



مقالات پژوهشی:

- تپیدی طیف سلکتکد برای طراحی دستگاههای سختی منفی و کاربرد آن در پل‌های تحت اثر زلزله / محمد روزی نای و ماس کرمانی
- پیش‌بینی مانفه‌های روزانه سونو-های بنن مسلح با استفاده از روش‌های پادگیری مانفه / ایاده خنگردی و سینه پریانی نای و مختار احمدی
- پهندنیسازی سازه‌های منفعت از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای ANP / سیما سعدیان، فرد ووب و توفیق
- برآوردهایی مخلوط آلوپلیسیکلوفیدی در ماسه‌کریسانه‌ی پوشش بر درصد لای مختلط احسان اذنی، رضا ضیائی موحد و سید ابوالحسن نائینی
- روضی برای حل مسائل تحقیم غیرخطی با استفاده از مفهوم جالت اشکنی / احمد ابراهیمی
- نایبر از پلزدیتی نازل در رفتار سیپ شور تخلیه شده بهصورت مستغرق مایل با زاویه  $60^\circ$  / وحدت بابایی زیاد و نیک خورستی
- پیش‌بینی در صحنه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یکنندگی و شکل‌های مود از پاسخ دینامیکی / ابراهیم مهرانی و محمد شاهین علی‌احمدی
- قویود کاربری یک مدل افقی فاری تریش‌پیش شاخص شرارت لزوجی با استفاده از یک الگوریتم پهندنیسازی از دامن نزد مبنی بر تسته‌بودی تطبیقی حدایت نهاده / امید زربالان، توحید پورسته، مهدی فضیان، عیدارخان سروقدمند، علی گلمراد پهلوانی
- پهندنیسازی الگوریتم پهندنیسازی غیرخطی برای تحلیل قالب‌لیست اتمام‌سازها / مهرداد فربارزاده، پیمان همایش و محسن شهروزی
- طراحی پهندی قابه‌های مهارنده‌ی فولادی دوگهواره‌ی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌ی نایه / محمدنی رفعی محمدی، وحدت بروجردیان و اسامیل محمدی دچشمeh

یادداشت‌های:

- مدل‌سازی عددی نایبر راوه‌ی فرارگیری زون‌کنستابل در ایهی اسپس و زیراسپس روسازی راه / رضا موداری، مسعودرضا مطهری و پهلوان سرداری
- انهشتارسنجی مدل‌های اشکنی برای سیپ چکال تخلیه شده از نازل‌های نایبر و مربع با زاویه تخلیه  $45^\circ$  / وحدت بابایی زیاد و رضا حاجی سیدمحمد شیرازی

ARTICLES:

- Generation of Performance Spectra for Designing Negative Stiffness Devices and Their Application in Bridges Under Earthquakes / M. Mavizi Sani and A. Karamodin
- Prediction of Deterioration Components in Reinforcement Concrete Columns Using Machine Learning Techniques / A. Khoshkroodi, H. Parvin Sani and M. Ajami
- Optimization of Thermal Characteristics of Industrial Structures Using Analytic Network Process (ANP) / S. Samadianfar and V. Toufigh
- Injectability of Colloidal Nano-Silica in Bushehr Carbonate Sand with Different Silt Content / E. Azini, R. Ziae Mosayed and S.A. Naeini
- A Disturbed State Concept-Based Solution for Nonlinear Consolidation of Soils / A. Ouria
- The Effect of Nozzle Geometry on the Behavior of Saline Effluent Discharged in an Inclined Submerged form with an Angle of  $60^\circ$  / V. Babainejad and B. Khorsandi
- Damage Identification in Steel Plates Using a Detection Algorithm Based on 1D Continuous Wavelet Transform and 2D Vibration Mode Shapes / A. Mamaziz and M. Khanahmadi
- Improving the Performance of a Fuzzy Logic Model in Seismic Damage Prediction Using a Guided Adaptive Search-Based Particle Swarm Optimization Algorithm / O. Zarinbafan, T. Pourrostam, M. Fazilati, A. S. Moghadam and A. Golsoorat Pahlavani
- Establishing a Nonlinear Optimization Method for Structural Reliability Analysis / N. Ghorbanzadeh, P. Homami and M. Shahrouz
- Optimized Design of Bi-Rocking Steel Braced Frames Via Changing the Second Rocking Joint Location / M. Rafiei Mohammadi, V. Broujerdi and E. Mohammadi Dehcheshmeh

RESEARCH NOTES:

- Numerical Modeling of the Geotextile Positioning Angle in the Base and Subbase Layer of the Road Pavement / R. Mosyedfar, M. Motahari and B. Serydani
- Validation of Turbulence Models for Dense Effluent Discharged from Circular and Square Nozzles with a Discharge Angle of  $45^\circ$  / V. Babainejad and R. Haji Seyed Mohammad Shirazi

## دکتر بیتا آبی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

## دکتر همایون استکانچی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

## دکتر علی پاک

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر مسعود تجربی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر وہب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

## دکتر امیر رضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

## دکتر حسین رحامي

دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران

## دکتر فیاض رحیم زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر امیر صمیمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر ناصر طالب بیدختی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

## دکتر محسن قائمیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

## دکتر محمد تقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

## دکتر محمد جواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر موسی محمودی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیرشیه رجایی

## دکتر حسن میرزابزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## دکتر علی نورزاد

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

## دکتر جواد واثقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

## دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## مهندسی عمران

## تئوریف

دوره ۳۹-۲

شماره ۱

بهار

۱۴۰۲

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

سردیب: دکتر محسن قائمیان

سردیب هیات تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

مدیر داخلي: پوران خیرمندي

مسئول روابط عمومي: محمدرضا یوسف خان

ویرایش: رزیتا رستمیان پایدار

حروف چینی: سانار نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی

صفحه آرایی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیما آن اسدالله، مریم پورابراهیمی باوفا

طرح لوگو: زندیاد مرتضی ممیز

طرح روی جلد و ساختار صفحه آرایی: مصطفی اسداللهی

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۰۹۳۱۶۴۰۶۶۱۶۴۰۵۴۱۹

پست تصویری: ۰۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی سایت: <http://journal.sharif.ir>سایت اسپرینگر: [www.globalsciencejournals.com](http://www.globalsciencejournals.com)پست الکترونیکی: [pajouhesh@sharif.edu](mailto:pajouhesh@sharif.edu)چاپ: کارگاه گرافیک فرگاهی، <http://www.fargahi.com>

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و نوواری دانشگاه صنعتی شریف

## هیأت تحریریه‌ی تخصصی

- سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر احمد ابریشم‌چی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر همایون استکانچی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر عباس افشار
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران
- دکتر محمدعلی برخورداری
- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران
- دکتر حسین پورزاهدی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر مسعود تجریشی
- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دانشیار ایوب ترکیان
- دانشیار مرکز تحقیقات آب و ارزی - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر عباسعلی تسینی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس
- دکتر حسن حاجی کاظمی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد
- دکتر سیدمحسن حائری
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر امیرضا خوبی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر فیاض رحیم‌زاده
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف
- دکتر علی اکبر رمضانیانپور
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- دکتر سیدمه‌دی زهرا‌بی
- دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران
- دکتر محمدمه‌دی سعادت‌پور
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان
- دکتر عیسی سلاجقه
- استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان
- دکتر مجید صادق آذر
- استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران
- دکتر ناصر طالب بیدختی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیزاد
- دکتر ارسلان قهرمانی
- استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیزاد
- دکتر محمد کارآموز
- استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران
- دکتر محمدنقی کاظمی
- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

لتزیف

مهندسی عمران

## مطلوب این شماره

### مقالات پژوهشی:

۳ تهیه‌ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه‌های سختی منفی و کاربرد آن در پل‌های تحت اثر زلزله محمد مویزی ثانی و عباس کرم‌الدین

۱۵ پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین آزاده خشکرودی، حسین پریزی ثانی و مجتبی اعجمی

۲۳ بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ی ANP سیما صمدیان فرد و وهب توفیق

۲۹ تزریق بذری محلول نانوسیلیس کلوریدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لایی مختلف احسان آذینی، رضا ضیائی مؤید و سید ابوالحسن نایینی

۳۹ روشی برای حل مسائل تحکیم غیرخطی با استفاده از مفهوم حالت آشنازی احمد اوربا

۴۹ تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی  $60^\circ$  وحید بابایی‌نژاد و بابک خورستندی

۵۹ عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دو‌بعدی آرمان مام عزیزی و محتمم خان احمدی

۷۱ بهبود کارایی یک مدل منطق فازی در پیش‌بینی شاخص خسارت لرزه‌ی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده امید زریابیان، توحید پورستم، مهدی فضیلتی، عبدالرضا سروقدام، علی گلصورت پهلویانی ویره‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها

۸۱ مهرشاد قربانزاده، پیمان همامی و محسن شهرورزی

۹۳ طراحی بهینه‌ی قاب‌های مهاربندی فولادی دوگهواره‌ی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌ی ثانویه محمد تقی رفیعی محمدی، وحید بروجردیان و اسماعیل محمدی دهچشم

### یادداشت فنی:

۱۰۵ مدل‌سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ریوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس روسازی راه رضا مویدفر، محمدرضا مظہری و بهزاد سریانی

۱۱۵ اعتبارسنجی مدل‌های آشنازی چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^\circ$  وحید بابایی‌نژاد و رضا حاجی سید محمد شیرازی

### ضمائی:

۱۳۲ چکیده مقالات به انگلیسی

# تهیه‌ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه‌های سختی منفی و کاربرد آن در پل‌های تحت اثر زلزله

محمد مویزی ثانی (دانشجوی دکتری)

عباس کرم‌الدین \* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

در نوشتار حاضر، طیف عملکرد برای سازه‌های یک درجه آزادی برشی مجهر به دو نوع از دستگاه سختی منفی غیرفعال ارائه شده است. با استفاده از روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای پارامترهای مکانیکی مختلف دستگاه‌های سختی منفی، طیف عملکرد برای سازه‌های با دوره‌ی تناوب  $0/5$  تا  $2/5$  ثانیه برای هر دو نوع دستگاه به دست آمده است. برای انجام این کار، رکورد زلزله با طیف طراحی آینین نامه‌ی ایران (استاندارد ۲۸۰۰) انطباق داده شده‌اند. از پارامترهای نسبت نیروی تسلیم دستگاه و ساز، به نیروی تسلیم سازه و همچنین نسبت سختی دستگاه به سازه برای تهیه‌ی طیف‌های عملکرد استفاده شده است. همچنین، برای بررسی کارایی طیف عملکرد در طراحی پارامترهای دستگاه سختی منفی و آثار آن در کاهش پاسخ سازه‌ها، از سازه‌ی پل بزرگراهی معیار استفاده شده است. پارامترهای هدف به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی نتایج مطلوب طیف عملکرد در طراحی سیستم‌های سختی منفی و کاهش پاسخ‌هاست.

mmsani.p.e@gmail.com  
a-karam@um.ac.ir

واژگان کلیدی: طیف عملکرد، سختی منفی، پل بزرگراهی معیار، کنترل غیرفعال.

## ۱. مقدمه

جالب در این زمینه، دستگاه‌های مرکرگرا<sup>۱</sup> و سختی منفی<sup>۲</sup> هستند، که مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. هر دو سیستم مرکرگرا و سختی منفی بر اساس کاهش یا حذف جابه‌جایی‌های غیرکشسان باقیمانده پس از زلزله در سازه ایجاد شده‌اند، تا امکان بهره‌برداری از سازه پس از زلزله با کمترین هزینه انجام شود. تقاؤن دو روش اخیر، در عملکرد آنها برای رسیدن به هدف ذکر شده است. سیستم‌های مرکرگرا، عمدهاً توسط برخی از عناصر پیش‌تینیده، سعی در کاهش پاسخ‌ها و بازگرداندن سازه به حالت اولیه‌ی خود دارند. در مقابل، در روش سختی منفی، با افزودن یک دستگاه اضافی به سازه، مانند میرکرگرهای، با ایجاد نقطه‌ی تسلیم مجازی، سطح نیروها در سازه و به دنبال آن آسیب در سازه کاهش می‌یابد. ویژگی اصلی روش سختی منفی، کاهش نیرو و شتاب وارد بر سازه است. به طور کلی، در اثر زلزله‌های شدید، جابه‌جایی‌های سازه‌ها وارد ناحیه‌ی غیرخطی رفتار سازه می‌شوند، که نتیجه به تغییر شکل ماندگار در سازه می‌شود. با افزودن یک سیستم سختی منفی به سازه، سختی مجموع سازه و سیستم دارای سختی منفی کاهش می‌یابد. بنا بر این، سازه در نقطه‌ی مجازی، کمتر از تسلیم واقعی سازه، رفتار غیرخطی و مجازی از خود نشان می‌دهد. در نتیجه‌ی کاهش سختی، دوره‌ی تناوب سازه افزایش می‌یابد، که منجر به کاهش نیرو و شتاب مطلق وارد شده به سازه می‌شود، اما در مقابل به دلیل کاهش سختی، جابه‌جایی

یکی از چالش‌آمیزترین مسائل در طراحی سازه‌ها، طراحی در برابر بارهای لرزه‌یی است. از آن جایی که زلزله‌ها در زمان‌های مختلف ماهیت دینامیکی و عدم قطعیت بالایی دارند، طراحی سازه در برابر زلزله، اهمیت بسیاری دارد. پژوهشگران همواره به دنبال مؤثث‌ترین راه برای حفاظت از سازه‌ها در برابر زلزله بوده‌اند. بنا بر این دانش کنترل سازه برای برسی و بهبود رفتار سازه در برابر زلزله ایجاد شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۷۲، کنترل سازه توسط یائو،<sup>[۱]</sup> پیشنهاد شد، که پتانسیل زیادی برای کاهش ارتعاش‌ها در سازه‌های عمرانی مختلف تحت بارگذاری دینامیکی نشان داده است. در پنج دهه‌ی گذشته، تلاش‌های زیادی برای توسعه‌ی مفهوم کنترل سازه به عنوان یک فناوری قابل اجرا در سازه‌ها صورت گرفته است. بر همین اساس، سیستم‌های کنترل به دستگاه‌های کنترل غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال طبقه‌بندی شده‌اند.

در دو دهه‌ی اخیر، در زمینه‌ی پژوهش‌های کنترل سازه، ایده‌های جدید بسیاری برای کاهش آسیب به سازه‌ها و کاهش جابه‌جایی ماندگار ارائه شده است. دو ایده‌ی

\* نویسنده مسئول  
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۲۳

DOI: 10.24200/J30.2022.60333.3096

استناد به این مقاله:

مویزی ثانی، محمد و کرم‌الدین، عباس (۱۴۰۲). «تهیه‌ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه‌های سختی منفی و کاربرد آن در پل‌های تحت اثر زلزله»، مهندسی عمران شریف، ۱۳-۳، ۳۹-۲ (۱)

برای یک دستگاه کنترل با توجه به رفتار سازه ارائه شود. یکی از روش‌های مؤثر و مناسب در ارائه‌ی پارامترهای بهینه‌ی مناسب برای سیستم‌های کنترلی، استفاده از طیف عملکرد برای تعیین رفتار یک سیستم در پارامترهای مختلف است. طیف عملکرد به عنوان یک ابزار گرافیکی، نشان‌دهنده‌ی تأثیر سیستم کنترلی با پارامترهای مختلف در سازه‌ی اصلی است. روش طراحی مبتنی بر طیف عملکرد (گوا و کریستوپولوس، [۲۵] ۲۰۱۶)، پاسخ‌های سیستم یک درجه آزادی دوخطی را شامل: بیشینه‌ی جابه‌جایی، جابه‌جایی باقیمانده، بیشینه‌ی برش پایه و شتاب به پارامترهای قابل تنظیم میراگر مرتبط می‌کند. طیف‌های مذکور، امکان مقایسه‌ی پارامترهای مختلف برای دستیابی به اهداف عملکرد را بدون نیاز به طراحی کامل و فرایند تکراری فراهم می‌کنند. طیف عملکرد (P-Spectra) برای میراگرهای ویسکوز، ویسکوکشسان، اصطکاکی و فولادی بررسی و توسعه یافته است، [۲۵] ۲۰۱۶ ولی تاکنون طیف عملکرد برای سیستم‌های سختی مبنی تهیه نشده است.

## ۲. معرفی سیستم

ویژگی اصلی روش سختی مبنی، کاهش نیرو و تغییرشکل دائمی در سازه است. سیستم‌های سختی مبنی متفاوتی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از دو نوع دستگاه سختی مبنی برای تولید طیف عملکرد استفاده شده است.

### ۱.۲. دستگاه سختی مبنی (NSD)<sup>۱۷</sup>

نگارجایاه<sup>۱۸</sup> و همکارانش، [۲۶] اولین بار مفهوم سختی مبنی واقعی را برای کاربردهای سازه‌ی معرفی کردند. سختی مبنی واقعی، نیازی به منع تعذیه‌ی خارجی ندارد و کاملاً از فنر تشکیل می‌شود و یک سختی مبنی کشسان غیرخطی واقعی ایجاد می‌کند. دستگاه سختی مبنی توسعه یافته توسط نگارجایاه و همکارانش، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دستگاه سختی مبنی، شامل یک فنر پیش‌فسرده در مرکز دستگاه، فنرهای gap در پایین و ترکیبی از عناصر قاب و صفحاتی است که قطعات را در کنار هم نگه می‌دارد. هنگامی که دستگاه تغییرشکل می‌دهد، فنر از پیش فسرده شده، نیرویی در جهت حرکت یا نیروی مبنی ایجاد می‌کند. همچنین نمودار شماتیک دستگاه در وضعیت تغییرشکل یافته پس از جابه‌جایی بالای دستگاه در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

بر اساس معادلات تعادل،  $\tau = \text{طول فنر تغییرشکل} / \text{تفاوت ارتفاع}$  است:

$$l_s = \sqrt{\left(l_p + l_1 - l_1 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{l_2}\right)^2}\right)^2 + u^2 \left(1 + \frac{l_1}{l_2}\right)^2} \quad (1)$$

شکل نهایی رابطه‌ی نیروی تولید شده توسط NSD به صورت تابعی از تغییرشکل دستگاه به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:

$$F_{NSD} = - \left( \frac{P_{in} + K_s l_p - K_s}{l_s} \right) \left( \frac{l_1}{l_2} \right) \left( 2 + \frac{l_2}{l_1} + \frac{l_p + l_1}{\sqrt{l_p^2 - u^2}} \right) u + F_g \quad (2)$$

که در آن،  $F_g$  نیروی فنر gap است، که برای جابه‌جایی یکنواخت مثبت به صورت

سازه افزایش می‌یابد. بنابراین، سازه‌ی اصلی، رفتار غیرخطی کم یا نسبتاً خطی از خود نشان می‌دهد و آسیب در آن بسیار کاهش می‌یابد. برای حل مشکل افزایش جابه‌جایی در سازه از سیستم‌های انلاف انرژی، مانند میراگرهای ویسکوز، به موازات سیستم سختی مبنی استفاده می‌شود.

روش سختی مبنی به صورت: غیرفعال، فعل و نیمه‌فعال قابل اجراست. اولین بار ایمورا<sup>۲۰</sup> (۲۰۰۵)، یک جداگر با قابلیت سختی مبنی را ارائه کرد. [۲۱] نگارجایاه<sup>۲۲</sup> و همکارانش (۲۰۱۱-۲۰۱۴)، نیز یک دستگاه سختی مبنی با استفاده از یک فنر فشرده ارائه دادند، که سختی مبنی واقعی را تولید می‌کرد. [۲۳] عطاری (۲۰۱۵)، با استفاده از چند چرخ دنده، یک دستگاه سختی مبنی دورانی را ایجاد کرد. [۲۴] توکویا<sup>۲۵</sup> (۲۰۱۵)، یک جداگر با قابلیت سختی مبنی را برای سازه‌ی پل‌های راه‌آهن معرفی کرد. [۲۶] لیو و نو<sup>۲۷</sup> (۲۰۱۵)، ابتدا یک دستگاه سختی مبنی برای کنترل ارتعاش کابل‌ها در پل‌های معلق<sup>۲۸</sup> و سپس یک سیستم جدید با استفاده از فنرهای فشرده و آلیازهای حافظه‌دار<sup>۲۹</sup> ارائه کردند، که دو قابلیت سختی مبنی و مرکزگرا را هم زمان ارائه می‌کرد. [۲۰] هوان لی<sup>۳۰</sup> (۲۰۲۱)، یک دستگاه سختی مبنی تطبیقی اصلاح شده با توانایی ارائه‌ی سختی مبنی جانبی و میرایی غیرخطی با پیکربندی فنرهای خطی و میراگرهای ویسکوز خطی برای رفع مشکل در سامدهای بالا پیشنهاد کرد. [۳۱] سان (۲۰۲۱)، نشان داد عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مجهز به کمربند خرپایی میرا شده معمولی با ترکیب سختی مبنی به موازات میراگر ویسکوز بهبود می‌یابد. [۳۲] ژاوووانگ (۲۰۲۲)، یک سیستم جداسازی تقویت شده با سختی مبنی جدید (NSAS-IS) را برای ارتقاء عملکرد لرزه‌ی سازه‌های اطراف راکتور هسته‌ی بیان ارائه کرده‌اند. [۳۳] تقیب‌الاسلام (۲۰۲۲)، یک ترکیب جدید از میراگرهای سختی مبنی واقعی (NSDs) و دستگاه‌های اینتر (Inerter) را به عنوان میراگرهای موازی (NSID)<sup>۳۴</sup> برای کنترل پاسخ سازه‌های جداسازی شده استفاده کرده است. [۳۵]

تمامی دستگاه‌های اشاره شده، سختی مبنی را به روش غیرفعال تولید می‌کنند. ایمورا (۲۰۰۳)، حلقه‌ی هیسترزیس سختی شبه‌مبنی در کاهش پاسخ لرزه‌ی مؤثر را برای اولین بار ارائه داد. [۳۶] لی (۲۰۲۱)، یک سیستم سختی مبنی جدید پیشنهاد کرده است که سختی مبنی تطبیقی و ویژگی‌های میرایی را ادغام می‌کند. [۳۷] ژیانگ شی (۲۰۲۱)، یک روش جدید جداسازی ارتعاش مبتنی بر فنر سختی مبنی غیرفعال (NSS) و یک دستگاه نیمه‌فعال را با هدف دستیابی به عملکرد جداسازی فعال با استفاده از روش نیمه‌فعال کم توان پیشنهاد کرده است. [۳۸]

سالاتوره (۲۰۲۲)، سختی مبنی توسط مکانیسم‌های دارای دو وضعیت پایدار همراه با سوپرکشسانی قابل تنظیم توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌ی (SMA) را ارائه کرده است، که می‌تواند انعطاف‌پذیری دینامیکی یک سازه را در زمینه‌ی جداسازی ارتعاش افزایش دهد. [۳۹] لی (۲۰۲۲)، یک میراگر سختی مبنی شبه‌فعال جدید برای حفاظت لرزه‌ی مؤثر و مقاوم با ادغام عنصر سختی مبنی و عنصر میرایی قابل کنترل با هم، پیشنهاد داده است. [۴۰] در منابع فارسی نیز پژوهش‌هایی بر روی سختی مبنی صورت پذیرفته است، که به جهت اختصار فقط به ذکر منع آنها اکتفا شده است. [۴۱] و [۴۲]

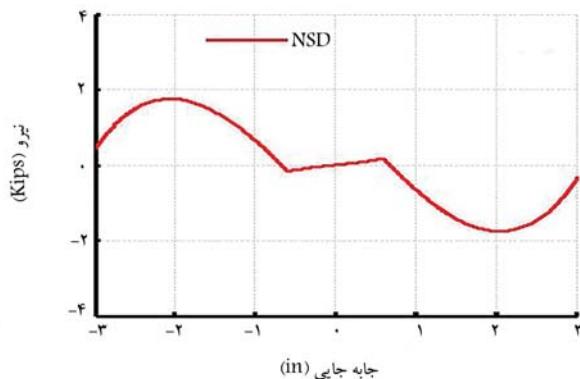
با توجه به ویژگی‌های بسیار خوب سیستم سختی مبنی، یکی از مسائل مهم در این زمینه، نحوه‌ی طراحی و ظرفیت مورد نیاز سیستم‌های سختی مبنی با توجه به ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ی اصلی است. امروزه برای طراحی‌های سازه‌های جدید، استانداردهایی مانند: ASCE-۷، ASCE-۴۱، ASCE-۴۵۰ و FEMA ۲۴-۲۳<sup>۴۳</sup> ضوابطی را برای طراحی و کنترل سیستم‌های میرایی ارائه کرده‌اند، اما استانداردهای مذکور بر تحلیل سیستم‌های میرایی تمرکز دارند و مبتنی بر آزمون و خطأ هستند. بنابراین لازم است روش مناسبی برای انتخاب پارامترهای بهینه در طراحی و تولید ظرفیت مناسب



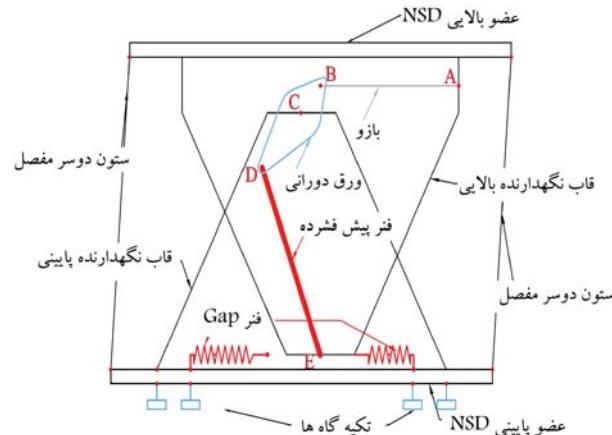
ب) تغییر شکل یافته.

الف) تغییر شکل یافته.

شکل ۱. دستگاه سختی منفی NSD.<sup>[۵]</sup>



شکل ۳. نمودار نیرو - جابه جایی NSD.<sup>[۴]</sup>



شکل ۲. وضعیت شماتیک دستگاه سختی منفی NSD در حالت تغییر شکل یافته.<sup>[۴]</sup>

رابطه‌ی ۳ است:

$$F_g = \begin{cases} K_{g1}u & 0 \leq u \leq d_{gap} \\ K_{g1}d_{gap} + K_{g2}(u - d_{gap}) & u > d_{gap} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $d_{gap}$  طول فنر پیش فشرده در زمانی است که NSD تغییر شکل یافته است،  $u$  فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی C و D و  $u$  فاصله‌ی نقاط B و C است. جابه جایی  $P_{in}$  کل دستگاه و  $K_g$  فنر پیش فشرده کی فشردگی فنر است و باید مقادیر مثبت داشته باشد،  $K_g$  سختی فنر فشرده،  $K_g$  و  $K_g$  یک جابه جایی مشخص در فنر gap در حالی است که باز می‌شود.

بازوی AB، یک جابه جایی در بالا (نقطه‌ی B) ایجاد می‌کند، که ورق دورانی حول نقطه‌ی C می‌چرخد. از آنجا که ورق چرخشی حول نقطه‌ی C دوران می‌کند، نقطه‌ی D در جهت خلاف حرکت جابه جایی اعمال شده حرکت می‌کند. نقطه‌ی E به صورت کاملاً صلب به بالای دستگاه متصل است و بنا بر این، جابه جایی برابر با جابه جایی اعمال شده دارد. با توجه به حرکت نقاط D و E، فنر فشرده چرخش می‌یابد و نیروی فشردگی آن، باعث جابه جایی بیشتر می‌شود. همان‌طور که دستگاه تغییر شکل می‌دهد، فنر باز می‌شود و بنا بر این نیروی فشردگی آن کاهش می‌یابد؛ در حالی که زاویه‌ی آن افزایش و مقادیر سختی تولید شده توسط دستگاه کاهش می‌یابد. در نهایت، کاهش سختی تدریجی اخیر، منجر به سختی مثبت در جابه جایی‌های بزرگ می‌شود. در شکل ۳، نمودار نیرو - جابه جایی NSD مشاهده شده است: ۱. درگیر شدن ناگهانی چرخ دنده‌ی ثانویه، ۲. ناپایداری در جابه جایی‌های

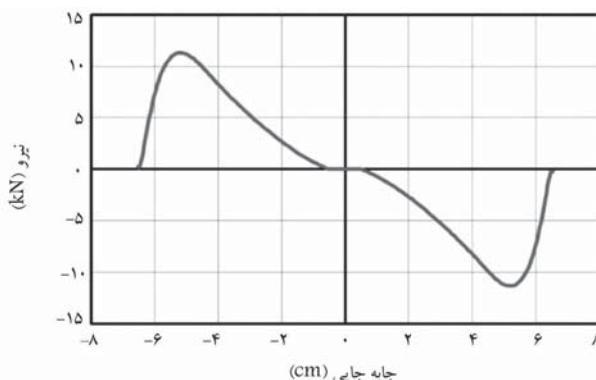


شکل ۴. نمونه‌ی RBMAP-S ساخته شده اولیه.<sup>[۷]</sup>

## ۲. دستگاه سختی منفی دورانی (RBMAP - S)<sup>[۹]</sup>

نوید عطاری و همکاران (۲۰۱۵) (RBMAP - S) یک دستگاه غیرفعال مکانیکی تطبیقی در سازه ایجاد و حرکت انتقالی یک سازه را به حرکت دورانی تبدیل کند.<sup>[۹]</sup> در شکل ۴، دستگاه متشکل از سه چرخ دنده مشاهده می‌شود. چرخ دنده‌ی اولیه به وسیله‌ی یک بازوی اتصال مفصلی به سازه متصل می‌شود و دو چرخ دنده‌ی ثانویه، برای کنترل حرکت چرخ دنده‌ی اولیه و در نتیجه تأثیر در پاسخ سازه طراحی شده است.

در شکل ۵، طرح کلی دستگاه مشاهده می‌شود. دستگاه اولیه ارائه شده دو مشکل داشته است، که توسط عطاری اصلاح شده است: ۱. درگیر شدن ناگهانی چرخ دنده‌ی ثانویه، ۲. ناپایداری در جابه جایی‌های

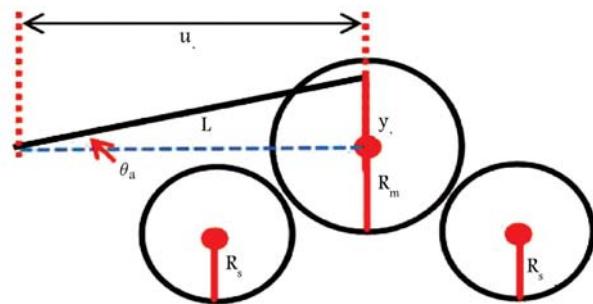


شکل ۸. نمودار نیرو - جایه‌جایی RBMAP-S در حالت اصلاح شده. [۷]

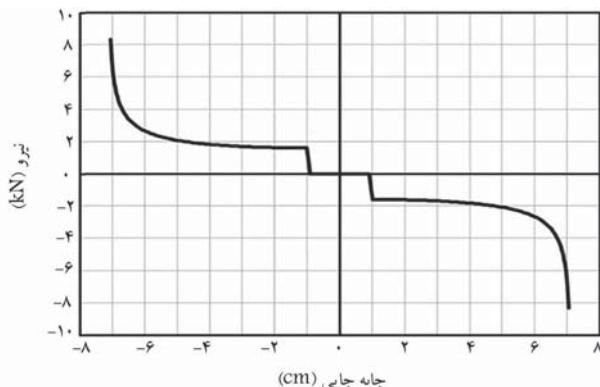
$$F_a = k_a L \theta = k_a R_s \sqrt{3 - 2(\sin \theta_s + \cos \theta_s)} \quad (6)$$

$$M_a = k_a R_s^2 [\cos \theta_s - \sin \theta_s] \sqrt{3 - 2(\sin \theta_s + \cos \theta_s)} \quad (7)$$

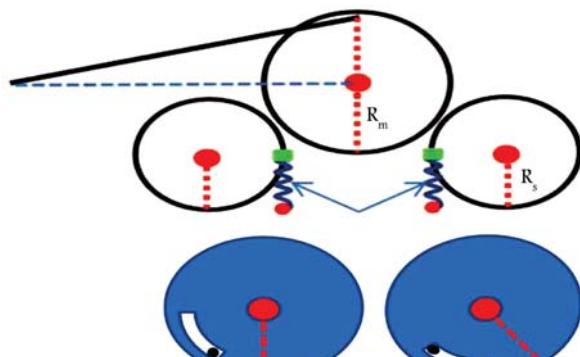
که در آنها،  $L$  طول بازوی اتصال،  $\theta_m$  دوران چرخ‌دنده‌ی اصلی،  $u$  فاصله‌ی اولیه بین نقطه‌ی اتصال دستگاه به سازه و مرکز چرخ‌دنده‌ی اصلی،  $y$  میزان دوران لازم برای درگیر شدن چرخ‌دنده‌های ثانویه با چرخ‌دنده‌ی اصلی،  $y_s$  فاصله‌ی بین نقطه‌ی اتصال بازوی چرخ‌دنده‌ی اصلی و مرکز چرخ‌دنده‌ی اصلی،  $T$  گشتاور چرخ‌دنده‌های ثانویه،  $k_s$  سختی پیچشی فنر،  $R_m$  شعاع چرخ‌دنده‌ی اصلی،  $R_s$  طول اولیه فنر افزوده شده یا شعاع چرخ‌دنده‌ی ثانویه،  $\theta_s$  دوران چرخ‌دنده‌ی ثانویه،  $k_a$  سختی محوری فنر افزوده شده،  $F_a$  نیروی محوری فنر افزوده شده و  $M_a$  گشتاور ایجاد شده توسط  $F_a$  است. در شکل ۸، نمودار نیرو - جایه‌جایی RBMAP-S در حالت اصلاح شده مشاهده می‌شود.



شکل ۵. طرح کلی دستگاه سختی منفی S



شکل ۶. نمودار نیرو - جایه‌جایی RBMAP-S در حالت اولیه. [۷]



شکل ۷. موقعیت فنر انتقالی و پیچشی افزوده شده. بالا: فنر انتقالی، پایین: فنر پیچشی. [۷]

یکی از مشکلات مهندسان برای استفاده از سیستم‌های کنترل در سازه‌ها، انتخاب پارامترهای بھینه برای یک هدف عملکردی معین است. استانداردهای موجود، از جمله: FEMA ۴۵۰ [۱۹] و ASCE ۷ [۲۰]، برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر متکی به فرایند آزمون و خطای استنداستند، که بر تعیین عملکرد یک سازه‌ی مجهز به میراگر متمرکز است و روش آموزنده‌ی برای تعیین طراحی بھینه نیست. طراحی سیستم‌های میراگری غیرفعال، شامل تنظیم پارامترهای سازه‌ی است که پاسخ‌های چندگانه‌ی مورد نیاز را در سطح مختلف خطر برآورده سازد. طیف عملکرد از منحنی‌های پاسخ برای مقادیر مختلف پارامترهای سیستم استفاده می‌کند و پاسخ‌های سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرخطی ایده‌آل، شامل: بیشینه‌ی جایه‌جایی، بیشینه‌ی برش و شتاب پایه را به پارامترهای قابل کنترل دستگاه و سازه ارتباط می‌دهد. گوا و کریستوپولوس، ۲۰ درجه [۲۱] برای اولین بار طیف عملکردی را برای میراگرهای هیسترزیس و پیسکوکشسان پیشنهاد کردند.

برای رسم طیف عملکرد یک سیستم، سازه به صورت یک سیستم یک درجه آزادی الاستوکمیری دوخطی با نسبت سختی ثانویه ۵٪ سختی اولیه مدل سازی می‌شود که در آن،  $m$  جرم سازه‌ی یک درجه آزادی،  $T_f$  دوره‌ی تناوب سازه و  $V_f$  نسبت مقاومت برشی سازه  $V_{bf}$  به برش پایه‌ی کشسان  $S_a(T_f, \xi)$  است.

$$V_f = V_{bf} / S_a(T_f, \xi) m \quad (8)$$

در شکل ۶، نمودار نیرو - جایه‌جایی دستگاه در حالت اولیه شکل ۴ و نایابیاری به وجود آمده مشاهده می‌شود. عطاری برای رفع مشکل مذکور، اول یک فنر انتقالی خطی به محیط چرخ‌دنده‌ی ثانویه و برای مشکل دوم، یک فنر پیچشی دیگر به چرخ‌دنده‌ی ثانویه متصل کرد، که اتصال مذکور به چرخ‌دنده‌ی ثانویه از طریق یک شکاف قوسی شکل انجام شده است. در شکل ۷، موقعیت فنر انتقالی و پیچشی افزوده شده به دستگاه مشاهده می‌شود.

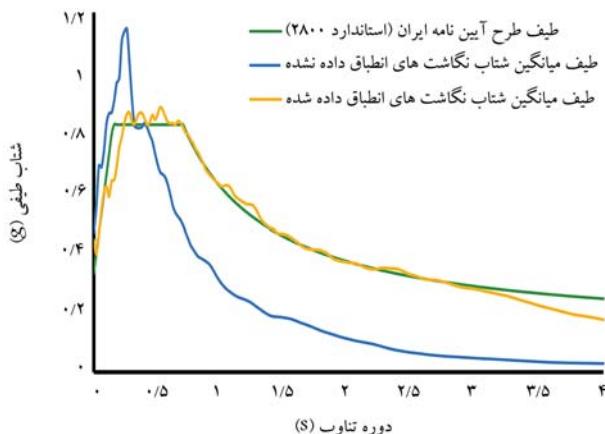
مشابه NSD، معادلات نیرو - جایه‌جایی (معادلات ۴ الی ۷) برای RBMAP-S ارائه شده‌اند:

$$u = \sqrt{L^2 - y_s^2 \cos^2 \theta_m} + y_s \sin \theta_m - u. \quad (4)$$

$$F_x = \frac{\left( T_s - K_s \frac{R_m}{R_s} (\theta_m - \theta_s) \right) \frac{R_m}{R_s}}{y_s \cos \theta_m} \frac{\sqrt{L^2 - y_s^2 \cos^2 \theta_m}}{L} \quad (5)$$

جدول ۱. فهرست شتاب نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی. [۲۲]

ردیف	نام رکورد	بزرگا (Mw)	اطلاعات شتاب نگاشت‌ها				
			فاصله از منبع (Km)	نوع گسل	رو مرکزی	کانونی	عمق
بیشینه‌ی شتاب (cm/s)	بیشینه‌ی سرعت (cm/s)	بیشینه‌ی شتاب (g)	بیشینه‌ی سرعت (g)				
۶۳	۰,۵۲	۱۷,۲	۱۳,۳	معکوس	۶,۷	Northridge	۱
۶۲	۰,۸۲	۱۲	۴۱,۳	امتداد لغز	۷,۱	Duzce	۲
۴۲	۰,۳۸	۱۲,۵	۲۹,۴	امتداد لغز	۶,۵	Imperial Valley	۳
۳۷	۰,۵۱	۷,۱	۸,۷	امتداد لغز	۶,۹	Kobe	۴
۵۹	۰,۳۶	۱۵,۴	۹۸,۲	امتداد لغز	۷,۵	Kocaeli	۵
۴۲	۰,۴۲	۱۹,۷	۸۲,۱	امتداد لغز	۷,۳	Landers	۶
۴۵	۰,۵۶	۱۲,۸	۳۱,۴	امتداد لغز	۶,۹	Loma Prieta	۷
۵۴	۰,۵۱	۱۲,۶	۴۰,۴	امتداد لغز	۷,۴	Manjil	۸
۲۶	۰,۴۵	۱۱,۲	۱۱,۲	امتداد لغز	۶,۵	Superstition	۹
۳۹	۰,۵۱	۲۶	۷۷,۵	معکوس	۷,۶	Chi Chi	۱۰
۱۹	۰,۲۱	۲۲,۸	۳۹,۵	معکوس	۶,۶	San Fernando	۱۱
۲۱	۰,۳۵	۱۵,۸	۲۰,۲	معکوس	۶,۵	Friuly	۱۲



شکل ۹. طیف طرح آینین نامه‌ی ایران برای زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (سیزما) و طیف میانگین شتاب نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انطباق داده نشده (آبی) و انطباق داده شده (زرد) برای دوره‌ی تناوب ۱/۵ ثانیه.

برای کسب نتایج با دقت مورد نظر، باید شتاب نگاشت‌ها به مقیاس در آورده شوند. بر اساس آینین نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در پایه زلزله ایران (ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰)، [۲۸] فقط روش مقیاس شتاب نگاشت‌ها ارائه شده است. روش دیگری که در آینین نامه‌های دیگر، از جمله ۱۶ ASCE-7-۲۰۱۶، [۲۵] ارائه شده است، روش انطباق شتاب نگاشت با یک طیف طراحی هدف است، که روش‌های مختلفی برای انجام آن پیشنهاد شده است؛ که از جمله آن‌ها، روش انطباق در حوزه زمان است، که شتاب نگاشت‌ها در نرم‌افزار SeismoMatch با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آبراهامسون [۲۱] (۱۹۹۲) در بازه ۰,۵T تا ۲ با طیف طراحی استاندارد ۲۸۰۰ انطباق داده شده‌اند. طیف آینین نامه‌ی ایران بر اساس زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (A) ترسیم شده است. در شکل ۹، طیف طراحی استاندارد شماره‌ی ۲۸۰۰ و طیف میانگین انطباق داده شده و انطباق داده نشده ۱۲ شتاب نگاشت انتخابی

که در آن،  $(\zeta, T_f)$  شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب  $T_f$  و میرایی ذاتی  $\zeta$  است و  $V_{bf}$  مقاومت سیستم الاستوخرمیری معادل است. بنابراین، مقدار  $V_{bf}$  به جایه جایی هدف و سختی ناگویه‌ی سیستم بستگی دارد. با توجه به رفتار غیرخطی سیستم‌های RBMAP-S و NSD نشان داده شده در بخش قبل، پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  برای رسم طیف عملکرد مطابق روابط ۹ و ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\alpha = K_s / K_f \quad (9)$$

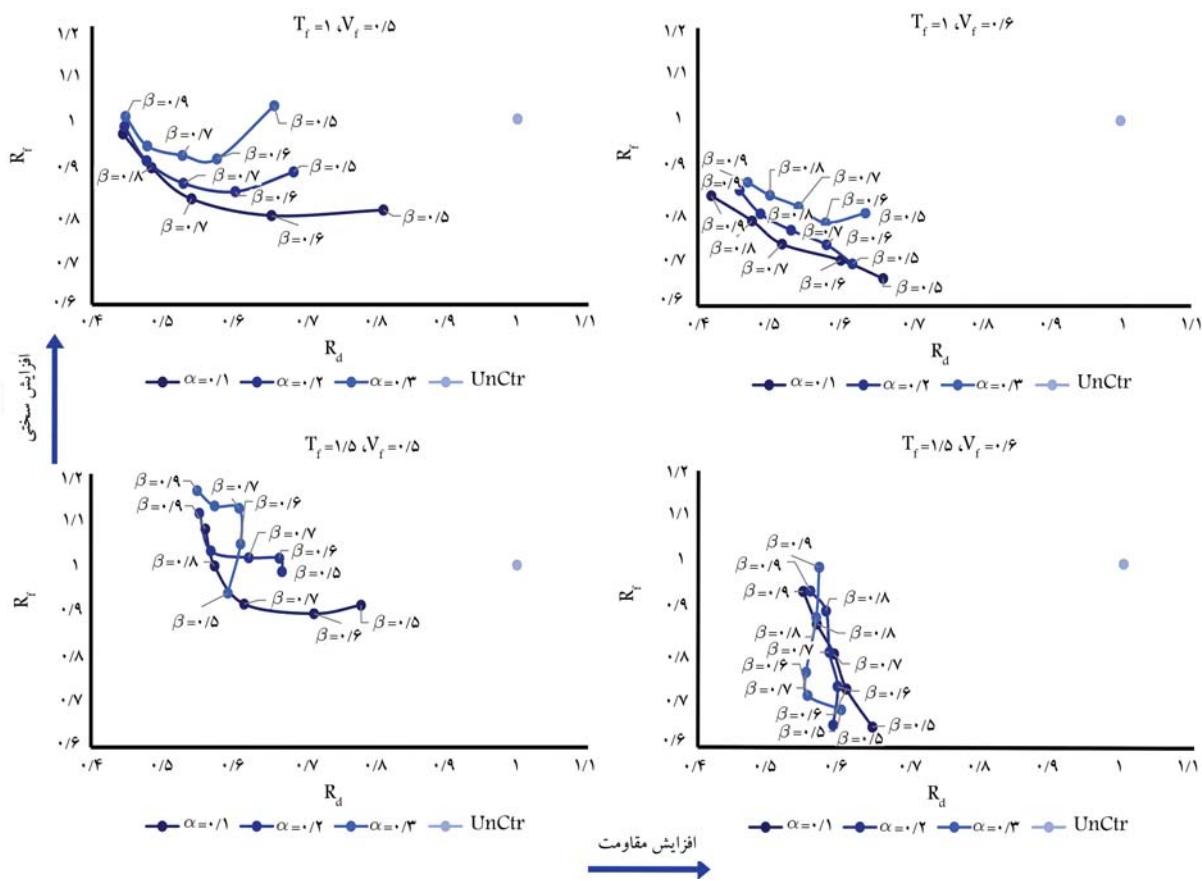
$$\beta = F_{y_n} / F_{y_0} \quad (10)$$

که در آنها،  $K_s$  سختی فنر فشرده،  $K_f$  سختی سازه‌ی یک درجه آزادی،  $F_{y_n}$  نیروی تسلیم سیستم سختی منفی و سازه و  $F_{y_0}$  نیروی تسلیم سازه هستند. در مورد سیستم RBMAP-S، به جای استفاده از پارامتر  $\alpha$  پارامتر  $\theta$ ، که میران دوران اولیه‌ی فشر پیچشی را نشان می‌دهد، استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای بدون  $R_d$  و  $R_f$  [۱۱ و ۱۲]، برای به دست آوردن نسبت جایه جایی و نیروی تسلیم و کارایی عملکرد سیستم در نظر گرفته شده‌اند:

$$R_d = D_{N+f} / D_f \quad (11)$$

$$R_f = F_{N+f} / F_f \quad (12)$$

که در آنها،  $R_d$  و  $R_f$  نسبت بیشینه‌ی جایه جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی به بیشینه‌ی جایه جایی و برش پایه‌ی سازه،  $D_{(N+f)}$  و  $F_{(N+f)}$  به ترتیب بیشینه‌ی جایه جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی،  $D_f$  و  $F_f$  به ترتیب بیشینه‌ی جایه جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی اولیه هستند. طیف عملکرد، نموداری است که پاسخ‌های نرمال شده‌ی  $R_f$  را در برابر  $R_d$  به ازاء پارامترهای مختلف  $\alpha$  و  $\beta$  برای  $f$  های مختلف ترسیم می‌کند. طیف عملکرد با استفاده از پاسخ‌های میانگین تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی توسط ۱۲ شتاب نگاشت رسم می‌شود. شتاب نگاشت‌ها مبتنی بر موارد میدان دور معرفی شده در دستورالعمل FEMAP-۶۹۵ انتخاب شده‌اند. [۲۷] در جدول ۱، فهرست شتاب نگاشت‌ها و بیوگی‌های آن‌ها، از قبیل: نوع گسل، فاصله‌ی سایت تا کانون زلزله و بیشینه‌ی شتاب ثبت شده (PGA) را که در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده‌اند، ارائه شده است.



شکل ۱۰. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی NSD.

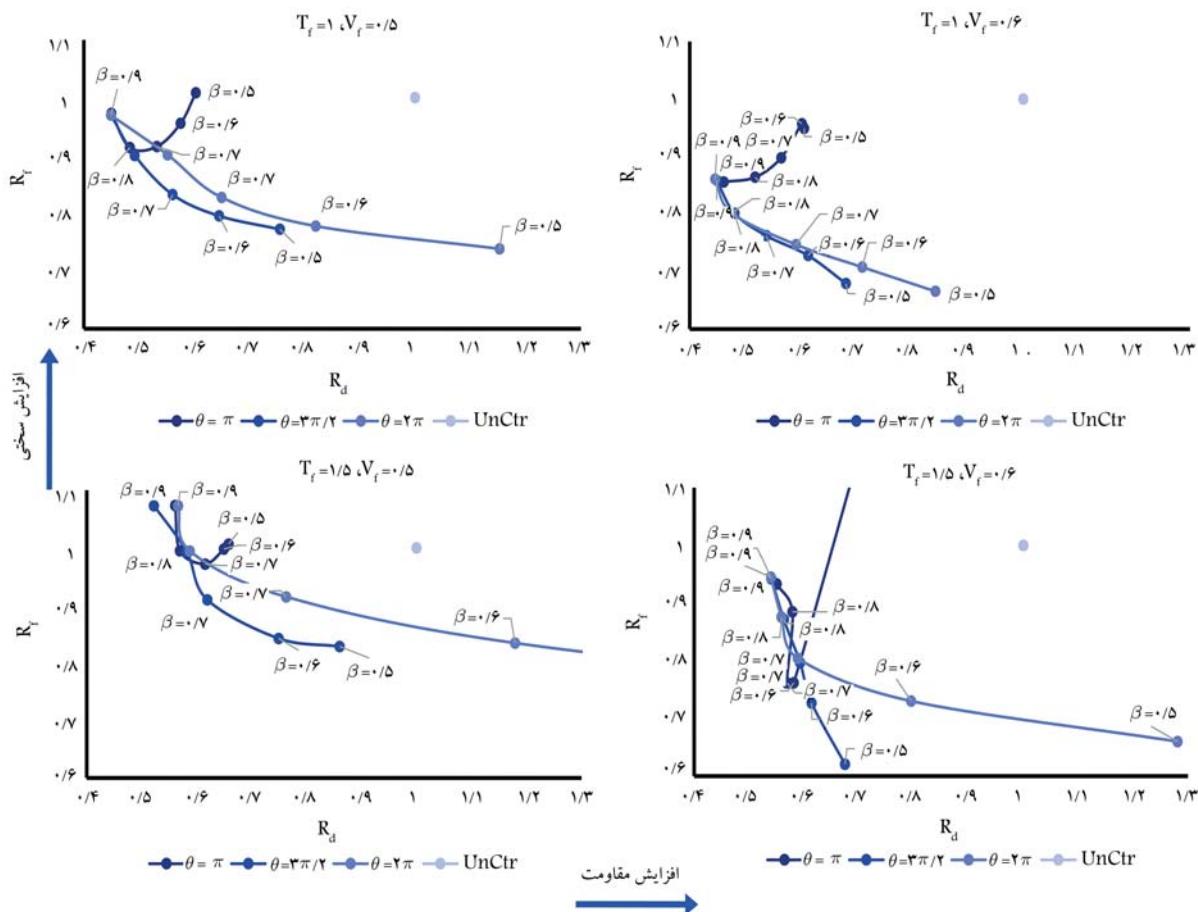
#### ۴. بررسی طیف عملکرد بر روی پل بزرگراهی معیار

برای کنترل نتایج به دست آمده در مرحله‌ی قبل و استفاده از طیف‌های عملکرد رسم شده، از یک پل بزرگراه معیار واقع شده در کالیفرنیا استفاده شده است. آگراوال و تان <sup>۲۲</sup> (۲۰۰۴)، <sup>۱۰</sup> مدل پل بزرگراهی را ارائه کرده‌اند، که تقاطع جدید ۵/۹۱ بوده و در منطقه‌ی اورنج در جنوب کالیفرنیا واقع شده است. در شکل ۱۲ تصویر پل به همراه پلان و برش پل مشاهده می‌شود. پل مذکور، یک پل جعبه‌یی با تیرهای بتی پیش‌تینیده با دو دهانه پیوسته است، که دو دهانه دارد و طول هر دهانه، ۵۸,۵ متر بر روی یک بزرگراه چهارخطه با دو تکیه‌گاه ۳۳ درجه است. عرض عرشه در امتداد دهانه‌ی شرقی، ۱۲,۹۵ متر و ۱۵ متر در جهت غرب است. عرشه توسط یک پایه‌یی پیش‌تینیده به طول ۳۱/۴ متر و ۶/۹ متر نگهداری می‌شود، که بر روی دو گروه شمع قرار دارد و هر گروه از ۴۹ شمع اصطکاکی بتی تشکیل شده است. ارتفاع ستون‌ها تقریباً ۶/۹ متر است. عرشه‌ی پل با استفاده از تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی در هر تکیه‌گاه جداسازی می‌شود و در مجموع ۸ عدد جدآگرین تکیه‌گاه‌های انتهایی و عرشه نصب شده‌اند. در مدل ایجاد شده از پل، برای جایگزینی ۸ تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی از جداسازهای لاستیکی سریبی استفاده شده است. زیرا جدآگرها لرزه‌یی می‌توانند عملکرد لرزه‌یی را بهبود بخشنند. با این حال، در مطالعه‌ی حاضر، دستگاه‌های کنترلی سختی منفی بین عرشه و تکیه‌گاه‌های انتهایی پل نصب شدند تا عملکرد آن‌ها بررسی شود. برای مدل سازی در محیط متلب، <sup>۲۳</sup> جرم و سختی المان‌ها در گره‌های سازه متغیر شدند تا ماتریس‌های سختی و جرم کلی در مطلب ایجاد شوند. سپس عناصر غیرخطی

مشاهده می‌شود. طیف میانگین اخیر برای سازه‌های با دوره‌ی تناوب ۱/۵ ثانیه انتطاق داده شده است. تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی برای ۰/۷ – ۰/۴ – ۰/۵ – ۰/۶ – ۰/۱ – ۰/۲ – ۰/۳ – ۰/۴ – ۰/۵ – ۰/۶ – ۰/۷ – ۰/۸ – ۰/۹ – ۰/۱۰ – ۰/۱۱ تئیه انجام شده است.

طیف عملکرد دو نوع سیستم سختی منفی NSD و RBMAP-S برای  $R_d = 1/0$  و  $V_f = 1/0$  در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ترسیم شده‌اند. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های زیاد سازه در اثر کاهش سختی و جلوگیری از ناپایداری سیستم، یک میراگر ویسکوز با نسبت میرایی  $20\%$  به موازات سیستم سختی منفی استفاده شده است. نقطه‌ی  $R_d = R_f = 1/0$  عملکرد قاب بدون سیستم کنترلی است، که به صورت یک نقطه به نمایش گذاشته شده است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به شکل ماتریس مرتب شده‌اند، که امکان بررسی دامنه‌ی وسیع‌تری از احتمالات را فراهم می‌کنند. همان‌طور که در طیف عملکرد در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، در سیستم NSD، تغییر پارامتر  $\alpha$  تأثیر کمی در مشخصات سیستم دارد و تغییرات  $\beta$ ، پاسخ را بیشتر کنترل می‌کند؛ بنابراین، پارامتر اصلی در طراحی NSD، نیروی پیش‌فسرده‌گی فشر است. همچنین در طیف عملکرد سیستم RBMAP-S در شکل ۱۱، علاوه‌بر  $\beta$ ، نقش  $\theta$  نیز در افزایش سختی، تأثیر میراگر ویسکوز در کاهش جابه‌جایی کاهش می‌یابد. با استفاده از طیف‌های عملکرد با توجه به مشخصات سازه و پاسخ هدف می‌توان مشخصات سیستم کنترلی را بدون نیاز به سعی و خطا به دست آورد.



جدول ۲. مشخصات مودهای غالب پل بزرگراهی. [۲۶]

شماره مود	نوع مود	دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۱	پیچشی	۰,۸۱
۲	پیچشی <sup>+</sup> عمودی	۰,۷۸
۳	عمودی	۰,۶۵
۴	انتقالی	۰,۵۹
۵	عمودی	۰,۵۶

جدول ۳. فهرست معیارهای ارزیابی. [۲۶]

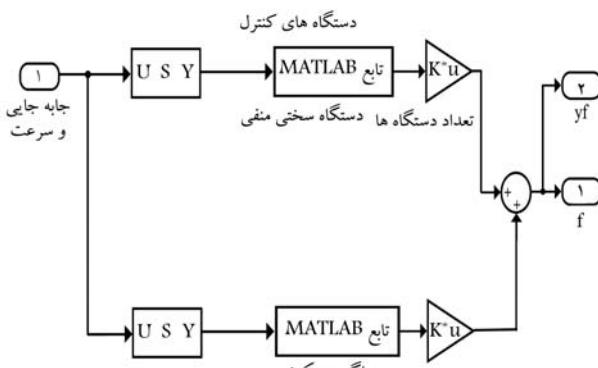
نرم پاسخ	پاسخ حداکثر
برش پایه	برش پایه
$J_1 = \max \left\{ \frac{\max_{i,t}  F_{bi}(t) }{F_{0b}^{\max}} \right\}$	$J_+ = \max \left\{ \frac{\max_t \ F_{bi}(t)\ }{\ F_{0b}^{\max}\ } \right\}$
لنگر واژگونی	لنگر واژگونی
$J_v = \max \left\{ \frac{\max_{i,t}  M_{bi}(t) }{M_{0b}^{\max}} \right\}$	$J_v = \max \left\{ \frac{\max_t \ M_{bi}(t)\ }{\ M_{0b}^{\max}\ } \right\}$
جایه‌جایی در وسط دهانه	جایه‌جایی در وسط دهانه
$J_r = \max \left\{ \max_{i,t} \left  \frac{y_{mi}(t)}{y_{0m}^{\max}} \right  \right\}$	$J_+ = \max \left\{ \max_i \left  \frac{y_{mi}(t)}{\ y_{0m}^{\max}\ } \right  \right\}$
شتاب در وسط دهانه	شتاب در وسط دهانه
$J_+ = \max \left\{ \max_{i,t} \left  \frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ddot{y}_{0m}^{\max}} \right  \right\}$	$J_+ = \max \left\{ \max_i \left  \frac{\ddot{y}_{mi}(t)}{\ \ddot{y}_{0m}^{\max}\ } \right  \right\}$
جایه‌جایی جداساز	جایه‌جایی جداساز
$J_+ = \max \left\{ \max_{i,t} \left  \frac{y_{bi}(t)}{y_{0b}^{\max}} \right  \right\}$	$J_{++} = \max \left\{ \max_i \left  \frac{y_{bi}(t)}{\ y_{0b}^{\max}\ } \right  \right\}$

از طیف‌های عملکرد با  $V_f = ۰,۵, ۰,۶, ۰,۷$ ، می‌توان پارامترهای طراحی سیستم‌های ساختی منفی را به دست آورد. با استفاده از طیف‌های عملکرد برای سیستم NSD،  $\alpha = ۰,۳$  و  $\beta = ۰,۷$  و برای سیستم RBMAP-S  $\theta = ۳\pi/2$  اختیار شده‌اند. بنابراین، بر اساس پارامترهای مذکور، شتاب نسبت نیروی تسلیم سازه‌ی اولیه در هر دو سیستم است. علاوه‌بر این، نسبت ساختی فنر فشرده به ساختی سازه در سیستم NSD و میزان زاویه‌ی دوران اولیه‌ی فنر پیچشی در RBMAP-S نیز به عنوان پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای دوره‌ی تناوب  $1/5$  ثانیه برای هر دستگاه ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌شود که پارامترهای انتخابی دستگاه تا حد مطلوبی عملکرد دستگاه را به نمایش می‌گذارند و می‌توان بر اساس طیف عملکرد ارائه شده، به طراحی دستگاه‌های ساختی منفی بدون سعی و خطا پرداخت. بر اساس طیف‌های ترسیم شده ملاحظه می‌شود که سیستم NSD عمدتاً توسط  $\beta$  یعنی نیروی پیش‌فشردگی فنر دستگاه کنترل می‌شود، ولی در سیستم RBMAP-S علاوه‌بر  $\beta$ ، نقش  $\theta$  در کنترل سازه و نیز انتخاب میزان دوران اولیه‌ی فنر پیچشی در عملکرد دستگاه تأثیرگذار هستند. با افزایش مقاومت و ساختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ساختی، تأثیر

مجموعه‌ی دوم، از ۵ معیار براساس نرم پاسخ‌ها در کل مدت زمان یک زلزله است. مقدار نرم پاسخ به صورت رابطه‌ی ۱۳ است:

$$\| \cdot \| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (\cdot)^2 dt} \quad (13)$$

مدل سازی پل و سیستم‌های ساختی منفی در محیط SIMULINK در نرم افزار



شکل ۱۳. مدل NSD در محیط SIMULINK.

