه روابط منحصر به فردی دارند و مسئولیت‌های ذی‌نفعان نیز حول این روابط شکل می‌گیرد، ادعاها، دلایل و راهکارهای پیشگیری از آنها نیز در انواع سیستم تحویل پروژه متفاوت خواهد بود. در این پژوهش با هدف دستیابی به راهکارهای پیشگیری از بروز دعاوی در پروژه‌های طرح و ساخت، ابتدا ۷۱ مورد از مهمترین دلایل بروز دعاوی در این پروژه‌ها را شناسایی کردیم و بر اساس روابط میان ذی‌نفعان طبقه‌بندی کردیم. سپس ۱۱ دعاوی اصلی را از ۲۲ دلیل بروز آنها تفکیک نموده و ارتباط میان آنها را نشان دادیم. در ادامه با کمک مصاحبه‌های باز و تحلیل مضمون نظر خبرگان، راهکارهایی برای پیشگیری از بروز دعاوی به تفکیک هر ادعا بیان کردیم و در جمع‌بندی ۲۹ راهکار عملی را به ترتیب زمان اعمال در پروژه، به عنوان دستورالعملی کاربردی ارائه دادیم.

واژه‌های کلیدی مدیریت دعاوی، ادعا، علل بروز دعاوی، مدیریت پروژه و ساخت، تحلیل مضمون.

Thematic Analysis of Construction Disputes, Their Causes And Prevention resolution In The Design-Build Project Delivery System

Mostafa Bodaghi

Majid Parchami Jalal

Ali Mohaghar

Esmatullah Noorzai

Abstract Today, claims and disputes have a great impact on reducing the efficiency of construction industry projects. Because each of project delivery system has unique relationships among stakeholders and the responsibilities of them are also formed by these relationships, claims and disputes, causes of claims and disputes, and solutions to prevent of them are also different in each of PDSs. In this research, with the aim of achieving solutions to prevent claims in design-build projects, we first identified 71 of the most important causes of claims and then classified them based on the relationships between stakeholders. After that, we separated 11 main claims from 22 reasons for their occurrence and showed the relationship between them. Then, by interviews and content analysis of experts' opinions, we presented solutions to prevent claims separately for each claim and, in conclusion, presented 29 practical solutions in order to application time in the project as a practical guideline.

Key Words Claim Management, Disputes, Causes Of Disputes, Project and Construction Management, Thematic Analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۹/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران.

(۳) استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران.

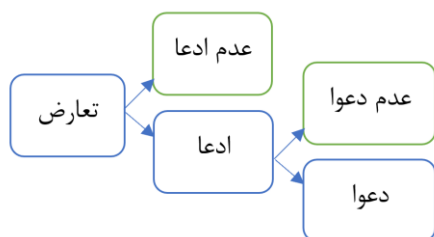
(۴) استاد مدعو گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران.

پروژه‌های طرح و ساخت بر اساس کانال‌های ارتباطی میان ذینفعان و تفکیک دعاوی از دلایل بروز آن (که در بسیاری از تحقیقات مرز مشخصی ندارند)، به دنبال تعیین ارتباط میان آنها بوده؛ و در نهایت با استفاده از نظر خبرگان این موضوع، راهکارهایی برای کاهش احتمال بروز دعاوی در قراردادهای طرح و ساخت با روش تحلیل مضمون ارائه خواهیم کرد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

تعاریف و مفاهیم حقوقی

در رابطه با مفاهیم مرتبط با مدیریت ادعا تعاریف گوناگونی در مقالات بیان شده است. تعارض (Conflict)، ادعا (Claim) و اختلاف (Dispute) یا همان دعا اصطلاحات متمایزی هستند [16]، بطوریکه طبق نظر ناجی (Naji) و همکارانش، تعارض ناشی از دیدگاه‌های مختلف است، ادعاها به دنبال غرامت هستند و اختلافات ناشی از ادعاهای رد شده‌اند [17]. همچنین آموآ (Amoah) و انکوسازانا (Nkosazana) تعارض را ناشی از وجود ایده‌های مخالف و ادعا را اعتقاد به حق دانسته و می‌گویند اختلاف زمانی رخ می‌دهد که طرفین نتوانند یک ادعا را پیش از مراحل حقوقی حل کنند [18]. شهباز نژاد فرد و یوسفی نیز تعارض را ناسازگاری تعاملی بین رفتارها یا اهداف ذینفعان تعریف می‌کنند [19]. از سوی دیگر ادعا، درخواست غرامت یا جبران خسارتی، از قبیل تمدید زمان و افزایش هزینه در قراردادهای ساختمانی به دلیل نقض قرارداد است، که در صورت عدم پذیرش توسط طرف مقابل منجر به اختلافات و دعاوی می‌شود [17]. در صورت عدم حل و فصل ادعاهای بوجود آمده در پروژه، می‌توانند تبدیل به اختلاف شوند [20]. اختلاف زمانی است که یک طرف ادعای دیگری را بدون پذیرش رد کند، که اغلب نیاز به دخالت شخص ثالث دارد و بر کیفیت رابطه در پروژه‌های ساختمانی تأثیر می‌گذارد [21]. شکل (۱) توالی سه مفهوم حقوقی گفته شده را نشان می‌دهد.



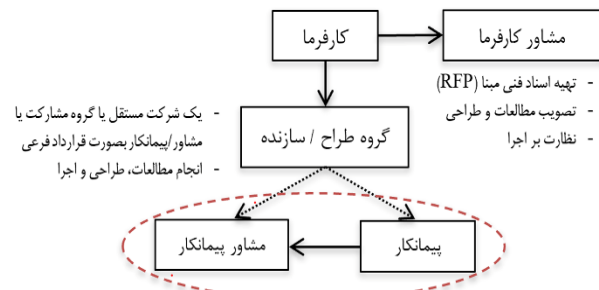
شکل ۱ روابط میان تعارض، ادعا و دعاوی

مقدمه

صنعت ساخت و ساز یکی از مهمترین بخش‌های اقتصاد جهانی است که نقش مهمی در توسعه اقتصادی، به خصوص در کشورهای در حال توسعه ایفا کرده [1] و همواره با چالش‌های متعددی مانند دعاوی بی‌پایان، بهره‌وری پایین و سوء مدیریت اطلاعات و ارتباطات مواجه است [2]. وجود دعاوی متعدد در پروژه‌های صنعت ساخت سبب کاهش کارایی شده و دستیابی به اهداف پروژه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد [3]. اختلافات می‌توانند منجر به ایجاد روابط پرتنش و غیردوستانه [4]، تأخیر در پروژه و زمان‌بندی فعالیت‌ها [5] و توقف احتمالی کار [6] شده، و با افزایش هزینه‌های پروژه، منجر به کاهش کیفیت و تکمیل ناموفق پروژه گردند [7]. لذا بررسی دعاوی پروژه‌های صنعت ساخت برای درک علل ریشه‌ای آن [3] و توسعه استراتژی‌های بهبود مدیریت قرارداد (Contract Management) ها برای کاهش آن ضروری است [8]. درک علل و سلسله مراتب درگیری‌ها، ادعاها و اختلافات می‌تواند منجر پیشگیری، کاهش و حل راحت‌تر دعاوی گردد [9].

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه دعاوی و راه‌های حل و فصل آن انجام شده است. برخی از آنها به دنبال راه‌های بهبود فرایند پاسخگویی به دعاوی بوده [10]، برخی به دنبال فرصت‌های نوین برای حل اختلاف [11] و برخی نیز با کمک فناوری‌های به‌روزی همانند BIM (Building Information Modeling) به دنبال کاهش دعاوی بوده‌اند [12]. برخی نیز سعی در جایگزینی مذاکره (Negotiation) به جای حل و فصل‌های زمان و هزینه‌بر دادگاهی داشته‌اند [13,14]. با همه این موارد کماکان پروژه‌ها دعاوی بسیاری داشته و پژوهش‌هایی نظیر تحقیق حاضر در رابطه با آن نیز ادامه دارند. باید توجه داشت که هر یک از سیستم‌های انجام پروژه (Project Delivery Systems) مسئولیت‌های متفاوتی را برای ذینفعان نسبت به سایر آنها داشته و در نتیجه چالش‌ها و دلایل متفاوتی برای بروز دعاوی می‌تواند داشته باشد؛ لذا تمرکز بر شرایط پیمان‌های طرح و ساخت در کنار کم‌تجربگی نسبی این سیستم در ایران از دلایل نیاز به تحقیق حاضر می‌باشد. بعلاوه اگر بپذیریم که شرایط کار و قوانین در جوامع و فرهنگ‌های مختلف متفاوت است [15]، نیاز به مطالعات این موضوع در فرهنگ، محیط و مقررات ایران دیده می‌شود. در این تحقیق ضمن طبقه‌بندی مهمترین دلایل بروز دعاوی در

(Cheung) نیز تخصیص نامتناسب مسئولیت و اختیار و درک نادرست روابط را از دلایل مهم دعوی می‌دانند [27]. از سوی دیگر دلایل بروز دعوی در پروژه‌های ساخت در جوامع مختلف بخصوص در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته متفاوت است [28]. اختلافات در کشورهای در حال توسعه ناشی از عواملی مانند خطاهای طراحی، قراردادهای نامشخص و نوسانات اقتصادی و ناسازگاری‌های قانونی است؛ و در پروژه‌های بین‌المللی شامل عواملی مانند تفسیر متفاوت از قرارداد، کیفیت ساخت و تفاوت‌های فرهنگی و زبانی است [29]. مهمترین دلایل بروز دعوی در عربستان تغییر نقشه‌ها و حجم کار، تأخیر در اجرا و خطاهای طراحی [15]، در نیجریه ارتباطات ضعیف و درک متفاوت ذینفعان [30]، در مالزی تنوع زبانی و فرهنگ [31]، در کویت تأخیر در تحویل مصالح [32] و در یمن ارتباطات ضعیف و برنامه‌ریزی‌های ناکارآمد [33] می‌باشد.



با دقت در این مطالعات درمی‌یابیم که در اغلب تحقیقات کلیه پروژه‌های صنعت ساخت مورد مطالعه بوده و کمتر بر روی دلایل دعاوی در یک نوع سیستم تحویل خاص از جمله روش طرح و ساخت تمرکز دارند. بعلاوه با توجه تأثیر محیط به تعداد محدودتری از مطالعات در محدوده ایران می‌رسیم و همچنین در اندک مطالعات خاص متمرکز در محدوده تحقیق گفته شده به راهکارهای کاربردی برای پیشگیری از بروز چنین ادعاهایی کمتر پرداخته شده است، لذا به نظر می‌رسد باید از ابعاد دیگری نیز تحقیقاتی در این زمینه انجام شود که این مقاله سعی کرده است این هدف را دنبال کند.

در مطالعات پیرامون دعاوی، دلایل مختلفی برای بروز آن عنوان شده است. در نگاهی اجمالی به نتایج این تحقیقات، تین دو (Tien Do) و همکارانش دستورات تغییر [26]، زیرگا (Zeberga) و همکارانش شرایط متفاوت سایت و مشکلات نقشه‌ها [9]، فهد (Fahad) و محمد (Mohamad) تأخیر در کار، تغییرات هزینه، موانع زبانی و ارتباطات ضعیف بین ذینفعان را مهم‌ترین عوامل بروز دعاوی می‌دانند [5]. ژو (Zhu) و جئونگ

این پژوهش از روش تحقیق کیفی با رویکرد تحلیل مضمون برای بررسی و تحلیل داده‌ها استفاده کرده است. بدین منظور در گام اول با بررسی مقالات داخلی و بین‌المللی، مجموعه‌ای از دلایل بروز دعوی در صنعت ساخت را جمع‌آوری نمودیم، در گام دوم با استفاده از مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته با خبرگان حوزه مدیریت ادعا و قراردادهای، مهمترین این دعوی و دلایل را شناسایی کرده و از یکدیگر تفکیک نمودیم. در گام سوم با کمک پرسشنامه‌ای ماتریسی میزان تأثیرگذاری هر یک از علل بروز دعوی در وقوع دعوی پیش‌گفته را بررسی کرده و در نتیجه

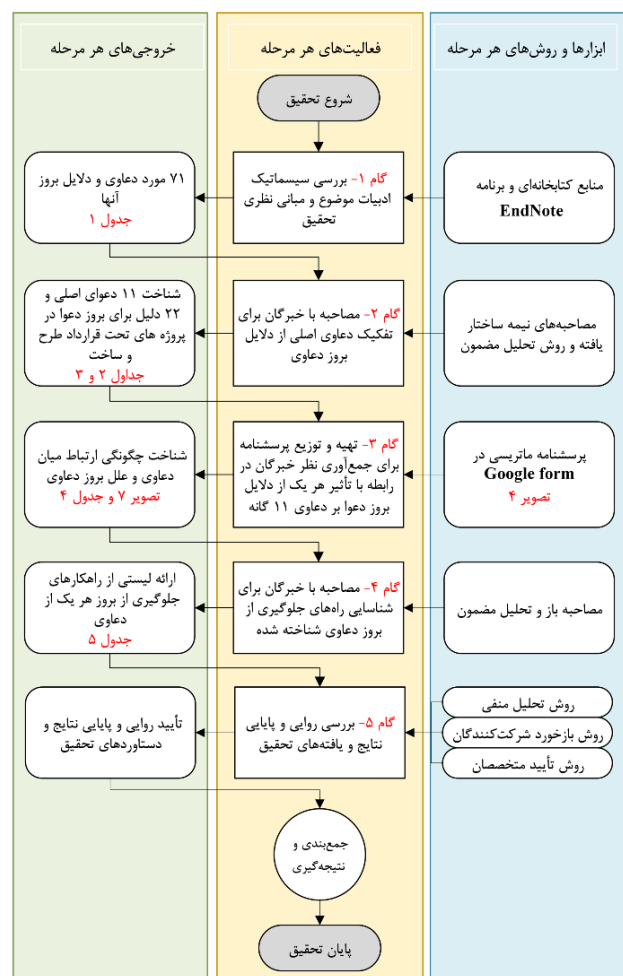
(Civilica) و (SID) (Scientific Information Database) پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی) به جستجوی کلیدواژه‌های ادعا، دعاوی و علل بروز دعاوی؛ و در پایگاه داده‌های بین‌المللی از قبیل Elsevier، ASCE، Emerald، MDPI، IEEE و Google scholar نیز به جستجوی کلید واژه‌های Claim و Dispute پرداختیم. در نتیجه این جستجوها ۴۲ سند مرتبط جهت مطالعه انتخاب و مطالب مورد نظر به فراخور نیاز از آنها استخراج گردید. در گام‌های بعدی نیز مصاحبه‌های باز و نیمه ساختار یافته و همچنین پرسشنامه کمی ماتریسی مطابق شکل (۴) در جای خود به گردآوری داده‌های میدانی مورد نیاز کمک نمودند.

جامعه هدف و نمونه آماری

جامعه هدف این تحقیق مدیران پروژه، رؤسای کارگاه و مدیران امور قراردادها و دعاوی شاغل در دفاتر مدیریت پروژه (PMO) (Project Management Office) و یا قائم مقام ایشان، در شرکت‌های پیمانکاری، مشاور و مدیریت طرح دارای پایه ۱ و ۲، شرکت‌های دارای صلاحیت طرح و ساخت و یا شاغل در شرکت‌ها و سازمان‌های دولتی کارفرمایی بودند (تذکر: طبق بخشنامه‌های سازمان برنامه و بودجه شرکت پیمانکار و مشاور پایه ۱ و ۲ می‌تواند در پروژه‌های با روش طرح و ساخت مشارکت نماید).

از جامعه تعریف شده ۲۱ نفر به صورت انتخاب هدفمند غیرتصادفی با شناخت از ویژگی‌ها و توانایی‌هایشان برای انجام مصاحبه‌های حضوری انتخاب شدند؛ چرا که پس از مصاحبه با ایشان به کفایت داده رسیدیم. گفتنی است در بخش پرسشنامه کمی، تعداد متخصصین و پرسشنامه‌های جمع‌آوری شده، با شیوه گلوله برفی و معرفی از طرف متخصصین پیش‌گفته به ۵۳ نفر رسید. در این شیوه برای شناخت بهتر متخصصین بیشتر از متخصصینی که در وهله اول شناسایی شده‌اند کمک گرفته می‌شود. در شکل (۵) اطلاعات جمعیت شناختی خبرگان نمایش داده شده است.

ارتباط میان دعاوی و دلایل بروز آنها را به تفکیک به دست آوردیم. در گام چهارم مجدداً از خبرگان حوزه دعاوی کمک گرفته و با انجام مصاحبه‌های نیم ساختاریافته راه‌های عملی جلوگیری از بروز دعاوی در پروژه‌های دو عاملی صنعت ساخت ایران را شناسایی کرده و در نهایت در گام پنجم روایی و پایایی نتایج به دست آمده را با سه روش متفاوت بررسی نمودیم. شکل (۳) مراحل گفته شده و فرایند انجام این تحقیق را نمایش می‌دهد. در این تصویر برای وضوح بیشتر در کنار فعالیت‌های هر مرحله، ابزارها و روش‌های مورد استفاده در آن مرحله در یک سو و خروجی‌های هر مرحله در سوی دیگر نشان داده شده است.



شکل ۳ فرایند انجام تحقیق

گردآوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌ها در پایگاه داده‌های داخلی سیویلیکا

شکل ۴ بخشی از پرسشنامه ماتریسی

شکل ۵ اطلاعات جمعیت شناختی شرکت کنندگان در پرسشنامه‌های پژوهش

A و علت ۲۷ "دستورات تغییر بیش از حد از سوی کارفرما" در کانال B اشاره نمود. از عللی که مربوط به دو کانال می باشد می توان به علت شماره ۴۲ "تأخیر در ابلاغ دستور کارها یا صورت جلسات توسط کارفرما" اشاره نمود که می تواند هم در کانال A و هم در کانال B وجود داشته باشد و همچنین از علل عمومی می توان از علت شماره ۶۴ یعنی "برگزاری ناکافی یا غیر مؤثر جلسات" نام برد، که می تواند در تک تک کانال ها موضوعیت داشته باشد..

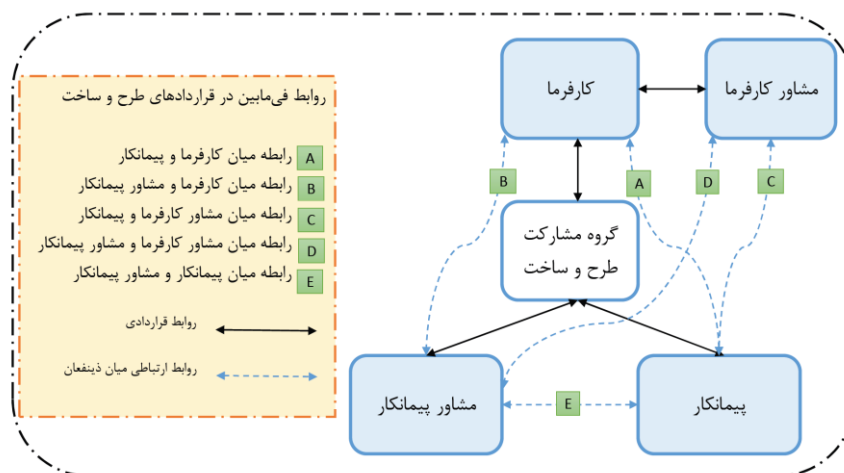
تفکیک دعاوی از علل بروز دعاوی

در این مرحله تلاش کردیم با کمک خبرگان به یک چالش متداول در بحث دعاوی پاسخ دهیم و آن تفکیک دعاوی از علل و ریشه های بروز آنها بود. بدین منظور به دنبال شناسایی آن بودیم که کدامیک از علل بروز دعاوی زمینه ساز یک علت دیگر و دعاوی اصلی بوده و خود به عنوان ادعا و خواسته اصلی مطرح نمی شود. بعلاوه با هدف کاربردی شدن مطلب، از تعدد دلایل کم کرده و مفاهیم همراستا را در قالب یک علت با ادبیات جامع تر بیان نمودیم. لذا با بررسی عمیق و مشورت خبرگان، نخست با تفکیک علل از دعاوی و سپس ادغام دعاوی مشابه و همچنین ادغام علل مشابه در همدیگر در نهایت دلایل ۷۱ گانه را در ۱۱ ادعای اصلی و ۲۲ علت و ریشه بروز آنها طبقه بندی نمودیم. جداول شماره (۲) و (۳) ماحصل این گام ها بوده اند که پس از جمع بندی به تأیید خبرگان نیز رسیده اند. در ادامه شرح مختصری از دعاوی ۱۱ گانه ارائه شده است.

به ارائه راهکارهای پیشنهادی خبرگان برای کاهش احتمال بروز دعاوی در پروژه های تحت قراردادهای طرح و ساخت مطابق جدول (۵) می پردازیم.

طبقه بندی دلایل بروز دعاوی بر اساس کانال های ارتباطی میان ذینفعان

در مطالعات قبلی دسته بندی های مختلفی برای علل بروز دعاوی ارائه شده است. گاه این دسته بندی ها بر اساس مفاهیم مدیریت پروژه نظیر علل قراردادی، استراتژیک، تغییرات، تأخیرات و علل زمانی بیان می شود؛ گاه از منظر فازهای انجام پروژه نظیر طراحی و مهندسی، تدارکات و ساخت، و گاه نیز از منظر ذینفعان دخیل در پروژه به علل مربوط به کارفرما، پیمانکار، مشاور کارفرما و مشاور پیمانکار تقسیم شده اند. هر یک از این روش ها، مزایا و ویژگی های خاص خود را دارند و نادرست نیستند؛ لیکن در این مقاله تلاش کردیم مطابق شکل (۶) که نمایانگر ۵ کانال ارتباطی (روابط A تا E) میان ذینفعان روش طرح و ساخت است، علل بروز دعاوی را طبقه بندی کنیم. به عقیده نویسندگان قرارگیری علل بروز دعاوی در این مدل دسته بندی کمک بیشتری به شناسایی ریشه و راه حل های کاهش احتمال بروز آنها خواهد کرد. طبق جدول (۱) از میان ۷۱ علل برشمرده ۴۱ مورد فقط مختص یکی از کانال های ۵ گانه بوده و ۱۵ مورد در دو کانال (علل ۴۲ تا ۵۶) قرار گرفته اند و مابقی نیز ۱۵ علل عمومی می باشند. از عللی که فقط در یک کانال وجود دارد می توان به علت شماره ۶ "تأخیرات پیمانکار در پیشرفت فیزیکی پروژه" در کانال



شکل ۶ روابط قراردادی و ارتباطی میان ذینفعان روش طرح و ساخت

جدول ۱ دسته‌بندی علل ۷۱ گانه بروز دعاوی بر اساس روابط میان ذینفعان کلیدی در سیستم انجام پروژه طرح و ساخت

دسته علل	ردیف	علل بروز دعاوی مطرح شده در مطالعات پیشین	دسته علل	ردیف	علل بروز دعاوی مطرح شده در مطالعات پیشین
رابطه A	۱	تأخیر در تحویل سایت و امکانات تحت تعهد کارفرما	رابطه E	۳۵	تفاوت نگرش و روحیات سازنده و طراح
	۲	تعلیق کار به خاطر عوامل قابل انتساب به کارفرما		۳۶	فشار بر مشاور پیمانکار برای اتمام سریع فاز طراحی-مهندسی
	۳	عدم توافق درباره تأخیرات مجاز و غیرمجاز کار		۳۷	درخواست‌های پیمانکار از مشاور برای انجام کار غیر تخصصی
	۴	عدم توافق درباره هزینه‌های تأخیر و تعلیق عوامل غیر مترقبه		۳۸	اعمال قدرت پیمانکار در مسائل تخصصی مشاور پیمانکار
	۵	عدم توافق درباره هزینه‌های تأخیر مرتبط با ذینفعان خارجی		۳۹	تأخیر در پرداخت مطالبات مشاور پیمانکار توسط پیمانکار
	۶	تأخیرات پیمانکار در پیشرفت فیزیکی پروژه		۴۰	ابهام در محدوده خدمات مشاور پیمانکار حق الزحمه وی
	۷	تغییر در زمان‌بندی کارها		۴۱	عدم انتفاع مشاور از سود حاصل از صرفه‌جویی‌ها در پروژه
	۸	تحمل هزینه‌های اضافه اداری به پیمانکار	روابط A و B	۴۲	تأخیر در ابلاغ دستور کارها و صورت‌جلسات توسط کارفرما
	۹	تأخیر در پرداخت صورت وضعیت‌ها و مطالبات پیمانکار		۴۳	تغییر در دستورالعمل‌ها، مقررات و مجوزهای دولتی
	۱۰	عدم توانایی در تأمین مالی توسط کارفرما		۴۴	عدم تصویب و ابلاغ به موقع طراحی‌ها و نقشه‌ها
	۱۱	مشکلات مالی پیمانکار در پیشبرد پروژه		۴۵	ابهام در محدوده پروژه و خواسته‌های کارفرما
	۱۲	تورم و تغییرات نرخ ارز		۴۶	روش نامناسب انتخاب ذینفعان پروژه
	۱۳	عدم توافق درباره کارهای قیمت جدید و تعدیل	روابط A و C	۴۷	انتخاب پیمانکاران اصلی و جزء نامناسب
	۱۴	کمبود فضا و تجهیزات مورد نیاز پیمانکار	روابط A و D	۴۸	دستورات تغییر بیش از حد در حین کار از سوی کارفرما
	۱۵	ساخت و ساز معیوب و یا غیر منطبق بر نقشه‌ها	روابط A و E	۴۹	عدم اعمال نظر مشاور پیمانکار در تنظیم قرارداد
	۱۶	ایرادات اساسی در نگهداری از پروژه و اموال کارفرما		۵۰	هم وزن نبودن پیمانکار و مشاور پیمانکار
	۱۷	وجود ایراد و اشتباه در اسناد فنی مبنا (RFP)		۵۱	تأخیر زیاد در امضا قرارداد مشارکت پیمانکار و مشاور
	۱۸	عدم شفافیت و اعتماد متقابل	روابط B و D	۵۲	انتخاب مشاور پیمانکار نامناسب
	۱۹	فقدان اخلاق و وجود رفتارهای فرصت طلبانه	روابط C و D	۵۳	رفع مسئولیت بیش از حد مشاور کارفرما از خود
	۲۰	تضاد منافع و اولویت منافع شخصی به پروژه		۵۴	برآورد اولیه اشتباه از سوی مشاور کارفرما
	۲۱	تلنبار شدن مشکلات و موکول نمودن به انتهای پروژه		۵۵	برنامه ریزی اولیه اشتباه از سوی مشاور پیمانکار
	۲۲	عدم انجام مطالعات امکان سنجی دقیق		۵۶	تغییر مشاور کارفرما در طول پروژه
رابطه B	۲۳	عدم رعایت HSE و عواقب آن	عمومی	۵۷	عدم انتخاب مشاور با صلاحیت توسط کارفرما
	۲۴	شرایط قراردادی نامشخص و قابل تفسیر		۵۸	زمان ناکافی برای برگزاری مناقصه و انجام مذاکرات
	۲۵	مشکل تضامنی بودن مسئولیت‌های پیمانکار و مشاور		۵۹	تفاوت فرهنگی و زبانی
	۲۶	عدم اعمال نظرات مشاور کارفرما در قرارداد پیمانکار		۶۰	وجود ابهامات، کاستی‌ها در ضوابط طرح و ساخت موجود
	۲۷	دستورات تغییر بیش از حد طرح‌ها و نقشه‌ها از سوی کارفرما		۶۱	ارتباطات ضعیف و درک نادرست خواسته‌های طرفین
	۲۸	دخالت کارفرما در امور طراحی، مهندسی و اجرا		۶۲	مکاتبات بیش از حد و یا کمبود ارتباط بین ذی نفعان
رابطه C	۲۹	عدم درک درست خواسته‌های کارفرما		۶۳	برنامه‌ریزی و برآوردهای غیر واقعی
	۳۰	تخصیص مازاد و انتظارات غیر واقعی از پیمانکار		۶۴	برگزاری ناکافی و یا غیر مؤثر جلسات
رابطه D	۳۱	عدم شفافیت و کامل نبودن اسناد و الزامات کارفرما		۶۵	ساختار سازمانی اشتباه و نامتناسب
	۳۲	ناکافی بودن طراحی‌ها و اسناد اولیه مشاور کارفرما		۶۶	ثبت و به اشتراک گذاری ناکافی اسناد و مدارک پروژه
	۳۳	ایراد در اسناد، طراحی‌ها و نقشه‌های تحویلی کارفرما به پیمانکار		۶۷	ضعف کارفرما در رهبری، مدیریت و کنترل پروژه
	۳۴	فقدان مبنایی برای کنترل‌ها و محاسبات پیشرفت کار		۶۸	عقب ماندن از راهکارهای نوین مدیریتی
				۶۹	عدم تناسب روش طرح و ساخت با اهداف پروژه
				۷۰	عدم همکاری عامدانه کارکنان پروژه
				۷۱	فرایند کار و رویه هماهنگی نامناسب میان ذینفعان

جدول ۲ دعاوی اصلی مطرح در پروژه‌های طرح و ساخت

ردیف	دعاوی ۱۱ گانه اصلی مطرح در پروژه‌های طرح و ساخت
D1	نقص مطالعات اولیه و وجود ایراد و اشتباه در اسناد فنی مبنا (RFP) و عدم درک درست خواسته‌های کارفرما
D2	عدم تصویب و ابلاغ به موقع نقشه‌ها، دستورات تغییر و صورت جلسات
D3	عدم توافق در رابطه با تأخیرات مجاز و غیر مجاز پیمانکار در مواقع تمدید و انتهای پروژه
D4	عدم توافق درباره هزینه‌های تأخیر در پروژه
D5	عدم کفایت مبالغ پرداخت شده به پیمانکار به تناسب هزینه‌های واقعی پروژه به دلیل عدم کفایت تعدیل‌ها، تورم و یا تغییرات نرخ ارز و حتی محاسبات اشتباه وی
D6	شرایط قراردادی نامشخص و قابل تفسیر و عدم تعیین تکلیف موارد دارای ابهام پیش از امضاء قرارداد و شروع کار به خصوص در مورد قیمت‌گذاری و نحوه پرداخت
D7	تأخیر در دسترسی و تحویل سایت، امکانات و تجهیزاتی که وظیفه تأمین آنها طبق قرارداد به عهده کارفرما می‌باشد
D8	عدم توافق در رابطه با ارزش کارهای قیمت جدید و تعدیل قیمت‌ها
D9	ساخت و ساز معیوب و یا غیرمنطبق بر نقشه‌ها و خواسته‌های پروژه و رد آنها در انتهای پروژه
D10	دستورات تغییر بیش از حد از سوی کارفرما و دوباره کاری‌های ناشی از تغییرات و عدم توافق در رابطه با حجم کار، زمان و هزینه آن
D11	تغییر مشاور کارفرما یا عوامل تعیین‌کننده وی در طول پروژه و اعمال سلیقه تیم جدید در روند ادامه کار و عدم تصویب گزارشات قبلی