متلب انجام شده و نتایج معیارهای ارزیابی به دست آمده است. در شکل ۱۳، مدل دستگاه کنترل در محیط SIMULINK مشاهده می‌شود. در جدول‌های ۴ و ۵، نتایج معیارهای ارزیابی برای سیستم‌های ساختی منفی در دو نوع سیستم NSD و RBMAP-S ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دستگاه ساختی منفی NSD،  $۰,۳۳/۰,۳۳$  و سیستم RBMAP-S،  $۰,۲۱/۰,۲۱$  میزان برش پایه را کاهش داده‌اند. همچنین دستگاه ساختی منفی NSD باعث کاهش  $۰,۳۳/۰,۳۳$  و سیستم RBMAP-S، باعث کاهش  $۰,۲۰/۰,۲۰$  در میزان لنگر واژگونی شده‌اند. جایه‌جایی در وسط دهانه دستگاه ساختی منفی NSD،  $۰,۲۵/۰,۲۵$  و در وسط دهانه سیستم RBMAP-S،  $۰,۳۷/۰,۳۷$  کاهش و نیز شتاب در وسط دهانه دستگاه ساختی منفی NSD،  $۰,۱۵/۰,۱۵$  کاهش و در وسط دهانه سیستم RBMAP-S،  $۰,۱۸/۰,۱۸$  افزایش یافته است. در نتیجه، در مقایسه بین دو دستگاه اخیر، دستگاه NSD عملکرد بهتری در کنترل پاسخ‌های پل از خود نشان داده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، طیف عملکرد برای دو نوع دستگاه ساختی منفی به صورت فنر پیش‌فشرده‌ی خطی و دورانی ارائه شده است. طیف مذکور در دوره‌ی تناوب  $۰,۵/۰,۶$  ثانیه، که دوره‌ی تناوب غالب سازه‌های است، بر اساس پارامترهای دینامیکی مختلف دستگاه ساختی منفی ترسیم شده است. پارامترهای مذکور، شامل نسبت نیروی تسلیم شوندگی مجموع دستگاه ساختی منفی به نیروی تسلیم سازه‌ی اولیه در هر دو سیستم است. علاوه‌بر این، نسبت ساختی فنر فشرده به ساختی سازه در سیستم NSD و میزان زاویه‌ی دوران اولیه‌ی فنر پیچشی در RBMAP-S نیز به عنوان پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای دوره‌ی تناوب  $1/5$  ثانیه برای هر دستگاه ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌شود که پارامترهای انتخابی دستگاه تا حد مطلوبی عملکرد دستگاه را به نمایش می‌گذارند و می‌توان بر اساس طیف عملکرد ارائه شده، به طراحی دستگاه‌های ساختی منفی بدون سعی و خطا پرداخت. بر اساس طیف‌های ترسیم شده ملاحظه می‌شود که سیستم NSD عمدتاً توسط  $\beta$  یعنی نیروی پیش‌فشردگی فنر دستگاه کنترل می‌شود، ولی در سیستم RBMAP-S علاوه‌بر  $\beta$ ، نقش  $\theta$  در کنترل سازه و نیز انتخاب میزان دوران اولیه‌ی فنر پیچشی در عملکرد دستگاه تأثیرگذار هستند. با افزایش مقاومت و ساختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ساختی، تأثیر

جدول ۴. نتایج معیارهای ارزیابی پل بزرگراهی معیار بر اساس سیستم کنترل سختی منفی NSD.

معیار ارزیابی	نام رکورد										میانگین		
	Northridge	Duzce	Imperial Valley	Kobe	Kocaeli	Landers	Loma Prieta	Manjil	Superstition	Chi Chi	San Fernando		
J1	-/۵۵۱	-/۸۵۲	-/۵۶۳	-/۸۷۲	-/۴۴۸	-/۴۰۴	-/۷۹۷	-/۶۶۰	-/۶۱۱	-/۴۷۹	۱/۰۴۹	-/۷۵۱	-/۶۷۰
J2	-/۵۳۴	-/۸۸۹	-/۵۴۳	-/۸۶۵	-/۴۳۵	-/۴۱۰	-/۷۹۸	-/۶۵۰	-/۵۹۵	-/۴۸۶	۱/۰۲۹	-/۸۱۰	-/۶۷۰
J3	-/۶۸۵	-/۷۹۵	-/۳۲۹	-/۶۴۸	-/۳۵۰	-/۳۶۶	-/۸۰۰	-/۶۷۲	-/۷۷۹	-/۷۴۱	-/۹۹۰	-/۶۸۱	-/۶۵۳
J4	-/۸۴۵	۱/۲۴۸	۱/۰۲۴	-/۷۷۲	-/۵۷۹	-/۵۸۵	-/۷۸۸	-/۸۶۴	۱/۰۶۶	-/۶۳۶	-/۸۰۳	۱/۰۵۹	-/۸۵۶
J5	-/۶۸۳	-/۷۸۸	-/۳۲۲	-/۶۵۲	-/۳۳۸	-/۳۶۲	-/۸۴۰	-/۶۷۵	-/۷۸۰	-/۷۱۴	-/۹۹۹	-/۶۶۹	-/۶۵۲
J6	-/۴۵۵	-/۵۸۶	-/۳۸۸	-/۹۰۰	-/۴۹۸	-/۳۰۸	-/۶۷۳	-/۴۶۷	-/۶۱۷	-/۵۵۴	۱/۲۵۸	-/۳۹۱	-/۵۸۸
J7	-/۴۵۲	-/۵۸۲	-/۳۸۲	-/۸۹۷	-/۴۹۲	-/۳۰۹	-/۶۲۶	-/۴۶۲	-/۶۰۸	-/۵۵۱	۱/۲۵۷	-/۳۸۷	-/۵۸۴
J8	-/۵۱۶	-/۷۵۱	-/۱۸۹	-/۸۸۱	-/۳۱۳	-/۲۳۸	-/۶۵۱	-/۴۹۱	-/۷۷۰	۱/۱۲۵	۲/۶۵۱	-/۶۱۸	-/۷۶۶
J9	-/۸۶۵	۱/۱۱۳	-/۹۰۷	-/۹۳۳	-/۷۶۵	-/۶۰۵	-/۹۰۶	-/۹۸۸	۱/۱۱۸	-/۸۲۸	-/۹۷۱	۱/۰۴۲	-/۹۲۰
J10	-/۵۱۳	-/۷۴۳	-/۱۸۱	-/۸۸۴	-/۳۰۳	-/۲۳۶	-/۶۱۸	-/۴۸۹	-/۷۸۸	۱/۱۴۲	۲/۶۸۳	-/۶۰۸	-/۷۶۶

جدول ۵. نتایج معیارهای ارزیابی پل بزرگراهی معیار بر اساس سیستم کنترل سختی منفی S - RBMAP.

معیار ارزیابی	نام رکورد										میانگین		
	Northridge	Duzce	Imperial Valley	Kobe	Kocaeli	Landers	Loma Prieta	Manjil	Superstition	Chi Chi	San Fernando		
J1	-/۶۵۱	۱/۲۳۶	-/۶۹۱	-/۸۷۲	-/۵۶۴	-/۴۴۱	۱/۰۹۷	-/۷۲۸	-/۶۱۱	-/۵۵۹	۱/۱۰۳	-/۸۲۷	-/۷۸۸
J2	-/۶۹۷	۱/۲۴۹	-/۷۱۸	-/۸۶۰	-/۵۷۳	-/۴۵۲	۱/۰۹۴	-/۷۲۰	-/۶۰۱	-/۵۶۳	۱/۰۸۴	-/۸۱۱	-/۸۰۱
J3	-/۵۸۴	-/۶۶۷	-/۳۷۷	-/۶۰۸	-/۳۵۸	-/۲۵۶	۱/۰۵۶	-/۶۸۸	-/۷۰۶	-/۷۲۳	-/۸۳۲	-/۶۷۸	-/۶۲۷
J4	۱/۷۵۸	۱/۲۴۷	۱/۰۹۸	۱/۶۱۱	-/۸۸۳	-/۵۸۸	۱/۴۸۰	-/۲۳۸	-/۵۴۲	-/۸۵۱	-/۸۲۷	-/۹۹۵	۱/۱۸۵
J5	-/۵۶۰	-/۷۸۹	-/۳۷۰	-/۵۸۴	-/۳۴۳	-/۲۶۸	۱/۰۵۰	-/۶۹۰	-/۶۹۲	-/۷۴۰	-/۸۵۰	-/۶۷۵	-/۶۳۴
J6	-/۶۶۱	۱/۹۷۱	-/۵۷۶	-/۴۷۸	-/۱۵۶	-/۳۵۶	۱/۲۲۰	-/۴۳۶	-/۶۴۴	-/۶۲۶	۱/۴۹۳	-/۴۱۴	-/۷۸۶
J7	-/۶۵۹	۱/۹۶۷	-/۵۷۲	-/۴۷۲	-/۱۵۶	-/۳۵۷	۱/۲۱۳	-/۴۳۱	-/۶۳۷	-/۶۲۳	۱/۴۹۲	-/۴۱۱	-/۷۸۳
J8	-/۳۸۳	۱/۱۱۳	-/۳۶۶	-/۱۵۰	-/۳۰۵	-/۱۵۶	۱/۷۶۷	-/۶۶۰	-/۶۹۶	۱/۱۴۴	۲/۹۳۹	-/۲۳۳	-/۸۹۸
J9	۱/۰۵۵	۱/۱۸۶	-/۹۴۱	۱/۲۱۷	-/۸۷۳	-/۱۰۶	۱/۱۰۲	-/۱۰۳۱	-/۱۱۸	-/۹۲۲	۱/۰۱۸	-/۶۴۳	۱/۰۱۳
J10	-/۳۸۱	۱/۱۴۲	-/۳۶۶	-/۴۹۰	-/۳۰۲	-/۱۸۴	۱/۶۹۹	-/۷۰۳	-/۶۹۳	۱/۲۰۲	۲/۹۶۷	-/۷۲۳	-/۹۰۶

میراگر ویسکوز در کاهش جایه جایی کاهش می‌یابد. برای بررسی عملکرد سیستم ذکر شده در کنترل رفتار سازه‌ی پل، مدل سیستم‌های سختی منفی به همراه میراگر ویسکوز در ابتدا با توجه به مشخصات دینامیکی پل از روی طیف عملکرد طراحی شده و سپس بر اساس پارامترهای به دست آمده بر روی پل بزرگراهی جداسازی شده معیار در نرم افزار مدل سازی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از طیف عملکرد، روشی آسان و کاربردی برای طراحی سیستم‌های کنترلی، از جمله سیستم سختی منفی است؛ که علاوه بر حذف سعی و خطای از

## پانوشت‌ها

- Iemura
- Nagarajaiah
- Tokooya
- Liu & Zhou
- Shape Memory Alloy
- Huan Li

1. Yao
2. Self-Centring
3. Negative Stiffness

10. Sun
11. Zhao & Wang
12. Negative Stiffness Inerter Damper
13. Li
14. Xiang shi
15. Salvatore
16. Guo & Christopoulos
17. Negative Stiffness Device
18. Nagarajaiah
19. Rotation-Based Mechanical Adaptive Passive Device
20. Guo & Christopoulos
21. Abrahamson
22. Agrawal & Tan
23. MATLAB

### منابع (References)

1. Yao, J.T.P. "Concept of structural control", *Journal of the Structural Division*, **98**(7), pp.1567-1574 (1972).
2. Iemura, H. and Igarashi, A. "Negative stiffness friction damping for seismically isolated structures", *Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp.775-791 (2005).
3. Pasala, D.T.R. and Nagarajaiah, S. "A New structural modification approach for seismic protection using negative stiffness device", 15 WCEE (2012).
4. Sarlis, A.A. and Nagarajaiah, S. "Negative stiffness device for seismic protection of structures - an analytical and experimental study", *3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* (2011).
5. Sarlis, A.A. and Nagarajaiah, S. "Negative stiffness device for seismic protection of structures", *Journal of Structural Engineering*, **139**(7), pp.1124-1133 (2012).
6. Attary, N., Symans, M. and Nagarajaiah, S. "Numerical simulations of a highway bridge structure employing passive negative stiffness device for seismic protection", *Earthquake Engng Struct. Dyn*, **44**(6), pp. 973-995 (2014).
7. Attary, N., Symans, M. and Nagarajaiah, S. "Development of a rotation-based negative stiffness device for seismic protection of structures", *Journal of Vibration and Control*, pp. 1-15 (2015).
8. Toyooka, A., Motoyama, H., Kouchiyama, O. and et al. "Developement of autonomous negetive stiffness damper for reducing absolute responses", *QR of RTRI*, **56**(4), pp. 284-290 (2015).
9. Zhou, P. and Li, H. "Modeling and control performance of a negative stiffness damper for suppressing stay cable vibrations", *Structural Control and Health Monitoring*, **23**(4), pp. 764-782 (2015).
10. Liu, M. and Zhou, P. "Novel self-centering negative stiffness damper based on combination of shape memory alloy and prepressed springs", *Journal of Aerospace Engineering*, **31**(6), 1950058 (2018).
11. Li, H. and Li, J. "Modified adaptive negative stiffness device with variable negative stiffness and geometrically nonlinear damping for seismic protection of structures", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **21**(08), 2150107 (2021).
12. Sun, F. and Wang, M. "Multi-objective optimal design and seismic performance of negative stiffness damped outrigger structures considering damping cost", *Engineering Structures*, **229**, 111615 (2021).
13. Zhao, Z. and Wang, Y. "Seismic performance upgrading of containment structures using a negative-stiffness amplification system", *Engineering Structures*, **262**, 114394 (2022).
14. Naqeeb Ul Islam, R. and Jangid, S. "Optimum parameters and performance of negative stiffness and inerter based dampers for base-isolated structures", *Bulletin of Earthquake Engineering* (2022).
15. Iemura, H. and Pradono, M.H. "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge", *Journal of Structural Control*, **10**(3-4), pp.187-203 (2003).
16. Li, H. and Askari, M. "A novel structural seismic protection system with negative stiffness and controllable damping", *Structural Control and Health Monitoring*, **28**(10), e2810 (2021).
17. Shi, X. and Zhao, F. "High-performance vibration isolation technique using passive negative stiffness and semiactive damping", *Earthquake Engineering and Resilience*, **36**(8), pp. 1034-1055 (2021).
18. Salvatore, A. and Carboni, B. "Nonlinear dynamic response of an isolation system with superelastic hysteresis and negative stiffness", *Nonlinear Dynamics*, **107**, pp. 1765-1790 (2022).
19. Li, H. and Li, J. "A quasi-active negative stiffness damper for structural vibration control under earthquakes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **173**, 109071 (2022).
20. Ejabati, S.M. and Bahar, A. "Passive control of isolator-based structures using negative stiffness device", *2ed International Conference on Geotechnics and Seismic Engineering*, (In Persian) (1393/2015).
21. Tehranizadeh, M. and Taghikhani, T. "Performance of semi-active control systems in seismic protection of sensitive equipment using negative stiffness algorithm", The 4th National Congress of Civil Engineering (In Persian) (1386/2008).
22. ASCE/SEI 7-16. "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers (2016).
23. ASCE/SEI 41-17. "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings", American Society of Civil Engineers (2017).
24. FEMA450. "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures", Building Seismic Safety Council National Institute of Building Sciences, Washington D.C. (2003).
25. Guo, J.W.W. and Christopoulos, C. "Performance spectra based method for the seismic design of structures equipped with passive supplemental damping systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **4**(6), pp. 9.0-90 (2012).
26. Guo, J.W.W. and Christopoulos, C. "A procedure for generating performance spectra for structures equipped with passive supplemental dampers", *Earthquake Engng Struct. Dyn*, **42**(9), pp. 1321-1338 (2013).

27. FEMA P695. "Quantification of building seismic performance factors", Federal Emergency Management Agency (2009).
28. Iranian Building Codes And Standards. "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Standard No.2800 4th Edition (2014).
29. Abrahamson, N.A. "Non-Stationary spectral matching", *Seismological Research Letters*, **63.1**(20), p.30 (1992).
30. Agrawal, A., Tan, P., Nagarajaiah, S. and et al. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge, Part I: phase I problem definition", *National Science Foundation Grant*, **16**(5), pp. 509-529 (2009).



# پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین

آزاده خشکرودی (دانشجوی دکتری)

حسین پروینی ثانی\* (استادیار)

مجتبی اعجمی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

یکی از مؤلفه‌های کلیدی در تعیین عملکرد سازه، مؤلفه‌های زوال هستند. در نوشتار حاضر، به پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح توسط مدل‌های یادگیری ماشین پرداخته شده است. برای این منظور از ۲۵۵ داده آزمایشگاهی مربوط به ستون‌های بتن مسلح از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۲، برای پیش‌بینی با روش‌های مختلف یادگیری ماشین انتخاب شده‌اند، که دچار سه نوع شکست: خمشی، برشی و خمشی-برشی بوده‌اند. در ادامه، عملکرد روش‌های یادگیری ماشین، شامل: آدبوست، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) با هم مقایسه شده‌اند. در این راستا، تحلیل‌های دقیق توسط نرم‌افزار پاپتن بررسی شدند و نتایج به دست آمده نشان دادند که مدل جنگل تصادفی دارای دقیقی برابر ۹۱٪ برای پیش‌بینی چرخش خمیری بعد از تسلیم ( $\theta_p$ )، ۸۱٪ برای چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال مقاومت تا نقطه‌ی صفر مقاومت ( $\theta_{pc}$ ) و ۸۸٪ برای ظرفیت استهلاک ازرسی نرمال‌بین شده ( $\lambda$ ) نسبت به سایر الگوریتم‌ها بوده است. در ضمن، مدل جنگل تصادفی، نسبت به مدل‌های تحلیلی، بهبود پیش‌بینی قابل ملاحظه‌ی در تعیین مؤلفه‌های زوال داشته است.

khoshkroodi@iauz.ac.ir  
hossein.parvini\_sani@iauz.ac.ir  
aajami@iauz.ac.ir

وازگان کلیدی: مؤلفه‌های زوال، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی.

## ۱. مقدمه

مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) استفاده کرده‌اند.<sup>[۱]</sup> سالانه ۲۰ میلیون تن، نخاله‌ی ساختمانی در تهران تولید می‌شود، که مقدار زیادی از آنها را می‌توان بازیافت و به عنوان بتن بازیافتی استفاده کرد. فخاریان و همکاران<sup>[۲]</sup>، به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) پرداخته‌اند.<sup>[۳]</sup> اونیاری و آیکوتون<sup>[۴]</sup>، از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و خمشی ملات ساخته شده با افزودنی رزولیت اصلاح شده استفاده کرده‌اند.<sup>[۵]</sup> پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های تحت بار جانی، یکی از مسائل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک بوده و تاکنون روش‌های متفاوتی برای ارزیابی آن ارائه شده است، اردکانی و کوهستانی<sup>[۶]</sup>، از روش ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانی شمع‌ها در خاک‌های رسی استفاده کرده‌اند.<sup>[۷]</sup> از آن جایی که مصالح ساختمانی اغلب جرم سازه را تشکیل می‌دهند، برای بهره‌وری از مصالح و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌یی، می‌توان از ارزیابی‌های زیست‌محیطی استفاده کرد. همچنین دامیکو<sup>[۸]</sup> و همکاران<sup>[۹]</sup>، از

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی جهت استفاده از الگوریتم‌های مختلف جهت پیش‌بینی پارامترهای سازه‌یی انجام شده است. بیو<sup>[۱۰]</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، مقاومت فشاری و کششی بتن با کارایی بالا را توسط الگوریتم ترکیبی به دست آورده‌اند، که شامل: مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)<sup>[۱۱]</sup> و الگوریتم کرم شب‌تاب اصلاح شده بوده است. نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که سیستم ترکیبی، عملکرد بالایی نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است.<sup>[۱۲]</sup> نخاله‌های ساختمانی و پسمند‌های کشاورزی، از جمله نگرانی‌های عمده‌ی زیست‌محیطی در جهان هستند. سالانه بیش از ۵/۵ میلیون تن پوسته‌ی برنج برای دفعه، در دسترس است، که مقدار زیادی از آنها را می‌توان بازیافت و به عنوان سنگ‌دانه در بتن استفاده کرد. جتاهون<sup>[۱۳]</sup> و همکاران<sup>[۱۴]</sup>، برای پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی خاکستر پوست برنج، از

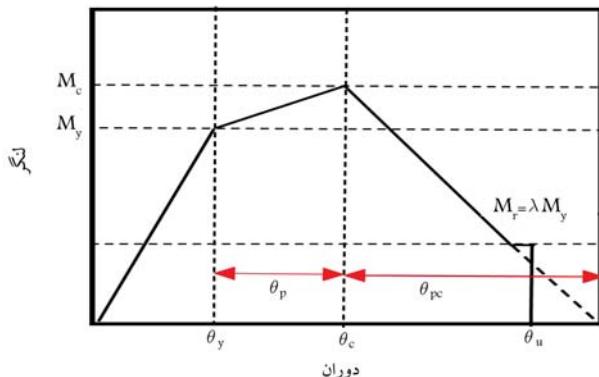
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱، اصلاحیه ۷، ۱۴۰۱/۱/۸، پذیرش ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۱/۹.

DOI: 10.24200/J30.2022.60697.3116

استناد به این مقاله:

خشکرودی، آزاده، پروینی ثانی، حسین و اعجمی، مجتبی (۱۴۰۲). «پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین»، مهندسی عمران شریف، ۲۲-۱۵، ص. ۳۹-۴۰.



شکل ۱. نمودار لنگر - دوران.

آنها نشان دادند که مدهای شکست لرزه‌ی دیوارهای برشی بتن مسلح به پارامترهای مختلفی، مانند: نسبت ابعادی، نسبت طول به عرض دیوارهای برشی و شاخص المان‌های تقویتی مرزی بستگی دارد.<sup>۱۵</sup> سانتوس<sup>۱۱</sup> و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۷)، از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص ناهنجاری در پل‌ها استفاده کردند.<sup>۱۶</sup> منگالاسو و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۲۰)، از مدل‌های یادگیری ماشین جنگلی تصادفی (RF) برای پیش‌بینی حالت شکست ستون‌های بتن مسلح و دیوارهای برشی و نیز از یک روش توضیحی افزایشی تطبیقی SHAP<sup>۱۴</sup> برای رتبه‌بندی متغیرهای ورودی باست شناسایی مدهای شکست استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم جنگل تصادفی دارای دقت تقریبی ۸۶٪ است. همچنین نتایج آنها نشان داد که متغیرهای هندسی و شاخص‌های پایداری، پارامترهای مهمی در تعیین مدهای شکست هستند.<sup>۱۷</sup>

در نوشتار حاضر، پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال برای ستون‌های بتن مسلح توسط روش‌های یادگیری ماشین، که شامل روش‌های: جنگل تصادفی (RF)، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و آدابوت<sup>۱۸</sup> هستند، انجام شده است.

برای این منظور، نتایج ۲۵۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی از ستون‌های بتن مسلح به دست آمده، که توسط پژوهشگران مختلف در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۲ جمع‌آوری و انتخاب شده‌اند.<sup>۱۹</sup> نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی موجود و مدل‌های به دست آمده از چند روش یادگیری ماشین برای اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی استفاده شده‌اند. برای درک و پیش‌بینی رفتار سازه‌ها، تحت بارهای لرزه‌ی بتن نیاز است که بتوانند رفتار اعضاء سازه را تشریح کنند. منحنی‌های بک - ب - بک<sup>۲۰</sup> یا یک‌جهت، مدل‌های چندخطی هستند که شامل مؤلفه‌های زوال هستند، (شکل ۱).

رویکرد تحلیلی، برای ایجاد مدل‌هایی برای تخمین مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. روابط مذکور بر اساس تعداد محدودی از پارامترها، به پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال می‌پردازند. این مدل‌ها اغلب دقت پیش‌بینی محدود را نشان می‌دهند، بنابراین استفاده از چنین مدل‌هایی برای شبیه‌سازی رفتار ستون‌های بتن مسلح کافی نیست. هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر، پیدا کردن مدلی از روش‌های یادگیری ماشین است، که بتواند بهترین پیش‌بینی را داشته باشد. مدل جنگل تصادفی (RF)، پیش‌بینی بهتری نسبت به روابط تحلیلی داشته است. در ادامه، عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین با روابط تحلیلی مقایسه شده است.

## ۱.۱. روابط تحلیلی

برای درک و پیش‌بینی رفتار سازه‌ها تحت بارهای لرزه‌ی بتن نیاز است که بتوانند رفتار اعضاء سازه را تشریح کنند. منحنی‌های بک - ب - بک یا منحنی‌های یک‌جهت، مدل‌های چندخطی هستند که شامل مؤلفه‌های زوال هستند (شکل ۱).

روش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استفاده و روش‌ها، اطلاعات قوی و دقیقی از مصالح سازه‌ی بتن، جزئیات ساخت و ساز را فراهم و در نتیجه، فرست متناسبی برای برآورده قابل اطمینان از چرخه‌ی عمر گازهای گلخانه‌ی ایجاد کرده‌اند.<sup>۲۱</sup> در مطالعات دیگری، طبقه‌بندی مدهای شکست در سازه‌های بتن مسلح با میانقاب بنایی از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسط هوانگ و بارتون<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان داده که بیشتر الگوریتم‌ها، دقیقی بیش از ۸۰٪ دارند، که در این میان بالاترین دقت برای الگوریتم‌های ماشین بردازی‌پیش‌تیان و تقویتی تطبیقی بوده است.<sup>۷</sup> در این راستا، مانگالاتو و ژتون<sup>۷</sup> (۲۰۱۸)، توانستند مدهای شکست قبل و بعد از تسلیم عضو، همچنین مقاومت‌های برشی اتصال‌ها در تیرهای و ستون‌های بتن مسلح تحت بارهای لرزه‌ی را از طریق یادگیری ماشین به دست آورند.<sup>۸</sup> سیام<sup>۸</sup> و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۸)، نیز برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی عملکرد دیوارهای برشی آجری مسلح از روش‌های یادگیری ماشین استفاده کردند. ایشان ابتدا از یک الگوریتم بدون نظارت برای خوش‌بندی دیوارها بر اساس مشخصات هندسی و مکانیکی استفاده کرده و سپس از طریق الگوریتم‌های تحت نظارت به طبقه‌بندی دیوارها و پیش‌بینی جایه‌جایی با توجه به مدهای شکست پرداخته‌اند.<sup>۹</sup> کیانی و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۹)، پاسخ‌های لرزه‌ی و منحنی‌های شکستگی را از طریق ابرارهای یادگیری ماشین به دست آورده‌اند. آنها از ۱۰ الگوریتم یادگیری ماشین استفاده کرده و دریافتند که الگوریتم جنگل تصادفی (RF) و تحلیل‌های تشخیص خطی و درجه دوم، کارایی بالاتری در پیش‌بینی پاسخ‌های سازه‌ی دارند. علاوه بر این، ایشان از یک روش مبتنی بر طبقه‌بندی، برای استخراج منحنی‌های شکستگی استفاده کردند، که نتایج به دست آمده حاکی از دقت و کارایی بالای روش مذکور است.<sup>۱۰</sup> ژتون<sup>۹</sup> و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۴)، مدل‌های آماری برای مقاومت برشی اتصال‌های تیر به ستون تیز مسلح را براساس روش‌های یادگیری ماشین ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیون خطی چندگانه‌ی معمولی و روش یادگیری ماشین پیشرفته‌ی مارپیچ رگرسیون خطی سازکار چندگانه (MARS)، تأثیر پارامترهای مختلفی، مانند: خواص ماده، پارامترهای طراحی و پیکربندی اتصال ( مقاومت برشی اتصال) را بررسی کردند و دریافتند که روش MARS، دقت و پیش‌بینی بالایی دارد.<sup>۱۱</sup> رفیعی و عادلی<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۷)، از یک مدل جدید برای پایش سلامت سازه‌های بلندمرتبه از طریق تکیب یادگیری ماشین بدون نظارت، ماشین بولزمن محدود و یک الگوریتم طبقه‌بندی تحت نظارت به نام طبقه‌بندی دینامیک عصبی استفاده کردند. ایشان نتایج به دست آمده را با سه الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده مقایسه کرده و دریافتند که طبقه‌بندی دینامیکی عصبی، دقت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.<sup>۱۲</sup> فلاح و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۲۱)، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پایش سلامت سازه‌ها استفاده کرده و نشان داده‌اند که یادگیری ماشین به طور مؤثری چندین تجزیه و تحلیل، مانند: خوش‌بندی، رگرسیون و طبقه‌بندی آسیب در سازه‌های مختلف، از جمله: ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها، تونل‌ها و غیره را انجام می‌دهد و از این طریق می‌تواند شکاف‌های داشن فعلی و نیازهای مطالعات آینده را مشخص کند.<sup>۱۳</sup> چارالامپاکیس<sup>۱۰</sup> و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۲۰)، دوره‌ی تناوب اصلی سازه‌های بتن‌آرمه‌ی مسلح میانقاب با مصالح بنایی را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین تخمین زند و نشان دادند که دوره‌ی تناوب، که به ارتفاع سازه‌ها، طول دهانه‌ی بین ستون‌ها، نسبت بازشدنگی دیوار و سختی دیواربنایی مربوط است، را می‌توان از طریق یادگیری ماشین به دست آورد و در نتیجه، با این کار سطح هزینه‌های محاسباتی بالا کاهش می‌یابد.<sup>۱۴</sup> منگالاسو و همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۲۰)، مدهای شکست لرزه‌ی دیوارهای برشی بتن مسلح را توسط الگوریتم یادگیری ماشین به دست آورده‌اند، که از میان الگوریتم‌های انتخاب شده، الگوریتم جنگل تصادفی نسبت به سایر الگوریتم‌ها، دقت حدود ۸۶٪ داشته است.

جدول ۱۴.۱ پارامتر ورودی و ۳ پارامتر خروجی.

توصیف پارامتر	واحد	پارامتر
عرض ستون	$b$	$mm$
عمق ستون	$h$	$mm$
نسبت ابعادی ستون	$\frac{L_s}{H}$	
نسبت نیروی محوری	$v$	
نسبت نیروی محوری به نیروی محوری متعادل شده	$\frac{P_b}{P}$	
تشن فشاری بتن	$f'_c$	$Mpa$
تشن تسلیم فولاد	$f_y$	$Mpa$
نسبت مساحت میلگرد طولی به مساحت کل	$\rho$	
قطر میلگرد طولی	$d_b$	$mm$
فاصله‌ی میلگردهای عرضی	$s$	$mm$
ضریب کمانش میلگرد	$s_n$	
نسبت مساحت میلگرد عرضی به مساحت کل	$\rho_{sh}$	
نسبت مساحت مؤثر میلگرد عرضی به مساحت کل	$\rho_{sh,eff}$	
شاخص متغیر پیوستگی لغزشی	$a_{sl}$	
چرخش خمیری بعد از تسلیم	$\theta_p$	$rad$
چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال تا نقطه‌ی صفر مقاومت	$\theta_{pc}$	$rad$
ظرفیت استهلاک انرژی نرمالایز شده	$\lambda$	

## ۲. مروری بر روش‌های یادگیری ماشین

در نوشتار حاضر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و اثر کلی مدل‌های یادگیری که در پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال اعضاء بتنی به کار می‌روند، بررسی شده‌اند. در مدل‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین از نرم‌افزار ۳/۸ Python استفاده شده است. در یادگیری ماشین، داده‌ها به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شوند، که بخش راستی آمایی مدل‌های یادگیری ماشین توسط داده‌های آزمایشی انجام می‌شود. در واقع، داده‌های آزمایشی به عنوان معیاری برای مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی هستند. ۹۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۱۰٪ برای آزمایش به صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. سپس روش‌های یادگیری ماشین با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و توسط معیارهای ارزیابی میزان دقت و صحبت نتایج بیان شده‌اند، که در ادامه، به طور خلاصه معرفی شده‌اند:

### ۲.۱. شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌ی عصبی، مجموعه‌یی از نورون‌های است که با قرار گرفتن در لایه‌های مختلف، عبارت از مبنای ارتباطات بین نورون‌ها در لایه‌های مختلف تشکیل می‌دهند. نورون می‌تواند یک تابع ریاضی غیرخطی باشد؛ در نتیجه، یک شبکه‌ی عصبی که از اجتماع نورون‌های مذکور تشکیل می‌شود، نیز می‌تواند یک سامانه‌ی کاملاً پیچیده و غیرخطی باشد. شبکه‌ی عصبی هر نورون مستقل‌اً عمل می‌کند و رفتار کلی شبکه، برآیند رفتار نورون‌های متعدد است. به عبارت دیگر، نورون‌ها در یک روند همکاری، یکدیگر را تصحیح می‌کنند. شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، برگرفته از شبکه‌ی عصبی انسان است. در مبحث شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌های ریاضی و نرم‌افزاری متعددی با الهام گرفتن از مغز انسان پیشنهاد شده‌اند، که برای حل گستره‌ی وسیعی از مسائل علمی، مهندسی و کاربردی در حوزه‌های مختلف کاربرد دارند.

شبکه‌های عصبی، لایه‌های مختلفی دارند. شبکه‌های عصبی، اطلاعات را دریافت می‌کنند و در لایه‌های مخفی به تحلیل آنها می‌پردازند، که شامل: تصاویر، نوشته‌ها، صداها و غیره هستند و باید به برداها و اطلاعات قابل درک برای ماشین تبدیل شوند. اطلاعات مذکور با تنظیم پارامترهای مختلف شبکه و ویژگی‌های موجود طبقه‌بندی می‌شوند و در نهایت یک خروجی را ایجاد می‌کنند. پارامترهای شبکه‌های عصبی، شامل: وزن‌ها، تابع فعال سازی، لایه‌های ورودی، لایه‌ی پنهان و لایه‌ی خروجی هستند. لایه‌های شبکه‌های عصبی تا جایی تغییر می‌کنند که الگوریتم مذکور قادر به ارائه‌ی جواب تصادفی نیاشد.<sup>[۱۹]</sup>

### ۲.۲. جنگل تصادفی (RF)

الگوریتم جنگل تصادفی (RF)، یک الگوریتم محبوب یادگیری ماشین از زیرمجموعه‌ی هوش مصنوعی است، که به روش یادگیری نظارت شده تعقیق دارد و می‌تواند برای

در مطالعه‌ی حاضر، داده‌های مربوط به زوال مربوط به ستون‌های بتن مسلح و همچنین روابط تجربی به دست آمده، توسط هسلتون<sup>[۱۶]</sup> و همکاران<sup>[۱۷]</sup> استفاده شده است. معادله‌ی ۱، چرخش خمیری بعد از تسلیم<sub>p</sub>، معادله‌ی ۲، چرخش خمیری بعد از تسلیم ساده شده<sub>p</sub>، معادله‌ی ۳، چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال تا نقطه‌ی صفر مقاومت<sub>pc</sub> و معادله‌ی ۴، ظرفیت استهلاک انرژی نرمالایز شده<sub>λ</sub> هستند.<sup>[۱۸]</sup> در مجموعه‌ی داده‌ها، ۱۴ ویژگی به عنوان ورودی الگوریتم هستند، که شامل:  $b$  عرض ستون،  $h$  عمق ستون،  $\frac{L_s}{H}$  نسبت ابعادی ستون،  $v$  نسبت نیروی محوری بالاتر شده به نیروی محوری،  $\rho$  نسبت مساحت میلگرد طولی،  $d_b$  قطر میلگرد طولی،  $s$  فاصله‌ی میلگردهای عرضی،  $s_n$  ضریب کمانش میلگرد،  $\rho_{sh}$  نسبت مساحت مؤثر میلگردهای عرضی به مساحت کل و  $a_{sl}$  شاخص متغیر پیوستگی لغزشی (اگر لغزش وجود داشته باشد، مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت، برابر ۰ خواهد بود) هستند. همچنین سه خروجی، شامل: چرخش خمیری بعد از تسلیم<sub>p</sub>: چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال تا نقطه‌ی صفر مقاومت<sub>pc</sub> و ظرفیت استهلاک انرژی نرمالایز شده<sub>λ</sub> هستند، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. ستون‌ها نیز بعد از آن‌های دیگر سه نوع شکست: خمشی، برشی، خمشی - برشی می‌شوند، که شکست خمشی با عدد ۱، شکست برشی با عدد ۲ و شکست خمشی - برشی با عدد ۳ و نمونه‌های گزارش نشده با (not reported) nr: تابع توزیع داده‌ها به صورت گاوسی در نظر گرفته شده است.

## ۲.۱. روابط تحلیلی موجود

$$\theta_p = 0,12(1 + 0,55a_{sl})(0,16)^v(0,02 + 40\rho_{sh})^{0,23} \quad (1)$$

$$(0,57)^{0,14}c_{units}f'_c(0,66)^{0,15n}(2,27)^{0,10p} \quad (1)$$

ب) ضریب تعیین ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (Y_{test}^i - Y_{testi})^2}{\sum_{i=1}^{N_t} (Y_{test}^i - \bar{Y}_{test})^2} \quad (6)$$

ج) خطای مطلق میانگین (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |Y_{test}^i - Y_{testi}| \quad (7)$$

پارامترهای اخیر، برای داده‌های آموزشی و آزمایشی برای ۳ الگوریتم محاسبه شده‌اند، که در جدول‌های ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند. در معادله‌های ۵ تا ۷

جدول ۲. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در  $\theta_p$ .

MAE	RMSE	$R^2$	روش‌ها	مجموعه‌ها
۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۹۸	۰/۵۷	آدابوست	
۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۲۸	۰/۶۶	نتایج آزمایشی شبکه‌ی عصبی مصنوعی	
۰/۰۰۰۸	۰/۱۲۶	۰/۶۷	جنگل تصادفی	
۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۶۶	آدابوست	
۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۴۳	۰/۷۷	نتایج آموزشی شبکه‌ی عصبی مصنوعی	
۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۹۸	۰/۹۱	جنگل تصادفی	

جدول ۳. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در  $\theta_p$ .

MAE	RMSE	$R^2$	روش‌ها	مجموعه‌ها
۰/۰۸۳	۰/۰۸۹	۰/۳۲	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	
۰/۰۳۲	۰/۰۴۱	۰/۴	آدابوست	نتایج آزمایشی
۰/۰۴۴	۰/۰۴۲	۰/۴۰۴	جنگل تصادفی	
۰/۰۹	۰/۱۲۶	۰/۴۲	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	نتایج آموزشی
۰/۰۶۷	۰/۰۸۹	۰/۷۲	آدابوست	
۰/۰۵	۰/۰۷۲	۰/۸۱	جنگل تصادفی	

جدول ۴. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در  $\lambda$ .

MAE	RMSE	$R^2$	روش‌ها	مجموعه‌ها
۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۵۲	آدابوست	
۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۷۴	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	نتایج آزمایشی
۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۸۵	جنگل تصادفی	
۰/۰۸۶	۰/۰۸۹	۰/۶۶	آدابوست	
۰/۰۷	۰/۰۹۳	۰/۷۵	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	نتایج آموزشی
۰/۰۳۹	۰/۰۵۷	۰/۸۸	جنگل تصادفی	

### ۳.۲ آدابوست

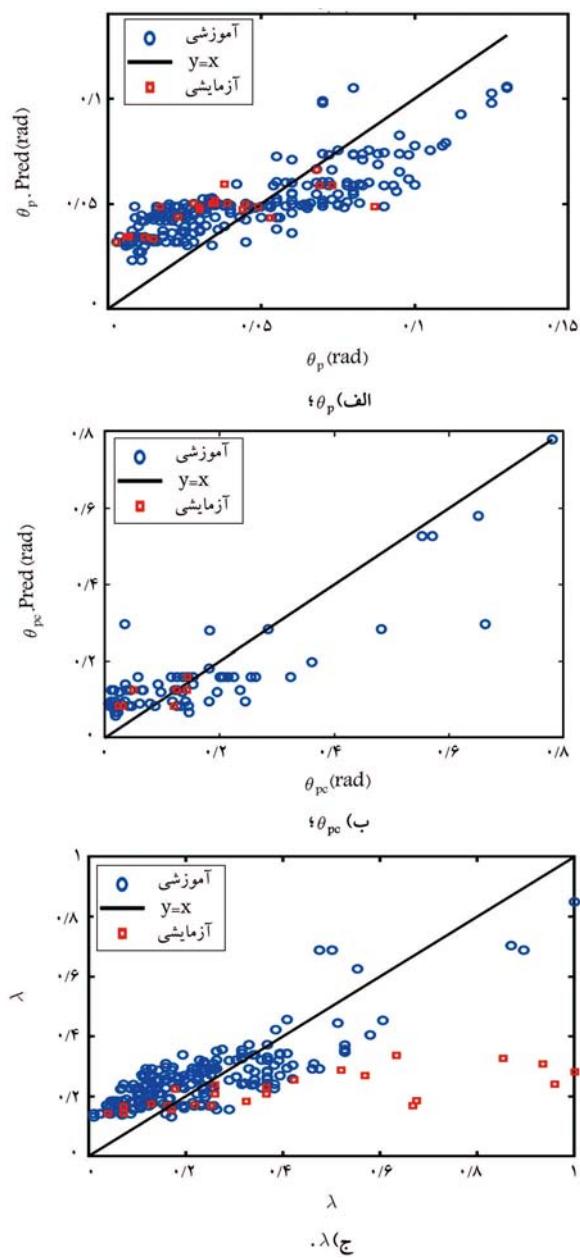
آدابوست (AdaBoost) مخفف برجسب‌زنی تطبیقی<sup>[۱۷]</sup>، یک الگوریتم طبقه‌بندی آماری و یادگیری ماشین است. آدابوست، روش یادگیری ترکیبی و شناخته شده‌ترین روش از خانواده‌ی برجسب‌زنی است. در الگوریتم آدابوست، مدل‌ها به طور پی در پی یادگرفته می‌شوند، به طوری که در هر نوبت، یک مدل آموزش داده می‌شود. در پایان هر نوبت، نمونه‌هایی که اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند، شناسایی می‌شوند و تأکید روی آنها در یک مجموعه‌ی آموزشی جدید، افزایش می‌یابد. پس مجموعه‌ی آموزشی ذکر شده‌ی جدید، برای نوبت بعدی آموزش استفاده و یک مدل جدید آموزش داده می‌شود. ایده این است که مدل‌های جدید باید قادر به جبران خطاهای ایجاد شده توسط مدل‌های قبلی باشند. در واقع، آدابوست یک متألک الگوریتم است، که به منظور ارتقاء عملکرد و رفع مشکل رده‌های نامتوازن همراه دیگر الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. الگوریتم آدابوست نسبت به داده‌های نویز و پرت حساس است، ولی نسبت به مشکل پیش‌پردازش، از بیشتر الگوریتم‌های یادگیری برتری دارد.<sup>[۲۱]</sup>

### ۳. عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین

برای تعیین بهترین عملکرد در میان سه الگوریتم استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر از داده‌ی آزمایشگاهی به دست آمده برای مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح استفاده شده است. داده‌ها به صورت تصادفی به ۹۰٪ برای آموزش و ۱۰٪ برای آزمایش تقسیم‌بندی شده‌اند. تقسیم‌بندی براساس روش Kennard-Stone Algorithm بوده است. سه الگوریتم: شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF) و آدابوست برای پیش‌بینی استفاده و عملکرد آنها ارزیابی شده‌اند. سه پارامتر ارزیابی، عملکرد شامل این موارد هستند:

الف) ریشه‌ی میانگین مربع خط (RMSE)<sup>[۱۸]</sup>

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (Y_{test}^i - Y_{testi})^2} \quad (5)$$



شکل ۲. الگوریتم آدابوست.

جدول ۸. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی بر حسب مدل تحلیلی برای  $\theta_p$ .

روش‌ها	$R^2$	RMSE	MAE
جنگل تصادفی	۰/۰۹۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۷۲
معادله‌ی ۱	۰/۱۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲
معادله‌ی ۲	۰/۱۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۱
بهبود نسبت به معادله‌ی ۱ (%)	۷۹	۶۳/۷	۶۴
بهبود نسبت به معادله‌ی ۲ (%)	۸۰/۲	۶۳/۷	۶۵/۷

تحلیلی مشاهده می‌شوند. مدل جنگل تصادفی در مقایسه با دیگر مدل‌های تحلیلی، پارامترهای  $R^2$ ،  $MAE$  و  $RMSE$  را به میزان قابل ملاحظه‌ی بهبود بخشیده است. در ضمن، خلاصه‌ی نتایج در جدول‌های ۸ الی ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۵. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها و روابط تحلیلی برای  $\theta_p$ .

مجموعه‌های روش‌ها	$R^2$	RMSE	MAE
آدابوست	۰/۶۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۷
شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۷۷	۰/۰۱۴۳	۰/۰۰۹۴
جنگل تصادفی	۰/۹۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۷۲
معادله‌ی ۱	۰/۱۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲
معادله‌ی ۲	۰/۱۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۱

جدول ۶. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها و روابط تحلیلی برای  $\theta_{pc}$ .

مجموعه‌های روش‌ها	$R^2$	RMSE	MAE
آدابوست	۰/۴۲	۰/۱۲۶	۰/۰۹
آدابوست	۰/۷۲	۰/۰۸۹	۰/۰۶۷
جنگل تصادفی	۰/۸۱	۰/۰۷۲	۰/۰۵
معادله‌ی ۳	۰/۲	۰/۱۴	۰/۰۹۶

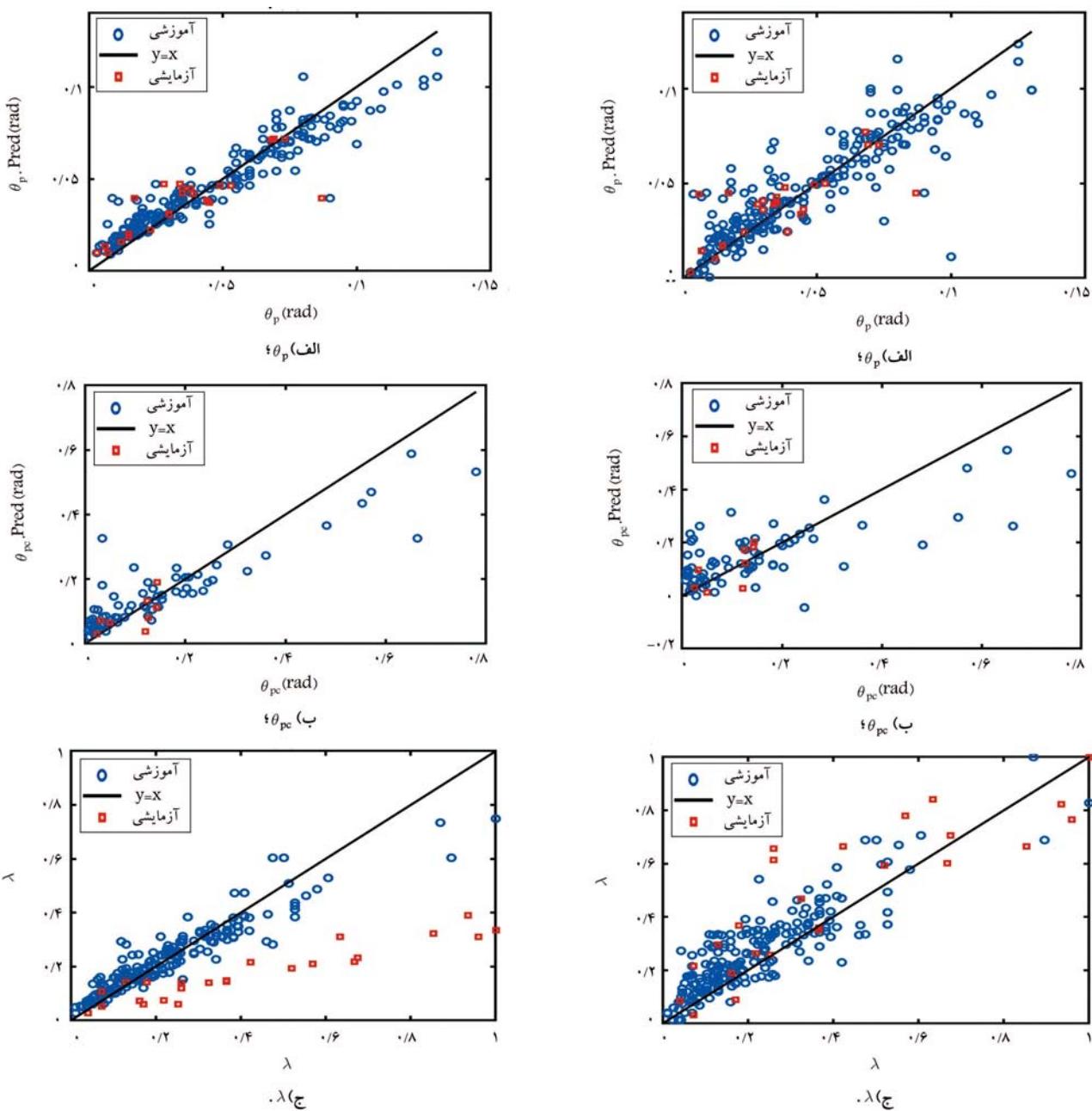
جدول ۷. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها و روابط تحلیلی برای  $\lambda$ .

مجموعه‌های روش‌ها	$R^2$	RMSE	MAE
آدابوست	۰/۶۶	۰/۰۹۸	۰/۰۸۶
شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۷۵	۰/۰۹۳	۰/۰۷
جنگل تصادفی	۰/۸۸	۰/۰۵۷	۰/۰۳۹
معادله‌ی ۴	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۳۷

مقادیر واقعی برای  $\lambda$  امین مشاهده در داده‌های آزمایشی  $Y_{test,i}^{\lambda}$  مقادیر پیش‌بینی شده در  $\lambda$  امین مشاهده در داده‌های آزمایشی هستند، که توسط الگوریتم یادگیری ماشین به دست آمده‌اند.  $N_t$  تعداد داده‌های نهایی در مجموعه‌ی آزمایشی  $Y_{test}$  مقدار متوسط داده در مجموعه‌ی آزمایشی هستند. جدول‌های ۲ الی ۴ به طور واضح نشان می‌دهند که الگوریتم جنگل تصادفی (RF)، عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است. در شکل‌های ۲ الی ۴، پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال برای ۳ الگوریتم ذکر شده مشاهده می‌شود.

#### ۴. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین با معادله‌های تجربی مؤلفه‌های زوال

در بخش حاضر، عملکرد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده در مقایسه با مدل‌های تحلیلی در جدول‌های ۵ الی ۷ خلاصه شده است. مدل جنگل تصادفی (RF)، نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته و پیش‌بینی‌ها برای مؤلفه‌های زوال بر اساس ۱۴ پارامتر اشاره شده انجام شده است. نتایج به دست آمده برای ارزیابی الگوریتم ها نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی با  $RMSE = ۰/۰۰۹۸$ ،  $R^2 = ۰/۹۱$  و  $MAE = ۰/۰۷۲$  برای  $\theta_p$  با  $RMSE = ۰/۷۲$ ،  $R^2 = ۰/۸۱$  و  $MAE = ۰/۰۷۲$  برای  $\theta_{pc}$  و همچنین  $RMSE = ۰/۰۵۷$ ،  $R^2 = ۰/۸۸$  و  $MAE = ۰/۰۳۹$  برای  $\lambda$  نسبت به دیگر مدل‌های تحلیلی ذکر شده، به طور قابل ملاحظه‌ی، عملکرد بهتری داشته است. تقریباً همه‌ی مدل‌های پیش‌بینی شده در محدوده‌ی  $y=x$  قرار گرفته‌اند. در شکل ۵، نمودارهای مربوط به مدل‌های



شکل ۴. الگوریتم جنگل تصادفی.

شکل ۳. الگوریتم شبکه‌ی عصبی مصنوعی.

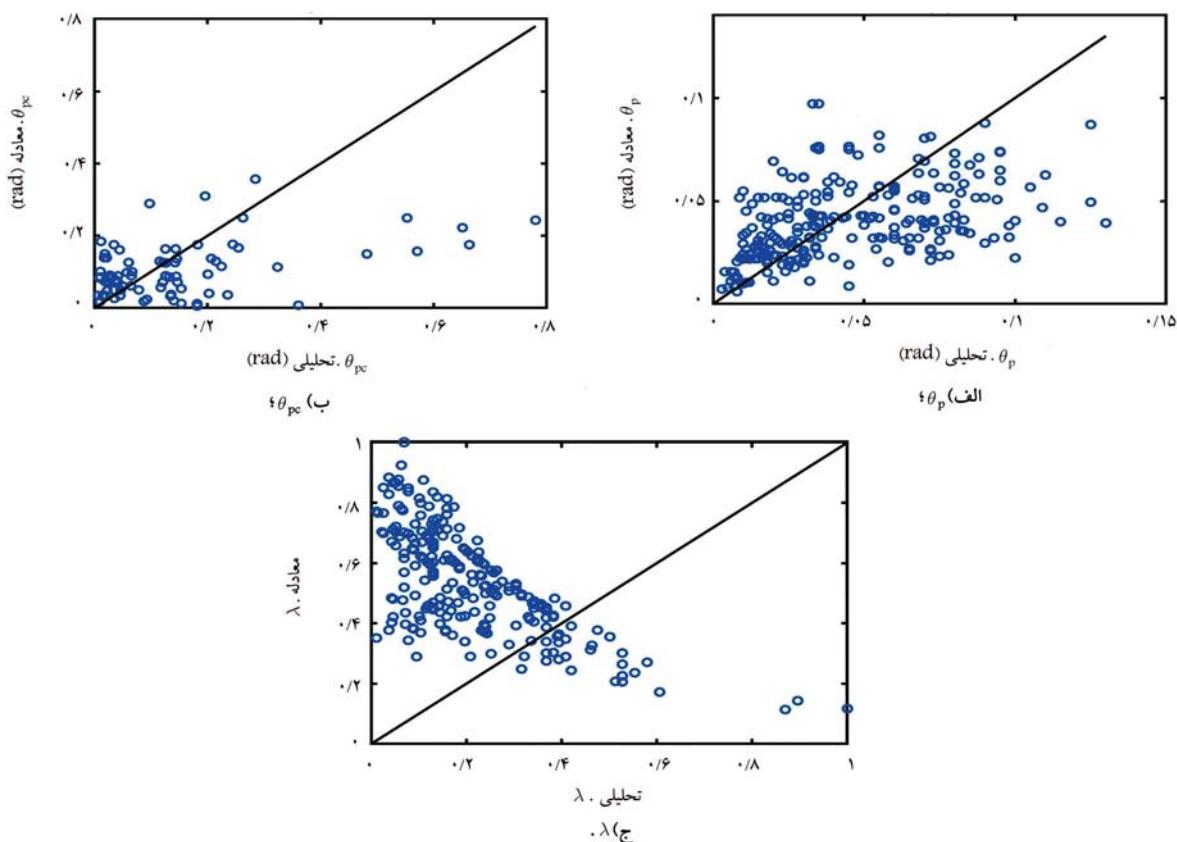
رویکرد تحلیلی، برای ایجاد مدل‌هایی به منظور تخمین مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح براساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. روابط مذکور براساس تعداد محدودی از پارامترها، به پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال می‌پردازند. این مدل‌ها اغلب دقت پیش‌بینی محدود را نشان می‌دهند. بنابراین، استفاده از چنین مدل‌هایی برای شبیه‌سازی رفتار ستون‌های بتن مسلح کافی نیست. برای افزایش دادن دقت، مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند با پارامترهای بیشتری، پیش‌بینی‌های لازم را انجام دهند. نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی و مدل‌های یادگیری ماشین با هم مقایسه و بهبود عملکرد آنها نسبت به مدل‌های تحلیلی بررسی شده است. در مطالعه‌ی

 جدول ۹. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی برحسب مدل تحلیلی برای  $\theta_{pc}$ .

روش‌ها	MAE	RMSE	$R^2$
جنگل تصادفی	۰/۰۵	۰/۰۷۲	۰/۸۱
معادله‌ی ۳	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۴	۰/۲
بهبود نسبت به معادله‌ی ۳ (%)	۹۲	۴۸/۵	۷۵/۳

 جدول ۱۰. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی برحسب مدل تحلیلی برای  $\lambda$ .

روش‌ها	MAE	RMSE	$R^2$
جنگل تصادفی	۰/۰۳۹	۰/۰۵۷	۰/۸۸
معادله‌ی ۴	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۴۷
بهبود نسبت به معادله‌ی ۴ (%)	۸۹/۴	۸۶/۷	۴۶/۵



شکل ۵. پیش‌بینی انجام شده توسط روابط تحلیلی.

بر اساس داده‌های آموزشی، برای  $\theta_p$  برابر  $0_{pc}$  برابر  $81\%$ ، برای  $\theta_p$  برابر  $88\%$  بوده و لذا، بهترین پیش‌بینی را داشته است. همچنین روش RF برای داده‌های آزمایشی دارای دقت:  $67\%$  برای  $\theta_p$ ،  $40\%$  برای  $\theta_{pc}$  و  $52\%$  برای  $\lambda$  بوده است. میزان پیش‌بینی که مدل جنگل تصادفی نسبت به روابط تحلیلی داشته است، در  $R^2$  برابر  $0.46/5$ ، در  $MAE$  برابر  $0.86/7$  و در  $RMSE$  برابر  $0.89/4$  بوده است.

حاضر، از ۲۵۵ داده‌ی آزمایشگاهی استفاده شده است، که به صورت تصادفی به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم‌بندی شده‌اند ( $90\%$  داده‌ها آموزشی و  $10\%$  آزمایشی بوده‌اند). از سه مدل یادگیری ماشین و جهت بررسی عملکرد از سه معیار ارزیابی در نوشتار حاضر استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل جنگل تصادفی نسبت به دو مدل دیگر دقت بالاتری داشته است. دقت مدل RF

## پابندی

15. Back-Bone
16. Haselton
17. Adaptive Boosting
18. Root Mean Square Error
19. Coefficient of Determination
20. Mean Absolute Error

## منابع (References)

1. Bui
2. Artificial Neural Network
3. Getahun
4. Onyari & Ikotun
5. D'Amico
6. Huang, H. and Burton
7. Mangalathu & Jeon
8. Siam
9. Jeon
10. Charalampakis
11. Santos
12. Random Forest
13. Shapley Additive Explanations
14. AdaBoost

1. Bui, D.K., Nguyen, T., Chou, J.-Sh. and et al. "A modified firefly algorithm-artificial neural network expert system for predicting compressive and tensile strength of high-performance concrete", *Construction and Building Materials*, **180**, pp. 320-333 (2018).

2. Getahun, M.A., Shitote, S.M. and Gariy, Z.C.A. "Artificial neural network based modelling approach for strength prediction of concrete incorporating agricultural and construction wastes", *Construction and Building Materials*, **190**, pp. 517-525 (2018).
3. Naderpour, H., Rafiean, A.H. and Fakharian, P. "Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks", *Journal of Building Engineering*, **16**, pp. 213-219 (2018).
4. Onyari, E. and Ikotun, B. "Prediction of compressive and flexural strengths of a modified zeolite additive mortar using artificial neural network", *Construction and Building Materials*, **187**, pp. 1232-1241 (2018).
5. Ardakani, A.R. and Kohestani, V.R. "Prediction of lateral bearing capacity of piles of in clay soils using support vector machine", *Journal of Civil Engineering and Envivoment*, **47**(2), pp. 1-10, (In Persian) (1395/2017).
6. D'Amico, B., Myers, R.J., Voss, E. and et al. "Machine learning for sustainable structures: A call for data", *Structures*, **19**, pp. 1-4 (2019).
7. Huang, H. and Burton, H.V. "Classification of in-plane failure modes for reinforced concrete frames with infills using machine learning", *Journal of Building Engineering*, **25**, p. 100767 (2019).
8. Mangalathu, S. and Jeon, J.-S. "Classification of failure mode and prediction of shear strength for reinforced concrete beam-column joints using machine learning techniques", *Engineering Structures*, **160**, pp. 85-94 (2018).
9. Siam, A., Ezzeldin, M. and El-Dakhakhni, W. "Machine learning algorithms for structural performance classifications and predictions: Application to reinforced masonry shear walls", *Structures*, **22**, pp. 252-265 (2019).
10. Kiani, J., Camp, C. and Pezeshk, S. "On the application of machine learning techniques to derive seismic fragility curves", *Computers & Structures*, **218**, pp. 108-122 (2019).
11. Jeon, J.S., Shafieezadeh, A. and DesRoches, R. "Statistical models for shear strength of RC beam-column joints using machine-learning techniques", *Earthquake Eengineering & Structural Dynamics*, **43**(14), pp. 2075-2095 (2014).
12. Rafiei, M.H. and Adeli, H. "A novel machine learning-based algorithm to detect damage in high-rise building structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **26**(18), p. e1400 (2017).
13. Flah, M., Nunez, I., Chaabene, W.B. and et al. "Machine learning algorithms in civil structural health monitoring: a systematic review", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **28**(4), pp. 2621-2643 (2021).
14. Charalampakis, A.E., Tsiatas, G.C. and Kotsiantis, S.B. "Machine learning and nonlinear models for the estimation of fundamental period of vibration of masonry infilled RC frame structures", *Engineering Structures*, **216**, p. 110765 (2020).
15. Mangalathu, S., Jang, H., Hwang, S.-H. and et al. "Data-driven machine-learning-based seismic failure mode identification of reinforced concrete shear walls Engineering", *Structures*, **208**, p. 110331 (2020).
16. Santos, A., Figueiredo, E., Silva, M. and et al. "Genetic-based EM algorithm to improve the robustness of gaussian mixture models for damage detection in bridges structural", *Control and Health Monitoring*, **24**(3), p. e1886 (2017).
17. Mangalathu, S., Hwang, S.H. and Jeon, J.S. "Failure mode and effects analysis of RC members based on machine-learning-based shapley additive explanations (SHAP) approach", *Engineering Structures*, **219**, p. 110927 (2020).
18. Haselton, C.B., Liel, A.B., Lange, S.T. and et al. "Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings", *PEER Report 2007/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering, University of California, Berkeley*, pp. 86-99 (2008).
19. Mhatre, M.S., Siddiqui, F., Dongre, M. and et al. "A review paper on artificial neural network: a prediction technique", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **6**(12), pp. 161-163 (2015).
20. Breiman, L. "Bagging predictors", *Machine learning*, **24**(2), pp. 123-140 (1996).
21. Freund, Y. and Schapire, R.E. "Experiments with a new boosting algorithm", *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference* (1996).

# بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌یی ANP

سیما صمدیان‌فرد (دانشجوی دکتری)

و هب توفیق\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهمنگی ۲ عمده شریف (پیاپی ۱۴۰۲) دری ۲، شماره ۱، ص ۱۳۷-۱۴۱ (پژوهشی)

روند فناوری‌های مصرف انرژی در صنعت ساخت‌وساز، مهندسان و طراحان سازه را به سمت بررسی روش‌هایی سوق داده است که در طی چرخه‌ی ساخت تا تخریب، میزان انرژی کمتری را مصرف می‌کنند. تقویت ویژگی‌های رسانش حرارتی المان‌های سازه‌یی و غیرسازه‌یی در کنار ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی علاوه بر گسترش زمینه‌های کاربردی مصالح مذکور، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی میزان انرژی مصرفی و کاهش پیامدهای مخرب زیست محیطی می‌شود، که هم‌سو با اهداف توسعه‌ی پایدار نیز است. در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء‌یافته‌ی تحلیل شبکه‌یی (ANP) به منظور انتخاب پانل سازه‌یی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌یی، به عبارت بهتر، سازه‌ی بهینه از نظر انرژی، استفاده شده است. معیارهای انتخاب سازه‌ی بهینه در مطالعه‌ی حاضر، ضریب رسانش حرارتی پانل‌ها، مدت زمان تأخیر حرارتی، وزن سازه و هزینه ساخت هستند. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور با مدل سازی یک سوله‌ی سه دهانه‌ی در نرم افزار SAP ۲۰۰۰V۱۹/۲ پارامترهای ANP، انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی می‌سرشد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که سوله‌ی با فولاد ST۳۷ و استفاده از پانل با ضخامت ورق عالیق ۴ سانتی‌متری، رفتاری بهینه از منظر معیارهای مفروض خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** سوله، پانل‌های ساختمانی، کاهش مصرف انرژی، پارامترهای رسانش حرارتی، بهینه‌سازی.

## ۱. مقدمه

استفاده از فولاد ST۵۲، تا ۳۰٪ میزان رسانش حرارتی را کاهش می‌دهد.<sup>[۱]</sup> به همین علت، بررسی تأثیر استفاده از پانل‌های عالیق حرارتی به همراه فولادهای با آلیاژهای با درصد کربن‌های مختلف در میزان انتقال انرژی حرارتی ضروری به نظر می‌رسد.

معیارهای مختلفی باید به منظور انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر مصرف انرژی در نظر گرفته شود. چنین سازه‌یی باید در کنار تأمین پارامترهای مقاومتی و حرارتی، از نظر هزینه نیز در وضعيت مطلوبی باشد.<sup>[۲]</sup> بنابراین انتخاب چنین سیستمی نیازمند روش‌های انتخاب چندمعیاره است. یکی از روش‌های مذکور، روش تحلیل شبکه‌یی (ANP)<sup>[۳]</sup> است.<sup>[۴]</sup> روش ANP با ایجاد شبکه‌یی از المان‌های انتخابی و شناسایی روابط بین آن‌ها، حالت‌های مختلف را در نظر می‌گیرد. از روش ANP در مطالعات بسیاری استفاده شده است. آتماکا و باسر<sup>[۵]</sup> (۲۰۱۲)،<sup>[۶]</sup> نجوهی توزیع انرژی از نیروگاه‌ها را بررسی کردند. همچنین یوهان و همکاران<sup>[۷]</sup> (۲۰۱۵)،<sup>[۸]</sup> با استفاده از روش ANP، یک روش سودمند بهسازی در چین، و میلانی و همکاران<sup>[۹]</sup> (۲۰۱۳)،<sup>[۱۰]</sup> نیز با استفاده از روش اخیر، مصالح مناسبی برای یک فضای انتخاب کردند.

برخ فناوری‌های نیاز به کاهش مصرف انرژی و بهبود سطح عملکرد زیرساخت‌های موجود، روش‌های نوین ساخت و ساز و تعبیه‌ی سیستم‌های جدید عالیق حرارتی برای سازه‌های صنعتی را موردن توجه پژوهشگران سازه قرار داده است.<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۳، ۴۵٪ از میزان کل انرژی مصرفی در ایران به بخش ساخت و ساز ارتباط داده شده است که ۴ الی ۵ برابر انرژی مصرفی کشورهای اروپایی است.<sup>[۱۲]</sup> به همین دلیل، باید این میزان انرژی مصرفی که به عنوان عامل اصلی تغییر اقلیم شناخته شده است، کنترل و روش‌های کاهش آن ارائه شوند.<sup>[۱۳]</sup>

بخش اعظمی از اثلاف انرژی سازه‌های صنعتی از سطوح غیرسازه‌ی آن صورت می‌پذیرد. با این حال، ۲۵٪ از این میزان اثلاف انرژی حرارتی به اجزاء سازه‌ی آن مرتبط می‌شود. درصد کربن موجود در آلیاژهای مختلف فولاد موجب تفاوت در میزان رسانش حرارتی فولادها می‌شود. نتایج مطالعات گوناگون نشان می‌دهند که

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۲، ۱۴۰۱/۴/۱، اصلاحیه ۱۶، ۱۴۰۱/۷/۱، پذیرش ۱۶/۸/۱، ۱۴۰۱/۱/۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60619.3120

استناد به این مقاله:

صمدیان فرد، سیما و توفیق، وهب (۱۴۰۲). «بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌یی ANP»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۲، ص ۲۷-۲۳.

علی‌الخصوص ضریب هدایت حرارتی بستگی دارد. پارامتر ضریب هدایت حرارتی نیز به ویژگی‌های مکانیک حرارتی مصالح مربوط است که در رسانش حرارتی، توزیع پروفیل دمایی در راستای ضخامت مواد و عایق‌های پوشاننده جداره ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد. برقراری جریان حرارتی در داخل نمونه برای بدست آوردن رژیم همگن دائمی، ضروری است. هنگامی که جریان حرارتی برقرار شود، ضریب هدایت حرارتی با استفاده از قانون فوریه (رابطه‌ی ۲)، محاسبه می‌شود:

$$q = k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

که در آن،  $q$  نیخ جریان حرارتی ( $W$ )،  $dx$  اختلاف دمایی بین دو سمت نمونه ( ${}^{\circ}C$ )،  $dx$  ضخامت نمونه ( $m$ ) و  $k$  ضریب هدایت حرارتی ( $W \cdot {}^{\circ}C^{-1} \cdot m^{-1}$ ) هستند. روش‌های اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به دوگره اصلی روش‌های پایا و گذرا تقسیم می‌شوند و عوامل قابل ملاحظه‌ی در تعیین آن‌ها تأثیر می‌گذارند، که عبارتند از: اندازه‌ی نمونه‌ها، مدت زمان انجام آزمایش و ابزارهای اندازه‌گیری. در روش ذکر شده، سیمی از آلیاژ پلاتین حرارت دیده در راستای مرکز یک نمونه‌ی استوانه‌یی شکل همگن فرار می‌گیرد به صورت تابع توانی با زمان گرم می‌شود. شرایط مزدی در آزمایش اخیر شامل دو صفحه‌ی سرد و گرم است و با تکیه بر این فرضیات انجام می‌شود:

۱. صفحات دمایی در تماس کامل با نمونه قرار دارند.
۲. جریان حرارتی تک‌محوره در راستای خط مرکزی نمونه برقرار است.

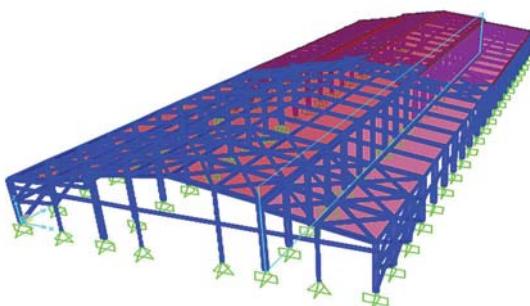
نیخ افزایش دمایی سیم به قابلیت رسانش ماده بستگی دارد. در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای محاسبه‌ی رسانش حرارتی مواد پیشنهاد شده است. مشکل اصلی روش‌های پایا، مدت زمان طولانی است که برای آزمایش صرف می‌شود. در صورت استفاده از محیط‌های بسته، هوای محبوس موجب افزایش فشار داخلی محفظه می‌شود. با توجه به اینکه پارامترهای فشار و دما ارتباط مستقیمی با هم دارند، اندرکش این دو سرعت، تغییرات دمایی را افزایش می‌دهد و دما در دو طرف نمونه در مدت زمان کمتری ثابت می‌شود.

### ۳. روش پژوهش

#### ۱.۳. مدل‌سازی سوله

به منظور مطالعه‌ی پارامترهای وزن و هزینه، سوله‌ی نشان داده شده در شکل ۲، در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ مدل شده است.

سازه‌ی صنعتی مورد مطالعه، یک سوله با دو نیم‌سوله‌ی مجاور بوده است (شکل ۳) که هر یک از آن‌ها، دارای جرثقیل بوده است؛ به طوری که ظرفیت جرثقیل



شکل ۲. نمای سه‌بعدی سوله.

در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء‌یافته‌ی تحلیل شبکه‌یی به منظور انتخاب پانل سازه‌یی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌یی - به عبارت بهتر، سازه‌یی بهینه از نظر انرژی - استفاده شده است. المان‌های منتخب برای انتخاب سازه‌یی بهینه در مطالعه‌ی حاضر، ضریب رسانش حرارتی پانل‌ها، مدت زمان تأخیر حرارتی، وزن سازه، و هزینه بوده‌اند. درنهایت، با استفاده از روش ANP، نیز انتخاب سازه‌یی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی می‌سرد شده است. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور سوله‌ی سه‌بعدی در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ V19/۲ مدل شده است.

## ۲. تئوری و فرضیات خصوصیات رفتاری مصالح

### ۲.۱. مدت زمان تأخیر و ضریب کاهشی

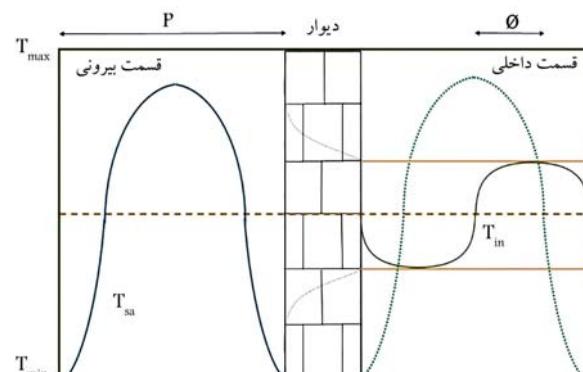
پروفیل دمایی در راستای ضخامت دیوار استگی به تغییرات دمایی دو طرف دیوار دارد. هنگامی که یک سمت دیوار در معرض تابش منبع انرژی مانند خورشید است، در راستای مقطع دیوار، افزایش دمای تدریجی رخ می‌دهد و نسبتی از مقدار تغییر یافته‌ی آن به سمت داخلی نمونه می‌رسد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا پیده‌ی مذکور رخ دهد را مدت زمان تأخیر و نسبت بزرگی این دو مقدار را ضریب کاهشی می‌نامند. ویژگی‌های مکانیک حرارتی مصالح ساختمانی در مقدار پارامترهای اشاره شده، تأثیر می‌گذارند. در طول این حالت گذرا، توزیع پروفیل دمایی به صورت سینوسی تغییر می‌کند. متغیرهای مدت زمان تأخیر به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شوند:

$$LT = T_{\max,out} - T_{\max,in} \quad (1)$$

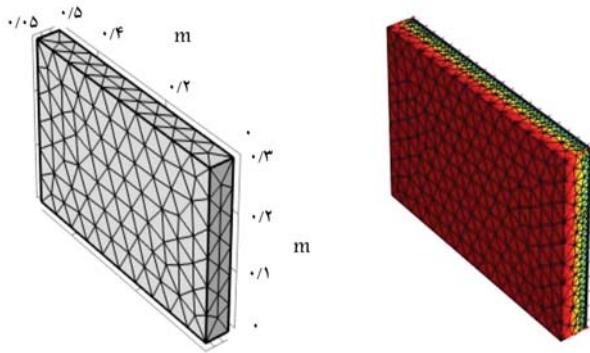
که در آن،  $T_{\max,out}$  بیشینه‌ی دما و  $T_{\min,out}$  کمینه‌ی دما می‌باشد که سطح خارجی دیوار که در تماس با محیط بیرون است، تجربه می‌کند. به طور مشابه،  $T_{\max,in}$  بیشینه‌ی دما و  $T_{\min,in}$  کمینه‌ی دما می‌باشد که سطح داخلی دیوار تجربه می‌کند. در شکل ۱، نمای شماتیکی از پارامتر مدت زمان تأخیر مشاهده می‌شود. برای یک دوره‌ی تناوب از بارگذاری حرارتی،  $P$  دوره‌ی تناوب،  $T_{Sa}$  پروفیل بارگذاری حرارتی اعمال شده و  $T_{in}$  مقدار تغییرات دمایی است که هوای محیط داخل تجربه می‌کند. در شکل ۱،  $\Phi$  به عنوان مدت زمان تأخیر شناخته می‌شود که همان مدتی است که طول می‌کشد تا هر دو طرف دیوار به بیشترین دمای خود برسد.

### ۲.۲. ضریب رسانش حرارتی

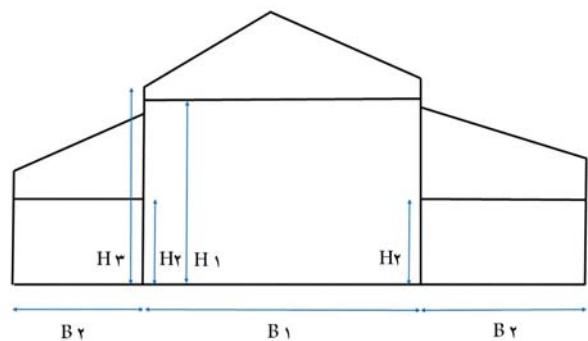
ویژگی‌های نارسانایی حرارتی سازه‌ها به پارامترهای حرارتی مواد سازنده‌ی آن‌ها،



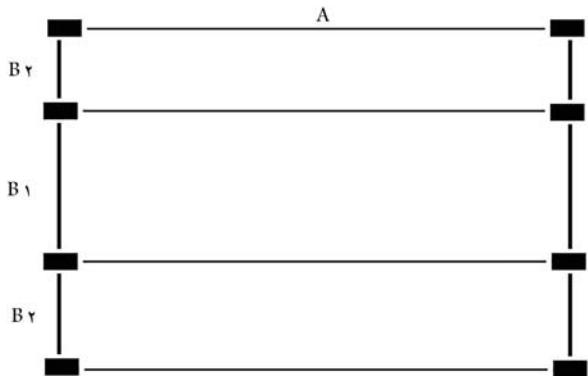
شکل ۱. نمای شماتیک پارامتر مدت زمان تأخیر.



شکل ۵. نمونه بی از پانل مدل سازی شده در نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS.



شکل ۳. نمای جانبی سازه های مطالعه شده.



شکل ۴. پلان سازه.

جدول ۱. ابعاد سازه.

$H_1(m)$	$H_2(m)$	$H_3(m)$	$B_2(m)$	$B_1(m)$	$A(m)$
۱۳	۷	۱۱	۱۳	۲۲	۱۲۵

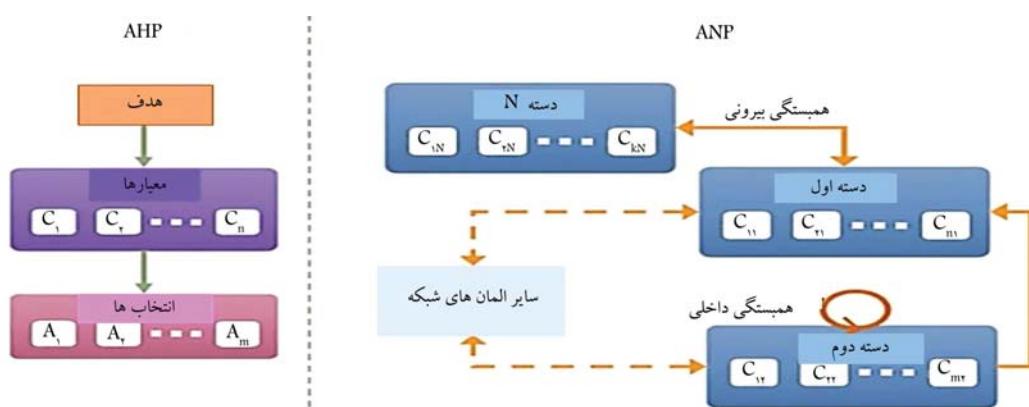
سازه ای اصلی، ۱۰۰ تن و جرقیل سازه های فرعی، ۵۰ تن بوده است. ابعاد سوله در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. ساختمان مذکور با کاربری تجاری - صنعتی، یک طبقه دارد. سازه ای اشاره شده، یک بار با مقاطع ساخته شده از فولاد ST37 و باز دیگر با فولاد ST52 تحلیل و طراحی شده است.

## ۲.۳. تعریف پانل های عایق

در مطالعه های حاضر، ۵ نوع پانل بررسی شده و ضخامت ورق XPS  $3\text{ mm}$  در هر یک از آنها از ۱۵ تا ۵ سانتی متر متغیر بوده است. سه نوع از پانل های مذکور (P3, P2, P1) دارای ورق الومینیوم ۴۰۰۰ بودند. با افزایش ضخامت و داشتن ورق الومینیومی، قیمت پانل تا ۲/۵ برابر پانل ساده افزایش می یابد. در جدول ۲، مشخصات پانل های بررسی شده در مطالعه های حاضر ارائه شده است. ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی پانل های مذکور - مطابق روش ذکر شده در نوشتار توفیق و صمدیان فرد (۲۰۲۰)، با استفاده از نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۵، ابعاد دیوار مدل شده،  $30 \times 50 \times 5\text{ mm}$  سانتی متر بوده و به صورت مثالی با طول ضلع بیشینه هی ۵ سانتی متری، مشتمل شده است. به منظور مدل سازی دیوار از مارپول Heat Transfer استفاده شده است که در آن با استفاده از قانون فوریه برای انتقال حرارت و با در دست داشتن شار حرارتی، ضرایب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر محاسبه شده اند.

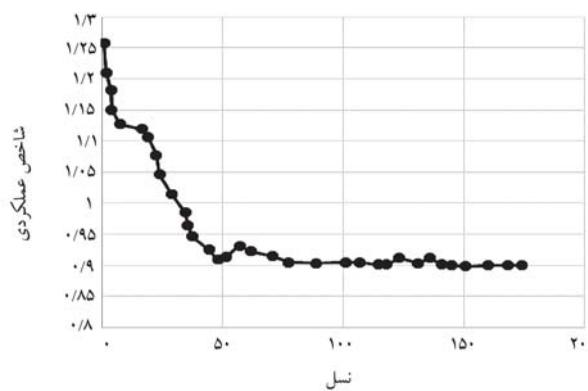
## ۳. تحلیل نتایج

پارامترهای بهینه سازی، شامل: وزن، هزینه، ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی بوده اند. پارامترهای حرارتی مطابق جدول ۳ محاسبه شده اند. نتایج نشان می دهند که با افزایش ضخامت لایه XPS، از مقدار ضریب هدایت حرارتی کاسته شده و مدت زمان تأخیر حرارتی افزایش یافته است. با این حال، عدم وجود ورق الومینیومی، تأثیر قابل توجهی در افزایش مدت زمان تأخیر با افزایش ضخامت در داشته است. از طرف دیگر، با طراحی سازه به روش تحلیل طیفی و با دو نوع فولاد ST37 و ST52، وزن سازه به ترتیب ۳۲۰ و ۲۲۵ تن به دست آمده است. به علاوه، هزینه ساخت سوله نیز کاهش یافته است. قابل ذکر است که تفاوت در هزینه ساخت پانل ها، موجب تفاوت چشمگیری در هزینه کلی ساخت سوله


 شکل ۶. نمای شماتیک شبکه‌های ANP و AHP.<sup>[۶]</sup>

جدول ۲. مشخصات پانل‌ها.

شماره	معرف پانل	ضخامت ورق (cm)	ورق آلومینیوم	هزینه ( واحد)	وزن واحد سطح (g/m²)
۱	P1	۱	دارد	۱/۰	۹۷۰
۲	P2	۲	دارد	۱/۷	۱۱۵۰
۳	P3	۳	دارد	۲/۵	۱۳۴۰
۴	P4	۴	ندارد	۱/۶۵	۱۲۷۰
۵	P5	۵	ندارد	۲/۱	۱۳۲۰



شکل ۸. شاخص عملکردی روش ANP.

## ۵. نتیجه‌گیری

به منظور یافتن سازه‌ی صنعتی بهینه با درنظرگرفتن پارامترهای حرارتی، یک سوله با ابعاد ذکر شده به روش تحلیل طیفی یکبار با فولاد ST37 و بار دیگر با فولاد آنالیز و طراحی شد. در دیوارهای سازه‌ی مذکور، از ۵ نوع پانل استفاده و پارامترهای حرارتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS محاسبه شده است. با درنظرگرفتن ۴ متغیر: وزن، هزینه، مدت زمان تأخیر حرارتی و ضریب هدایت حرارتی، روش بهینه‌سازی ANP بر سازه اعمال و پس از ۱۷۸ نسل، سوله با فولاد ST37 و استفاده از پانل P4 به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. ملاحظه می‌شود در صورتی که طراحی با فولاد ST52 انجام گیرد، با وجود اینکه سازه وزن کمتری خواهد داشت، به دلیل افزایش خارج از محدوده‌ی هزینه‌ها، طرح داده است. در شکل ۸، عملکرد روش ANP و تعداد نسل‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۳. ویژگی‌های حرارتی پانل‌های عایق.

شماره	معرف پانل	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	مدت زمان تاخیر (m)	عبارت
۱	P1	۰/۲۴	۹۴	
۲	P2	۰/۱۸	۱۱۱	
۳	P3	۰/۱۲	۱۲۰	
۴	P4	۰/۱۱	۱۴۸	
۵	P5	۰/۰۹	۱۵۶	

$$\left( \begin{array}{cccc} W_{11} & \dots & W_{1k} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{k1} & \dots & W_{kk} & \dots & W_{kn} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{nk} & \dots & W_{nn} \end{array} \right)$$

 شکل ۷. ماتریس ANP.<sup>[۶]</sup>

خواهد شد. با اجرای روش بهینه‌سازی ANP، پس از ۱۷۸ نسل، حالت بهینه به دست آمد. ساخت سوله با استفاده از فولاد ST37 و استفاده از پانل P4 به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. این در حالی است که استفاده از فولاد ST52، وزن سازه را کاهش داده است، ولی قیمت بالای آن، شاخص عملکردی پارامتر وزن را کاهش داده است. در شکل ۸، عملکرد روش ANP و تعداد نسل‌ها مشاهده می‌شود.

1. Analytic Network Process (ANP)
2. Atmaca & Basar
3. Extruded Polystyrene (XPS)
4. Analytic Hierarchy Process (AHP)

## (References) مراجع

1. Toufigh, V. and Kianfar, E. "The effects of stabilizers on the thermal and mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts", *Construction and Building Materials*, **200**, pp. 616-629 (2019).
2. Samadianfard, S. and Toufigh, V. "Energy use and thermal performance of rammed-earth materials", *J. Mater. Civ. Eng.*, **32**(10), p. 04020276 (2020).
3. Saidi, M., Cherif, A.S., Zeghamti, B. and et al. "Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks", *Construction and Building Materials*, **167**, pp. 566-577 (2018).
4. Katunsky, D., Korjenic, A., Katunska, J. and et al. "Analysis of thermal energy demand and saving in industrial buildings: A case study in Slovakia", *Build. Environ.*, **67**, pp. 138-146 (2013).
5. Kosarimovahhed, M. and Toufigh, V. "Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures", *Journal of Cleaner Production*, **277**, p. 123279 (2020).
6. Pakand, M. and Toufigh, V. "A multi-criteria study on rammed earth for low carbon buildings using a novel ANP-GA approach", *Energy Build.*, **150**, pp. 466-476 (2017).
7. Atmaca, E. and Basar, H.B. "Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP)", *Energy*, **44**(1), pp. 555-563 (2012).
8. Xu, P., Chan, E.H.W., Visscher, H.J. and et al. "Sustainable building energy efficiency retrofit for hotel buildings using EPC mechanism in China: Analytic Network Process (ANP) approach", *Journal of Cleaner Production*, **107**, pp. 378-388 (2015).
9. Milani, A.S.; Shanian, A.; Lynam, C. and et al. "An application of the analytic network process in multiple criteria material selection", *Mater. Des.*, **44**, pp. 622-632 (2013).



# تزریق‌پذیری محلول نانو‌سیلیسیس کلوئیدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لای مختلف

احسان آذینی (دانشجوی دکتری)

رضا ضیائی مؤید\* (استاد)

سید ابوالحسن نائینی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهمنگی: عمان شرف (پیاره ۱۴۵۱)  
دوری: ۲، شماره ۱، ص. ۳۹-۳۴، سال ۱۴۰۲ (پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، تزریق‌پذیری روی خاک کربناته‌ی خلیج فارس (بوشهر) با محلول نانو‌سیلیسیس با ساخت نمونه‌های یک متغیر بررسی شده است. نمونه‌های ماسه‌ی کربناته با ۵ ترکیب مختلف لای با درصد‌های (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و ۳ غلظت محلول با درصد‌های (۱۰، ۲۰ و ۳۰) تزریق شده‌اند، تا بتوان اثر عواملی، مانند: غلظت محلول، درصد ریزدانه و فشار تزریقی در میزان تزریق‌پذیری، نفوذ، و ارتباط آنها با یکدیگر را بررسی کرد. همچنین به منظور به دست آوردن غلظت بهینه‌ی تزریق، آزمایش‌های تک محوری با مقادیر مختلف درصد لای، ۳ درصد مختلف غلظت و در ۳ درجه‌ی عمل آوری انجام و مشاهده شد که تثبیت مؤثر و تامی غلظت‌ها تزریق‌پذیر بوده است؛ به نحوی که غلظت ۳٪ بهینه‌ی غلظت تزریقی است، که بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت داشته است. همچنین غلظت ۳٪ نسبت به غلظت ۱۰٪، به طور میانگین ۴٪ افزایش مقاومت را در پی داشته است.

e\_azini@yahoo.com  
ziaie@eng.ikiu.ac.ir  
naeini@eng.ikiu.ac.ir

واژگان کلیدی: ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار بوشهر، نانو‌سیلیسیس کلوئیدی، تزریق‌پذیری، بهسازی خاک، آزمایش تک محوری.

## ۱. مقدمه

مهندسی بهسازی خاک‌های مستله‌دار، یکی از مسائل پیش روی جامعه‌ی مهندسی است. یکی از خاک‌های مستله‌دار، خاک ماسه‌ی کربناته‌ی سست است، که در جنوب ایران، از جمله: هرمن، قشم، کیش و بوشهر یافت می‌شوند. منطقه‌ی خلیج فارس به ویژه بندر بوشهر از منطقه‌های راهبردی کشور است، که در آن ماسه‌ی کربناته با درصد لای مختلف به فور یافت می‌شود. لذا مطالعه‌ی دقیق بهسازی خاک منطقه‌ی خلیج فارس، اهمیت بهسزایی دارد. خواص ماسه‌ی کربناته، که جزء خاک‌های مستله‌دار محسوب می‌شود، را می‌توان با تثبیت‌کننده‌های شیمیایی به ویژه محلول نانو‌سیلیسیس کلوئیدی افزایش داد.

خاک‌های کربناته به خاک‌هایی گفته می‌شود که مقادیر قابل ملاحظه‌یی کربنات کلسیم دارند (عمدتاً در حدود ۵۰٪ یا بیشتر). اگر بیش از ۵۰٪ مواد حل شده از خاکی دراسیده هیدروکاربیک، از نوع کربناته باشد، آن خاک کربناته تلقی می‌شود.<sup>[۱]</sup> رسوبات کربناته، نوع بسیار زیادی هم از لحاظ منشأ تولید و هم از نظر ویژگی‌های

سیلیسیس کلوئیدی، تثبیت‌کننده‌یی مناسب برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ی سست است.<sup>[۲-۴]</sup> سیلیسیس کلوئیدی تعلیقی، کلوئیدی است که فاز پیوسته‌ی آن، آب و ذرات پراکنده‌ی آن، ذرات سیلیس است و در صورتی پایدار می‌ماند که رسوب نکند و با لخته شدن در آنها با سرعت کم رخ دهد. ژل شدگی<sup>۲</sup>، فرایندی است که طی آن محلول سیلیسیس به ساختار زنجیره‌یی شکل به حالت ژل در می‌آید. زمان ژل شدگی نانو‌سیلیسیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیسیس، اندازه‌ی ذرات نانو‌سیلیسیس، pH و حرارت محلول بستگی دارد. با ثابت ماندن درجه حرارت و اندازه‌ی ذرات عامل pH باقی ماند. کوتاه‌ترین زمان ژل شدگی در محدوده‌های  $pH < 7$  بین  $140-180$  رخ

\* نویسنده مسئول  
تاریخ: دریافت ۳۱/۰۵/۱۴۰۱، اصلاحیه ۹/۱/۱۴۰۱، پذیرش ۱۸/۱/۱۴۰۱.

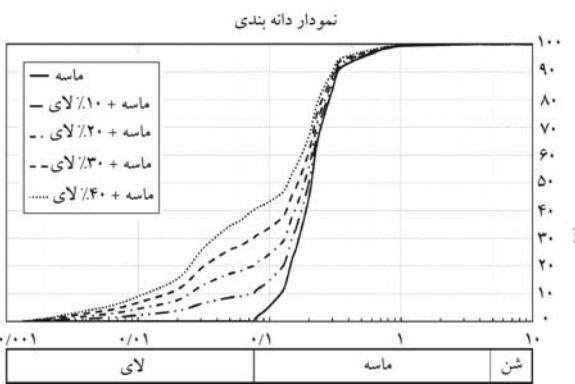
DOI:10.24200/J30.2022.60975.3135

استناد به این مقاله:

آذینی، احسان، ضیائی مؤید، رضا و نائینی، سید ابوالحسن (۱۴۰۲). «تزریق‌پذیری محلول نانو‌سیلیسیس کلوئیدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لای مختلف». مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۳۸، ص.

#### جدول ١. مشخصات فیزیکی مصالح.

مشخصات خاک (gr/cm³)									نوع خاک
Cc	Cu	D <sub>50</sub>	γ <sub>dmin</sub> (gr/cm³)	γ <sub>dmax</sub> (gr/cm³)	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	G <sub>s</sub>		
۰/۹۶۰	۱/۸۷۰	۰/۲۰۸	۱/۶۰	۱/۹۱	۰/۴۳۱	۰/۷۰۲	۲/۷۳	۰	ماسه‌ی خالص
۱/۳۸۸	۲/۸۸۰	۰/۲۰۰	۱/۵۹	۱/۹۶	۰/۳۹۵	۰/۷۲	۲/۷۴	۰	ماسه با ۱۰٪ لای
۲/۳۵۳	۸/۷۵۰	۰/۱۹۰	۱/۵۴	۱/۹۷	۰/۴۰	۰/۷۹	۲/۷۶	۰	ماسه با ۲۰٪ لای
۱/۵۹۸	۱۳/۸۷۰	۰/۲۰۰	۱/۵۲	۱/۹۷	۰/۴۱۶	۰/۸۲۳	۲/۷۹	۰	ماسه به ۳۰٪ لای
۰/۸۱۷	۱۶/۱۸۰	۰/۱۴۰	۱/۴۸	۱/۹۵	۰/۴۴۹	۰/۹	۲/۸۲	۰	ماسه با ۴۰٪ لای



شکل ۱. دانه‌بندی ترکیب‌های مختلف ماسه - لایی به کار رفته در پژوهش حاضر.

نانوپلیسیس، تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر بررسی ها در خصوص ترتیق پذیری ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر در درصد های مختلف لای انجام شده است. همچنین نقش موثر محلول تزریقی (نانوپلیسیس کلوتیدی) تحت تأثیر عواملی از جمله: درصد لای، غلظت و pH محلول بررسی شده و هدف نهایی پژوهش حاضر، رسیدن به غلظت بهینه و موثر در خاک ماسه‌ی کربناته‌ی لای دار بوده است، که بر اساس نتایج آزمایش های تک مجزوی به دست آمده است.

## ۲. مشخصات مصالح و محلول استفاده شده

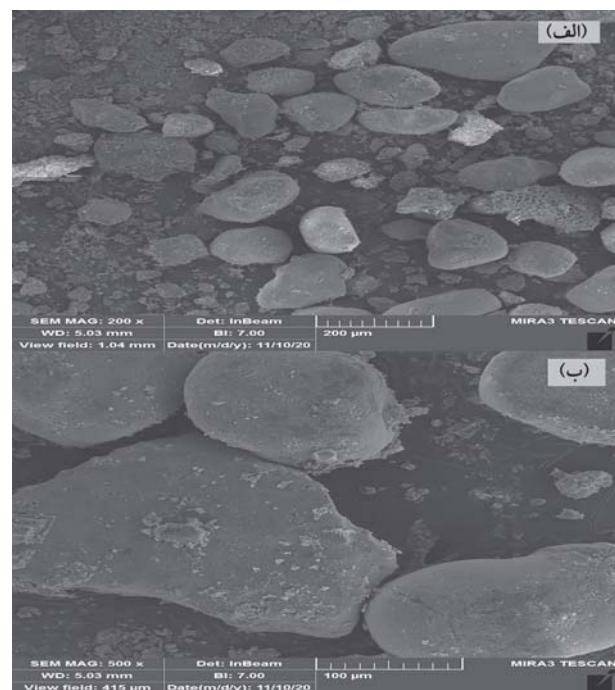
9

در سواحل شمالی خلیج فارس، عمدتاً خاک هایی دارای کربنات کلسیم ( $CaCO_3$ ) هستند. در پژوهش حاضر از مasseه کربناتی بوشهر استفاده شده است. با توجه به طلاقات لای گمانه، که از پژوهه های مختلف منطقه هی بوشهر به دست آمده است، درصد لای در خاک های مasseه لای دار در مکان های مختلف بین ۱۰ تا ۴۲ درصد بوده است.<sup>[۱۶]</sup> بنابراین در پژوهش حاضر، درصد وزنی لای ۱۰، ۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ انتخاب شده است. به دست آوردن درصد کربنات کلسیم خاک مasseه بی بوشهر نیز بر اساس استاندارد BS ۱۳۷۷-۳ انجام شده است، که مقدار آن ۵/۷۲٪ بوده است.<sup>[۲۷]</sup> داده بندی بر اساس استاندارد ASTM D۶۹۱۳-۱۷ انجام شده است، که در شکل ۱ مشاهده می شود.<sup>[۲۸]</sup> بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۵۴-۱۶، نسبت تخلخل پیشینه و بر اساس استاندارد ۱۶۱-۱۶۱، ASTM D۴۲۵۳، نسبت تخلخل کمیته به دست آمده اند.<sup>[۲۹]</sup> همچنین جهت به دست آوردن چگالی و یقه (G) از استاندارد ASTM D۸۴۵-۱۴ استفاده شده است.<sup>[۳۰]</sup> در جدول ۱، مشخصات فیزیکی مصالح ارائه شده است. همچنین عکس های SEM گرفته شده از مasseه لای دار

می‌دهد و خارج از محدوده‌ی اخیر، به شدت این زمان می‌تواند افزایش یابد.<sup>[۷]</sup> موضوع تزریق‌پذیری خاک‌های دانه‌ای، سال‌هاست که مورد پژوهش پژوهشگران مختلف بوده و در بیشتر موارد از دوغاب‌های زیر، مانند سیمان، استفاده کرده‌اند.<sup>[۸]</sup> در پژوهش‌های مذکور، اثر اندازه‌ی خاک و سیمان ارزیابی شده است. در حالی که در مطالعات دیگری، پارامترهای اندازه‌ی خاک و ماده‌ی سوسپانسیون تزریق، درصد ریزدانه، فشار تزریق، چگالی نسبی و سبب آب به سیمان بررسی شده‌اند.<sup>[۹]</sup> دانو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، تزریق‌پذیری خاک دانه‌ی از ماسه تا سیلت را با تزریق دوغاب سیمان پرتلند بسیار ریز بررسی کرده‌اند.<sup>[۱۰]</sup> با توجه به استفاده‌ی گسترده از تزریق نفوذی<sup>۴</sup> با سیمان در بهسازی خاک‌ها، تولید سیمان مشکلاتی را در پی دارد. برای تولید سیمان پرتلند انرژی زیادی مصرف می‌شود و همچنین صفت سیمان سبب انتشار حدود ۷٪ گازکربنیک در جهان می‌شود.<sup>[۱۱]</sup> لذا استفاده از مصالح جایگزین به پیزه بهسازی با مواد شیمیایی، که غیررسمی و دوستدار محیط‌زیست هستند (به پیزه نانوسیلیس)، رواج یافته است. مطالعات مختلفی بر روی شبیت خاک‌ها با استفاده از مواد مختلف، از جمله: زویلت، بتونیت و محلول سیلیکات سدیم انجام گرفته است. اما کمتر به مطالعه‌ی تزریق‌پذیری و عوامل مؤثر در تزریق با مواد ذکر شده پرداخته شده است. از جمله در مطالعه‌ی حسنلو راد و صرافی یگانه (۱۳۹۲)، بر روی قابلیت تزریق‌پذیری خاک‌های ماسه‌یی با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم پرداخته‌اند.<sup>[۱۲]</sup> آنچه در مورد تزریق‌پذیری دوغاب سیلیکات سدیم مطرح است، ویسکوزیته‌ی آنهاست، به طوری که با افزایش لزجت از تزریق‌پذیری خاک کاسته می‌شود. در پژوهش نوری و همکاران (۱۳۹۵)، به تزریق‌پذیری خاک ماسه‌یی به سیله‌ی دوغاب بتونیت پرداخته‌اند.<sup>[۱۳]</sup> به دلیل این که اخیراً، استفاده از نانومواد در پژوهش‌های مهندسی عمران به دلیل مزایای متعدد و افزایش خواص مهندسی افزایش یافته است<sup>[۱۴]</sup> و از طرفی تاکنون مطالعاتی در خصوص تزریق نانوسیلیس کلوفیدی در ماسه‌ی کربناته انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، به قابلیت تزریق‌پذیری محلول نانوسیلیس و عوامل مؤثر بر آن در ماسه‌ی کربناته‌ی لای دار پرداخته شده است.

جدول ۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوئیدی با غلظت ۳۰٪ استفاده شده در پژوهش حاضر.

$\text{SiO}_2\text{NH}_2\text{O}$	فرمول شیمیایی
۰/۳	غلظت
مایع	حالت
سفید شیری	رنگ
۶۰/۰ ۸g/mol	وزن مولکولی
۱/۱۹ - ۱/۲۱(۲۵°C)	چگالی ویژه
۹/۰ - ۱۰/۰	مقدار PH
۵mPa.s	لزجت
۱۲-۲۵nm	سایز ذره
۱۰۰°C	نقطه جوش اولیه



شکل ۲. عکس میکروسکوپ الکترونیکی ماسه‌ی کربناته‌ی لای دار بوشهر.

کربناته‌ی بوشهر در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که در دسته‌ی نیمه تیزگوشه تا تیزگوشه قرار گرفته و بر اساس تقسیم‌بندی دانه‌های کربناته، که در نوشتار فوکر و هایجین با توم ۵ (۱۹۷۵)،<sup>[۲۲]</sup> ارائه شده است، بافت آن از نوع اسکلتی (بیولوژیکی) بوده است. در این نوع از ماسه‌های کربناته، زیاد بودن نسبت منافذ داخل دانه‌ها و نسبت منافذ بین دانه‌ها، سبب خردشدنی دانه‌ها در اثر فشار می‌شود. لازم به ذکر است که با بررسی چشمی، خاک باقیمانده‌ی ذرات پوسته‌های صدفی<sup>۶</sup> و باقیمانده‌ی خارتنا<sup>۷</sup> مشاهده می‌شود.



شکل ۳. دستگاه تزریق با اعمال فشار و مکش قابل تنظیم.



شکل ۴. قالب تزریق استوانه‌ای مدرج با قطر داخلی ۳/۸ و طول ۱۰۰ سانتی‌متر جهت آزمایش تزریق پذیری.

حرکت محلول در داخل قالب مشهود باشد و برای اندازه‌گیری طول نفوذ، روی قالب ۱ متری مدرج شده است، که بتوان بر اساس آن طول نفوذ را اندازه‌گیری کرد. فشار لازم برای تزریق، توسط رگلاتور فشار به مخزن حاوی محلول اعمال و محلول از طریق سیستم لوله‌کشی، که به ابتدای قالب متصل شده بود، وارد نمونه شده است. شایان

۲.۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوئیدی استفاده شده سیلیس کلوئیدی تعلیقی، کلوئیدی است که فاز پیوسته‌ی آن آب و ذرات پراکنده‌ی آن ذرات سیلیس است و در صورتی پایدار می‌ماند که رسوب نکند و یا لخته شدن در آنها با سرعت کم رخ دهد. ژل‌شدنگی، فرایندی است که طی آن محلول سیلیس به ساختار زنجیره‌ای شکل به حالت ژل در می‌آید. زمان ژل‌شدنگی نانوسیلیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیس، اندازه‌ی ذرات نانوسیلیس، قدرت یونی، pH و حرارت محلول بستگی دارد. مشخصات دوغاب سیلیس کلوئیدی با استعلام از شرکت دانش‌بنیان صنایع نانوسیلیس ایساتیس تهیه شده است (جدول ۲).

### ۳. روش پژوهش

#### ۳.۱. دستگاه و قالب‌های تزریق

برای انجام تزریق از دستگاه‌های مطابق شکل ۳ استفاده شده است. دستگاه تزریق متشکل از یک مخزن ۱۰ لیتری و سیستم اعمال فشار تزریق قابل تنظیم بوده است، که می‌تواند تا بیش از ۵۰۰ کیلوپاسکال فشار اعمال کند، اما در پژوهش حاضر، بیشینه‌ی فشار اعمالی حدود ۴۵ کیلوپاسکال بوده است. قالب استفاده شده به طول ۱ متر بوده است، که از پلاستیک شفاف ساخته شده است، تا فرایند تزریق قابل رویت باشد (شکل ۴). در حین تزریق، شفاف بودن قالب باعث شده است که



ب) قطعات تشکیل دهنده قالب تزریق.

الف) نمای کلی قالب تزریق؛

شکل ۵. قالب تزریق استوانه‌بی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر جهت آزمایش فشاری محدود نشده.



شکل ۶. دستگاه کوبش با ارتفاع قابل تنظیم در روش تراکم کاهش‌یافته.

**۳.۳. غلظت‌های محلول نانو‌سیلیسیس کلورئیدی**  
همان گونه که پیشتر گفته شد، هدف پژوهش حاضر، تزریق محلول نانو‌سیلیسیس است. از آنجایی که نانو‌سیلیسیس توسط شرکت داخلی تولید می‌شود، هزینه‌ی آن تا حدی پایین است و از سوی دیگر، به جهت خاصیت کلورئیدی بودن آن در خاک‌های ماسه‌یی ریز و یا حاوی ریزدانه، اجرای راحتی دارد. نکته‌ی قابل توجه، آثار زیست‌محیطی آن است، که دوستدار محیط‌زیست است. لذا جایگزین مناسبی برای دوغاب‌های زبر از جمله سیمان است. غلظت‌های انتخابی برای تزریق در ماسه‌ی کربناتی لایه دار، می‌شود. از آنجایی که در روش تراکم کاهش‌یافته، لایه‌های بالایی باعث مترکم شدن لایه‌های پایینی می‌شوند، جهت ساخت نمونه‌ها از دستگاه کوبش تراکم کاهش‌یافته، که یک سیستم چکش با قابلیت تنظیم ارتفاع دارد، استفاده شده است (شکل ۶). ارتفاع چکش به اندازه‌ی  $h$  برای هر لایه تنظیم و خاک هر لایه به صورت دورانی و یکنواخت کوییده شد تا جایی که به ارتفاع موردنظر برسد. سپس لایه‌ی بعدی ریخته و مجدد کوییده شد و این کار ادامه یافت تا ارتفاع قالب پُر شود. شایان ذکر است میزان رطوبت در روش مذکور به میزان ۵٪ به دست آمده است.

#### ۴. روش تزریق و عمل‌آوری

همان طور که در بخش مقدمه عنوان شده است، مصالح ریزدانه‌ی موجود در دوغاب می‌توانند به راحتی سبب بسته شدن  $1^\circ$  ممتازد بین ذرات خاک شوند.<sup>[۳۵]</sup> جهت بررسی تزریق پذیری از لوله‌ی ۱ متری شفاف با قطر داخلی  $3/8$  سانتی‌متر استفاده

ذکر است که در پژوهش حاضر، جهت آزمایش‌های تک محوره از قالب استوانه‌بی جداشونده‌ی فلزی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۵).

#### ۲.۳. روش ساخت نمونه

در مطالعه‌ی قنیری و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از روش تراکم کاهش‌یافته به نمونه‌سازی خاک ماسه‌ی کربناتی لایه دار بوشهر پرداخته شده است.<sup>[۳۳]</sup> ایشان به منظور کنترل همگن بودن نمونه در لایه‌های مختلف از روش تزریق ژلاتین<sup>۸</sup> استفاده کرده و دریافته‌اند که با استفاده از تراکم کاهش‌یافته، نمونه‌سازی همگن در نمونه‌های ماسه‌ی لایه دار کربناتی بوشهر امکان پذیر است. لذا در پژوهش حاضر از روش تراکم کاهش‌یافته<sup>۹</sup> استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی قنیری و همکاران (۱۴۰۱)، که بر روی خاکی مشابه انجام شده است، برای رسیدن به نمونه‌ی همگن نیاز به رطوبت بهینه بوده است.<sup>[۳۴]</sup>

به منظور انتخاب درصد تراکم، براساس مطالعات رسولی و حسنلوراد (۱۳۹۴)، مشاهده شد که ظاهراً ماسه‌های کربناتی خلیج فارس و دریای عمان نسبت به ماسه‌های سایر نقاط جهان، در محدوده‌ی ماسه‌های با قابلیت فشرگی کم تا نسبتاً زیاد قرار دارند.<sup>[۳۴]</sup> همچنین در مطالعه‌ی زارع و حاجیانی (۱۳۹۶)، پس از بررسی عدد نفوذ استاندارد و تراکم نسبی رسوب‌های شهر بوشهر مشاهده شد که در اعماق ۱۵ متری، تراکم نسبی ماسه‌ی لایه دار، متوسط و سُست گزارش شده است.<sup>[۱۹]</sup> بنابراین جهت انجام آزمایش از چگالی نسبی ۵۰٪ استفاده شده همان گونه که پیشتر عنوان شد، جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده، از قالب جداشونده با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. وزن موردنظر خاک با توجه به چگالی نسبی ۵٪ به دست آمده است. در روش مذکور، خاک در ۶ لایه در قالب موردنظر با دستگاه کوبش ریخته می‌شود. از آنجایی که در روش تراکم کاهش‌یافته، لایه‌های بالایی باعث مترکم شدن لایه‌های پایینی می‌شوند، جهت ساخت نمونه‌ها از دستگاه کوبش تراکم کاهش‌یافته، که یک سیستم چکش با قابلیت تنظیم ارتفاع دارد، استفاده شده است (شکل ۶). ارتفاع چکش به اندازه‌ی  $h$  برای هر لایه تنظیم و خاک هر لایه به صورت دورانی و یکنواخت کوییده شد تا جایی که به ارتفاع موردنظر برسد. سپس لایه‌ی بعدی ریخته و مجدد کوییده شد و این کار ادامه یافت تا ارتفاع قالب پُر شود. شایان ذکر است میزان رطوبت در روش مذکور به میزان ۵٪ به دست آمده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش تزریق پذیری در لوله‌ی ۱ متری بر اساس طول نفوذ (سانتی‌متر) و فشار تزریق (کیلوپاسکال) در مقادیر لایی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و مقادیر غلظت نانوسیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

غلظت ۳۰ درصد	غلظت ۲۰ درصد	غلظت ۱۰ درصد	
۱۰۰ ۸۸ ۷۵ ۶۰ ۴۰ ۰	۱۰۰ ۶۰ ۰	۱۰۰ ۵۵ ۰	طول نفوذ
۲۲ ۲۰ ۱۸ ۱۳ ۱۰ ۱۰	۱۸ ۸ ۸	۱۵ ۵ ۵	فشار تزریق
۱۰۰ ۸۰ ۷۰ ۵۸ ۴۰ ۰	۱۰۰ ۸۰ ۴۳ ۰	۱۰۰ ۴۰ ۰	طول نفوذ
۲۷ ۲۵ ۲۲ ۱۷ ۱۰ ۱۰	۲۰ ۱۵ ۸ ۸	۱۸ ۵ ۵	فشار تزریق
۱۰۰ ۸۰ ۶۲ ۴۵ ۳۵ ۰	۱۰۰ ۷۰ ۴۰ ۰	۱۰۰ ۸۰ ۳۰ ۰	طول نفوذ
۳۵ ۲۸ ۲۵ ۱۷ ۱۰ ۱۰	۲۵ ۱۵ ۸ ۸	۲۰ ۱۳ ۵ ۵	فشار تزریق
۱۰۰ ۷۳ ۶۰ ۴۵ ۳۰ ۰	۱۰۰ ۷۰ ۳۸ ۰	۱۰۰ ۷۰ ۲۰ ۰	طول نفوذ
۴۰ ۳۵ ۲۸ ۲۳ ۱۵ ۱۵	۲۷ ۲۰ ۱۰ ۱۰	۲۲ ۱۵ ۱۰ ۱۰	فشار تزریق
۱۰۰ ۷۵ ۵۵ ۴۰ ۲۵ ۰	۱۰۰ ۶۰ ۳۵ ۰	۱۰۰ ۵۰ ۱۵ ۰	طول نفوذ
۴۳ ۳۸ ۲۸ ۲۶ ۱۵ ۱۵	۳۰ ۲۲ ۱۴ ۱۳	۲۶ ۲۰ ۱۳ ۱۳	فشار تزریق

زمان و بسته به مدت عمل آوری، محلول داخل نمونه نسبتاً خشک می‌شود.

#### ۱.۴ اثر pH و زمان ژل شدگی

دو عامل مهم در تزریق دوغاب‌های شیمیایی، ویسکوزیته و زمان ژل شدن دوغاب است. عامل اول تأثیر مستقیم در شعاع نفوذ دوغاب به خاک مورد تزریق دارد.<sup>۱۵</sup> ویسکوزیته‌ی محلول نانو بستگی به عدد pH در ماده‌ی تزریقی دارد. pH های پایین نسبت به pH های بالا، موجب ایجاد محلولی با ویسکوزیته‌ی بالا می‌شود، که مسلمان نفوذ کمی به داخل منافذ ریز دارد. در نوشتار حاضر، برای کاهش pH از اسید هیدروکاربیک استفاده شده و pH محلول به محدوده ۶/۵ رسیده است. اما با کاهش این مقدار به اعداد کمتر از ۶، محلول به سرعت ژل می‌شود و امکان تزریق میسر نیست. لذا مقدار pH مناسب تزریق در این خاک pH محدوده ۶/۵ بوده است.

شده است. همچنین به منظور تعیین غلظت بهینه‌ی محلول (از بین غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) از آزمایش‌های تک محوره استفاده شده است، که نیازمند تزریق در قالب استوانه‌ی است. در ادامه، روش تزریق در قالب لوله‌ی ۱ متری و قالب استوانه‌ی بی توضیح داده شده است.

جهت تزریق در لوله‌ی ۱ متری، در ابتدا محلول نانوسیلیس با اسید هیدروکلریدریک pH حدوداً ۶/۵ می‌رسد و سپس در مخزن دستگاه تزریق وارد می‌شود. بر اساس چگالی نسبی ۵۰٪، خاک مورد نظر در درون قالب ریخته می‌شود. در ابتدا با فشار تزریق ۵ کیلوپاسکال تزریق آغاز می‌شود و بعد از گذشت دقایقی سرعت نفوذ مایع کاهش می‌یابد و تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به این‌که قالب شیشه‌یی مدرج است، طول نفوذ یادداشت می‌شود، سپس فشار تزریق افزایش می‌یابد (۵ کیلوپاسکال)، که مشاهده می‌شود مجدداً به سرعت نفوذ اولیه باز می‌گردد. پس از مدتی مجدداً امکان دارد سرعت نفوذ کاهش یابد، که عدد طول نفوذ را قریط می‌کند و مرحله‌ی قبل مجدداً تکرار می‌شود تا محلول طول یک متر را طی کند و از لوله‌ی خروجی خارج شود.

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش تک محوره از قالب استوانه‌ی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است. مشابه تزریق در لوله‌ی ۱ متری، محلول آماده شده با pH حدوداً ۶/۵ به مخزن تزریق وارد و سپس، محلول با توجه به نوع نمونه، با فشار ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال به قالب تزریق می‌شود. عموماً سعی می‌شود با کمینه‌ی فشار، تزریق صورت گیرد تا ساختار یکنواخت نمونه‌های ساخته شده تغییر نکند. محلول تزریق شده از پایین نمونه وارد و از بالای نمونه خارج می‌شود. جهت اطمینان از اشباع شدن نمونه تا ۲ برابر حجم قالب (حدود ۴۰۰ CC) خارج می‌شود.<sup>۳۶، ۳۷</sup>

شایان ذکر است با توجه به آن‌که خاک برداشت شده از سواحل دریا و اشباع است، در ابتدا قبل از تزریق محلول نانوسیلیس، آب به میزان ۲ برابر حجم نمونه تزریق شد تا کاملاً اشباع شود و سپس محلول تزریق شده است. با عملیات تزریق، محلول جایگزین آب مایین حفره‌ها شده است و پس از تکمیل تزریق می‌توان گفت آب مایین حفره‌ها، از نمونه خارج و کلیه‌ی حفره‌های نمونه با محلول پر می‌شود.

پس از تزریق، نمونه‌های تک محوره جهت عمل آوری، پس از گذشت ۲ ساعت، از قالب خارج می‌شوند. سپس نمونه‌ها در دمای تقریبی ۲۳ درجه‌ی سیلیسیوس اتاق، برای طی زمان عمل آوری، یعنی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، نگهداری می‌شوند. با گذرا

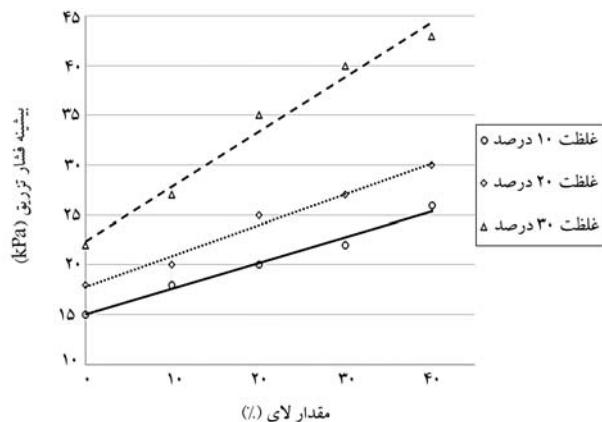
#### ۵ نتایج و بحث

##### ۵.۱ اثر غلظت و درصد ریزدانه در تزریق پذیری

غلظت محلول و همچنین ارتباط آن با درصد ریزدانه، عامل مهمی در فرایند تزریق است. لذا به منظور ارزیابی تزریق پذیری، ۱۵ آزمایش با مقادیر لایی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، با تراکم ۵۰٪ و سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، در لوله‌ی ۱ متری انجام شده است. نتایج آزمایش تزریق پذیری در جدول ۳ ارائه شده است.

در شکل ۷، تغییرات طول نفوذ بر حسب فشار تزریق در ۳ حالت: (الف) غلظت ۳۰٪، (ب) غلظت ۲۰٪ و (ج) غلظت ۱۰٪ و ج) غلظت ۵٪ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که محلول حاضر با غلظت‌های ذکر شده با فشارهای نسبتاً کم در ماده‌ی بدون درصد ریزدانه (ماده‌ی خالص) تا ماده‌ی حاوی بیشترین درصد ریزدانه (۴۰٪)، به آسانی تا انتهای طول نفوذ (شعاع ۱ متری) و بدون ایجاد هیچ‌گونه ترک و شکافی نفوذ کرده است.

بر اساس شکل ۸، در یک درصد لایی ثابت (به عنوان مثال ۴۰٪) با افزایش غلظت به دلیل کاهش لزجت، به فشار تزریق بیشتری احتیاج است و روند ذکر شده در تمامی مقادیر لایی قابل مشاهده است.



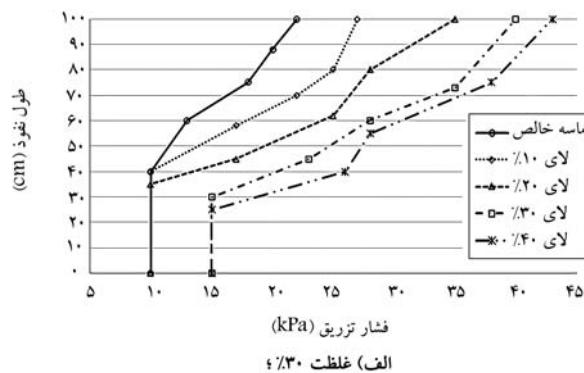
شکل ۹. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به مقدار لایی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در غلظت محلول نانو سیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

از سوی دیگر در شکل ۹ می‌توان پی برد که با افزایش درصد لایی، به فشار تزریق بیشتری نیاز است؛ به طوری که در ماسه‌ی خالص با کمترین فشار تزریق صورت می‌گیرد، اما با افزایش درصد لایی به دلیل کاهش حفره‌های نمونه، به فشار بیشتری مورد نیاز است، برای مثال، برای لایی ۴۰٪، به بیشترین فشار تزریق در حدود ۴۵ کیلوپاسکال نیاز است. اما در نمونه‌های فاقد لایی (ماسه‌ی خالص) در محدوده‌ی ۲۰ کیلوپاسکال تزریق انجام می‌شود. اما نکته‌ی حائز اهمیت آن است که همه‌ی غلظت‌های استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر به خصوص غلظت ۳۰٪، قابلیت تزریق در ماسه‌ی کربناته‌ی مورد استفاده را دارند. همچنین محلول اشاره شده، در فشارهای نسبتاً کم و با یک زمان کوتاه (متوسط ۱۵ دقیقه) تزریق انجام می‌شود.

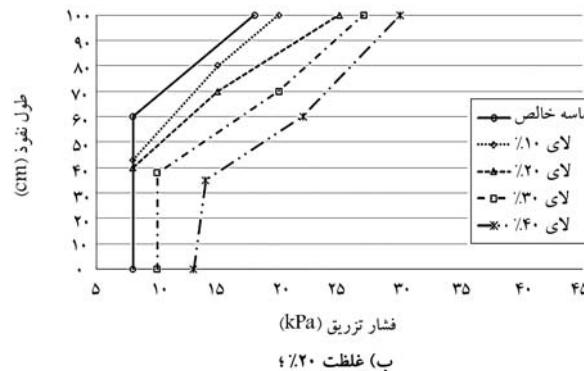
## ۲.۵. آزمایش فشاری محدود نشده

بیشتر مواقع از آزمایش تک محوری به عنوان معیاری برای ارزیابی بهسازی خاک در فرایند تثبیت استفاده می‌شود. خاک موردنظر در حالت تثبیت نشده، هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. در واقع، ماسه‌ی کربناته‌ی لایی دار به سبب سست بودن، فاقد مقاومت تک محوری است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، یکی از اهداف پژوهش حاضر، به دست آوردن غلظت بیشینه‌ی محلول جهت تزریق است. به همین منظور ۴۵ آزمایش تک محوری مطابق دستورالعمل ASTM D4219<sup>[۲۸]</sup> در ۵ درصد مختلف لایی (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد)، یک درصد تراکم (۰.۵٪) در ۳ دوره‌ی عمل آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) و در ۳ غلظت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) انجام شده است. بدین منظور از دستگاه بارگذاری اتوماتیک با ظرفیت بیشینه‌ی ۱۰ kN استفاده شده و بار محوری به صورت پیوسته با نرخ کرنش ۳٪/mm (٪/mm) افزایش یافته است. در آزمایش‌های انجام شده برای رسیدن به گسیختگی از دو معیار بیشینه‌ی بار برابر واحد سطح یا بار واحد سطح در کرنش ۲۰٪، به طوری که هر کدام زودتر به وقوع به پیوند، استفاده شده است.<sup>[۲۹]</sup> در جدول ۴، نتایج آزمایش تک محوری روی نمونه‌های تزریق شده با نانو سیلیس کلوریدی ارائه شده است.

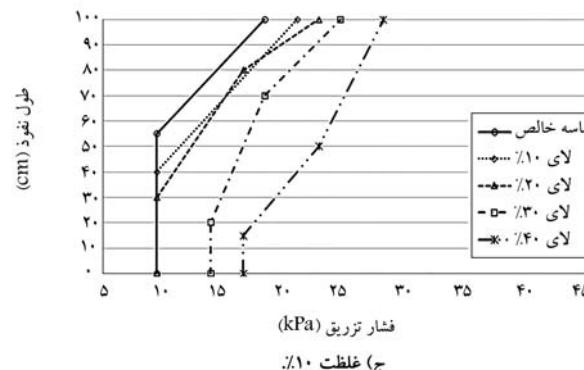
شایان ذکر است همان‌گونه که در بخش ۱.۳. بیان شده است، ابعاد نمونه‌های تک محوری استوانه‌بی به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر هستند، که بر اساس استاندارد ASTM D4219، نمونه‌های آزمایش باید دارای نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۳ باشند. همچنین قطر نمونه باید بیشتر از ۱۰ برابر اندازه‌ی بیشینه‌ی ذرات نمونه و کمتر از ۳۵ میلی‌متر باشد.<sup>[۲۸]</sup> ابعاد اختیابی این شرایط را احراز می‌کند. از طرفی دیگر،



(الف) غلظت ۴٪/۳۰

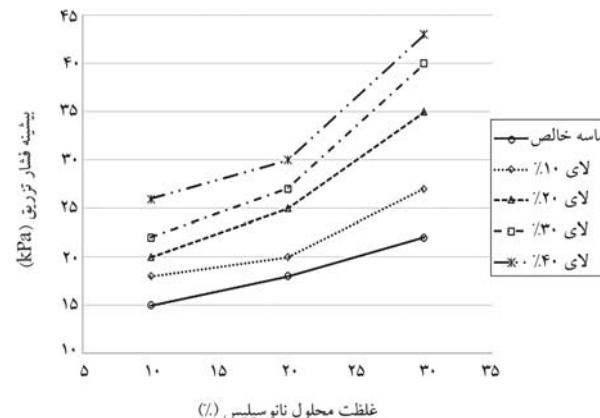


(ب) غلظت ۴٪/۲۰



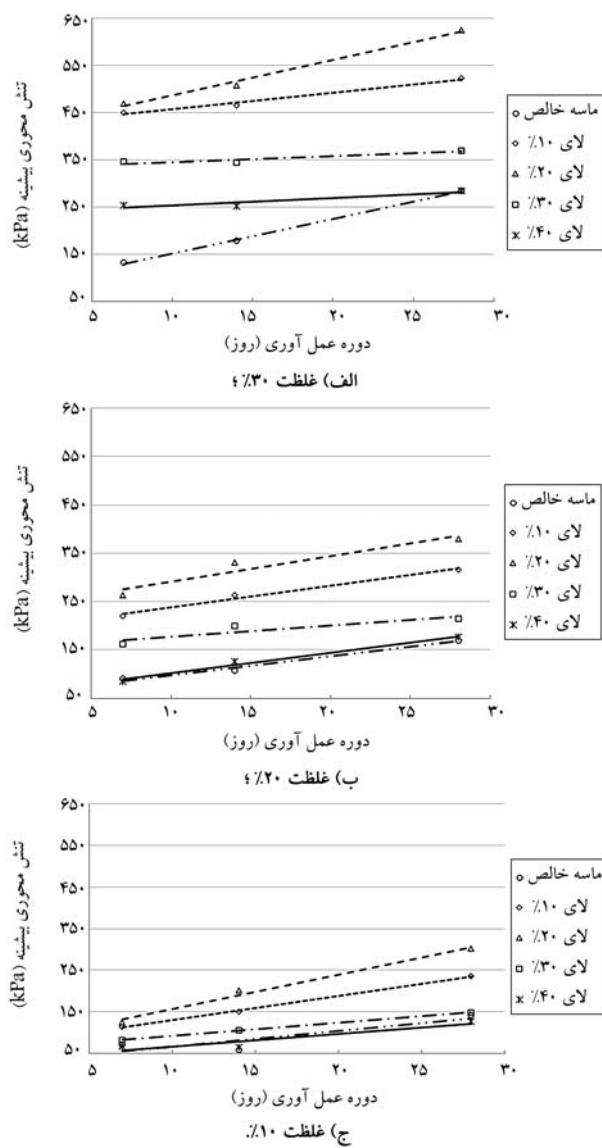
(ج) غلظت ۴٪/۱۰

شکل ۷. نمودار تغییرات طول نفوذ (سانتی‌متر) به فشار تزریق (کیلوپاسکال) در مقدار لایی ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.