جدول ۳- علل بروز دعاوی در پروژه‌های طرح و ساخت

ردیف	علل ۲۲ گانه بروز دعاوی در پروژه‌های طرح و ساخت
C1	تعلیق کار به خاطر عوامل قابل انتساب به کارفرما (تأخیر غیرعامدانه در تأییدات و تصمیمات وی)
C2	تعلیق کار به خاطر عوامل غیرمترقبه و غیرقابل انتساب به کارفرما (اعتراضات محلی، معارض و عوامل طبیعی)
C3	تعلیق کار به خاطر عوامل قابل انتساب به پیمانکار (ایرادات عملیاتی و تأخیر در برنامه و عدم تأمین مالی مورد توافق)
C4	کارفرمای ضعیف و مدیریت و رهبری ضعیف وی
C5	پیمانکار ضعیف و ضعف در برآوردها، اجرای ضعیف و غیر قابل قبول
C6	مشاور کارفرمای ضعیف (ضعف در درک نیاز کارفرما و پروژه، تنظیم RFP و قرارداد شفاف، طراحی‌ها و برآوردهای اولیه)
C7	مشاور پیمانکار ضعیف (ضعف در درک خواسته‌های کارفرما، اعتبارسنجی مدارک مشاور کارفرما، برنامه‌ریزی‌ها و تهیه نقشه‌های اجرایی بهینه برای پروژه)
C8	کمبود منابع مالی و عدم توانایی در تأمین به موقع آن توسط کارفرما
C9	مشکلات مالی پیمانکار و عدم توانایی مالی در پیشبرد صحیح پروژه
C10	زمان کم مشاور کارفرما برای تهیه اسناد، RFP و قرارداد
C11	زمان کم مشاور پیمانکار برای تهیه نقشه‌ها و برنامه‌ریزی پروژه
C12	زمان کم اجرا و برنامه‌ریزی نامعقول برای پیمانکار
C13	تنبهار شدن مشکلات و ادعاها و موکول کردن آنها برای دعاوی انتهای پروژه به دلیل عدم ارتباط کافی و مستمر در حین پروژه
C14	عدم درک درست نیازهای متقابل طرفین به دلیل کم و زیاد بودن مکاتبات اداری و کمبود ارتباطات مؤثر (مانند جلسات منظم هفتگی)
C15	فقدان فرآیندهای شفاف گردش کار و نحوه ارتباط و انتشار اطلاعات میان ذینفعان
C16	فقدان مبنایی مورد توافق در رابطه با کنترل‌ها و اندازه‌گیری‌های حین پیشرفت پروژه (محاسبات پیشرفت کار، تأخیرات و ...)
C17	عدم اعتماد و اعتباردهی کارفرما به مشاور خود و سایر ذینفعان که منجر به دخالت کارفرما در امور طراحی، مهندسی و اجرا بیش از حدود اختیاراتش می‌گردد
C18	ابهام در مرز وظایف و اختیارات کارفرما و مشاور وی که منجر به رفع مسئولیت‌های بیش از حد مشاور کارفرما از خود و ارجاع کار به کارفرما می‌شود
C19	عدم وجود فرمت مناسب برای تدوین خواسته‌های کارفرما که منجر به ضعف در شناخت خواسته‌های کارفرما و محدوده دقیق پروژه می‌شود
C20	تغییر در زمان‌بندی کارها مثل اجبار پیمانکار به کار در شب مطابق نظر کارفرما
C21	تضاد منافع، عدم شفافیت و نداشتن حسن نیت و در نتیجه اعمال قدرت کارفرما یا رفتارهای فرصت‌طلبانه پیمانکار
C22	وجود ابهامات، کاستی‌ها و تناقضات در ضوابط طرح و ساخت موجود و نیاز به تدوین آیین نامه‌های جدید

می‌باشد، لذا با توجه به اهمیت این امر هرگونه نقص و کمبود و اشتباه موجود در آن منجر به اشتباه در مبلغ پروژه و دعاوی متعدد می‌گردد.

عدم تصویب و ابلاغ به موقع نقشه‌ها، دستور کارها و صورت جلسات. تصمیمات کارفرما و نتایج جلسات فنی و مدیریتی میان ذینفعان ملاک اصلاح رویه‌های کاری و پیشبرد پروژه هستند، لیکن عدم ابلاغ نتایج جلسه به معنی از رسمیت

شرح دعاوی اصلی مطرح در سیستم طرح و ساخت
نقص مطالعات اولیه و وجود ایراد در اسناد فنی مبنا (RFP)
 و عدم درک صحیح خواسته‌های کارفرما. اسناد فنی مبنا یا همان RFP در ابتدای پروژه، توسط مشاور کارفرما و بر طبق نیازهای اعلامی کارفرما و تأیید ایشان تهیه و در اختیار پیمانکارانی که در مناقصه شرکت کرده‌اند قرار می‌گیرد. بدیهی است که این اسناد ملاک کلیه خدمات و فعالیت‌های آتی تیم طرح و ساخت و در نتیجه مبنای برآورد قیمت پیشنهادی آنها

نداشته و آن را منصفانه و جبران کننده تلاش و سرمایه گذاری خویش نمی داند. از آنجاییکه در سال های اخیر در کشور همواره شاهد تورم و تغییرات نرخ ارز بالایی نیز بوده ایم، تغییر هزینه ها بسیار چشمگیر بوده و بعضاً به اعتقاد پیمانکار مقادیر پرداختی در قالب تعدیل جوابگوی این هزینه های انجام شده و انتظارات پیمانکار نیستند. البته در مواردی نیز شاهد آن هستیم که پیمانکار در محاسبات هزینه های انجام کار اشتباه چشمگیری داشته و پس از مواجهه با واقعیت و درک اشتباه خویش، سعی در اقناع کارفرما برای پرداختی بیشتر در جهت جلوگیری از ضرر خویش دارد.

شرایط قراردادی نامشخص و قابل تفسیر. قراردادهای با تعریف تعهدات طرفین نقش مهمی در کاهش یا افزایش اختلافات دارند [37] و لذا کیفیت متن و اسناد قرارداد در پیشگیری از بروز دعوا بسیار مهم است [16]. این اختلافات زمانی بوجود می آیند که شرایط قرارداد نامشخص یا ناقص و قابل تفسیر بوده و ابهاماتی در رابطه با تعهدات، هزینه ها، روابط و مسئولیت های ذینفعان داشته باشد. در مواقعی که ابهامات موجود در قرارداد عامدانه یا غیرعامدانه پیش از شروع کار مطرح و حل و فصل نشود، به هنگام بروز تضاد منافع، هر یک از طرفین تفسیر خود را از قرارداد ارائه نموده و سعی بر توجیه طرف مقابل خواهد داشت. مسائل مهم پروژه بخصوص نحوه محاسبه هزینه ها و چگونگی پرداخت ها از مهمترین مواردی هستند که هر گونه ابهام در آنها قطع به یقین منجر به دعاوی انتهای پروژه می شود.

تأخیر در تحویل مصالح، امکانات و تجهیزاتی که به عهده کارفرما می باشد. در هر پروژه ای برخی تعهدات مؤثر در اجرای کار به عهده کارفرما می باشد. از تحویل زمین بدون معارض گرفته تا تأمین مصالح و تجهیزات و موارد دیگر. عدم انجام به موقع هر یک از این تعهدات نه تنها بعضاً ابهاماتی در میزان پیشگیری از سرعت پیشرفت پروژه دارد، بلکه برنامه هایی که وابسته به آن بوده اند را نیز دچار تغییر می نماید. عدم توافق در رابطه با این مسائل بعید نبوده و سبب ایجاد دعاوی دیگری از سوی پیمانکار می باشد.

عدم توافق در رابطه با ارزش کارهای قیمت جدید. در پروژه هایی که سیستم پرداخت بر اساس فهرس بهای ارائه شده توسط سازمان برنامه و بودجه هستند، همواره در رابطه با هزینه کارهایی که به عنوان قیمت جدید می شناسیم چالش های زیادی

انداختن نتایج حاصل از آن جلسه بوده و سد بزرگی در ادامه کار پیمانکار خواهد بود. گفتنی است علاوه بر ضعف های غیرعامدانه تیم کارفرما و مشاور وی، گاهی عدم ابلاغ صورت جلسات و تصمیمات در بزنگاه های حساس به دلایل سیاست کاری اتخاذ شده و بطور عامدانه صورت می گیرد که این امر همواره محل اعتراض، از بین رفتن اعتماد و فضای همکاری و در صورت تداوم مسبب اقامه دعوا از سوی پیمانکار خواهد بود.

عدم توافق درباره تأخیرات مجاز و غیرمجاز پیمانکار. تأخیرات زمانی یکی از بزرگترین دعاوی مطرح در انتهای پروژه های صنعت ساخت بوده اند و در اغلب پروژه ها نیز شاهد آن هستیم؛ بطوریکه خوش گفتار و همکاری در پژوهشی میزان پروژه های دارای تأخیر ایران در سال ۲۰۳۳ را ۷۵ درصد اعلام نموده اند [36]. حال موضوع اصلی آنجاست که تصمیمات و عملکردهای هر دو طرف دعوا (کارفرما و مشاور وی در مقابل تیم یا شرکت طرح و ساخت) می تواند سبب بخشی از تأخیرات بوجود آمده در پروژه باشد و قاعدتاً هر یک از طرفین می کوشند که عملکرد خود را توجیه نموده و سهم عمده ای از تأخیرات را به دلیل عملکرد تیم مقابل بدانند. لذا مجاز یا غیرمجاز دانستن تأخیر (به معنای مقصر بودن یا نبودن پیمانکار) و تبعات مالی آن از مهمترین دعاوی مطرح در انتهای پروژه می باشد. به عبارتی اگر تأخیرات غیرمجاز باشد، پیمانکار مشمول ماده خسارت تأخیرات غیرمجاز در شرایط خصوصی پیمان می شود و برعکس اگر تأخیرات مجاز شود پیمانکار مدعی دریافت هزینه های بالاسری و مستمر کارگاه خواهد بود. گاهی تشخیص مجاز و غیرمجاز بودن تأخیرات امری بسیار پیچیده و دشوار است و لذا نحوه بررسی تأخیرات همواره یکی از چالش ها و اختلافات در پروژه ها می باشد.

عدم توافق درباره هزینه های تأخیر در پروژه. گذشته از نفس تأخیر، محاسبه هزینه های تحمیلی به پروژه در اثر وقوع تأخیرات نیز دلیل دیگری برای دعاوی پروژه ها است. تأثیرات چند جانبه تأخیر در پروژه ها، بر هزینه مصالح، تجهیزات، خدمات، ضمانتنامه ها و کاهش سود بهره برداری پیچیدگی بسیاری داشته که توافق در این زمینه و احتمال پیشگیری از وقوع آن را کم می کند.

عدم کفایت مبالغ پرداخت شده به پیمانکار. در مواقع متعددی پیمانکار از محاسبات هزینه ها و پرداختی های کارفرما رضایت

تغییر مشاور یا عوامل تعیین کننده کارفرما. تغییر کارکنان پروژه به ذات خود مشکلی ندارد و در پروژه‌های با زمان نسبتاً بلند ناگزیر خواهد بود، ولی وقتی نفرت شاخص و تعیین کننده پروژه همانند مدیر پروژه که در گذر زمان زبان ارتباط با آنها را درک نموده‌ایم تغییر می‌کنند؛ و یا حتی تیم مشاور (یا مدیر طرح) یکجا تغییر می‌کند، چالش‌های زیادی به همراه خواهد داشت. بزرگترین چالش در چنین مواقعی تغییر رویه و نگرش تیم جدید نسبت به فرایند انجام امور به خصوص در رابطه با توافقات و مصوبات پیشین است. در چنین مواقعی عدم تأیید مصوبات پیش گفته یکی از دعاوی قطعی در انتهای پروژه خواهد بود.

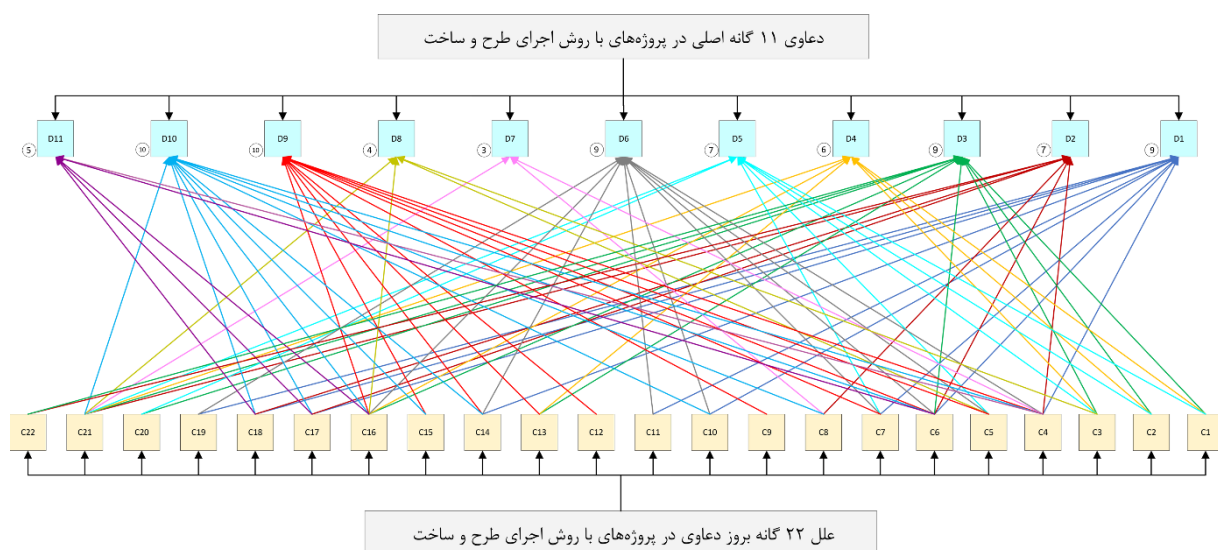
ارتباط میان دعاوی و علل بروز آنها

در این مرحله با نظر خبرگان به ریشه‌یابی دعاوی اصلی پرداخته و هر یک از علل ۲۲ گانه بروز دعاوی را به دعوای ۱۱ گانه ارتباط دادیم. این امر کمک خواهد نمود که در گام نهایی با شناخت دقیق دلایل بروز هر دعوا، راهکارهایی برای پیشگیری از آنها نیز ارائه شود. در شکل (۷) و جدول (۴) ارتباط میان ۱۱ دعوای اصلی و دلایل ۲۲ گانه بروز آنها نمایش داده شده است. گفتنی است تعداد دلایلی که می‌توانند منجر به بروز هر یک از دعاوی ۱۱ گانه شوند در شکل (۷) و در دوائر کوچکی کنار شماره دعاوی نشان داده شده است.

مطرح است. شرایط زمانی و مکانی خاص پروژه نیز می‌تواند مزید بر علت شود تا توافق درباره هزینه یاد شده را دشوارتر نماید.

ساخت و ساز معیوب. مشکلات اجرا نیز یکی دیگر از موضوعات مورد بحث در حین پروژه یا انتهای آن است. از ادعاهای پیمانکار در رابطه با اشکالات نقشه‌ها (وارد یا ناوارد) و بلااشکال بودن کار خویش گرفته، تا زمان بحث در رابطه با خطای صورت گرفته در اجرا، هر یک به گونه‌ای سبب ادعاهای مختلف می‌شود. بدیهی است کشف و اصلاح ساخت معیوب در حین اجرا چالش‌های بسیار کمتری به نسبت عیب‌یابی پس از اتمام کار یا آن قسمت معیوب از کار دارد. لذا مطرح کردن ایرادات پس از اجرای کامل آن در برخی موارد منجر به هزینه‌های بسیاری برای اصلاح و حتی تخریب بخش زیربنایی کار گشته و دعاوی بزرگی را پدید می‌آورد.

دستورات تغییر بیش از حد از سوی کارفرما. تغییرات متعدد از سوی کارفرما همواره سبب تأخیر در تحویل و افزایش هزینه پروژه شده [5] و مستندسازی دقیقی از دستورات تغییر و اسناد کارهای صورت گرفته را طلب می‌کند [38]. زمان اعمال تغییر نیز در میزان دوباره‌کاری‌های مورد نیاز آن تأثیر بسزایی داشته که همواره در آن، زمان و هزینه‌های تحمیلی ناشی از آن اختلاف نظر هست.



شکل ۷ ارتباط تصویری میان دعاوی ۱۱ گانه اصلی و علل ۲۲ گانه بروز دعاوی در سیستم انجام پروژه طرح و ساخت

جدول ۴ ارتباط میان دعاوی ۱۱ گانه اصلی و علل ۲۲ گانه بروز دعاوی در سیستم انجام پروژه طرح و ساخت

دلایل بروز دعاوی در روش اجرای طرح و ساخت																							دعاوی اصلی در روش اجرای طرح و ساخت
C۲۲	C۲۱	C۲۰	C۱۹	C۱۸	C۱۷	C۱۶	C۱۵	C۱۴	C۱۳	C۱۲	C۱۱	C۱۰	C۹	C۸	C۷	C۶	C۵	C۴	C۳	C۲	C۱		
			✓	✓	✓			✓			✓	✓				✓	✓		✓				D۱
✓	✓			✓	✓										✓		✓		✓				D۲
✓	✓	✓				✓			✓								✓			✓	✓	✓	D۳
	✓					✓			✓											✓	✓	✓	D۴
	✓	✓														✓		✓		✓	✓	✓	D۵
			✓			✓		✓			✓	✓				✓	✓	✓	✓				D۶
	✓														✓				✓				D۷
	✓					✓												✓		✓			D۸
						✓	✓	✓	✓	✓				✓		✓	✓	✓	✓				D۹
	✓			✓	✓	✓	✓	✓				✓			✓		✓		✓				D۱۰
				✓	✓	✓											✓		✓				D۱۱

دعاوی اصلی و فرعی

راهکارهای پیشگیری از بروز دعاوی

در مرحله آخر و با توجه به جداول به دست آمده از ارتباط میان دعاوی و علل بروز آنها، از تجربه خبرگان استفاده کرده و به بررسی راهکارهای عملی پیشگیری از بروز دعاوی اصلی پرداختیم. بدیهی است که راهکارهای پیشگیری از دعاوی می‌بایست از علل بروز دعاوی پیشگیری نماید و بالطبع با توجه به اشتراک دلایل مختلف میان برخی دعاوی، راهکارهای پیشنهادی نیز می‌توانند برای بهبود شرایط پیرامون چند دعوی خاص مفید واقع شوند. در ادامه با توجه به ارتباط میان دعاوی و دلایل بروز دعاوی که در قسمت قبل گفته شد، برای هر یک از دعاوی به تفصیل راهکارهای به دست آمده را بیان می‌کنیم.

راهکارهای پیشگیری از دعاوی "نقص مطالعات اولیه و

وجود ایراد در اسناد فنی مبنا (RFP) و عدم درک

صحیح خواسته‌های کارفرما"

برای انتقال کامل خواسته‌های کارفرما به مشاور وی قاعدتا باید هر دو طرف توانا باشند. توانایی کارفرما در بیان خواسته‌های روشن خویش از یک سو و توانایی فهم مقصود مطلوب کارفرما و کشف خواسته‌های نهان وی توسط مشاور کارفرما از سوی دیگر ضرورت نیاز به تیم‌های حرفه‌ای برای دو طرف را نشان می‌دهد. علی‌القاعده برای داشتن مشاور مناسب، تخصیص بودجه مناسب و عدم استفاده از روش انتخاب مشاور با کمترین قیمت (CBS) (Cost-Based Selection) و بالعکس استفاده از روش‌های انتخاب بر اساس کیفیت (QBS) (Quality-Based Selection) یا (QCBS) (Quality Cost-Based Selection) در

همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود هر یک از دلایل

۲۲ گانه می‌توانند سبب وقوع یک یا چند مورد از دعاوی ۱۱ گانه اشاره شده باشند. دلیل شماره ۹ یعنی "مشکلات مالی پیمانکار" تنها می‌تواند مسبب بروز دعاوی شماره ۹ یعنی "ساخت و ساز معیوب و غیرمنطبق بر نقشه‌ها" شود، و همچنین دلیل شماره ۱۲ یعنی "زمان کم و برنامه‌ریزی نامعقول برای اجرا" نیز تنها باعث همین دعاوی شماره ۹ می‌شود. ولی در باقی موارد هر یک از دلایل ۲۲ گانه می‌توانند دعاوی متعددی را موجب شوند. بعنوان نمونه دلیل شماره ۲۲ یعنی "وجود ابهامات و کاستی‌ها در ضوابط و مقررات" می‌تواند همزمان سبب بروز دعاوی شماره ۲ یعنی "عدم تصویب و ابلاغ بموقع نقشه‌ها، دستور کارها و صورتجلسات" و شماره ۳ یعنی "عدم توافق درباره تأخیرات مجاز یا غیرمجاز پیمانکار" شود. ابهام و کاستی ضوابط آنجایی است که برخلاف روش سه عاملی در روش طرح و ساخت مهلت دقیقی برای ابلاغ برخی صورتجلسات و دستورات کارفرما لحاظ نشده (دعاوی شماره ۲) و یا مالکیت استفاده از شنواری زمانی فعالیت‌هایی که روی مسیر بحرانی نیستند و همچنین سهم هر یک از طرفین در مواقعی که هر دو در انجام فعالیت‌های پیش‌نیاز یک فعالیت بحرانی کوتاهی دارند مشخص نشده است (دعاوی شماره ۳). در این میان دلایل C₄، C₆، C₁₆ و C₂₁ هر کدام با موجب شدن ۷ دعاوی بیشترین عامل بروز دعاوی هستند. تفسیر تک‌تک این ارتباطات بسیار مهم و کاربردی است، لیکن در قالب این پژوهش نمی‌گنجد و می‌توان در تحقیقات آینده نسبت به آن اقدام نمود.

می‌باشد.

راهکارهای پیشگیری از "عدم توافق در رابطه با تأخیرات مجاز و غیرمجاز پیمانکار"

تعلیق کار تحت هر شرایطی برنامه زمان‌بندی اولیه را مختل نموده و چالش توافق برای مجاز یا غیر مجاز کردن تأخیرات را در پی خواهد داشت. داشتن برنامه کاملی برای مدیریت ریسک می‌تواند تا حدودی تأثیر چنین تعلیق‌هایی را کم نموده و ثبت کامل اسناد پروژه نیز به کاهش ابهامات کمک کند. همچنین توانایی مشاور کارفرما در بیان دقیق خواسته‌های پروژه و تنظیم قرارداد قوی، که در آن مبنای هرگونه محاسبات پیشرفت کار و تأخیر مشخص شده است، کمک زیادی به شفافیت چگونگی مواجهه با تأخیرات خواهد کرد. بعلاوه یکی از مهمترین پیشنهادات خبرگان در این زمینه تحویل گام به گام پروژه بوده که از جمع شدن مشکلات و انباشته شدن تأخیرات بلامتکلیف جلوگیری می‌کند. به عبارتی در بازه‌های ماهانه یا سه ماهه می‌بایست میزان تأخیرات مجاز و غیرمجاز تعیین، محاسبه و صورت‌جلسه شود که قطعاً این کار آسان و امکان‌پذیر است و توافق در بازه‌های کوتاه راحت‌تر خواهد بود.

راهکارهای پیشگیری از "عدم توافق درباره هزینه‌های تأخیر در پروژه"

بهترین راه حل برای جلوگیری از بروز و حل آسان اختلاف و دعوی مربوط به هزینه‌های بالاسری و مستمر کارگاه پیمانکار در دوران تأخیرات مجاز قابل انتساب به کارفرما (تأخیرات قابل بخشش قابل جبران)، پیش‌بینی و تعیین میزان مبلغ هزینه‌های قابل پرداخت توسط کارفرما در قرارداد می‌باشد.

راهکارهای پیشگیری از عوای "عدم کفایت مبالغ پرداخت شده به پیمانکار"

در مواقع زیادی شاخص‌های تعدیل با افزایش هزینه‌ها و قیمت اجناس در بازار تطابق ندارد و یا نوسانات نرخ ارز به خصوص در پروژه‌هایی که تأمین تجهیزات خارجی دارند نیز به همان نسبت جبران نمی‌شود، پیشنهاد می‌شود پیش از عقد قرارداد توافقاتی در رابطه با نحوه محاسبات تعدیل این گونه هزینه‌ها با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف صورت گرفته و موافقت دو

انتخاب وی بسیار تأثیرگذار خواهند بود. بعلاوه برخی اطلاعات به درستی توسط مشاور پیمانکار دریافت نشده یا در برنامه‌ریزی‌ها لحاظ نمی‌شود که با وجود یک تیم حرفه‌ای به عنوان مشاور پیمانکار احتمال آن کم خواهد شد. علاوه بر این به هر دوی مشاوران پیش‌گفته باید زمان کافی اختصاص داد تا بتوانند برنامه‌ریزی مناسبی داشته و به بهترین نحو توانایی خود را بروز دهند. در کنار این موارد وجود جلسات منظم و هدفمند به منظور ارتباط روشن و مؤثر در طول پروژه و بخصوص به توصیه اغلب خبرگان، برگزاری جلسه شفاف‌سازی در شروع کار پیش از امضای قرارداد می‌تواند به پیشگیری از بروز چنین مشکلات و ادعاهایی کمک شایانی کند. بعلاوه تدقیق وظایف و اختیارات کارفرما و مشاور وی در قبال هم، در کنار اعتباردهی شایسته به تخصص مشاور از سوی کارفرما نیز می‌تواند از خلط مسئولیت‌ها و عواقب آن جلوگیری نماید. در انتها وجود فرمت یا چک‌لیست مناسب برای استخراج نیازهای کارفرما می‌تواند اطمینان بیشتری نسبت به عدم درک بخشی از اهداف و خواسته‌های ایشان ایجاد نماید.

راهکارهای پیشگیری از دعوی "عدم تصویب و ابلاغ به موقع نقشه‌ها، دستور کارها و صورت‌جلسات"

عدم ابلاغ یاد شده می‌تواند عامدانه یا غیرعامدانه باشد. در شرایط عامدانه که می‌تواند به معنای اعمال قدرت کارفرما تعبیر شود، برگزاری جلساتی در سطح مدیریت ارشد برای ایجاد محیط مطلوب و درک سخن طرف مقابل می‌تواند تا حدی مشکلات قابل حل را رفع نماید. همچنین کمبود منابع مالی کارفرما از دلایل مهم بروز چنین شرایطی بوده که برنامه‌ریزی دقیق و واقع‌بینانه برای تأمین و تخصیص آن پیش از شروع پروژه می‌تواند بسیار مفید باشد. در سوی دیگر در شرایط غیرعامدانه توانایی فنی - مدیریتی کارفرما و مشاور وی نقش بسزایی ایفا خواهد کرد و نیازمند تیم قوی در این زمینه خواهد بود. بعلاوه تعیین دقیق حدود وظایف و اختیارات میان کارفرما و مشاور وی و همچنین دریافت اعتبار کافی مشاور کارفرما می‌تواند تا حدی از بروز چنین ادعایی پیشگیری نماید. در انتها تعیین فرجه در قرارداد برای ابلاغ صورت‌جلسات به نحوی که پس از گذشت مهلت مقرر موارد ابلاغ نشده، ابلاغ شده تلقی گردند از راهکارهای مؤثر

می‌تواند از ایجاد چنین دعوایی جلوگیری نماید. تنظیم برنامه زمان‌بندی تفصیلی دقیق که در آن مایل استون‌های تحویل امکانات توسط کارفرما مشخص شده، و درخواست آن توسط پیمانکار چند هفته پیش از موعد انجام تکلیف کارفرما ثبت شده باشد، کمک شایانی به پیشگیری از این حالت خواهد نمود.

راهکارهای پیشگیری از "عدم توافق در رابطه با ارزش کارهای قیمت جدید"

هر گونه توافق در اواسط کار به ذاته چالش برانگیز است و توافق درباره محاسبه هزینه‌های کارهای قیمت جدید در پروژه‌هایی که پرداخت‌ها بر اساس فهارس بها صورت می‌گیرد نیز از این قاعده مستثنی نیست. در شرایط عدم توافقات زمانی و محاسبه تأخیرات نیز قیمت‌های جدید و تعدیل‌های در نظر گرفته شده توسط کارفرما مطابق میل پیمانکار نخواهد بود؛ لذا علاوه بر راهکارهای پیشنهادی برای تعیین تأخیرات مجاز که پیشتر اشاره شد، می‌بایست برای محاسبه قیمت‌ها نیز مبنای مورد توافقی در قرارداد پیش‌بینی شود. از سوی دیگر نداشتن حسن نیت در هر یک از طرفین، اعمال قدرت کارفرما یا رفتارهای فرصت‌طلبانه پیمانکار می‌تواند ایجاد توافق را سخت نماید، در این مواقع نگرش منصفانه و جلسات در سطح مدیران ارشد می‌تواند تا حدودی از این مشکل بکاهد.