غلظت محلول نانو سیلیس (٪)

شکل ۸. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به غلظت محلول نانو سیلیس کلوریدی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و با مقدار لایی ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.



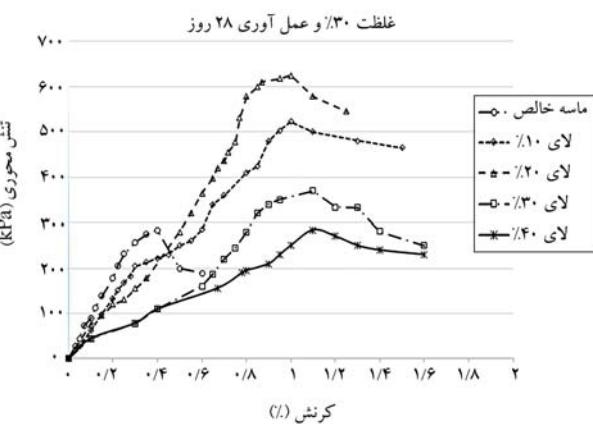
شکل ۱۱. تغییرات تنش محوری بیشینه به دوره‌ی عمل‌آوری در درصد لامی‌های ۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۰٪.

اما حضور لای فضای بین دانه های ماسه را پر کرده و تا حد نسبتاً خوبی باعث افزایش مقاومت شده است. در تمامی نمونه ها می توان بیان کرد بیشترین مقاومت تک محوری مربوط به لای  $20\%$  و در تراکم  $50\%$  و عمل آوری  $28$  روزه بوده است، که مقدار  $625$  کیلوپاسکال به دست آمده و پس از آن مربوط به لای  $10\%$  با مقدار  $524$  کیلوپاسکال بوده است (جدول ۳). در حقیقت می توان گفت حفره های ماسه هی بینون لای (ماسه هی خالص) فقط با نانو سیلیس پر می شود، ولی با اضافه کردن لای به ساختار ماسه، سختی نمونه به شدت تا لای  $20\%$  افزایش می یابد، که حد نهایی را می توان لای  $20\%$  عنوان کرد؛ اما با افزایش لای به میزان  $30$  و  $40$  درصد، ذرات لای علاوه بر پر کردن حفره های ماسه، ساختار نمونه را سست کرده و سیر نزولی مقاومت تک محوری ادامه داشته است، به طوری که کمترین مقاومت ها مربوط به

دورهی عمل آوری، یکی از عوامل مؤثر در تثبیت نمونه‌ها و مقاومت تک‌محوری ماسه‌ی حاصل و ماسه‌ی حاوی لای ۷/۱ بوده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش نک محوره روی نمونه های تزریق شده با نانوسیلیس در دوره های عمل اولیه ۱۴، ۲۸ روزه و تراکم ۵۰٪.

مقدار لای	غایظت نانوسیلیس (%)	مقاموت فشاری تک محوری بیشینه‌ی (کیلوپاسکال)	روزه	روزه	روزه
۰	۱۰	۱۴۲	۷۱	۵۸	۱۴۲
۱۰	۱۰	۲۳۵	۱۵۱	۱۱۴	۲۳۵
۲۰	۱۰	۳۰۲	۲۰۲	۱۲۵	۳۰۲
۳۰	۱۰	۱۴۹	۱۰۶	۸۳	۱۴۹
۴۰	۱۰	۱۲۷	۶۶	۶۷	۱۲۷
۵۰	۲۰	۱۷۰	۱۰۷	۹۰	۱۷۰
۱۰	۲۰	۳۱۷	۲۶۳	۲۲۰	۳۱۷
۲۰	۲۰	۳۸۰	۳۳۱	۲۶۳	۳۸۰
۳۰	۲۰	۲۱۴	۲۰۰	۱۶۲	۲۱۴
۴۰	۲۰	۱۷۶	۱۲۶	۸۵	۱۷۶
۵۰	۳۰	۲۸۴	۱۷۹	۱۳۳	۲۸۴
۱۰	۳۰	۵۲۴	۴۶۵	۴۵۱	۵۲۴
۲۰	۳۰	۶۲۵	۵۰۸	۴۷۰	۶۲۵
۳۰	۳۰	۳۶۹	۳۴۴	۳۴۵	۳۶۹
۴۰	۳۰	۲۸۵	۲۵۱	۲۵۳	۲۸۵



شکل ۱۰. نمودار تغییرات تنش محوری محدود نشده (کیلوپاسکال) به کرنش (%) در لایهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، غلظت ۳۰٪، تراکم ۵۰٪ و دوره‌ی عمل آوری ۲۸ روزه.

در بیشتر دستگاه‌های آزمایش، از جمله سه محوری، از ابعاد مذکور استفاده می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، از ابعاد منتخب استفاده شده است تا شرایط یکسان آزمایش با دیگر دستگاه‌ها فراهم شود.

در شکل ۱۰، نمودار تنش - کرنش نمونه های ۲۸ روزه روی مقادیر لایی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، در غلطت ۳۰٪ و تراکم ۵۰٪ مشاهده می شود؛ که مطابق آن، پیشینه های مقاومت تک محوری مربوط به لایی ۲۰٪ و سپس ۱۰٪ بوده و با افزایش میزان لایی از ۳۰ به ۴۰ درصد، مقاومت کاهش یافته است. همچنین، شبیه نمودار (سختی) در ابتدای زیاد بوده است، که مربوط به لایی ۲۰٪ بوده و سپس به ترتیب «ای لایی ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاهشی، یافته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۵، کمترین کرنش‌ها مربوط به ماسه‌ی خالص «ده است» که به دلایل ماهیت شکننده‌ی دهنده‌ها، ماسه‌ی کناته «ده است»

۵۰٪ و نهایتاً ۳ دوره‌ی عمل آوری (۱۴، ۷ و ۲۸ روزه) انجام شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها می‌توان گفت که:

۱- اثر غلظت در طول نفوذ، تابع اندازه‌ی درصد لای خاک است و با افزایش درصد لای، اثر غلظت کاهش می‌یابد؛ که در واقع، در یک درصد ثابت لای با افزایش غلظت محلول، فشار تزریق افزایش می‌یابد. به طوری که در غلظت ۳۰٪ به فشار بیشتری جهت تزریق نیاز بوده است، چرا که با افزایش غلظت، لزجت کاهش یافته است.

۲- با افزایش درصد لای در یک چگالی نسبی ثابت (۵۰٪)، به فشار تزریق بیشتری احتیاج است؛ به طوری که برای تزریق در طول یک متر در لای ۴۰٪ به فشار تزریق تا محدوده‌ی ۴۵ کیلوپاسکال احتیاج بوده و در ماسه‌ی فاقد لای (ماسه‌ی خالص) با فشار کمینه‌یی در حدود ۲۵ کیلوپاسکال تزریق انجام شده است.

۳- از آنجایی که نمونه‌های تثبیت نشده هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند، با تزریق محلول نانو سیلیس بر اساس نتایج آزمایش تک‌محوری، مقاومت چندین برابر افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی مؤثر بودن تزریق در بهسازی خاک کریباته‌ی لای‌دار بوشهر است.

۴- در هر ۳ غلظت استفاده شده با اضافه شدن لای به ماسه تا ۲۰٪ (با توجه به افزایش مقاومت تک‌محوری)، می‌توان اثر تزریق را مؤثر دانست. به گونه‌ی که ماسه‌ی حاوی لای ۲۰٪، بهترین نتیجه‌ی تثبیت را داشته است. اما با افزایش لای به بیش از ۲۰٪، اثر تزریق در بهسازی خاک را می‌توان کمتر دانست، که کمترین آن مربوط به ماسه‌ی بدون لای (ماسه‌ی خالص) و ماسه‌ی حاوی ۴۰٪ لای بوده است.

۵- دوره‌ی عمل آوری، عامل مهمی در بهسازی خاک است، که با افزایش آن در هر ۳ غلظت تزریقی، با توجه به افزایش مقاومت نمونه‌ها، تزریق در بهبود خاک مؤثر بوده است.

۶- در غلظت محلول ۳۰٪ پس از ۷ روز عمل آوری، در بیشتر نمونه‌ها، مقاومت به بیش از ۳۴۵ کیلوپاسکال رسیده و با افزایش دوره‌ی عمل آوری تا ۲۸ روز، به بهترین شرایط بهسازی و عبور از مرز مذکور رسیده است؛ به طوری که در ماسه‌ی حاوی ۲۰٪ لای به مقاومت تک‌محوری ۶۲۵ کیلوپاسکال و ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ لای به مقاومت ۵۲۴ کیلوپاسکال رسیده است. بنابراین می‌توان غلظت ۳۰٪ را به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفت.

۲۸ روزه) مشاهده می‌شود. نمودار الف، مربوط به غلظت ۳۰٪؛ نمودار ب، مربوط به غلظت ۲۰٪ و نهایتاً نمودار ج، مربوط به غلظت ۱۰٪ بوده و آزمایش‌ها در تراکم ۵۰٪ انجام شده است. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دوره‌ی عمل آوری، مقاومت تک‌محوری افزایش یافته است؛ به طوری که در عمل آوری‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت به دست آمده است. در واقع رشد مقاومت در بیشتر نمونه‌ها با افزایش دوره‌ی عمل آوری چشمگیر بوده است. از سوی دیگر، غلظت محلول تزریقی، عامل تعیین‌کننده‌ی دیگری در فریند تثبیت است. مشاهده می‌شود که نمودار الف، که در غلظت ۳۰٪ تزریق انجام شده است، نسبت به نمودارهای ب و ج، یعنی در غلظت‌های ۲۰ و ۱۰ درصد، مقاومت به شدت افزایش یافته است، به طوری که غلظت ۳۰٪ نسبت به غلظت ۱۰٪، مقاومت را در محدوده ۳ تا ۴ برابر افزایش داده است. لذا می‌توان غلظت را عامل مهم و اساسی در تثبیت نمونه‌ها دانست.

مطابق استاندارد ASTM D ۴۶۰۹ (۲۰۰۸)، در صورتی که مقاومت فشاری تک‌محوری به مقدار ۳۴۵ kPa یا بیشتر برسد، تثبیت خاک را می‌توان مؤثر در نظر گرفت.<sup>[۲۰]</sup> در پژوهش حاضر، همان طور که بیشتر عنوان شد، غلظت (۳۰٪ بیشینه‌ی غلظت استفاده شده) در تمامی نمونه‌ها، خصوصاً لای ۴۰٪، تزریق پذیر بوده و از سوی دیگر، با توجه به عمل آوری ۷ روزه‌ی بیشتر نمونه‌ها، مقاومت آنها بیش از ۳۴۵ kPa به دست آمده و با افزایش دوره‌ی عمل آوری، مقدار اخیر از مرز مذکور عبور کرده و به شدت افزایش یافته است. لذا می‌توان غلظت ۳۰٪ را غلظت بهینه و مؤثر جهت تزریق اعلام کرد. در واقع، با کمترین زمان عمل آوری (۷ روز)، به نتیجه‌ی قابل قبول (۳۴۵ کیلوپاسکال) می‌رسد، که نتیجه‌ی به دست آمده حائز اهمیت بسیار در پژوهش حاضر است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک سری آزمایش بررسی تزریق پذیری با محلول نانو سیلیس کلوفیدی با ۳ غلظت متفاوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به داخل خاک ماسه‌ی کریباته‌ی بوشهر و با ۵ ترکیب درصد متفاوت لای (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪) و نیز در چگالی نسبی ۵۰٪ انجام شده است. همچنین به جهت تعیین غلظت بهینه‌ی محلول نانو سیلیس و مؤثر بودن تثبیت خاک، یک سری آزمایش‌های تک‌محوری در ۵ میزان مختلف درصد لای (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪) غلظت (۱۰، ۲۰ و ۳۰)، چگالی نسبی

## پانوشت‌ها

9. Undercompaction
10. Coagulate

## منابع (References)

1. Calcite
2. Gelation
3. Dano
4. Permeation Prouting
5. Fookes & Higginbottom
6. Shell Fragments
7. Echinoderms
8. Injection of Gelatin

mented sand”, 22th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, American Society of Mechanical Engineering (ASME) (2003).

- Sharma, S. and Ismail, M. “Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(12), pp. 1581-1591 (2006).
- Totunchian, M.A. “Evaluation of the liquefaction phenomenon of non-cement carbonate sands using cyclic tests-case study”, *Ph.D Thesis, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology* (In Persian) (1393/2015).
- Gallagher, P.M. and Mitchel, J.K. “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loos sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9), pp. 1017-1026 (2002).
- Gallagher, P.M., Pamuk, A. and Abdoun, T. “Stabilization of liquefable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Material in Civil Engineering*, **19**(1), pp. 33-40 (2007).
- Gallagher, P.M. and Y.L. “Colloidal silica transport through liquefable porous media”, *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, **135**(11), pp. 1702-1712 (2009).
- DuPont. “Ludox colloidal silica: properties, uses, storage, and handling”, *Product Information, Wilmington, Del* (1997).
- Gallagher, P.M. “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, *Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va* (2000).
- Herndon, J. and Lenahan, T. “Grouting in oils”, *Design and operations Manual, Federal Highway Traction, Alliburton Services*, Duncan, Oklahoma,te technical Report, 2 (1976).
- Bell, F.G. “Engineering treatment of soils”, *E and FN Spon, London*, pp. 10-160 (1993).
- Akulut, S. “The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting”, *Ph.D. Thesis, The Institute of the Istanbul Technical University*, Istanbul (1999).
- Kutzner, C. “Grouting of rock and soil”, *Bulkema, Netherlands*, pp. 10-195 (1996).
- Dano, C., Hicher, P-Y. and Taillierz, S. “Engineering properties of grouted sands”, *Geotechotc. And Geoenviron. Eng.*, **130**(3), pp. 328-338 (2004).
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D. and et al. “Sustainable development and climate change initiatives”, *Cement and Concrete Research*, **38**(2), pp. 115-127 (2008).
- Hassanlourad, M. and Sarrafi, A. “Investigation of sandy soils grouting-ability with sodium silicate chemically grout”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **45**(2), pp. 41-48 (In Persian) (1392/2014).
- Nori, A., Ziae Moayed, R. and Hassanlourad, M. “Injectability of sands using bentonite”, *Journal of Engineering Geology*, **11**, pp. 299-318, (In Persian) (1394/2016).
- Choobasti, A.J. and Kutanaei, S.S. “Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nano-silica”, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, **9**(5), pp. 981-988 (2017).
- Sahu, A., Dey, T. and Chakraborty, S. “Influence of nano silica on mechanical and durability characteristic of mortar made by partial replacement of natural fine aggregate with recycled fine aggregate”, *SILICON*, **13**, pp. 4391-4405 (2020).
- Zare, M. and Hajiani Boushehrian, A. “Boushehr liquefaction hazard zonation based on SPT and result presentation by using GIS plat form reseant by Uusing GIS plat form of natural fine aggregate with recycled fine aggregate SILICON”, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **48**(3), pp. 109-119 (In Persian) (1396/2018).
- Dehnavi, Y., Shahnazari, H., Salehzadeh, H. and et al. “Compressibility and undrained behavior of hormuz calcareous sand”, *Electronic Journal of Electrical Engineering (EJGE)*, **15**, pp. 1684-1702 (2010).
- Farshbaf Aghajani, H., Salehzadeh, H. and Rezvani, R. “Energy equilibrium during crushing of sandy soils underisotropic compression”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**, pp. 1531-1542 (2016).
- Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. “Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands”, *International Journal of Civil Engineering*, **9**(4), pp. 307-314 (2011).
- Kargar, S.H.R., Shahnazari, H. and Salehzadeh, H. “Post-cyclic behavior of carbonate sand with anisotropic consolidation”, *International Journal of Civil Engineering*, **12**(4) pp. 316-325 (2014).
- Shahnazari, H. and Rezvani, R. “Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study”, *Engineering Geology*, **159**, pp. 98-105 (2013).
- Shahnazari, H., Rezvani, R. and Tutunchian, M.A. “An experimental study on the phase transformation point of crushable and non-crushable soils”, *Marine Georesources & Geotechnology*, **35**(2), pp. 176-185 (2017).
- Shahnazari, H., Salehzadeh, H., Rezvani, R. and et al. “The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**(4), pp. 975-983 (2014).
- BS1377-3, “BS 1377: Part 3 chemical and electrochemical tests”, London: BSI (1990).
- ASTM D6913-17, “Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis”, ASTM (2017).
- ASTM D4254-16, “Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density”, West Conshohocken, PA: ASTM International (2016).
- ASTM D4253-16e1, “Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table”, West Conshohocken, PA: ASTM International (2016).

31. ASTM D854-14, "Standard test methods for specific gravity of soils by water pycnometer", *West Conshohocken, PA: ASTM International* (2014).
32. Fookes, P. and Higginbottom I. "The classification and description of nearshore carbonate sediments for engineering purposes", *Geotechnique*, **25**(2), pp. 406-411 (1975).
33. Ghanbari, E., Ziae Moayed, R. and Naeini, S.A. "Application of under compaction method in sampling of boushehr carbonated silty sand", *Amirkabir Journal of Engineering*, Amirkabir University of Technology (In Persian) (1401/2022).
34. Rasouli, M.R. and Hassanlourad, M. "Study on geotechnical properties of four carbonates sands from the southern coastal of Iran", *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J.)*, **15**(4), (In Persian) (1394/2016).
35. Toumbakari, E.E., Van Gemert, D., Tassios, T.P. and et al. "Effect of mixing procedure on injectability of cemen-  
titious grouts", *Cement and Concrete Research*, **29**(6), pp. 867-872 (1999).
36. Pantazopoulos, I.A. and Atmatzidis, D.K. "Dynamic properties of microfine cement grouted sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **42**, pp. 17-31 (2012).
37. Dupla, J.C., Canou, J. and Gouvenot, D. "An advanced experimental set-up for studying a mono directional grout injection process" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, **8**(3), pp. 91-99 (2004).
38. ASTM D4219, "Standard test method for unconfined compressive strength index of chemical-grouted soils", *West Conshohocken* (2008).
39. ASTM D4609, "Standard guide for evaluating effectiveness of admixtures for soil stabilization", *West Conshohocken* (2008).

# روشی برای حل مسائل تحکیم غیرخطی با استفاده از مفهوم حالت آشتفتگی

احد اوریا (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه حقوق اردبیل

مهمنگی ۲ عمران شریف (پیاپی ۱۴۵) دری ۲، شماره ۱، ص. ۳۹-۴۷، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، روشی برای حل معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم غیرخطی با نفوذپذیری، تراکم‌پذیری و ضخامت لایه‌ی متغیر ارائه شده است، که بر اساس مفهوم حالت‌های آشتفتگی است. در روش مذکور، جواب‌های معادله‌ی تحکیم غیرخطی به صورت ترکیبی از جواب‌های معادله‌ی تحکیم ترازاقی در دو شرایط اولیه و نهایی ارائه شده است. برای ترکیب جواب‌های معادله‌ی ترازاقی از تابع حالتی استفاده شده است که بر اساس نتایج به دست آمده از روش تقاضلات محدود استخراج شده است. پارامترهای روش ارائه شده بر اساس مشخصات خاک در دو سطح تنش مؤثر اولیه قبل از شروع تحکیم و سطح تنش مؤثر نهایی بعد از تکمیل تحکیم تعیین شده‌اند. برای بررسی راستی آزمایش روشن ارائه شده از نتایج روش تقاضلات محدود و نیز نتایج آزمایشگاهی منتشر شده استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نتایج روش ذکر شده، دقت بسیار خوبی دارد.

واژگان کلیدی: تحکیم غیرخطی، مفهوم حالت‌های آشتفتگی، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، درصد تحکیم.

aouria@uma.ac.ir

## ۱. مقدمه

طبق تئوری تحکیم ترازاقی، ضخامت لایه‌ی خاک و نیز ضریب تحکیم برای هر دامنه‌ی بارگذاری، مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود، که در عمل به ندرت چنین فرضیاتی برقرار است. برای جبران کاسته‌های ناشی از فرضیات ذکر شده در تئوری تحکیم ترازاقی، آزمایش‌های تحکیم در دامنه‌های تنش کوچک انجام و برای هر دامنه‌ی تنش مشخص، ضخامت لایه و ضریب تحکیم متفاوتی در نظر گرفته می‌شود، که برای مقاصد عملی با دقت محاسبات پایین قابل قبول است. از این رو، بررسی روش‌هایی که در حل مسئله‌ی تحکیم، تغییرات مشخصات خاک و نیز ضخامت لایه‌ی خاک، که تأثیر زیادی در سرعت تحکیم دارد، ضروری است.

تئوری تحکیم ترازاقی برای شرایط تنش و جریان یک‌بعدی در دستگاه ادومتر توسعه یافته است. بایوت<sup>۱</sup> (۱۹۴۱)، در فرمول بندی معادلات تحکیم، شرایط تنش - تغییرشکل و جریان سه‌بعدی را در نظر گرفته است. همچنین طبق تئوری تحکیم بایوت، معادلات تعادل و جریان به صورت هم‌بسته نیز در نظر گرفته شده‌اند.<sup>[۱]</sup> دیویس و ریموند<sup>۲</sup> (۱۹۶۵)، نیز رابطه‌ی تنش و تخلخل لگاریتمی را به معادلات تحکیم وارد و با توجه به پیچیدگی معادلات حاصل، استفاده از ضریب تحکیم ثابت را توصیه کرده‌اند.<sup>[۲]</sup> اساس بسیاری از تئوری‌های توسعه یافته‌ی تحکیم، مطالعات گیبسون<sup>۳</sup> و همکاران است.<sup>[۳]</sup> گیبسون و همکاران<sup>[۴]</sup> (۱۹۸۱)، معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم را بر اساس اختلاف سرعت حرکت ذرات جامد خاک و سیال منفذی توسعه داده‌اند.

برخلاف تئوری ترازاقی، تئوری تحکیم گیبسون، قابلیت اعمال رفتار غیرخطی ناشی

خاک به عنوان فراگیرترین مصالح ساختمانی از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است. رفتار خاک به عنوان یک ماده‌ی اصطکاکی، از اندرکنش سه فاز تشکیل دهنده‌ی آن متأثر است. در بسیاری از مسائل عملی مکانیک خاک، مانند تحکیم، بررسی رفتار خاک در حالت اشباع کامل مورد نیاز است. در شرایط اشباع کامل، فقط بررسی آثار متقابل دانه‌های جامد خاک و آب موجود در فضای خالی بین حفره‌ها لازم است. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های علم مکانیک خاک، معروف مفهوم تنش مؤثر در خاک‌ها توسط ترازاقی (۱۹۹۶) بوده است، که بر اساس آن، تئوری تحکیم ترازاقی توسعه یافته است.<sup>[۱]</sup> بر اساس تئوری تحکیم ترازاقی، تغییر شکل توده‌ی جامد خاک اشباع مستلزم خروج آب از منفذ بین دانه‌های جامد خاک است. در واقع، معادله‌ی تحکیم یک‌بعدی ترازاقی، یک رابطه‌ی سازگاری بین تغییرات حجم توده‌ی جامد خاک و تغییرات حجم آب منفذی است، که به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:<sup>[۱]</sup>

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن،  $u$  و  $c_v$  به ترتیب اضافه فشار آب منفذی و ضریب تحکیم هستند.

تاریخ: دریافت ۱۱/۱۰/۱۴۰۱، اصلاحیه ۳۰/۷/۱۴۰۱، پذیرش ۱۸/۱۰/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60990.3136

استناد به این مقاله:

اوریا، احد (۱۴۰۲). «روشی برای حل مسائل تحکیم غیرخطی با استفاده از مفهوم حالت آشتفتگی»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۲، ص. ۴۷-۳۹.

مثنا،  $k$  ضریب نفوذپذیری و  $k_0$  ضریب نفوذپذیری مبتدا در نسبت تخلخل  $b$  و  $M$  شیب نمودار ضریب نفوذپذیری در برابر تخلخل در مقیاس نیمه لگاریتمی هستند. عباسی و همکاران (۲۰۰۷)،<sup>[۷]</sup> و آن - فنگ<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۱۵]</sup> نشان داده‌اند که با اعمال معادله‌های ۳ و ۴ در معادله‌های ۲ و ۱، می‌توان غیرخطی بودن مشخصات خاک را به صورت رابطه‌ی ۵ وارد معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم ترازاقی کرد:

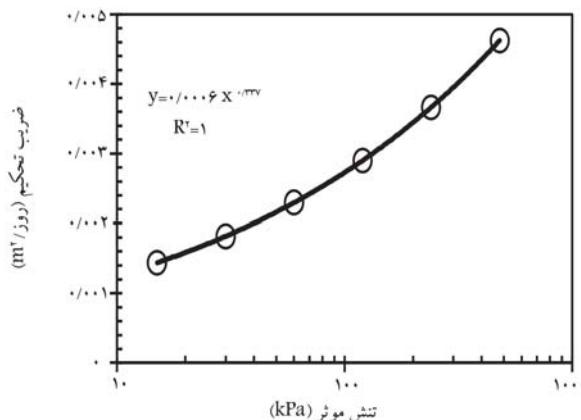
$$c_v(\sigma') \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

که در آن،  $c_v(\sigma')$  ضریب تحکیم غیرخطی است، که مطابق معادله‌ی ۶، تابعی از سطح تنش مؤثر است:<sup>[۱۵, ۷]</sup>

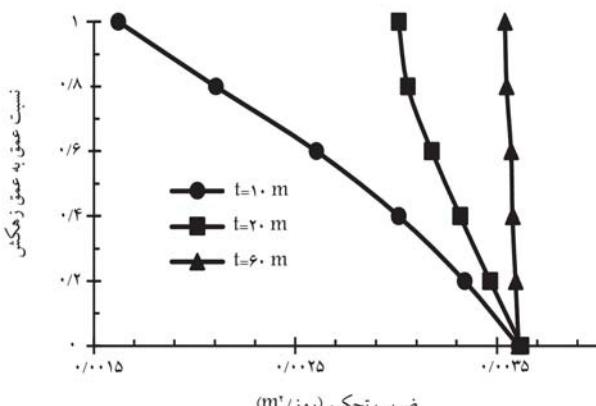
$$c_v(\sigma') = \frac{2/3(1+e_0)}{c_c \gamma_w} \sigma'^{1-\frac{c_c}{M}} \quad (6)$$

معادله‌ی دیفرانسیل نشان داده شده در رابطه‌ی ۵، غیرخطی است و حل آن، نیاز به فرایند ریاضی پیچیده‌ی دارد. با توجه به پیچیدگی روش‌های تحلیلی، حل معادله‌ی ۶ بیشتر با استفاده از روش‌های عددی صورت می‌گیرد.

در شکل ۱، تغییرات ضریب تحکیم برای یک نقطه از نمونه‌ی خاک رس سیلیتی، که در آزمایش تحکیم هیدرولیکی توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷)،<sup>[۷]</sup> اندازه‌گیری شده است، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تغییرات ضریب تحکیم به صورت تابعی پیوسته بوده و مقادیر اولیه و نهایی آن قبل از شروع تحکیم و بعد از تکمیل آن مشخص شده است. در شکل ۲، نیز تغییرات ضریب تحکیم در عمق نمونه‌ی خاک



شکل ۱. تغییرات ضریب تحکیم براساس تنش مؤثر برای نمونه‌ی رس سیلیتی.<sup>[۷]</sup>



شکل ۲. تغییرات ضریب تحکیم طی فرایند تحکیم در عمق نمونه‌ی رس سیلیتی.<sup>[۷]</sup>

از تغییرات مشخصات خاک، شامل تغییرات ضریب‌های نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک و نیز رفتار غیرخطی هندسی ناشی از تغییرات ضخامت لایه‌ی خاک را دارد. کرنتی و باتاجلیو<sup>۸</sup> (۱۹۹۴)،<sup>[۸]</sup> تحکیم غیرخطی خاک‌های رسی را مطالعه و روش‌های تحلیلی برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی تحکیم ارائه کرده‌اند. عباسی و همکاران (۲۰۰۷)،<sup>[۷]</sup> تغییرات تراکم‌پذیری و نفوذپذیری خاک را طی فرایند تحکیم در آزمایشگاه بررسی و روشی تقریبی برای تعیین درصد تحکیم در شرایط غیرخطی ارائه کرده‌اند. همچنین، ایشان بر اساس روش نقاطلات محدود، روشی برای حل معادله‌ی غیرخطی تحکیم ارائه کرده‌اند. توفیق و اوریا (۲۰۰۹)،<sup>[۸]</sup> نیز روشی برای حل معادلات غیرخطی تحکیم تحت بارگذاری متنابع ارائه کرده‌اند، که با استفاده از نوعی نگاشت در فضای زمان، تئوری تحکیم ترازاقی را برای استفاده در شرایط بارگذاری متنابع تعمیم داده‌اند. ابولنژا و پندر<sup>۹</sup> (۲۰۱۲)،<sup>[۹]</sup> با تغییر نمودارهای درصد تحکیم ترازاقی، روشی برای اعمال آثار تغییرات مشخصات خاک طی فرایند تحکیم در جواب‌های معادله‌ی تحکیم ارائه داده‌اند. بو<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۱۰]</sup> بر اساس آنالیزهای حذی، روشی برای حل معادله‌ی غیرخطی تحکیم ارائه داده‌اند، که علاوه بر تغییرات مشخصات خاک، تأثیرگسترش اضافه فشار آب منفذی را در نتایج اعمال می‌کند. مطالعات دیگری نیز در زمینه‌ی تحکیم غیرخطی صورت گرفته است، که بیشتر آن‌ها بر اساس تئوری تحکیم گیبسون بوده است، که با توجه به پیچیدگی معادلات، روش حل آن‌ها بر اساس روش‌های عددی بوده است.<sup>[۱۱-۱۴]</sup> با توجه به این که بروز نشسته‌های ناشی از تحکیم یک فرایند زمان بر است و نشانه‌های آن بعد از تکمیل پروژه و در زمان بهره‌برداری نمایان می‌شود، امکان اصلاح و بازبینی طرح محدود است. از این‌رو، ارائه‌ی روش‌هایی که به سادگی امکان اعمال شرایط غیرخطی در محاسبات و تعیین دقیق نشسته‌ها را فراهم کنند، ضروری است. در پژوهش حاضر، روشی برای حل مسئله‌ی تحکیم غیرخطی ناشی از تغییرات مشخصات مصالح و ضخامت لایه‌ی خاک ارائه شده است، که با استفاده از تئوری ترکیب منطقی، جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم را از ترکیب جواب‌های معادله‌ی تحکیم خطی ترازاقی در دو حالت مبنای اولیه و نهایی تعیین می‌کند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. تحکیم غیرخطی یک بعدی

رابطه‌ی حاکم بر ضریب تحکیم در معادله‌ی ۱، به صورت تابعی از ضریب‌های نفوذپذیری و تراکم‌پذیری حجمی خاک است، که مطابق رابطه‌ی ۲ است:<sup>[۱]</sup>

$$c_v = \frac{(1+e)k}{a_v \gamma_w} \quad (2)$$

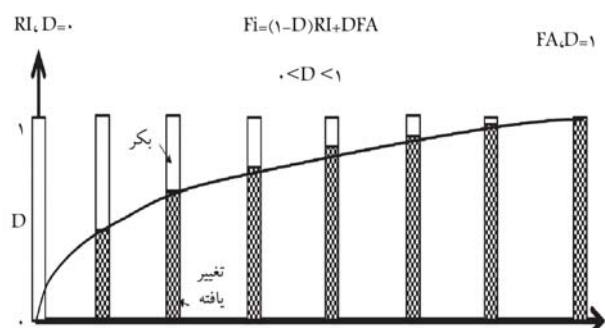
که در آن،  $e$ ،  $k$ ،  $a_v$ ،  $\gamma_w$  به ترتیب: نسبت تخلخل، ضریب نفوذپذیری، نشانه‌ی فشردگی در فضای تنش - نسبت تخلخل در مقیاس معمولی و وزن مخصوص سیال منفذی (آب) هستند.

با فرض تراکم ناپذیری سیال منفذی، معادله‌ی ۲، تابعی از نسبت تخلخل و ضریب نفوذپذیری است، که هر دو آن‌ها تابع تنش مؤثر هستند (روابط ۳ و ۴):<sup>[۱۵]</sup>

$$e = a - c_c \log \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (3)$$

$$e = b + M \log \left( \frac{k}{k_0} \right) \quad (4)$$

که در آن‌ها،  $c_c$  نشانه‌ی فشردگی در مقیاس نیمه لگاریتمی،  $\sigma'$  تنش مؤثر،  $\sigma$  تنش مؤثر مبنای، که برابر یک واحد تنش در نظر گرفته می‌شود،  $a$  نسبت تخلخل در تنش



### شكل ٣. مفهوم حالت آشفتگی.

ولیهی خاک (RI) در نظر گرفته می‌شود. در ابتدای تحکیم، مقدار تنش مؤثر در یکشتر قسمت‌های لایه به مقدار تنش مؤثر اولیه نزدیک است؛ ولی با افزایش درصد تحکیم، تنش مؤثر در بیشتر قسمت‌های لایه به تنش مؤثر نهایی نزدیک می‌شود. در فر زمانی بین زمان‌های اولیه و نهایی، مشخصاً خاک می‌تواند به صورت میانگینی ز مشخصات خاک در دو حالت اولیه و نهایی، بیان شود.

از آن جایی که فرایند تحریک، تابع مشخصات خاک است، درصد تحریک در مربايط غیرخطی نیز تابع درصد تحریک در دو شرایط اولیه و نهایی خواهد بود. در توجه با توجه به توضیحات اخیر، تعمیم مفهوم حالت آشفته به مسئله‌ی تحریک غیرخطی، با مشخصات مصالح و خصامت متغیر به صورت راطیه‌ی  $\lambda$  خواهد بود: <sup>[۲۳]</sup>

$$U_{NL}(t) = DU_{LFA}(t) + (1 - D)U_{LRI}(t) \quad (\lambda)$$

در آن،  $U_{NL}$  متوسط درصد تحریک در تحلیل غیرخطی با ضخامت و ضریب تحریک متغیر،  $ULRI$  متوسط درصد تحریک در تحلیل خطی با ضریب تحریک و ضخامت ثابت برابر با مقادیر اولیه، نظریتش مؤثر در زمان قبیل از شروع تحریک و  $ULFA$  متوسط درصد تحریک خطی با ضریب تحریک و ضخامت ثابت برابر با مقادیر نهایی نظریتش مؤثر در زمان اتمام تحریک هستند.

مهم‌ترین بخش استفاده از مفهوم حالت آشتفتگی برای حل مسائل مختلف، عین تابع حالت است. روش‌های مختلفی مانند فرمول‌بندی ریاضی یا مشاهده‌های زمایشگاهی برای تعیین تابع حالت استفاده می‌شود. با توجه به این که هدف پژوهش حاضر، حل معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم است، لذا از روش فرمول‌بندی ریاضی برای تعیین تابع حالت استفاده شده است. برای این مظنهور با استفاده از [۱۶] بسطی، ۸، ص: تابع حالت را به صورت اطمه، ۹، سازنده، ۱۰، می‌نامد.

$$D = \frac{U_{NL} - U_{LRI}}{U_{LFA} - U_{LRI}} \quad (1)$$

توجه به رابطه‌ی اخیر، برای تعیین فرم تابع حالت، مسئله‌ی تحکیم باید در سه حالت غیرخطی با ضریب تحکیم و ضخامت متغیر ( $U_{NL}$ )، خطی با مشخصات ولیه‌ی ثابت ( $U_{LRI}$ ) و خطی با مشخصات نهایی ثابت ( $U_{LFA}$ ) تحلیل شود. برای تحلیل‌های خطی از جواب‌های تئوری تحکیم ترازاقی استفاده می‌شود، ولی برای تحلیل تحکیم غیرخطی از روش تفاضلات محدود برای تعیین جواب‌های معادله‌ی ۵ استفاده شده است.

### ۳.۱ حل معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم با استفاده از روش فاصله‌ی ایجاد

استفاده از روش تقاضلات محدود می‌توان معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم احرا. ک.د. د. شکا، ۴، شیکه؛ تقاضلات محدود د، دامنه؛ زمان و مکان، که

در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقدار ضریب تحریم در هر نقطه از توده‌ی خاک در زمان‌های مختلف، تابع تنش مؤثر است و مقادیر متفاوتی خواهد داشت؛ ولی مقادیر آن بین دو مقدار اولیه برابر با ضریب تحریم نظر تنش مؤثر قبل از شروع تحریم و مقدار نهایی، که برابر ضریب تحریم نظر تنش مؤثر پس از تکمیل فرایند تحریم است، خواهد بود.

در واقع شرایط تنش در توده‌ی خاک در هر زمانی بعد از شروع تحکیم و قبل از تکمیل آن، شامل شرایط تنش نهایی در مرز مجاور زهکش و شرایط تنش اولیه در نقاط نزدیک به مرز نفوذ‌نایابی خواهد بود، که با گذشت زمان مقدار تنش مؤثر در تمامی نقاط به مقدار تنش مؤثر نهایی نزدیک خواهد شد، که نشان دهنده ناهمگن بودن توده‌ی خاک در حال تحکیم است.

بر اساس مفهوم حالت آشفته‌گی،<sup>۱۶</sup> مشخصات توده‌ی خاک غیرهمگن ناشی از تغییرات تنفس را می‌توان به صورت میانگین وزن دار مشخصات قسمت‌های مختلف آن بیان کرد. همچنین رفتار یک محیط غیرهمگن را نیز می‌توان به صورت ترکیبی از رفتارهای مختلف های مختلف محیط غیرهمگن بیان کرد. در نتیجه، اگر بتوان جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم را به صورت ترکیبی غریب‌خطی از جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل خطی تحکیم ترازاقی در دو شرایط اولیه و نهایی قبل و بعد از تحکیم بیان کرد، در این صورت می‌توان تئوری تحکیم ترازاقی را به شرایط غریب‌خطی، تعمیم داد.

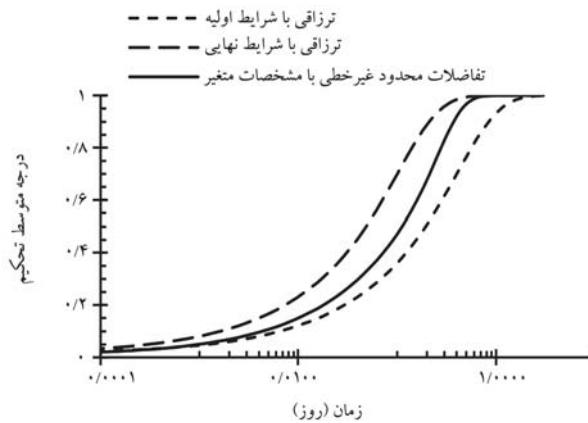
## ۲.۲. مفهوم حالت آشافتگی

بر اساس مفهوم حالت آشناگی، واکنش یک جسم می‌تواند بر اساس ترکیبی از واکنش‌های اجزاء تشکیل دهنده‌ی آن بیان شود. به عبارتی، عوامل محرک خارجی موجب تغییر حالت یک جسم از حالت موجود به یک حالت تعادلی جدید می‌شوند. در عمل ممکن است نقش دقیق اجزاء مختلف جسم در فرایند تغییر حالت جسم به یک حالت پایدار جدید قابل اندازه‌گیری نباشد، ولی در عوض رفتار اولیه مصالح قابل مشاهده و بررسی است و حالت ایده‌آل نهایی را نیز می‌توان از روی رفتار مشاهده شده در طول تغییرات انجام شده تعیین کرد. مفهوم اخیر، ابتدا برای مدل‌سازی مصالح خاکی توسعه داده شده است.<sup>۱۷-۲۲</sup> سپس برای انواع دیگر مسائل ژئوتکنیک، مانند تحریک خاک‌های اشیاع<sup>۲۳</sup> و فروریش خاک‌های غیراشیاع<sup>۲۴</sup> نیز استفاده شده است.

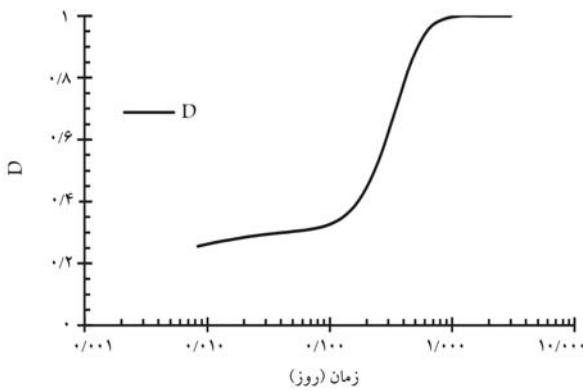
بر اساس مفهوم حالت آشفته‌گی، پاسخ مصالح در هر حالت دلخواه بین دو حالت مرجع اولیه‌ی  $RI$  و نهایی  $FA$ ، می‌تواند با استفاده از یک تابع حالت مناسب، به صورت ترکیبی از پاسخ‌های مصالح در دو حالت مرجع اخیر به صورت رابطه‌ی اساسی، ۷ بیان شود:<sup>[۱۶]</sup>

$$F_i = DFA + (\lambda - D)RI \quad (4)$$

که در آن،  $F_i$  پاسخ مصالح در هر حالت دلخواه و  $D$  تابع حالت است. برای تطبیق مفهوم حالت آشتفتگی با مسئله‌ی تحقیم، در شکل ۳ مفهوم حالت آشتفتگی به صورت شماتیک نشان داده شده است. با افزایش تنش مؤثر در عمق لایه‌ی خاک، مشخصات خاک نیز تغییر می‌کند. به عنوان یک روش بسیار ساده، مشخصات قسمت‌هایی از خاک که نزدیک زهکش است و تنش مؤثر در آن قسمت‌ها به تنش مؤثر نهایی نزدیک است، برابر مشخصات خاک در شرایط نهایی ( $FA$ ) و مشخصات قسمت‌هایی که در مجاورت مرز نفوذناپذیر قرار داشته و مقدار تنش، مؤثر دارند، آن قسمت‌ها به تنش اولیه نزدیک بوده است، مثباهه مشخصات



شکل ۵. نتایج معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم در دو حالت خطی اولیه و نهایی با ضخامت‌ها و ضرایب تحکیم متفاوت ولی ثابت و غیرخطی با ضخامت و ضریب تحکیم متغیر.

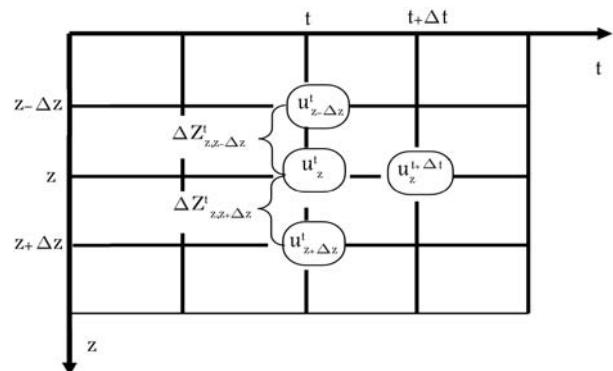


شکل ۶. فرم تابع حالت برای مسئله‌ی تحکیم غیرخطی.

۱۰ مترمربع بر روز در شرایط اولیه (RI)، نتایج یک تحلیل خطی دیگر با ضخامت ثابت ۰/۵ متر و ضریب تحکیم ثابت ۱ مترمربع بر روز در شرایط نهایی (FA) و همچنین نتایج شامل تحلیل غیرخطی با ضریب تحکیم و ضخامت متغیر است، که در آن در اثر تکمیل فرایند تحکیم و افزایش تنش مؤثر، ضریب تحکیم از مقدار اولیه‌ی ۱/۰ مترمربع بر روز به مقدار نهایی ۰/۵ مترمربع بر روز و ضخامت لایه از مقدار اولیه‌ی ۱ متر به مقدار نهایی ۰/۵ متر رسیده (Fi) است.

مطابق شکل ۵، در ابتدای فرایند تحکیم، نتایج تحلیل غیرخطی مطابق بر نتایج تحلیل خطی با ضریب تحکیم و ضخامت اولیه بوده و با افزایش زمان به سمت جواب‌های تحلیل خطی با ضریب تحکیم و ضخامت نهایی میل کرده و در نهایت بر آن منطبق شده است. لذا می‌توان توجه گرفت که مفهوم حالت آشنتگی در مورد جواب‌های مسئله‌ی غیرخطی تحکیم نیز صدق می‌کند. مفهوم حالت آشنتگی برای مسائل تابع زمان نیز قبلاً استفاده شده است.<sup>[۱۹]</sup>

در شکل ۶، نمودار تابع حالتی که نمودار درصد تحکیم غیرخطی با ضریب تحکیم و ضخامت متغیر را به دو نمودار درصد تحکیم خطی در شرایط اولیه (RI) و نهایی (FA)، که توسط رابطه‌ی ۹ محاسبه شده است، مشاهده می‌شود. فرم تابع نشان داده شده در شکل ۶ تا حدودی مشابه توابع سیگموئید<sup>۹</sup> یا سیگماوار است. توابع سیگموئید کاربرد زیادی در هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و اقتصاد دارند.<sup>[۲۵]</sup> چندین نوع معادله‌ی ریاضی برای تولید توابع سیگموئید کاربرد دارند، که یکی از کلی‌ترین و ساده‌ترین فرم‌های آن مطابق رابطه‌ی ۱۵ است، که در



شکل ۷. شبکه‌بندی تفاضلات محدود لایه‌ی خاک در فضای زمان و مکان.

برای گسسته‌سازی معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم غیرخطی استفاده شده است، مشاهده می‌شود. با استفاده از روش صریح، معادله‌ی ۵ به صورت رابطه‌ی ۱۰ گسسته‌سازی شده است:<sup>[۸]</sup>

$$u_z^{t+Δt} = α_{z-Δz}^t u_{z-Δz}^t + α_{z+Δz}^t u_{z+Δz}^t + (1 - α_{z-Δz}^t - α_{z+Δz}^t) u_z^t \quad (10)$$

که در آن،  $α_{z-Δz}^t$  از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$α_{z-Δz}^t = \frac{c_v z_{z-Δz}^t Δt}{(ΔZ_{Z-Δz}^t)^2} \quad (11)$$

که در آن،  $ΔZ_{Z-Δz}^t$  مطابق رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

$$c_{v,z,z-Δz}^t = \frac{1/3(1 + e_{z,z-Δz}^t)}{c_c γ_w} \circ \frac{a-b}{M} \left[ \frac{(\sigma_{z-Δz}^{it}) + (\sigma_z^{it})}{2} \right]^{(1 - \frac{c_c}{M})} \quad (12)$$

$$e_{z,z-Δz}^t = e_{z,z-Δz}^{t-Δt} - c_c \log \left[ \frac{(\sigma_{z-Δz}^{it}) + (\sigma_z^{it})}{(\sigma_{z-Δz}^{it-Δt}) + (\sigma_z^{it-Δt})} \right] \quad (13)$$

که در آن‌ها،  $e_{z,z-Δz}^t$  از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$ΔZ_{Z-Δz}^t = ΔZ_{Z-Δz}^{t-Δt} \left[ 1 - \frac{e_{z,z-Δz}^t - e_{z,z-Δz}^{t-Δt}}{1 + e_{z,z-Δz}^t} \right] \quad (14)$$

نتایج روش تفاضلات محدود، که به صورت صریح فرمول‌بندی شده‌اند، به صورت مشروط هم‌گرا هستند و شرط هم‌گرا بیان‌ها،  $α_z^t < 1$  است. باید توجه داشت که با افزایش درجه‌ی تحکیم و افزایش تنش مؤثر در هر قسمت از شبکه، مقادیر  $α_z^t$  نیز تغییر می‌یابد. لذا جهت بررسی شرط هم‌گرا بیان جواب‌ها، کنترل مقادیر اولیه و نهایی  $α_z^t$ ، که نظری تنش مؤثر قبل و بعد از تکمیل تحکیم است، ضروری است. علاوه‌بر شرط هم‌گرا بیان، با توجه به غیرخطی بودن معادله‌ی حاکم، انتخاب گام‌های زمانی کوچک جهت افزایش دقت نتایج ضروری است.

#### ۴. استخراج تابع حالت

در شکل ۵، نتایج سه سری جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم مشاهده می‌شود، که شامل نتایج یک تحلیل خطی با ضخامت ثابت ۱ متر و ضریب تحکیم ثابت

در نمودارهای شکل ۷، روابط ۱۸ الی ۲۰ برای تعیین پارامترهای تابع حالت ارائه شده‌اند:

$$\alpha = ۲,۰۳۶ C H_r^{۱,۰۲۳۹۵} \quad (۱۸)$$

$$\beta = ۰,۰۲ \ln C H_r + ۰,۱۲۶ \quad (۱۹)$$

$$\delta = ۰,۴۱ e^{-۰,۰۴ C H_r} \quad (۲۰)$$

در نتیجه با اعمال روابط ۱۸ الی ۲۰ در رابطه‌ی ۱۵ و جایگذاری آن‌ها در رابطه‌ی ۸، متوسط درصد تحکیم غیرخطی یک لایه با ضریب تحکیم و ضخامت متغیر به صورت رابطه‌ی ۲۱ قابل محاسبه است:

$$U_{NL}(t) = \left( \frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta U_{LFA}(t) + \left( 1 - \left( \frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \right) U_{LRI}(t) \quad (۲۱)$$

که در آن،  $U_{LRI}$  و  $U_{LFA}$  از معادله‌ی تحکیم ترزاکی تعیین می‌شوند، که برای ساده‌سازی بیشتر، می‌توان از رابطه‌ی تقریبی هانسن<sup>۱۱</sup> [۲۶] مطابق روابط ۲۲ و ۲۳ استفاده کرد:

$$U_{LRI}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^m} e^{M^m T_{vRI}} \simeq \sqrt{\frac{2 T_{vRI}^2}{1 + 2 T_{vRI}}} \quad (۲۲)$$

$$U_{LFA}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^m} e^{M^m T_{vFA}} \simeq \sqrt{\frac{2 T_{vFA}^2}{1 + 2 T_{vFA}}} \quad (۲۳)$$

که در آن‌ها،  $M = ۰,۵\pi(2m+1)$  است و  $T_{vRI}$  و  $T_{vFA}$  مطابق روابط ۲۴ و ۲۵ محاسبه می‌شوند:

$$T_{vRI} = \frac{c_{vRI} t}{H_{dRI}} \quad (۲۴)$$

$$T_{vFA} = \frac{c_{vFA} t}{H_{dFA}} \quad (۲۵)$$

در نهایت با جایگذاری روابط ۲۲ و ۲۳ در رابطه‌ی ۲۱، درصد تحکیم متوسط در یک لایه خاک با تراکم پذیری، نفوذپذیری و ضخامت متغیر به صورت رابطه‌ی ۲۶ محاسبه می‌شود:

$$U_{NL}(t) = \left( \frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \left( \sqrt{\frac{2 T_{vFA}^2}{1 + 2 T_{vFA}}} \right) + \left( 1 - \left( \frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \right) \left( \sqrt{\frac{2 T_{vRI}^2}{1 + 2 T_{vRI}}} \right) \quad (۲۶)$$

### ۳. راستی آزمایی روش ارائه شده

۱.۳. راستی آزمایی بر اساس نتایج روش تفاضلات محدود در جدول‌های ۱ الی ۳، ضریب تحکیم و ضخامت‌های اولیه و نهایی سه لایه‌ها خاک و پارامترهای مدل ارائه شد، که بر اساس مشخصات اولیه و نهایی لایه‌ها محاسبه شده‌اند، ارائه شده‌اند. آنالیزهای انجام شده با فرض زهکشی یک طرفه انجام گرفته است. مشخصات خاک‌ها به گونه‌ی انتخاب شده است که مقدار  $CH_r$  بزرگ‌تر، کوچک‌تر و برابر ۱ بوده‌اند. در فرایند تحکیم غیرخطی لایه‌ی خاک با مشخصات و ضخامت متغیر، سه حالت ممکن است واقع شود: در نمونه‌هایی که  $CH_r$  بزرگ‌تر از ۱ است، با تکمیل فرایند تحکیم، تغییرات مشخصات مصالح

$$D = \left( \frac{1}{1 + e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \quad (۱۵)$$

که در آن،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  پارامترهای مدل و بدون بعد هستند و  $T_{vRI}$  عامل زمان و بدون بعد است و بر اساس مشخصات اولیه‌ی خاک طبق رابطه‌ی ۱۶ تعیین می‌شود:

$$T_{vRI} = \frac{c_{vRI} t}{H_{dRI}} \quad (۱۶)$$

که در آن،  $c_{vRI}$  و  $H_{dRI}$  به ترتیب ضریب تحکیم و طول مسیر زهکشی لایه‌ی خاک در شرایط تنش مؤثر اولیه قبل از شروع تحکیم و  $t$  زمان هستند.

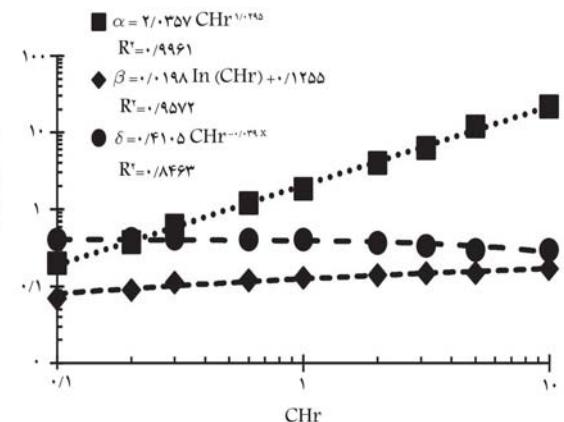
با استفاده از اصول آنالیز ابعادی و قضیه‌ی بی-پی - بوكیتگهام<sup>۱۰</sup> پارامتر بدون بعد دیگری تعریف شده است تا پارامترهای  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  و بر اساس دو پارامتر بدون بعد، که بیانگر مشخصات خاک و ضخامت لایه در شرایط اولیه و نهایی هستند، تعریف شوند. چهار پارامتر ضریب تحکیم در شرایط تنش اولیه، ضریب تحکیم در شرایط تنش نهایی، طول مسیر زهکشی اولیه، و طول مسیر زهکشی نهایی در مسئله‌ی تحکیم غیرخطی تأثیرگذار هستند. همچنین دو کمیت فیزیکی زمان و طول نیز در تحلیل‌های مذکور دخیل هستند. لذا طبق قضیه‌ی بی-پی - بوكیتگهام، دو پارامتر بدون بعد مستقل برای مسئله‌ی مذکور قابل تعریف است. اولین پارامتر بدون بعد مطابق رابطه‌ی ۱۵ است و همان عامل زمان برای مشخصات اولیه‌ی مسئله است. پارامتر بدون بعد دوم به صورت رابطه‌ی ۱۷ تعریف می‌شود، که در واقع نشان‌دهنده‌ی روند تغییرات ضریب تحکیم و ضخامت لایه‌ی خاک است.

$$CH_r = \frac{c_{vFA}}{c_{vRI}} \left( \frac{H_{dRI}}{H_{dFA}} \right)^\beta \quad (۱۷)$$

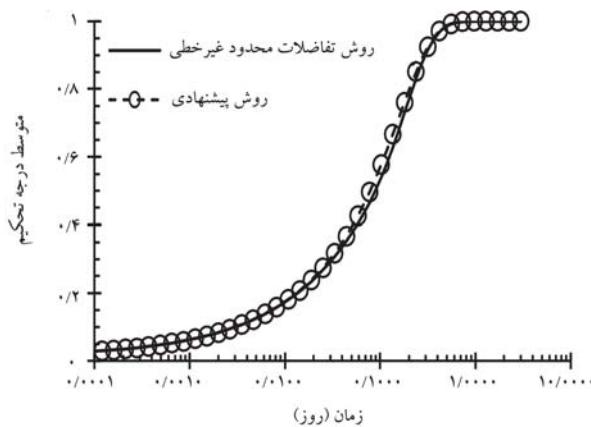
که در آن،  $c_{vFA}$  و  $c_{vRI}$  به ترتیب ضریب تحکیم و طول مسیر زهکشی در شرایط تنش بعد از تکمیل فرایند تحکیم هستند.

برای تعیین پارامترهای مدل از روش کمینه‌ی مرتعات استفاده شده است. برای این منظور، تحلیل‌های مختلف با مقدار مختلف  $CH_r$  انجام شده و با استفاده از روش کمینه‌ی مرتعات، مقدار بهینه‌ی  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  که کمترین اختلاف بین درصد تحکیم محاسبه شده با روش پیشنهادی در پژوهش حاضر (رابطه‌ی ۸) و روش تفاضلات محدود (رابطه‌ی ۱۰) را نتیجه می‌دهند، تعیین شده‌اند.

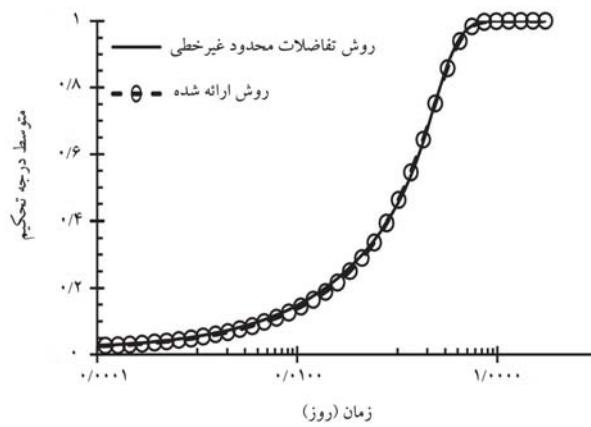
همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، سه پارامتر مدل ارائه شده، همبستگی مناسبی با توابع ریاضی دارند. با توجه به نتایج آنالیزهای عددی نشان داده شده



شکل ۷. پارامترهای تابع حالت برای مسئله‌ی تحکیم غیرخطی.



شکل ۸. مقایسه نتایج روش ارائه شده با نتایج روش عددی با ضخامت متغیر.



شکل ۹. مقایسه نتایج روش ارائه شده با نتایج روش عددی با مشخصات متغیر.

در جدول ۱، مشخصات لایه‌ی خاکی ارائه شده است که در اثر فرایند تحکیم، ضخامت آن به مقدار ۵۰٪ کاهش یافته، ولی ضریب تحکیم آن ثابت مانده است. علاوه‌نی شرایطی زمانی رخ می‌دهد که پارامترهای  $c_c$  و  $M$  خاک با هم برابر باشند، که در آن صورت، منشأ رفتار غیرخطی در فرایند تحکیم، فقط تغییر ضخامت لایه‌ی خاک است، که در واقع یک مسئله‌ی غیرخطی هندسی است.

در شکل ۸، مقایسه نتایج روش ارائه شده برای لایه‌یی با مشخصات جدول ۱، با نتایج روش تفاضلات محدود غیرخطی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج روش ارائه شده تطابق مناسبی با نتایج روش تفاضلات محدود دارد. در آنالیز انجام شده، اختلاف روش ارائه شده با روش عددی، کمتر از ۳٪ بوده است. با توجه به کاهش ۵۰ درصدی ضخامت لایه در زمان تحکیم، مسئله‌ی مذکور شدیداً غیرخطی بوده است. با توجه به سهولت روش ارائه شده، خطای محاسبات نیز قابل صرف نظر است.

در جدول ۲، مشخصات لایه‌ی خاکی در نظر گرفته شده است که در اثر فرایند تحکیم، ضریب تحکیم آن ۴ برابر کاهش یافته است. در تحلیل ذکر شده از کاهش ضخامت لایه‌ی خاک صرف نظر شده است، تا منشأ غیرخطی بودن مسئله‌ی خاک تغییرات مشخصات خاک باشد و عامل غیرخطی هندسی وجود نداشته باشد. نتایج تحلیل‌های انجام شده با روش ارائه شده و روش عددی برای مشخصات جدول ۲ نیز در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

در تحلیل‌های اخیر، بیشینه‌ی مقدار اختلاف نتایج روش ارائه شده با روش تفاضلات محدود کمتر از ۱٪ بوده است. نتایج آنالیزهای ذکر شده نشان می‌دهد که

جدول ۱. مشخصات لایه‌ی خاک ۱ برای راستی آزمایی عددی.

مقدار	واحد	کمیت
۱	متر	ضخامت اولیه
۰/۵	متر	ضخامت نهایی
۱	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم اولیه
۱	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم نهایی
۴	بدون بُعد	$CH_r$
۸/۵	بدون بُعد	$\alpha$
۰/۱۵	بدون بُعد	$\beta$
۰/۳۵	بدون بُعد	$\delta$

جدول ۲. مشخصات لایه‌ی خاک ۲ برای راستی آزمایی عددی.

مقدار	واحد	کمیت
۱	متر	ضخامت اولیه
۱	متر	ضخامت نهایی
۱	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم اولیه
۰/۲۵	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم نهایی
۰/۲۵	بدون بُعد	$CH_r$
۰/۰۴۵	بدون بُعد	$\alpha$
۰/۱	بدون بُعد	$\beta$
۰/۴	بدون بُعد	$\delta$

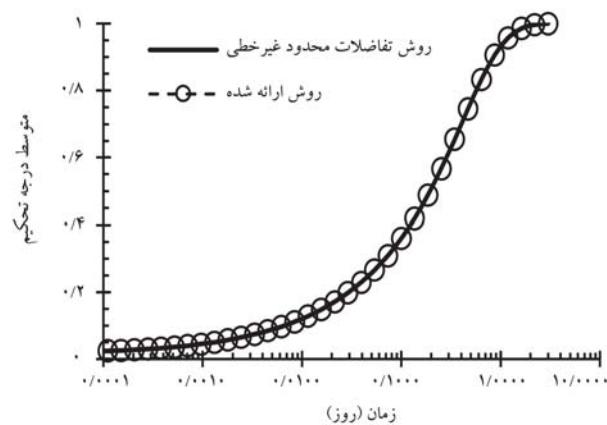
جدول ۳. مشخصات لایه‌ی خاک ۳ برای راستی آزمایی عددی.

مقدار	واحد	کمیت
۱	متر	ضخامت اولیه
۰/۵	متر	ضخامت نهایی
۱	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم اولیه
۰/۲۵	متر مربع بر روز	ضریب تحکیم نهایی
۱	بدون بُعد	$CH_r$
۱/۸۵	بدون بُعد	$\alpha$
۰/۱۳	بدون بُعد	$\beta$
۰/۴۱	بدون بُعد	$\delta$

و ضخامت لایه باعث افزایش سرعت تحکیم می‌شود. در صورتی که  $CH_r$  کوچک‌تر از ۱ باشد، تغییرات مشخصات مصالح و ضخامت لایه باعث کاهش سرعت تحکیم می‌شود. در این شرایط تأثیر تسریع کننده‌ی کاهش ضخامت لایه و ضریب تراکم‌پذیری خاک کمتر از تأثیر کند کننده‌ی کاهش ضریب نفوذ‌پذیری خاک است. همچنین در صورتی که  $CH_r$  برابر ۱ باشد، تأثیر تسریع کننده‌ی کاهش ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ی خاک با تأثیر کند کننده، کاهش ضریب نفوذ‌پذیری خاک خنثی می‌شود و مسئله‌ی تحکیم مشابه تئوری تحکیم ترازاقی خواهد بود. برای بررسی درستی روش ارائه شده، سه حالت ممکن مذکور در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. مشخصات لایه‌ی خاک ۵ برای راستی آزمایی با نتایج آزمایشگاهی.<sup>[۱۰]</sup>

کمیت	واحد	مقدار
ضخامت اولیه	متر	۰,۰۲۲
ضخامت نهایی	متر	۰,۰۲۰
ضریب تحکیم اولیه	متر مربع بر روز	۰,۳۰۲
ضریب تحکیم نهایی	متر مربع بر روز	۰,۳۸۹
$CH_r$		۱,۵
$\alpha$		۳,۰۹
$\beta$		۰,۱۲۴
$\delta$		۰,۳۸۷
بدون بعد		

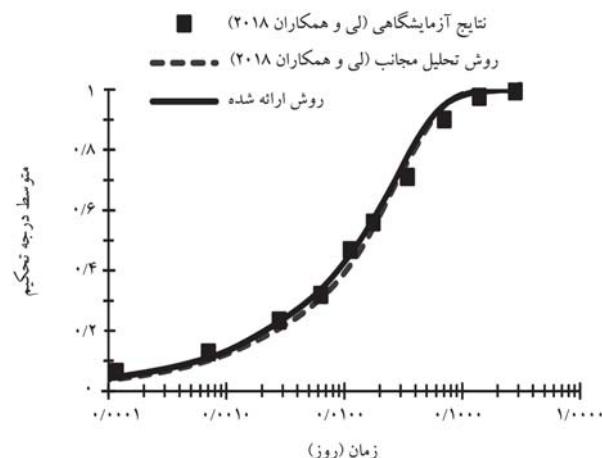


شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج روش عددی با مشخصات متغیر مشابه تغیری ترزاوی.

جدول ۴. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی ارائه شده توسط عباسی و همکاران<sup>[۷] (۲۰۰۷)</sup>

کمیت	واحد	مقدار
ضخامت اولیه	متر	۰,۰۶۵
ضخامت نهایی	متر	۰,۰۵۲
ضریب تحکیم اولیه	متر مربع بر روز	۲,۵۹
ضریب تحکیم نهایی	متر مربع بر روز	۳,۴۶
$CH_r$	بدون بعد	۲,۰۹
$\alpha$	بدون بعد	۴,۳۵
$\beta$	بدون بعد	۰,۱۴
$\delta$	بدون بعد	۰,۳۸

شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط عباسی و همکاران<sup>[۷] (۲۰۰۷)</sup>



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل مجانب ارائه شده توسط بو و همکاران<sup>[۲۰۱۸] (۲۰۱۸)</sup>.

که در دستگاه تحکیم هیدرولیکی آزمایش شده است، ارائه شده است. آزمایش کنونی برای راستی آزمایی روش حل تحکیم غیرخطی بر اساس تحلیل مجانب انجام شده است. نتایج آزمایش مذکور و روش تحلیل مجانب، که با نتایج روش ارائه شده مقایسه شده است، در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۲، نتایج روش ارائه شده، اختلاف ناچیزی با نتایج روش تحلیل مجانب و نیز نتایج آزمایشگاهی داشته است. نتایج روش ارائه شده در مقایسه با نتایج روش تحلیل مجانب، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده است.

روش ارائه شده، می‌تواند با دقت بالایی آثار غیرخطی تغییر مشخصات مصالح را وارد محاسبات کند.

در جدول ۳، نیز مشخصات لایه‌ی خاکی ارائه شده است، که در اثر فرایند تحکیم، ضریب تحکیم آن افزایش، ولی ضخامت آن کاهش یافته است. شرایط اخیر، مشابه تحکیم ترزاوی با ضریب تحکیم و ضخامت ثابت است. نتایج آنالیزهای انجام شده نیز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در این شرایط نیز نتایج روش ارائه شده دقیقاً منطبق بر روش عددی بوده است.

۲.۳. راستی آزمایی بر اساس نتایج آزمایشگاهی و روش‌های دیگر برای مقایسه‌ی بیشتر عملکرد روش ارائه شده، نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط عباسی و همکاران<sup>[۲۰۰۷] (۲۰۰۷)</sup> و همچنین بو<sup>[۱۲]</sup> و همکاران<sup>[۲۰۱۸] (۲۰۱۸)</sup> استفاده شده است. در جدول ۴، مشخصات نمونه‌ی رس سیلیستی (نمونه‌ی ۱) که توسط عباسی و همکاران<sup>[۷] (۲۰۰۷)</sup> بر روی آن آزمایش تحکیم هیدرولیکی صورت گرفته است، ارائه شده است.

در شکل ۱۱، نتایج روش ارائه شده به همراه نتایج آزمایشگاهی عباسی و همکاران<sup>[۷] (۲۰۰۷)</sup> مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج روش ارائه شده تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشته است.

در جدول ۵، مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی که توسط بو و همکاران<sup>[۲۰۱۸] (۲۰۱۸)</sup>

## ۴. نتیجه‌گیری

در دو شرایط اولیه و نهایی قابل تعیین است. در روش ارائه شده علاوه بر این‌که مشخصات خاک متغیر در نظر گرفته می‌شود، تعییرات ضخامت لایه‌ی خاک و طول مسیر زهکشی نیز وارد محاسبات می‌شود. با استفاده از روش ارائه شده، می‌توان جواب‌های معادله‌ی تحکیم ترزاوی با ضریب تحکیم و ضخامت ثابت را برای تعیین درصد تحکیم غیرخطی با ضریب تحکیم و ضخامت متغیر استفاده کرد. برای بررسی دقت روش ارائه شده، از روش عددی و نیز نتایج آزمایشگاهی منتشر شده استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج روش مذکور نشان داد که روش اخیر با وجود فرمول بندی ساده، دقت بالایی دارد و بین نتایج آزمایشگاهی و روش عددی، همیستگی کاملی وجود دارد.

در پژوهش حاضر، روشی بر اساس مفهوم حالت‌های آشفتگی برای حل مسئله‌ی غیرخطی تحکیم ارائه شده است، که نتایج تحلیل غیرخطی ناشی از تعییرات تراکم پذیری و نفوذپذیری و نیز ضخامت لایه‌ی خاک را با استفاده از آنالیزهای تحکیم خطی بر اساس تئوری ترزاوی تعیین می‌کند. نتایج تحلیل غیرخطی به صورت ترکیبی از جواب‌های دو آنالیز خطی با ضرایب تحکیم و ضخامت‌های ثابت در دو شرایط تش اولیه قبل از شروع تحکیم و تش نهایی بعد از تکمیل تحکیم بیان شده است. کلیه‌ی پارامترهای روش ارائه شده بر اساس مشخصات و ضخامت لایه‌ی خاک

## پانوشت‌ها

1. Biot
2. Davis & Raymond
3. Gibson
4. Cornetti & Battaglio
5. Abul-Naga & Pender
6. Bo
7. An-Feng
8. Disturbed State Concept
9. Sigmoid
10. Bockingham- $\pi$
11. Hansen
12. Bo

## منابع (References)

1. Terzaghi, K., Mesri, G. and Peck, R. *Soil Mechanics in Engineering*, 3rd ed., John Wiley (1996).
2. Biot, M.A. "General theory of three dimensional consolidation", *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*, **12**(2), pp. 155-164 (1941).
3. Davis, E.H. and Raymond, G.P. "A non-linear theory of consolidation", *Géotechnique*, **15**(2), pp. 161-173 (1965).
4. Gibson, R.E., England, G.L. and Hussey, M.J.L. "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays", *Géotechnique*, **17**(3), pp. 261-273 (1967).
5. Gibson, R.E., Schiffman, R.L. and Cargill, K.W. "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers", *Canadian Geotechnical Journal, NRC Research Press*, **18**(2), pp. 280-293 (1981).
6. Cornetti, P. and Battaglio, M. "Nonlinear consolidation of soil modeling and solution techniques", *Mathematical and Computer Modelling*, **20**(7), pp. 1-12 (1994).
7. Abbasi, N., Rahimi, H., Javadi, A.A. and et al. "Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability", *Computers and Geotechnics*, **34**(1), pp. 41-52 (2007).
8. Toufigh, M.M. and Ouria, A. "Consolidation of inelastic clays under rectangular cyclic loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(2), pp. 356-363 (2009).
9. Abuel-Naga, H.M. and Pender, M.J. "Modified terzaghi consolidation curves with effective stress-dependent coefficient of consolidation", *Géotechnique Letters*, **2**(2), pp. 43-48 (2012).
10. Bo, L., Ying-Guang, F. and Zhen-Feng, O. "Asymptotic solution for the one-dimensional nonlinear consolidation equation including the pore evolution effect", *International Journal of Geomechanics, American Society of Civil Engineers*, **18**(10), 4018125 (2018).
11. Zhuo, Y., Wang, J., Zheng, Sh. and et al. "Experimental study of one-dimensional nonlinear consolidation of an aquitard under multistage loading", *Journal of Hydrology*, **611**, 127994 (2022).
12. Amiri, A., Toufigh, M.M. and Toufigh, V. "An experimental investigation of the consolidation process under triangular cyclic loading", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **173**(2), pp. 125-132 (2020).
13. Satwik, C.S. and Chakraborty, M. "Numerical analysis of one-dimensional consolidation of soft clays subjected to cyclic loading and non-darcian flow", *Computers and Geotechnics*, **146**, 104742 (2022).
14. Toufigh, M.M., Sadeghi, J.S.A. and Toufigh, V. "Comparison of radial consolidation behavior of clay under three types of cyclic loading", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **51**(1), pp. 17-33 (2018).
15. Hu, A.-F., Xia, Ch.-Qi., Cui, J. and et al. "Nonlinear consolidation analysis of natural structured clays under time-dependent loading", *Int. J. Geomech*, **18**(2), 4017140 (2018).
16. Desai, C.S., *Mechanics of Materials and Interfaces the Disturbed State Concept*, CRC Press (2000).
17. Desai, C.S. and Wang, Z. "Disturbed state model for porous saturated materials", *International Journal of Geomechanics, American Society of Civil Engineers*, **3**(2), pp. 260-265 (2003).
18. Ouria, A. "Disturbed state concept-based constitutive model for structured soils", *International Journal of Geomechanics*, **17**(7), 04017008 (2017).
19. Ouria, A. and Behboodi, T. "Compressibility of cement treated soft soils", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **47.1**(86), pp. 1-9 (2017).

20. Ouria, A., Ranjbarnia, M. and Vaezipour, D. "A failure criterion for weak cemented soils", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **48.3**(92), pp. 13-21 (2018).
21. Farsijani, A. and Ouria, A. "Constitutive modeling the stress-strain and failure behavior of structured soils based on HISS model", *MCEJ*, **21**(4), pp. 231-250 (2021).
22. Farsijani, A. and Ouria, A. "A constitutive model for structured soils based on HISS model and disturbed state concept", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **54**(7), p. 21 (2022).
23. Ouria, A., Desai, C.S. and Toufigh, V. "Disturbed state concept-based solution for consolidation of plastic clays under cyclic loading", *International Journal of Geomechanics*, **15**(1), 04014039 (2015).
24. Farsijani, A. and Ouria, A. "Wetting-induced collapse behavior of unsaturated soils in disturbed state concept framework", *International Journal of Geomechanics, American Society of Civil Engineers*, **22**(4), 4022014 (2022).
25. Kucharavy, D. and De Guio, R. "Application of S-shaped curves", *Procedia Engineering*, **9**, pp. 559-572 (2011).
26. Sharifi, S., Abrishami, S. and Gandomi, A.H. "Consolidation assessment using multi expression programming", *Applied Soft Computing*, **86**, 105842 (2020).



# تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی $60^\circ$

وحید بابایی نژاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران - آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

باک خورسندی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندنسی عمران شریف (پیاپی ۱۴۰) دری ۲، ۳۹، ۳۹-۴۰، شماره ۱، ص. ۴۹-۵۷-۵۸، پژوهشی (پژوهشی)

کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب به جای مانده از شیرین‌سازی آب را مستقیماً به دریا تخلیه می‌کنند، که بسیار شورتر از آب دریاست و باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود. استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب، یکی از مهم‌ترین روش‌های برای کاهش آثار زیست‌محیطی پساب‌های مذکور است. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به تخلیه‌ی پساب چکال از نازل دایریه است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از مدل آشفتگی (RNG)  $\epsilon - k$  به شبیه‌سازی پساب چکال تخلیه شده از نازل‌های دایری، مثلث و لوزی پرداخته شده است. پساب به صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $60^\circ$  درجه نسبت به افق در محیط آبی ساکن و پویا تخلیه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه پساب به صورت صفحه‌یی از نازل خارج شود، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین کاهش و در مقابل میزان رقیق‌سازی پساب افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد میزان پخش در لبه‌ی داخلی جت به دلیل وجود بسترهای اثر کواندا، کمتر از میزان پخش در لبه‌ی خارجی جت است.

واژگان کلیدی: آب شیرین‌کن، جت، پساب، پلوم، رقیق‌سازی.

vahidbabaiynejad2@gmail.com  
b.khorsandi@aut.ac.ir

## ۱. مقدمه

احداث کارخانه‌های آب شیرین‌کن در مناطق ساحلی که با مشکل کمبود آب مواجه هستند، به سرعت در حال افزایش است. کارخانه‌های آب شیرین‌کن به دلیل حجم بالای آب دریاها و اقیانوس‌ها، به عنوان یک منبع نامحدود آب شیرین شناخته می‌شوند. کارخانه‌های آب شیرین‌کن، در کنار فوایدی که برای بشر دارند، باعث آسیب زدن به محیط زیست نیز می‌شوند. معمولاً پساب کارخانه‌های آب شیرین‌کن از طریق خروجی‌های تک‌پورتی (مستغرق یا سطحی) یا چند پورتی به دریا بازگردانده می‌شوند. چنین پساب‌هایی ممکن است به منبع اصلی آن‌لودگی دریایی تبدیل شوند، زیرا حاوی نمک با غلظت بالا و همچنین مواد شیمیایی گوناگون هستند.<sup>[۱]</sup> به همین دلیل استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب برای افزایش میزان رقیق‌سازی پساب‌های ذکر شده ضروری است. برای کاهش آثار مخرب پساب‌های شور تولیدی، تخلیه‌ی آن‌ها باید بهگونه‌یی انجام شود که پساب بعد از تخلیه در فاصله‌ی زمانی کوتاهی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۱۰/۱/۶، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱/۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱/۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱/۸

DOI: 10.24200/J30.2022.61005.3137

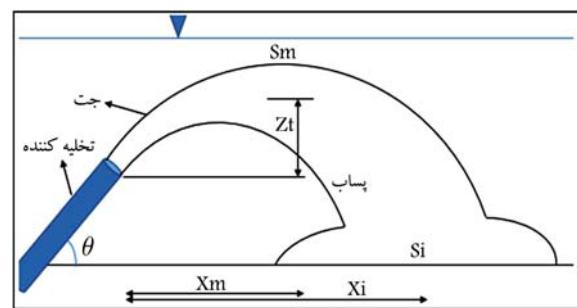
استناد به این مقاله:

بابایی نژاد، وحید و خورسندی، باک (۱۴۰۰/۲). «تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی  $60^\circ$ »، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۲، ص. ۴۹-۵۷-۵۸

۵۷-۴۹

عددی و تجربی به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل دایریهی در محیط پویا پرداختند و دریافتند که جریان محیط باعث افزایش مقدار  $Z_t$  و افزایش میزان رقیق سازی می شود. همچنین ایشان نشان دادند نتایج مدل انتگرالی VISJET، مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.<sup>[۲۲]</sup> عابسی<sup>۴</sup> و رابرتر<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) مطالعات خود را روی رقیق سازی پساب شور چگال تخلیه شده از دیفیوزرهای چندپورتی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن و پویا انجام دادند. آن‌ها مهمن ترین عامل در طراحی دیفیوزرهای چندپورتی را فاصله‌ی دهانه‌ی خروجی از هم دانستند. طبق نتایج ایشان، در صورتی که جت‌ها با هم ادغام شوند، مقدار  $Z_t$  و  $S_i$  در محیط ساکن و پویا کاهش می‌یابد.<sup>[۱۲]</sup> فرناندز<sup>۵</sup> و همکاران<sup>[۱۳]</sup> (۲۰۱۸)، به بررسی استفاده از دیفیوزر در تخلیه‌ی پساب شور و اثر آن در میزان رقیق سازی پساب شور پرداختند و با استفاده از مدل CORMIX ایشان دادند که استفاده از دیفیوزر برای تخلیه‌ی پساب شور حاصل از کارخانه‌های آب شیرین کن، آثار زیست‌محیطی پساب شور را به شدت کاهش می‌دهد. یان<sup>۶</sup> و محمدیان<sup>[۱۴]</sup> (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل‌های ( $\varepsilon$  – k) Standard و (k –  $\varepsilon$ ) RNG به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب چگال با استفاده از نازل‌های چندپورتی پرداختند و دریافتند که مدل‌های عددی، قابلیت خوبی در شبیه‌سازی تخلیه‌کننده‌های چندپورتی دارند. همچنین مدل ( $\varepsilon$  – k) RNG عملکرد بهتری در مقایسه با مدل Standard دارد.<sup>[۱۴]</sup> رمضانی و همکاران<sup>[۱۵]</sup> (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل اپن‌فوم، به بررسی تأثیر فاصله‌ی دهانه‌ی نازل (با زاویه‌های تخلیه‌ی ۳۵ و ۴۵ درجه) از بسترهای پرداختند و دریافتند که نزدیکی دهانه‌ی نازل به بستر دریا، تأثیر محسوسی در رفتار پساب تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۴۵ درجه ندارد. اما برای پساب تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۳۵ درجه، هنگامی که مقدار پارامتر  $y_0/L_M$  (y<sub>0</sub> ارتفاع نازل از سطح زمین،  $L_M$  مقیاس طولی جت به پلوم) به کمتر از ۱۴٪ می‌رسد، مقدار رقیق سازی کاهش می‌یابد.<sup>[۱۵]</sup> جیانگ<sup>۷</sup> و همکاران، تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۴۵ درجه را بررسی و نتایج مربوط به نازل با هندسه‌های دایره، مربع، لوزی، متقار اردکی و سtarه را با یکدیگر مقایسه کردند. طبق نتایج ایشان، تخلیه‌ی پساب با نازل‌های متقار اردکی و ستاره‌ی، میزان رقیق سازی را نسبت به نازل دایریهی به میزان ۱۵٪ افزایش داد. همچنین استفاده از نازل‌های مربع و لوزی، میزان رقیق سازی را در مقایسه با نازل دایریهی به مقدار قابل ملاحظه‌ی کاهش داده است. همچنین ایشان نشان دادند که تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل متقار اردکی در حالت جریان هم راستا با جت، میزان رقیق سازی را نسبت به نازل با دهانه‌ی دایریهی افزایش

امروزه بیشتر کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب چگال خود را با استفاده از نازل دایریه‌ی تخلیه می‌کنند. هندسه‌ی نازل، یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل است.<sup>[16]</sup> در زمینه‌ی تخلیه‌ی پساب چگال، مطالعات بسیاری انجام شده و بیشتر آن‌ها مربوط به تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل دایریه‌ی بوده است. با توجه به این‌که مطالعات بسیار کمی در مورد تأثیر هندسه‌ی نازل برای تخلیه‌ی پساب چگال انجام شده است، در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار رقیق‌سازی و مشخصات پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی (اسکن و پویا) پرداخته شده است. برای این منظور، تخلیه‌ی پساب از نازل با هندسه‌های دایره، مثلث و لوزی در شرایط یکسان مدل‌سازی و مقادیر  $S_i/F$ ،  $S_m/F$ ،  $Z_t/F.De$  و  $X_i/F.De$  مقاسه شده‌اند.



شکل ۱. مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل در حالت جت و پلوم.

پلوم با سیال محیط پذیرنده باعث کاهش غلظت پساب می‌شود.<sup>[۴]</sup> هر چه زاویه‌ی نازل نسبت به افق بیشتر باشد، ارتفاع سقوط پلوم بیشتر می‌شود؛ که این موضوع باعث اختلاط بیشتر پساب با سیال محیط پذیرنده و در تیجه کاهش غلظت پساب می‌شود.<sup>[۵]</sup> میزان رقیق شدگی پساب (S) (در اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه‌ی پایین دست تخلیه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$S = \frac{C_* - C_a}{C - C_a} \quad (1)$$

که در آن،  $C_a$  غلظت پساب قبل از تخلیه،  $C_s$  غلظت سیال محیط پذیرنده و میزان غلظت در نقطه مورد نظر است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در دینامیک اختلاط جریان تخلیه شده، عدد فرود ( $F$ ) جت خروجی است. عدد فرود جریان چگال به صورت رابطه‌ای ۲ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{U_j}{\sqrt{Dg'}} \quad (1)$$

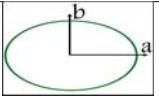
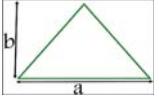
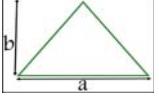
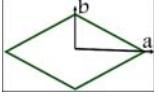
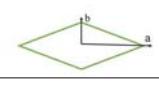
که در آن،  $z_U$  سرعت جریان خروجی،  $D$  قطر نازل تخلیه و  $g$  شتاب گرانش اصلاح شده است و به صورت راپتیه ۳ تعریف می‌شود:

$$g_{\circ}^! = g \frac{(\rho_{\circ} - \rho_a)}{\rho_a} \quad (4)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی اولیه‌ی پساب،  $\rho_a$  چگالی محیط و  $g$  شتاب گرانش است. و در شکل ۱ فاصله‌ی افقی محل ارتفاع بیشینه‌ی صعود جت از نازل،  $X_m$  فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل،  $S_m$  رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت،  $S_i$  میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین و  $\theta$  زاویه‌ی نازل نسبت به افق است.

استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب برای تخلیه‌ی پساب شور باعث کاهش خسارت‌های وارده به محیط‌زیست می‌شود. در همین راستا، مطالعه‌های زیادی برای یافتن بهینه‌ترین حالت‌های تخلیه‌ی پساب چگال صورت گرفته است. زیتون<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۷۱)، بهینه‌ترین روش‌های تخلیه‌ی پساب چگال را بررسی کردند و برای یافتن مناسب‌ترین روش تخلیه‌ی پساب چگال، نازل‌هایی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵، ۴۵ و ۶۰ درجه سببت به افق را بررسی کردند و دریافتند که زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.<sup>[۱]</sup> در همین زمینه، پژوهش‌گران بسیاری در مطالعه‌های خود، زاویه‌ی ۶۰ درجه را مناسب‌ترین زاویه برای تخلیه‌ی پساب با شناوری منفی در محیط ساکن معرفی کردند.<sup>[۲]</sup> همکاران (۱۹۸۷)، به بررسی تأثیر جریان محیط در میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده با زاویه‌های مختلف پرداختند که پساب تخلیه شده با زاویه‌ی ۹۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.<sup>[۳]</sup> همکاران (۱۶)، به صورت

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نازل‌ها.

نازل	هندسه‌ی نازل	ابعاد نازل (mm)	قطر معادل نازل (mm)	مساحت (mm)	
دایره		$a = 10$ $b = 10$	۲۰	۳۱۴	
مثلث ۱		$a = 22/32$ $b = 26/936$	۲۰	۳۱۴	
مثلث ۲		$a = 50$ $b = 12/56$	۲۰	۳۱۴	
لوزی ۱		$a = 12/53$ $b = 12/53$	۲۰	۳۱۴	
لوزی ۲		$a = 25/6$ $b = 6,265$	۲۰	۳۱۴	

## ۱. مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مشخصات پساب چگال تخلیه شده ( $X_i$ ,  $X_m$ ,  $S_i$  و  $S_m$ ) پرداخته شده است. پساب با غلظت بالای نمک به صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $60^\circ$  درجه در یک محیط آبی ساکن و پویا (هم‌راستا)، از نازل‌هایی با هندسه‌ی دایره، مثلث، و لوزی تخلیه شده است. همه‌ی نازل‌ها دارای سطح مقطع یکسان ( $D_e = 314\text{ mm}^2$ ) و با قطر معادل ( $D_e = A = 314\text{ mm}^2$ ) متر بوده‌اند.  $D_e$  به عنوان قطر دایره‌ی برابر با مساحت یک ناحیه‌ی غیردایره‌ی تعریف می‌شود. اطلاعات مربوط به نازل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار عدد فرود خروجی پساب در محیط ساکن برابر  $10$ ،  $20$ ،  $30$  و  $40$  و در محیط پویا برابر  $20$  در نظر گرفته شده است. در محیط پویا، سرعت محیطی متغیر  $U_a < 0,374\text{ m/s}$  در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب شور از نازل‌های مستغرق مایل پرداخته شده است. مدل‌سازی مذکور با استفاده از اختلاط دوفازی (آب و روغن با چگالی بالاتر از آب) انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و وزین<sup>[۱۶]</sup> از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  (RNG) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار  $k$  (انرژی جنبشی آشفتگی) و  $\varepsilon$  (نخ استهلاک) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

(CFD) است، که توانایی مدل کردن پدیده‌های مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده را دارد. نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در حل مسائل مختلف استفاده می‌کند و امکان ریز یا درشت کردن شبکه‌ی محاسباتی را در نزدیکی مرزها و یا مکان‌هایی که دارای گرادیان‌های شدید هستند فراهم می‌سازد تا مدل مسائل را با دقت بالاتری محاسبه کند.<sup>[۱۷]</sup>

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب شور از نازل‌های مستغرق مایل پرداخته شده است. مدل‌سازی مذکور با استفاده از اختلاط دوفازی (آب و روغن با چگالی بالاتر از آب) انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و وزین<sup>[۱۶]</sup> از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  (RNG) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار  $k$  (انرژی جنبشی آشفتگی) و  $\varepsilon$  (نخ استهلاک) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} k) = \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \varepsilon) = \\ \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن‌ها،  $\mu_{t,m}$  لزجت آشفتگی و  $G_{k,m}$  انرژی سینماتیک آشفتگی هستند. همچنین مقدار  $C_{1\varepsilon}^*$  مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_*} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

مقدار ثابت‌های معادلات با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و وزین<sup>[۱۶]</sup> عبارت‌اند:  $\eta = 0,012$ ،  $\beta = 0,044$ ،  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ،  $C_{2\varepsilon} = 1,68$  و  $\sigma_\varepsilon = 1$ .

اطلاعات اولیه‌ی ورودی به نرم‌افزار در جدول ۲ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی، ابتدا هندسه‌ی مدل طراحی و سپس مش زنی مطابق شکل ۲ صورت گرفته است. همچنین در شکل ۳، تأثیر اندازه‌ی مش‌ها در مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تخلیه شده از نازل دایره‌ی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با کاهش ابعاد مش ( $R$ ) از  $10$  میلی‌متر به  $7/5$  میلی‌متر، نتایج ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تغییر چندانی نکرده و به همین دلیل ابعاد مش برابر  $8/5$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با افزایش فاصله از محل تخلیه، طول مش‌ها نیز افزایش یافته است. برای دهانه‌ی نازل از شرط مرزی Velocity inlet، برای بستر محل تخلیه به دلیل عدم لغزش میان آب و دیواره از شرط مرزی no slip و برای دیواره‌های اطراف محل تخلیه از شرط مرزی symmetry استفاده شده است. برای شبیه‌سازی مدل آشفتگی انتخاب و برای ثابت‌های مدل منتخب از پیش‌فرض‌های نرم‌افزار

## ۲. مواد و روش‌ها

FLUENT، یک نرم‌افزار مهندسی در زمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است، که توانایی مدل کردن پدیده‌های مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده را دارد. نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در حل مسائل مختلف استفاده می‌کند و امکان ریز یا درشت کردن شبکه‌ی محاسباتی را در نزدیکی مرزها و یا مکان‌هایی که دارای گرادیان‌های شدید هستند فراهم می‌سازد تا مدل مسائل را با دقت بالاتری محاسبه کند.<sup>[۱۷]</sup>

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب شور از نازل‌های مستغرق مایل پرداخته شده است. مدل‌سازی مذکور با استفاده از اختلاط دوفازی (آب و روغن با چگالی بالاتر از آب) انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و وزین<sup>[۱۶]</sup> از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  (RNG) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار  $k$  (انرژی جنبشی آشفتگی) و  $\varepsilon$  (نخ استهلاک) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

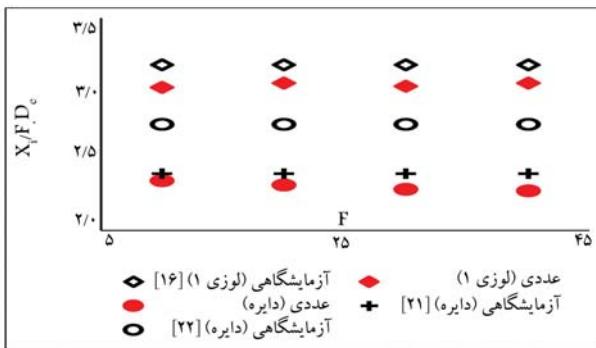
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} k) = \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \varepsilon) = \\ \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

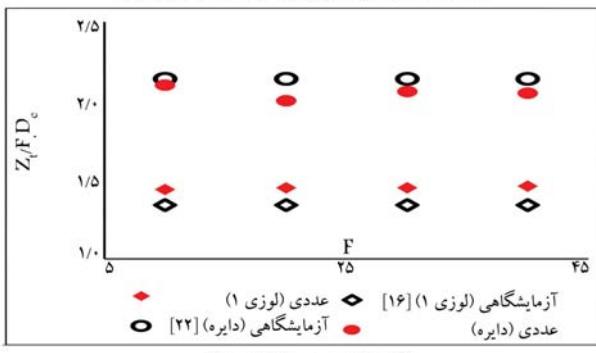
که در آن‌ها،  $\mu_{t,m}$  لزجت آشفتگی و  $G_{k,m}$  انرژی سینماتیک آشفتگی هستند. همچنین مقدار  $C_{1\varepsilon}^*$  مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_*} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

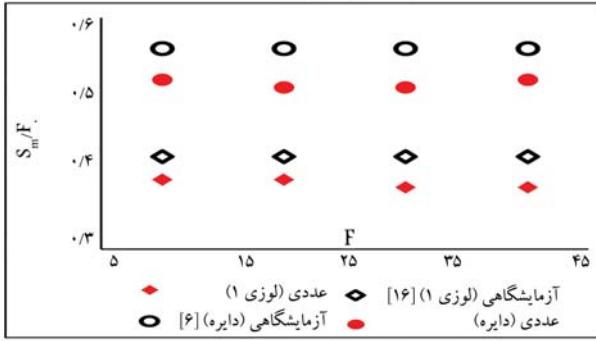
مقدار ثابت‌های معادلات با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و وزین<sup>[۱۶]</sup> عبارت‌اند:  $\eta = 0,012$ ،  $\beta = 0,044$ ،  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ،  $C_{2\varepsilon} = 1,68$  و  $\sigma_\varepsilon = 1$ .



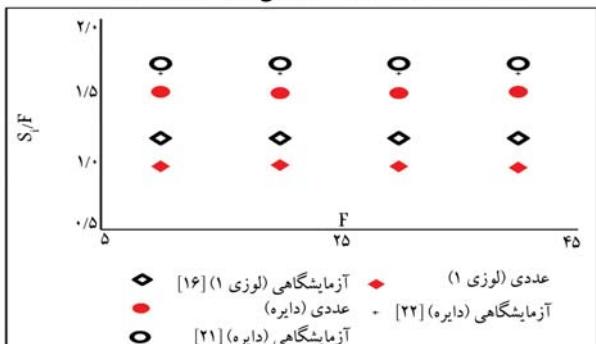
الف) فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل؛



ب) ارتفاع صعود پیشینه‌ی جت؛



پ) رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود پیشینه‌ی جت؛



ت) رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین.

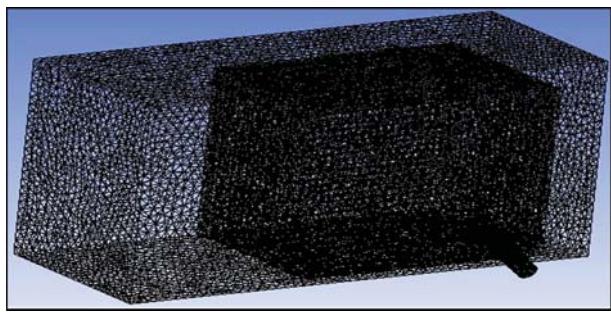
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج مشخصات پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن FLUENT با مطالعات تجربی.

با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پژوهش‌گران مختلف مقایسه شده است.

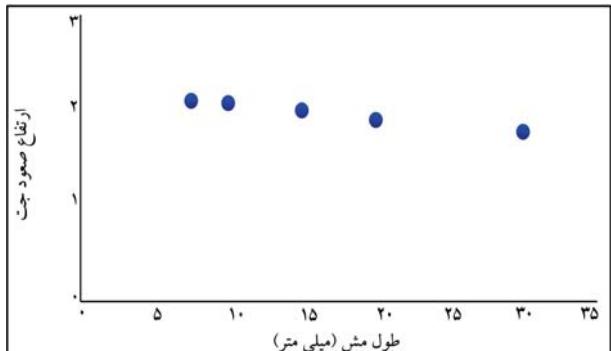
در شکل ۴، مقدار پارامتر بدون بعد  $X_t/F.D_e$  (شکل ۴ - الف)،  $Z_t/F.D_e$  (شکل ۴ - ب)،  $S_m/F$  (شکل ۴ - پ) و  $S_t/F$  (شکل ۴ - ت) به دست آمده از نرم‌افزار FLUENT برای تخلیه‌ی پساب چگال به صورت مستغرق مایل (زاویه‌ی

جدول ۲. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار.

$D_e$ (mm)	$U_a$ (m/s)	$F$	$\theta$ (°)	$\rho_0$ (kg/m³)	$\rho_a$ (kg/m³)
۱۰	۰/۰۶				
۲۰	۰/۱۴	۲۰	۶۰	۱۰۳۲	۹۹۸/۲
۳۰	۰/۲۵				
۴۰	۰/۳۷				
۱۰					
۲۰	۰				
۳۰	۶۰				
۴۰					



شکل ۲. شباهتیک مش‌بندی دامنه‌ی محاسباتی.



شکل ۳. تأثیر طول مش در ارتفاع صعود پیشینه‌ی جت تخلیه شده از نازل دایره.

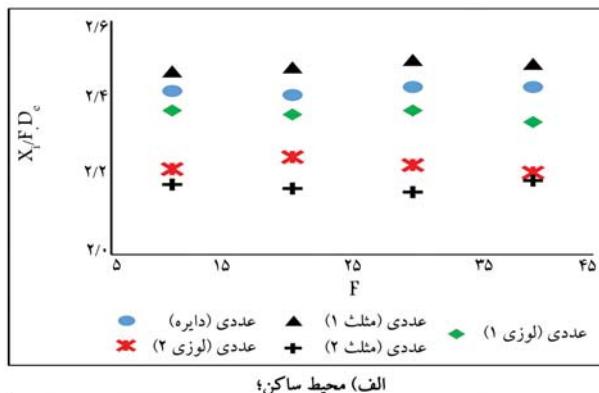
استفاده شده است. برای به دست آوردن گام زمانی مناسب، نتایج به دست آمده از گام زمانی ۰/۰۳۵ و ۰/۰۰۲ ثانیه‌ی برای تخلیه‌ی پساب با عدد فرود ثابت تطابق بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند و برای دقت بیشتر، گام زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه انتخاب شده است. زمان شبیه‌سازی در ابتدا ۰/۰۰۲ ثانیه انتخاب و مشاهده شد که نتایج مدل، با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی اختلاف بالایی دارد. با افزایش زمان شبیه‌سازی، نتایج مدل به نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر شده است. برای زمان‌های بیشتر از ۰/۰۰۲ ثانیه، نتایج مدل تغییر قابل توجهی نکرد؛ به همین دلیل مدت زمان شبیه‌سازی ۰/۰۰۵ ثانیه انتخاب شد، تا اطمینان حاصل شود که جریان کاملاً توسعه یافته است.

### ۳. اعتبارسنجی مدل

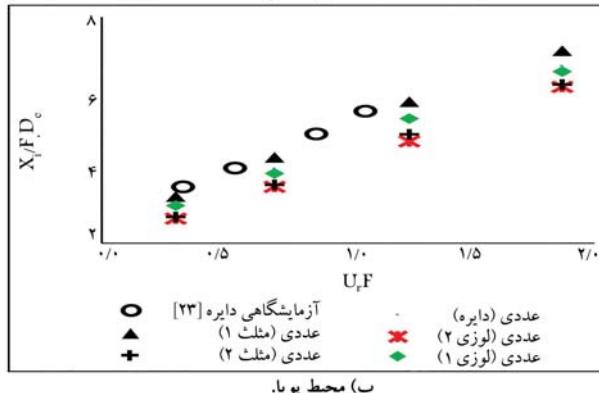
در بخش حاضر، برای راستی آزمایی مدل، نتایج به دست آمده از طریق FLUENT

جدول ۳. مقدار انحراف معیار نتایج مدل RNG در مقایسه با نتایج تجربی.

مطالعه‌ی تجربی	$S_i/F$	$S_m/F$	$Z_t/F.D_e$	$X_i/F.D_e$
جیانگ (لوژی) [۱۶]	۰,۰۴۴	۰,۰۲	۰,۰۶۳	۰,۰۸۸
راپرتر (دایره) [۲۱]	۰,۰۷۲	-	-	۰,۰۶۵
پاپاکنتیس (دایره) [۲۲]	۰,۱۱	-	۰,۰۶	۰,۲۲
زیتون (دایره) [۲۴]	-	۰,۰۲۸	-	-



(الف) محیط ساکن؛



(ب) محیط پویا.

شکل ۵. فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از دهانه‌ی نازل.

مثلث ۲ و لوژی ۲، کمترین مقدار را داشته است. استفاده از نازل‌های با مقطع مثلث ۲ و لوژی ۲ (در محیط ساکن و پویا)، باعث کاهش مقدار  $X_i/F.D_e$  نسبت به نازل‌های با مقطع مثلث ۱، لوژی ۱ و دایره شده است. در این مورد می‌توان گفت هر چه پساب به صورت صفحه‌ی  $1^\circ$  از نازل خارج شود، باعث هماوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شود. افزایش هماوری سیال محیط به درون جت، باعث کاهش مقدار سرعت جت می‌شود و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مسیر افقی طی شده توسط جت کاهش می‌یابد. پساب تخلیه شده با نازل‌های مثلث ۱، لوژی ۱ و دایره، باعث انتقال پساب به نقاط دور از ساحل می‌شود (مسیر افقی بیشتری را طی می‌کند)، که این موضوع از لحاظ زیست‌محیطی توصیه شده است. [۲۴] بنابراین، از لحاظ زیست‌محیطی، تخلیه‌ی پساب با نازل‌های دایره، لوژی ۱ و مثلث ۱ نسبت به نازل‌های لوژی ۲ و مثلث ۲ (که پساب را به صورت صفحه‌ی تخلیه می‌کنند)، متناسب‌تر است.

#### ۴. ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت ( $Z_t/F.D_e$ )

در شکل ۶، مقدار پارامتر بدون بعد  $Z_t/F.D_e$  برای پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه شده  $60^\circ$  درجه مشاهده می‌شود. پساب با استفاده از نازل با شکل دایره، مثلث و لوژی در محیط ساکن (شکل ۶ - الف) و پویا (شکل ۶ - ب) تخلیه شده است. در محیط ساکن، مقدار  $Z_t/F.D_e$  برای پساب تخلیه شده از نازل‌های مثلث ۱ و لوژی ۲ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار بوده است. در محیط ساکن، مقدار  $Z_t/F.D_e$  برای نازل‌ها با هندسه‌ی مثلث ۱، دایره، لوژی ۱، مثلث ۲ و لوژی ۲ به ترتیب برابر  $2/2$ ،  $2/1$ ،  $2/03$ ،  $2/01$ ،  $1/91$ ،  $1/83$  بوده است. با توجه به شکل ۵ - ب، مدل RNG مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت را

تخلیه‌ی  $60^\circ$  درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل دایره و زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^\circ$  درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوژی در محیط ساکن برای اعداد فرود مختلف ارائه شده است. نتایج FLUENT مطابقت خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی داشته و برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوژی، نیز مقدار  $S_i/F$ ،  $S_m/F$ ،  $Z_t/F.D_e$ ،  $X_i/F.D_e$  و  $S_i/F$  را در مقایسه با نتایج تجربی، [۱۶] به ترتیب با انحرافی در حدود  $7/3$ ،  $9/7$ ،  $6/9$  و  $10/4$  درصد دست پایین تخمین زده است. همچنین  $S_i/F$  را برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی  $60^\circ$  درجه با مقطع دایره به ترتیب با انحرافی در حدود  $5/3$ ،  $6/3$ ،  $9/4$  و  $11/4$  درصد خطای نسبت به مطالعه‌های تجربی، [۲۴] پیش‌بینی کرده است. مقدار انحراف معیار بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

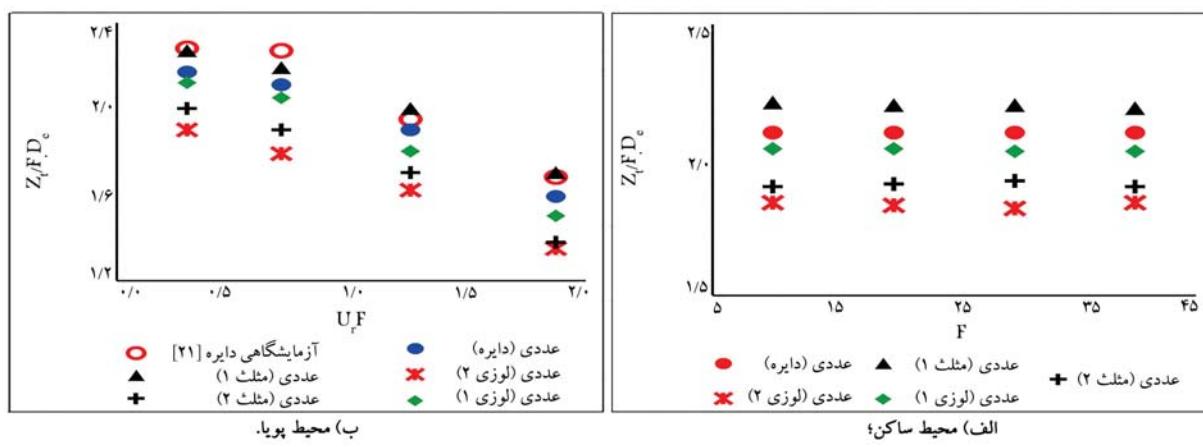
#### ۴. یافته‌ها و بحث

در بخش کنونی، به ارائه نتایج مدل FLUENT در تخمین تأثیر هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی و تراکتوری پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل ( $60^\circ = \theta$ ) در محیط ساکن و پویا (جریان هم‌راستا) پرداخته شده است.

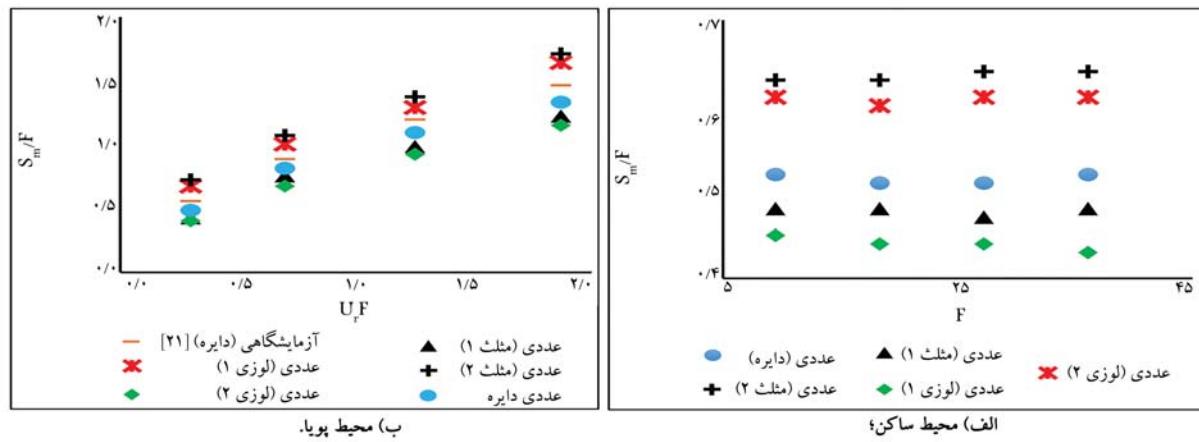
#### ۱.۴. فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل ( $X_i$ )

در شکل ۵، مقدار پارامتر  $X_i/F.D_e$  برای تخلیه‌ی پساب در محیط ساکن (شکل ۵ - الف) و پویا (شکل ۵ - ب) مشاهده می‌شود. پساب به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $60^\circ$  درجه از نازل با هندسه‌های مختلف (دایره، مثلث ۱، مثلث ۲، لوژی ۱ و لوژی ۲) تخلیه شده است. با توجه به شکل ۵ - الف، مقدار  $X_i/F.D_e$  برای پساب تخلیه شده از نازل‌های مثلث ۱ و مثلث ۲ به ترتیب بیشتر است. در محیط پویا (شکل ۵ - ب)، با افزایش  $U_r/F$  برای همه‌ی نازل‌ها به صورت خطی افزایش یافته و همچنین نتایج مدل تطبیق نسبتاً خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی چوی و همکاران [۲۰] بوده

دانشته و مقدار خطای میانگین مخذول مربعات<sup>۹</sup> برای نازل دایره‌ی  $13^\circ$  بوده است. مطابق شکل ۵، مقدار  $X_i/F.D_e$  برای پساب تخلیه شده (با همه‌ی مقطع) در محیط پویا بیشتر از  $X_i/F.D_e$  در محیط ساکن بوده است. جریان محیط باعث افزایش طول مسیر حرکت پساب می‌شود. هنگامی که سرعت جت به صفر برسد، پساب از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود. حرکت پساب چگال در حالت پلوم به واسطه‌ی شار شناوری و به سمت بستر محیط پذیرنده صورت می‌گیرد. در صورت وجود جریان محیط، پساب (پلوم)، علاوه‌بر حرکت به سمت بستر (به دلیل شار شناوری)، مسافتی را هم توسط جریان محیط به صورت افقی منتقل می‌شود. بنابراین، هر چقدر سرعت جریان محیط افزایش پیدا کند، مقدار مسافت طی شده‌ی پساب در حالت جت و پلوم افزایش می‌یابد. در محیط پویا نیز همانند محیط ساکن، مقدار  $X_i/F.D_e$  برای نازل با مقطع مثلث ۱، بیشترین و برای نازل‌های با هندسه‌ی



شکل ۶. ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت.

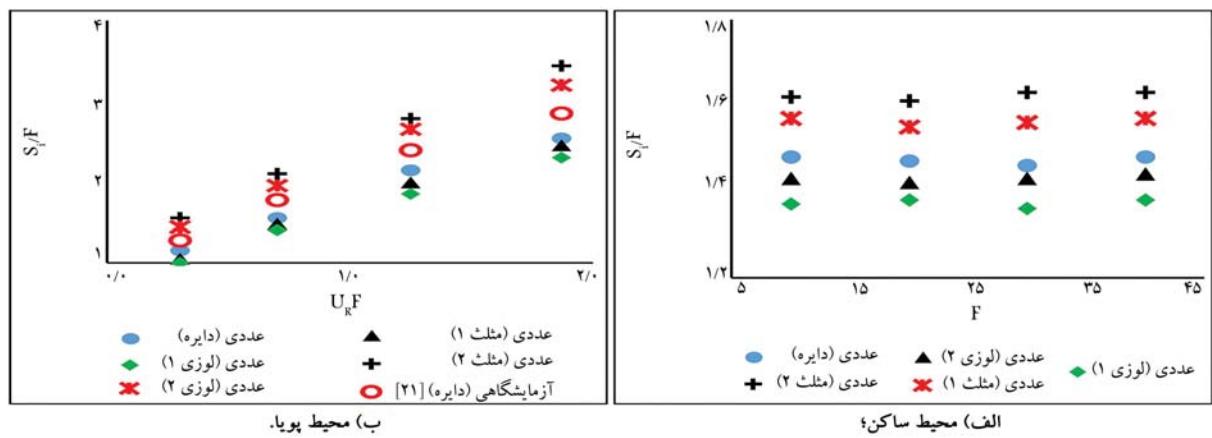


شکل ۷. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت.

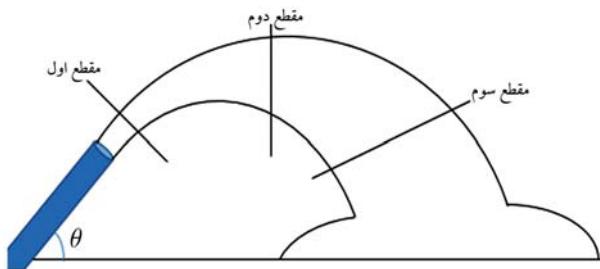
### ۳.۴. رقیق‌سازی در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت ( $S_m/F$ )

در شکل ۷، مقدار بدون بُعد رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت برای نازل با هندسه‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به تخلیه‌ی پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $60^\circ$  درجه در محیط ساکن (شکل ۷ - الف) و پویا (شکل ۷ - ب) است. در محیط ساکن، مقدار  $S_m/F$  برای تخلیه‌ی پساب با نازل‌های مثلث ۱ ( $S_m/F = 0,48$ ) (لوزی ۱) ( $S_m/F = 0,45$ ) و دایره ( $S_m/F = 0,52$ ) (دایره [۲۱]) مکتربین مقدار و برای نازل‌های مثلث ۲ ( $S_m/F = 0,63$ ) (لوزی ۲) ( $S_m/F = 0,61$ ) بیشترین مقدار را داشته است. تخلیه‌ی پساب با جت صفحه‌یی، تماش بدنی جت با سیال محیط را افزایش می‌دهد و بتابراین سیال محیط بیشتر به درون جت نفوذ می‌کند و غلظت جت را بیشتر کاهش می‌دهد. به همین دلیل، مقدار  $S_m/F$  برای نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲ بیشتر از نازل‌های دیگر بوده است. در محیط پویا، مقدار  $S_m/F$  برای همه‌ی نازل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته و نتایج مدل مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی رایتر و نامز (۱۹۸۷) داشته و مقدار خطای میانگین مجدور مرباعات برای میزان  $S_m$  نازل دایره‌ی  $0,12$  بوده است. با توجه به شکل ۷، مقدار  $S_m/F$  در محیط پویا بیشتر از محیط ساکن بوده و با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار  $S_m/F$  به صورت خطی افزایش یافته است. دینامیک و اخلاق ارتفاع پساب تخلیه شده در محیط آبی، متأثر از عوامل مختلفی

به خوبی (RMSE =  $0,11$ ) در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی رایتر و نامز (۱۹۸۷) براورده می‌کند. در محیط پویا، با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار  $Z_t/F.D_e$  برای همه‌ی نازل‌ها به صورت تقریباً خطی کاهش یافته است. هنگامی که سرعت جت به کمتر از سرعت جریان محیط برسد، جت توسط جریان محیط کاملاً از مسیر خود منحرف می‌شود و در جهت جریان محیط حرکت می‌کند و به همین دلیل، هر چه سرعت محیط افزایش پیدا می‌کند، جت زودتر از مسیر خود منحرف می‌شود. در واقع، می‌توان گفت با افزایش سرعت جریان محیط، نیروی وارد بر بدنی جت افزایش می‌یابد و هنگامی که سرعت جت برابر سرعت سیال محیط شود، نیروی وارد از طرف جریان محیط مانع از حرکت قائم جت ( $Z_t$ ) می‌شود و مقدار  $Z_t/F.D_e$  برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ (که به صورت صفحه‌یی از نازل خارج شود، نیروی وارد از طرف سیال به جت بیشتر می‌شود و سیال محیط تأثیر زیادی در سرعت جت تخلیه شده می‌گذارد. به همین دلیل، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت برای نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره بیشتر از نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲ بوده است. با کاهش ارتفاع صعود جت می‌توان پساب را در عمق کمتری تخلیه کرد. تخلیه‌ی پساب در عمق زیاد دریا باعث افزایش هزینه‌ی ساخت و نگهداری نازل می‌شود. بتابراین استفاده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ در مقایسه با نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره، صرفه‌ی اقتصادی دارد.



شکل ۸. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین.



شکل ۹. شماتیک مقاطع عرضی جت در نقاط مختلف.

مقدار رقیق‌سازی پساب نسبت به محیط ساکن افزایش می‌یابد.<sup>[۲۲]</sup> با توجه به نتایج، استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، که پساب را به صورت جت صفحه‌یی تخلیه می‌کنند، میران رقیق‌سازی را به مقدار قابل توجهی (نسبت به نازل دایره‌یی) افزایش می‌دهند و مناسب‌ترین روش برای تخلیه‌ی پساب چگال است.

#### ۴.۵. غلظت در مقاطع عرضی جت

در بخش کنونی، به بررسی تغییرات غلظت در مقاطع عرضی مختلف جت پرداخته شده است. مقاطع عرضی به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که مقطع اول در محلی واقع شود که رفتار جریان، جت مانند است؛ یعنی، جایی که مومنت بر شار شناوری غالب است. مقطع دوم، در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و مقطع سوم نیز در محلی انتخاب شده‌اند که پساب، رفتار پلوم مانند دارد (مطابق شکل ۹).

در شکل ۱۰، پروفیل‌های عرضی غلظت در سه مقطع بر حسب فاصله‌ی شعاعی از خط مرکزی جت برای عدد فرود ۲۰ ترسیم شده است.  $C$  مقدار غلظت در مرکز جت،  $C_s$  غلظت در نقطه‌ی موردنظر،  $r$  فاصله‌ی شعاعی از مرکز جت و  $h$  محلی است که:  $C = C_s = \frac{1}{r}$ .

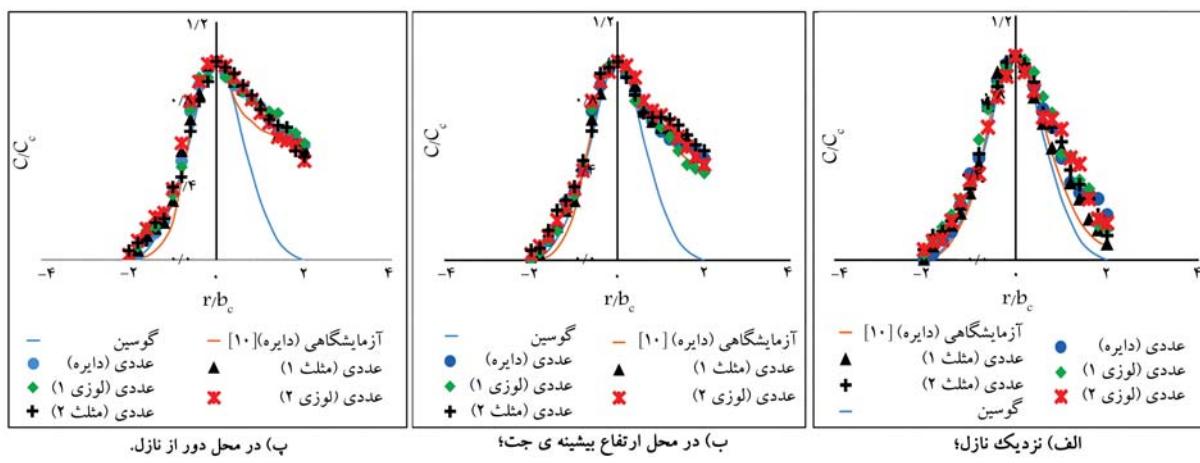
در شکل اخیر، سمت چپ نمودار مربوط به قسمت خارجی جت (نزدیک سطح آب) و سمت راست نمودار مربوط به قسمت داخلی جت (نزدیک بستره) است. رفتار پروفیل‌های عرضی غلظت با توجه به ناحیه‌ی آن متفاوت است. با توجه به شکل ۱۰ الف، در مقطع اول (نزدیک به محل تخلیه)، پروفیل‌های غلظت در لبه‌های داخلی و خارجی جت، اختلاف کمی با هم دارند و هر دو نزدیک پروفیل گاووسی هستند. اما در مقاطع دوم (شکل ۱۰ ب) و سوم (شکل ۱۰ پ)، رفتار جت در لبه‌ی خارجی همانند مقطع اول، نزدیک به پروفیل گاووسی است؛ در حالی که لبه‌ی داخلی به دلیل محدودیت شار شناوری از پروفیل گاووسی فاصله‌ی گرفته است. طبق

است که جریان محیط، یکی از مهم‌ترین آن‌هاست و رفتار پساب تخلیه شده در محیط ساکن، متفاوت از محیط پویاست.<sup>[۲۳]</sup> مقدار  $S_m/F$  برای نازل لوزی ۲ به ترتیب ۲۰ و ۳۱ درصد بیشتر از نازل‌های دایره و لوزی ۱ بوده است. همچنین مقدار  $S_m/F$  پساب تخلیه شده از نازل مثلث ۲ به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد بیشتر از نازل‌های دایره و مثلث ۱ بوده است.

#### ۴.۶. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین ( $S_i$ )

در بخش حاضر، به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در میران رقیق‌سازی پساب چگال در نقطه‌ی برخورد به زمین پرداخته شده است. نتایج برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌هایی با هندسه‌ی دایره، مثلث ۱، مثلث ۲، لوزی ۱ و لوزی ۲ با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن (شکل ۸ - الف) و پویا (شکل ۸ - ب) در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میران رقیق‌سازی در هر دو محیط ساکن و پویا، برای نازل مثلث ۲ بیشترین مقدار و برای نازل لوزی ۱، کمترین مقدار را داشته است. مقدار  $S_i/F$  در محیط ساکن برای نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره به ترتیب برابر  $1/۳۸$ ،  $1/۴۲$  و  $1/۴۷$  و برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به ترتیب برابر  $1/۶۳$  و  $1/۶۷$  بوده است.