راهکارهای پیشگیری از "ساخت و ساز معیوب"

ضعف هر یک از ذینفعان اصلی ۴ گانه پروژه مستقیماً به ضعف در اجرای پروژه خواهد انجامید. همچنین عدم تزریق به موقع منابع مالی به پیمانکار و یا تخصیص کار مازاد و برنامه‌ریزی بسیار فشرده دلیل دیگری بر ایجاد این دعاوی بوده که راهکارهای پیشگیری از آنها نیز گفته شده است. به جز این موارد برخی مسائل مرتبط با ارتباط مؤثر میان ذینفعان نیز می‌تواند منجر به بروز چنین مشکلی شده یا از وقوع آن جلوگیری نماید. عدم درک نیاز خواسته‌های طرفین، تلنبار شدن مشکلات در حین کار و موکول کردن آنها برای انتهای پروژه از جمله این موارد هستند که با برگزاری منظم جلسات تعامل، تحویل گام به گام پروژه و حل و فصل اختلافات در حین پیشرفت کار به راحتی قابل

طرف در منصفانه بودن آن کسب شود. بدیهی است داشتن رویکرد همکارانه و برد-برد کمک شایانی به دستیابی به نقطه نظر مشترک خواهد کرد. همچنین باید در پروژه‌هایی که تعدیل ندارند نیز پیش‌بینی جهش قیمت‌ها یا طولانی شدن مدت زمان صورت پذیرد تا در آینده در این زمینه مشکلی نباشد. از سوی دیگر گاهی پیمانکار در محاسبات اولیه و ارائه قیمت خود دچار اشتباهاتی می‌شود و سهواً قیمت پیشنهادی برای عقد قرارداد را کمتر از واقعیت خواسته خود ارائه می‌کند، در این گونه مواقع کارفرما و مشاور وی می‌بایست آنالیز بهائی که در پیمانکار لزوماً در مدارک خود ارائه کرده را به دقت بررسی نموده و نقاطی که از نظر ایشان محل ابهام و اشتباه بوده را با پیمانکار در میان گذارند. این امر کمک می‌کند که اگر پیمانکار دچار اشتباهی شده است آن را اصلاح نماید تا در ادامه برای خود وی و متعاقباً پروژه مشکلی پیش نیاید.

راهکارهای پیشگیری از "شرایط قراردادی نامشخص و قابل تفسیر"

قرارداد مهمترین عامل ارتباط میان ذینفعان پروژه است و بیشترین دقت در تنظیم آن باید لحاظ شود. ضعف هر یک از تیم‌های ذینفع اصلی پروژه می‌تواند سبب درک نادرست ایشان از پروژه و دعاوی ناشی از آن شود، لذا طبق صحبت‌های پیش‌گفته باید تمهیدات لازم در جهت اطمینان از انتخاب صحیح هر یک از ایشان صورت گیرد. همچنین به مشاوران هر دو طرف زمان مناسبی برای درک و پیاده‌سازی خواسته‌های پروژه و تنظیم قرارداد مناسب داده شده و علاوه بر برگزاری منظم جلسات هم‌اندیشی از ارتباط کامل میان ذینفعان و درک نیازهای ایشان اطمینان حاصل نماییم. همچنین داشتن مبنایی دقیق برای کنترل‌های کار و خواسته‌های طرح در کنار تعریف دقیق محدوده و اهداف پروژه می‌تواند تأثیر خوبی بر کاهش چنین دعوایی داشته باشد.

راهکارهای پیشگیری از "تأخیر در تحویل امکانات و تجهیزاتی که به عهده کارفرما می‌باشد"

ضعف کارفرما و نداشتن منابع مالی مشخص و مطمئن از مهمترین دلایل بروز چنین دعوایی هستند. کارفرمای حرفه‌ای و شروع پروژه پس از اطمینان از وجود منابع مالی مورد نیاز

سلیقه نفرات یا تیم مشاور جدید تا حدی جلوگیری نماید.

نتیجه‌گیری

خلاصه کاربردی نتایج و دستاوردهای پژوهش

در این پژوهش بررسی جامعی در رابطه با دعاوی، ریشه‌های به‌روز، و راهکارهای پیشگیری از دعاوی در پروژه‌های طرح و ساخت ایران صورت گرفت. به تفصیل دریافتیم علاوه بر دلایل بروز دعاوی خاصی نظیر تغییرات زیاد یا کمبود منابع مالی که در همه پروژه‌ها سبب بروز دعاوی حقوقی می‌شوند، نیاز به تحقیقات مستقل پیرامون دلایل مخصوص هر مدل و شرایط قراردادی نیز داریم؛ بخصوص که شرایط اقتصادی، اجتماعی و سیاسی ایران، تحقیقاتی اختصاصی در محیط داخلی کشور را می‌طلبد. در این پژوهش با مرور ادبیات موضوع به لیست بلندی از دلایل دعاوی رسیدیم که با نظر خبرگان حوزه دعاوی به ۱۱ دعوای اصلی و ۲۲ دلیل دعوا تبدیل شده و در انتها راهکارهایی نیز برای پیشگیری از آن دعاوی مطرح نمودیم. از آنجا که اشتراکات زیادی در راهکارهای پیشنهادی وجود دارد و به دلیل عملیاتی شدن بکارگیری نتایج به دست آمده، در جدول (۵) خلاصه‌ای از مهمترین راهکارهایی که باید در مقاطع مختلف زمانی در طول پروژه مد نظر ذینفعان پروژه باشد، به همراه زمان اعمال و پیش‌نیازهای هر یک نشان داده شده است. بکارگیری این موارد در عین سادگی می‌تواند از دعاوی متعدد و مشکلات زیاد متعاقب آنها جلوگیری نماید.

همانطور که مشاهده می‌شود راهکارهای پیشنهادی در ۱۲ مقطع زمانی مختلف تقسیم شده‌اند که می‌توان از "تعیین محل و میزان دقیق منابع مالی" به عنوان راهکاری برای زمان "پیش از تصویب پروژه" تا "تحویل گام به گام پروژه" و "جلوگیری از تلنبار شدن مشکلات برای انتهای پروژه" به عنوان راهکارهایی برای زمان "حین پیشرفت پروژه" اشاره کرد. مواردی نیز مانند "کاهش دستورات تغییر کارفرما" نیز در یک مقطع زمانی (در اینجا در هنگام تهیه RFP) قرار گرفته‌اند، لیکن در آینده و در "حین پیشرفت پروژه" نیز مجدداً باید در دستور کار ذینفعان باشد.

اجتناب خواهند بود. علاوه فقدان فرایندهای شفاف و مبنایی روشن برای کنترل پیشرفت نیز از دیگر دلایل بروز چنین دعوایی هستند که پیشتر در رابطه با راهکارهای جلوگیری از وقوع آنها توضیح داده شده است. وجود سیستم کنترل کیفی در تیم پیمانکار و کنترل فرایندهای آن و نظارت بر عملکرد آن توسط مشاور کارفرما تأثیر بسزایی در رعایت کیفیت انجام کارها خواهد داشت.

راهکارهای پیشگیری از "دستورات تغییر بیش از حد از سوی کارفرما"

تغییرات زیاد در طول پروژه نیز از جمله مهمترین دعاوی مطرح در پروژه‌ها می‌باشد. کارفرمای ضیف و کمبود منابع مالی وی، در کنار مشاور کارفرمای ضعیف و زمان کم وی برای تهیه اسناد پروژه، RFP و تنظیم قرارداد از مهمترین دلایل این دعوی هستند. علاوه بر مز و وظایف غیر شفاف میان این دو و یا عدم اعتباربخشی صحیح به مشاور از طرف کارفرما می‌توانند تغییرات و بالطبع مشکلات بیشتری را در پروژه رقم بزنند. لذا تکرار می‌شود که حرفه‌ای بودن این ذینفعان، تخصیص زمان و منابع کافی برای انجام امور محوله و روشن نمودن تعهدات و اختیارات هر یک می‌تواند از بروز چنین دعوایی جلوگیری نماید. همچنین وجود شفافیت کاری میان هر دوی ایشان و تیم طرح و ساخت، ارتباطات مؤثر و تعامل بهتر با یکدیگر و درک درست خواسته‌های هر یک از این ذینفعان از دیگر عوامل تأثیرگذار در کاهش احتمال چنین دعوایی به شمار می‌روند.

راهکارهای پیشگیری از "تغییر مشاور کارفرما یا عوامل تعیین‌کننده کارفرما"

انتخاب نفرات یا مشاور ضعیف می‌تواند موجب عدم اعتماد کارفرما و دخالت خارج از چارچوب وی در امور محوله به مشاور شده و در نهایت منجر به قطع همکاری با ایشان گردد؛ لذا ضعف کارفرما در انتخاب ایشان نیز سهم خود را دارد. بدین جهت ضمن تشکیل تیم حرفه‌ای در نهاد کارفرمایی، وی باید در انتخاب افراد برای نقش‌های اصلی پروژه و انتخاب مشاور نهایت دقت را داشته و ملاک‌های فنی را جایگزین ملاک‌های مالی و رابطه‌ای نماید. همچنین ملاک و مبنای مشخصی در تحویل کارها وجود داشته باشد تا ضمن تحویل گام به گام پروژه از اعمال

پیشنهادات تحقیقات آتی

موارد متعددی در تحقیق حاضر وجود داشت که به دلیل اجتناب از خزش محدوده تحقیق، از تشریح بیشتر آنها اجتناب شده است، لیکن در تحقیقات آتی می‌توان بیشتر به آنها پرداخت. از نظر نویسندگان هر یک از دعاوی اصلی ۱۱ گانه یاد شده در نتایج این تحقیق می‌توانند به صورت ویژه بررسی شده و درباره علل بروز، تأثیرات و راهکارهای اجتناب از آنها کنکاش بیشتری نمود.

همچنین در سیستم‌های دیگر اجرای پروژه نیز می‌توان تحقیقات مشابهی انجام داد. بعلاوه با توجه به تفاوت‌های ریشه‌ها و علل بروز دعاوی در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته، می‌توان مقایسه‌ای تطبیقی بین علل بروز دعاوی در این دو دسته انجام داد. در انتها نیز می‌توان ملزومات و استراتژی‌های مورد نیاز هر سیستم اجرای پروژه را با یکدیگر مقایسه نمود.

جدول ۵ توصیه‌های کاربردی برای پیشگیری از بروز دعاوی، پیش‌نیازها و زمان اعمال آنها در طول پروژه

ردیف	زمان اعمال راهکار	راهکارهای پیشگیری از بروز دعاوی	پیش‌نیاز راهکار
۱	پیش از تصویب پروژه	تعیین محل و میزان دقیق منابع مالی	مطالعات امکان‌سنجی و مدیریت استراتژیک و چشم‌انداز صحیح
۲	پس از تصویب پروژه	انتخاب نفقات مناسب برای تیم کارفرما	شایسته‌سالاری و حقوق مکفی
۳		انتخاب مشاور کارفرمای حرفه‌ای	انتخاب مشاور کارفرما بر اساس کیفیت (QBS/QCBS)
۴		عدم تغییر مشاور، مدیر طرح و نفقات اصلی پروژه	انتخاب نفقات و تیم‌های حرفه‌ای
۵	قبل از انعقاد (هر یک از) قرارداد(ها)	داشتن قرارداد روشن و غیر قابل تفسیر	تعیین دقیق اهداف و خواسته‌ها و تسلط تهیه‌کنندگان متن قرارداد
۶	هنگام انعقاد قرارداد با مشاور کارفرما	تدقیق مرز اختیارات کارفرما و مشاور وی	وجود قرارداد روشن و غیر قابل تفسیر
۷		داشتن فرایندی روشن برای استخراج نیازها و اهداف کارفرما	داشتن چک لیست برای اطمینان از عدم غفلت در برخی جوانب
۸	پس از انعقاد قرارداد با مشاور کارفرما	اختصاص زمان کافی به مشاور کارفرما	عدم فشار غیر معقول به مشاور کارفرما برای تحویل کار
۹	در مراحل مطالعات اولیه و تهیه RFP	کاهش دستورات تغییر از طرف کارفرما	مطالعات و جلسات کافی برای تدقیق اهداف و نیازهای کارفرما
۱۰	پیش از انعقاد قرارداد با تیم طرح و ساخت	برگزاری جلسه شفاف سازی بیان شرایط و اهداف پروژه	
۱۱		راه‌اندازی آزمایشی سیستم کنترل، محاسبات و پرداخت	برگزاری جلسه شفاف سازی بیان شرایط و اهداف پروژه
۱۲		تعیین مبنای دقیق کنترل پیشرفت و محاسبات زمان و هزینه	وجود قرارداد روشن و غیر قابل تفسیر
۱۳	در زمان انعقاد قرارداد تیم طرح و ساخت	انتخاب پیمانکار حرفه‌ای	کیفی پیمانکار و هشدار دادن به وی در صورت اشتباه محاسباتی
۱۴		انتخاب مشاور پیمانکار حرفه‌ای	انتخاب مشاور پیمانکار بر اساس کیفیت (QBS/QCBS)
۱۵		پیش‌بینی مهلت دقیق برای ابلاغ صورت‌جلسات از طرف کارفرما	مسئولیت‌پذیری کارفرما
۱۶		تعیین مایل‌استون‌های تحویل امکانات از طرف کارفرما در قرارداد	مسئولیت‌پذیری کارفرما
۱۷		پیش‌بینی شرایط توری و تأخیرات و تعدیل‌ها	وجود قرارداد روشن و غیر قابل تفسیر
۱۸		تعیین نحوه جبران هزینه‌های تأخیرات توسط کارفرما	مطالعات کافی و قرارداد روشن و غیر قابل تفسیر
۱۹		اختصاص زمان کافی به مشاور پیمانکار	اعمال نظارت بر تخصیص زمان کافی از سوی پیمانکار
۲۰		وجود و بکارگیری برنامه جامع مدیریت ریسک	نگرش مدیریتی صحیح ذینفعان
۲۱	در شروع کار یا هنگام بروز چالش‌های مدیریتی	برگزاری جلساتی در سطح مدیریت ارشد	حسن نیت، شفافیت و داشتن رویکرد برد - برد در طرفین
۲۲	در حین پیشرفت پروژه	بکارگیری برنامه جامع مدیریت دانش و ثبت دقیق اسناد و وقایع	نگرش مدیریتی صحیح ذینفعان
۲۳		وجود سیستم کنترل کیفی توسط پیمانکار و نظارت مشاور کارفرما	نگرش مدیریتی صحیح ذینفعان
۲۴		تحویل گام به گام پروژه	برنامه ریزی دقیق و تعیین مناسب مایل‌استون‌های پروژه
۲۵		عدم دخالت در برنامه‌ریزی و اجرای امور تیم طرح و ساخت	انتخاب پیمانکار و مشاور حرفه‌ای وی و اعتماد به توانایی ایشان
۲۶		جلوگیری از تلنبار شدن مشکلات برای انتهای پروژه	تحویل گام به گام پروژه و برگزاری جلسات هفتگی/ماهانه مفید
۲۷		توافق ماهانه یا سه ماه یکبار در رابطه با تأخیرات مجاز و غیرمجاز	
۲۸		برگزاری جلسات منظم هفتگی/ماهانه برای تبادل اطلاعات	نگرش مدیریتی صحیح ذینفعان
۲۹		اعتماد کارفرما به مشاور خویش و عدم دخالت در وظایف وی	انتخاب مشاور کارفرمای حرفه‌ای

Project Management Office (PMO) دفتر مدیریت پروژه	واژه نامه
Negative Case Analysis رویکرد تحلیل منفی	Thematic Analysis تحلیل مضمون
Member Checking بازخوردگیری از شرکت کنندگان	Contract Management مدیریت قرارداد
External Audit بازبینی خارجی	مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)
Cost-Based Selection انتخاب بر اساس قیمت	Building Information Modeling
Quality-Based Selection انتخاب بر اساس کیفیت	Negotiation مذاکره
انتخاب بر اساس قیمت و کیفیت	سیستم های تحویل پروژه (PDSs)
Quality Cost-Based Selection	Project Delivery Systems
	Conflict تعارض
	Claim ادعا
	Dispute دعوا
	Request For Proposal (RFP) درخواست ارسال پروپوزال

سپاسگزاری

مراجع

- [1] R. O. Asiedu and E. Adaku, "Cost overruns of public sector construction projects: a developing country perspective," *International Journal of Managing Projects in Business*, vol. 13, no. 1, pp. 66–84, 2020. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0177>
- [2] A. Fatima B. K. Prasad et al., "Factors Affecting Construction Dispute: Testimonies from Indian Construction Projects," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4.26, pp. 305–310, 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.26.27941>
- [3] M. Jagannathan and V. S. K. Delhi, "Litigation in construction contracts: literature review," *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, vol. 12, no. 1, p. 03119001, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000342](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000342)
- [4] S. El-Sayegh, I. Ahmad et al., "Construction disputes in the UAE: Causes and resolution methods," *Buildings*, vol. 10, no. 10, p. 171, 2020. <https://doi.org/10.3390/buildings10100171>
- [5] M. Fahad and H. M. Mohamad, "A review on impact of ineffective communication in construction projects leads to complicated litigation and arbitration," *International Journal of Business and Technology Management*, vol. 5, no. 3, pp. 29–41, 2023. <https://doi.org/10.55057/ijbtm.2023.5.3.3>
- [6] M. Ahmed, M. Badawy, T. Attia, and A. Zahir, "Causes of claims in building construction projects," Faculty of Engineering - Ain Shams University, 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2300052/v1>
- [7] L. Madhumitha, A. Sivakumar, G. Dhanasekar, and P. Karthikeyan, "Identification of causes of conflicts and disputes in construction industry," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 1065–1071, 2020. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C5154.029320>
- [8] S. Senaratne and S. Farhan, "Role of standard contracts in mitigating disputes in construction," *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, vol. 15, no. 1, p. 04522045, 2023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000593)

- [9] M. S. Zeberga, H. Haaskjold, and B. Hussein, "Digital technologies for preventing, mitigating, and resolving contractual disagreements in the AEC industry: a systematic literature review," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 150, no. 6, p. 03124002, 2024. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14032>
- [10] S. Yussof and A. A. Zaini, "Conceptual framework in mitigating construction dispute," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1022, no. 1, 2022, p. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1022/1/012015>
- [11] E. M. Annang, "Exploring strategies towards effective communication among construction project team in the Ghanaian construction industry," Doctoral dissertation, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Ghana, 2021.
- [12] M. N. Liphadzi and M. Liphadzi, "Communication factors that enable effective project outcomes in the South African construction industry," *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Manila, Philippines, 2023. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230436>
- [13] S. Yousefi, K. W. Hipel, and T. Hegazy, "Attitude-based conflict management for resolving disputes over water quality of the Seymareh River in Iran," *cientia Iranica*, vol. 27, no. 1, pp. 25–40, 2020. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20599>
- [14] S. Yousefi, K. W. Hipel, and T. Hegazy, "Attitude-based negotiation methodology for the management of construction disputes," *Journal of Management in Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 114–122, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000013)
- [15] S. Assaf, M. A. Hassanain, A. Abdallah, A. M. Sayed, and A. Alshahrani, "Significant causes of claims and disputes in construction projects in Saudi Arabia," *Built Environment Project and Asset Management*, vol. 9, no. 5, pp. 597–615, 2019. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-09-2018-0113>
- [16] M. Sinha and A. S. Wayal, "Dispute causation in construction projects," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 55, pp. 55–58, 2007.
- [17] K. K. Naji, M. M. Mansour, and M. Gunduz, "Methods for modeling and evaluating construction disputes: a critical review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45641–45652, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976109>
- [18] C. Amoah and H. Nkosazana, "Effective management strategies for construction contract disputes," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 41, no. 6, pp. 70–84, 2022. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2022-0004>
- [19] M. Shahbaznezhadfar and S. Yousefi, "Development of a dynamics-based model for analyzing strategic water–environmental conflicts: systems thinking instead of linear thinking," *Water Policy*, vol. 24, no. 1, pp. 83–100, 2022. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.145>
- [20] H. H. Mohamed, A. H. Ibrahim, and A. A. Soliman, "Reducing construction disputes through effective claims management," *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, no. 6, pp. 186–196, 2014. <https://doi.org/10.12691/ajcea-2-6-2>
- [21] M. B. Jelodar and T. W. Yiu, "Systematic framework of conflict, dispute and relationship quality in construction projects," 37th Annual Conference of the Australasian Universities Building Educators Association (AUBEA), Australia: The University of New South Wales, 2012.
- [22] J. M. Parchami, "Endorsement of RFP documents in DB & EPC project delivery systems," The 14th National Congress of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran, 2024.
- [23] J. M. Parchami and F. Akhoundi, "Identifying effective criteria on the selection of DBO, BOT and BOO project delivery systems in water and sewage projects," The 13th International Congress of Civil Engineering, Tehran, Iran, 2023. <https://civilica.com/doc/1852931>
- [24] J. M. Parchami, "Investigating the legal and technical challenges of using Design-Build & EPC contracts of Iran and Fidic," The

- First National Conference of Project Implementation by EPC Method, 2010. <https://civilica.com/doc/68199/>
- [25] M. Hoseingholi and M. P. Jalal, "Identification and analysis of owner-induced problems in design-build project lifecycle," *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, vol. 9, no. 2, p. 04516013, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000206)
- [26] S. T. Do, V. T. Nguyen, and N. H. Nguyen, "Relationship networks between variation orders and claims/disputes causes on construction project performance and stakeholder performance," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 30, no. 9, pp. 3817–3839, 2023. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2022-0066>
- [27] L. Zhu and S. O. Cheung, "Power of incentivization in construction dispute avoidance," *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, vol. 12, no. 2, p. 03720001, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000368](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000368)
- [28] A. Nosheen, A. Arewa, and H. M. Akhtar, "Preventive approach to unsubstantiated claims and disputes in the UK construction industry," International Conference on Civil Infrastructure and Construction, Qatar University Press, 2020, pp. 98–107. <https://doi.org/https://qspace.qu.edu.qa/handle/10576/14664>
- [29] J. Liu, H. Li, M. Skitmore, and Y. Zhang, "Experience mining based on case-based reasoning for dispute settlement of international construction projects," *Automation in Construction*, vol. 97, pp. 181–191, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.006>
- [30] A. C. Anumudu and G. M. Uchendu, "Examination of major causes of disputes and dispute resolution methods used in the Nigerian construction industry," *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, vol. 7, no. 3, p. 16, 2023. <https://doi.org/10.47001/IRJIET/2023.703003>
- [31] Y. Gamil and I. Abd Rahman, "Studying the relationship between causes and effects of poor communication in construction projects using PLS-SEM approach," *Journal of Facilities Management*, vol. 21, no. 1, pp. 102-148, 2023. <https://doi.org/10.1108/JFM-04-2021-0039>
- [32] A. Q. Adeleke, A. O. Windapo, et al., "Validating the influence of effective communication, team competency and skills, active leadership on construction risk management practices of Nigerian construction companies," *The Journal of Social Sciences Research*, vol. 6, pp. 460-465, 2018. <https://doi.org/10.32861/jssr.spi6.460.465>
- [33] Y. Gamil, I. A. Rahman, S. Nagapan, and N. Alemad, "Qualitative approach on investigating failure factors of Yemeni mega construction projects," *MATEC Web of Conferences*, vol. 103, 2017, p. 03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710303002>
- [34] A. Harikrishnan, A. S. Abdallah, S. K. Ayer, M. El Asmar, and P. Tang, "Feasibility of augmented reality technology for communication in the construction industry," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, p. 101363, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101363>
- [35] C. Tanriverdi, G. Atasoy, I. Dikmen, and M. T. Birgonul, "Causal mapping to explore emergence of construction disputes," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 27, no. 5, pp. 288-302, 2021. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.14900>
- [36] M. Khoshgoftar, A. H. A. Bakar, and O. Osman, "Causes of delays in Iranian construction projects," *International Journal of Construction Management*, vol. 10, no. 2, pp. 53-69, 2010. <https://doi.org/10.1080/15623599.2010.10773144>
- [37] A. J. H. Arar, "The causes of disputes that would lead to binding dispute resolution methods: A perspective of the Quebec construction industry," Doctoral dissertation, École de technologie supérieure, 2020. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2603>
- [38] O. K. Sabri and O. Torp, "Corrective and preventive action plan (CAPA) for disputes in construction projects: a Norwegian perspective," *Infrastructures*, vol. 7, no. 5, p. 63, 2022. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7050063>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Comparison of System Identification Methods for Extracting Modal Parameters (Case Study: 22 Bahman Bridge, Ferdowsi University of Mashhad)

Research Article

Nima Kowsari¹, Zaher Rezaie², Mahmud Hassanpour Golriz³, Ahmad Shooshtari^{4*}

DOI: [10.22067/jfcej.2025.91585.1336](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.91585.1336)

1. Introduction

Civil structures are critical infrastructure assets that require continuous structural health monitoring (SHM) to prevent catastrophic failures and minimize associated damages. Effective damage detection through SHM is essential for ensuring structural safety and longevity. In recent years, non-destructive testing (NDT) methods, particularly those based on vibration analysis, have gained significant attention. These techniques allow for the assessment of structural integrity without disrupting operational functionality. This research evaluates and compares the performance of various system identification techniques for extracting modal parameters from both numerically simulated and real-world structural vibration data.

2. Methodology

This study employed four prominent system identification methods: Stochastic Subspace Identification (SSI), a time-domain parametric method; Frequency Domain Decomposition (FDD) and Polynomial Least Squares Complex Frequency-domain (PLSCF), frequency-domain non-parametric and parametric methods, respectively; and Empirical Mode Decomposition (EMD), a time-frequency domain method. The efficacy of these methods was assessed using two distinct case studies: a numerical model of the ASCE-AISC benchmark structure and experimental data obtained from the 22 Bahman Bridge at Ferdowsi University of Mashhad.

3. Case studies

The ASCE-AISC benchmark structure, a 12-DOF analytical model, was simulated with incorporated noise and damping effects to provide a controlled environment for evaluating method accuracy (Figure 1).

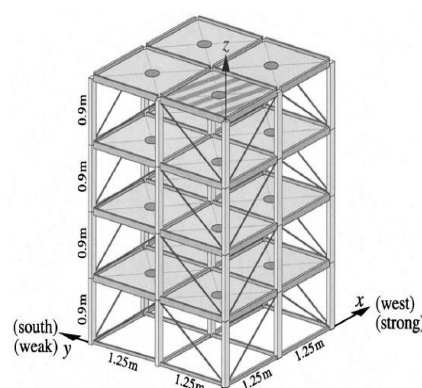


Figure 1- ASCE-AISC benchmark structure

The 22 Bahman Bridge is a single-span bridge measuring 12.6 meters in length and 3.25 meters in width (Figure 2). Modal testing was performed using piezoelectric accelerometers and a 16-channel data logger to record ambient vibration data. Two different sensor configurations were employed. Additionally, a finite element model (FEM) of the bridge, based on field measurements, was developed in SAP2000 to assess methods robustness and the effect of sensor configurations.



Figure 2- 22 Bahman Bridge

*Manuscript received January 9, 2025, Revised March 11, 2025, Accepted March 20, 2025.

¹ Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

² Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

³ Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

⁴ Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad. Email: ashoosht@um.ac.ir

4. Results and discussion

For the ASCE-AISC benchmark structure, the PLSCF method demonstrated superior accuracy in estimating natural frequencies, though it exhibited notable sensitivity to noise. SSI and FDD showed comparable performance, with FDD offering greater computational efficiency for large datasets. In contrast, EMD yielded lower accuracy, especially for higher-order modes, as summarized in Table 1.

For the 22 Bahman Bridge, SSI consistently provided the most accurate natural frequency estimates, with FDD also maintaining high accuracy. However, PLSCF showed some deviations in its estimates, while EMD again demonstrated the lowest accuracy. The frequency estimations for the two configurations are shown in Table 2.

Table 1- Estimated natural frequencies (Hz) of the ASCE-AISC benchmark structure

Method	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Analytical	9.4109	25.5449	38.6634	48.0073
SSI	9.7496	25.8891	39.4439	48.4052
FDD	9.1553	25.5127	37.9028	47.3022
PLSCF	9.4181	25.4767	38.9618	48.3439
EMD	9.258	23.9584	-	-

Table 2- Estimated natural frequencies (Hz) of the 22 Bahman Bridge

Configuration	Method	Mode 1	Mode 2	Mode 3
1	SSI	12.0035	49.8247	99.7489
	FDD	11.8594	49.7188	99.7109
	PLSCF	11.8561	50.1249	99.812
	EMD	11.4774	45.3655	-
2	SSI	12.082	51.1011	102.16
	FDD	12.2422	51.2578	102.523
	PLSCF	11.8904	50.6787	102.808
	EMD	11.8015	47.386	-

The study compared the estimated mode shapes with the finite element model, revealing that all methods successfully captured the fundamental vibration patterns, albeit with varying degrees of accuracy. The FDD and SSI methods exhibited the closest agreement with the analytical model, demonstrating robust performance in modal identification. In contrast, the PLSCF method showed a tendency to overestimate modal amplitudes, particularly in higher-order modes. While EMD proved effective for extracting low-frequency, dominant modes, its performance degraded significantly for higher-order modes. These observations were quantitatively validated using the Modal Assurance Criterion (MAC) and Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC), Figure 3 presents the MAC matrix for the first sensor configuration of the 22 Bahman Bridge.

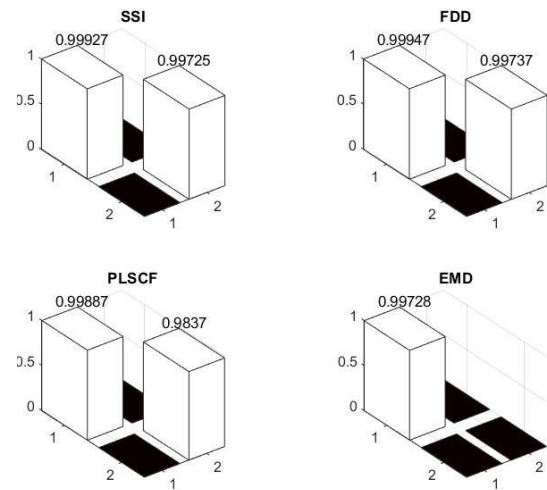


Figure 3- MAC matrix: Analytical vs. estimated mode shapes (Config. 1) - 22 Bahman Bridge

For the real-world study, FDD and SSI demonstrated relative errors below 6% in the first sensor configuration and below 5% in the second configuration for the first mode. In contrast, PLSCF showed deviations up to 9%, and EMD up to 17%. The MAC values indicated strong overall correlation between estimated and analytical mode shapes, with FDD consistently yielding the best results. COMAC analysis showed excellent local agreement, though only the first two modes were analyzed.