با توجه به شکل ۸، میران رقیق‌سازی برای همه‌ی نازل‌ها در محیط پویا بیشتر از میران رقیق‌سازی در محیط ساکن بوده است. با افزایش سرعت جریان محیط، میران رقیق‌سازی در محیط پویا در تمام نازل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. نتایج مدل برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی ۶۰ درجه، همخوانی خوبی (RMSE = ۰،۲۱) با مطالعه‌ی رابرتس و تامر (۱۹۸۷)<sup>[۲۴]</sup> داشته است. در محیط پویا، مقدار رقیق‌سازی پساب تخلیه شده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به ترتیب ۲۱ و ۲۶٪ درصد بیشتر از نازل دایره‌یی بوده است. همچنین در محیط پویا، مقدار  $S_i/F$  پساب تخلیه شده از نازل مثلث ۲، ۲٪ بیشتر از نازل مثلث ۱ و مقدار  $S_i/F$  در نازل لوزی ۲ نیز ۲۸٪ بیشتر از مقدار  $S_i/F$  در نازل لوزی ۱ بوده است. در محیط پویا، پساب نسبت به محیط ساکن بیشتر تحت تأثیر رقیق‌سازی توسعه جریان محیط قرار می‌گیرد. همان‌گونه که گفته شد، در محیط ساکن، پلوم فقط تحت تأثیر شار شناوری حرکت می‌کند؛ اما در محیط پویا، علاوه بر شار شناوری، پلوم تحت تأثیر جریان محیط نیز قرار می‌گیرد. بنابراین مسافت طی شده‌ی پساب در محیط پویا در مقایسه با محیط ساکن افزایش می‌یابد و به همین دلیل، میران همواری سیال محیط به درون جت (تماس پساب با سیال محیط) و در نتیجه



شکل ۱۵. پروفیل‌های بی‌بعد شده‌ی عرضی غلظت در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی تجربی.

هزینه و آثار زیست‌محیطی (افزایش میزان رقیق‌سازی)، استفاده از نازل با هندسه‌ی مثلث ۲ و لوژی ۲ به جای استفاده از نازل‌های دایره، لوژی ۱ و مثلث ۱ توصیه می‌شود. همچنین مزیت تخلیه‌ی پساب با نازل‌های دایره، لوژی ۱ و مثلث ۱ (در مقایسه با نازل‌های مثلث ۲ و لوژی ۲)، انتقال پساب به نقاط دور از ساحل است.

## فهرست علامت

- $D$ : قطر نازل دایره‌ی؛
- $D$ : قطر معادل سطح دایره‌ی؛
- $U_a$ : سرعت جریان محیط؛
- $U_j$ : سرعت خروجی پساب از نازل؛
- $U_r = U_a/U_j$ : سرعت نسبی؛
- $S$ : میزان رقیق‌سازی؛
- $S_m$ : میزان رقیق‌سازی پساب در ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت؛
- $S_i$ : میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین؛
- $X_i$ : فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل؛
- $Z_t$ : ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت از نازل؛
- $F$ : عدد فرود تخلیه؛
- $K$ : انرژی جنبشی آشتنگی؛
- $\varepsilon$ : نرخ استهلاک؛
- $C$ : غلظت در نقطه‌ی موردنظر؛
- $C_e$ : غلظت در مرکز جت؛
- $C$ : غلظت اولیه‌ی پساب؛
- $C_a$ : غلظت محیط پذیرنده؛
- $r$ : فاصله‌ی شعاعی نقطه‌ی موردنظر از مرکز نازل؛
- $b_e$ : فاصله‌ی شعاعی که  $C/C_e = 1/e$ ؛
- $R$ : طول مش؛
- $\theta$ : زاویه‌ی دهانه‌ی نازل نسبت به افق (درجه)؛
- $\rho_a$ : چگالی محیط؛
- $\rho$ : چگالی پساب؛
- $A$ : مساحت نازل.

نتایج به دست آمده، میزان پخش در لبه‌ی خارجی جت نسبت به لبه‌ی داخلی آن بیشتر بوده است. این موضوع منجر به انحراف سریع‌تر پروفیل‌های غلظت در لبه‌ی داخلی در مقایسه با لبه‌ی خارجی نسبت به پروفیل گاوی شده است. در لبه‌ی خارجی جت، هماوری سیال محیطی به درون جت بدون هیچ محدودیتی رخ داده و به همین دلیل، رفتار جت همانند پروفیل گاوی بوده است. اما در لبه‌ی داخلی جت با دور شدن از منبع تخلیه، به دلیل ناپایداری شارشناوری و همچنین وجود بستر و اثر کواندا، که مانع از هماوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شوند، نمودار از حالت گاوی فاصله گرفته است. با توجه به نتایج مشخص شده که هندسه‌ی نازل تأثیری در پروفیل بی‌بعد شده‌ی غلظت در مقطع عرضی جت ندارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار  $Z_t$ ,  $X_i$ ,  $S_m$  و  $S_i$  پرداخته شده است. با مقایسه‌ی نتایج مدل آشتگی (RNG)  $\varepsilon$  با نتایج مطالعه‌های تجربی مشخص شد که مدل (RNG)  $\varepsilon$  –  $k$ ، توانایی بالای در شبیه‌سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی دارد. هندسه‌ی نازل، عامل مهمی در تغییر دینامیک و اختلاط پساب چگال در میدان نزدیک است. در محیط‌های ساکن و پویا، نازل مثلث ۲ در مقایسه با دیگر نازل‌ها، بیشترین میزان  $S_m$  و  $S_i$  و کمترین میزان  $Z_t$  را داشته است. تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل‌های لوژی ۱ و مثلث ۱، میزان رقیق‌سازی را در مقایسه با نازل دایره کاهش داده است. همچنین تخلیه‌ی پساب با نازل مثلث ۲ مقدار  $S_m$  و  $S_i$  را در مقایسه با نازل دایره‌ی به ترتیب ۲۰ و ۱۵ درصد در محیط ساکن و ۲۵ و ۲۶/۵ درصد در محیط پویا افزایش داده است. به این ترتیب می‌توان گفت تخلیه‌ی پساب شور با استفاده از نازل‌های صفحه‌ی باعث افزایش تعامل پساب با سیال محیط پذیرنده می‌شود و بنابراین، میزان رقیق‌سازی افزایش می‌یابد. استفاده از نازل‌های مثلث ۲ و لوژی ۲، باعث کاهش ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت نسبت به نازل‌های دایره، لوژی ۱ و مثلث ۱ شده است. به همین دلیل، با استفاده از نازل‌های لوژی ۲ و مثلث ۲ به جای نازل‌های دایره، لوژی ۱ و مثلث ۱، می‌توان پساب را در عمق کمتری (نزدیک ساحل) تخلیه کرد، که این موضوع باعث کاهش هزینه‌ی تخلیه‌ی پساب (ساخت و نگهداری از تخلیه‌کننده) می‌شود. بنابراین برای کاهش

1. Zeitoun
2. Roberts
3. Choi
4. Abessi
5. Fernández
6. Yan
7. Jiang
8. Meng & Wenxin
9. RMSE
10. Plane Jet

## (References) مراجع

1. Papakonstantis, I.G. and Papanicolaou, P.N. "On the computational modeling of inclined brine discharges", *Fluids*, **7**(2:86), p. 14 (2022).
2. Alameddine, I. and El-Fadel, M. "Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design", *Desalination*, **214**(1-3), pp. 241-260 (2007).
3. Yan, X. and Mohammadian, A. "Evolutionary modeling of inclined dense jets discharged from multiport diffusers", *Journal of Coastal Research*, **36**(2), pp. 362-371 (2020).
4. Bleninger, T. "Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: environmental hydraulic design and control of multiport diffusers", PhD diss., Zugl. Karlsruhe Univ (2007).
5. Jiang, B., Law, A.W.-K. and Lee, J.H.-W. "Mixing of 30 and 45° inclined dense jets in shallow coastal waters", *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(3), pp. 241-253 (2014).
6. Zeitoun, M.A. and McIlhenny, W.F. "Conceptual designs of outfall systems for desalination plants", *In Offshore Technology Conference*, OnePetro (1971).
7. Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C. and et al. "Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges", *Desalination*, **431**, pp. 27-34 (2018).
8. Lai, Chris C.K. and Lee, J.H.-W. "Mixing of inclined dense jets in stationary ambient", *Journal of Hydro-Environment Research*, **6**(1), pp. 9-28 (2012).
9. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Dense jet discharges in shallow water", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(1), p.04015033 (2016).
10. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(8), p.06015009 (2015).
11. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Multiport diffusers for dense discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(8), p.04014032 (2014).
12. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water", *Journal of Hydraulic Engineering*, **143**(6), p.04017003 (2017).
13. Jirka, G.H., Doneker, R.L. and Hinton, S.W. "User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters", US Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology (1996).
14. Yan, X. and Mohammadian, A. "Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports", *Water*, **11**(10), pp.159-171, 2077 (2019).
15. Ramezani, M., Abessi, O. and Rahmani Firoozjaee, A. "Effect of proximity to bed on 30° and 45° inclined dense jets: a numerical study", *Environmental Processes*, **8**(3), pp. 1141-1164 (2021).
16. Jiang, M., Law, A.W.-K. and Song, J. "Mixing characteristics of inclined dense jets with different nozzle geometries", *Journal of Hydro-Environment Research*, **27**, pp. 116-128 (2019).
17. Jiang, M., Chen, W. and Law, A.W.-K. "Mixing characteristics of 45° inclined duckbill dense jets in co-flowing currents", *Journal of Hydro-Environment Research*, **36**, pp. 77-86 (2021).
18. Ansys, Inc. "ANSYS Fluent User's Guide, Version 2019 R3", (2019).
19. Meng, G. and Wenxin, H. "Numerical simulation of a round buoyant jet in a counterflow", *Procedia Engineering*, **154**, pp. 943-950 (2016).
20. Palomar, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. "Near field brine discharge modeling part 2: validation of commercial tools", *Desalination*, **290**, pp. 28-42 (2012).
21. Roberts, P.J.-W. and Toms, G. "Inclined dense jets in flowing current", *Journal of Hydraulic Engineering*, **113**(3), pp. 323-340 (1987).
22. Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. "Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements", *Journal of Hydraulic Research*, **49**(1), pp. 13-22 (2011).
23. Choi, K.W., Lai, Ch.C.-K. and Lee, J.H.-W. "Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(1), 04015041 (2016).
24. Babaiynejad, V. and Khorsandi, B. "Influence of ambient flow on the behavior of dense effluent discharged into the water environment", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **53**(9), pp. 897-900 (In Persian) (1399/2020).



# عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دو‌بعدی

آرمان مام عزیزی\* (استادیار)

محتمم خان احمدی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مهمنگی عمران شریف (پیاپی ۱۴۵) دری ۲، شماره ۱، ص. ۵۹-۶۹، (پژوهشی)

شناسایی آسیب در المان‌ها و تعلقات سازه‌یی، یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی و پایش سلامتی در سازه است. پس از تشخیص آسیب‌های جزئی با ترمیم و یا تعویض المان‌های محتمل آسیب می‌توان از گسترش آسیب‌های جلوگیری کرد و خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی احتمالی را کاهش داد. در صنعت ساختمان، استفاده از صفحات جدارازارک فولادی رو به افزایش است. آسیب در اعضاء صفحه‌یی و به طور خاص دیوارهای برشی فولادی می‌تواند به صورت پیش‌رونده به سایر المان‌ها انتقال یابد و ایجاد خسارت سازه‌یی کای کند. در نوشтар حاضر، به تشخیص و تعیین موقعیت آسیب‌های جزئی در المان صفحه‌یی فولادی پرداخته شده است. الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی و شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دو‌بعدی پیشنهاد و شاخص‌های تشخیصی L و DI-W ارائه شده‌اند. نتایج نموداری بررسی‌های مربوط به دو شاخص پیشنهادی، کارآمدی و قابلیت تشخیص دو‌بعدی موقعیت‌های مختلف آسیب را نشان می‌دهند؛ به‌نحوی که در منطقه‌ی آسیب، قله‌هایی برآمده از مقادیر شاخص‌های تشخیصی به صورت بی‌نظمی و اغتشاش پدید آمده است.

a.mamazizi@uok.ac.ir  
mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir

واژگان کلیدی: پاش سلامتی سازه، شناسایی آسیب، تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی، شکل‌های مود ارتعاشی، شاخص تشخیص آسیب.

## ۱. مقدمه

مراحل ساخت و پهراه‌داری کنترل کرد. تحلیل پاسخ‌های سازه با استفاده از تبدیل ریاضی توانمندی، مانند تبدیل موجک<sup>۱</sup>، در هر دو حوزه‌ی زمان و بسامد، یکی از روش‌های کارآمد تشخیص آسیب است. با استفاده از تبدیل موجک، اطلاعات بیشتری از پاسخ تحلیل شده‌ی سازه بر اساس توانایی آن در محلی سازی پاسخ سازه در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل می‌شود.<sup>[۱]</sup> تاکنون مطالعات متعددی بر مبنای استفاده از تبدیلات موجک در ارتباط با شناسایی آسیب انجام و در ادامه، خلاصه‌ی برخی از آن‌ها را در است: کاتونین<sup>۲</sup> (۲۰۱۰)،<sup>[۲]</sup> بر مبنای استفاده از تبدیل موجک و داده‌های مودال

تیر ساخته شده از ورق پلیمری به شناسایی موقعیت آسیب ترک پرداخته و نشان داده است که در روند شناسایی، حذف نویه از ضرایب موجک لازم است. زانگ و

ارزیابی سلامتی در سازه‌ها و تعلقات سازه‌یی، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. بدون تردید وضعیت سلامت سازه‌ها، حائز اهمیت بوده و در صورت امکان تشخیص آسیب، محل و شدت آن می‌توان با ترمیم ناچیه‌ی آسیب دیده و یا تعویض اعضاء محتمل آسیب، از وقوع خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی پیش رو جلوگیری کرد. توسعه‌ی انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مفاهیم و کاربردهای عملی را کاهش داده و این ممکن را فراهم ساخته است تا با بکارگیری روش‌های پایش سلامت قابل اعتماد بتوان رفتار سازه‌ها را در

\* نویسنده مسئول  
تاریخ دریافت: ۱۵/۰۱/۱۴۰۰، اصلاحیه ۳۰/۰۱/۱۴۰۰، پذیرش: ۱۲/۰۹/۱۴۰۰.

DOI: 10.24200/J30.2022.61052.3143

استناد به این مقاله:

مام عزیزی، آرمان و خان احمدی، محتمم (۱۴۰۰). «عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دو‌بعدی»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ص. ۵۹-۶۹.

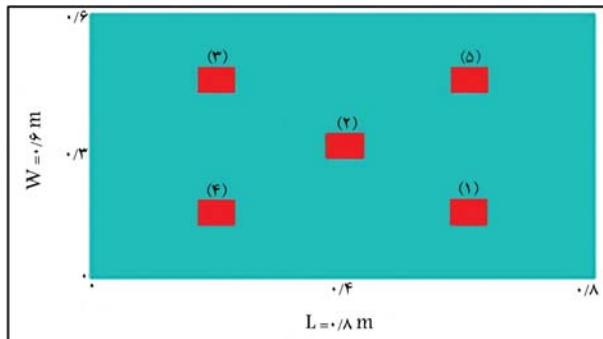
آسیب چشمگیر است و در تمامی مودها می توان موقعیت های آسیب را شناسایی کرد. ایشان در مطالعات دیگری با استفاده از روش های مبتنی بر موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات فولادی پیش ساخته ای پانلی و چندلایی کامپوزیتی شدند.<sup>[۲۰-۲۱]</sup> همچنین، آن ها نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع پیوسته و گسته ای تبدیلات موجک می توان موقعیت های آسیب در تیر را به درستی شناسایی کرد.<sup>[۲۲-۲۳]</sup> ایشان در مطالعات دیگری<sup>[۲۴-۲۵]</sup> با بکارگیری تبدیل موجک به شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر اوج سیگنال های خروجی با صرف نظر از مقادیر مستناظر با دو انتها ستون، موقعیت های آسیب را نشان دادند. همچنین آن ها در ادامه مطالعات شان، شخص های مبتنی بر شیب و انحنای شکل های اولیه و ثانویه مود را برای شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پیشنهاد دادند.<sup>[۲۶-۲۷]</sup> حنطه<sup>[۲۸]</sup> و همکاران<sup>[۲۹]</sup> بر مبنای تحلیل موجک پیوسته ای شکل های مود یک سازه ای ساختمانی کاملاً پانلی و چهار آسیب نشان دادند که موقعیت آسیب با ایجاد چهش های نسبی بیشینه و کمینه در ضرایب موجک قابل شناسایی است. ما<sup>[۳۰]</sup> و همکاران<sup>[۳۱]</sup> بر مبنای تحلیل موجک انحنای های استاتیکی تیرها به شناسایی آسیب های چندگانه پرداختند و به نتایج شناسایی مطلوبی دست یافتند. سان<sup>[۳۲]</sup> و همکاران<sup>[۳۳]</sup> استفاده از تبدیل موجک و همیستگی تصاویر دیجیتال را برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت پیشنهاد دادند، که یک روش شناسایی کارآمد است. مام عزیزی و همکاران<sup>[۳۴]</sup> برای شناسایی موقعیت های جدا شدگی در ستون های کامپوزیت CFST، یک شخص تشخیصی مبتنی بر ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسته ای شکل های مود را پیشنهاد کردند و حساسیت آن را به موقعیت های جدا شدگی و شدت های مختلف آسیب نشان دادند. در پژوهش دیگری، خان احمدی و همکاران<sup>[۳۵]</sup> با تعریف یک سیگنال رودی و به کارگیری تبدیل موجک پیوسته به شناسایی منطقه ای جدا شدگی در ستون های کامپوزیت CFST پرداختند و نشان دادند که در مقیاس های پایین، همکاری بیشتری از ضرایب موجک به محدوده آسیب وجود دارد؛ با این حال در مقیاس های بالاتر، منطقه ای آسیب باوضوح مناسب تری قابل شناسایی است. همچنین ایشان در مطالعه دیگری،<sup>[۳۶]</sup> مقایسه هی ضرایب جزئیات به دست آمده از تحلیل موجک شکل های اولیه و ثانویه مود های ارتعاشی برای شناسایی آسیب در تیرها را پیشنهاد کرده و نشان داده اند که با استفاده از روش مذکور بدون در نظر گرفتن آثار نوافه، موقعیت های آسیب با خطای کمتر از ۰٪ قابل شناسایی است.

تحلیل ویژگی های بسادمی در سایر مباحث مهندسی سازه نیز مهم است. به عنوان مثال، قله کنی و همکاران<sup>[۳۷]</sup> برای سازه های دارای دیوار بر پیش فولادی با بسادم بزرگ تراز ۲ هر تر، ضریب رفتار در حدود ۱۱ تا ۱۳، برای سازه های بلند مرتبه برابر با ۸، و برای سازه های کوتاه و میان مرتبه در حدود ۹ را پیشنهاد کرده اند. با توجه به استفاده ای روز افزون از صفحه های فولادی در صنعت ساختمان و امکان انتقال و گسترش آسیب های جزئی در میان قاب های صفحه بیهی به دیگر المان ها، شناسایی آسیب در صفحات مهم بوده و مورد توجه نویسنده اگان نوشتار حاضر واقع شده است. از طرفی اغلب مطالعات انجام شده در ارتباط با پایش سلامت در المان های صفحه بیهی بر مبنای استفاده از تبدیلات ایجاد شده در نوشتار حاضر، یک (همانند تبدیل موجک) با زمینه ای تئوری دو بعدی بوده است. در نوشتار حاضر، یک الگوریتم تشخیصی مبتنی بر شکل های اولیه و ثانویه مود های ارتعاشی دو بعدی و تبدیل موجک پیوسته با زمینه ای تئوری یک بعدی برای شناسایی موقعیت های مختلف آسیب در صفحه های فولادی، پیشنهاد و کارایی تشخیصی آن بررسی شده است.

[۲۰] با استفاده از تبدیل موجک ایستا<sup>۳</sup> و داده های مودال، موفق به شناسایی آسیب ترک در تیرها با شرایط تکیه گاهی ساده شده اند. <sup>۴</sup> و همکاران<sup>[۲۱]</sup> نیز با بکارگیری موجک های گوسی جهت دار دو بعدی<sup>۵</sup> و شکل های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر<sup>۶</sup> موفق به شناسایی آسیب در صفحات شده اند. لی<sup>۷</sup> و همکاران<sup>[۲۲]</sup> با استفاده از روش آنتربی موجک نسبی پیوسته<sup>۸</sup> به شناسایی آسیب در سازه های پل خربایی پرداخته و نشان داده اند که این روش قابلیت محلی سازی آسیب در سازه های پل خربایی را دارد. کاتونین<sup>[۲۳]</sup> با استفاده از موجک های ناپایدار کوینکانکس<sup>۹</sup> تحت اثر انرژی های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل های مود صفحات کامپوزیتی آسیب دیده پرداخته و نشان داده است که با استفاده از موجک های مذکور، مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مزدی رخ می دهد. پاتل<sup>۱۰</sup> و همکاران<sup>[۲۴]</sup> با تحلیل موجک پاسخ های ارتعاشی ثبت شده هی تراز هر طبقه از یک ساختمان بتنی برای جرم های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. نادرپور و فخاریان<sup>[۲۵]</sup> با استفاده از یک روش دو مرحله بی مبتنی بر موجک و الگوریتم های بهینه سازی به شناسایی آسیب های چندگانه در تیرها پرداختند و با بهره گیری از تبدیل موجک، محل های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجھولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت های شناسایی شده بی را که دارای انرژی پکسان با سیگنال اصلی بود، برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. عملکرد روش اخیر در شناسایی، با استفاده از نتایج نمونه ای آزمایشگاهی مورد تأیید واقع شد.

عباس نیا و همکاران<sup>[۲۶]</sup> با استفاده از یک روش دو مرحله بی مبتنی بر موجک و الگوریتم های بهینه سازی به شناسایی آسیب های چندگانه در تیرها پرداختند و با بهره گیری از تبدیل موجک، محل های آسیب را شناسایی کردند. سپس سیگنال تجزیه شده بی را که دارای انرژی پکسان با سیگنال اصلی بود، برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. علاوه بر این روش اخیر در شناسایی، با استفاده از نتایج نمونه ای آزمایشگاهی مورد تأیید واقع شد.

عباس نیا و همکاران<sup>[۲۷]</sup> با استفاده از یک روش دو مرحله بی مبتنی بر موجک و الگوریتم های بهینه سازی به شناسایی آسیب های چندگانه در تیرها پرداختند و با بهره گیری از تبدیل موجک، محل های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجھولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت های شناسایی شده بی را که دادند و از طریق الگوریتم های بهینه سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب ایک ای از موقعیت های شدنی. یانگ و ایادیجی<sup>[۲۸]</sup> با روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از سطح سامد مودال<sup>۱۱</sup> ارائه دادند و با محاسبه هی ضرایب موجک سطح سامد مودال، موقعیت آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه را شناسایی کردند. نوری و همکاران<sup>[۲۹]</sup> با روشی مبتنی بر نزدیکی موجک به شناسایی آسیب سازه های پل فولادی پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان، می توان شناسایی آسیب موقوفی را انجام داد. یونسی و همکاران<sup>[۳۰]</sup> بر اساس داده های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب جدا شدگی در ستون های فولادی پر شده با بتن (CFST)<sup>۱۲</sup> پرداختند. ایشان آسیب جدا شدگی را توسط یک لایه پلی استایرن نازک در یک وجه ستون بین بتن و فولاد در نظر گرفتند و با به کار گیری تبدیل موجک پیوسته، موفق به شناسایی موقعیت آسیب جدا شدگی شدند. وانگ<sup>[۳۱]</sup> و همکاران<sup>[۳۲]</sup> تبدیل موجکی مبتنی بر روش بردار نیروی باقی مانده برای تشخیص آسیب در سازه های تونی پیشنهاد دادند و برای مدل المان محدود تونل با انواع آسیب استفاده کردند و نتایج شناسایی مطلوبی به دست آوردند. میرزا بی و همکاران<sup>[۳۳]</sup> با روشی مشابه روش عباس نیا و همکاران<sup>[۲۷]</sup> به شناسایی آسیب در سازه های خربایی با تعداد المان های زیاد پرداختند. در ابتدا، المان های محتمل آسیب را شناسایی و سپس مقدار خسارت در هر یک از المان ها را محاسبه کردند. خان احمدی و همکاران<sup>[۳۴]</sup> با استفاده از تحلیل موجک دو بعدی شکل های مود صفحه های فولادی به مقایسه هی ضرایب موجک وضعیت های با و بدون آسیب پرداختند و نشان دادند که اغتشاش ها در ضرایب موجک تولید شده و وضعیت های محتمل آسیب مقایسه با ضرایب موجک تولید شده و وضعیت بدون آسیب در موقعیت های مختلف



شکل ۱. صفحه‌ی فولادی با موقعیت‌های آسیب تعریفی و شرایط لبه‌ی آزاد.

#### جدول ۱. مشخصات آسیب در صفحه‌ی فولادی شکل ۱.

نام		تعداد	شماره	مرکز آسیب (m)	طولی عرضی
D 1	۱			۰/۶۰	۰/۱۵
	۲			۰/۴۰	۰/۳۰
	۳			۰/۲۰	۰/۴۵
D 2	۱			۰/۶۰	۰/۱۵
	۳			۰/۲۰	۰/۴۵
	۴			۰/۲۰	۰/۱۵
	۵			۰/۶۰	۰/۴۵
D 3	۱			۰/۶۰	۰/۱۵
	۲			۰/۴۰	۰/۳۰
	۳			۰/۲۰	۰/۴۵
	۴			۰/۲۰	۰/۱۵
D 4	۵			۰/۶۰	۰/۴۵

## ۴. تحلیل مودال

#### ۱.۱. بررسی اثر آسیب در مقادیر بسامد

ز دینامیک سازه‌ها، معادله‌ی ارتعاش آزاد بدون میرایی یک سیستم سازه‌ی  $n$  درجه زادی مطابق رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$M\ddot{U} + KU = \{\circ\}_{n \times 1} \quad (5)$$

که در آن، ماتریس‌های  $M$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی و  $U$  پاسخ سازه هستند. معادله‌ی مشخصه‌ی رابطه‌ی ۵ با در نظر گرفتن پاسخ‌هایی به شکل توابع نمایی به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$\det(K - \omega^\top M) = 0 \quad (8)$$

که در آن،  $n$  بسامد طبیعی سازه است. معادله مشخصه‌ی  $\psi$ ، با یک معادله‌ی چندجمله‌ی درجه  $n$  متناظر است که از حل آن،  $n$  مقدار متمایز برای بسامد حاصل می‌شود و هر بسامد نظری یک شکل مود است. هرگونه تغییر در خواص ماده، از جمله مدول کشسانی، در ماتریس‌های جرم و سختی سازه تأثیرگذار است؛ و در نتیجه، آثار آن در مشخصات مودال (بسامدها و شکل‌های مود ارتعاشی) لحاظ

## ۲. تبدیل موجک

تبديل موجک یک تبدیل ریاضی پردازشی سیگنال هاست که مشخصات سامدی سیگنال را در یک بازه زمانی کوتاه استخراج می کند و نشان می دهد که با گذشت زمان، چگونه تغییر می کند. تبدیل موجک، مجموعه ای از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن سامدی تغییر می کند و اجزاء سامدی در رزولوشن های مختلف به دست می آیند.<sup>[۲۸]</sup> در یک تقسیم بندی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)<sup>[۱۹]</sup> و تبدیل موجک گستته (DWT)<sup>[۲۰]</sup> تعریف می شوند که در نوشتار حاضر، با توجه به اینکه نوع پیوسته‌ی تبدیل موجک مدد نظر بوده است، از بیان مبانی تئوری نوع گستته‌ی آن صرف نظر شده است. تبدیل موجک پیوسته سیگنال ( $f$ ) در بازه‌ی  $\infty - \infty$  مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می شود:<sup>[۲۹]</sup>

$$CWT_{s,\tau}^{\psi}(f(t)) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن،  $s$  و  $\tau$  به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند و  $\psi$  تابع موجک است. مقیاس های بالا  $(1 < s)$  متناظر با جزئیات  $^{21}$  و مقیاس های پایین  $(1 < s)$  متناظر با تقریب های  $^{22}$  سیگمال هستند. در رابطه‌ی  $1$  تابع موجک باید این ویژگی ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد: [۴۰۱۴]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

## ۲. ارزی آن محدود باشد: [۴۰و۴۱]

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^r dt < +\infty \quad (\mathfrak{P})$$

### ۳. باید در رابطه‌ی ۴ صدق کند: [۴۲-۴۰]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega^{-1} |\Psi(\omega)|^4 d\omega < +\infty \quad (4)$$

که در آن، **﴿تَبَدِيلٌ فُورِيٌّ﴾** و **﴿بِيَانِگَرِ بِسَامِدِ هَسْتَنَدِ﴾** را بخطه **﴿پیشنهاد می‌کند﴾** که تابع به صورت نوسانی است. را بخطه **﴿۳﴾**، به این معنی است که بیشترین انرژی **﴿موجک برای یک بازه‌ی زمانی کوتاه محدود نمی‌شود﴾** [۴۱].

### ۳. مدل سازی اجزاء محدود صفحه‌ی فولادی

صفحه‌ی فولادی (مطابق شکل ۱) به ابعاد  $6/8 \times 0/8$  متر با ضخامت ۲ میلی‌متر و موقعيت‌های آسيب مربعی به طول ضلع ۵ سانتی‌متر به شماره‌های ۱ تا ۵ در نرم افزار آباکوس <sup>۲۳</sup> با مشخصات مکانیکی مدول کشسانی  $20000$  مگاپاسکال، چگالی  $7850$  کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پوآسون  $0/3$  و شرایط لبه‌ی آزاد با استفاده از المان  $3D$  Shell مدل سازی شده است. مشخصات آسيب در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار  $10\%$  کاهش مدول کشسانی فولاد در هر یک از موقعيت‌های آسيب به عنوان خسارت در نظر گرفته شده است. در این صورت، مدول کشسانی موقعیت‌های آسيب برابر با  $0/9$  مدول کشسانی نواحی بدون آسيب خواهد بود.

مقادیر زاویه بین شکل های اولیه و ثانویه مود محاسبه و در جدول های ۳ الی ۵ گزارش شده اند. در صورتی که هیچ گونه آسیب در صفحه اتفاق نیفتاده باشد، مقدار زاویه بین شکل های اولیه و ثانویه برای تمامی مودهای متناظر صفر محاسبه می شود. به عبارتی دیگر، بردارهای جایه جایی درجه های آزادی اولیه و ثانویه مود زام بر هم منطبق خواهد شد؛ در غیر این صورت، مقادیر زاویه می غیر صفر محاسبه می شوند. مقادیر قطری گزارش شده در جدول های ۳ الی ۵، غیر صفر هستند که به دلیل وجود آسیب در صفحه است.

## ۵. شناسایی آسیب

از قابلیت های تبدیلات موجک، شناسایی موقعیت های مکانی یا زمانی است که در آنجا، سیگنال موردنظر دچار ناپیوستگی های ناگهانی می شود. بررسی های اولیه انجام شده نشان می دهند که ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک سیگنال های فرضی، اطلاعات مفیدی برای شناسایی نقاط ناپیوستگی دارند. بنابراین، در نوشتار حاضر، برای شناسایی آسیب در صفحه، الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته می بُعدی ارائه شده است که با استفاده از شاخص های پیشنهادی، موقعیت های آسیب با ایجاد قله های برآمده از بی نظمی قابل شناسایی است.

### ۱.۵. الگوریتم تشخیص آسیب

گام ۱: فراخوانی سیگنال های اولیه و ثانویه می شکل مود به محیط نرم افزار متلب؛

گام ۲: درون یابی سیگنال های فراخوانی شده بر مبنای طول و عرض صفحه ( $L$  و  $W$ )؛

گام ۳: انجام تحلیل موجک پیوسته یک بعدی سیگنال های دو بعدی حاصل از

گام ۲ و تشکیل ماتریس های شاخص های آسیب DI-L و DI-W (پیوست ۱)؛

گام ۴: اختصاص درجه های ماتریس شاخص های تشخیصی به درجه های آزادی صفحه فولادی و شناسایی آسیب (پیوست ۱).

## ۲.۵. شناسایی موقعیت های آسیب

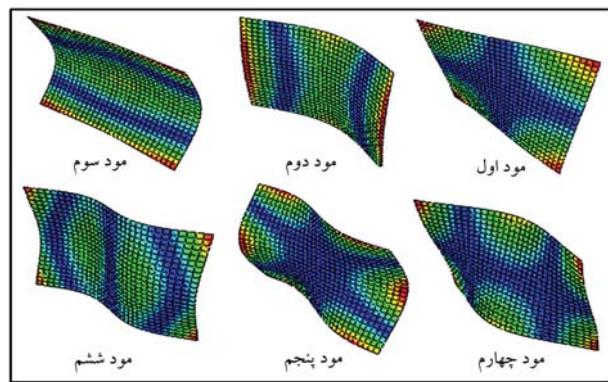
در نرم افزار متلب (R2021a)، کدنویسی ها برای محاسبه شاخص های تشخیصی در دو بعد طول و عرض صفحه انجام شده است (پیوست های ۱ و ۲) و مقادیر محاسبه شده به درجه های آزادی نظریه شدن در صفحه فولادی انتخاب داده شده اند. در شکل های ۳ الی ۵، نتایج نموداری مربوط به شاخص های تشخیصی DI-L سه مود اول وضعیت های آسیب D1، D2 و D3 ترسیم شده است. همچنین، در شکل های ۸ الی ۱۰، نتایج نموداری سه مود اول وضعیت های آسیب براساس شاخص های تشخیصی DI-W مشاهده می شوند. ضرایب موجک تعریف کننده شاخص های تشخیصی بر مبنای استفاده از تابع موجک coif5 محاسبه شده اند.

## ۳.۵. بررسی تغییر شرایط گیرداری لبه ها

روش تشخیص آسیب پیشنهادی برای صفحه با شرایط گیرداری لبه ها به صورت آزاد بررسی و نتایج آشکارسازی مطلوب حاصل شده است. اما صفحات فولادی به عنوان دیوارهای برشی دارای شرایط گیرداری لبه های غیر آزاد هستند؛ بنابراین، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، تشخیص و تعیین موقعیت آسیب در صفحه با شرایط

جدول ۲. بسامدهای ۶ مود اول حالت های سالم و آسیب (Hz).

شماره	حالت سالم			مود
	D3	D2	D1	
	بسامد طبیعی (Hz)			
۱	۱۳/۵۸۸	۱۳/۵۹۴	۱۳/۵۹۵	۱۳/۶۰۸
۲	۱۶/۲۰۲	۱۶/۲۱۲	۱۶/۲۰۹	۱۶/۲۲۵
۳	۲۰/۱۳۵	۲۰/۱۵۷	۲۰/۱۴۷	۲۰/۱۸۱
۴	۲۲/۲۱۳	۲۲/۲۱۳	۲۲/۲۲۰	۲۲/۲۴۷
۵	۲۹/۳۷۰	۲۹/۳۷۰	۲۹/۳۸۹	۲۹/۴۰۹
۶	۴۷/۴۷۷	۴۷/۴۷۸	۴۷/۵۲۶	۴۷/۵۷۵



شکل ۲. شکل های مود صفحه فولادی سالم.

می شود؛ بنابراین، از بررسی پاسخ ها می توان پایش سلامتی در سازه را مورد پژوهش قرار داد. تحلیل مودال صفحه فولادی با وضعیت های سلامتی بدون آسیب و با آسیب (حالت های آسیب D1 تا D3) با در نظر گرفتن ابعاد مش تحلیلی به طول ۲/۵ سانتی متر در نرم افزار اجراء محدود آباکوس انجام شده است. در جدول ۲، مقادیر بسامدی ۶ مود اول ارائه و در شکل ۲، شکل های مود نظیر هر بسامد وضعیت سالم مشاهده می شود که مطابق آن، در اثر آسیب، مقدار بسامد مودهای مختلف حالت های آسیب از بسامد متناظر از حالت سالم کمتر است. همچنین، مقادیر بسامدی حالت های آسیب D1 و D2 از مقادیر بسامدی حالت آسیب D3 کمتر است؛ به عبارتی، با اضافه شدن موقعیت های جدید آسیب، مقادیر بسامدی کاهش یافته است.

### ۲.۴. بررسی اثر آسیب در زاویه بین شکل های مود ارتعاشی

یکی از مفاهیمی که به کمک آن می توان تأثیر آسیب در جایه جایی درجه های آزادی شکل های مود ارتعاشی سازه را مطالعه و بررسی کرد، زاویه بین شکل های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی است که عبارت از زاویه با ابتدای مشترک بردارهای شکل مودهای اولیه و ثانویه است که مطابق رابطه ۷ تعریف می شود:

$$\theta_{i,j}^{u,d} = \frac{180^\circ}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\left( \sum_{k=1}^n \phi_{i,k}^u \times \phi_{j,k}^d \right)}{\sqrt{\left( \sum_{k=1}^n \left( \phi_{i,k}^u \right)^2 \right) \left( \sum_{k=1}^n \left( \phi_{j,k}^d \right)^2 \right)}} \right) \quad (7)$$

که در آن،  $\phi_i^u$  و  $\phi_j^d$  به ترتیب شکل اولیه مود زام و شکل ثانویه مود زام هستند.

جدول ۳. زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D.

شماره‌ی مود وضعیت بدون آسیب						زاویه‌ی بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۹۰	۹۰	۹۰	۸۹/۹۹۲	۸۹/۹۷۸	۱۷۹/۹۷۲	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۳۴۶	۰/۰۳۱	۸۹/۹۸۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۵۷	۹۰/۳۲۷	۸۹/۹۹۶	۳
۸۹/۹۵۴	۹۰/۰۶۷	۰/۰۸۶	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۸۹/۰۵۴	۱۷۹/۹۰۸	۹۰/۰۶۸	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۱۷۹/۸۹۵	۸۹/۱۶۶	۸۹/۹۵۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

جدول ۴. زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب ۲.

شماره‌ی مود وضعیت بدون آسیب						زاویه‌ی بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۱۰	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۲۳۰	۰/۰۲۵	۹۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۳۴	۹۰/۳۳۹	۹۰	۳
۹۰	۹۰	۰/۰۲۲	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۹۱/۰۰۵	۰/۱۱۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۰/۱۳۳	۹۰/۷۸۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

جدول ۵. زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب <sup>۳</sup>.

شماره‌ی مود وضعیت بدون آسیب							راویه‌ی بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰ / ۰ ۱۳	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۰ / ۰ ۱۳	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰ / ۳۴۳	۰ / ۰ ۲۱	۹۰	۰ / ۰ ۲۱	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰ / ۰ ۵۳	۹۰ / ۳۲۹	۹۰	۹۰	۳
۹۰	۹۰	۰ / ۰ ۲۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۹۱ / ۰ ۰ ۵	۰ / ۱ ۱ ۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۰ / ۱۳۲	۹۰ / ۷۸۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

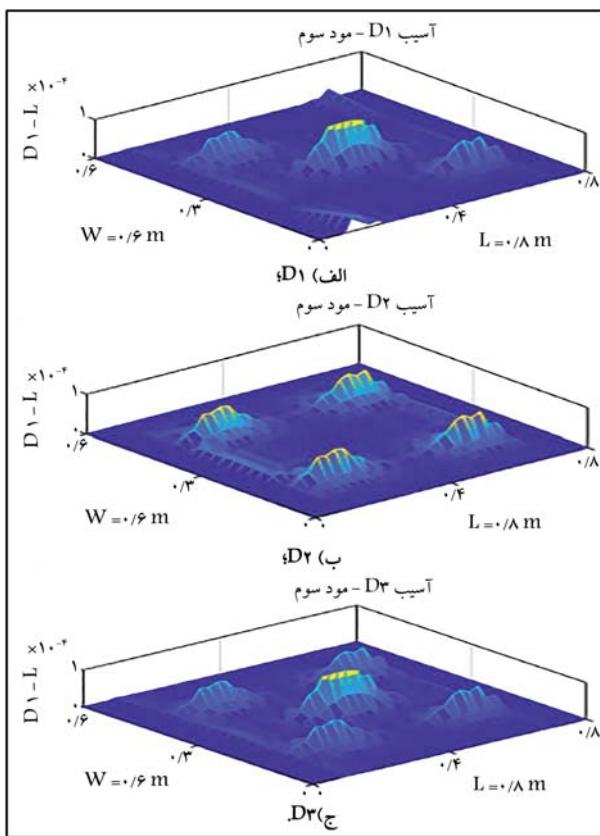
مودهای مختلف انجام شده است، درستی این قضیه تأیید شده است. به عنوان مثال، در شکل ۱۱، نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D۳ با تعریف مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، و (۵) و (الف) ۲۰٪ و (ب) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فقط، ارتفاع قله‌های بی‌نظمی ایجاد شده در موقعیت آسیب ۲ با افزایش مقدار خسارت در موقعیت مذکور افزایش پیدا کرده است.

گیرداری کامل لبها در مود اول بررسی و مشاهده شد که با استفاده از روش اخیر می‌توان موقعیت‌های آسیب در صفحه را با شرایط گیرداری کامل لبها شناسایی کرد. نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L و DI-W مود اول (شکل ۹) برای وضعیت آسیب D<sup>3</sup> با مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

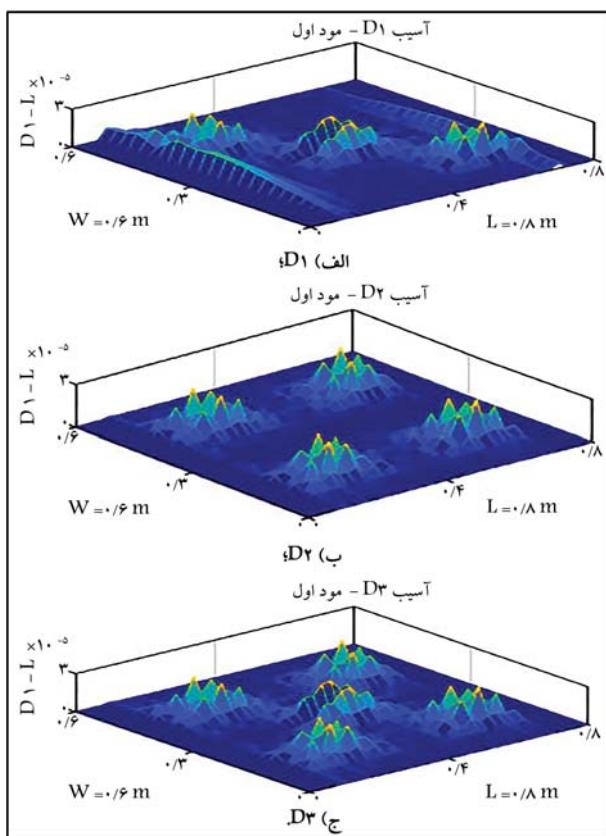
۴.۵. بررسی اثر تغییر شدت آسیب در شاخص‌های تشخیص آسیب شاخص‌های تشخیصی آسیب معرفی شده در نوشتار حاضر به مقدار خسارت رخداده در موقعیت‌های آسیب حساس هستند و با افزایش مقدار خسارت رخداده در یک موقعیت آسیب، ارتفاع قله‌های ایجاد شده از بی‌نظمی‌ها، در همان موقعیت آسیب افزایش می‌یابد. در بررسی‌های تشخیص آسیب که در

## ۵. شناسایی آسیب با دیگر توابع موجک

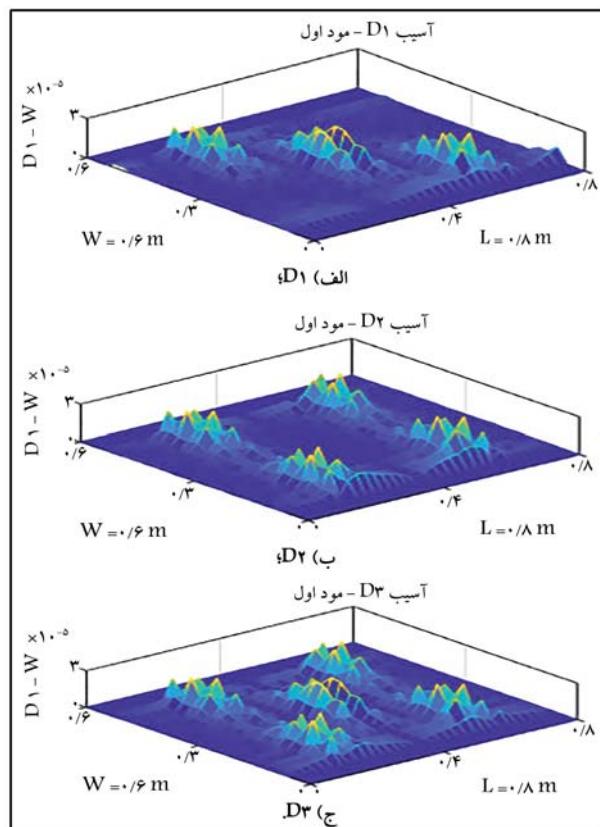
بکی از مشکلاتی که در روش‌های تشخیص آسیب بر پایهٔ تبدیلات موجک وجود دارد، این است که با کدام تابع موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب را به درستی



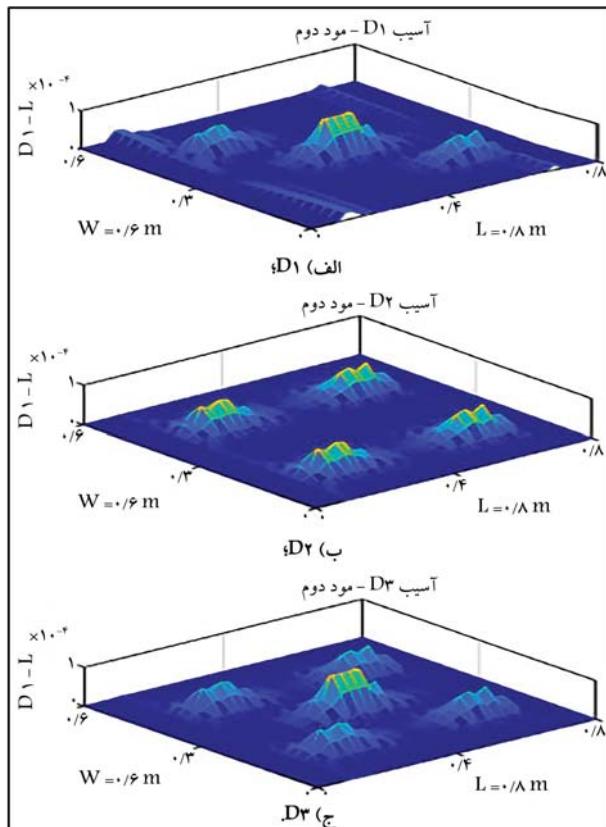
شکل ۵. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود سوم برای وضعیت آسیب.



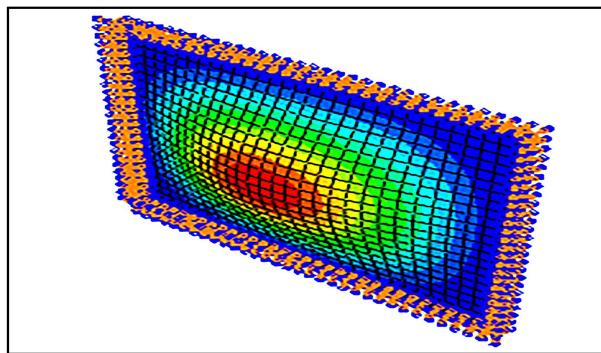
شکل ۳. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب.



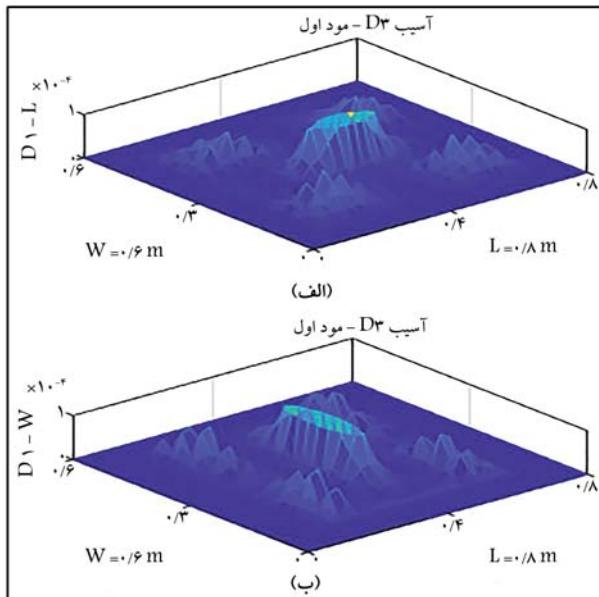
شکل ۶. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-W مود اول برای وضعیت آسیب.



شکل ۴. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود دوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۹. شکل مود اول صفحه‌ی فولادی سالم با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها.

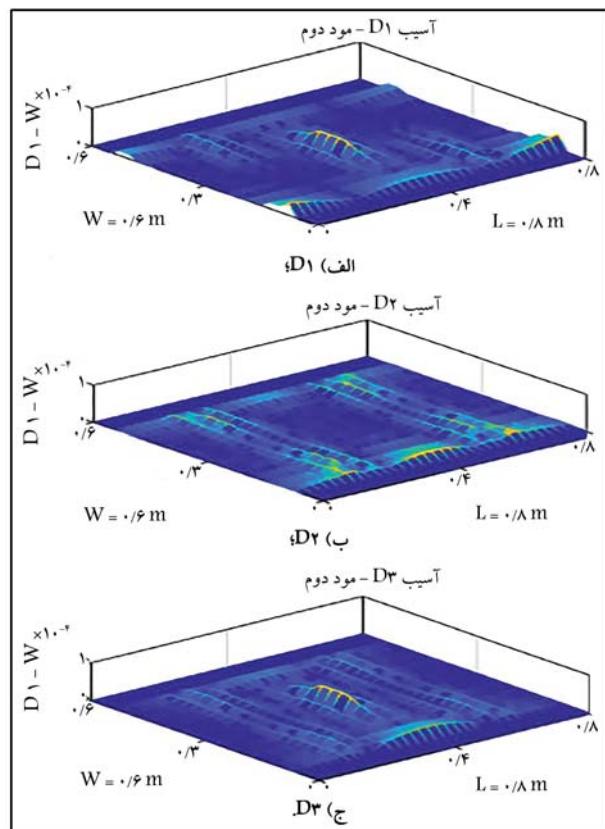


شکل ۱۰. نمودار شاخص‌های تشخیصی (الف) D1-L و (ب) D1-W مود اول آسیب D3 با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها.

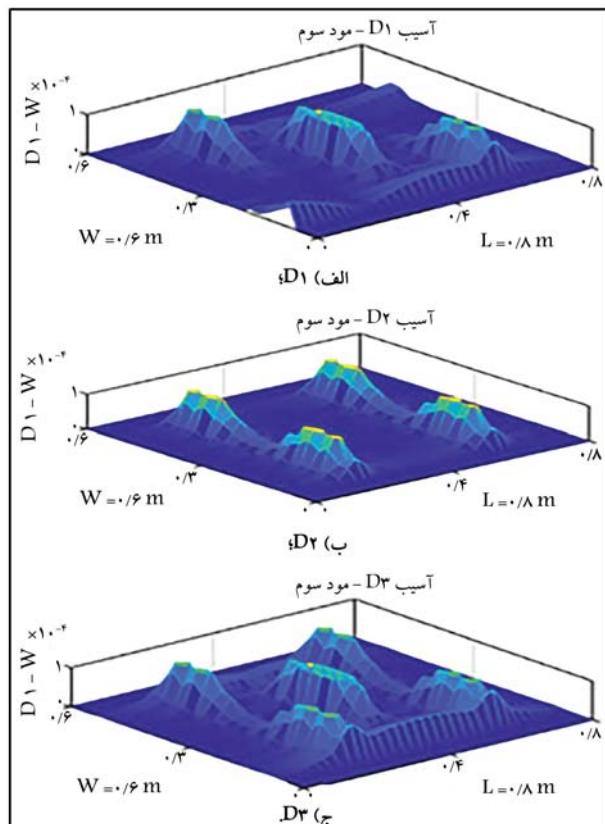
شناختایی کرد؛ به عبارتی، انتخاب تابع موجک مناسب به عنوان یکی از چالش‌های روش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر تبدیلات موجک مطرح است. در نوشتار حاضر، ذراییند آشکارسازی موقعیت‌های آسیب در صفحه با تابع موجک متعدد بررسی و مشاهده شد که می‌توان با استفاده از شمار زیادی از تابع موجک، موقعیت‌های آسیب را به درستی شناختایی کرد که این موضوع بر قابلیت اعتماد تشخیصی روش پیشنهادی نوشتار حاضر می‌افزاید. به عنوان مثال، در شکل ۱۲، نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی D1-L مود اول برای وضعیت آسیب D3 با تابع موجک rbio5/5, bior5/5, sym4 و db8 مشاهده می‌شود که تأییدی بر درستی مطالعه بخش حاضر است.

## ۶. نتیجه‌گیری

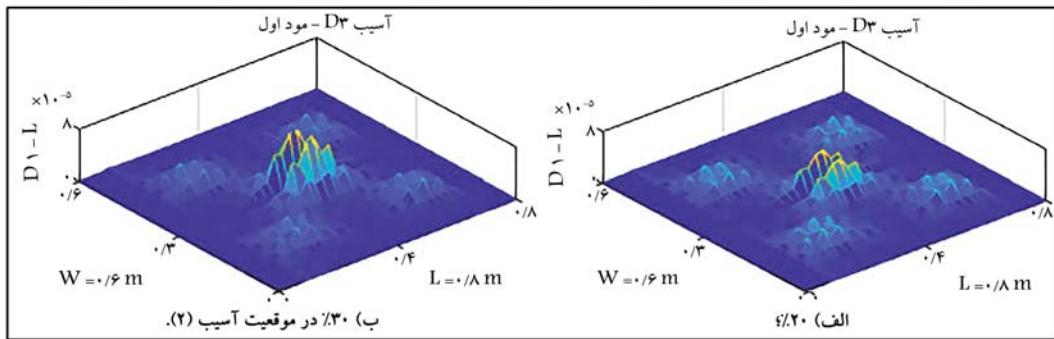
باش سلامت در سازه‌های مهندسی، از زمینه‌های پژوهشی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است که همواره شناختایی و تعیین موقعیت‌های آسیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل آن در سازه‌ها مطرح بوده است. امروزه استفاده از صفحه‌های جدار نازک فولادی در صنعت ساختمان، به ویژه به عنوان دیوار برشی فولادی، رو



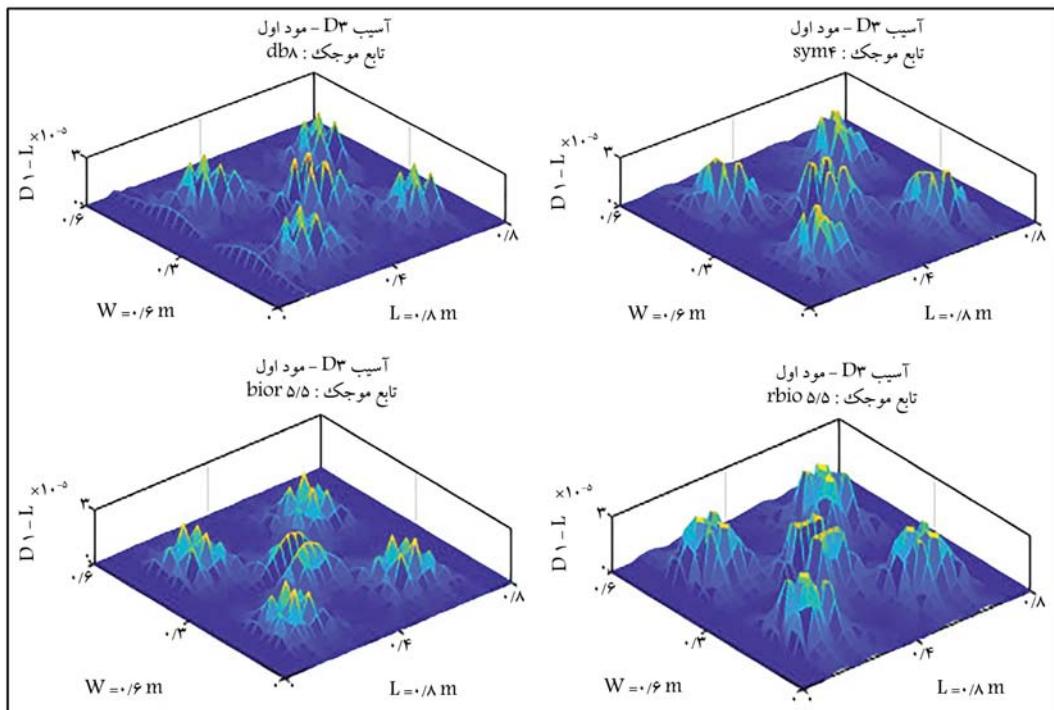
شکل ۷. نمودار شاخص‌های تشخیصی D1-W مود دوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۸. نمودار شاخص‌های تشخیصی D1-W مود سوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۱۱. نمودار شاخص‌های تشخیصی DIL مود اول برای وضعیت آسیب  $D^3$  با مقدار خسارت  $10\%$  در موقعیت‌های آسیب (۱)، (۳)، (۴) و (۵) و مقدار خسارت (الف)  $20\%$  و (ب)  $30\%$  در موقعیت آسیب (۲).



شکل ۱۲. نمودار شاخص‌های تشخیصی DIL مود اول برای وضعیت آسیب  $D^3$  با استفاده از توابع موجک  $sym^4$ ،  $db8$  و  $bior5/5$  و  $rbio5/5$ .

۳. در اثر آسیب، زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی غیرصرف‌است؛ به عبارتی، بردار جایه‌جایی مodal درجه‌های آزادی متناظر از دو وضعیت اولیه و ثانویه بر هم انطباق ندارند.

۴. اندازه‌ی زاویه‌ی بین شکل اولیه‌ی مود  $\theta$  و شکل ثانویه‌ی مود  $\vartheta$  ( $j \neq i$ ) برابر با مقدار تقریبی  $90^\circ$  درجه محاسبه شده است؛ که وینگی اصلی تعامل مودهای متفاوت است. در صورتی که آسیب در سازه وجود نداشته باشد، ماتریس‌های زاویه (جدول‌های ۳ تا ۵) به صورت کاملاً متقارن محاسبه می‌شوند.

برای شناسایی موقعیت‌های محتمل آسیب در صفحه، یک الگوریتم تشخیصی بر مبنای استفاده از شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی دو بعدی و تبدیل موجک پیوسته یک بعدی ارائه شده است. خروجی الگوریتم پیشنهادی، ماتریس‌های شاخص تشخیصی DIL و DI-W هستند که:

(الف) از اختصاص مقادیر درایه‌ی  $b_i$  هر یک از ماتریس‌های ذکر شده به درجه‌های

به افزایش است. با توجه به گسترش آسیب‌های موضعی در صفحه‌های فولادی و انتقال آن‌ها به دیگر المان‌ها امکان وقوع آسیب‌های کلی در سازه وجود دارد؛ بنابراین، شناسایی آسیب‌های موضعی در صفحه‌ها دارای اهمیت است. در نوشیار حاضر، صفحه‌ی فولادی با وضعیت‌های با و بدون آسیب در نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی و اطلاعات مodal شامل بسامدی‌های طبیعی و شکل‌های مود ارتعاشی استخراج شده است. بررسی‌ها نشان داده است که:

۱. در تمامی مودها (به دلیل وجود آسیب)، مقدار بسامد وضعیت‌های آسیب از مقدار بسامد متناظر با وضعیت بدون آسیب کمتر بوده است.

۲. از مقایسه‌ی مقادیر بسامدی وضعیت‌های آسیب  $D1$  و  $D2$  با مقادیر بسامدی متناظر با وضعیت آسیب  $D^3$  مشخص می‌شود که با اضافه شدن یک یا چند موقعیت آسیب به یک وضعیت آسیب قبلی، تغییر کاهشی بیشتری در مقادیر بسامد رخ می‌دهد.

شناسایی موقعیت های آسیب رضایت بخش نیست و حال آنکه با استفاده از DI-L، موقعیت های مختلف آسیب به درستی شناسایی شده اند.   
ج) مقدار بی نظمی های ایجاد شده در نمودار شاخص های تشخیصی در یک موقعیت آسیب به مقدار خسارت، ارتفاع قله های بی نظمی در آن موقعیت آسیب وابسته است و با افزایش مقدار خسارت، ارتفاع قله های بی نظمی در آن موقعیت آسیب افزایش می یابد.   
د) طبق الگوریتم پیشنهادی با استفاده از توابع موجک متعددی می توان موقعیت های آسیب در صفحه را با شرایط مختلف گیرداری لبه ها شناسایی کرد.

آزادی نظریه ای از مفهوم شناسایی، قله هایی از بی نظمی ها و اغتشاش ها در موقعیت های آسیب ایجاد می شوند که با یک بررسی ساده می توان موقعیت های آسیب را به درستی شناسایی کرد.

ب) مقایسه ای نتایج نموداری حاصل از ترسیم ماتریس های شاخص های تشخیصی نشان می دهد که شاخص های تشخیصی امتداد طولی یا DI-L نسبت به شاخص های تشخیصی امتداد عرضی یا DI-W عملکرد شناسایی مطلوبی ارائه می دهد، به طوری که در مود دوم مشاهده می شود با استفاده از DI-W،

## پابندی ها

1. Wavelet Transform
2. Katunin
3. Zhong & Oyadji
4. Stationary Wavelet Transform
5. Xu
6. Two-Dimensional Directional Gaussian Wavelets
7. Laser Scanned Operating Deflection Shapes
8. Lee
9. Continuous Relative Wavelet Entropy Method
10. Quincunx
11. Patel
12. Yang & Oyadji
13. Modal Frequency Surface
14. Concrete-Filled Steel Tube (CFST)
15. Wang
16. Hanteh
17. Ma
18. Sun
19. Continuous Wavelet Transform (CWT)
20. Discrete Wavelet Transform (DWT)
21. Details
22. Approximations
23. Abaqus

## منابع (References)

1. Zhou, S., Tang, B. and Chen, R. "Comparison between non-stationary signals fast fourier transform and wavelet analysis", *Intelligent Interaction and Affective Computing, International Asia Symposium, IEEE* (2009).
2. Katunin, A. "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, **45**(2), pp. 41-52 (2010).
3. Zhong, S. and Oyadji, S.O. "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, **18**(2), pp. 169-190 (2011).
4. Xu, W., Radzienki, M., Ostachowicz, W. and Cao, M. "Damage detection in plates using two-dimensional direction Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes", *Structural Health Monitoring*, **12**(5-6), pp. 457-468 (2013).
5. Lee, S.G., Yun, G.J. and Shang, S. "Reference-free damage detection for truss bridge structures by continuous relative wavelet entropy method", *Structural Health Monitoring*, **13**(3), pp. 1-14 (2014).
6. Katunin, A. "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**(1), pp. 251-261 (2015).
7. Patel, S.S., Chourasia, A., Panigrahi, S. and et al. "Damage identification of RC structures using wavelet transformation", *Procedia Engineering*, **144**, pp. 336-342 (2016).
8. Naderpour, H. and Fakharian, P. "A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification", *KSCJ Journal of Civil Engineering*, **20**(7), pp. 2859-2867 (2016).
9. Fakharian, P. and Naderpour, H. "Damage severity quantification using wavelet packet transform and peak picking method", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **27**(1), p. 04021063 (2022).
10. Abbasnia, R., Mirzaei, B. and Yousefbeik, S., "A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams", *Journal of Vibroengineering*, **18**(3), pp. 1497-1513 (2016).
11. Yang, C. and Oyadji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Computers & Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
12. Noori, M., Wang, H., Altabayc, W.A. and et al. "A modified wavelet energy rate-based damage identification method for steel bridges", *Scientia Iranica*, **25**(6), pp. 3210-3230 (2018).

13. Rezaifar, O., Younesi, A., Gholhaki, M. and et al. "Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(4), pp. 93-106 (2018).
14. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", *Magazine of Civil Engineering*, **85**, pp. 136-145 (2019).
15. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Esfandiari, A. "Damage detection in concrete filled tube columns based on experimental modal data and wavelet technique", *Mechanics of Advanced Composite Structures*, **7**(2), pp. 245-254 (2020).
16. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Active interface debonding detection of a concrete filled tube (CFT) column by modal parameters and continuous wavelet transform (CWT) technique", *Structural Monitoring and Maintenance*, **8**(1), pp. 69-90 (2021).
17. Wang, S., Li, J., Luo, H. and et al. "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", *Engineering Structures*, **178**, pp. 506-520 (2019).
18. Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefbeik S. and et al. "A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization algorithm", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **7**(1), pp. 1-20 (2019).
19. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(5), pp. 198-214 (2021).
20. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(8), pp. 289-309 (2021).
21. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalehbahman, A. and et al. "Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method", *Journal of Vibration and Sound*, **10**(20), pp. 144-156 (2022).
22. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(9), pp. 166-183 (2021).
23. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Wavelet-based damage detection of steel beam-structures", *Journal of Structure & Steel*, **15**(33), pp. 15-27 (2021).
24. Rezaifar, O., Gholhaki, M., Khanahmadi, M. and et al. "A review of structural health monitoring and damage detection using wavelet transform: The case study of damage detection in cantilever beams", *Journal of Vibration and Sound*, **11**(21), pp. 157-17 (2022).
25. Khanahmadi, M., Gholhaki, M. and Rezayfar, O. "Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data", *Journal of Modeling in Engineering*, **18**(63), pp. 51-64 (2021).
26. Khanahmadi, M., Khademi-Kouhi, M. and Azizi Rashid, F. "A finite element analytical study of the effect of axial load on structural modal properties in a column", *5th International Conference on Civil, Architecture and Urbanity Engineering* (2021).
27. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Curvature-based damage detection in a column under the effect of axial load", *Journal of Structure & Steel*, **16**(35), pp. 65-75 (2022).
28. Khanahmadi, M., Pouraminian, M., Mohammady Garfamy H. and et al. "Damage detection and identification in a column under the effect of axial load using modal properties and mode shapes-based detection index", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(4.2), pp. 53-62 (2023).
29. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37**(2.2), pp. 131-147 (2021).
30. Hanteh, M. and Rezaifar, O. "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
31. Ma, Q., Solis, M. and Galvin, P. "Wavelet analysis of static deflections for multiple damage identification in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **147**, pp. 1-14 (2021).
32. Sun, G., Wang, Y., Luo, Q. and et al. "Vibration-based damage identification in composite plates using 3D-DIC and wavelet analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **173**, p. 108890 (2022).
33. Mamazizi, A., Khanahmadi, M., and Nobakht Vakili, K. "Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(3.1), pp. 53-63 (2022).
34. Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using wavelet analysis analytical method", *Modares Civil Engineering Journal*, **22**(1), pp. 129-142 (2023).
35. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Rezaifar, O. and et al. "Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis", *Civil Infrastructure Researches*, **8**(2), pp. 173-183 (2023).
36. Gholhaki, M., Karimi, M. and Pachideh, G. "Investigation of subpanel size effect on behavior factor of stiffened steel plate shear wall", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **5**(4), pp. 73-87 (2019).
37. Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O. and et al. "Specification of response modification factor for steel plate shear wall by incremental dynamic analysis method [IDA]", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(2), pp. 211-224 (2019).
38. Mallat, S. "A wavelet tour of signal processing: the sparse way", Academic Press (2008).
39. Gao, R.X., and Yan, R. "Wavelets: Theory and applications for manufacturing", Springer, Science & Business Media (2010).

40. Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of Solids and Structures*, **40**(13-14), pp. 3557-3569 (2003).

41. Zhong, Sh. and Olutunde Oyadiji, S. "Detection of

cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers & Structures*, **89**(1-2), pp. 127-148 (2011).

42. Hansang, K. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).

## پیوست

پیوست ۱. (کد متلب الگوریتم تشخیص آسیب):

```

k1 = floor(n1/10);
DIL(:, 1 : k1 + 1) = 0; DIL(:, n1 - k1 : n1) = 0
for j = 1 : n1
if Teta(Ui(:, j), Di(:, j)) > 90
DIW(:, j) = abs(cwt(Ui(:, j) + Di(:, j), scale, wname));
else
DIW(:, j) = abs(cwt(Ui(:, j) - Di(:, j), scale, wname));
end
end
k2 = floor(m1/10);
DIW(1 : k2 + 1, :) = 0; DIW(m1 - k2 : m1, :) = 0
%Step 1
figure(1); surf(X2, Y2, DIL)
figure(2); surf(X2, Y2, DIW)
%End

```

%Step 2

```

U = xlsread('Undamaged Signal.xlsx', 'Sheet1');
D = xlsread('Damaged Signal.xlsx', 'Sheet1');
%Step 2
[m, n] = size(U);
x1 = linspace(0, L, n); y1 = linspace(0, W, m); N = 2;
x2 = linspace(0, L, N * n); y2 = linspace(0, W, N * m);
[X1, Y1] = meshgrid(x1, y1);
[X2, Y2] = meshgrid(x2, y2);

```

```

Ui = interp2(X1, Y1, U, X2, Y2, 'spline');
Di = interp2(X1, Y1, D, X2, Y2, 'spline');
%Step 3

```

```

[m1, n1] = size(Ui);
DIL = zeros(m1, n1); DIW = zeros(m1, n1);
wname = 'coif5'; scale = 2;

```

```

for i = 1 : m1
if Teta(Ui(i, :), Di(i, :)) > 90
DIL(i, :) = abs(cwt(Ui(i, :) + Di(i, :), scale, wname));
else
DIL(i, :) = abs(cwt(Ui(i, :) - Di(i, :), scale, wname));
end
end

```

پیوست ۲. (کد متلب تابع  $Teta$ ):

```

function [z] = Teta(X, Y)
z = a cos d (dot(X, Y) / (norm(X) * norm(Y)))
end

```



# بهبود کارایی یک مدل منطق فازی در پیش‌بینی شاخص خسارت لرزه‌بی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده

امید زریافیان (دانشجوی دکتری)

توحید پورستم\* (استادیار)

گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهند فضیلتی (استادیار)

گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

عبدالرضا سروقد مقدم (دانشیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

علی گلصویرت پهلویانی (استادیار)

گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

عملیات غربالگری سریع بصری (RVS)، ساده‌ترین و سریع‌ترین روش برای بررسی آسیب‌های لرزه‌بی یک ساختمان است. به دلیل وجود عدم قطعیت در ساختار RVS، از یک مدل منطق فازی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌بی در نوشتار حاضر استفاده شده است. به منظور آموزش مدل فازی نیز از یک الگوریتم اخیر پیشنهاد شده‌ی بهینه‌سازی از دحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده (GuASPSO)، استفاده و نتایج ناشی از آن با الگوریتم‌های PSO و گرگ خاکستری (GWO) مقایسه شده است. از زلزله‌ی سال ۱۳۹۶ سرپل ذهاب ایران نیز به عنوان یک مطالعه‌ی موردنی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل فازی آموزش‌دیده با الگوریتم GuASPSO به ترتیب در ۷۸، ۶۷ و ۶۷ درصد از معیارهای کارایی در سه مرحله‌ی آموزش، اعتبارسنجی و در کل مجموعه‌ی داده‌های ورودی، عملکرد مناسب‌تری را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر از خود نشان می‌دهند. همچنین مدل فازی بهبودیافته، عملکرد بهتری در پیش‌بینی خسارت لرزه‌بی دارد.

وازگان کلیدی: غربالگری سریع بصری (RVS)، خسارت‌پذیری لرزه‌بی، ساختمان‌های بتن مسلح، بهینه‌سازی، GuASPSO، منطق فازی، نگاشت خودسازمان (SOM).

## ۱. مقدمه

موجود است که با آین‌نامه‌های قدیمی طراحی و اجرا شده‌اند، یا ضوابط آین‌نامه‌ی به دلایل مختلف برای آن‌ها استفاده نشده است. بدینهی است که بهسازی تمام سازه‌های آسیب‌پذیر از نقطه‌نظر لرزه‌بی مقرر نبوده نیست.<sup>[۱]</sup> بنا بر این، شناخت سطح خطر آسیب‌پذیری لرزه‌بی و اولویت‌بندی ساختمان‌ها در جهت مقاوم‌سازی نوساز شده است. با این حال، هر منطقه از جهان دارای اینبوی از ساختمان‌های آن‌ها می‌تواند کمک مؤثری در کاهش آثار مخرب زمین‌لرزه‌ها باشد. روش‌های متعددی برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌بی سازه‌ها موجودند که با درجه‌های مختلفی از پیچیدگی توسعه یافته‌اند. روش‌های مذکور می‌توانند از یک رتبه‌بندی ساده تا

تجربیات حاصل از عملکرد ساختمان‌ها در زلزله‌های پیشین که موجب پیشرفت‌های چشمگیری در تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌بی ساختمان‌ها شده است، به همراه طراحی لرزه‌بی براساس آین‌نامه‌های جدید موجب کاهش خسارت‌های لرزه‌بی در ساختمان‌های نوساز شده است. با این حال، هر منطقه از جهان دارای اینبوی از ساختمان‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۰۶/۱۴۰۱، اصلاحیه ۱/۰۱/۱۴۰۱، پذیرش ۱۸/۰۱/۱۴۰۱

DOI:10.24200/J30.2022.61047.3142

استناد به این مقاله:

زریافیان، امید، پورستم، توحید، فضیلتی، مهندی، سروقد مقدم، عبدالرضا و گلصویرت پهلویانی، علی (۱۴۰۲). «بهبود کارایی یک مدل منطق فازی در پیش‌بینی شاخص خسارت لرزه‌بی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۳۹-۲، ص. ۸۰-۷۱.

لرزه‌یی بهره برد هاند.<sup>۱</sup> در رویکرد آن‌ها، رسک لرزه‌یی و آسیب‌پذیری ساختمان در یک چارچوب سلسله مراتبی تحلیل می‌شود، تا یک مدل مبتنی بر منطق فازی برای پیش‌بینی خسارت لرزه‌یی ایجاد کند. آن‌ها رویکرد خود را با استفاده از داده‌های زلزله‌ی نورث‌بیج<sup>۲</sup> (۱۹۹۴) اعتبارسنجی کرده‌اند.

به رغم آنکه منطق فازی از نظر تئوری قادر به مدیریت عدم قطعیت در روش RVS است؛ اما عملاً این امر مستلزم تنظیم دقیق پارامترهای داخلی<sup>۷</sup> مدلی است که در ساختار خود از داده‌های ناشی از روش RVS سود می‌برد. میزان بهینه‌گی پارامترهای داخلی مدلی مانند یک سیستم استنتاج فازی، می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌یی در دقت پیش‌بینی مدل ذکر شده داشته باشد. در مطالعه‌ی حاضر از یک الگوریتم بهینه‌سازی نوبن از دحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده<sup>۸</sup> (GuASPSO)<sup>[۱۷]</sup> به منظور آموزش مدل اصلی تسفاماریام و ساعتچی اوغلو<sup>[۱۸]</sup>، استفاده و نتایج ناشی از مدل طراحی شده با الگوریتم GuASPSO<sup>[۱۹]</sup>،<sup>۱۰</sup> ۲۰۰۸ با نتایج همین مدل زمانی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی از دحام ذرات<sup>[۱۸]</sup> (PSO)<sup>[۱۹]</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)<sup>[۱۰]</sup> آموزش دیده است، مقایسه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

## ۱.۲.۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جست‌وجوی تطبیقی (GuASPSO) هدایت شده

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده (GuASPSO) که نخستین بار توسط رضانی و صفوی<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۰)،<sup>۱۷</sup> ارائه شده است، نسخه‌ی جدیدی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است که نخستین بار توسط کنندی و ابرهارت<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۵)،<sup>۱۸</sup> پیشنهاد شده است. در یکش حاضر، ایندا شکل کلی یک مسئله‌ی بهینه‌سازی که توسط الگوریتم PSO قابل حل است، تشریح شده است. فرض کنید یک مسئله‌ی بهینه‌سازی D بعدی موجود باشد که ذرات شده است. PSO سعی در جست‌وجوی جواب بهینه و در نتیجه، حل جست‌وجوگر الگوریتم PSO آن دارند و فرض کنید که  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$  بردار موقعیت ذره‌ی  $i$  ام و  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  بردار سرعت ذره‌ی  $i$  ام از مجموعه‌ی ذرات باشد. اگر  $Pbest_i^t = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  موقعیت بهترین ذره‌ی تاکنون یافت شده‌ی انفرادی  $i$  ام و  $Gbest^t = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$  موقعیت بهترین ذره‌ی تاکنون یافت شده در میان کل ذرات باشد، سرعت و موقعیت هر ذره در الگوریتم PSO مطابق روابط ۱ و ۲ به روزرسانی می‌شوند:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 r_1 (Pbest_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (Gbest^t - X_i^t) \quad (1)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  اندازه‌ی جمعیت ذرات و  $D$  تعداد ابعاد فضای جست‌وجوی مسئله‌ی بینیه‌سازی است. همچنین  $w$  وزن اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  دو بردار شامل اعداد تصادفی تولیدی در بازه‌ی  $[1, 0]$  و  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب ضرایب مقیاس‌بندی شناختی و اجتماعی هستند. رابطه‌ی ۳، شکل مؤثر رابطه‌ی ۱ است که به آن مدل ضرایب اتفاقاً نیز گفته می‌شود.

$$V_i^{t+1} = \chi[V_i^t + \phi_{\downarrow}(Pbest_i^t - X_i^t) + \phi_{\uparrow}(Gbest^t - X_i^t)] \quad (4)$$

روش‌های پیچیده‌تر، نظری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی سازه‌ها متغیر باشند.<sup>[۱-۳]</sup> با این حال، روش‌شن است که استفاده از روش‌های ساده و سریع برای تعداد زیادی از ساختمان‌ها در مرحله‌ی مقدماتی، مقدم بر روش‌های پیچیده‌تر خواهد بود.

روش RVS<sup>۱</sup> از یک بازرسی سریع بصری (چشمی) توسط یک غربالگر با تجریبه از طریق بررسی بیرونی ساختمان بدون هیچگونه محاسبات سازه‌ی بهره می‌گیرد. هدف اصلی RVS، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ی یک ساختمان به صورت سریع و اقتصادی و ارائه یک رتبه‌ی ایمنی برای آن است. بدینهی است، نتایج ارزیابی RVS به دلیل سرعت و سادگی فرازیند آسیب‌پذیری لرزه‌ی، تقریبی است و چه بسا یک ساختمان نیاز به بررسی‌های دیگری داشته باشد که بسیار پیچیده‌تر و زمان‌برتر هستند و حتی محاسبات سازه‌ی را نیز شامل می‌شوند.<sup>[۴]</sup> گزارش فیما-۱۵۴<sup>[۵]</sup> در ایالات متحده که یکی از معتبرترین دستورالعمل‌های RVS است، پارامترهای مختلفی، مانند: تعداد طبقات، قدمت ساخت، آینین‌نامه‌ی لرزه‌ی استفاده شده، نقاچیص سازه‌ی و غیره را که در رفتار لرزه‌ی ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد، در نظر می‌گیرد. تجربه‌ی زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد نقاچیص سازه‌ی (نظیر: نامنظمی در پلان، نامنظمی در ارتفاع، و غیره) می‌توانند آسیب‌پذیری لرزه‌ی ساختمان‌ها را افزایش دهند.

حریزچیان<sup>۳</sup> و همکاران<sup>۴</sup> و ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱<sup>۵</sup>، بررسی جامعی در زمینه‌ی روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌بی انجام داده‌اند. روش‌های اخیر را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: ۱. مدل‌های تجربی و آماری، ۲. مدل‌های مهندسی تحلیلی و ۳. مدل‌های ابتکاری. در سناریوهای مشخصی، از ترکیبی از مدل‌های ذکر شده نیز می‌توان استفاده کرد.<sup>۶</sup> روش RVS یک روش تجربی است که از ماهیت ساده و سریع خود در عین غیرقطبه بودن، بهره می‌برد. روش‌های متمددی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی روش RVS با بهره‌گیری از مدل‌های ابتکاری و محاسبات نرم پیشنهاد شده‌اند.<sup>۷</sup> مدل‌های آماری و مدل‌های مهندسی تحلیلی، هر یک محدودیت‌های جدی خود را دارند.<sup>۸</sup> بنا بر این استفاده از مدل‌های ابتکاری اجتناب ناپذیر است. از جمله روش‌های ابتکاری می‌توان به روش‌های ابتکاری مبتنی بر قواعد،<sup>۹</sup> سیستم‌های استنتاج فازی برای شبیه‌سازی عرضه‌ی پل‌های بتن مسلح،<sup>۱۰</sup> روش‌های مبتنی بر منطق فازی برای ساختمان‌های بتنی،<sup>۱۱</sup> مدل سازی منطق فازی نظارت شده،<sup>۱۲</sup> مدل منطق فازی آموش‌دیده توسط الگوریتم ژنتیک برای ساختمان‌ها،<sup>۱۳</sup> شبکه‌های عصبی مصنوعی،<sup>۱۴</sup> و غیره اشاره کرد.

تسفه‌ماریام و ساعتچی اوغلو<sup>۵</sup>، از RVS در چارچوب یک مدل منطق فازی جهت ارزیابی ریسک موجود در تعیین مقدار کمی شاخص آسیب‌پذیری لزجیه و توسعه‌ی روشن رتبه‌بندی ساختمندانهای بین مسلمان به لحاظ خسارت‌پذیری

که در آن،  $W_i(t)$  بردار وزن نرون  $\mathbf{z}$  ام در تکرار  $t$  ام و  $W_i(t+1)$  بردار وزن نرون  $\mathbf{z}$  ام در تکرار بعدی یا  $(t+1)$  ام است. همچنین  $\eta(t)$  نرخ یادگیری متغیر با زمان (تکرار) است و در اینجا فرض شده است که به طور یکنواخت در طول تکرارها کاهش یابد. رابطه‌ی محاسبه‌ی نرخ یادگیری در رابطه‌ی ۹ ارائه شده است:

$$\eta(t) = \eta(0) \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \quad (9)$$

که در آن،  $\eta(0)$  معمولاً برابر  $1/0$  فرض می‌شود و  $\tau_1$  برابر بیشینه‌ی تعداد تکرارهای SOM است که در الگوریتم GuASPSO مساوی با  $4$  برابر تعداد بردارهای ورودی به شبکه یا همان تعداد ذرات  $P_{best}$  در نظر گرفته شده است. روشن است که تعداد ذرات  $P_{best}$  نیز برابر اندازه‌ی جمعیت الگوریتم GuASPSO است. بنابراین SOM ذرات  $P_{best}$  را به تعداد متغیری از کلاسترها تقسیم می‌کند که از طریق رابطه‌ی  $10$  محاسبه می‌شود:

$$N_{cluster}(t) = \text{Round}\left(N - (N-2) \times \left(\frac{t-1}{t_{max}-1}\right)\right) \quad (10)$$

که در آن،  $t_{max}$  بیشینه‌ی تعداد تکرارهای الگوریتم GuASPSO است. سپس معکوس تعداد ذرات  $P_{best}$  که در هر کلاستر فعل (هر کلاستر دارای حداقل یک ذره است) قرار گرفته‌اند، محاسبه و به عنوان وزن هر کلاستر که میزان سهم آن کلاستر را در هدایت ذرات مختلف در فضای جستجو مشخص می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ی  $11$ ، نحوه‌ی محاسبه‌ی ذره‌ی راهنمای سراسری منحصر به فرد هر ذره را نشان می‌دهد.

$$Gbest_i^t = \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq c(i)}}^{N_{cluster}(t)} W_j^t \times Cbest_j^t}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq c(i)}}^{N_{cluster}(t)} W_j^t} \quad (11)$$

که در آن،  $Gbest_i^t$  ذره‌ی بهینه‌ی سراسری متناظر با ذره‌ی  $\mathbf{z}$  ام در تکرار  $t$  ام، وزن محاسبه شده برای کلاستر  $\mathbf{z}$  ام در تکرار  $t$  ام،  $j$  بهترین ذره (بهترین ذره  $Cbest$ ) واقع در کلاستر  $\mathbf{z}$  ام در تکرار  $t$  ام و  $c(i)$  کلاستری است که نامین ذره  $P_{best}$  در آن قرار گرفته است. در این صورت با تبدیل ذره‌ی بهینه‌ی سراسری عمومی  $Gbest^t$  به ذره‌ی بهینه‌ی سراسری منحصر به هر ذره با عنوان  $Gbest_i^t$  در الگوریتم GuASPSO، رابطه‌ی  $3$  در الگوریتم PSO به رابطه‌ی  $12$  در الگوریتم پیشنهادی GuASPSO تبدیل می‌شود. خاطر نشان می‌شود که سایر محاسبات، روابط به روزرسانی و سایر تنظیمات پارامترهای الگوریتم GuASPSO دقیقاً مشابه همین موارد در الگوریتم استاندارد و اصلی PSO هستند.

$$V_i^{t+1} = \chi[V_i^t + \varphi_1(Gbest_i^t - X_i^t) + \varphi_2(P_{best}^t - X_i^t)] \quad (12)$$

در الگوریتم GuASPSO، تعداد کلاسترها در تکرارهای اولیه‌ی الگوریتم زیاد است، به گونه‌یی که میزان برازنده‌ی (تابع هدف) ذرات  $Cbest$  ضریب تأثیرگذاری در هدایت ذرات در فضای جستجو می‌یابد و در عوض تنوع ذرات مذکور، ضریب تأثیر بالاتری دارد. به مرور تعداد کلاسترها کمتر می‌شوند و ذرات  $P_{best}$  دارای برازنده‌ی نامناسب، ولی به شدت مشابه یکدیگر، در کلاستر یکسانی جمع می‌شوند. در نتیجه، ضریب تأثیر شاخص تنوع ذرات، کمتر و ضریب تأثیر شاخص برازنده‌ی، به مراتب بیشتر می‌شود. این فرایند می‌تواند به برقراری یک تعادل بسیار مناسب میان مراحل اکتشاف و استخراج کمک شایانی کند. نحوه‌ی کمک به برقراری این تعادل

$$\chi = \frac{2k}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi(\varphi - 4)}|}; \varphi = \varphi_1 + \varphi_2; \\ \varphi_1 = c_1 r_1; \varphi_2 = c_2 r_2 \quad (4)$$

که در آن،  $\chi$  ضریب انقباض  $13$  نامیده می‌شود. پارامتر  $k$  در رابطه‌ی  $4$  که همواره در محدوده‌ی  $[1, 5]$  مقداردهی می‌شود، گذار الگوریتم PSO از مرحله‌ی اکتشاف  $14$  به مرحله‌ی استخراج  $15$  را کنترل می‌کند و براساس رابطه‌ی  $5$  در هر تکرار از تکرارهای الگوریتم محاسبه می‌شود:

$$k = k_{max} - \frac{k_{max} - k_{min}}{t_{max}} \times t \quad (5)$$

که در آن،  $k_{min}$  و  $k_{max}$  ثابت‌هایی هستند که معمولاً به ترتیب برابر  $9/4$  و  $4/0$  در نظر گرفته می‌شوند. همچنین  $t$  شماره‌ی تکرار جاری الگوریتم و  $t_{max}$  بیشینه‌ی تعداد تکرارهای الگوریتم است. الگوریتم GuASPSO سعی در تغییر سازوکار مرسوم موجود در الگوریتم PSO دارد، به گونه‌یی که تنوع در میان جواب‌های حاصل در هر تکرار از الگوریتم به طرز بهتر و مؤثرتری حفظ شود. در GuASPSO از نوع خاصی از شبکه‌های عصبی با عنوان نگاشت خودسازمان (SOM)  $16$  به منظور محاسبه‌ی ذرات راهنمای منحصر به فرد  $Gbest$  است که در اینجا اختصاصی به ذرات استفاده می‌شود. شبکه‌ی SOM از یک لایه‌ی ورودی و یک لایه‌ی خروجی موسوم به لایه‌ی کوهن  $17$  تشکیل شده است. لایه‌ی خروجی می‌تواند نک - یا دو - بعده باشد. به منظور توضیحات بیشتر پیرامون شبکه‌های SOM به نوشتار هایکین  $18$   $[2009]$ ،  $[20]$  مراجعه شود. الگوریتم حاکم بر شبکه‌های SOM در اینجا تشریح شده است.  $[20]$  بردار ورودی یا الگوی ورودی به شبکه‌ی SOM به صورت رابطه‌ی  $6$  تعریف می‌شود:

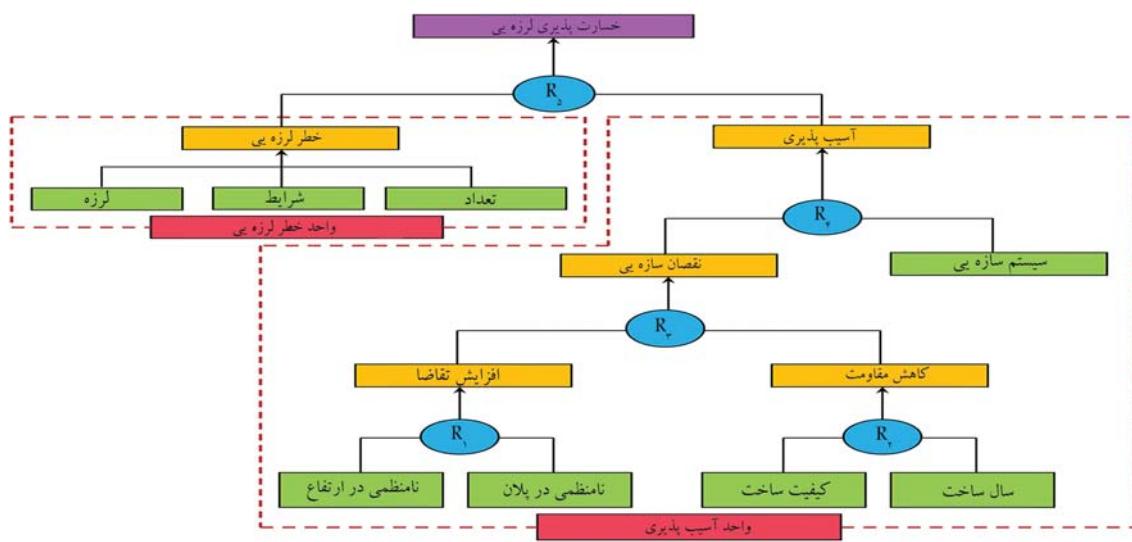
$$X = [x_1, x_2, \dots, x_D]^T \quad (6)$$

که در آن،  $D$  تعداد عناصر موجود در بردار ورودی  $X$  به شبکه است. بردارهای وزن مربوط به هر نرون در لایه‌ی خروجی از شبکه‌ی عصبی SOM به صورت رابطه‌ی  $7$  تعریف می‌شوند:

$$W_i = [w_{1i}, w_{2i}, \dots, w_{Di}]^T; i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

که در آن،  $W_i$  بردار وزن مربوط به نرون  $\mathbf{z}$  ام در لایه‌ی خروجی است که عملایک خوشی (کلاستر) را نمایندگی می‌کند. همچنین  $D$  تعداد کل عناصر موجود در بردار وزن نرون‌ها و  $M$  تعداد کل نرون‌های است (کلاسترها) مشابه هر نوع دیگری از شبکه‌های عصبی، شبکه‌ی عصبی SOM نیز باید به منظور یافتن قابلیت خوشبندی (کلاستر بندی) داده‌های ورودی به آن، ابتدا آموش بیسیند. در مرحله‌ی آموش، تمامی الگوهای ورودی که در پژوهش حاضر، در حقیقت همان بردارهای موقعیت ذرات بهینه‌ی انفرادی‌ها ( $P_{best}$ ) ها هستند، به صورت یک به یک به شبکه اعمال می‌شوند. هر زمان که یک الگوی ورودی به شبکه SOM معرفی می‌شود، رقبای میان نرون‌های شبکه در می‌گیرد، که در آن فاصله‌ی اقلیدسی میان بردار وزن هر نرون و بردار (الگو) ورودی محاسبه می‌شود و نزدیکی کمترین فاصله‌ی اقلیدسی با بردار ورودی است، به عنوان نرون برنده و مرکز کلاستری که بردار ورودی متعلق به آن است، انتخاب می‌شوند. سپس نرون مذکور به سمت بردار ورودی به شبکه (ذرهی  $P_{best}$ ) که کمترین فاصله و بیشترین تشابه را با آن داشته باشد، حرکت می‌کند. این حرکت مطابق رابطه‌ی  $8$  صورت می‌گیرد:

$$W_i(t+1) = W_i(t) + \eta(t)(X - W_i(t)) \quad (8)$$



شکل ۱. نمای کلی سیستم سلسله مراتبی منطق فازی. [۱]

پارامترهای  $VI$  و  $PI$  خود شامل دو پارامتر کیفی "yes" و "no" هستند، که در جریان فرایند کالیبراسیون به هر کدام از آن‌ها، یک مقدار کمی اختصاص می‌یابد. پارامتر  $CQ$  نیز در برگیرنده‌ی سه حالت "poor", "good" و "average" است که آن‌ها نیز در کالیبراسیون مدل، شکل کمی به خود می‌گزند. سیستم سازه‌ی ساختمان نیز در مدل ذکر شده، شامل سه سیستم قاب خمی (MRF)، قاب خمی و دیوار برشی (سیستم دوگانه) (MSW) و قاب خمی با دیوارهای ساخته شده از مصالح بنایی پُرکننده (MRFI) است که هر سه به نوعه‌ی خود در جریان آموزش مدل فازی به صورت بهینه تنظیم می‌شوند. همچنین چهار سیستم اول از سیستم‌های فازی پنج‌گانه‌ی  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  و  $R_5$ , سه حالت کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H) را بر مبنای میزان تأثیرگذاری آن‌ها در خسارت‌پذیر شدن یک ساختمان در مقابل بار زلزله به خود اختصاص می‌دهند که حالت‌های مذکور به عنوان اعداد فازی منفرد در تالی قوانین ظاهر می‌شوند و مقداری کمی به خود می‌گزند. سیستم  $R_5$  نیز خود شامل ۵ حالت: خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H)، و خیلی زیاد (VH) است که به ترتیب اعداد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به آن‌ها نسبت داده می‌شود.

**۳.۲. نحوی عملکرد مدل منطق فازی در پیش‌بینی خسارت لزه بی**  
همان‌گونه که بیان شد، هر یک از سیستم‌های فازی اشاره شده، خود شامل دو پارامتر مؤثر در آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در مقابل زلزله هستند که مقدم‌های (Premise) قوانین فازی را تشکیل می‌دهند؛ در حالی که به ازاء هر قانون از هر سیستم قوانین، یک گزاره‌ی مؤخر یا تالی نیز وجود دارد و از آنجا که تمامی سیستم‌های فازی به کار گرفته شده در مدل سلسله مراتبی در نوشتار حاضر از نوع سوگون هستند، تالی‌های اخیر به صورت اعداد فازی منفرد (Singleton) در نظر گرفته شده‌اند و یک مجموعه‌ی فازی، در برگیرنده‌ی فقط یک عنصر با درجه عضویت یک است. تالی هر سیستم از غیرفازی‌سازی خروجی فازی سیستم پیشین ناشی می‌شود. در همین حال، اعداد فازی منفرد دیگری نیز در سیستم‌ها حضور دارند که بیانگر کمیت منتبه به یک متغیر زبانی هستند که به پارامترهای مجهولی که در روش RVS مشاهده و به مدل فازی وارد می‌شوند، اختصاص می‌یابند. در تمامی سیستم‌های پنج‌گانه‌ی فازی، از تابع استلزم حاصل ضرب لارسن به منظور ترکیب درجه‌های عضویت مقدم‌ها و نیز

مناسب، می‌تواند به عنوان نقطه‌ی قوت الگوریتم پیشنهادی  $GuASPSO$  و وجه تمایز آن با الگوریتم استاندارد  $PSO$  و سایر نسخه‌های اصلاحی الگوریتم محبوب و شناخته شده‌ی  $GuASPSO$  تلقی شود.

## ۲.۲. مدل سلسله مراتبی منطق فازی

در نوشتار حاضر، یک مدل منطق فازی سلسله مراتبی که نخستین بار توسط سفمازیم و ساعتچی اوغلو (۲۰۰۸)، [۱] پیشنهاد شده است، جهت پیش‌بینی شاخص خسارت‌پذیری لزه‌بی ساختمان‌های بتن‌آرمه استفاده شده است. مدل مذکور از ۵ سیستم قاعده - بنیاد فازی به نام‌های  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  و  $R_6$  تشکیل شده است. یک نمای کلی از مدل سلسله مراتبی فازی اخیر در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

در مدل مذکور، دو واحد اصلی وجود دارد: ۱. واحد آسیب‌پذیری ساختمان و ۲. واحد خطر لزه‌بی سایت زلزله. واحد اول، عاقب ناشی از ویژگی‌های لزه‌بی (ID) و کاهش مقاومت در بار زلزله (DR) را در نظر می‌گیرد، که این دو عامل نیز خود میزان نقصان سازه‌بی ساختمان (SD) در بار زلزله را نشان می‌دهند. نامنظمی در پلان (PI) و نامنظمی در ارتفاع ساختمان (VI) از مهم‌ترین عواملی هستند که افزایش تقاضای لزه‌بی را سبب می‌شوند، در حالی که کیفیت ساخت (CQ) و سال ساخت ساختمان (YC) از جمله عوامل مؤثر در کاهش مقاومت ساختمان در مقابل بار زلزله هستند. سیستم سازه‌بی ساختمان (SS) نیز به همراه نقصان سازه‌بی آن ( $I^{BV}$ ) نقش دارد. آسیب‌پذیری ساختمان با عنوان شاخص آسیب‌پذیری ساختمان ( $I^{SH}$ ) مطرح است که خود تابعی از خروجی واحد اول از سیستم سلسله مراتبی فازی موردنظر در نوشتار حاضر است. اما در واحد دوم، خطر لزه‌بی سایت زلزله ( $I^{SH}$ ) مطرح است که خود تابعی از سه پارامتر لزه‌خیزی سایت، شرایط سایت و تعداد طبقات ساختمان است. با توجه به این نکته که خطر لزه‌بی سایت می‌تواند مستقیماً از طیف پاسخ ساختمان نیز به دست آید، این پارامتر طبق توصیه‌ی سفمازیم و ساعتچی اوغلو (۲۰۰۸)، [۱] با پارامتر شتاب طیفی ( $S_a$ ) جایگزین شده است. ترکیب شتاب طیفی و آسیب‌پذیری ساختمان، شاخص خسارت‌پذیری ساختمان یا همان سطح خسارت را مشخص می‌کند، که خروجی نهایی سیستم سلسله مراتبی فازی مطرح در نوشتار حاضر است.

از غیرفازی‌ساز مرکز نقل استفاده شده است. به منظور روش کردن شیوه‌ی کارکرد این مدل فازی، در پژوهش حاضر، آخرین سیستم فازی از پنج سیستم یعنی ( $R_5$ ) انتخاب و مطابق روابط ۱۳ الی ۱۸ فرمول‌بندی شده است. همچنین توابع عضویت فازی استفاده شده در فازی‌سازی مقدم‌ها و نیز نحوه‌ی ترکیب مقدم‌های مذکور در نوشتار تساماریام (۲۰۰۸)،<sup>[۲۱]</sup> قابل مشاهده است.

$$R_1 : \text{If } I^{BV} \text{ is } VL \text{ AND } I^{SH} \text{ is } VL \text{ THEN } I^{BD} = 1 \quad (13)$$

$$R_2 : \text{If } I^{BV} \text{ is } VL \text{ AND } I^{SH} \text{ is } L \text{ THEN } I^{BD} = 1 \quad (14)$$

$$R_3 : \text{If } I^{BV} \text{ is } VL \text{ AND } I^{SH} \text{ is } M \text{ THEN } I^{BD} = 1 \quad (15)$$

$$R_4 : \text{If } I^{BV} \text{ is } VL \text{ AND } I^{SH} \text{ is } H \text{ THEN } I^{BD} = 2 \quad (16)$$

$$R_5 : \text{If } I^{BV} \text{ is } VL \text{ AND } I^{SH} \text{ is } VH \text{ THEN } I^{BD} = 2 \quad (17)$$

$$R_{25} : \text{If } I^{BV} \text{ is } VH \text{ AND } I^{SH} \text{ is } VH \text{ THEN } I^{BD} = 5 \quad (18)$$

۴. کالیبراسیون مدل منطق فازی  
مدل منطق فازی، پیش‌بینی‌کننده‌ی سطح خسارت لرزه‌یی مانند هر مدل هوشمند داده - محور دیگری نیازمند کالیبراسیون (آموزش) است. در مرحله‌ی کالیبراسیون، تمام پارامترهای مجهول مدل، شامل ضرایب تبدیل پارامترهای مشاهداتی در روش RVS و نیز کل مقادیر کمی اعداد فازی منفرد، که در تالی قوانین در سیستم‌های فازی استفاده می‌شوند، به صورت بهینه تعیین می‌شوند. جهت انجام فرایند آموزش مدل فازی، در نوشتار حاضر از دو الگوریتم معروف و شناخته‌شده‌ی ازدحام ذرات (PSO)،<sup>[۱۸]</sup> و گرگ خاکستری (GWO)<sup>[۱۹]</sup> و نیز یک الگوریتم پیشرفتی بر جست‌جوی تطبیقی ذرات با عنوان الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر یکدیگر مقایسه و الگوریتم هدایت شده (GuASPSO).<sup>[۲۰]</sup> استفاده شده است. در پایان، نتایج آموزش مدل منطق فازی توسط هر سه الگوریتم بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه و الگوریتم برتر انتخاب شده است. کدنویسی هر سه الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۱۹</sup> (R2۰۱۸b) انجام شده است. در مجموع، ۷۷ ساختمان در سایت لرزه‌یی سر بر ذهاب موجود است که ۵۰٪ ساختمان (۷۰٪) برای آموزش و ۲۲ ساختمان (۳۰٪) به منظور اعتبارسنجی استفاده شده‌اند. تابع هدف الگوریتم‌های بهینه‌سازی در پژوهش حاضر، کمیته‌سازی جذر میانگین مرباعات خطای میان سطح خسارت لرزه‌یی و RMSE توسط مدل فازی و مشاهداتی توسط روش RVS است، که اصطلاحاً نامیده می‌شود. تابع هدف بهینه‌سازی و قیود مرتبط به شرح روابط<sup>۲۱</sup> الی ۲۵ است:

$$\text{Minimize } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - I_i^{BD})^2} \quad (21)$$

Subject to :

$$VI, PI : ۰,۰۱ < "no" < ۰,۵۱; ۰,۴۹ < "yes" < ۰,۹۹ \quad (22)$$

$$CQ : ۰,۵۱ < "poor" < ۰,۹۹; \quad (23)$$

$$۰,۲۵ < "average" < ۰,۷۵; ۰,۰۱ < "good" < ۰,۵۰ \quad (23)$$

$$SS : ۰ < "MSW" < ۰,۲۵; ۰,۲۵ < "MRFI" < ۰,۷۵; \\ ۰,۷۵ < "MRF" < ۱ \quad (24)$$

$$ID, DR, SD, I^{BV} : ۰ < "L" < ۰,۲۵; \\ ۰,۲۵ < "M" < ۰,۷۵; ۰,۷۵ < "H" < ۱ \quad (25)$$

که در آن‌ها،  $I^{BV}$  شاخص آسیب‌پذیری ساختمان،  $I^{SH}$  شاخص خطر لرزه‌یی و  $I^{BD}$  شاخص خسارت‌پذیری لرزه‌یی ساختمان هستند که اصطلاحاً سطح خسارت نیز نامیده می‌شود و از ۱ تا ۵ متغیر است. پس از شکلیل همه‌ی ۲۵ قانون مذکور از پنجین سیستم فازی مدل سلسله مراتبی فازی، روش غیرفازی‌ساز مرکز نقل به صورت رابطه‌ی<sup>۲۰</sup> به محاسبه‌ی عدد نهایی سطح خسارت می‌پردازد:

$$I^{BD*} = \frac{\sum_{i=1}^5 I_i^{BD} \times \mu_{C_i} (I_i^{BD})}{\sum_{i=1}^5 \mu_{C_i} (I_i^{BD}) + \varepsilon} \quad (19)$$

که در آن،  $I_i^{BD}$  شاخص  $C_i$  و  $\mu_{C_i}$  شمارنده‌ی قوانین فازی است و  $\varepsilon$  یانگر درجه عضویت فازی تعیین شده برای شاخص‌های  $I_i^{BV}$  و  $I_i^{BD*}$  و  $I_i^{SH}$  هستند.  $I^{BD*}$  خروجی نهایی مدل سلسله مراتبی فازی و  $\varepsilon$  یک عدد مثبت بسیار کوچک است که برای جلوگیری از تکینگی در مخرج کسر  $I^{BD*}$  استفاده شده است. از آنجا که  $I^{BD*}$  در حالت کلی یک عدد حقیقی (اعشاری) است، در حالی که باید برابر کمیتی گستته، مانند: ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به عنوان سطح خسارت لرزه‌یی باشد، بنابراین از رابطه‌ی<sup>۲۰</sup> جهت گستته‌سازی  $I^{BD*}$  استفاده می‌شود:

$$I_{dis}^{BD*} = \text{Round} \left( \max(I^{BD*}, 1) \right) \quad (20)$$

که در آن،  $I_{dis}^{BD*}$  شاخص نهایی خسارت‌پذیری یا همان سطح خسارت لرزه‌یی محاسبه شده توسط مدل فازی است که در روابط آنی به اختصار  $I^{BD}$  نامیده می‌شود. محاسبات سایر سیستم‌های فازی پنج‌گانه نیز به طریقی مشابه صورت می‌شود. محاسبات سایر سیستم‌های فازی پنج‌گانه نیز به طریقی مشابه صورت می‌کیرد، با این تفاوت که تالی سیستم‌های ذکر شده برخلاف سیستم  $R_5$ ، یک کمیت مجھول است که خود طی فرایند کالیبراسیون (آموزش) مدل فازی محاسبه و تعیین می‌شود.

از آنجایی که یک مدل پیش‌بینی‌کننده‌ی منطق فازی باید در هر دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی، عملکرد قابل قبولی را از خود بروز دهد، باید به دنبال کمیته‌سازی  $RMSE$  در هر دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی به طور همزمان بود.

در این راستا، در پژوهش حاضر پیشنهاد شده است که میانگین هندسی  $RMSE$  در دو مرحله، کمیته‌سازی شود. از آنجا که میانگین هندسی برخلاف میانگین حسابی این قابلیت را دارد که هم میانگین و هم میزان شباخت متفاوت‌های میانگین‌گیری شده را به طور همزمان ارائه کنند، در صورتی که میانگین هندسی دو عدد کمیته شود،

$$SI_{obs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})^2}{N}} \quad (42)$$

$$SI_{comp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD} - \bar{I}^{BD})^2}{N}} \quad (43)$$

$$DSI = |SI_{obs} - SI_{comp}| \quad (34)$$

که در آن‌ها،  $MAPE$  خطای درصد مطلق میانگین،  $RRMSE$  جذر میانگین مربعات خطای نسبی،  $R$  ضریب همبستگی،  $PI$  شاخص عملکرد،  $d$  شاخص تطابق،  $SI_{obs}$  شاخص پراکنده‌سازی سطوح خسارت مشاهداتی،  $SI_{comp}$  شاخص پراکنده‌سازی سطوح خسارت محاسباتی و  $DSI$  قدرمطلق تفاضل این دو شاخص هستند.<sup>[21]</sup> لازم به ذکر است که شاخص پراکنده‌گی برابر نسبت اخراج معیار یک مجموعه داده به میانگین آن‌هاست. بنابراین، شاخص پراکنده‌گی با حذف اثر مقیاس داده‌ها، میزان تنوع میان آن‌ها را در مقایسه با داده‌های دیگر به شکل منطقی تری معنیکس، ممکن است.

هر چه مقادیر معیارهای  $MAPE$  و  $RRMSE$  کوچک‌تر باشند، دقیق‌تر مدل در پیش‌بینی سطح خسارت لرزه‌بی بیشتر خواهد بود و مقادیر بزرگ‌تر معیارهای  $R$  و  $d$  نیز بیانگر عملکرد بهتر مدل فازی است. همچنین، هر چه مقادیر معیارهای  $SI_{comp}$  و  $SI_{obs}$  بزرگ‌تر باشند، مجموعه‌های داده‌های مشاهداتی و محاسباتی متفق‌ترند و با براین مدل فازی ایجاد شده رامی‌توان با اطمینان بالاتری در شیوه‌سازی فرایندهای مشابه به کار گرفت. آخرین معیار،  $DSI$  است که هر چه کوچک‌تر باشد، به معنای تطبیق بیشتر مجموعه‌های داده‌های مشاهداتی و محاسباتی و بالاتر بودن دقیق‌تر مدل در شیوه‌سازی و تخمین خسارت لرزه‌بی است.

این بدان معنیست که دو عدد متشابه‌ای کمینه شده‌اند. در نتیجه، در پژوهش حاضر از میانگین‌گیری هندسی میان شاخص‌های  $RMSE$  در دو مرحله‌ی آموزش و اعتیارسنجی استفاده شده است (مطابق رابطه‌ی ۲۶):

$$OPI = \sqrt{\prod_{i=1}^r (RMSE_{max} - RMSE_i)^{W_i}}$$

$$= \left\{ (r - RMSE_1)^{W_1} \times (r - RMSE_r)^{W_r} \right\}^{1/(W_1 + W_r)} \quad (26)$$

که در آن،  $RMSE_1$  و  $RMSE_2$  به ترتیب جذر میانگین مربعات خطای داده‌های محاسباتی و مشاهداتی در مراحل آموزش و اعتبارسنجی هستند. همچنین  $OPI W_1 = W_2 = 0,5$  شاخص عملکرد کلی نامیده می‌شود که هر چه بزرگ‌تر باشد، عملکرد مدل فازی در شبیه‌سازی رابطه‌ی میان ورودی‌ها و خروجی و محاسبه‌ی سطح خسارت نهایی مطلوب‌تر خواهد بود. در فرایند آموزش مدل فازی در نوشتار حاضر،  $50\%$  مرتبه، مجموعه‌هایی از داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به نسبت  $70\%$  به  $30\%$  انتخاب و پس از هر بار انتخاب دو مجموعه،  $5$  مرتبه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده است. همچنین در هر بار اجرای الگوریتم، فرایند بهینه‌سازی در  $1000$  تکرار و با  $35$  عامل جست‌وجوگر به عنوان اندازه‌ی جمعیت الگوریتم انجام شده است. در مجموع،  $22$  متغیر تصمیم قابل تنظیم در مدل منطق فازی وجود دارد که طی مراحل مذکور به صورت بهینه تعیین و مدل پیش‌بینی‌کننده‌ی فازی با تنظیم کلیه‌ی پارامترهای مذکور شکل‌گرفته و آماده‌ی استفاده در فرایند شبیه‌سازی خسارت‌پذیری لرزه‌ی ساختمان‌هایی شده است که به لحاظ موقعیت جغرافیایی و نیز پارامترهای ورودی تقریباً در همان محدوده‌ی قرار دارند که پارامترهای مدل طراحی شده با اعمال داده‌های مربوط به آن بهینه می‌شوند.

### ۳. مطالعه‌ی موردي

زلزله‌ی سرپل ذهاب در ساعت ۲۱ و ۴۸ دقیقه (به وقت محلی) در روز ۲۱ آبان‌ماه ۱۳۹۶ هجری شمسی، مطابق با ساعت ۱۸ و ۱۸ دقیقه (به وقت جهانی) روز ۱۷ نومبر ۲۰۱۷ میلادی با بزرگای گشتواری  $7/3$  در فاصله‌ی ۱۰ کیلومتری ازگله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه به وقوع پیوسته است. بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)  $2^{\circ}$  ثبت شده در سرپل ذهاب به میزان ۶۸٪ گال  $2^{\circ}$  بوده و اغلب خسارت‌های شدید ساختمانی نیز در سرپل ذهاب رخ داده است. طی یک پروژه‌ی تپه‌هشی، به کمک روش ارزیابی سریع بصری (RVS)،<sup>[۲۲]</sup> اغلب ساختمان‌های آسیب‌دیده در منطقه‌ی زلزله‌زده از جمله شهر سرپل ذهاب بررسی و میزان خسارت‌پذیری لرزه‌ی ساختمان‌های بستی در شهر زلزله‌زده‌ی سرپل ذهاب، در پژوهش حاضر ارزیابی شده‌اند.

جهت آموزش مدل فازی پیش‌بینی کنندۀ‌ی خسارت لرزه‌ی ازدواج‌گوریتم شناخته شده‌ی بهینه‌سازی فراابتکاری ازدحام ذرات (PSO) و گرگ خاکستری (GWO) به همراه یک سویه‌ی جدید و پیشرفته از گرگ‌ریتم ازدحام ذرات (GuASPSO) استفاده شده است. طی فرایند آموزش مدل شیوه‌ساز فازی، که اصطلاحاً کالیبراسیون نیز خوانده می‌شود، پارامترهای داخلی، مجهول مدل فازی همگر، به صورت بهینه تعیین

## ۵.۵. معیارهای کارآیی، مدل منطق فازی

علاوه بر معیار بسیار معروف و شناخته شده‌ی RMSE، معیارهای دیگری نیز جهت ارزیابی کارایی مدل منطق فازی ایجاد شده وجود دارند که به صورتی کامل و جامع می‌توانند میراث قدرت نسبی یک مدل شبیه‌ساز در تخمین خروجی موردنظر از آن ارائه کنند که در اینجا مورد بررسی قرار گیرد.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{I_i^{BDt} - I_i^{BD}}{I_i^{BDt}} \right| \quad (44)$$

$$RRMSE = \frac{1}{\overline{I^{BD'}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I_i^{BD}})^2}{N}} \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})(I_i^{BD} - \overline{I^{BD}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (I_i^{BD} - \overline{I^{BD}})^2}} \quad (19)$$

$$PI = \frac{RRMSE}{R + 1} \quad (40)$$

$$d = \gamma - \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - I_i^{BD})^\gamma}{\sum_{i=1}^N \left( \left| I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}} \right| + \left| I_i^{BD} - \overline{I^{BD}} \right| \right)^\gamma} \quad (31)$$

جدول ۱. معیارهای کارایی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده منطق فازی آموزش دیده با سه الگوریتم بهینه‌سازی در مرحله‌ی آموزش مدل‌ها.

نحوت (%)		الگوریتم‌ها			معیارهای کارایی
GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO	GuASPSO	PSO	GWO	
-۵/۷۴۱(-)	۶/۷۵(+)	۰/۱۷۱۳	۰/۱۶۲۰	۰/۱۸۳۷	MAPE
۱/۵۲۶۳(+)	۸/۲۳۵۸(+)	۰/۸	۰/۸۱۲۴	۰/۸۷۱۸	RMSE
۰/۴۸۰۱(+)	۸/۲۲۳۷(+)	۰/۲۰۷۳	۰/۲۰۸۳	۰/۲۲۵۹	RRMSE
۴/۴۶۷۶(+)	۱۲/۳۶۳۴(+)	۰/۱۲۸۳	۰/۱۳۴۳	۰/۱۴۶۴	PI
۱۱/۶۳۱۳(+)	۱۳/۴۲۱۸(+)	۰/۶۱۵۲	۰/۵۵۱۱	۰/۵۴۲۴	R
۱۵/۱۴۷۳(+)	۱۲/۴۶۵۸(+)	۰/۵۷۴۷	۰/۴۹۹۱	۰/۵۱۱۰	d
۱۱/۰۲۸۶(+)	۳/۲۵۴۴(+)	۰/۲۰۹۴	۰/۱۸۸۶	۰/۲۰۲۸	SI <sub>obs</sub>
۲/۸۸۵۸(+)	۶/۰۳۵۱(-)	۰/۲۴۶۰	۰/۲۳۹۱	۰/۲۶۱۸	SI <sub>comp</sub>
۲۷/۵۲۴۸(+)	۳۷/۹۶۶۱(+)	۰/۰۳۶۶	۰/۰۵۰۵	۰/۰۵۹۰	DSI

جدول ۲. معیارهای کارایی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده منطق فازی آموزش دیده با سه الگوریتم بهینه‌سازی در مرحله‌ی اعتبارسنجی مدل‌ها.

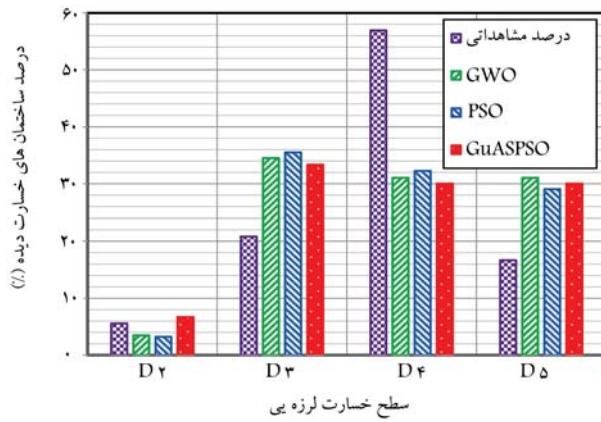
نحوت (%)		الگوریتم‌ها			معیارهای کارایی
GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO	GuASPSO	PSO	GWO	
۱۶/۴۷۵۳(+)	۱۶/۴۷۵۳(+)	۰/۱۴۵۵	۰/۱۷۴۲	۰/۱۷۴۲	MAPE
۸/۶۲۴۸(+)	۸/۶۲۴۸(+)	۰/۳۸۱۴	۰/۴۱۷۴	۰/۴۱۷۴	RMSE
۱۰/۸۰۳۶(+)	۸/۶(+)	۰/۰۹۹۹	۰/۱۱۲۰	۰/۱۰۹۳	RRMSE
۱۱/۶۸۰۹(+)	۱۷/۹۸۹۴(+)	۰/۰۶۲۰	۰/۰۷۰۲	۰/۰۷۵۶	PI
۲/۷۳۶۷(+)	۳۷/۲۲۸۱(+)	۰/۶۱۱۹	۰/۰۹۵۶	۰/۴۴۵۹	R
۲۲/۰۳۸۶(-)	۷/۲۸۴۶(-)	۰/۴۸۱۱	۰/۶۱۷۱	۰/۵۱۸۹	d
۲۱/۵۸۶۳(-)	۹/۳۲۷۸(-)	۰/۱۷۴۰	۰/۲۲۱۹	۰/۱۹۱۹	SI <sub>obs</sub>
۲/۱۵۲۳(+)	۴/۴۸۴۳(+)	۰/۲۵۶۳	۰/۲۵۰۹	۰/۲۴۳۵	SI <sub>comp</sub>
۱۸۳/۷۹۳۱(-)	۵۹/۴۹۶۱(-)	۰/۰۸۲۳	۰/۰۲۹۰	۰/۰۵۱۶	DSI

جدول ۳. معیارهای کارایی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده منطق فازی آموزش دیده با سه الگوریتم بهینه‌سازی در کل مجموعه‌ی داده‌ها.

نحوت (%)		الگوریتم‌ها			معیارهای کارایی
GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO	GuASPSO	PSO	GWO	
۱/۲۸۳۸۱(+)	۹/۶۲۳۹(+)	۰/۱۶۳۴	۰/۱۶۵۷	۰/۱۸۰۸	MAPE
۰/۶۸۷۸(+)	۴/۹۱۵۳(+)	۰/۴۰۴۳	۰/۴۰۷۱	۰/۴۲۵۲	RMSE
۰/۶۶۱۶(+)	۴/۸۸۶۹(+)	۰/۱۰۵۱	۰/۱۰۵۸	۰/۱۱۰۵	RRMSE
۲/۴۰۷۴(+)	۱۰/۵۶۲۴(+)	۰/۰۶۵۲	۰/۰۶۷۵	۰/۰۷۲۹	PI
۷/۷۸۴۴(+)	۱۸/۶۰۴۷(+)	۰/۶۱۲۰	۰/۵۶۷۸	۰/۵۱۶۰	R
۱/۵۰۷۴(+)	۷/۴۳۱۹(+)	۰/۵۵۲۲	۰/۵۴۴۰	۰/۵۱۴۰	d
۰/ (~)	۰/ (~)	۰/۱۹۸۳	۰/۱۹۸۳	۰/۱۹۸۳	SI <sub>obs</sub>
۲/۵۶۷۳(+)	۲/۷۱۰۱(-)	۰/۲۴۷۷	۰/۲۴۱۵	۰/۲۵۴۶	SI <sub>comp</sub>
۱۴/۳۵۱۹(-)	۱۲/۲۵۵۸(+)	۰/۰۴۹۴	۰/۰۴۳۲	۰/۰۵۶۳	DSI

همچنین ۹ معیار کارایی پیشتر ذکر شده جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های منطق فازی در پیش‌بینی خسارت‌پذیری لرزه‌بی استفاده شده‌اند، که در جدول‌های ۱ الی ۳ به ترتیب مقادیر عددی آن‌ها برای مدل منطق فازی طراحی شده به کمک سه الگوریتم بهینه‌سازی در سه مرحله‌ی آموزش، اعتبارسنجی و در کل داده‌ها ارائه شده‌اند. برتری، عدم برتری و تساوی الگوریتم پیشرفت‌های GuASPSO در مقایسه با دو

شدیداند. پارامترهای ذکر شده شامل کمیت‌های مبهم متناسب به متغیرهای زیانی: ۱. نامنظمی در ارتفاع (VI)؛ ۲. نامنظمی در ریلان (PI)؛ ۳. کیفیت ساخت (CQ)؛ ۴. سال ساخت (YC)؛ که ضرایب تبدیل آن برای ساختمان‌های مختلف براساس روش ارائه شده در نوشتار یزدی و همکاران (۲۰۲۰<sup>[۲۴]</sup>) تعیین شده‌اند؛ ۵. سیستم باربر لرزه‌بی ساختمان (SS)؛ ۶. شاخص خطر لرزه‌بی سایت وقوع زلزله ( $I^{SH}$ ) و ۷. سطح خسارت واقعی مشاهداتی ساختمان‌ها در سایت زلزله ( $I^{BD'}$ ) هستند.



شکل ۲. درصد محاسبه شده‌ی ساختمان‌های خسارت دیده در سطوح مختلف خسارت لرزه‌یی.

جدول‌های ۴ الی ۶ نشان می‌دهند که مدل فازی آموزش‌دیده با الگوریتم سطح دوم خسارت (D2) که فقط چهار ساختمان از مجموع ۷۲ ساختمان در آن قرار دارند، را بهتر از مدل‌های آموزش‌دیده با دو الگوریتم دیگر پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که در جدول ۷ نیز مشاهده می‌شود، مدل کالیبره شده توسط الگوریتم GuASPSO، هم دقت متوسط بالاتر و هم حساسیت بالاتری نسبت به سطوح مختلف خسارت دارد. به این معنا که نسبت به دو مدل دیگر، توانایی بیشتری در تشخیص صحیح سطوح خسارت لرزه‌یی دارد. شایان ذکر است از آنجا که در مجموعه‌ی داده‌های زلزله‌ی مطالعه شده، هیچ ساختمانی در سطح خسارت اول (D1) قرار ندارد، لذا، سطح خسارت اول (D1) در جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه نشده است. همچنین نتایج یک تحلیل چندمعیاره به روش برنامه‌ریزی سازشی<sup>۲۳</sup> در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج این تحلیل نیز حاکی از برتری مطلق مدل فازی آموزش‌دیده با الگوریتم GuASPSO بر مدل‌های کالیبره شده با دو الگوریتم دیگر است. متغیرهای تصمیم بهینه شده توسط هر سه الگوریتم ذکر شده در جدول ۹ ارائه شده‌اند. در انتها، در شکل ۲، درصد ساختمان‌های خسارت دیده به تفکیک سطح خسارت شناسایی شده مشاهده می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

روش غربال‌گری سریع بصری (RVS) که عمدتاً جهت ارزیابی ویژگی‌های لرزه‌یی یک ساختمان و نیز سطح خسارت لرزه‌یی آن استفاده می‌شود، به رغم بهره بردن از سادگی و سرعت قابل ملاحظه در مقایسه با روش‌های دیگر، دقت بالایی ندارد. دلیل عمدتی این امر را باید در عدم قطعیت ذاتی موجود در روش RVS جست‌وجو کرد. این موضوع، انگیزه‌ی اصلی استفاده از مدل منطق فازی در نوشتار حاضر در لحاظ کردن همه‌ی این عدم قطعیت‌ها و در نتیجه هر چه دقیق تر سازی فرایند شیوه‌سازی اثر زلزله در ساختمان‌ها جهت برآورد سطح خسارت لرزه‌یی آن‌ها بوده است. از مدل فازی ارائه شده برای پیش‌بینی شاخص خسارت‌پذیری لرزه‌یی ساختمان‌های واقع در سایت لرزه‌یی زلزله‌ی منطقه‌ی سرپل‌ذهاب رخداده در سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. در نوشتار حاضر، به منظور آموزش مدل فازی استفاده شده از سه الگوریتم بهینه‌سازی فرالاتکاری گرگ خاکستری (GWO)، ازدحام ذرات (PSO) و یک الگوریتم جدیداً پیشنهاد شده با عنوان الگوریتم ازدحام

جدول ۴. ماتریس چگونگی عملکرد مدل فازی آموزش دیده با الگوریتم GWO در پیش‌بینی سطوح مختلف خسارت لرزه‌یی.