5. Conclusion

This research presents a comparative analysis of SSI, FDD, PLSCF, and EMD for modal parameter estimation in structural health monitoring. Through numerical simulations and field data analysis, the study demonstrates each method's distinct strengths and limitations. The results show that FDD and SSI consistently provide the most accurate and reliable estimations, as evidenced by their strong correlation with analytical models and superior MAC/COMAC values.

Key findings reveal that FDD offers particular advantages for field applications due to its noise robustness and computational efficiency, while SSI provides precise modal identification but requires careful parameter selection. PLSCF proves ideal for controlled laboratory conditions with known inputs, though it exhibits limitations in noise-contaminated environments. EMD remains preferable for non-stationary signal analysis but requires methodological enhancements to improve accuracy.



مقایسه روش‌های شناسایی سیستم جهت استخراج پارامترهای مودال (مطالعه موردی: پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد)*

مقاله پژوهشی

نیما کوثری^(۱) ظاهر رضایی^(۲) محمود حسن پور گلریز^(۳) احمد شوشتری^(۴) 

DOI: 10.22067/jfpei.2025.91585.1336

چکیده شناسایی مشخصات دینامیکی سیستم‌ها از مسائل مهم در پایش سلامت سازه‌ها می‌باشد. با داشتن شاخص‌های حساس به آسیب نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی و با مقایسه آن‌ها با وضعیت اولیه سیستم، می‌توان آسیب‌ها را شناسایی کرد. در این مقاله کارایی روش‌های مرسوم شناسایی سیستم جهت محاسبه پارامترهای مودال بررسی می‌شود. بدین منظور در حوزه زمان روش زیر فضای تصادفی (SSI)، در حوزه فرکانس روش‌های تجزیه حوزه فرکانس (FDD) و حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی (PLSCF) و در حوزه زمان - فرکانس روش تجزیه مود تجربی (EMD) انتخاب شده است. جهت مقایسه نتایج و بررسی دقت روش‌ها از مدل عددی سازه پنج مارک ASCE-AISC استفاده شده است. علاوه بر آن برای بررسی کارایی روش‌ها با داده‌های میدانی و دارای نویز محیطی داده‌های ارتعاشی حاصل از انجام آزمایش مودال بر روی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد روش‌های FDD و SSI عملکرد دقیق‌تر و مناسب‌تری برای تخمین ویژگی‌های مودال سازه‌ها دارند. روش PLSCF نسبت به نویز محیطی حساس می‌باشد و نویز موجود در سیگنال‌ها سبب بروز خطا در نتایج آن خواهد شد. روش EMD برای پردازش سیگنال غیر ایستا و غیر خطی مناسب بوده اما دقت پایین تری نسبت به سایر روش‌ها دارد. این نتایج می‌تواند راهنمای محققان حوزه پایش سلامت سازه‌ها جهت انتخاب روش برای پیاده سازی در سازه‌ها یا توسعه هر یک از این روش‌ها قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی شناسایی سیستم، زیر فضای تصادفی، تجزیه حوزه فرکانس، حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های نمایی مختلط در حوزه فرکانس، تجزیه مود تجربی

Comparison of System Identification Methods for Extracting Modal Parameters (Case Study: 22 Bahman Bridge, Ferdowsi University of Mashhad)

Nima Kowsari Zaher Rezaie Mahmud Hassanpour Golriz Ahmad Shooshtari*

Abstract System identification plays a crucial role in structural health monitoring. By using damage-sensitive features such as natural frequencies and mode shapes and comparing these features to the healthy state of the system, damage can be identified. This paper investigates the efficiency of system identification methods. To this end, the Stochastic Subspace Identification (SSI) method in the time domain, the Frequency Domain Decomposition (FDD) and Poly Reference Least Squares Complex Frequency domain (PLSCF) methods in the frequency domain, and the Empirical Mode Decomposition (EMD) method in the time-frequency domain were selected for evaluation. To assess the accuracy of these methods, both numerical and experimental data were utilized. The numerical data were obtained from the ASCE-AISC benchmark structure, while the experimental data consisted of vibration data obtained from a modal test performed on the 22 Bahman Bridge at Ferdowsi University of Mashhad. This approach allowed for an evaluation of method performance under controlled conditions (numerical) and in the presence of environmental noise (experimental). The results demonstrate that the FDD and SSI methods exhibited superior accuracy and suitability for estimating the modal characteristics of structures. The PLSCF method proved to be sensitive to environmental noise, leading to errors in the estimated modal parameters. The EMD method, while suitable for processing non-stationary and nonlinear signals, exhibited lower accuracy compared to other methods. These findings provide valuable information for researchers in the field of structural health monitoring in selecting appropriate methods for implementation in real-world applications or in developing further advancements to these techniques.

Key words System identification, Stochastic Subspace Identification, Frequency Domain Decomposition, Poly Reference Least Square Complex Frequency domain, Empirical Mode Decomposition

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱/۲۴ می‌باشد.

(۱) دانشجو دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) دانشجو دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۳) دانشجو دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۴) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

مقدمه

سازه‌های عمرانی از سرمایه‌های با ارزشی هستند که تخریب ناگهانی و پیش‌بینی نشده آن‌ها باعث خسارت‌های مالی و جانی بزرگی می‌شود. ایده پایش سلامت سازه برای تشخیص زود هنگام آسیب همواره مورد توجه محققین این حوزه بوده است. در سالیان اخیر روش‌های پایش سلامت سازه‌ها بیشتر بر روی روش‌های غیر مخرب متمرکز شده است. روش‌های غیرمخرب را می‌توان در گروه‌های بازرسی چشمی، آسیب‌یابی محلی و آسیب‌یابی کلی طبقه‌بندی کرد. در روش‌های محلی وجود، نوع و شدت آسیب با دقت بالایی مشخص می‌شود. این نوع آسیب‌یابی با استفاده از ابزار فراصوت، پرتونگاری، مغناطیسی، حرارتی و... صورت می‌گیرد. این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی در سازه‌های بزرگ و پیچیده می‌باشد و نمی‌تواند رفتار کلی سازه را ارزیابی کند. روش‌های کلی خود به دو دسته روش‌های استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شود. در روش‌های استاتیکی در هنگام انجام آزمایش کاربری سازه مختل می‌شود و سازه به‌صورت آبی ارزیابی نمی‌شود. روش‌های دینامیکی با ثبت ارتعاشات سازه، آنالیز این سیگنال‌ها و به‌دست آوردن شاخصه‌های حساس به آسیب، آسیب را تخمین می‌زنند. شناسایی دقیق سیگنال‌های سازه و تفسیر صحیح آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در پایش سلامت سازه‌ها معمولاً تعداد زیادی از داده‌های گسسته موجود است که می‌بایست شاخصه‌های حساس به آسیب را از آن‌ها استخراج نمود. انتخاب روش مناسب جهت پردازش سیگنال‌های سازه تاثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی دارد. روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال خود به سه دسته در حوزه زمان، در حوزه فرکانس و در حوزه زمان - فرکانس قابل تقسیم است. در این تحقیق در حوزه زمان روش زیر فضای تصادفی، در حوزه فرکانس روش‌های تجزیه حوزه فرکانس و حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی و در حوزه زمان - فرکانس روش تجزیه مود تجربی انتخاب شده‌اند. جهت مقایسه نتایج و بررسی دقت روش‌ها از مدل عددی سازه بنچ مارک ASCE-AISC استفاده شده است. همچنین برای بررسی کارایی روش‌ها با داده‌های واقعی و دارای نویز محیطی داده‌های ارتعاشی حاصل از انجام آزمایش مودال بر روی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد مورد استفاده قرار گرفته است.

روش شناسایی زیرفضای تصادفی توسط اوورشی (Overschee) و مور (Moor) [1] ارائه شد. این روش به عنوان یکی از روش‌های قدرتمند شناسایی سیستم در زمینه آنالیز مودال می‌باشد. این روش به صورت پارامتری در حوزه زمان است. روش زیرفضای تصادفی مشخصات مودال سیستم را با استفاده از ماتریس فضای حالت محاسبه می‌کند. این روش برای هر یک از حالت‌های ارتعاش محیطی و ارتعاش اجباری قابل استفاده است. از مهمترین ویژگی‌های این روش می‌توان به سرعت بالا (عدم وجود الگوریتم تکرار شونده در روش) و دقت قابل قبول آن اشاره نمود.

پیترز (Peeters) و همکاران [2] با تاکید بر اطلاعات سنسور مرجع، بهبود قابل توجهی در سرعت و دقت این روش ایجاد کردند این روش به روش زیرفضای تصادفی مبتنی بر کوواریانس معروف است.

انتخاب مناسب پارامترهای تعریف شده توسط کاربر در الگوریتم زیرفضای تصادفی مبتنی بر کوواریانس یک مسئله چالش برانگیز است. لی (Li) و همکاران [3] به مطالعه تجزیه و تحلیل اثر چهار پارامتر تعریف شده توسط کاربر برای شناسایی ویژگی‌های مودال سدهای قوسی بلند پرداختند. در این پژوهش از دو مدل با و بدون در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه استفاده شد. مقادیر پیشنهاد شده در این مطالعه می‌تواند جهت تخمین ویژگی‌های مودال سدهای قوسی در آینده سودمند واقع شود.

شیم (Shim) و همکاران [4] در پژوهشی روشی مبتنی بر روش زیر فضای تصادفی و شبکه‌های عصبی به نام روش شناسایی زیرفضای تصادفی تطبیق پذیر با حافظه کوتاه و بلند مدت را برای ارزیابی تغییرات پارامترهای مودال سازه پیشنهاد دادند. این روش پاسخ‌های قبل و بعد آسیب را به طور همزمان در نظر گرفته و تغییرات فرکانسی که به سبب آسیب ایجاد شده است را تخمین می‌زند. در این روش از روش زیرفضای تصادفی مبتنی بر کوواریانس برای برای ساخت داده‌های آموزشی برای شبکه عصبی استفاده شده است. این روش بر روی یک سازه چهار درجه آزادی و یک ساختمان ۵۵ طبقه بررسی شده است.

روش تجزیه حوزه فرکانس توسط برینکر (Brincker) و همکاران [5,6] ارائه شد. این روش برای داده‌های ورودی به صورت ارتعاشات محیطی توسعه یافته است. این روش از روش‌های غیر پارامتری در حوزه فرکانس می‌باشد. از مزیت‌های

مرجعی در حوزه فرکانس انجام شده است. در این روش با بکارگیری زیر فضاهاى مختلف ماتریس‌های مشاهده‌پذیری و کنترل‌پذیری حوزه فرکانس محاسبه و برای تخمین ویژگی‌های مودال سیستم استفاده شده است.

استفنسن (Steffensen) و همکاران [11] روش حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی را به عنوان یک معیار در تحلیل مودال عملیاتی معرفی کردند. در حالی که کارایی این روش به خوبی شناخته شده بود، یک چارچوب جامع برای کمی کردن عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای مودال تخمین زده شده، به ویژه شکل‌های مودی، همچنان وجود نداشت. آن‌ها در این پژوهش به رفع این محدودیت پرداختند. در این پژوهش با بهره‌گیری از نظریه اختلال مرتبه اول و روش دلتا، عبارات تحلیلی برای تمام پارامترهای مودال استخراج شد که در آن عدم قطعیت ناشی از تخمین ضرایب چند جمله‌ای با مقدار واقعی در مدل‌سازی پاسخ فرکانسی در روش حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی در نظر گرفته می‌شد. این رویکرد تحلیلی امکان کمی‌سازی کارآمد عدم قطعیت برای تحلیل مودال مبتنی بر این روش را فراهم می‌آورد.

هوانگ (Huang) و همکاران [12] روشی جدید برای پردازش سیگنال‌های غیرایستا ارائه دادند این تبدیل یکی از اکتشافات مهم در حوزه پردازش سیگنال شناخته می‌شود. این روش با ترکیب روش تجزیه مود تجربی و استفاده از تبدیل هیلبرت دامنه و فرکانس سیگنال را هر لحظه استخراج می‌کند. این روش در حوزه زمان فرکانس بوده و به صورت تنها خروجی بوده و توانایی آنالیز سیگنال‌های غیر ایستا و غیرخطی را دارد و از این رو یکی از قوی ترین روش‌های پردازش سیگنال به حساب می‌آید.

وو (Wu) و هوانگ (Huang) [13] روش تجزیه مود تجربی مجموعی که ارتقا یافته روش تجزیه مود تجربی است را ارائه دادند این روش با بهره‌گیری از خصوصیات آماری نویز سفید و مجموعه‌ای از عملیات ال‌ک کردن سعی در بهبود روش تجزیه مود تجربی دارد.

یه (Yeh) و همکاران [14] روش تجزیه مود تجربی مجموعی مکمل را ارائه کردند. این روش با اضافه و کم کردن نویز از سیگنال سعی در بازسازی کامل سیگنال دارد. با این حال

این روش می‌توان به دقت بالا، هزینه محاسباتی کم و حساسیت پایین به نویز محیطی اشاره کرد. این روش به طور گسترده برای شناسایی سیستم سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است.

گید (Gade) و همکاران [7] در پژوهش‌های این روش را توسعه و روش تجزیه حوزه فرکانس بهبود یافته (EFFD) را ارائه دادند. این روش علاوه بر تخمین فرکانس طبیعی و مود شیب‌ها نسبت میرایی را نیز تخمین می‌زد.

کاردونی (Cardoni) و همکاران [8] در مطالعه‌ای به بررسی و بهبود روش‌های موجود برای تخمین فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی پرداختند. آن‌ها رویکردی جدید را ارائه داده‌اند که از روش تجزیه حوزه فرکانس و معیار اطمینان مودال استفاده می‌کند. در این مطالعه، عوامل تاثیرگذاری بر پاسخ سازه مانند سطح نویز، طول رکورد شتاب، و چیدمان حسگرها برای پل کابلی یوانگه در چین مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها با انجام تحلیل حساسیت، سعی در شناسایی تأثیر این عوامل بر دقت ارزیابی نتایج داشته‌اند. نوآوری این تحقیق در تفسیر نتایج تحلیل‌های حساسیت نهفته است که شامل ترسیم نتایج در یک دیاگرام پایداری است. با مقایسه نتایج تحلیل‌های حساسیت مختلف، و در نظر گرفتن مقدار قابل قبول برای معیار اطمینان مودال نیاز به تعیین مقدار پارامترها بر اساس تجربه کاربر حذف شده که می‌تواند به بهبود دقت و صحت نتایج کمک کند.

روش حداقل مربعات چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی در حوزه فرکانس در سال ۲۰۰۳ توسط گیوم (Guillaume) و همکاران [9] ارائه شد. این روش بر خلاف سایر روش‌های ارائه شده به صورت ورودی، خروجی است. و اثر ورودی‌های مختلف بر خروجی‌ها را منظور می‌کند. هزینه محاسباتی این روش بالا بوده و دقت بالایی دارد. با این حال برای تخمین دقیق مشخصات سازه نیاز به داده‌های با کیفیت و با نویز کم است.

آمادور (Amador) و برینکر [10] با استفاده از روشی مبتنی بر چند جمله‌ای‌های مختلط چند مرجعی در حوزه فرکانس به تشخیص آسیب در نمونه‌های فولادی پرداختند. در این پژوهش بر استخراج دقیق ویژگی‌های مودال از داده‌های ارتعاشات اندازه‌گیری شده تمرکز شده است. فرآیند شناسایی با استفاده از رویکرد جدیدی مبتنی بر روش چند جمله‌ای‌های مختلط چند

بررسی قرار می‌گیرد. بررسی روش‌های شناسایی سیستم برای این دو دسته داده عددی و میدانی امکان مقایسه دقیق‌تر روش‌ها و انتخاب بهترین روش شناسایی سیستم را برای محققان و فعالان حوزه پایش سلامت سازه فراهم می‌آورد. جدول (۱) ویژگی‌های کلیدی روش‌های مورد بررسی در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ ویژگی‌های کلیدی روش‌های مورد بررسی در پژوهش

EMD	PLSCF	FDD	SSI	ویژگی
حوزه زمان-فرکانس	حوزه فرکانس	حوزه فرکانس	حوزه زمان	حوزه کاربرد
تنها خروجی	ورودی-خروجی	تنها خروجی	تنها خروجی	داده‌های مورد نیاز
متوسط	به نسبت بالا	کم	متوسط	حساسیت به نویز
غیرایستا	ایستا	ایستا	ایستا	ایستا/غیرایستا
بالا	بالا	کم	متوسط	هزینه محاسباتی

روش‌های شناسایی سیستم

روش زیرفضای تصادفی

این روش به صورت پارامتری در حوزه زمان است. در روش‌های پارامتری معمولاً مدلی ریاضی بر داده‌ها برازش داده می‌شود. اصول این روش بر مبنای مدل فضای حالت و ارتباط آن با مشخصات دینامیکی سیستم می‌باشد. به عبارتی رفتار دینامیکی سیستم با معادلات فضای حالت شبیه‌سازی می‌شود. این مدل با فرض ورودی به صورت ارتعاشات محیطی به صورت روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شود.

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) پارامترهای x_k و y_k به ترتیب بردار حالت و خروجی نمونه برداری شده می‌باشد. A ماتریس حالت، C ماتریس خروجی، w_k نویز فرایند و v_k نویز قابل اندازه‌گیری است. نویز فرایند نشان دهنده خطای موجود در مدل‌سازی و نویز اندازه‌گیری خطای اندازه‌گیری سنسورها می‌باشد. با محاسبه ماتریس‌های A و C می‌توان فرکانس، میرایی و شکل‌های مودی سیستم را مطابق روابط (۳) تا (۶) محاسبه کرد.

در این روش سیگنال به صورت کامل بازسازی نمی‌شود و شبیه‌سازی‌های مختلف تعداد مودهای متفاوتی تولید می‌کنند.

تورس (Torres) و همکاران [15] روش تجزیه مود تجربی مجموعی کامل با نویز تطبیق‌پذیر را جهت رفع اشکالات تجزیه مود تجربی مجموعی و تجزیه مود تجربی مجموعی کامل ارائه دادند و نشان دادند این روش به تعداد کمتر از نصف تعداد غربالگری‌های تجزیه مود تجربی مجموعی نیاز دارد که منجر به کاهش هزینه محاسباتی شده و سیگنال را به طور کامل بازسازی می‌کند.

وزیرزاده و همکاران [16] با به کارگیری روش تجزیه مود تجربی مجموعی کامل و تبدیل هیلبرت فرکانس و شکل مودی مود اول یک قاب خمشی یک دهانه با سه طبقه را تخمین زدند؛ سپس با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی سیگنال را بر مبنای اندازه‌گیری‌های قبلی پیش‌بینی و عدم هم‌خوانی بین سیگنال اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده را به عنوان شاخصه آسیب انتخاب و مکان آسیب را تخمین زدند. خروجی مراحل قبل به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی دیگری در نظر گرفته شده و شدت آسیب تخمین زده شد.

صفار یوسفی‌فر و همکاران [17] روشی ترکیبی مبتنی بر روش تجزیه مود تجربی مجموعی کامل با نویز تطبیق‌پذیر و پیش‌بینی خطا در سری‌های زمانی ارائه کردند. در این روش تجزیه مود تجربی مجموعی کامل با نویز تطبیق‌پذیر برای پردازش سیگنال استفاده می‌شود سپس تابع مود ذاتی مربوط به مود اول به عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شده و مقادیر آن توسط شبکه عصبی تخمین زده می‌شود. آن‌ها با در نظرگیری سه شاخصه حساس به آسیب بر مبنای اختلاف سیگنال موجود و تخمین زده شده به یافتن مکان و شدت آسیب در سه سازه پل Z24 در سوئیس، سازه آزمایشگاهی دانشگاه فلوریدا و سازه‌ای شبیه‌سازی شده در دانشگاه قطر پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده عملکرد قوی این روش برای تشخیص مکان و شدت آسیب بود.

در این پژوهش دقت روش‌های مختلف شناسایی سیستم‌ها برای تعیین ویژگی‌های مودال بر روی سازه مرجع ASCE_AISC بررسی شده و با مقدار واقعی حاصل از مدل اجزاء محدود سازه مقایسه می‌شود. این روش‌ها با داده‌های میدانی حاصل از انجام آزمایش مودال بر روی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد مورد

در رابطه (۸) $G_{yy}(\omega)$ ماتریس طیف توانی پاسخ ها و $G_{uu}(\omega)$ ماتریس طیف توانی در مختصات مودال است. اگر مختصات مودال غیرهمبسته باشد، ماتریس چگالی طیف توان در مختصات مودال قطری خواهد بود. به عبارتی رابطه (۸) همان تجزیه مقدار تکین $G_{yy}(\omega)$ است. رابطه (۹) شکل کلی تجزیه مقدار تکین را نشان می دهد.

$$G_{yy}(\omega_i) = U \Sigma V^H \quad (9)$$

در رابطه (۹) ماتریس های U و V ماتریس های تکین و Σ ماتریس قطری مقادیر تکین است. با توجه به این که ماتریس چگالی توان پاسخ ها هرمیتی و معین مثبت است می توان نشان داد ماتریس های U و V برابر می باشند. با رسم مقدار اول مقادیر تکین در برابر فرکانس های مختلف و با استفاده از روش جستار قله فرکانس های طبیعی سیستم محاسبه می شود. بردار تکین متناظر با این فرکانس ها استخراج شده از ماتریس های تکین نشان دهنده شکل های مودی می باشد.

روش حداقل مربعات چند جمله ای های مختلط چند

مرجعی

این روش در واقع پیاده سازی روش معروف حداقل مربعات نمایی مختلط (LSCE) در حوزه فرکانس است. یکی از مزیت های این روش هزینه محاسباتی کم جهت ساخت دیاگرام پایداری می باشد. رابطه بین پاسخ و تحریک (ورودی) در حوزه فرکانس از طریق توصیف ماتریسی کسری در سمت راست (RMFD) (Right Matrix Fraction Description) مدل سازی می شود.

$$\hat{H}_0(\omega) = N_0(\omega)D^{-1}(\omega) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) می توان ماتریس های N_0 و D بر حسب چند جمله ای مختلط نمایی مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) بیان کرد.

$$N_0(\omega) = \sum_{j=0}^N \Omega_j(\omega) B_{0j} \quad (11)$$

$$D(\omega) = \sum_{j=0}^N \Omega_j(\omega) A_j \quad (12)$$

در رابطه (۱۱) و (۱۲) ضرایب B_{0j} و A_j پارامترهایی هستند که با استفاده از روش حداقل مربعات تخمین زده می شوند. با محاسبه این ضرایب می توان ماتریس های A و C معرفی شده

$$\bar{\lambda}_i = \log(\lambda_i) f_s \quad (3)$$

$$f_i = -\frac{|\bar{\lambda}_i|}{2\pi} \quad (4)$$

$$\xi_i = -\frac{\text{Real}(\bar{\lambda}_i)}{|\bar{\lambda}_i|} \quad (5)$$

$$\Phi_i = C \Phi_i \quad (6)$$

در روابط (۳) تا (۶) پارامترهای λ_i و Φ_i به ترتیب مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس A می باشد. f_i ، ξ_i و Φ_i به ترتیب فرکانس، نسبت میرایی، و شکل های مودی سیستم می باشد. برای محاسبه ماتریس های A و C با استفاده از داده های خروجی ماتریس هنکل تشکیل و با تجزیه مقدار تکین (Singular Value Decomposition) (SVD) ماتریسی به نام ماتریس مشاهده پذیری (Observability matrix) قابل دستیابی است که شامل ماتریس های A و C است.

تعداد مودهای شناسایی شده در این روش به ابعاد ماتریس A یا به عبارتی به درجه مدل وابسته است. با توجه به این که معمولاً تعداد مودهای سیستم مشخص نیست انتخاب درجه بالا منجر به تشخیص مودهای جعلی و انتخاب درجه پایین سبب عدم شناسایی مودهای سازه خواهد شد. برای حل این مشکل پیشنهاد می شود از دیاگرام پایداری استفاده شود.

روش تجزیه حوزه فرکانس

این روش به صورت غیر پارامتری در حوزه فرکانس است و در عمل توسعه یافته تکنیک جستار قله در حوزه فرکانس می باشد. روش تجزیه حوزه فرکانس برای ارتعاشات محیطی توسعه داده شده است. در این روش فرض می شود ورودی سازه به صورت نویز سفید است. در این روش صیف چگالی توان (Power Spectral Density) (PSD) برای سیگنال اندازه گیری شده محاسبه و با انجام تجزیه مقدار تکین بر روی آن مودهای سازه تشخیص داده می شود. می توان پاسخ سازه در مختصات مودال را به صورت رابطه (۷) بیان کرد با گرفتن تبدیل فوریه از رابطه (۷) و محاسبه ماتریس طیف چگالی برای فرکانس ω_i رابطه (۸) بدست می آید.

$$Y(t) = \Phi u(t) \quad (7)$$

$$G_{yy}(\omega_i) = \Phi G_{uu}(\omega_i) \Phi^T \quad (8)$$

۵. مؤلفه‌ای که شرط توقف را ارضا کند به عنوان IMF در نظر گرفته می‌شود.

۶. مقدار IMF از سیگنال اصلی کم شده و باقی‌مانده به دست می‌آید.

۷. باقی‌مانده به عنوان سیگنال اصلی در نظر گرفته شده و مراحل ۱ الی ۶ تکرار می‌شود تا IMFهای بعدی محاسبه شوند. این عملیات تا زمانی که باقی‌مانده قابل تجزیه باشد تکرار می‌شود. محتوای فرکانس بالا در IMFها به تدریج از IMF_1 به IMF_n حذف شده و در نتیجه IMFهای انتهایی دارای محتوای فرکانسی پایین‌تری هستند. سیگنال اصلی بر حسب IMFهای محاسبه شده به صورت رابطه (۱۳) نوشته می‌شود.

$$x = \sum_{i=1}^n IMF_i + r_n \quad (13)$$

در این روش برای به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی، هیستوگرام فرکانس‌های آنی برای هر IMF رسم می‌شود. مرکز بازه‌ای که بیشترین تعداد فرکانس را دارد نشان‌دهنده فرکانس طبیعی سازه در آن مود است. با تقسیم دامنه هر یک از IMFها در هر طبقه بر دامنه IMF مربوط به همان مود در طبقه آخر شکل مودی سازه را تخمین زده می‌شود.

مطالعه عددی: سازه پنج مارک ASCE_AISC

در این پژوهش از مدل عددی سازه پنج مارک ASCE_AISC جهت مقایسه دقت روش‌ها و مقایسه پارامترهای به دست آمده از روش‌ها با مدل اجزاء محدود استفاده شده است.

مشخصات سازه پنج مارک ASCE_AISC

در بسیاری از مطالعات پایش سلامت سازه روش‌های مختلف بر سازه‌های مختلف اعمال می‌شود. این موضوع سبب پیچیدگی در مقایسه روش‌ها خواهد شد. برای حل این مشکل گروه پایش سلامت ASCE_AISC یک سازه پنج مارک را برای بررسی روش‌های پایش سلامت پیشنهاد کرد [18]. استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده از یک مدل تحلیلی مبتنی بر یک سازه واقعی گزینه مناسبی برای بررسی روش‌های مختلف می‌باشد. استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده به محققان امکان می‌دهد درک بهتری از حساسیت روش‌ها و جنبه‌های مختلف مسئله مانند اختلاف بین مقدارهای تخمین زده شده با مقدارهای واقعی، وجود نویز در سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و اثر داده‌های ناقص داشته باشند.

در روش زیرفضای تصادفی را محاسبه و به طور مشابه مشخصات سیستم را شناسایی کرد.

روش تجزیه مود تجربی

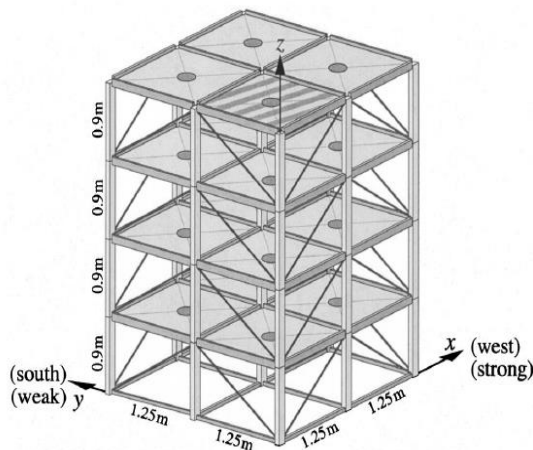
در سال ۱۹۹۸ تبدیل هیلبرت - هوانگ از ترکیب روش تجزیه مود تجربی (Empirical Mode Decomposition) (EMD) و تبدیل هیلبرت برای پردازش سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا ارائه شد [12]. در روش تجزیه مود تجربی سیگنال ورودی به چند سیگنال که هر کدام محتوای فرکانسی تقریباً ثابتی دارند تجزیه می‌شود. به این سیگنال‌ها توابع مود ذاتی (Intrinsic Mode Function) (IMF) گفته می‌شود. دامنه و فرکانس توابع مود ذاتی در زمان متغیر بوده و سیگنال‌هایی غیرایستا هستند. از طرفی تبدیل هیلبرت یک اپراتور خطی در پردازش سیگنال است که شکل تحلیلی سیگنال را به دست می‌دهد. سیگنال تحلیلی یک سیگنال با مقادیر مختلط است که طیف فرکانسی آن یک طرفه می‌باشد. این سیگنال محتوای فرکانسی سیگنال اولیه را حفظ می‌کند و سبب کاهش خطا و حذف نویز بین نمونه‌ای می‌شود. با استفاده از این تبدیل می‌توان دامنه و فرکانس آنی سیگنال را محاسبه کرد. اساس کارکرد این روش تجزیه سیگنال به توابع مود ذاتی و گرفتن تبدیل هیلبرت از آن‌ها می‌باشد.

تابع مود ذاتی به عنوان تابعی که دو شرط زیر را ارضا کند تعریف می‌شود.

۱. تعداد نقاط اکسترمم و تعداد نقاط صفر تابع مفروض باید برابر باشند یا حداکثر یک واحد اختلاف داشته باشند.
۲. در هر نقطه از تابع میانگین پوش ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های سیگنال برابر صفر باشد.

الگوریتم روش تجزیه مود تجربی به شرح زیر است.

۱. تمامی اکسترمم‌های محلی سیگنال مشخص می‌شود.
۲. منحنی‌های پوش بالا و پایین با برازش منحنی از ماکسیمم و مینیمم‌های محلی محاسبه می‌شود.
۳. میانگین پوش بالا و پایین از سیگنال کم می‌گردد تا مؤلفه اول به دست آید.
۴. معیار توقف (نشان‌گر شروط وجود IMF) کنترل می‌شود. در صورت عدم ارضای معیار توقف با در نظرگیری مؤلفه اول به عنوان سیگنال به مرحله اول بازگشت داده می‌شود.



شکل ۱ مدل تحلیلی سازه ASCE_AISC [18]

در این پژوهش جهت مقایسه دقت روش‌ها سازه تحلیلی به صورت ۱۲ درجه آزادی، متقارن و در حالت بارگذاری برای همه طبقات در جهت y در نظر گرفته شده است. سیگنال پاسخ سازه برای حالت سالم سازه با در نظرگیری درصد میرایی ۵ در صد و فرکانس نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز، مدت زمان سیگنال ۶۰ ثانیه و سطح نویز ۵ واحد و شدت نیرو اعمالی ۵۰ واحد لحاظ شده است. جدول (۳) و شکل (۲) مشخصات مودال سازه تحلیلی در حالت سالم در جهت y را برای سازه سالم نمایش می‌دهد.

سیگنال‌های پاسخ سازه در جهت y در طبقات یک الی چهار در شکل (۳) نشان داده شده است. قابل ذکر است ورودی سیستم در این مدل تحلیلی به صورت سیگنال نویز سفید در نظر گرفته شده است.

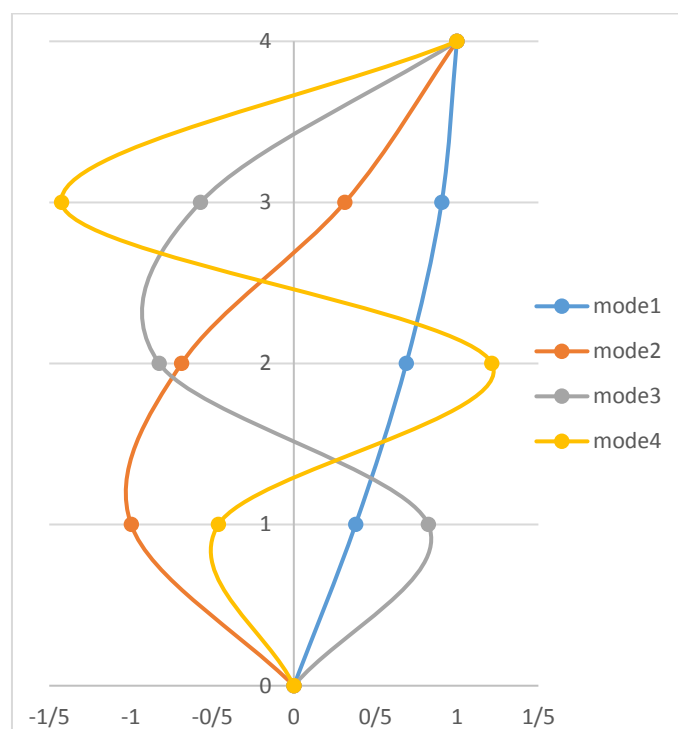
مدل تحلیلی ASCE_AISC را بر مبنای سازه مورد استفاده توسط بلک (Black) و ونتورا (Ventura) [19] در سال ۱۹۹۸ انتخاب شده است. سازه انتخاب شده مدلی با مقیاس یک‌چهارم از قاب فولادی چهار طبقه، دو دهانه در دو دهانه در آزمایشگاه تحقیقات مهندسی زلزله در دانشگاه بریتیش کلمبیا است. این سازه دارای پلان ۲٫۵ متر در ۲٫۵ متر و ارتفاع ۳٫۶ متر است. اعضای سازه از فولاد با تنش تسلیم اسمی ۳۰۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. مقاطع غیرمعمول هستند و برای یک مدل مقیاس طراحی شده‌اند شکل (۱) مدل تحلیلی این قاب و جدول (۲) مشخصات مقاطع آن را نشان می‌دهد. تمام ستون‌ها طوری جهت‌دهی شده‌اند که خمش قوی‌تر در جهت x باشند. تیرهای کف طوری جهت‌دهی شده‌اند که خمش قوی‌تری در جهت عمودی باشد در هر طبقه از هر وجه، دو مهاربند وجود دارد که ممکن است برای شبیه‌سازی آسیب حذف شوند. مشخصات دال به شرح چهار دال ۸۰۰ کیلوگرمی در سطح اول، چهار دال ۶۰۰ کیلوگرمی در هر یک از طبقات دوم و سوم و برای طبقه چهارم، چهار دال ۴۰۰ کیلوگرمی یا سه دال ۴۰۰ کیلوگرمی و یک دال ۵۵۰ کیلوگرمی برای ایجاد عدم تقارن می‌باشد. دو مدل اجزای محدود مبتنی بر این سازه برای تولید داده‌های پاسخ شبیه‌سازی شده توسعه داده شدند. اولین مدل یک مدل ساختمان برشی ۱۲ درجه آزادی است که تمام حرکت‌ها به جز دو انتقال افقی و یک چرخش در هر طبقه را محدود می‌کند. دومین مدل یک مدل ۱۲۰ درجه آزادی است که تنها گره‌های هر طبقه دارای انتقال افقی و چرخش درون صفحه‌ای یکسان می‌باشند.

جدول ۲ مشخصات مقاطع سازه ASCE_AISC [18]

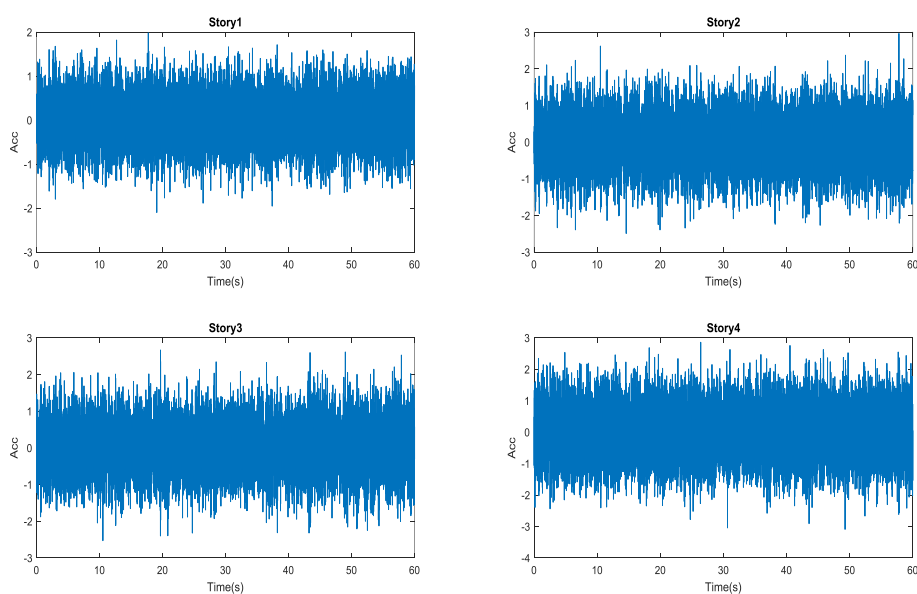
مشخصه	ستون‌ها	تیرهای کف	مهاربندها
نوع مقطع	B100×9	S75×11	L25×25×3
مساحت سطح مقطع (m^2)	$1,133 \times 10^{-3}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$0,141 \times 10^{-3}$
مان اینرسی (جهت قوی) ($I (m^4)$)	$1,97 \times 10^{-6}$	$1,22 \times 10^{-6}$	0
مان اینرسی (جهت ضعیف) ($I (m^4)$)	$0,664 \times 10^{-6}$	$0,249 \times 10^{-6}$	0
ثابت پیچش سنت و نانت ($J (m^4)$)	$8,01 \times 10^{-9}$	$38,2 \times 10^{-9}$	0
مدول یانگ ($E (Pa)$)	2×10^{11}	2×10^{11}	2×10^{11}
مدول برشی ($G (Pa)$)	$E/2,6$	$E/2,6$	$E/2,6$
جرم واحد حجم ($\rho (kg/m^3)$)	۷۸۰۰	۷۸۰۰	۷۸۰۰

جدول ۳ مشخصات مودال سازه سالم در جهت Y

شماره مود	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
فرکانس (Hz)	۹,۴۱۰,۹	۲۵,۵۴۴,۹	۳۸,۶۶۳,۴	۴۸,۰۰۷,۳
شکل مودی	۰,۳۷۸۵	-۰,۹۹۷۶	۰,۸۲۴۸	-۰,۴۶۲۶
	۰,۶۸۹۸	-۰,۶۸۸۶	-۰,۸۲۵۱	۱,۲۱۴۷
	۰,۹۰۶۸	۰,۳۱۳۴	-۰,۵۷۲۹	-۱,۴۲۵۱
	۱	۱	۱	۱



شکل ۲ شکل‌های مودی سازه سالم در جهت Y



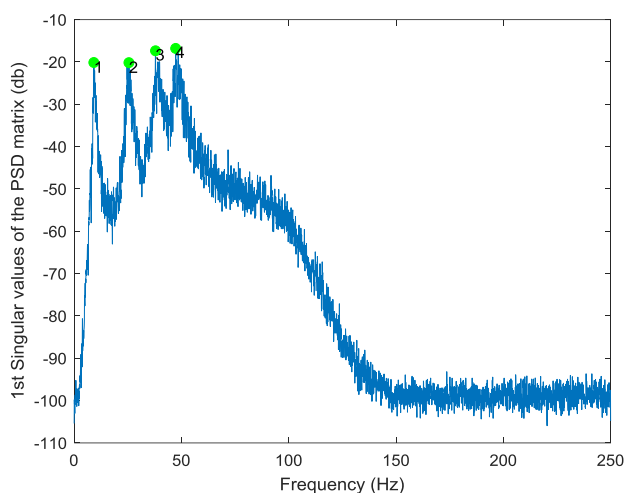
شکل ۳ سیگنال‌های پاسخ سازه در جهت Y

نتایج مربوط به سازه پنج مارک ASCE_AISC

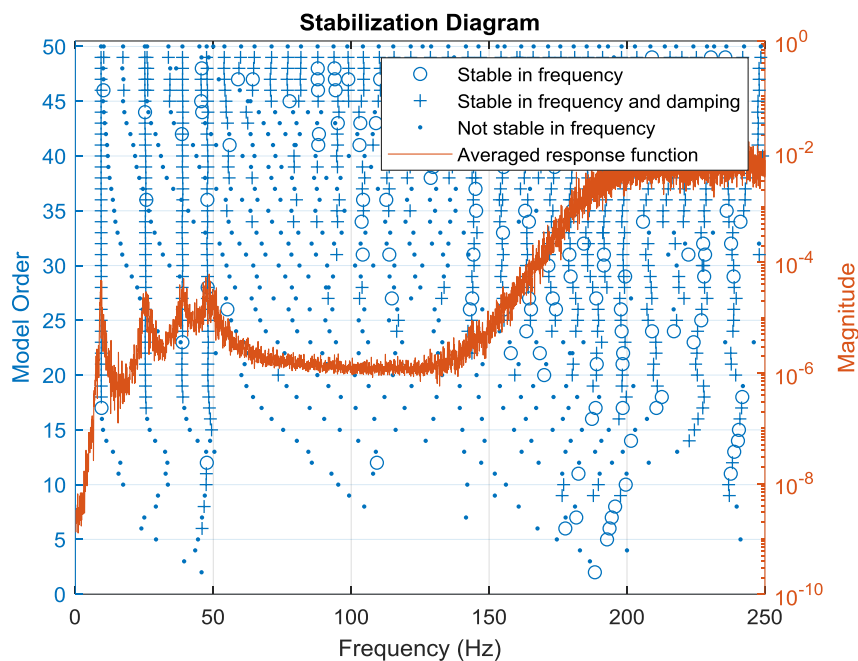
از میان روش‌های ارائه شده روش‌های زیرفضای تصادفی، تجزیه حوزه فرکانس و تجزیه مود تجربی به صورت تنها خروجی و روش حداقل مربعات نمایی حوزه فرکانس چند مرجعی به صورت ورودی خروجی می‌باشد. در این بخش نتایج مقایسه این روش‌ها برای تخمین فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی ارائه می‌شود.

در روش زیر فضای تصادفی تعداد ستون‌های ماتریس هنکل ۲۴۰۰۰ عدد (بزرگتر از دو سوم تعداد داده‌ها) و تعداد سطرها ۴۰۰ عدد (بیشتر از ۲۰ برابر تعداد مودها) انتخاب شده است. در روش FDD دیاگرام اولین مقدار تکین در برابر فرکانس مطابق شکل (۴) بدست آمد و فرکانس‌های طبیعی سازه با استفاده از روش جستار قله مشخص و بردار تکین متناظر با آن به عنوان شکل مودی خروجی گرفته شد.

در روش حداقل مربعات نمایی جهت تعیین درجه مدل می‌بایست از دیاگرام پایداری استفاده کرد چراکه انتخاب درجه پایین منجر به عدم شناسایی مودهای اصلی و درجه بالا سبب شناسایی مودهای اضافی خواهد شد. دیاگرام پایداری برای این



شکل ۴ دیاگرام اولین مقدار تکین در برابر فرکانس



شکل ۵ دیاگرام پایداری روش PLSCF

جدول ۴ تخمین فرکانس‌های طبیعی با روش‌های شناسایی سیستم مختلف

روش شناسایی سیستم	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
مدل تحلیلی	۹,۴۱۰۹	۲۵,۵۴۴۹	۳۸,۶۶۳۴	۴۸,۰۰۷۳
SSI	۹,۷۴۹۶	۲۵,۸۸۹۱	۳۹,۴۴۳۹	۴۸,۴۰۵۲
FDD	۹,۱۵۵۳	۲۵,۵۱۲۷	۳۷,۹۰۲۸	۴۷,۳۰۲۲
PLSCF	۹,۴۱۸۱	۲۵,۴۷۶۷	۳۸,۹۶۱۸	۴۸,۳۴۳۹
EMD	۹,۲۵۸	۲۳,۹۵۸۴		

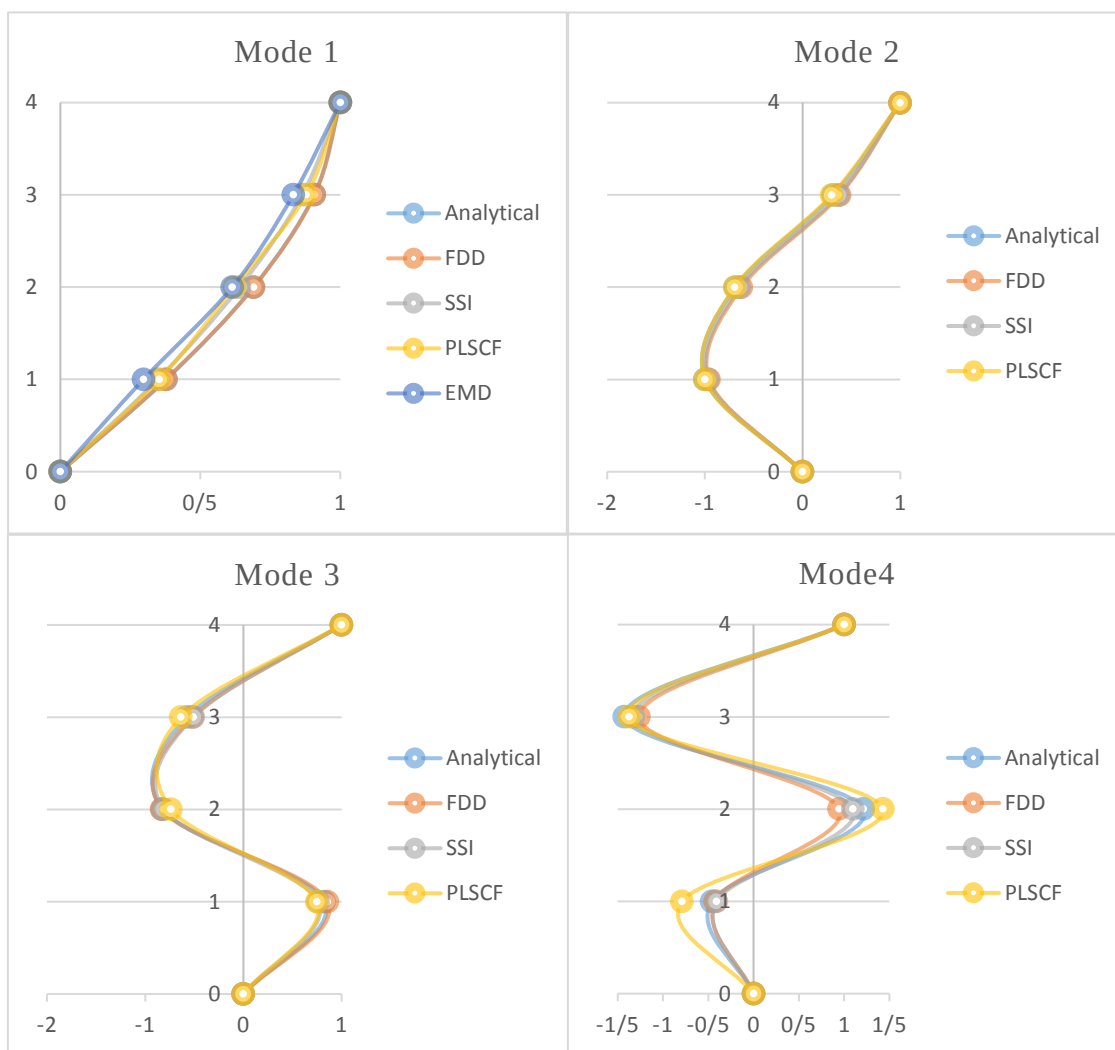
قطعی فراهم نیست. با این حال روش FDD برای داده‌های با ابعاد بزرگ هزینه محاسباتی کمتری نسبت روش SSI دارد. روش EMD با این‌که توانایی آنالیز سیگنال‌های غیر ایستا و غیرخطی را دارد در تشخیص مودهای سوم و چهارم موفق نبوده و تنها مودهای اول و دوم را تخمین زده است. قابل ذکر است بیشترین اختلاف مربوط به روش EMD می‌باشد.

اشکال مودی محاسبه شده با روش‌های مختلف مطابق جدول (۵) می‌باشد. شکل (۶) مقایسه اشکال مودی محاسبه شده با مدل تحلیلی را نمایش می‌دهد. برای مقایسه بهتر روش‌ها جهت تخمین شکل‌های مودی از معیار اطمینان مودال (Modal Assurance Criteria) (MAC) استفاده شده است. مقدار این معیار را می‌توان به عنوان معیاری برای تشابه دو شکل مودی در نظر گرفت. مقدار یک در این معیار نشان‌دهنده همسانی کامل و مقدار صفر نشان‌دهنده شباهت حداقلی یا مستقل بودن اشکال می‌باشد. شکل (۷) معیار اطمینان مودال بین شکل مودهای تحلیلی و شکل مودهای تخمین زده شده را نمایش می‌دهد.

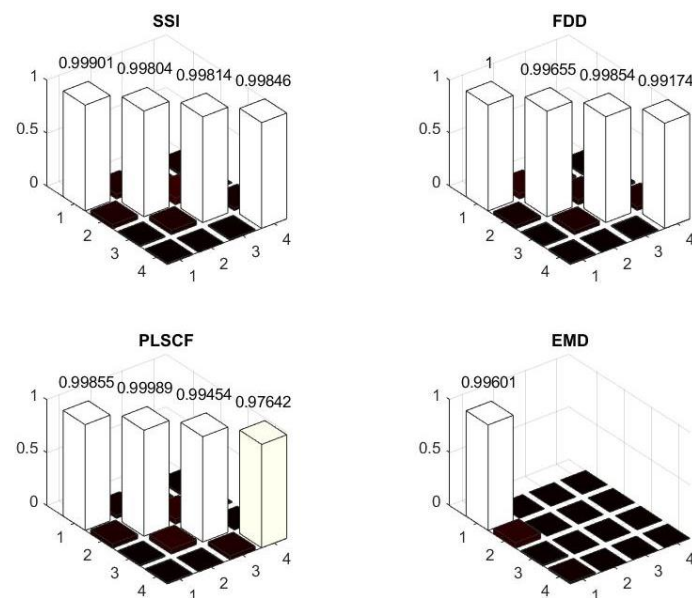
برای مقایسه دقت روش‌ها در تشخیص فرکانس طبیعی سیستم از شاخص جذر میانگین مربعات اختلاف فرکانس‌های تخمینی با فرکانس تحلیلی سیستم استفاده شده است. با در نظرگیری این شاخص عملکرد روش PLSCF با توجه ورودی خروجی بودن روش همان‌طور که انتظار می‌رفت از سایر روش‌ها بهتر است. با این حال وجود نویز در سیگنال ممکن است دقت این روش را کمی پایین بیاورد. عملکرد روش‌های FDD و SSI بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و امکان نتیجه‌گیری

جدول ۵ تخمین شکل‌های مودی با روش‌های شناسایی سیستم مختلف

روش	تحلیلی	SSI	FDD	PLSCF	EMD
شکل مودی اول	طبقه ۱	۰,۳۷۸۵	۰,۳۴۸۵	۰,۳۷۶۶	۰,۳۵۲۷
	طبقه ۲	۰,۶۸۹۸	۰,۶۴۰۴	۰,۶۹۰۵	۰,۶۲۱۹
	طبقه ۳	۰,۹۰۶۸	۰,۸۶۴۲	۰,۹۰۸۲	۰,۸۷۸۲
	طبقه ۴	۱	۱	۱	۱
شکل مودی دوم	طبقه ۱	-۰,۹۹۷۶	-۰,۹۶۶۸	-۰,۹۵۸۲	-۰,۹۹۷۹
	طبقه ۲	-۰,۶۸۸۶	-۰,۶۴۶۰	-۰,۶۲۴۱	-۰,۶۹۴۷
	طبقه ۳	۰,۳۱۳۴	۰,۳۶۶۷	۰,۳۷۹۰	۰,۲۹۷۹
	طبقه ۴	۱	۱	۱	۱
شکل مودی سوم	طبقه ۱	۰,۸۲۴۸	۰,۷۶۲۴	۰,۸۵۶۲	۰,۷۴۹۶
	طبقه ۲	-۰,۸۲۵۱	-۰,۸۱۲۷	-۰,۸۳۱۰	-۰,۷۳۶۱
	طبقه ۳	-۰,۵۷۲۹	-۰,۵۰۷۶	-۰,۵۱۹۰	-۰,۶۳۴۹
	طبقه ۴	۱	۱	۱	۱
شکل مودی چهارم	طبقه ۱	-۰,۴۶۲۶	-۰,۴۰۸۱	-۰,۴۲۲۶	-۰,۷۹۰۱
	طبقه ۲	۱,۲۱۴۷	۱,۰۹۶۷	۰,۹۴۴۲	۱,۴۲۸۶
	طبقه ۳	-۱,۴۲۵۱	-۱,۳۲۸۰	-۱,۲۶۵۵	-۱,۳۷۵۳
	طبقه ۴	۱	۱	۱	۱



شکل ۶ مقایسه اشکال مودی محاسبه شده با مدل تحلیلی



شکل ۷ معیار اطمینان مودال بین شکل موده‌های تحلیلی و شکل موده‌های تخمین زده شده



شکل ۸ پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد

مشخصات دیتالاگر و سنسورها

برای داده برداری از دستگاه دیتالاگر ۱۶ کاناله دینامیکی برند آرتیمان ۱ استفاده شده است. این دستگاه توانایی برداشت ۱۶۰۰۰ نمونه در ثانیه برای هر کانال و ذخیره سازی اطلاعات تا ۸ گیگابایت را دارد. سنسورهای مورد استفاده از نوع شتاب‌سنج پیزوالکتریک (Piezoelectric Accelerometers) می‌باشد. این نوع سنسورها شامل یک ماده پیزوالکتریک است که یک ساختار مکانیکی محصور می‌باشد. این ماده تحت تأثیر شتابی که بر سنسور وارد می‌شود، دچار تغییر شکل شده و تغییر شکل ایجاد شده سبب ایجاد سیگنال الکتریکی می‌شود. این نوع سنسور نسبت به شتاب‌سنج‌های میکرو الکترومکانیکی (Micro Electro-Mechanical Systems Accelerometers) دقت بالاتری داشته و حساسیت دمایی کمتری دارد لذا برای تست‌های دینامیکی ایده‌آل می‌باشد. شکل (۹) دیتالاگر مورد استفاده و شکل (۱۰) شماتیک سنسورهای شتاب‌سنج پیزوالکتریک را نمایش می‌دهد.



شکل ۹ دستگاه دیتالاگر مورد استفاده

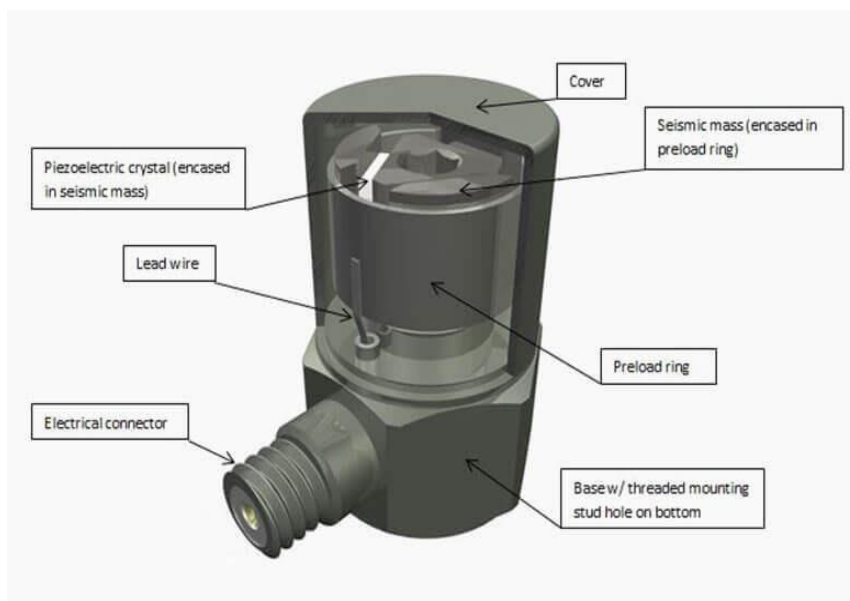
در تخمین شکل‌های مودی بهترین نتایج مربوط به روش FDD می‌باشد به‌طوری که نتایج مربوط به مود اول در این روش تا حد زیادی منطبق بر مدل تحلیلی می‌باشد. در این روش تشکیل ماتریس چگالی طیف توان بین سیگنال‌های پاسخ سازه سبب افزایش دقت روش و کاهش اثر نویزهای محیطی می‌شود. نتایج مربوط به روش SSI نزدیک به روش FDD بوده و حتی در مودهای بالاتر انطباق بهتری با سازه تحلیلی دارد. روش PLSCF روشی ورودی خروجی بوده، اما با توجه به حساسیت این روش به نویز محیطی دقت شکل مودهای تخمین زده شده به جز مود دوم پایین تر از دو روش دیگر می‌باشد. روش EMD در تشخیص شکل‌های مودی عملکرد مناسبی نداشته و در این روش تنها مود اول تشخیص داده شده است. دقت این روش نسبت به سایر روش‌ها پایین تر می‌باشد با توجه به این موضوع برای استفاده از مزایای این روش جهت پردازش سیگنال غیرایستا و غیرخطی پیشنهاد می‌شود از روش‌های توسعه یافته این روش مانند تجزیه مود تجربی مجموعی کامل (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition) (CEEMD) استفاده کرد.

مطالعه میدانی: پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد

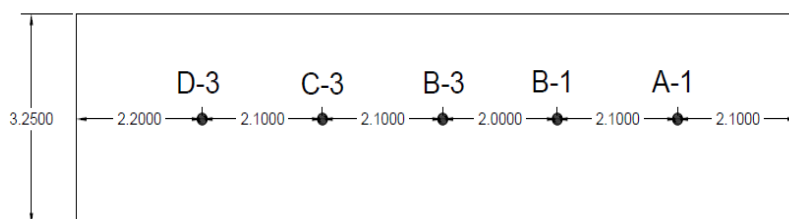
جهت بررسی کارایی روش‌ها با داده‌های میدانی با انجام آزمایش مودال بر روی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد سیگنال‌های شتاب سازه خروجی گرفته شده و ویژگی‌های مودال پل با استفاده از این روش‌ها تخمین زده شده است.

مشخصات پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد

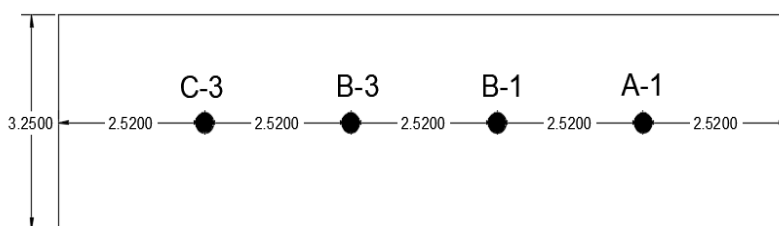
مشخصات سازه به شرح پل یک دهانه به طول ۱۲٫۶ متر، عرض ۳٫۲۵ متر و ضخامت دال ۱۰ سانتی‌متر است. پل مورد نظر دارای دو تیر ورق در راستای طولی خود با سطح مقطع I شکل با مشخصات جان $(h_w=60\text{cm}, t_w=1\text{cm})$ و بال $(b_f=25\text{cm}, t_f=2\text{cm})$ می‌باشد. در این پل برای تیرهای کش از IPE140 به فاصله ۱٫۴ متر استفاده شده است. شکل (۸) تصویر پل مد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ شماتیک سنسور شتاب‌سنج پیزوالکتریک



شکل ۱۱ آرایش اول قرارگیری سنسورها

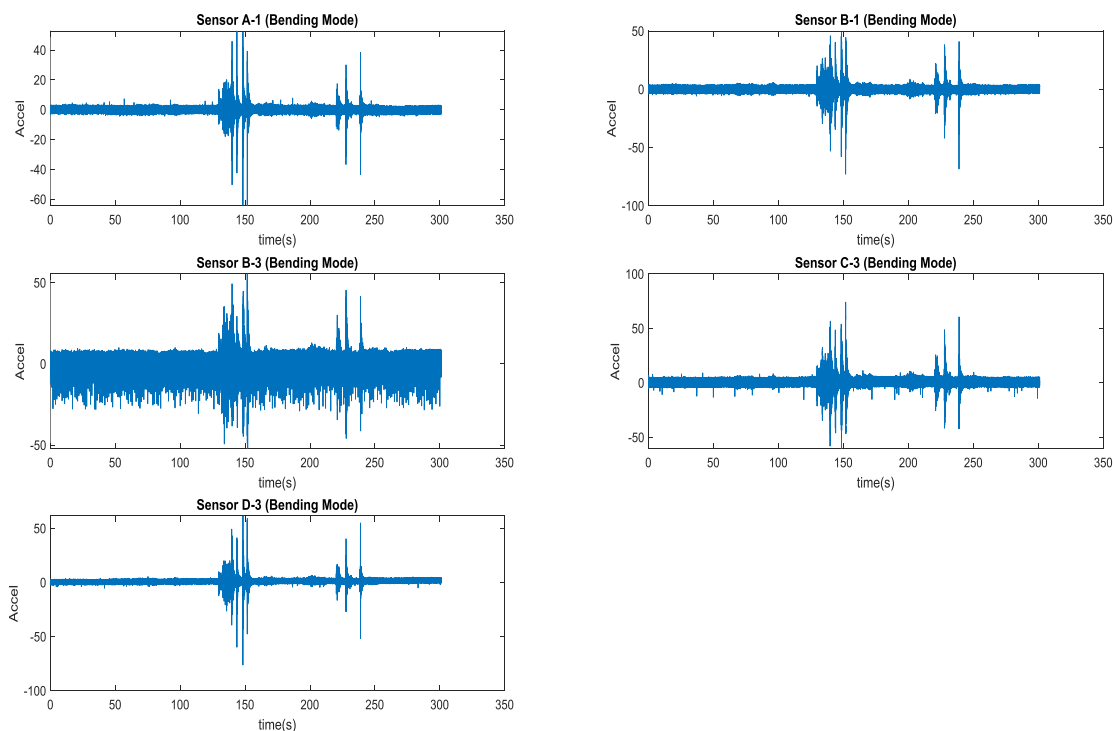


شکل ۱۲ آرایش دوم قرارگیری سنسورها

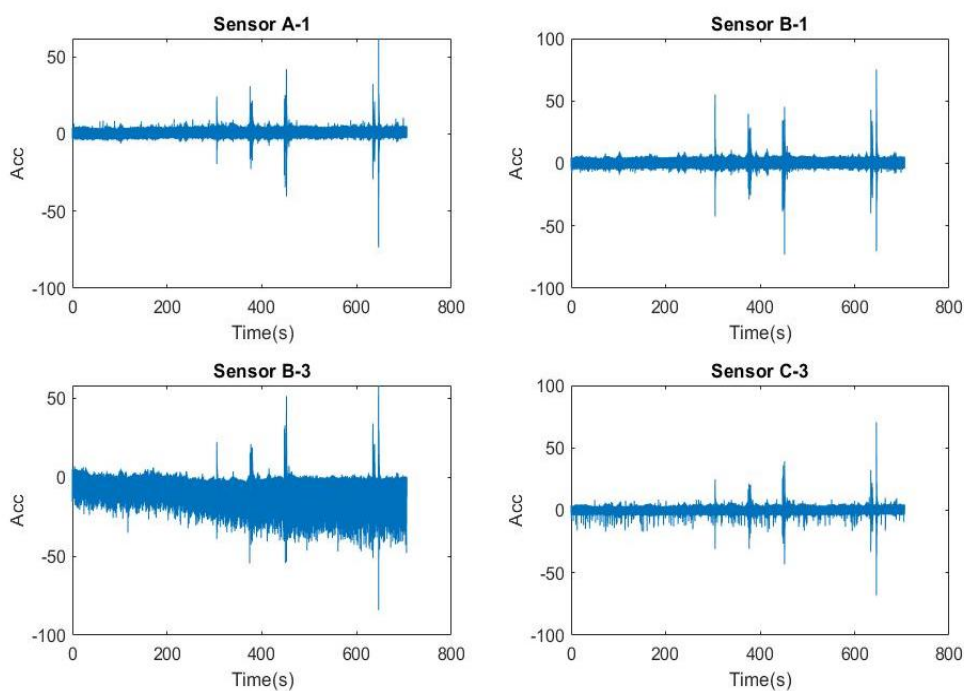
آرایش حسگرها و مشخصات داده برداری

برای استخراج مودهای خمشی سازه، دو آرایش متفاوت از حسگرهای شتاب‌سنج در راستای طولی پل مورد استفاده قرار گرفته است. آرایش اول شامل پنج حسگر است که داده‌برداری در آن به مدت ۳۰۱ ثانیه با فرکانس ۵۱۲ هرتز انجام شده است. آرایش دوم از چهار حسگر استفاده می‌کند و مدت نمونه‌برداری

در این حالت ۷۰۶ ثانیه با فرکانس ۱۰۲۴ هرتز بوده است. موقعیت قرارگیری حسگرها در این دو آرایش به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده‌اند. تحریک سازه به صورت ارتعاشات محیطی در نظر گرفته شده است. سیگنال‌های پاسخ ثبت‌شده پاسخ سازه برای این دو آرایش به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند.



شکل ۱۳ سیگنال‌های پاسخ سازه آرایش اول

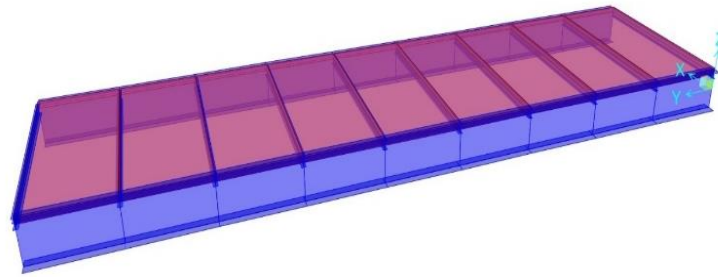


شکل ۱۴ سیگنال‌های پاسخ سازه آرایش دوم

پس از مدل‌سازی، مشخصات مودال پل استخراج گردید و نتایج حاصل از این تحلیل شامل فرکانس‌ها و شکل‌های مودی خمشی، در قالب جدول (۶) ارائه شده است.

مدل اجزا محدود پل ۲۲ بهمن

برای برآورد مشخصات مودال پل ۲۲ بهمن، این سازه با در نظر گرفتن مشخصات مقاطع و اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل، در نرم‌افزار SAP2000 مطابق شکل (۱۵) مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۵ مدل سازی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد در نرم افزار SAP2000

جدول ۶ مشخصات مودال استخراج شده از مدل اجزاء محدود پل ۲۲ بهمن

شماره مود	مود اول	مود دوم	مود سوم
فرکانس (Hz)	۱۲,۰۳۰۹	۴۸,۱۴۳۶	۱۰۱,۴۱۰۴
شکل مودی آرایش اول	A-1	۰,۳۷۳۶	-۰,۶۵۲۴
	B-1	۰,۶۵۱۷	-۰,۶۴۵۹
	B-3	۰,۷۵۲۶	-۰,۰۳۷۷
	C-3	۰,۶۶۱۱	۰,۶۲۴۱
	D-3	۰,۳۹۲۶	۰,۶۶۷۳
شکل مودی آرایش دوم	A-1	۰,۴۴۵۶	-۰,۷۵۴۵
	B-1	۰,۷۲۱	-۰,۴۶۶۵
	B-3	۰,۷۲۱	۰,۴۶۶۵
	C-3	۰,۴۴۵۶	۰,۷۵۴۵

اختلاف با مقادیر واقعی وجود دارد.

در آرایش اول، مودهای اول و دوم با دقت مناسبی تخمین زده شده‌اند. روش SSI با تخمین فرکانس‌های ۱۲,۰۳۵ هرتز برای مود اول و ۴۹,۸۲۴۷ هرتز برای مود دوم، نزدیک‌ترین مقادیر به فرکانس‌های واقعی را ارائه کرده است. روش‌های FDD و PLSCF نیز نتایج قابل قبولی داشته‌اند، اما به‌طور کلی روش SSI بهترین عملکرد را در این آرایش نشان داده است. برای مود سوم، روش‌های SSI و FDD تخمین‌هایی نزدیک به ۹۹,۷ هرتز ارائه داده‌اند، اگرچه این مقادیر اندکی پایین‌تر از فرکانس مدل اجزای محدود هستند.

در آرایش دوم، مودهای اول و سوم با دقت بهتری تخمین زده شده‌اند. روش SSI با تخمین فرکانس‌های ۱۲,۰۸۲ هرتز برای مود اول و ۱۰۲,۱۶۰۰ هرتز برای مود سوم، نزدیک‌ترین مقادیر به فرکانس‌های مدل اجزای محدود را ارائه کرده است. روش

نتایج مربوط به پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد

در این تحلیل، تمامی روش‌ها به جز روش PLSCF به‌صورت تنها خروجی ارائه شده‌اند. به دلیل نامعلوم بودن سیگنال ورودی در روش PLSCF، این سیگنال به‌صورت نویز سفید در نظر گرفته شده است. نتایج تخمین فرکانس‌های اول تا سوم پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد، برای آرایش‌های اول و دوم، در جدول (۷) ارائه شده‌اند.

در تحلیل نتایج باید به این نکته توجه داشت که مدل اجزای محدود مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار پل، لزوماً تمامی شرایط واقعی پل را به‌طور دقیق بازتاب نمی‌دهد. این مدل ممکن است برخی از پیچیدگی‌های رفتار دینامیکی سازه، از جمله تغییرات خواص مکانیکی مواد یا شرایط مرزی واقعی را به‌طور کامل لحاظ نکند. بنابراین، فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از این مدل، صرفاً تخمینی از رفتار واقعی پل هستند و امکان

تخمین یک مود است، استفاده از معیار COMAC برای این روش به نتایجی غیرقابل استناد منجر می‌شود. بنابراین، این معیار تنها برای روش‌های SSI، FDD و PLSCF به کار گرفته شده است. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب معیار MAC را برای آرایش‌های اول و دوم نمایش می‌دهند، و جدول (۸) نتایج معیار COMAC را برای این دو آرایش ارائه می‌دهد.

با توجه به شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، مقایسه تطبیقی اشکال مودی تخمین زده شده با مدل اجزای محدود نشان می‌دهد که تمامی روش‌های مورد مطالعه قادر به بازسازی الگوی کلی ارتعاشات در مدهای اول و دوم هستند، اگرچه تفاوت‌های قابل توجهی در جزئیات مشاهده می‌شود. روش‌های FDD و SSI در هر دو آرایش نزدیک‌ترین تطابق را با مدل تحلیلی نشان می‌دهند، در حالی که روش PLSCF تمایل به برآورد بیش‌ازحد مقادیر در برخی نقاط دارد. روش EMD نیز به دلیل ماهیت ذاتی خود تنها قادر به استخراج یک مود است و برای شناسایی کامل مدهای سیستم مناسب نیست.

بررسی مقادیر نرمال شده اشکال مودی نشان می‌دهد که برای مود اول، خطای نسبی روش‌های FDD و SSI در آرایش اول کمتر از ۶٪ و در آرایش دوم کمتر از ۵٪ است. در مقابل، روش PLSCF تا ۹٪ و روش EMD حتی تا ۱۷٪ انحراف در برخی نقاط نشان می‌دهد. همچنین، افزایش مدت زمان و فرکانس نمونه برداری منجر به بهبود دقت اشکال مودی شده است.

FDD عملکرد مطلوبی داشته است، اما روش PLSCF انحراف کوچکی در تخمین‌ها نشان داده است. افزایش فرکانس نمونه برداری و مدت زمان اندازه‌گیری در این آرایش، احتمالاً نقش مهمی در بهبود دقت، به ویژه در تخمین فرکانس‌های بالاتر (مود سوم)، داشته است.

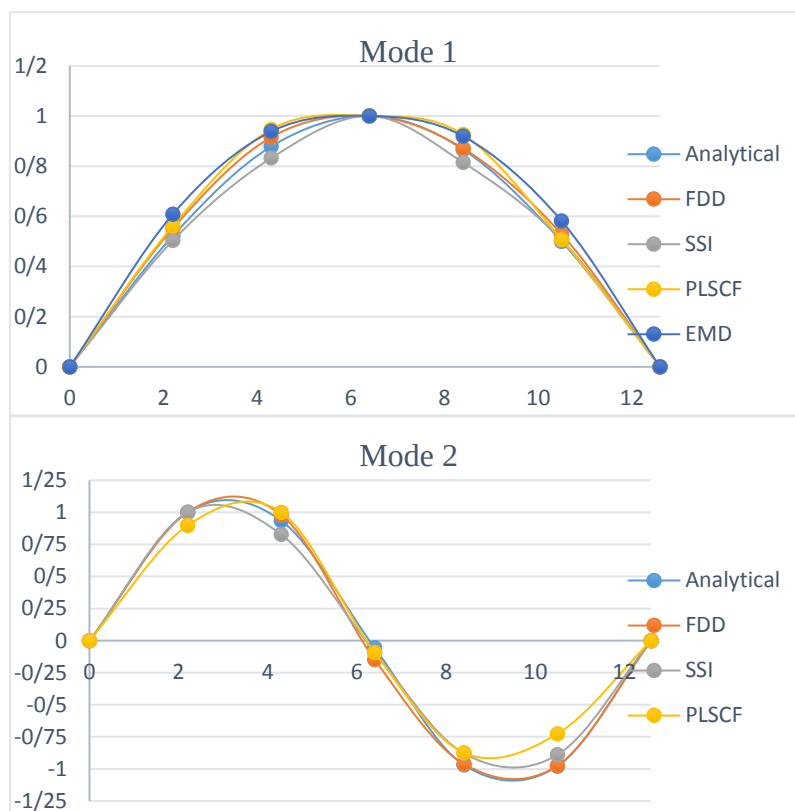
در هر دو آرایش، روش EMD ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. این روش، که برای پردازش سیگنال‌های غیرایستا و غیرخطی طراحی شده است و به دلیل ماهیت تطبیقی‌اش در تحلیل سیگنال‌های پیچیده و متغیر با زمان کاربرد دارد. با این حال، در مقایسه با روش‌هایی مانند SSI، FDD و PLSCF، دقت کمتری در تخمین فرکانس‌های طبیعی نشان داده است.

با توجه به محدود بودن تعداد حسگرها، تنها امکان تخمین مدهای اول و دوم سازه وجود دارد. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب شکل‌های مودی تخمین زده شده و مدل اجزای محدود را برای آرایش‌های اول و دوم نشان می‌دهند.

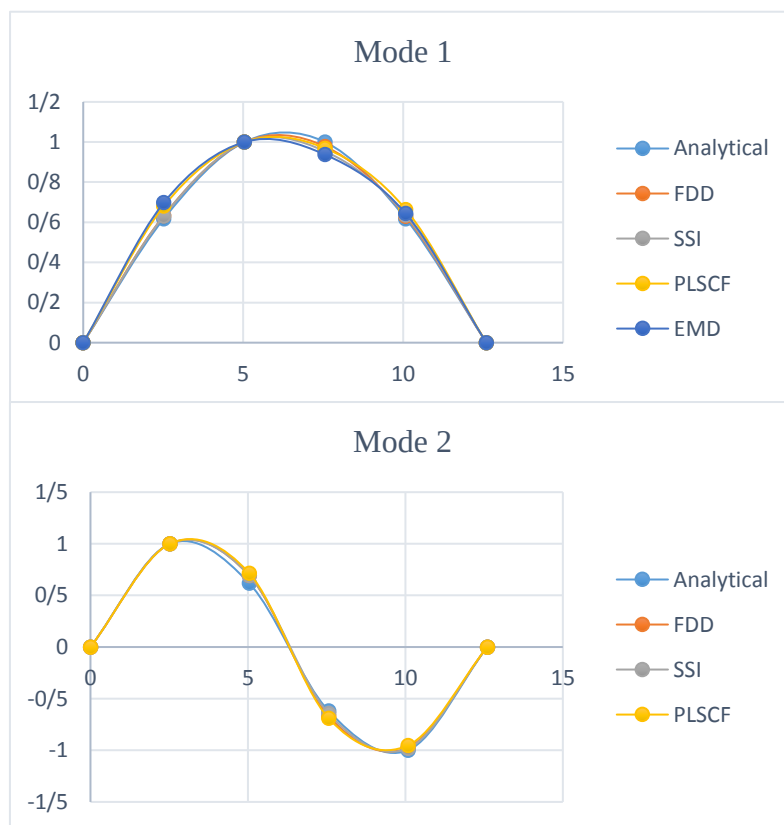
از آن‌جا که معیار MAC برای مقایسه شکل مدهای تجربی دارای عدم قطعیت است، علاوه بر آن از معیارهای تکمیلی مانند COMAC نیز استفاده شده است. معیار COMAC تطابق شکل مودها را در هر درجه آزادی به صورت جداگانه بررسی می‌کند. در این معیار، مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده همسانی و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده عدم همسانی شکل‌های مودی در آن درجه آزادی است. با توجه به این‌که روش EMD تنها قادر به

جدول ۷ تخمین فرکانس‌های طبیعی پل ۲۲ بهمن

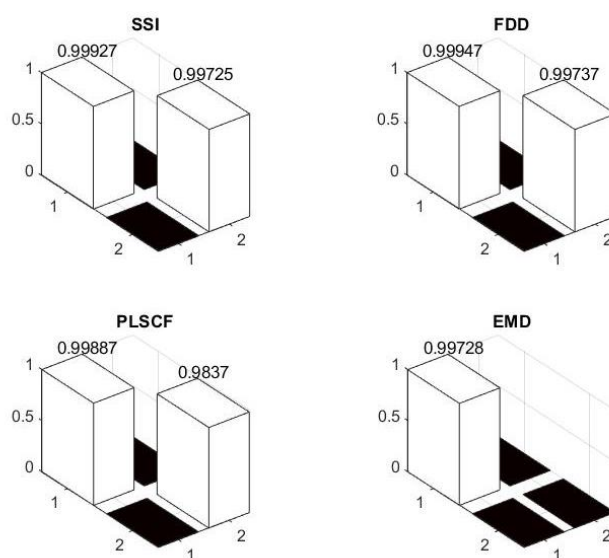
آرایش سنسورها	روش شناسایی سیستم	مود اول	مود دوم	مود سوم
آرایش اول	SSI	۱۲,۰۰۳۵	۴۹,۸۲۴۷	۹۹,۷۴۸۹
	FDD	۱۱,۸۵۹۴	۴۹,۷۱۸۸	۹۹,۷۱۰۹
	PLSCF	۱۱,۸۵۶۱	۵۰,۱۲۴۹	۹۹,۸۱۲۰
	EMD	۱۱,۴۷۷۴	۴۵,۳۶۵۵	
آرایش دوم	SSI	۱۲,۰۸۲	۵۱,۱۰۱۱	۱۰۲,۱۶۰۰
	FDD	۱۲,۲۴۲۲	۵۱,۲۵۷۸	۱۰۲,۵۲۳۴
	PLSCF	۱۱,۸۹۰۴	۵۰,۶۷۸۷	۱۰۲,۸۰۸۱
	EMD	۱۱,۸۰۱۵	۴۷,۳۸۶۰	



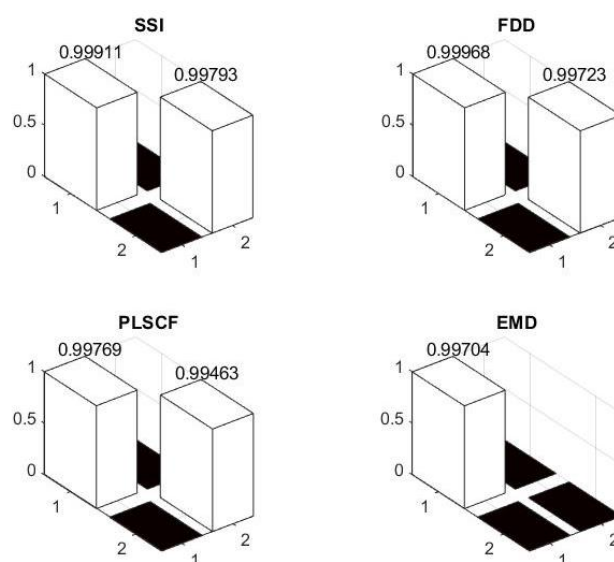
شکل ۱۶ اشکال مودی محاسبه شده از روش های مختلف و مدل اجزاء محدود آرایش اول



شکل ۱۷ اشکال مودی محاسبه شده از روش های مختلف و مدل اجزاء محدود آرایش دوم



شکل ۱۸ معیار اطمینان مودال بین شکل مودهای تحلیلی و شکل مودهای تخمین زده شده آرایش اول



شکل ۱۹ معیار اطمینان مودال بین شکل مودهای تحلیلی و شکل مودهای تخمین زده شده آرایش دوم

جدول ۸ محاسبه COMAC در روش‌های مختلف برای دو مود اول سازه

PLSCF	FDD	SSI	درجه آزادی	
۰,۹۹۳۹	۰,۹۹۹۴	۰,۹۹۹۸	A-1	آرایش اول
۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۸۵	B-1	
۰,۹۹۸۷	۰,۹۹۱۷	۰,۹۹۸۹	B-3	
۰,۹۹۲۵	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۶	C-3	
۰,۹۸۱۷	۰,۹۹۹۵	۰,۹۹۸۸	D-3	
۰,۹۹۸۱	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۹۹	A-1	آرایش دوم
۰,۹۹۵۵	۰,۹۹۷۲	۰,۹۹۷۲	B-1	
۰,۹۹۵۹	۰,۹۹۷۸	۰,۹۹۸۴	B-3	
۰,۹۹۷۰	۰,۹۹۹۶	۰,۹۹۹۵	C-3	

نتایج حاکی از برتری روش‌های FDD و SSI در تخمین دقیق مدهای اول و دوم سازه بود. روش FDD به دلیل مزایای متعدد از جمله هزینه محاسباتی پایین، مقاومت به نویز و سادگی پیاده‌سازی، به ویژه در آرایش دوم حسگرها (با وجود تعداد سنسور کمتر) عملکرد ممتازی از خود نشان داد. این برتری با مقادیر MAC نزدیک به یک و مقادیر COMAC که تطابق عالی در نقاط کلیدی را نشان می‌داد، تأیید شد. افزایش فرکانس نمونه‌برداری از ۵۱۲ به ۱۰۲۴ هرتز و مدت زمان اندازه‌گیری از ۳۰۱ به ۷۰۶ ثانیه، علیرغم کاهش تعداد سنسورها از پنج به چهار عدد، منجر به بهبود قابل توجه دقت نتایج به ویژه در تخمین مدهای بالاتر شد.

مقایسه عملکرد روش‌های شناسایی سیستم نشان داد که روش PLSCF با وجود دقت نظری بالا در محیط‌های عملی و داری نویز کارایی کمتری دارد. روش EMD به دلیل محدودیت‌های ذاتی تنها قادر به شناسایی مود اول با خطای محسوس است. بر این اساس، روش FDD به دلیل مقاومت در برابر نویز برای پروژه‌های میدانی، روش SSI برای تخمین دقیق مدهای اولیه سازه، و روش PLSCF برای شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده با ورودی معلوم و روش EMD صرفاً برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستا و غیرخطی پیشنهاد می‌شود.

انتخاب روش مناسب شناسایی سیستم نیازمند در نظر گرفتن فاکتورهای متعددی از جمله دقت مورد نیاز، شرایط محیطی، امکانات سخت‌افزاری و اهداف تحلیل است. برای مطالعات آینده، بررسی تأثیر تعداد حسگرها، توسعه روش‌های ترکیبی که بتوانند از مزایای روش‌های مختلف به صورت توأم بهره ببرند، و همچنین اعتبارسنجی نتایج از طریق اندازه‌گیری‌های بلندمدت پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

مقادیر MAC که نشان‌دهنده همبستگی بین مدهای تخمین‌زده شده و تحلیلی است، در تمامی موارد نزدیک به یک بوده که حاکی از تطابق کلی مناسب بین اشکال مودی است. بهترین نتایج MAC مربوط به مود اول در روش‌های SSI و FDD در هر دو آرایش است. برای مود دوم، مقادیر MAC اندکی پایین‌تر است که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به خطا در مدهای بالاتر است. روش FDD در هر دو آرایش بهترین نتایج را برای MAC ارائه کرده است.

نتایج معیار COMAC که همبستگی در درجات آزادی را بررسی می‌کند، نشان می‌دهد که مقادیر بسیار نزدیک به یک هستند که بیانگر تطابق عالی در سطح محلی است. البته باید توجه داشت که در این مطالعه تنها دو مود اول بررسی شده‌اند و با در نظر گرفتن مدهای بالاتر، ممکن است مقادیر این معیار کاهش یابد. روش SSI در آرایش اول (نقطه A-1) به مقدار ایده‌آل ۰٫۹۹۹۸ رسیده است، در حالی که روش FDD در آرایش دوم در برخی نقاط مقدار ۰٫۹۹۹۹ را ثبت کرده است. نقاط B-3 و C-3 در هر دو آرایش حساسیت بیشتری به خطا نشان داده‌اند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های FDD و SSI در هر دو آرایش چهارتایی و پنج‌تایی، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند و برای کاربردهای عملی در شناسایی مدهای ارتعاشی گزینه‌های مناسبی هستند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به ارزیابی جامع چهار روش شناسایی سیستم شامل SSI (حوزه زمان)، FDD (حوزه فرکانس)، PLSCF (حوزه فرکانس) و EMD (حوزه زمان-فرکانس) در تخمین پارامترهای مودال پرداخته است. مطالعه در دو بخش اصلی انجام شد: بخش عددی با استفاده از سازه پنج مارک ASCE-AISC و بخش میدانی بر روی پل ۲۲ بهمن دانشگاه فردوسی مشهد. علاوه بر این، تأثیر پارامترهای مهمی مانند چینش سنسورها، مدت زمان و فرکانس نمونه‌برداری نیز مورد بررسی دقیق قرار گرفت.

مراجع

- [1] P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] B. Peeters and G. De Roeck, "Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis,"

- Mechanical systems and signal processing*, vol. 13, no. 6, pp. 855-878, 1999. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249>
- [3] S. Li, J.-T. Wang, A.-Y. Jin, and G.-H. Luo, "Parametric analysis of SSI algorithm in modal identification of high arch dams," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 129, p. 105929, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105929>
- [4] H. B. Shim and H. S. Park, "SSI-LSTM network for adaptive operational modal analysis of building structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 195, p. 110306, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110306>
- [5] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," in *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000, 2000, pp. 625-630.
- [6] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition," *Smart materials and structures*, vol. 10, no. 3, p. 441, 2001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/303>
- [7] S. Gade, "Frequency domain techniques for operational modal analysis," *The Shock and Vibration Digest*, vol. 38, no. 6, pp. 537-538, 2006.
- [8] A. Cardoni, A. R. Elahi, and G. P. Cimellaro, "A refined output-only modal identification technique for structural health monitoring of civil infrastructures," *Engineering Structures*, vol. 323, p. 119210, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119210>
- [9] P. Guillaume, P. Verboven, and S. Vanlanduit, "A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator," *Proceedings of International Modal Analysis Conference*, vol. 21, 2003, pp. 183-192.
- [10] S. D. Amador and R. Brincker, "Modal identification of a steel platform specimen with a subspace implementation of the poly-reference complex frequency method formulated in modal model (pCF-MM)," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2647, no. 19: IOP Publishing, 2024, p. 192018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2647/19/192018>
- [11] M. T. Steffensen, M. Döhler, D. Tcherniak, and J. J. Thomsen, "Variance estimation of modal parameters from the poly-reference least-squares complex frequency-domain algorithm," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 223, p. 111905, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111905>
- [12] N. E. Huang *et al.*, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 454, no. 1971, pp. 903-995, 1998. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [13] Z. Wu and N. E. Huang, "Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method," *Advances in adaptive data analysis*, vol. 1, no. 01, pp. 1-41, 2009. <https://doi.org/10.1142/S1793536909000047>
- [14] J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, and N. E. Huang, "Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method," *Advances in adaptive data analysis*, vol. 2, no. 02, pp. 135-156, 2010. <https://doi.org/10.1142/S1793536910000422>
- [15] M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and P. Flandrin, "A complete ensemble empirical mode

- decomposition with adaptive noise," in *2011 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, 2011: IEEE, pp. 4144-4147. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5947265>
- [16] S. M. Vazirizade, A. Bakhshi, and O. Bahar, "Online nonlinear structural damage detection using Hilbert Huang transform and artificial neural networks," *Scientia Iranica*, vol. 26, no. 3, pp. 1266-1279, 2019. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.50657.1808>
- [17] H. S. Yousefifard, G. G. Amiri, E. Darvishan, and O. Avci, "Intelligent hybrid approaches utilizing time series forecasting error for enhanced structural health monitoring," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 224, p. 112177, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112177>
- [18] J. L. Burkett, "Benchmark studies for structural health monitoring using analytical and experimental models," 2005.
- [19] C. Black and C. Ventura, "Blind test on damage detection of a steel frame structure," in *Society for Experimental Mechanics, Inc, 16 th International Modal Analysis Conference.*, 1998, vol. 1, pp. 623-629.



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators

Research Article

Hamidreza Eftekhari¹, Paraham Hayati² , Ali Moniri³

DOI: [10.22067/jfcej.2025.91390.1334](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.91390.1334)

1- Introduction

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in asphalt mixtures is becoming increasingly popular due to economic and environmental benefits. However, the most important challenge in using asphalt mixtures with a high percentage of RAP is the degradation of the bitumen in the RAP, which, due to oxidation of the bitumen and the passage of time, increases its hardness, changes its physical and chemical properties, and reduces its efficiency. Inadequate performance of asphalt mixtures with proper in-situ compaction can lead to the formation of fine cracks and premature failure of the in-situ pavement surface. Many researchers believe that due to the layered structure of bitumen in asphalt chips, bitumen always adheres to the chips and creates dark-colored aggregates. This bitumen never separates from the aggregates and prevents water from entering the asphalt chip aggregates, so the chips will not have any problems with moisture sensitivity. Previous research results have shown that this is partly true, that asphalt crumb materials do not perform as well as dark aggregates in combination with new bitumen, and the type of aggregate can be influential. This issue has not been studied in detail to date, and the effect of the relationship between the degree of denudation before asphalt recycling and the degree of denudation after asphalt recycling has not been studied. Examining this issue could lead road construction professionals and those active in the asphalt recycling industry to be more sensitive to issues such as denudation and moisture sensitivity when designing recycled asphalt mixtures. Therefore, in the present study, in addition to examining the effect of different asphalt chip materials, the effect of moisture damage in asphalt chips on the moisture sensitivity of recycled asphalt mixtures and the effect of using various rejuvenating agents used in recycled asphalt mixtures on the moisture sensitivity of these mixtures are investigated.

2- Methodology

One of the vital infrastructures in the development and progress of any country is the construction of high-quality roads with a long service life. The service life of road pavement has a fundamental impact on the economy of any society and is recognized as one of the national assets; therefore, any damage to it will lead to a reduction in the service life of the pavement and an increase in its related costs. Therefore, to maintain and maintain urban and suburban roads for a long time, many roads need to be repaired and reconstructed. On the other hand, the budgets allocated for pavement maintenance are not sufficient and conventional and costly methods have delayed the timely improvement of roads and reduced the quality and services provided by pavements. Studies show that the use of asphalt recycling technology before the complete destruction of asphalt layers significantly reduces maintenance costs. In conducting this research, we faced certain limitations such as laboratory facilities, project financial resources, etc.; therefore, the hypotheses and framework of the study were adjusted in such a way that appropriate and practical results could be achieved despite the existing limitations. Accordingly, in this research, four RAPs with percentages of 25, 50, 75, and 100 and three types of rejuvenators from different groups of rejuvenators were used. To determine the optimal percentage of rejuvenators, aged asphalt of recycled mixtures (RAP) was extracted and then the optimal percentage of each rejuvenator was determined using conventional bitumen tests (permeation degree and softening point). By evaluating the effect of the design material structure on the volumetric properties of asphalt mixtures, the structure and granulation that meets the needs of the mixing design and pavement system were selected from among the different aggregates. By selecting the design material grading, asphalt samples were prepared to determine the optimal percentage of different asphalt mixture conditions, using the requirements and standards of the Marshall mixing

*Manuscript received December 29, 2024, Revised February 23, 2025, Accepted May 11, 2025

¹ Ph.D. Student Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Corresponding author. Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, **Email:** p.hayati@modares.ac.ir

³ Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, **Email:** Ali.moniri1@gmail.com

plan. Then, for the obtained optimal bitumen percentages, samples were prepared in specific dimensions according to the standard of each type of test using a Marshall electric hammer compactor, and the manufactured samples were subjected to loading by the desired devices to evaluate mechanical properties. Finally, the results of each of the tests performed are presented and discussed.

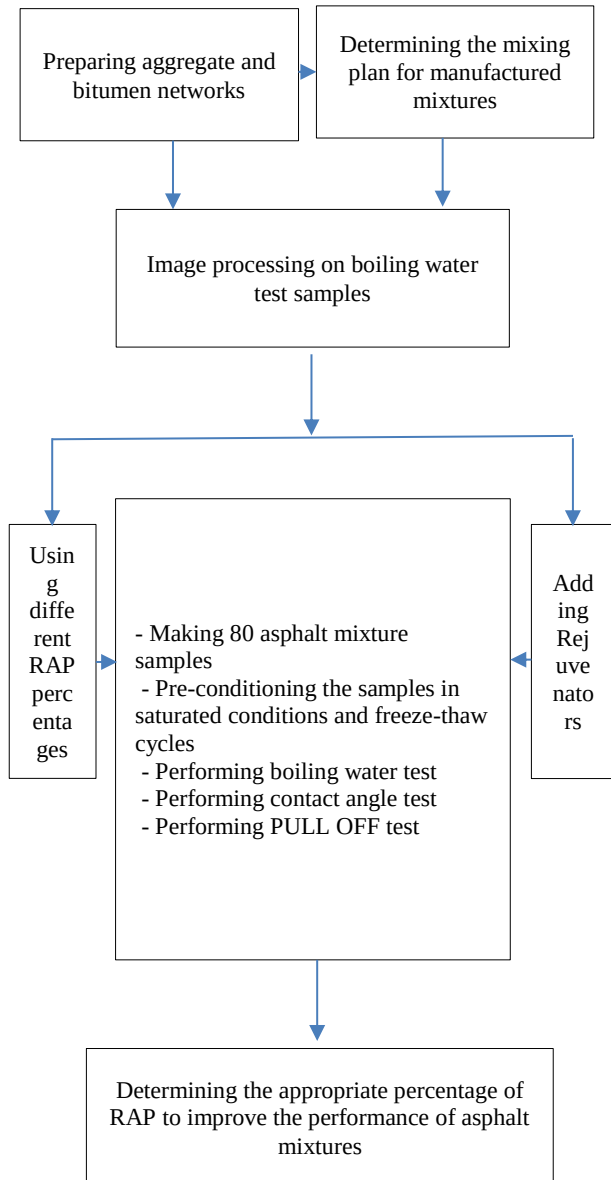


Fig. 1. Steps of the research method used in this study.

3- Results

In this section, the results obtained from various experiments on recycled asphalt mixtures containing different percentages of different chips from urban roads in the two provinces of Mazandaran and Golestan, and the Hemmat and Babaei highways, and the three rejuvenators of sunflower oil, cyclogen, and vacuum batum are presented.

The results of the adhesion and cohesion strength in the PULL OFF test of the mixtures made in dry and wet conditions show that limestone has higher adhesion and cohesion values with the base bitumen in both dry and wet conditions and in all four types of aggregates. However, with the addition of a rejuvenator, the adhesion and

cohesion strength in the dry state of limestone decreases and increases in the wet state; therefore, it can be stated that the addition of rejuvenators to recycled bitumens can have a significant effect on increasing adhesion. Also, the use of recycled chips with different percentages and different rejuvenators can help improve the performance of asphalt against tensile forces.

The results of the surface free energy measurements of the bitumens used in this study show that the rejuvenator-modified bitumen has a higher total surface free energy compared to the base bitumen, which causes this bitumen to experience less cohesion failure compared to the base bitumen. The surface free energy measurements of the bitumens from different samples showed significant differences. The rejuvenator-modified bitumens showed that they have a higher surface free energy, which could mean improved adhesion properties and reduced probability of failure between aggregates. Comparison of the results with the data available in the literature showed that increasing the percentage of rejuvenator effectively affects the stability and performance of asphalt. In other words, the findings of the present study indicate the improvement of asphalt performance by using rejuvenator compounds and recycled chips.

4- Conclusion

The most important results obtained from this study are briefly stated below:

- Samples with calcareous chert had the highest chert coverage (80.618 percent) and siliceous chert with a coverage of 51.340 percent resulted in the lowest coverage.
- According to the results of the moisture sensitivity test, mixtures containing limestone and asphalt recycling materials have greater resistance to moisture damage with increasing RAP percentage, and cyclogen rejuvenator can also be more effective than other rejuvenating materials, but with increasing RAP percentage, the performance of the rejuvenators becomes completely homogeneous.
- By examining the results of the PULL OFF test, it can be concluded that the use of rejuvenators, especially cyclogen, in modifying the surface of limestone leads to increased adhesion and cohesion. These can be used to improve the performance of stone materials.
- The results of measuring the surface free energy components of the bitumens used in this study show that the bitumen modified with a rejuvenator has a higher total surface free energy compared to the base bitumen, which causes this bitumen to experience less cohesion failure compared to the base bitumen.
- Multivariate regression model for predicting moisture deterioration behavior of recycled asphalt mixtures shows that variables such as recovery percentage (RAP), sand index, and Gastel index have a large impact on TSR values, and these variables are more sensitive to moisture changes. The TSR model is presented with high accuracy and low error, which indicates the good performance of the model in predicting moisture deterioration behavior of recycled asphalt mixtures.



بهبود عملکرد مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های بازیافتی و مواد جوانساز در مقابل خرابی رطوبتی*

مقاله پژوهشی

علی منیری^(۳)

پرهام حیاتی^(۲) ID

حمیدرضا افتخاری^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.91390.1334

چکیده در این تحقیق، تأثیر تراشه های آسفالتی بازیافتی، درصد استفاده از آنها و جوانسازهای روغنی بر خصوصیات خرابی رطوبتی مخلوط های آسفالتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. قیر مورد استفاده در این تحقیق، از نوع PG 64-16 می باشد. این تحقیق شامل ترکیبات مختلف با درصدهای مختلف تراشه و جوانساز بوده است. به منظور تعیین پارامترهای وقوع خرابی رطوبتی، آزمایشات انرژی آب سطحی بر روی قیر و آزمایش آب جوشان (به همراه پردازش تصویر جهت تحلیل میزان خرابی) و PULL OFF بر روی مخلوط های حاوی تراشه های آسفالتی بازیافتی انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات در ترکیب تراشه ها و افزودن جوانسازها تأثیر قابل توجهی بر مقاومت مخلوط ها در برابر خرابی رطوبتی دارند. همچنین مخلوط های آسفالتی حاوی سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می یابد. نتایج آزمایش PULL OFF حاکی از اهمیت جوانسازها در بهبود چسبندگی سنگدانه ها و پیوستگی مخلوط ها به سطح جاده است. همچنین نتایج اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است. نمونه ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش اب جوشان نتیجه دادند.

واژه های کلیدی مخلوط آسفالتی بازیافتی، درصد تراشه، خرابی رطوبتی، مواد جوانساز.

Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators

Hamidreza Eftekhari

Paraham Hayati

Ali Moniri

Abstract In this study, the effect of recycled asphalt chips, their percentage of use, and oil-based rejuvenators on the moisture deterioration properties of asphalt mixtures was investigated. The bitumen used in this study was PG 64-16. In order to determine the moisture deterioration parameters, surface water energy tests on bitumen, boiling water test (along with image processing to analyze the extent of deterioration) and PULL OFF were performed on mixtures containing recycled asphalt chips. The results showed that changes in the composition of chips and the addition of rejuvenators have a significant effect on the resistance of mixtures to moisture deterioration. Also, asphalt mixtures containing limestone have higher adhesion and cohesion values with the base bitumen in both dry and wet conditions. However, with the addition of rejuvenator, the adhesion and cohesion strength in the dry state of limestone decreases and increases in the wet state. The results of the PULL OFF test indicate the importance of rejuvenators in improving the adhesion of aggregates and the cohesion of mixtures to the road surface. Also, the results of measuring the surface free energy components of the bitumens used in this study showed that the bitumen modified with a rejuvenator has a higher total surface free energy compared to the base bitumen.

Key Words Recycled asphalt mixture, Chip percentage, Moisture damage, Rejuvenating materials, Indirect tensile strength resistance

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۲۲ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مقدمه

مطالعات نشان می دهد که استفاده از تکنولوژی بازیافت آسفالت قبل از تخریب کامل لایه های آسفالتی، هزینه های تعمیر و نگهداری را به طور معنی داری کاهش می دهد [1]. اگرچه استفاده گسترده از مواد بازیافتی (RAP) در تولید مخلوط های آسفالتی به مزایای اقتصادی و زیست محیطی چشمگیری منجر شده است، اما مهم ترین چالش در استفاده از مخلوط های آسفالتی با درصد بالای RAP، فرسودگی قیر موجود در RAP است که به علت اکسیداسیون قیر و گذشت زمان، سفتی آن را افزایش داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر می دهد و کارایی آن را کاهش می دهد [2]. کارایی ناکافی مخلوط های آسفالتی با تراکم مناسب در محل را متوقف کرده و در نهایت می تواند منجر به تشکیل ترک های ریز و زودرس شکست در سطح روسازی ایجاد شده در مکان گردد.

بسیاری از پژوهشگران معتقدند که با توجه به ساختار لایه ای قیر در تراشه های آسفالت، قیر همیشه به تراشه ها چسبیده و سنگدانه هایی با رنگ تیره ایجاد می کند. این قیر هرگز از سنگدانه ها جدا نمی شود و باعث جلوگیری از ورود آب به سنگدانه های تراشه آسفالت می شود و در نتیجه تراشه ها مشکلی در مورد حساسیت به رطوبت نخواهند داشت. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده اند که این موضوع، یعنی مواد خرده آسفالتی مانند سنگدانه های تیره در ترکیب با قیر جدید عمل نمی کنند، تا حدی صحیح است و نوع مواد سنگی می تواند تأثیرگذار باشد [3]. این موضوع تا به امروز به طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته و تأثیر ارتباط میان میزان عریان شدگی قبل از بازیافت آسفالت و میزان عریان شدگی پس از بازیافت آسفالت مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی این مسئله می تواند باعث شود که متخصصان راهسازی و افراد فعال در صنعت بازیافت آسفالت در طراحی ترکیبات آسفالت بازیافتی در مورد موضوعاتی مانند عریان شدگی و حساسیت به رطوبت حساس تر عمل کنند و این موضوع را در نظر بگیرند [4,5]. از همین رو در مطالعه حاضر، ضمن بررسی تأثیر جنس تراشه های آسفالت مختلف، به بررسی تأثیر وجود خرابی رطوبتی در تراشه آسفالت بر حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی بازیافتی و همچنین تأثیر استفاده از انواع مواد جوانساز مورد استفاده در مخلوط های آسفالتی بازیافتی بر حساسیت رطوبتی این مخلوط ها پرداخته می شود.

مطالعات پیشین

مطالعات مختلف بر روی عملکرد مخلوط های آسفالتی بازیافتی انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات تأثیر تراشه های به کار رفته در مخلوط های آسفالتی بازیافتی تنها مورد بررسی قرار گرفت و در شماری دیگر علاوه بر این موضوع به تأثیر استفاده از انواع جوانساز ها نیز پرداخته شد.

قابچی و همکارانش [6] در سال ۲۰۱۴ به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالت بازیافتی با درصد های مختلف تراشه آسفالت با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی پرداختند. آن ها نشان دادند که نرخ انرژی با استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی افزایش پیدا می کند و از نظر انرژی آزاد سطحی، با افزایش درصد تراشه حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی کم می شود. همچنین میزان تأثیر تراشه آسفالت زمانی که سنگدانه های جدید از انواع مختلف استفاده می شوند متفاوت هستند. به عنوان مثال تأثیر مثبت تراشه آسفالت بر نرخ انرژی در سنگدانه های آهکی بسیار بیشتر از گرانیتی هستند. ایازی و همکارانش [7] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و افزایش درصد تراشه آسفالت موجب بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی خواهد شد. آن ها نشان دادند که با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط های آسفالتی تا ۷۰ درصد، پارامتر TSR تا میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا می کند و به ۱۰۰ درصد می رسد. علت این موضوع عمدتاً ساختار لایه ای قیر در تراشه های آسفالتی عنوان شده است. در واقع این طور بیان شده است که یک لایه قیر همیشه اطراف تراشه های آسفالت چسبیده است باعث می شود تا برخورد رطوبت با مصالح سنگی در این مخلوط های کم تر اتفاق می افتد و لذا حساسیت رطوبتی این مخلوط ها بهبود پیدا می کند. منبری و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت تا میزان ۱۰۰ درصد باعث می شود تا مقاومت این مخلوط ها در برابر رطوبت افزایش پیدا کند. در این تحقیق هم علت این موضوع ساختار لایه ای قیر در این مخلوط ها عنوان شده است [8].

علی رغم این که بسیاری از مطالعات حاکی از تأثیر مثبت استفاده از تراشه آسفالت در مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی بوده است، برخی مطالعات وجود دارد که نشان دهنده تأثیر منفی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی بر

مختلف می‌تواند تا حد زیادی پارامتر مقاومت کششی غیرمستقیم را کاهش دهد. زهور (Zahoor) و همکارانش [15] در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که عدد اسیدی در جوانسازهای بازیافتی تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی دارند. حق‌شناس و همکارانش هم در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که خصوصیات شیمیایی جوانسازها تأثیر بسزایی در حساسیت رطوبتی آن‌ها دارد [16].

مطالعات زیادی در مورد تأثیر جوانسازی‌های مختلف بر مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالت ترکیب‌شده با مصالح RAP وجود دارد [17-21]. با توجه به این واقعیت که جوانسازها باعث کاهش سفتی قیر پیر شده‌ی مصالح RAP شده باعث کاهش قابل‌توجه مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. جیا و هوانگ با آماده‌سازی مخلوط‌هایی با سه درصد RAP (۰، ۲۵، ۴۰ درصد) و ترکیب با ۳ درصد جوانساز از نوع روغن ضایعاتی (۰، ۲۵، ۵۰ درصد) مقاومت در برابر شیار شدگی را با استفاده از آزمایش APA ارزیابی کرده و مشاهده کرد که جوانسازها تأثیر منفی بر مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی دارد [22]. کارکی و همکارانش با استفاده از آزمایش ویل تراک، مقاومت در برابر شیار شدگی سه نوع مخلوط نیمه گرم شده و درصد‌های مختلف از جوانساز (۰، ۲، ۵، ۱۰) مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که مخلوط‌های دارای جوانساز دارای عمق شیار شدگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های بدون جوانساز می‌باشد [23]. آرامبولا و کاسر، تأثیر جوانساز از نوع روغن‌های چوب را بر شیار شدگی مخلوط‌های پیر شده‌ی کوتاه‌مدت (دو ساعت در دمای ۱۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) با دو نوع مصالح سنگی (آهکی و ماسه‌ای) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که مخلوط حاوی ۱۲/۵ درصد جوانساز روغن چوب نمی‌تواند معیار مقاومت در برابر شیار شدگی (کمتر از ۱۲/۵ میلی‌متر) را عبور کند [24].

روش تحقیق

در این پژوهش از چهار درصد RAP با درصد‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و سه نوع جوانساز از گروه‌های مختلف انواع جوانسازها استفاده گردید. سپس برای تعیین درصد بهینه‌ی

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. فخری و احمدی [9] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با افزایش سیکل یخبندان و ذوب با طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی هم یخبندان و ذوب تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند که شیب کاهش پارامتر مقاومت ترک‌خوردگی در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت و مخلوط‌های متداول با یکدیگر تفاوت چندانی ندارند. ترن (Tran) و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت بدون استفاده از جوانساز کاهش پیدا می‌کند. با این وجود پس از استفاده از جوانساز این مقاومت مجدداً بازیابی می‌شود. مطالعات ترن نشان داده است که استفاده از تراشه آسفالت تأثیر منفی در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت دارند. سینگ (Singh) و همکارانش در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی به بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی مختلف در برابر رطوبت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش درصد تراشه آسفالت تا ۳۰ درصد باعث بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و پس از آن در صورتی که درصد تراشه آسفالت تا ۴۰ درصد افزایش پیدا کند مقاومت این مخلوط‌ها در برابر رطوبت کاهش می‌یابد [11].

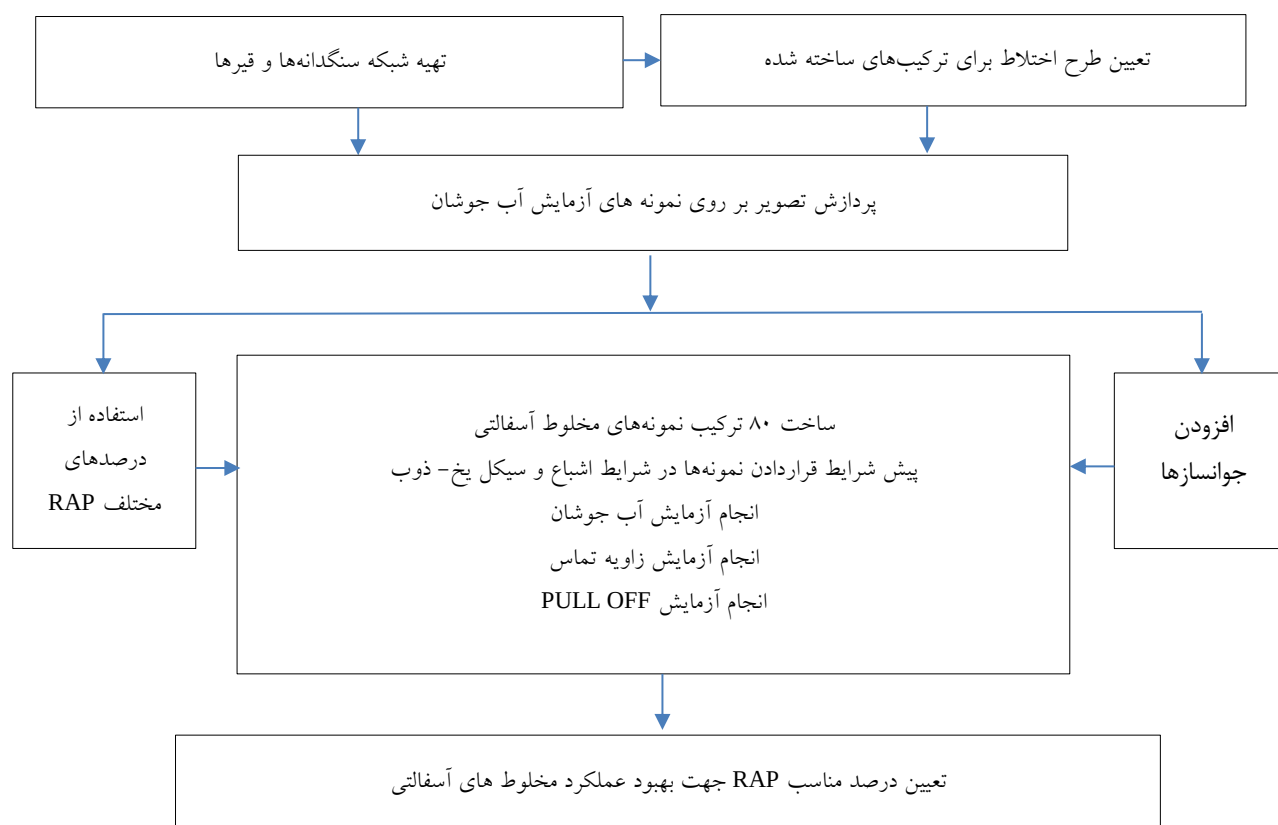
یان (Yan) و همکارانش [12] در سال ۲۰۲۲ از روش انرژی سطحی برای بررسی چسبندگی روغن سوخته خوراکی بازیافتی به عنوان جوانساز استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از روغن بازیافتی موجب افزایش نرخ انرژی و بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در برابر عریان شدگی می‌شود. فنگ (Fang) و همکارانش [13] در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای موردی به بررسی تأثیر جوانسازهای مختلف بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که روغن کلزا، روغن‌های گیاهی و روغن تال تأثیر مثبت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها دارند. با این وجود روغن کرچک و روغن سوخته خوراکی باعث کاهش مقاومت در برابر رطوبت می‌شود. شیخ (Xie) و همکارانش [14] در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که استفاده از ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی با دو جوانساز

چکش مارشال تهیه گردیده و نمونه های ساخته شده تحت بارگذاری دستگاه های موردنظر برای ارزیابی خواص مکانیکی قرار گرفتند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی از دو آزمایش آب جوشان و آزمایش PULL OFF و همچنین به منظور بررسی مشخصات قیر، از آزمایش انرژی آزاد سطحی قیر استفاده شد. شکل (۱)، قلوچارت مطالعه حاضر را نشان می دهد.

مصالح مصرفی

در ساخت نمونه های آزمایشگاهی از مصالح مختلفی از قبیل: خرده مصالح آسفالتی، قیر، مصالح سنگی و جوانساز استفاده شده که در ادامه به تفکیک ارائه شده است.

جوانسازها، قیرپیرشده ی مخلوط های بازیافتی (RAP) استخراج گردیده و سپس با استفاده از آزمایش های متداول قیر (درجه ی نفوذ و نقطه ی نرمی) درصد بهینه ی هریک از جوانسازها تعیین گردید. با ارزیابی میزان اثرگذاری ساختار مصالح طرح بر روی ویژگی های حجمی مخلوط های آسفالتی، از بین دانه بندی های مختلف ساختار و دانه بندی که پاسخگوی نیازهای طرح اختلاط و سیستم روسازی باشد انتخاب گردید. با انتخاب دانه بندی مصالح طرح، نمونه های آسفالتی به منظور تعیین درصد بهینه ی حالت های مختلف مخلوط های آسفالتی، با استفاده از الزامات و استانداردهای طرح اختلاط مارشال تهیه گردید. سپس به ازای درصد های قیر بهینه ی به دست آمده نمونه ها در ابعاد مشخص طبق استاندارد هر نوع آزمایش با استفاده از متراکم کننده ی برقی



شکل ۱. مراحل روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش

مصالح سنگی

کانی های تشکیل دهنده مصالح سنگی مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود که سنگدانه برداشت شده از آسفالت راه های شهری استان مازندران از نوع آهکی می باشد. با بررسی سایر سنگدانه ها مشخص شد که سنگدانه های استان گلستان از نوع گرانیتی می باشد. سنگدانه های دو بزرگراه همت و بابایی نیز از نوع گرانیتی می باشد.

دانه بندی مصالح سنگی تراشه ای آسفالت (RAP)

دانه بندی چهار نمونه از مصالح سنگی تراشه ای آسفالت پس از جداسازی قیر پیر شده در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از دانه بندی مصالح سنگی تراشه ای آسفالت نشان می دهد که دانه بندی مورد نظر در محدوده ی دانه بندی شماره ی ۴ آیین نامه واقع شده است.

قیر

درصد قیر آسفالت بازیافتی طبق استاندارد ASTM D2172 [25] و روش اکسترکشن تعیین گردید. قیر مصرفی مورد استفاده در این راه ها، قیر PG 64-16 می باشد. نوع قیر و خصوصیات آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

جوانساز

در این پژوهش به منظور بازگرداندن خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده ی موجود در آسفالت بازیافتی از سه نوع جوانساز و عامل بازیافتی روغن آفتابگردان، آروماتیک (سایکول وژن cyclogen) و نفتیک (وکیوم باتوم) استفاده شده است. جدول (۴) مشخصات جوانسازهای مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می دهد.

جدول ۱ کانی های تشکیل دهنده سنگدانه های تراشه آسفالت

ردیف	معبّر	Sio2	Al2o3	Fe2o3	Mgo	Cao	Sio2/ Cao
۱	گلستان	۶۶/۸۴	۱۳/۵۲	۴/۰۵	۱/۷۲	۱۳/۴۷	۴/۹۶
۲	مازندران	۱۶/۴۷	۴/۷۸	۳/۸۲	۲/۲۲	۷۲/۳۴	۰/۲۸
۳	بزرگراه بابایی	۵۲/۱۹	۶/۰۴	۷/۰۷	۲/۸۸	۳۱/۷۱	۱/۶۵
۴	بزرگراه همت	۵۰/۱۰	۵/۹۱	۶/۹۳	۲/۸۰	۳۰/۴۵	۱/۶۴

جدول ۲ درصد عبوری مصالح سنگی تراشه آسفالت پس از جداسازی قیر

اندازه الک	درصد عبوری					درصد عبوری نمونه ی				
	(دانه بندی شماره ی ۴ نشریه ی ۲۳۴)					۱	۲	۳	۴	متوسط
۱۹ میلی متر (۳/۴ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی متر (۱/۲ اینچ)	۱۰۰-۹۰	۹۸/۲	۹۹/۵	۹۸/۹	۹۹	۹۸/۹	۹۹	۹۸/۹	۹۹	۹۸/۹
۹/۵ میلی متر (۳/۸ اینچ)	---	۹۳/۳	۹۵/۳	۹۵/۵	۹۵/۴	۹۵/۵	۹۵/۴	۹۵/۵	۹۵/۴	۹۴/۹
۴/۷۵ میلی متر (شماره ی ۴)	۷۴-۴۴	۵۰/۶	۵۸/۸	۶۲/۴	۶۴/۸	۶۲/۴	۶۴/۸	۶۲/۴	۶۴/۸	۵۹/۲
۲/۳۶ میلی متر (شماره ی ۸)	۵۸-۲۸	۲۹/۵	۳۸/۲	۴۱/۶	۴۳/۷	۴۱/۶	۴۳/۷	۴۱/۶	۴۳/۷	۳۸/۳
۱/۱۸ میلی متر (شماره ی ۱۶)	---	۲۴/۵	۲۴/۰	۲۳/۰	۲۴/۵	۲۳/۰	۲۴/۵	۲۳/۰	۲۴/۵	۲۴/۰
۰/۶ میلی متر (شماره ی ۳۰)	---	۱۸/۰	۱۸/۵	۱۹/۵	۱۸/۰	۱۹/۵	۱۸/۰	۱۹/۵	۱۸/۰	۱۸/۵
۰/۳ میلی متر (شماره ی ۵۰)	۲۱-۵	۱۰/۵	۱۱/۶	۱۱/۰	۱۴/۶	۱۱/۰	۱۴/۶	۱۱/۰	۱۴/۶	۱۱/۹
۰/۷۵ میلی متر (شماره ی ۲۰۰)	۱۰-۲	۵/۹	۶/۵	۴/۶	۹/۲	۴/۶	۹/۲	۴/۶	۹/۲	۶/۶

جدول ۳ مشخصات قیر بازیافتی از تراشه آسفالت

نوع آزمایش	روش استاندارد	G-G	M-B	T-B	T-H
درصد قیر (درصد)	ASTM D2172	۴/۴۷	۵/۵۸	۵/۰۲	۴/۷۹
درجه نفوذ در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (۰/۱ میلیمتر)	ASTM D5	۳۱	۲۹	۲۵	۲۲
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۵۶/۴	۵۷/۷	۵۹/۶	۶۱/۳
ویسکوزیته در دما ۱۳۵ درجه سانتیگراد (پاسکال ثانیه)	ASTM 4402	۰/۸۱۱	۰/۷۹۱	۰/۷۸۲	۰/۷۶۱

جدول ۴ مشخصات جوانسازهای مورد استفاده

نوع آزمایش	روش استاندارد	گیاهی (روغن آفتابگردان)	آروماتیک (سایکولوژن cyclogen)	نفتیک (وکیوم باتوم)
پایه	*	گیاهی	نفتی	نفتی
رنگ	*	زرد	زرد	سیاه
بو	*	ندارد	ندارد	ندارد
حلالیت در آب	*	ندارد	ندارد	ندارد
وزن مخصوص در دما ۲۵ درجه سانتیگراد (گرم بر سانتیمتر مکعب)	ASTM D70	۰/۹۸۱	۰/۹۷۲	۱/۰۳۲
درجه اشتعال (درجه سانتیگراد)	ASTM D92	۳۱۵	۲۱۹	۲۸۱
کندروانی کینماتیکی در دما ۱۰۰ درجه سانتیگراد (استوکس)	ASTM D2170	۳۱	۱۱	۱۳
لعب نازک قیر افت حرارتی (درصد)	ASTM D1754	۲/۱	۱/۶	۲/۷

آزمایش های انجام شده

آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان (Boiling Water Test)، یک آزمایش ساده برای ارزیابی حساسیت مخلوط های آسفالتی در برابر رطوبت است که با توجه به استاندارد ASTM D3625 انجام می گیرد [27]. براساس این استاندارد در حدود ۲۵۰ گرم از نمونه های غیرمتراکم از مخلوط های آسفالتی به آب جوشان اضافه می شوند و در حدود ۱۰ دقیقه در همین شرایط قرار داده می شوند، سپس نمونه ها را به دمای محیط آورده تا خنک شوند. بعد از خنک و خشک شدن نمونه ها، آن ها را بر روی کاغذ سفید رنگ ریخته و جهت پردازش تصویر، از آن ها عکسبرداری می شود. کاهش سطح پوشش قیری بعد از آزمایش آب جوشان به عنوان شاخص خرابی رطوبتی ارزیابی می شود [28].

آزمایش مقاومت کشش و کنده شدن (Pull off)

در این تحقیق، آزمایش off-Pull نیز استفاده شده است. در این آزمایش، نمونه های قیری تحت شرایط کشش مستقیم برای اندازه گیری مقدار چسبندگی قیر به سنگدانه و اندازه گیری پیوستگی قیر مورد استفاده قرار می گیرند. در این راستا، از دستگاه

AASHTO TP 215 و ASTM D4541 (2017) برای آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش off-Pull، استاب هایی استفاده می گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب میچسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می شود و فک دستگاه روی استاب قرار میگیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد [29]. نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایش off-Pull، حداکثر تنشی است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می کند.

در این پژوهش، آزمایش off-Pull مطابق شکل (۲) در دو حالت خشک و تر و با ضخامت کم و زیاد قیر انجام شده است. ضخامت زیاد قیر، معادل با گسیختگی در غشای قیر یا گسیختگی

روش صفحه شیب دار، وقتی قطره روی سطح قرار گرفت ننگه دارنده نمونه را (همراه نمونه) کج می کنیم. به محض اینکه قطره شروع به لغزش روی سطح کرد زاویه پیشروی و زاویه پسروی را ثبت می کنیم [26].



شکل ۳ دستگاه اندازه گیری زاویه تماس

اندازه گیری مؤلفه های انرژی آزاد سطحی با استفاده از روش قطره چسبیده یکی از روشهای متداولی است که امروزه برای مواد جامد مورد استفاده قرار میگیرد. این روش را هم می توان برای سنگدانه و هم برای قیر (به صورت جامد) مورد استفاده قرار داد، به شرطی که مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه کوچک باشد. سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش دارای مؤلفه های انرژی آزاد سطحی بزرگ هستند که این روش برای اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی آنها مناسب نیست.

نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات مختلف بر روی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی درصدی متفاوت تراشه های مختلف از راههای شهری در دو استان مازندران و گلستان و بزرگراههای همت و بابایی و سه جوانساز روغن آفتابگردان، سایکلوژن و وکیوم باتوم ارایه می شود.

آزمایش آب جوشان

نتایج بدست آمده از پردازش تصویر (Image Processing) نمونه های آسفالتی غیرمترکم بعد از آزمایش آب جوشان در شکل (۴) نشان داده شده است. تصاویر نشان می دهند که نقاط زرد رنگ در نمونه های آسفالتی با تراشه راههای استان مازندران

پیوستگی و حالت ضخامت کم قیر، معادل با گسیختگی سطح تماس قیر- سنگدانه یا گسیختگی چسبندگی است.



شکل ۲ قرارگیری نمونه ها در آزمایش PULL OFF

آزمایش زاویه تماس (Sessile Drop)

برای اندازه گیری زاویه تماس دو روش وجود دارد: در روش غیر مستقیم زاویه تماس با اندازه گیری نیرو (مانند روش Wilhelmy) به دست می آید. در روش مستقیم زاویه تماس از روی تصویر (مثل روش Sessile Drop) اندازه گیری می شود. از بین این روش ها، روش های مستقیم به علت دقت بالاتر و نیاز به حجم کمتری از مایع، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. روش های Sessile Drop و صفحه شیب دار دو روش اصلی برای اندازه گیری زاویه تماس دینامیک هستند. در روش Sessile Drop (شکل ۳) ابتدا قطره روی یک نمونه افقی تزریق می شود، تزریق ادامه پیدا می کند و زاویه تماس حین حرکت خط تماس اندازه گیری می شود (زاویه تماس پیشروی). عکس این حرکت برای اندازه گیری زاویه تماس پسروی انجام می شود. برای یک سطح صاف همگن، انرژی آزاد سطح با نوشتن معادله حالت از طریق روش Sessile Drop به دست می آید. در

می توان پی برد که هر چه مقادیر SiO_2 کمتر باشد، مقاومت در برابر خرابی رطوبتی بیشتر می باشد [27]. همانطور که از نتایج جدول (۵) مشخص است؛ نمونه ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش آب جوشان نتیجه دادند.

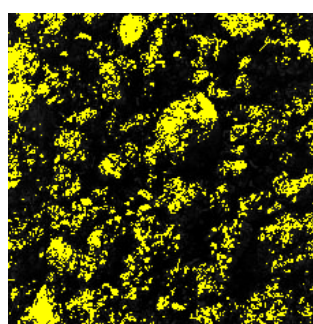
نسبت به نمونه های استان گلستان و بزرگراه های همت و بابایی کمتر می باشد. همچنین در جدول (۴) درصد مقدار پوشش (coating) قیری بر روی سطح سنگدانه ها ارایه شده است که با مقایسه تصاویر شکل (۴) و نتایج این جدول می توان بیان کرد که هر چه درصد کانی CaO در تراشه ها بیشتر باشد، مخلوط های آسفالتی مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارد. علاوه بر این با مقایسه تراشه های استان گلستان و بزرگراه های همت و بابایی،

تراشه

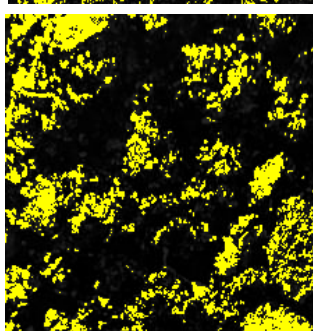
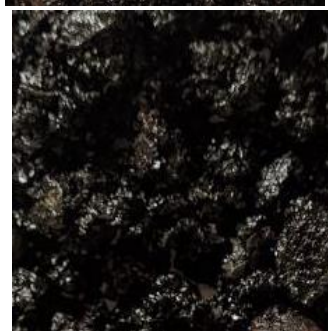
نمونه بعد از آزمایش جوشان

پردازش تصویر

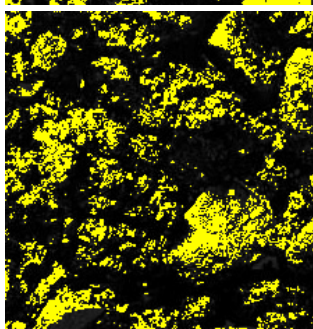
M-B



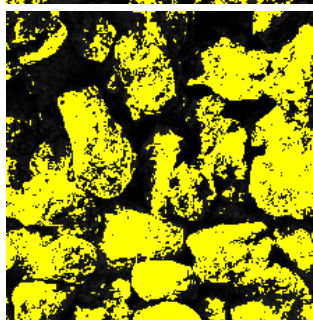
T-B



T-H



G-G



شکل ۴ پردازش تصویر نمونه ها بعد از آزمایش آب جوشان

جدول ۵ نتایج پردازش تصویر سنگدانه‌ها بعد از آزمایش آب جوشان

نوع تراشه	درصد سطح پوشش سنگدانه‌ها	شاخص تحلیل تصویری پوشش	ماهیت مصالح (XRD)
M-B	۸۰/۶۱۸	زیاد	آهکی
G-G	۵۱/۳۴۰	کم	سیلیسی
T-H	۷۶/۵۰۴	متوسط	ترکیبی
T-B	۷۹/۳۱۱	متوسط	ترکیبی

آزمایش PULL OFF

چسبندگی و پیوستگی نمونه‌های اصلاح شده با انواع جوانساز دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری می‌باشد. علاوه بر این، در بین مواد جوانساز، نمونه‌های اصلاح سده با سایکلوزن دارای بیشترین مقدار چسبندگی و پیوستگی می‌باشد [30]. بنابراین می‌توان بیان کرد که افزودن جوانسازها به قیرهای بازیافتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افزایش چسبندگی داشته باشد. مقادیر مقاومت چسبندگی و پیوستگی برای هر نمونه به صورت دقیق اندازه‌گیری و ثبت شد و تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که استفاده از تراشه‌های بازیافتی با درصد‌های مختلف و جوانسازهای متفاوت، می‌تواند به بهبود عملکرد آسفالت در برابر نیروهای کششی کمک کند.

جدول ۶ مقاومت چسبندگی (کیلو پاسکال) در آزمایش چسبندگی

PULL OFF

حالت	مصالح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوزن	قیر با وکیوم باتوم
خشک	M-B	۲/۸	۳/۰	۳/۸	۳/۶
	T-H	۲/۵	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	T-B	۲/۴	۳/۲	۳/۸	۳/۵
	G-G	۲/۳	۳/۳	۳/۸	۳/۵
تر	M-B	۲/۰	۲/۷	۳/۵	۳/۳
	T-H	۱/۶	۲/۶	۳/۲	۳/۱
	T-B	۱/۵	۲/۶	۳/۲	۳/۰
	G-G	۱/۴	۲/۵	۳/۱	۲/۹

در جداول (۶) و (۷) به ترتیب نتایج مقاومت چسبندگی و مقاومت پیوستگی پول آف ترکیبات ساخته شده در شرایط خشک و مرطوب ارائه شده است. دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد است. نرخ بارگذاری که یک پارامتر مهم در آزمایش‌های ارزیابی مقاومت کششی می‌باشد، ثابت فرض شده است. نرخ بارگذاری ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه است. در این راستا، از دستگاه A-AT test Pose استفاده شد. همچنین، استاندارد ۹۱-ASTM D4541 (2017) و AASHTO TP (2015) برای آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه‌ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش off-Pull، استاب‌هایی استفاده می‌گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب می‌چسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می‌چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه‌گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می‌شود و فک دستگاه روی استاب قرار می‌گیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می‌گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد (ASTM D4541، ۲۰۱۷). نرخ افزایش نیرو در این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایش off-Pull، حداکثر تنش است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می‌کند.

همان‌طور که از نتایج پیداست سنگ آهک در هر دو شرایط خشک و تر و در هر چهار نوع سنگدانه دارای مقادیر چسبندگی و پیوستگی بیشتری با قیر پایه می‌باشد. اما با اضافه شدن جوانساز مقاومت چسبندگی و پیوستگی در حالت خشک در سنگ آهک کاهش و در حالت تر افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر مقاومت

جدول ۷ مقاومت پیوستگی (کیلو پاسکال) در آزمایش چسبندگی

PULL OFF					حالت
مصلح سنگی	قیر PG 64-10	قیر با جوانساز گیاهی	قیر با سایکلوزن	قیر با وکیوم باتوم	
M-B	۴/۰	۴/۵	۴/۹	۴/۷	خشک
T-H	۳/۹	۴/۶	۵/۰	۴/۸	
T-B	۳/۹	۴/۷	۵/۱	۴/۸	
G-G	۳/۸	۴/۸	۵/۲	۵/۰	
M-B	۳/۲	۳/۸	۴/۵	۴/۳	تر
T-H	۲/۸	۳/۶	۴/۲	۴/۲	
T-B	۲/۶	۳/۵	۴/۰	۴/۱	
G-G	۲/۴	۳/۴	۳/۸	۴/۰	

انرژی آزاد سطحی قیر

برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر در روش قطره چسبنده، ابتدا باید زاویه تماس سه مایع آزمایش با قیر مورد نظر اندازه گیری شود. برای اینکه بتوان مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر را از روی زوایای تماس با مایع های آزمایش تعیین کرد، باید از مایع هایی استفاده نمود که مولفه های انرژی آزاد سطحی آن ها معلوم باشد. معمولاً برای اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی با روش زاویه تماس از یک ماده قطبی، یک

ماده غیر قطبی و یک ماده نیمه قطبی استفاده میشود که این مواد در این پژوهش به ترتیب آب، دی یدومتان و اتیلن گلیکول بوده اند. مولفه های انرژی آزاد سطحی مایع های آزمایش مورد نظر در این پژوهش در جدول (۸) ارائه شده است.

پوشش دهی یکی از توانایی های مایع ها در تماس با سطح جامد میباشد که با زاویه تماس ارتباط دارد. این پارامتر در نتیجه تماس دو ماده که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، اندازه گیری می شود. اگرچه این مفهوم معنای متفاوتی با چسبندگی دارد اما براساس نظر بعضی پژوهشگران میتواند شرایط الزم برای ایجاد چسبندگی مناسب را فراهم کند. هر چه زاویه تماس جسم مایع بر روی سطح جامد کمتر باشد نشان دهنده این است که قابلیت پوشش دهی آن ماده بهتر است. معمولاً زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری خوب و زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری ضعیف در نظر می گیرند. همانطور که از داده های جدول (۹) مشاهده میشود، مایع های آزمایش روی قیر اصلاح شده با جوانساز دارای زاویه تماس های کوچکتری نسبت به قیر پایه هستند. این رخداد مورد انتظار بود، زیرا جوانسازها سبب کاهش کندروانی و افزایش درجه نفوذ و قابلیت روانی می شوند که این پارامتر میتواند در پوشش پذیری موثر باشد. البته ساختار قیر و نوع مایع مورد استفاده در تعیین پوشش دهی تعیین کننده است.

جدول ۸ مایعات آزمایش به همراه اجزای انرژی آزاد سطحی آنها

مایعات آزمایش	مولفه قطبی Γ^{AB}_L	مولفه بازی Γ^-_L	مولفه اسیدی Γ^+_L	مولفه غیر قطبی Γ^{LW}_L	مولفه کل $\Gamma_{L\text{ total}}$
آب	۵۱/۰	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۱/۸	۷۲/۸
دی یدومتان	۰	۰	۰	۵۰/۸	۵۰/۸
اتیلن گلیکول	۱۹/۱	۳۱/۳	۲/۳۴	۲۹/۰	۴۸/۲۹

جدول ۹ اجزای انرژی آزاد سطحی قیر پایه و اصلاح شده به همراه زوایای تماس با مایعات آزمایش

مشخصات	قیر پایه	قیر + جوانساز R1	قیر + جوانساز R2	قیر + جوانساز R3
زاویه تماس با آب	۱۲۶/۶۷	۱۲۳/۲۰	۱۱۷/۴۰	۱۲۰/۴۴
زاویه تماس با دی یدومتان	۱۱۶/۳۳	۱۱۲/۴۳	۱۰۹/۶۳	۱۱۱/۳۹
زاویه تماس با اتیلن گلیکول	۱۱۳/۷۲	۱۰۹/۷۸	۱۰۵/۵۸	۱۰۷/۶۸
انرژی آزاد سطحی کل (mJ/m^2)	۱۴/۹۴	۲۰/۶۵	۲۶/۱۵	۲۳/۹۴
انرژی آزاد غیر قطبی (mJ/m^2)	۱۳/۲۳	۱۸/۷۸	۲۳/۷۸	۲۰/۵۳
انرژی آزاد قطبی (mJ/m^2)	۲/۱۱	۲/۱۷	۲/۶۷	۲/۴۴
مولفه اسیدی انرژی آزاد سطحی (mJ/m^2)	۲/۲۵	۱/۹۵	۱/۸۲	۱/۹۰
مولفه بازی انرژی آزاد سطحی (mJ/m^2)	۰/۴۳	۰/۶۴	۰/۹۴	۰/۷۸

که درصد بالایی از تراشه می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش شکنندگی مخلوط شود. این یافته‌ها تا حدی با نتایج این مطالعه متفاوت است که نشان می‌دهد با استفاده از نسبت‌های مناسب و جوانسازهای انتخابی، می‌توان اثرات منفی ناشی از استفاده بیش از حد تراشه‌ها را کاهش داد [31].

نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به صورت اختصار در ادامه بیان شده است:

۱. با توجه به نتایج آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر نمونه‌های آسفالتی غیرمترکم، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های آسفالتی با تراشه آهکی نسبت به نمونه‌های گرانیتی دارای نقاط زرد کمتری هستند. به عبارت دیگر ترکیب‌های با مقادیر بیشتر CaO و کمتر SiO_2 در تراشه‌ها، موجب افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل عوامل خرابی رطوبتی می‌شوند.

۲. نمونه‌ها با سنگدانه آهکی دارای بالاترین سطح پوشش سنگدانه (۸۰/۶۱۸ درصد) و سنگدانه‌های سیلیسی با سطح پوشش ۵۱/۳۴۰ درصد کمترین میزان سطح پوشش را پس از انجام آزمایش آب جوشان نتیجه دادند.

۳. با بررسی نتایج آزمایش PULL OFF می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جوانسازها، به ویژه سایکلوژن، در اصلاح سطح سنگ آهک منجر به افزایش قابلیت چسبندگی و پیوستگی می‌شود. این موارد می‌توانند در بهبود عملکرد مصالح سنگی مورد استفاده قرار گیرند.

۴. نتایج اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث می‌شود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند.

واژه نامه

Cyclogen	سایکولوژن
RAP	تراشه‌ی آسفالت بازیافتی
Pull-off Test	آزمایش کشش چسبندگی

سپاسگزاری

انرژی آزاد کل پارامتری با تاثیر دوگانه به شمار می‌آید زیرا افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی خستگی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار می‌آید و از طرفی باعث کاهش در پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر-سنگدانه نامطلوب است. زیرا افزایش در پوشش پذیری سبب میشود تا سطح تماس بیشتری از سنگدانه توسط قیر پوشش داده شود که می‌تواند به موثر بودن چسبندگی مناسب بین قیر و سنگدانه کمک کند. نتایج اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با جوانساز دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر پایه است که باعث میشود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر پایه تجربه کند. همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول مشخص است، مولفه قطبی قیر در مقایسه با مولفه غیرقطبی آن بسیار کوچک است. حتی دیده شده است، در بعضی از تحقیقات مولفه قطبی قیر برابر با صفر محاسبه شده است. براین اساس میتوان گفت قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است که پیوند آن با سایر مواد نیز عمدتاً از طریق مولفه غیرقطبی و پیوندهای کوالانسی می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی قیر از نمونه‌های مختلف نشان دهنده تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بود. قیرهای اصلاح شده با جوانساز نشان دادند که دارای انرژی آزاد سطحی بالاتری هستند که این امر می‌تواند به معنای بهبود خواص چسبندگی و کاهش احتمال گسیختگی در بین سنگدانه‌ها باشد. مقایسه نتایج با داده‌های موجود در ادبیات نشان داد که افزایش درصد جوانساز به طور مؤثری بر افزایش پایداری و کارایی آسفالت تأثیر می‌گذارد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۲۳، که بر روی اثرات مختلف مواد جوانساز بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام آسفالت تمرکز داشت، مشخص شد که استفاده از جوانسازهای بر پایه روغن‌های گیاهی می‌تواند به طور مؤثری مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و خستگی را بهبود بخشد. این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر که نشان دهنده بهبود عملکرد آسفالت با استفاده از ترکیبات جوانساز و تراشه‌های بازیافتی است، هم‌راستا هستند [1].

در سال ۲۰۲۴، مطالعاتی که بر روی تأثیر تراشه‌های بازیافتی بر خواص فیزیکی و شیمیایی آسفالت تمرکز داشتند، نشان دادند

مراجع

- [1] H. Ziari, B. Mojaradi, S. A. Saadatjoo, A. Amini, V. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseini, "Laboratory investigation of reclaimed asphalt mixtures containing cyclogen and vacuum bottom rejuvenators," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6223569>
- [2] R. Fariman, S. A. Hosseini, and M. Fakhri, "Developing a prediction model for rutting depth of warm mix asphalt mixture using neural network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 1–16, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.74238.1104>
- [3] H. Nabizadeh, H. F. Haghshenas, Y.-R. Kim, and F. T. S. Aragão, "Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 65–73, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101>
- [4] T. Mattinzioli, F. Moreno, M. Rubio, and G. Martínez, "LCA and cost comparative analysis of half-warm mix asphalts with varying degrees of RAP," in *Pavement, Roadway, Bridg. Life Cycle Assess. 2020*, Proceedings of the International Symposium on Pavement. Roadway, Bridg. Life Cycle Assess. 2020, Sacramento, CA, Jun. 2020, CRC Press, 2020, p. 354.
- [5] A. Sarhangi, F. Omidinasab, and A. Dalvand, "Evaluation of mechanical properties of concrete by replacing natural aggregates with fine and coarse recycled aggregates," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 87–110, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.77651.1164>
- [6] R. Ghabchi, D. Singh, and M. Zaman, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 479–489, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.042>
- [7] M. J. Ayazi, A. Moniri, and P. Barghabany, "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives," *Petroleum Science and Technology*, vol. 35, no. 9, pp. 890–895, 2017. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1290655>
- [8] A. Moniri et al., "Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 1423–1434, 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1696461>
- [9] M. Fakhri and A. Ahmadi, "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 748–756, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.116>
- [10] N. H. Tran, A. Taylor, and R. Willis, "Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents," *NCAT report*, no. 1, pp. 12–05, 2012.
- [11] D. Singh, S. F. Chitragar, and P. K. Ashish, "Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1145–1153, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.176>
- [12] S. Yan, C. Zhou, and J. Ouyang, "Rejuvenation effect of waste cooking oil on the adhesion characteristics of aged asphalt to aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 327, p. 126907, 2022.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126907>
- [13] Y. Fang et al., "Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials," *Construction and Building Materials*, vol. 295, p. 123631, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123631>
- [14] Z. Xie et al., "Performance of asphalt mixtures with high recycled contents using rejuvenators and warm-mix additive: field and lab experiments," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 29, no. 10, p. 04017190, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002037](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002037)
- [15] F. Zhou, C. Estakhri, and T. Scullion, "Literature review: performance of RAP/RAS mixes and new direction," *Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office*, 2014.
- [16] M. Zahoor et al., "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123304, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304>
- [17] J. Ji, H. Yao, Z. Suo, Z. You, H. Li, S. Xu, and L. Sun, "Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, p. D4016003, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001769)
- [18] N. Tran, A. Taylor, P. Turner, C. Holmes, and L. Porot, "Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, pp. 183–208, 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266757>
- [19] W. S. Mogawer, A. Booshehrian, S. Vahidi, A. J. Austerman, "Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, pp. 193–213, 2013. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812836>
- [20] L. Uzarowsk, H. Prilesky, E. Berube, V. Henderson, and R. Rizvi, "Laboratory Testing of Vancouver HMA Mixes Containing Recycled Asphalt Shingles," *Transportation Association of Canada*, Halifax, Nov. Scotia, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127698>
- [21] X. Jia, B. Huang, J. A. Moore, and S. Zhao, "Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, p. 4015042, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001292](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001292)
- [22] S. Im, P. Karki, and F. Zhou, "Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 727–734, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.081>
- [23] H. Taherkhani and F. Noorian, "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, pp. 1238–1257, 2020. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220>
- [24] Z. H. Al Saffar, H. Yaacob, M. K. Idham, M. K. Saleem, J. A. U. C. Lai, R. Putra Jaya, "A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 48, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0635>
- [25] L. Chatergoon, R. Whiting, and C. Smith, "Improved methods for separation and chromatographic analysis of natural

- asphalts," *Analyst*, vol. 117, no. 12, pp. 1869–1873, 1992. <https://doi.org/10.1039/an9921701869>
- [26] H. Behbahani, G. H. Hamed, and V. M. Gilani, "Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 97, pp. 791–798, 2020.
- [27] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseini, H. Behbahani, and G. H. Hamed, "Prediction and pareto-based multi-objective optimization of moisture and fatigue damages of asphalt mixtures modified with nano hydrated lime," *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120509, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120509>
- [28] V. N. M. Gilani, S. M. Hosseini, D. Safari, and G. H. Hamed, "Presentation of predictive models for two-objective optimization of moisture and fatigue damages caused by deicers in asphalt mixtures," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 49, no. 6, pp. 4437–4458, 2021. <https://doi.org/10.1520/JTE20200448>
- [29] N. Mukhtar, M. R. M. Hasan, K. A. Shariff, and W. Van Den Bergh, "Relationship between the physicochemical and electrostatic charge characteristics of filler materials on the morphological and adhesive Pull-Off tensile strength of asphalt mastics," *Construction and Building Materials*, vol. 346, p. 128343, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128343>
- [30] G. H. Hamed, M. R. Esmaeeli, V. N. M. Najafi Moghaddam Gilani, and S. M. Hosseini, "The effect of aggregate-forming minerals on thermodynamic parameters using surface free energy concept and its relationship with the moisture susceptibility of asphalt mixtures," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8818681>
- [31] P. Yin, F. Liu, Z. Li, B. Pan, and T. Liu, "Evaluation on the Adhesion Property of Recycled Asphalt Based on the Multi-Scale Experiments," *Buildings*, vol. 14, no. 8, p. 2365, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14082365>

CONTENTS

Seismic Evaluation of Steel Frames with Dual Linked-Column- Frame under Successive Earthquakes	1
Farzaneh Tafreshi - Elham Rajabi - Yaser Golestani	
Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers	31
Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi - Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad	
Improved Special Relativity Search Algorithm for Optimal Design of Truss Structures	49
Farnaz Salajegheh - Vahid Goodarzimehr	
Thematic Analysis of Construction Disputes, Their Causes And Prevention resolution In The Design-Build Project Delivery System	71
Mostafa Bodaghi - Majid Parchami Jalal - Ali Mohaghar- Esmatullah Noorzai	
Comparison of System Identification Methods for Extracting Modal Parameters (Case Study: 22 Bahman Bridge, Ferdowsi University of Mashhad	91
Nima Kowsari - Zaher Rezaie - Mahmud Hassanpour Golriz - Ahmad Shooshtari*	
Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators	115
Hamidreza Eftekhari - Paraham Hayati - Ali Moniri	



**JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD**

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor, Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor, Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseininia	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor, Shiraz University
M. H. Sebt	Professor, Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor, Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor, Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor, Amirkabir University of Technology
A. Mohammadzadeh Moghaddam	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
M. Kianoush	Professor, University of Ryerson

Text Editor: M. Dehghan

Administrative Director: T. Hooshmand

Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering

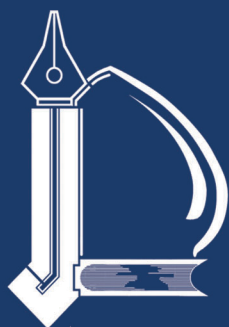
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN

Tel: +98 51 38806024; **Email:** civil-ferdowsi@um.ac.ir

Web site: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>

ISSN 2783-2805



*Ferdowsi University
of Mashhad*

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Serial No. 50

- | | |
|---|-----|
| Seismic Evaluation of Steel Frames with Dual Linked-Column- Frame under Successive Earthquakes
Farzaneh Tafreshi - Elham Rajabi
Yaser Golestani | 1 |
| Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers
Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi
Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad | 31 |
| Improved Special Relativity Search Algorithm for Optimal Design of Truss Structures
Farnaz Salajegheh - Vahid Goodarzimehr | 49 |
| Thematic Analysis of Construction Disputes, Their Causes And Prevention resolution In The Design-Build Project Delivery System
Mostafa Bodaghi - Majid Parchami Jalal
Ali Mohaghar- Esmatullah Noorzai | 71 |
| Comparison of System Identification Methods for Extracting Modal Parameters (Case Study: 22 Bahman Bridge, Ferdowsi University of Mashhad)
Nima Kowsari - Zaher Rezaie
Mahmud Hassanpour Golriz - Ahmad Shooshtari | 91 |
| Improving the Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Against Moisture Damage Using Rejuvenators
Hamidreza Eftekhari - Paraham Hayati
Ali Moniri | 115 |

Vol. 38, No. 2
Summer, 2025