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = ۷۲
۲۵	۰	۱	۲	۱	D2
۶۶/۶۷	۰	۴	۱۰	۱	D3
۲۱/۹۵	۱۶	۹	۱۳	۳	D4
۷۵	۹	۳	۰	۰	D5
دقت (%)	۳۶	۵۲/۹۴	۴۰	۲۰	

جدول ۵. ماتریس چگونگی عملکرد مدل فازی آموزش دیده با الگوریتم PSO در پیش‌بینی سطوح مختلف خسارت لرزه‌یی.

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = ۷۲
۲۵	۰	۱	۲	۱	D2
۷۳/۳۳	۰	۳	۱۱	۱	D3
۲۴/۳۹	۱۷	۱۰	۱۳	۱	D4
۷۵	۹	۳	۰	۰	D5
دقت (%)	۳۴/۶۲	۵۸/۸۲	۴۲/۳۱	۲۳/۳۲	

جدول ۶. ماتریس چگونگی عملکرد مدل فازی آموزش دیده با الگوریتم GuASPSO در پیش‌بینی سطوح مختلف خسارت لرزه‌یی.

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = ۷۲
۵۰	۰	۱	۱	۲	D2
۶۶/۶۷	۰	۳	۱۰	۲	D3
۲۱/۹۵	۱۹	۹	۱۳	۰	D4
۷۵	۹	۳	۰	۰	D5
دقت (%)	۳۲/۱۴	۵۶/۲۵	۴۱/۶۷	۵۰	

جدول ۷. ماتریس خلاصه عملکرد مدل فازی آموزش دیده با سه الگوریتم بهینه‌سازی در پیش‌بینی سطوح مختلف خسارت لرزه‌یی.

الگوریتم	متوسط دقت (%)	متوسط
GWO	۳۷/۲۴	۴۱/۱۶
PSO	۴۲/۲۷	۴۹/۴۳
GuASPSO	۴۵/۰۲	۵۳/۴۱

الگوریتم بهینه‌سازی دیگر هستند. بهترین معیار کارایی مربوط به مدل فازی در هر یک از جدول‌های مذکور با اندازه‌ی درشت<sup>۲۲</sup> (پرنگ‌تر) ارائه شده‌اند. همان‌طور که از نتایج مشخص است، الگوریتم GuASPSO در ۷ مورد از معیارهای مرحله‌ی آموزش (۷۸٪)، ۶ مورد از معیارهای مرحله‌ی اعتبارسنجی (۶۷٪) و ۷ مورد از معیارهای مربوط به کل مجموعه‌ی داده‌ها (۷۸٪) بر دو الگوریتم دیگر کاملاً برتری دارد. همچنین نتایج پیش‌بینی سطوح خسارت لرزه‌یی دوم، سوم، چهارم و پنجم که به ترتیب با نمادهای D2، D3، D4 و D5 مشخص شده است، در قالب سه ماتریس در جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه شده‌اند. در جدول ۷ نیز دقت و حساسیت متوسط مدل‌های فازی در پیش‌بینی سطوح مختلف خسارت ارائه شده است.

جدول ۸. شاخص برنامه ریزی سازشی برای مدل‌های مختلف فازی در سه مرحله طراحی مدل‌ها.

تفاوت (%)			الگوریتم‌ها			مرحله
GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO	GuASPSO	PSO	GWO		
۶۰/۶۴۶۷(+)	۶۸/۷۰۷۷(+)	۰/۸۱۶۶	۲/۰۷۵۰	۲/۰۹۶	آموزش	
۸/۰۸۵۸(+)	۲۳/۱۰۴۴(+)	۱/۷۳۲۱	۱/۸۸۴۴	۲/۵۸۹۲	اعتبارسنجی	
۴۰/۱۹۹۰(+)	۷۳/۲۳۲۵(+)	۰/۷۰۸۲	۱/۱۸۴۳	۲/۶۴۵۸	کل	

جدول ۹. پارامترهای داخلی محاسبه شده مدل منطق فازی (متغیرهای تصمیم بهینه شده توسط الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی).

الگوریتم آموزش مدل فازی			پارامترهای کالیبره شده
GuASPSO	PSO	GWO	
۰/۳۹۵۸	۰/۲۵۹۵	۰/۰۱۲۳	VI(no)
۰/۷۹۳۵	۰/۵۰۰۹	۰/۵۴۳۹	VI(yes)
۰/۳۰۴۵	۰/۴۲۲۴	۰/۳۷۱۵	PI(no)
۰/۶۷۶۷	۰/۶۷۲۷	۰/۷۶۸۲	PI(yes)
۰/۸۸۹۱	۰/۷۸۱۲	۰/۹۹	CQ(poor)
۰/۶۳۸۶	۰/۲۸۵۴	۰/۷۱۰۷	CQ(average)
۰/۱۰۲۶	۰/۱۲۷۵	۰/۲۴۴۰	CQ(good)
۰/۲۱۹۲	۰/۰۳۷۳	۰/۰۱۳۸	SS(MSW)
۰/۴۱۲۸	۰/۶۴۳۸	۰/۴۲۳۵	SS(MRFI)
۰/۷۴۷۹	۰/۸۸۴۵	۰/۷۶۵۲	SS(MRF)
۰/۱۷۰۳	۰/۲۰۹۹	۰/۲۵	$R_1(L)$
۰/۴۹۲۲	۰/۵۴۹۶	۰/۶۲۷۶	$R_1(M)$
۰/۸۳۳۴	۰/۷	۰/۸۹۹۱	$R_1(H)$
۰/۱۲۲۸	۰/۲۴۸۹	۰/۰۳۳۰	$R_2(L)$
۰/۶۱۷۵	۰/۷	۰/۵۰۲۲	$R_2(M)$
۰/۹۴۱۸	۰/۹۳۲۱	۱	$R_2(H)$
۰/۰۸۱۱	۰/۰۵۷۴	۰/۱۴۶۷	$R_3(L)$
۰/۳۶۴۵	۰/۴۰۵۴	۰/۴۰۵۹	$R_3(M)$
۰/۷۸۱۰	۰/۹۲۴۵	۰/۷۱۶۲	$R_3(H)$
۰/۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۶۹	$R_4(L)$
۰/۳۳۴۰	۰/۲۶۵۲	۰/۲۷۴۸	$R_4(M)$
۰/۷۸۵۶	۰/۹۰۰۵	۰/۸۱۲۵	$R_4(H)$

الگوریتم GuASPSO به میزان ۷۳٪ بر الگوریتم GWO و ۴۰٪ بر الگوریتم PSO در آموزش مدل فازی است. از آنجا که پیشتر الگوریتم GuASPSO قابلیت خود را در حل مسائل بهینه‌سازی بزرگ - مقیاس استاندارد و نیز در حل دو مثال کاربردی دیگر نشان داده بود، نتایج نوشتار حاضر حمایت می‌تواند بر اعتبار الگوریتم GuASPSO در حل انواع مسائل بهینه‌سازی بیافزاید. از این رو استفاده از الگوریتم GuASPSO در حل سایر انواع مسائل طراحی مهندسی نیز توصیه می‌شود.

ذرات مبتنی بر جستجوی تطبیقی هدایت شده (GuASPSO) استفاده شده است.

جهت ارزیابی کارایی هر یک از مدل‌های طراحی شده از ۹ معیار کارایی استفاده شد و نتایج نشان داد که مدل منطق فازی آموزش دیده با الگوریتم GuASPSO در هر سه مرحله: آموزش، اعتبارسنجی و در کل مجموعه داده‌ها، عملکرد کاملاً مناسب‌تری را در مقایسه با دو الگوریتم شناخته شده دیگر از خود نشان داده است. نتایج یک تحلیل چندمعیاره نیز حاکی از برتری

## پانوشت‌ها

1. Rapid Visual Screening (RVS)

2. Federal Emergency Management Agency (FEMA)
3. Harirchian
4. Uncertainty
5. Tesfamarian & Saatcioglu

6. Northridge
7. Hyper Parameters
8. Guided Adaptive Search Based Particle Swarm Optimization Algorithm (GuASPSO)
9. Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)
10. Grey Wolf Optimization Algorithm (GWO)
11. Rezaei & Safavi
12. Kennedy & Eberhart
13. constriction coefficient
14. Exploration
15. Exploitation
16. Self-Organizing Map
17. Kohonen
18. Haykin
19. MATLAB
20. Peak Ground Acceleration (PGA)
21. GAL
22. Bold
23. Programming Compromise

### منابع (References)

1. Tesfamariam, S. and Saatcioglu, M. "Risk-based seismic evaluation of reinforced concrete buildings", *Earthquake Spectra*, **24**(3), pp. 795-821 (2008).
2. Ghobarah, A. "Seismic assessment of existing RC structures progress", in *Structural Engineering and Materials*, **2**(1), pp. 60-71 (2000).
3. Tesfamariam, S. and Saatcioglu, M. "Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modeling", *Earthquake Spectra*, **26**(1), pp. 235-256 (2010).
4. Bektas, N. and Kegyes-Brassai, O. "Conventional RVS methods for seismic risk assessment for estimating the current situation of existing buildings: A State-of-the-Art review", *Sustainability*, **14**(5), p. 2583 (2022).
5. F.E.M.A. (FEMA)., *FEMA P-154 Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Applied Technological Council (ATC), Washington, DC, USA (2015).
6. Harirchian, E., Hosseini, S.E., Jadhav, K. and et al. "A review on application of soft computing techniques for the rapid visual safety evaluation and damage classification of existing buildings", *Journal of Building Engineering*, **43**, p. 102536 (2021).
7. Harirchian, E., Lahmer, T., Buddhiraju, S. and et al. "Earthquake safety assessment of buildings through rapid visual screening", *Buildandings*, **10**(3), p. 51 (2020).
8. Ketsap, A., Hansapinyo, C., Kronprasert, N. and et al. "Uncertainty and fuzzy decisions in earthquake risk evaluation of buildings", *Engineering Journal*, **23**(5), pp. 89-105 (2019).
9. Harirchian, E. and Lahmer, T. "Developing a hierarchical type-2 fuzzy logic model to improve rapid evaluation of earthquake hazard safety of existing buildings", *Structures*, **28**, pp. 1384-1399 (2020).
10. Harirchian, E. and Lahmer, T. "Improved rapid visual earthquake hazard safety evaluation of existing buildings using a type-2 fuzzy logic model", *Applied Sciences*, **10**(7), p. 2375 (2020).
11. Miyasato, G.H., Dong, W., Levitt, R.E. and et al. "Implementation of a knowledge based seismic risk evaluation system on microcomputers", *Artificial Intelligence in Engineering*, **1**(1), pp. 29-35 (1986).
12. Furuta, H., Shiraishi, N., Umano, M. and et al. "Knowledge-based expert system for damage assessment based on fuzzy reasoning", *Computers & Structures*, **40**(1), pp. 137-142 (1991).
13. Sen, Z. "Supervised fuzzy logic modeling for building earthquake hazard assessment", *Expert Systems with Applications*, **38**(12), pp. 14564-14573 (2011).
14. Allali, S.A., Abed, M. and Mebarki, A. "Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic", *Engineering Structures*, **166**, pp. 117-127 (2018).
15. Morfidis, K. and Kostinakis, K. "Approaches to the rapid seismic damage prediction of r/c buildings using artificial neural networks", *Engineering Structures*, **165**, pp. 120-141 (2018).
16. Harirchian, E. and Lahmer, T. "Improved rapid assessment of earthquake hazard safety of structures via artificial neural networks", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **897**(1), p. 012014 (2020).
17. Rezaei, F. and Safavi, H.R. "GuASPSO: a new approach to hold a better exploration-exploitation balance in PSO algorithm", *Soft Computing*, **24**(7), pp. 4855-4875 (2020).
18. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimisation. 1995", in: *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, IV, IEEE Service Center, Piscataway, pp. 1942-1948 (1995).
19. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A. "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, **69**, pp. 46-61 (2014).
20. Haykin, S., "Neural networks and learning machines", 3rd edn., Prentice Hall, Englewood Cliffs (2009).
21. Tesfamariam, S. "Seismic risk assessment of reinforced concrete buildings using fuzzy based techniques", PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Ottawa (2008).
22. Gharehbaghi, S., Gandomi, M., Plevris, V. and et al. "Prediction of seismic damage spectra using computational intelligence methods", *Computers & Structures*, **253**, p. 106584 (2021).
23. Kalantari, A., Hashemi, B.H., Moghadam, A.S. and et al. "Buildings damage data collection after 2017 sarpole-zahab earthquake", *SEE8 conf.* Tehran, Iran (2019).
24. Yazdi, M.H.Z., Dehkordi, M.R., Eghbali, M. and et al. "Seismic risk prioritization of steel buildings using fuzzy inference system: A case study of school buildings in selected regions of Tehran", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **52**(3), pp. 733-756 (In Persian) (1399/2020).

# ویژه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها

مهرشاد فربانزاده (دانشجوی دکتری)

پیمان همامی\* (استادیار)

محسن شهروزی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

روش مرتبه‌ی اول هاسفر لین - راکبیوت فیلتر به شکل گستردگی در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها استفاده شده است. با این حال، مرتبه‌ی بالای غیرخطی بودن تابع حالت حدی می‌تواند به تاپیداری حل مسئله در الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیرخطی منجر شود. مطالعه‌ی حاضر قصد دارد تا ویژه‌سازی یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی عددی جهت یافتن نقطه‌ی طراحی در فضای استاندارد نرمال و احتمال شکست متناظر با آن را در قالب یک ساختارسازی جدید ارائه کند. روش برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مریعات برای حل یک مسئله قابلیت اعتماد سازه‌ها، دارای همگرایی سریع و کارایی بالا در مرحله‌ی خطی‌سازی تابع حالت حدی است. روش مذکور، مسئله‌ی اولیه را با یک مسئله‌ی خطی کمینه‌ی مریعات از طریق گسترش سازی‌های پایدار برای ماتریس هسیان جایگزین می‌کند و همواره یک حل پایدار را نتیجه می‌دهد. بعد از دستیابی به پاسخ در مرحله‌ی خطی‌سازی، روش میانگین موردنانتظار احتمالاتی با درنظر گرفتن ماتریس هسیان و فضای دویان یافته استفاده شده است، تا دقت محاسباتی پاسخ به دست آمده را به دقتی نزدیک به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو اصلاح کند.

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد سازه‌ها، احتمال شکست، بهینه‌سازی عددی، احتمال موردنانتظار، برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مریعات.

## ۱. مقدمه

و ترکیب روش مونت‌کارلو با روش رویه‌ی پاسخ برای تحلیل سد بتی قوسی در مطالعه‌ی پورامیان و اکرانزاده (۲۰۲۱)، اشاره کرد.<sup>[۱]</sup> با اینکه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، ساده هستند، اما از دیدگاه صرف زمان محاسباتی با چالش همراه هستند و برای مسائل دارای تابع حالت حدی صریح و با مسائل دارای احتمال شکست کوچک، ناکارآمد محسوب می‌شوند.<sup>[۲-۱۰]</sup> روش‌های مبتنی بر تکرار انتخاب دیگری برای محاسبه‌ی احتمال شکست هستند که معمولاً بر حسب لنگرهای آماری متغیرهای تصادفی عمل می‌کنند. روش‌های اخیر، جست‌وجو در فضای استاندارد نرمال را از یک نقطه شروع می‌کنند و بعد از چند تکرار تقریبی از نقطه‌ی طراحی که متناظر با پاسخ مسئله و احتمال شکست است، را نتیجه می‌دهند. درین روش‌های مبتنی بر تکرار، روش تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد (FORM)<sup>[۱۱-۱۲]</sup> شناخته شده و پرکاربردترین روش محسوب می‌شود.

تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد (FORM)، شامل بسط مرتبه‌ی اول تیاور از رویه‌ی حالت حدی یا یک آبرسهمی حول نقطه‌ی طراحی است. این مفهوم

تعیین احتمال شکست، اصلی‌ترین موضوع در بحث قابلیت اعتماد سازه‌هاست. احتمال شکست با استفاده از حل یک انتگرال چندگانه در فضای متغیر محور به دست می‌آید. هزینه‌ی محاسباتی حل انتگرال اخیر قابل توجه است و با افزایش تعداد متغیرهای تصادفی دخیل در مسئله با درنظر گرفتن همبستگی بین متغیرهای تصادفی، امری دشوار و در مواقعي ناممکن می‌شود.<sup>[۱]</sup> روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نمونه‌گیری، اهمیت جایگزین‌های معرفی شده‌ی انتگرال‌گیری مستقیم جهت تعیین احتمال شکست هستند.<sup>[۲-۲]</sup> روش‌های ذکر شده در تحلیل بسیاری از مسائل مهندسی، مورد استقبال قرار گرفته و تلاش‌های متعددی برای توسعه‌ی آن‌ها انجام شده است. به عنوان نمونه، می‌توان به مطالعه‌ی راه‌گذار و همکاران (۲۰۲۱)، برای کاهش خسارت ناشی از بارگذاری جانبی لرزه‌ی برای سازه‌های فولادی،<sup>[۳]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۶/۰۶/۱۴، اصلاحیه ۹/۱/۱۴۰، پذیرش ۱۴/۸/۱۴۰.

DOI: 10.24200/J30.2022.61036.3138

استناد به این مقاله:

فربانزاده، مهرشاد، همامی، پیمان و شهروزی، محسن (۱۴۰۲). «ویژه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۲، ص. ۹۱-۸۱.

تبديل می‌کند و پاسخ آن را با سرعت بالایی از دیدگاه همگرایی نتیجه می‌دهد. در نوشتار حاضر، ویژه‌سازی روش SLSQP برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها و ترکیب آن با روش میانگین موردنظر احتمال شکست مدنظر قرار گرفته است تا توسط آن روشی جامع برای حل مسائل قابلیت اعتماد سازه‌ها در دسترس باشد که در کنار نزد سریع همگرایی با دقت محاسباتی مشابه روش‌های نمونه‌گیری را نتیجه دهد. بدین منظور، علاوه بر روش بهینه‌سازی، روش ساده‌ی میانگین موردنظر احتمال شکست با درنظر گرفتن ماتریس هسیان به دست آمده از بخش بهینه‌سازی که مخصوص روش‌های مبتنی بر تکرار است، نیز استفاده شده است تا با تعداد محدودی نمونه در روش شبیه‌سازی بتوان دقت محاسباتی را به سطح مطلوبی اصلاح کرد. در بخش دوم، روش بهینه‌سازی موردنظر نوشتار حاضر ارائه شده است. در بخش سوم، روش کاهش و کنترل خطای تابع هدف و قید برای مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود: [۲۰]

## ۲. ویژه‌سازی برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها

برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات، جهت یافتن کمترین فاصله بین مرکز مختصات و رویه‌ی حالت حدی در فضای استاندارد نرمال استفاده شده است. در این راستا، مسئله‌ی بهینه‌سازی، شامل تابع هدف و قید برای مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود: [۲۱]

$$\begin{array}{ll} \min & f(x) = 0 / 5 \|x\|^2 \\ \text{subject to} & G(x) = 0 \end{array} \quad (1)$$

که در آن، بردار  $x$  شامل متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی در فضای استاندارد نرمال،  $G$  تابع حالت حدی،  $\|x\|^2$  نرم  $L_2$  بردار پاسخ هستند. در ضمن فرض شده است که تابع هدف  $f$  و قید برای  $G$  دارای مشتق مرتبه‌ی دوم پیوسته در نقطه‌ی طراحی هستند. در روش ذکر شده، تبدیل مسئله‌ی عمومی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۱ به مسئله‌ی بهینه‌سازی با فرم SQP، اولین گام محسوب می‌شود؛ که شامل یک تابع هدف مربعی شده و قید خطی سازی شده مطابق رابطه‌ی ۲ خواهد بود:

$$\begin{array}{ll} \min & \nabla f(x_k)^T d_k + \frac{1}{2} d_k^T B_k d_k \\ \text{subject to} & G(x_k) + \nabla G(x_k)^T d_k = 0 \end{array} \quad (2)$$

که در آن،  $\nabla f(x_k)$  و  $\nabla G(x_k)$  به ترتیب برایر با بردارهای گرادیان تابع هدف و تابع حالت حدی نسبت به متغیر  $x$ ،  $d_k$  بردار جهت گام و  $B_k$  ماتریس هسیان متناظر با تابع لگرانزین مسئله‌ی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۱ است که در رابطه‌ی ۳ ارائه شده است:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T G(x) \quad (3)$$

که در آن،  $\lambda$  ضریب لگرانزین است. با برایر صفر قرار دادن گرادیان تابع لگرانزین که در رابطه‌ی ۴ ارائه شده است، معادله‌ی موردنظر برای تعیین ضریب لگرانزین به دست می‌آید:

$$\nabla L(x, \lambda) = \nabla f(x) + \lambda \nabla G(x) \approx 0 \quad (4)$$

نخستین بار توسط هاسفر و لین<sup>۲</sup> (۱۹۷۴)، [۱۸] معرفی شده است. راکیوتز و فیسلر<sup>۳</sup> (۱۹۷۸)، [۱۹] روش هاسفر و لین را بهبود بخشیدند، تا استفاده از متغیرهای دارای توزیع غیرنرمال را پوشش بدهند. و روش معرفی شده توسط آن‌ها با نام HLRF شناخته می‌شود. علی‌رغم عملکرد مناسب روش HLRF در بسیاری از مسائل، بروز ناپایداری در مسائل دارای توابع حالت حدی غیرخطی مشکل‌ساز است. زانگ و کورگیان<sup>۴</sup> (۱۹۹۵)، [۲۰] و سانتوس<sup>۵</sup> و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۲)، [۲۱] بعد‌ها روش‌های اصلاح شده‌ی nHLRF را معرفی کردند که با بکارگیری قانون آرمیو، مقادیر مماسی برای اندازه‌ی جهت در هر گام به دست می‌آورند، تا پایداری بهتری برای حل مسئله‌ی تأمین شود. تعیین اندازه‌ی جهت مذکور با مشاهده تغییرات به وجود آمده بر روی تابع برازنده‌ی یا تابع لگرانزین حاکم بر مسئله‌ی بهینه‌سازی در هر گام به دست می‌آید. این اصلاحات تا حدود زیادی مشکل پایداری نسخه‌ی ابتدایی روش HLRF را اصلاح کرده‌اند، اما تعداد زیاد مراحل محاسباتی در مسائل دارای پیچیدگی شدید و نزد پایین سرعت همگرایی در روش‌های مذکور باقی مانده است. روش تبدیل پایدار (STM)<sup>۷</sup> روش دیگری برای حل ناپایداری روش HLRF است که توسط یانگ معرفی شده و براساس تئوری کنترل آشتنگی بوده است. روداک<sup>۸</sup> و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۸)، نسخه‌ی تطبیقی روش STM را به ممنظور جلوگیری از تعداد تکرارهای زیاد در روش STM توسعه داده‌اند. [۲۲]

منگ<sup>۱۰</sup> و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۷)، [۲۳] توسعه‌ی روش STM را ادame داده و راهبرد کنترل جهت را به کار گرفته و روش DSTM را معرفی کرده‌اند. روش DSTM ارائه شده است تا ناپایداری روش HLRF را مرتفع سازد و کارایی روش STM را افزایش دهد. روش اندازه‌ی گام محدود (FSL)، تلاش دیگری برای کنترل همگرایی در حل مسئله محسوب می‌شود که توسط گنگ<sup>۱۱</sup> و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۱)، توسعه یافته و یک پارامتر جدید برای کنترل اندازه‌ی گام در آن معرفی شده است. روش FSL، مستقل از تابع برازنده‌ی و رابطه‌ی جست‌وجوی خطی است. روش HLRF، نیز یک نمونه از خروجی‌های روش FSL محسوب می‌شود، اگر پارامتر کنترل اندازه‌ی گام در آن به بی‌نهایت میل کند. [۲۴]

کشتگار<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۷)، تکیبی از دو روش FSL و جست‌وجوی جهت مزدوج را استفاده و روش CFSL معرفی کرده است. که پیش‌رفته تین نسخه‌ی ارائه شده در این شاخه از روش‌های تحلیل مرتبه‌ی اول محسوب می‌شود. تعیین شاخص قابلیت اعتماد می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تحت قید برایر نیز در نظر گرفته شود، که در این حالت روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی، گزینه‌های مناسب برای تعیین پاسخ مسئله محسوب می‌شوند. روش‌های تصویرگرایان (GP)، روش اگمنت لگرانز<sup>۱۴</sup> (ALM) و روش برنامه‌ریزی توالی مربعات (SQP)، روش مرتبه‌ی اول مبتنی بر جست‌وجوی مزدوج با گام‌های تطبیقی، [۲۵] نمونه‌هایی از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی هستند. [۲۶] روش SQP، یک روش شناخته شده مبتنی بر گرادیان در بین روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی است که روش‌های زیادی با توجه به آن توسعه یافته‌اند. [۲۷-۲۸] روش برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات (SLSQP)، یکی از روش‌های توسعه یافته‌ی مذکور با نزد سریع همگرایی از مرتبه‌ی خطی است. قواعد روش SLSQP توسط شیتکوفسکی<sup>۱۹</sup> (۱۹۸۲) ارائه شده، [۲۹] و کرافت<sup>۱۲</sup> (۱۹۸۸) الگوریتم آن را برای یک بهینه‌سازی در علوم هواشناسی به کار گرفته است. در مسائل بهینه‌سازی روش SLSQP، ابتدا بردار جهت با استفاده از برنامه‌ریزی مربعات (QP) تعیین می‌شود. سپس، یک رابطه‌ی جست‌وجوی خطی استفاده می‌شود تا اندازه‌ی جهت اصلاح شود. این امر به سادگی و با استفاده از تابع برازنده‌ی  $L$  امکان‌پذیر است. این الگوریتم بهینه‌سازی، مسئله‌ی بهینه‌سازی اولیه را به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن کمترین فاصله که از دامنه‌ی پایین محدود است.

شکل نهایی مسئله‌ی بهینه‌سازی ذکر شده در روش برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات با توجه به توضیحات ارائه شده به صورت رابطه‌ی ۱۳ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \min & \|z\| \\ & \nabla G(x_k)^T F^{-1} z - \dots \\ \text{subject to} & \nabla G(x_k) F^{-1} F^{-T} \nabla f(x_k) + G(x_k) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

براساس رابطه‌ی ۱۳، هدف از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی اشاره شده، یافتن پاسخ  $z$  تحت قید برابری معروفی شده است که در آن  $z$  همواره مثبت باشد و روش حل آن، استفاده از روش کمینه‌ی مربعات غیرمنفی ( $nnls$ ) است.<sup>[۲۳]</sup> زمانی که پارامتر  $z$  تعیین شود، بردار گام جهت  $d$  به دست می‌آید. اقدام بعدی در روش بهینه‌سازی موردنظر، اصلاح بردار گام جهت با استفاده از مقدار اندازه‌ی جهت  $s_m$  است که به این منظور کترل تابع برازنده‌ی صورت می‌پذیرد. تابع برازنده‌ی یا فیلتر در مسئله‌ی بهینه‌سازی اخیر از ترکیب تابع هدف و قید برابری تشکیل شده است، که در ادیات فنی به تابع برازنده‌ی  $L_1$  معروف است و در رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است:

$$\phi(x_k, c) = f(x_k) + c|G(x_k)| \quad (14)$$

گرایدیان تابع برازنده‌ی مطابق رابطه‌ی ۱۵، جهت کترل کاهش تابع برازنده‌ی در گام‌های حل مسئله استفاده می‌شود:

$$\nabla \phi(x_k, c) = \nabla f(x_k) + c|\nabla G(x_k)| \quad (15)$$

این کترل به صورت رابطه‌ی ۱۶ است که به منظور تعیین اندازه‌ی جهت

در هر گام از حل مسئله استفاده می‌شود:

$$\phi(x_{k+1}, c) - \phi(x_k, c) \leq a.s_m.(\nabla \phi(x_k, c)^T d_k) \quad (16)$$

که در آن،  $a$  یک مقدار مثبت برابر با  $5/0$  است و پارامتر  $c$  مطابق رابطه‌ی ۱۷ تعیین می‌شود:

$$c = \gamma(\|x_k\|/\nabla G(x_k)\|) + \eta \quad (17)$$

که در آن،  $\gamma = 2$  و  $\eta = 10$  مقادیر مثبت هستند و نهایتاً مقدار اندازه‌ی جهت با

استفاده از رابطه‌ی ۱۸ تعیین می‌شود:

$$s_m = b^k \quad (18)$$

که در آن،  $b$  یک مقدار ثابت بین  $0$  و  $1$  است، که معمولاً برابر با  $5/0$  در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $k$ ، نشان‌هنددهی شماره‌ی تکرار جاری است که از مقدار  $0$  شروع تا یک مقدار بیشینه‌ی از پیش تعیین شده، اندازه‌ی جهت مناسب تعیین می‌شود. به این ترتیب با استفاده از رابطه‌ی تکرار جستجوی خطی نشان داده شده در رابطه‌ی ۱۹، مقدار بردار پاسخ در هر گام قابل محاسبه است:

$$x_{k+1} = x_k + s_m d_k \quad (19)$$

دو معیار به منظور همگرایی روش ذکر شده، استفاده می‌شود. معیار اول در رابطه‌ی ۲۰ ارائه شده است:

$$|\nabla f_k^T(x_k) d_k| + \lambda_i |G(x_k)| < tol \quad (20)$$

براساس رابطه‌ی ۴، ضریب لاغرانژین با استفاده از روش کمینه‌ی مربعات، مطابق رابطه‌ی ۵، تعیین می‌شود. در صورت معکوس پذیر نبودن عبارت داخل برآکت در رابطه‌ی ۵، بکارگیری گسسته‌سازی QR و ترکیب آن با روش کمینه‌ی مربعات جهت تعیین ضریب لاغرانژین استفاده می‌شود:

$$\lambda = - \left[ \nabla G(x_k)^T \nabla G(x_k) \right]^{-1} \nabla G(x_k)^T \nabla f(x_k) \quad (5)$$

همچنین علم اصلی نامگذاری این روش بهینه‌سازی، استفاده از روش کمینه‌ی مربعات برای تعیین ضریب لاغرانژین است. گام بعدی در روش بهینه‌سازی مذکور محاسبه‌ی تقریبی ماتریس هسیان با استفاده از روش BFGS به صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$B_{k+1} = B_k + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} \quad (6)$$

که در آن، پارامترهای از رابطه‌های ۷ و ۸ تعیین می‌شوند:

$$y_k = \nabla L(x_{k+1}, \lambda) - \nabla L(x_k, \lambda) \quad (7)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (8)$$

در این محاسبات، ماتریس همانی  $B$  در اولین گام به کار گرفته می‌شود. به این ترتیب رابطه‌ی بهینه‌سازی ۲ به یک مسئله‌ی کمینه‌ی مربعات مطابق است. به این منظور ابتدا نیاز است تا ماتریس هسیان با گسسته‌سازی  $LDL^T$ ، مطابق رابطه‌ی ۹ بازنویسی شود:

$$B = LDL^T \quad (9)$$

که در آن،  $L$  ماتریس پایین‌ مثلثی و  $D$  یک ماتریس قطری است. حال فرمت مربعی شده‌ی مسئله‌ی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۲ به صورت مسئله‌ی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۱۰ بازنویسی می‌شود:

$$\begin{cases} \min & |D^{1/2} L^T d + D^{-1/2} L^{-1} \nabla f(x_k)| \\ \text{subject to} & \nabla G(x_k)^T d + G(x_k) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن،  $D^{1/2} = diag(\sqrt{\delta_1}, \dots, \sqrt{\delta_n})$  طوری تعریف شده است که از مثبت و معین بودن ماتریس هسیان اطمینان حاصل شود و پارامتر  $\delta_i$  برابر نامیں عضو از ماتریس قطری  $D$  محسوب می‌شود. با تعریف متغیر جدید  $F = D^{1/2} L^T$  می‌توان رابطه‌ی ۱۰ را به صورت رابطه‌ی ۱۱ بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} \min & |Fd + F^{-T} \nabla f(x_k)| \\ \text{subject to} & \nabla G(x_k)^T d + G(x_k) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

که در آن،  $F$  یک ماتریس بالا مثلثی است. گام بعدی در بهینه‌سازی موردنظر، کاهش مسئله‌ی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۱۱ به مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن کمینه‌ی فاصله است که دارای قید برابری جدیدی نسبت به مسئله‌ی قبلی است و این کار با استفاده از تعریف متغیر  $z$  مطابق رابطه‌ی ۱۲ صورت می‌گیرد:

$$z = Fd + F^{-T} \nabla f(x_k) \quad (12)$$

که در آن،  $P_f$  مقدار دقیق احتمال شکست،  $\bar{P}_f$  مقدار احتمال شکست به دست آمده از یک روش تقریبی مانند روش مرتبه اول قابلیت اعتماد و خطای تقریبی محاسبات است. ترم خطای در رابطه‌ی  $22$  می‌تواند دقیق، بالا دست یا پایین دست تخمین زده شود که به ترتیب برابر با حالت‌های  $0 < \epsilon < 0$  است. براساس قانون میانگین موردنظر رابطه‌ی  $22$  به صورت رابطه‌ی  $23$  بازنویسی می‌شود:

$$E(P_f) = E(\bar{P}_f) + E(\xi) = E(\bar{P}_f) + \mu_g \quad (23)$$

که در آن،  $\mu_g$  مقدار میانگین خطای تقریبی است. اگر تخمین خطای توسط رابطه‌ی اخیر، ناگرب باشد؛ آنگاه ترم  $E(\bar{P}_f)$ ، یک تخمین دقیق از احتمال شکست را تیجه می‌دهد. به طور خلاصه، اگر میانگین خطای تقریبی برابر با صفر باشد، میانگین مورد انتظار احتمال شکست به دست آمده به سیله‌ی یک روش مبتنی بر جستجوی تحلیل قابلیت اعتماد می‌تواند مطابق رابطه‌ی  $24$  به دست بیاید:

$$E(\bar{P}_f) = E(\Phi(\beta_1) - \Phi(\beta_2)) \quad (24)$$

که در آن،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  مقدار فاصله‌ی تابع حالت حدی برای هر نمونه در روش شبیه‌سازی مونتکارلو نسبت به مقدار میانگین موردنظر هستند. به منظور یافتن پاسخ رابطه‌ی  $24$ ، نیاز به حل دو مسئله‌ی هر نمونه اولین مسئله، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای تعیین اندازه‌ی باقیمانده‌ی هر نمونه در راستای بردار اهمیت تا رویی حالت حدی است، که در رابطه‌ی  $25$  ارائه شده است:

$$\begin{cases} \min & \|x_k - c_1 \alpha\| \\ \text{subject to} & G(x_k) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

که در آن  $c_1$  پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی و  $\alpha$  بردار اهمیت است که خروجی یک تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد است و از نسبت گرایان تابع حالت حدی به اندازه‌ی این بردار گرایان به دست می‌آید. پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی مذکور، فاصله‌ی بین نمونه‌ی بررسی شده تا نقطه‌ی بر روی حالت حدی ( $0 = G$ )، را که در راستای بردار اهمیت با یکدیگر مرتبط هستند، نتیجه می‌دهد؛ که موازی با خط متصل‌کننده بین مرکز مختصات و نقطه‌ی طراحی در فضای استاندار نرمال است.

مسئله‌ی دوم، یک مسئله‌ی ریشه‌یابی ساده است (مطابق رابطه‌ی  $26$ ) که هدف از حل آن، تعیین فاصله‌ی بین موقعیت تصویرسازی شده‌ی نمونه‌ی موردنظر بر روی رویی حالت حدی تا خطی است که مرکز مختصات را قطع می‌کند و موازی با خطی سازی تابع حالت حدی در نقطه‌ی طراحی به دست آمده از روش مبتنی بر جستجوی تحلیل قابلیت اعتماد است.

$$x_k + (c_1 + c_2) \alpha = 0 \quad (26)$$

پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی اخیر،  $c_2$  است. فرایند ساده‌ی اشاره شده، برای تمامی نمونه‌های محدودی که به جهت اصلاح دقت محاسباتی در روش‌های مبتنی بر جستجو استفاده شده‌اند، اعمال می‌شود و میانگین مقادیر به دست آمده برای پارامتر  $c_2$  (پاسخ نهایی) که احتمال شکست اصلاح شده است، را نتیجه می‌دهد. نکته‌ی قابل اهمیت در ارتباط با روش اخیر، تولید نمونه‌های موردنیاز در جهت کاهش خطای محاسباتی است. به همین دلیل در نوشتار حاضر، از مفاهیم به کار گرفته شده در روش کاهش ابعاد استفاده شده است. در روش کاهش ابعاد مبتنی بر ماتریس هسیان، نمونه‌های تولید شده در راستاهای اصلی حول نقطه‌ی طراحی

جدول ۱. برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات.

۱. مقداردهی  $k = 0$ ;
۲. انتخاب مقدار اولیه برای متغیرهای تصادفی ( $x_0$ ):
۳. تعیین تابع هدف  $f(x_k)$  و تابع حالت حدی  $G(x_k)$ :
۴. تعیین گرایان تابع هدف:  $(\nabla f(x_k), \nabla G(x_k))$  و گرایان تابع حالت حدی:  $(\nabla G(x_k))$ ;
۵. تعیین ضریب لاگرانژین  $\lambda$  به وسیله‌ی روش کمینه‌ی مربعات:
۶. محاسبه‌ی  $B_k$  به وسیله‌ی روش BFGS (انتخاب ماتریس همانی در گام اول):
۷. به دست آوردن جهت گام  $d_k$  به وسیله‌ی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی کمینه‌ی فاصله:
۸. اگر  $|\nabla f^T(x_k)| + \lambda |G(x_k)| < tol$ ؛ اتمام فرایند و چاپ نتایج.
- در غیر این صورت:
۹. به روزرسانی جهت گام با تابع برازنده‌ی و اندازه‌ی جهت  $s_m$ :
۱۰. محاسبه‌ی بردار طراحی جدید:  $x_{k+1} = x_k + s_m \cdot d_k$ :
۱۱. تعیین مقدار برای تابع هدف  $f(x_{k+1})$  و تابع حالت حدی  $G(x_{k+1})$ :
۱۲. اگر  $|f_{k+1} - f_k| < tol$ ؛ اتمام فرایند و چاپ نتایج.
- در غیر این صورت:
۱۳. مقداردهی  $k = k + 1$ ؛
۱۴. اگر  $k > k_{\max}$ ؛ اتمام فرایند و چاپ نتایج.
- در غیر این صورت:
۱۵. بازگشت به مرحله‌ی ۴ و تکرار چرخه.

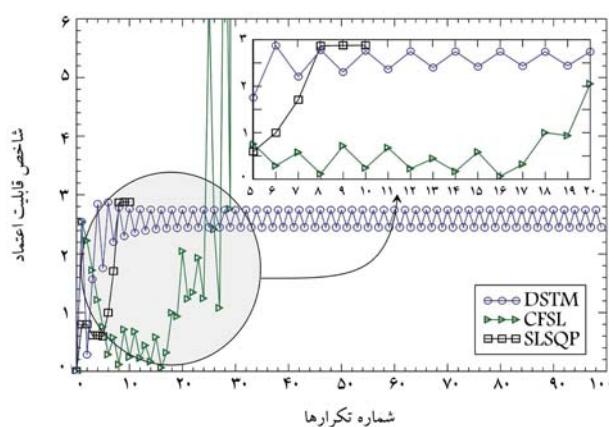
که عبارت اول در رابطه‌ی اخیر، نمایانگر بیشینه‌ی کاهش به دست آمده برای تابع هدف در جهت بردار گرایان است و عبارت دوم آن، مقدار قید حاکم بر مسئله‌ی بهینه‌سازی است که توسط ضریب لاگرانژین به دست آمده در هر گام حل مسئله‌ی وزن دهی می‌شود. رابطه‌ی  $20$  بیان می‌کند که اگر مقدار کاهش در تابع هدف و قید مسئله از مقدار از پیش تعیین شده‌ی  $tol$  کمتر باشد، الگوریتم به همگرایی دست یافته است. معیار دوم در کنترل همگرایی مطابق رابطه‌ی  $21$  بیان می‌شود:

$$|f_{k+1} - f_k| < tol \quad (21)$$

این معیار جهت جلوگیری از ادامه‌ی تکرارها در صورت تغییرات ناچیز در تابع حالت حدی است. مقدار  $tol$  در مطالعه‌ی حاضر برابر با  $1/000$  در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، مراحل موردنیاز برای برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات به طور خلاصه ارائه شده است.

**۳. میانگین موردنظر احتمالاتی با ماتریس هسیان**  
اخيراً، رشکی  $(20, 21)$ <sup>[۲۴]</sup> به منظور بهبود دقت روش تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها، روشی براساس تئوری شک ارائه کرده است (مطابق رابطه‌ی  $22$ ) که بیانگر نحوه‌ی تعیین احتمال شکست دقیق است. به عبارت دیگر، روش ذکر شده، ترکیبی از روش‌های مبتنی بر تکرار و روش شبیه‌سازی مونتکارلو است، و در آن به تعداد محدودی نمونه جهت بهبود تقریب محاسباتی نیاز است:

$$P_f = \bar{P}_f + \xi \quad (22)$$



شکل ۱. تاریخچه‌ی تکرارها برای مثال ۱.

شده و مقدار ضریب کنترل  $1/10$  برای روش DSTM، مقدار اندازه‌ی گام و ضریب تطبیقی برای روش CFSL به ترتیب برابر  $50$  و  $1/5$  در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی یکسان، یعنی  $\|\nabla f(x_k) + \lambda \nabla G(x_k)\|$ ، برای تمامی الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده است. احتمال شکست به دست آمده با استفاده از روش‌های SORM و مونت‌کارلو (MCS)، نیز به‌وسیله  $10^6$  نمونه محاسبه شده است، تا معیاری برای مقایسه‌ی دقت روش‌ها در اختیار قرار گیرد. علاوه بر این، مثال‌های ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر، قابل حل و مدل‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار BI هستند که یک نرم‌افزار تحت ویندوز برای تحلیل‌های قابلیت اعتماد سازه‌هاست و توسط نویسنده‌گان نوشتار حاضر توسعه یافته است که در آدرس [www.betaindexsoftware.com](http://www.betaindexsoftware.com) قابل دسترسی است.

## ۱.۴

مثال ۱: تابع حالت حدی چندجمله‌یی مربعی تابع حالت حدی در مثال اول، یک چندجمله‌یی مربعی غیرخطی است که دارای دو متغیر استاندارد نرمال مطابق رابطه‌ی  $27$  است.<sup>[۳۸,۳۶]</sup>

$$G(X) = X_1 - 1/7X_2 + 1/5(X_1 + 1/7X_2)^2 + 5 \quad (27)$$

تاریخچه‌ی همگرایی سه روش بررسی شده‌ی DSTM، CFSL و SLSQP برای مثال ۱ در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دو روش اول، فاقد همگرایی بوده‌اند، با اینکه رفتار عدم همگرا شدن در آنها متفاوت است (شکل ۱) روش DSTM بین دو نقطه، که هیچ‌کدام پاسخ مسئله نیستند، نوسان می‌کند که این مورد در بخش بزرگ‌نمایی شده در شکل ۱ مشخص است. از طرف دیگر، روش CFSL، عدم همگرایی به پاسخ غیرصحیح را در گام‌های ابتدایی تیجه داده و در ادامه‌ی روند حل مسئله به دلیل نیافتن اندازه‌ی گام‌های مناسب، موقتی برای اصلاح پاسخ به دست نیاورده است. در بین روش‌های ذکر شده، روش SLSQP کارایی مناسبی نشان داده و به شاخص قابلیت اعتماد برابر با  $2/8787$  همگرا شده است که متناظر با نقطه‌ی طراحی بود.

پاسخ اخیر، بهترین نتیجه‌ی مورد انتظار از خطی‌سازی تابع حالت حدی محسوب می‌شود، یعنی کمترین فاصله بین مرکز مختصات تا رویه‌ی حالت حدی است که برای آن از بسط مرتبه‌ی اول تیلور استفاده شده باشد. این مسئله توسط سایر پژوهشگران و روش‌های توسعه یافته نیز حل شده است. براساس نوشتار یانگ و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۳۶]</sup> پاسخ روش ذکور با  $2852$  فراخوانی تابع حالت حدی با استفاده از روش HLRF برابر با  $2/8787$  و نتیجه‌ی مشابه با روش STM بوده.

تولید می‌شوند، که این امر در کاهش خطای و حجم محاسبات بسیار مؤثر واقع می‌شود. کاهش خطای و محاسبه‌ی دقیق‌تر، احتمال شکست براساس دوران فضای استاندارد نرمال  $U$  به فضای استاندارد نرمال  $V$  انجام می‌شود. به این منظور نیاز است تا ماتریس دوران  $R$  که دارای ابعاد  $N \times N$  است (تعداد متغیرهای تصادفی در مسئله)، محاسبه شود. روش گرام اشمیت برای تعیین ماتریس دوران استفاده می‌شود، با این تفاصیل ورودی آن، که ماتریس هسیان در فضای  $U$  است، نیاز به محاسبه‌ی مجدد ندارد و ماتریس هسیان مذکور به عنوان خروجی روش در دسترس است. به این ترتیب بعد از تولید نمونه‌های موردنیاز با استفاده از رابطه‌ی  $u = Rv$ ، نمونه‌ها از فضای  $V$  به فضای  $U$  انتقال پیدا می‌کنند و محاسبه‌ی تابع حالت حدی ممکن می‌شود، با ذکر این نکته که نمونه‌ها در فضای  $V$  دارای مختصات هندسی به صورت  $\{v^0, \dots, v_i, \beta\}$  هستند و مختصات نقطه‌ی طراحی به صورت  $\{v^0, \dots, v^0, \beta\}$  است. این بدان معناست که سطرهای ماتریس دوران  $R$ ، عمود بر بردار اهمیت به دست آمده از روش SLSQP است و آخرین سطر ماتریس اخیر را بردار اهمیت تشکیل می‌دهد که خود به عنوان یکی از جهت‌های اصلی در نظر گرفته شده است.

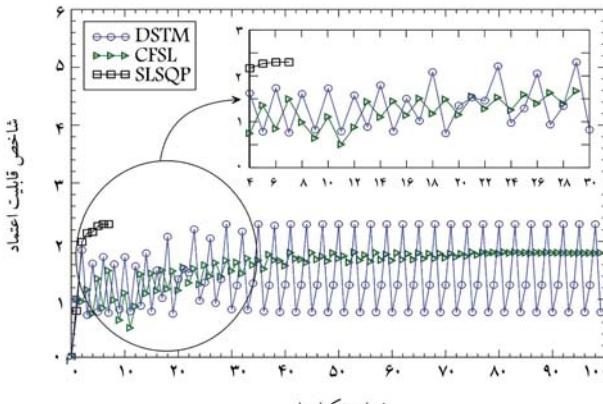
با داشتن محورهای اصلی در نقطه‌ی طراحی می‌توان نمونه‌های موردنیاز را به روش مریع - گاوی تولید کرد و به صورت نمونه‌سازی خطی در هر جهت به حل مسئله پرداخت. نکته‌ی مهم در این زمینه برای مسائلی است که دارای شعاع انحصار متفاوت در طرفین نقطه‌ی طراحی هستند، که برای این مسائل می‌توان با انتقال نمونه‌ها بر روی محور موردنظر، وضعیت مناسبی برای تولید نمونه‌ها ایجاد کرد. روش پیشنهادی نوشتار حاضر، که با نام SLSQP-PE در بخش مثال‌های عددی بیان شده است، تکمیلی از دو روش بیان شده در قسمت‌های پیشین است. در روش SLSQP-PE، ابتدا نقطه‌ی طراحی با استفاده از روش SLSQP که دارای نزدیکی سریع همگرایی و مجهز به مکانیزم‌های مناسب در برابر غیرخطی بودن تابع حالت حدی است، تعیین می‌شود که در صورت خطی بودن تابع حالت حدی می‌توان آن را به عنوان پاسخ دقیق مسئله در نظر گرفت. در گام بعدی، با استفاده از یکی از روش‌های نمونه‌سازی، تعداد محدودی نمونه‌حول نقطه‌ی طراحی تولید خواهد شد که آن‌ها با استفاده از روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی و حرکت در جهت محورهای اصلی و کاهشی به دست آمده با استفاده از ماتریس هسیان تخمینی در روش SLSQP، در مختصات جدید قرار می‌گیرند و خطای هر نمونه نسبت به پاسخ روش SLSQP محاسبه می‌شود. میانگین خطای به دست آمده در کنار پاسخ موجود، به پاسخ اصلاح شده با دقت بالا منجر می‌شود.

## ۴. مثال‌های عددی

در بخش حاضر، چهار مثال از ادبیات فنی بررسی شده است، تا کارایی روش پیشنهادی مشخص شود. مثال‌ها، شامل چالش‌هایی مانند انواع غیرخطی بودن تابع حالت حدی و پیچیدگی‌های عددی در ترکیب متغیرهای تصادفی هستند. به منظور ساده‌سازی در حل مسائل، روش پیشنهادی SLSQP و ترکیب آن با روش میانگین مورد انتظار، SLSQP-PE نامیده شده است. نتایج روش پیشنهادی با دو روش نوین محاسباتی شامل روش‌های CFSL و DSTM که برای مقابله با غیرخطی بودن تابع حالت حدی توسعه یافته و پیش‌تر توضیح داده شده‌اند، مقایسه شده است. به منظور آماده‌سازی دو روش مذکور جهت مقایسه‌ی تابع، از تنظیمات ارائه شده در نوشتارهای یانگ و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۳۶]</sup> و روداک و کرملو (۲۰۱۹)<sup>[۳۷]</sup> استفاده

جدول ۲. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۱.

		فراخوان تابع	تکرارها	$P_f$	$\beta$	روش
—	—	—	—	—	—	DSTM
—	—	—	—	—	—	CFSL
۶ + Hessian	—	۰/۰۰۰۴۳۴	۲/۳۳۰	—	—	SORM
۶	۶	۰/۰۰۲۰۰۱	۲/۸۷۸	—	—	SLSQP
۶ + ۹	۶ + ۹	۰/۰۰۰۴۱۸	۲/۳۴۰	—	—	SLSQP-PE
۱۰۶	۱۰۶	۰/۰۰۰۴۲۰	۲/۳۳۹	—	—	MCS



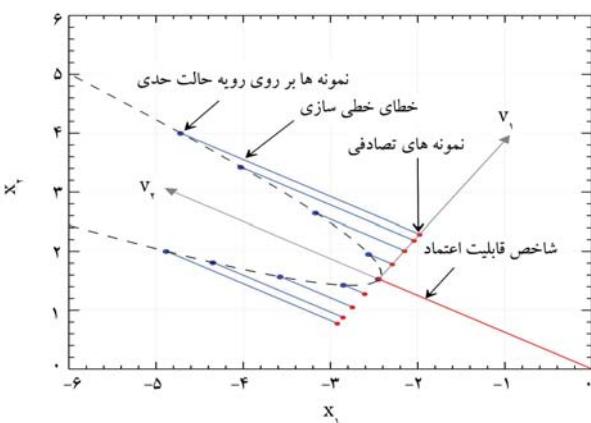
شکل ۳. تاریخچه‌ی تکرارها برای مثال ۲.

[۲۰، ۲۷، ۲۴] در نظر گرفته شده است.

$$G(X) = \ln(e^{1+X_1-X_2}) + e^{5-5X_1-X_2} \quad (28)$$

هر دو متغیر تصادفی، دارای توزیع احتمالاتی استاندارد نرمال هستند. در شکل ۳، تاریخچه‌ی گام‌های محاسباتی برای تعیین قابلیت اعتماد مشاهده می‌شود. غیرخطی بودن بالای تابع حالت حدی در مثال ۲ به عدم همگرایی برای روش‌های DSTM و CFSL منجر شده است. روش DSTM، رفت و برگشت بین دو نقطه‌ی اشتباه را نتیجه داده است. با اینکه روش CFSL به نتیجه‌ی پایدار رسیده است، ولی پاسخ به دست این روش صحیح نیست. روش SLSQP دارای پاسخ صحیح در کنار همگرایی سریع در این مرحله است که همان استفاده از خطی‌سازی تابع حالت حدی بوده است. مثال ۲، با روش‌های دیگری نیز حل شده است، که در ادبیات فنی موجود هستند: از جمله: روش پیشنهادی روداک و همکاران [۲۰، ۱۷]، روش گنگ [۲۰ ۱۱]، [۲۰ ۱۴]، [۲۰ ۱۲] روش پیشنهادی گنگ و همکاران [۲۰ ۱۷] روش‌های ذکر شده، توانایی مقابله با غیرخطی بودن تابع حالت حدی را داشته‌اند، اما تلاش محسوباتی آن‌ها، به میزان کمیه نبوده است (به منظور بررسی بهتر، مراجع ذکر شده مطالعه شوند). بنابراین می‌توان این طور بیان کرد که روش SLSQP، کارایی بالاتری بین روش‌های مقایسه شده و روش‌های اشاره شده در ادبیات فنی که براساس خطی‌سازی تابع حالت حدی عمل کرده است، را دارد.

گام بعدی، بررسی دقت پاسخ به دست آمده است. مشابه مثال ۱، مثال ۲ از دو متغیر تصادفی تشکیل شده است که دو بعد را پوشش می‌دهد. روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی، باز دیگر به کار گرفته خواهد شد تا خطی‌سازی را کاهش دهد. بعد از دوران و انتقال به محورهای اصلی  $v_1$  و  $v_2$  از  $\beta$  نقطه به روش مربعی- گاووسی استفاده شده است. در شکل ۴، فرایند تعیین خطی‌سازی هر نمونه مشابه توضیحات ارائه شده در مثال ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. رویه‌ی نمونه‌سازی جهت بهبود دقت محاسبات برای مثال ۱.

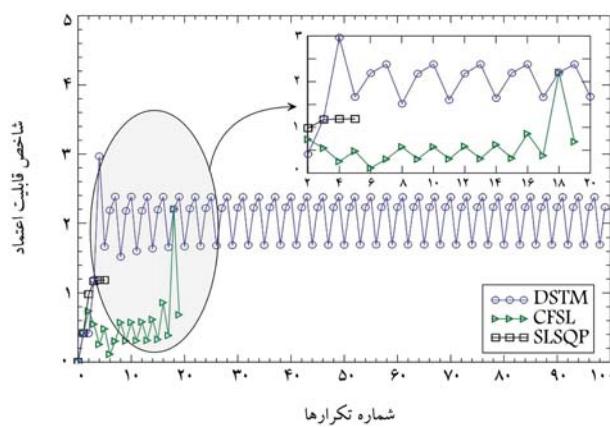
است، که با  $\beta = ۳۰/۲$  فراخوانی تابع حالت حدی به دست آمده است. گام بعدی حل مسئله، بهبود دقت محاسباتی است. در شکل ۲، فرایند استفاده شده برای تعیین میانگین مورد انتظار احتمالاتی جهت کاهش خطی‌سازی مشاهده می‌شود. مسئله‌ی کوئی از دو جهت تشکیل شده است. در روش حاضر این امکان وجود دارد تا از نمونه‌های تصادفی استفاده شود؛ اما مطالعه‌ی حاضر روش جایگزین مربع- گاووسی، [۲۹] را برای تولید نمونه‌های تصادفی به کار گرفته است، که برای مثال حاضر، از نقطه‌ی اولیه در جهت محور  $v_1$  استفاده شده است که با رنگ قرمز در شکل ۲ مشخص شده‌اند. گام بعدی، انتقال نقاط اولیه به روی رویه‌ی حالت حدی در راستای بردار حساسیت است. در گام قابلی، نقطه‌ی طراحی و بردار حساسیت به وسیله‌ی روش SLSQP محاسبه شده است. نقاط مذکور با رنگ‌های آبی در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. مرحله‌ی بعد، تعیین خطی‌های هر نمونه نسبت به شاخص قابلیت اعتماد به دست آمده از روش SLSQP است.

خط فرضی متصل‌کننده نقاط قرمز در شکل ۲، بیانگر تقریب خطی تابع حالت حدی حول نقطه‌ی طراحی به دست آمده به وسیله‌ی SLSQP است که به دلیل دوران محورهای مختصاتی، خط فرضی مذکور بر روی محور اصلی دوران باقیمانده است. قرار خواهد گرفت. خط‌های آبی که اتصال دهنده هر نمونه‌ها روی رویه‌ی حالت حدی به محور  $v_1$  هستند، بیانگر خطی‌سازی هر نمونه نسبت به روش خطی‌سازی محسوب می‌شوند. نهایتاً، با میانگیری کردن خط‌های به دست آمده مطابق آنچه در بخش سوم بیان شد، مقدار شاخص قابلیت اعتماد برابر با  $۳/۳۴۰$  به دست آمد که بسیار نزدیک به پاسخ روش مونت‌کارلو  $۳/۳۳۹$  است.

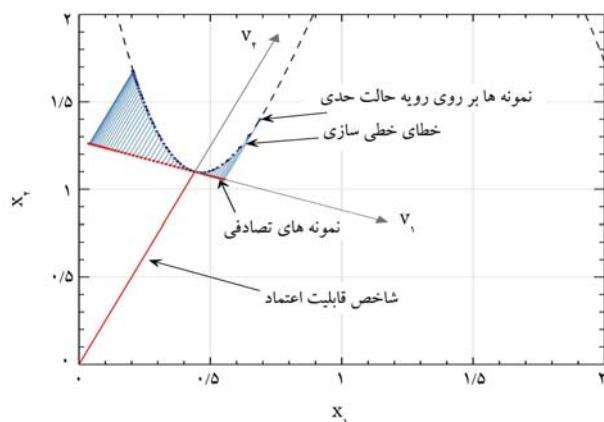
در جدول ۲، خلاصه‌ی از نتایج پایانی روش‌های مختلف ارائه شده است، که  $\beta$  شاخص قابلیت اعتماد،  $p$  احتمال شکست و تعداد تکرار موردنیاز و تعداد دفعات فراخوانی تابع حالت حدی برای هر روش ارائه شده است. پاسخ نهایی روش بهینه‌سازی که در آن از اصلاح به روش میانگین مورد انتظار استفاده شده است، به شکل ۲ در جدول ۲ نام برده شده است. کارایی مناسب روش SLSQP-PE در شکل ۲ نام برده شده است. کارایی مقایسه شده با پاسخ روش مونت‌کارلو  $۳/۳۳۹$  است.

در مثال ۲، ترکیب نمایی و لگاریتمی متغیرهای تصادفی در تابع حالت حدی (مطابق

۲.۴. مثال ۲: تابع حالت حدی نمایی - لگاریتمی



شکل ۵. تاریخچه‌ی تکرارها برای مثال ۳.

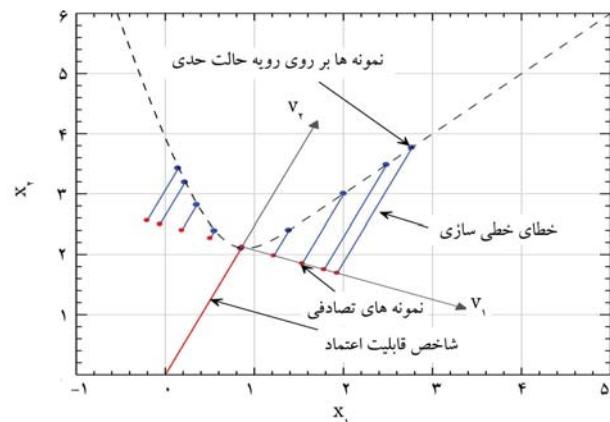


شکل ۶. رویه‌ی نمونه‌سازی جهت بهبود دقت محاسبات برای مثال ۳.

بین مركز مختصات و رویهی حالت حدی در فضای استاندار نرمال است. اما پاسخ خیری با نتیجه‌ی به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (SLSQP) مقاومت زیادی داشته است، که نیاز به اصلاح را بادآورد می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که این مورد ضعف روش بهینه‌سازی نیوود است، زیرا وظیفه‌ی روش SLSQP، یافتن زردیک ترین فاصله‌ی ذکر شده در حالت خطی‌سازی بوده و این امر صورت پذیرفته است.

نقشه‌ی طراحی به دست آمده دارای مختصات  $1/10000$  (۷) و  $۰/۴۴۰۹۷$  (۰) بوده است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. خطای محاسباتی مثال حاضر، به وجود ترم نویز و شعاع انحنای نامتقارن در نقطه‌ی طراحی بر می‌گردد. اگر مشابه مثال‌های قبلی، از روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی استفاده شود، بعد از دوران محور به مختصات محورهای اصلی و تولید نمونه‌های متقاضی نسبت به محور  $v_2$ ، تأثیر چندانی در بهبود خطای مسئله نخواهد داد. به این دلیل، برای مسئله‌ی حاضر از  $50^{\circ}$  نقطه به روش مربع-گاؤسی و انتقال به سمت چپ محور مذکور به مقدار  $15^{\circ}$  استفاده شده است. همچنین در شکل ۶، نمونه‌های تولید شده بر این اساس

به همراه خطای هر نمونه حول نقطه‌ی طراحی مشاهده می‌شوند. بهترین عملکرد در مسئله‌ی حاضر، متعلق به روش SLSQP است که فقط با ۶ تکرار در مرحله‌ی خطی سازی به نتیجه رسیده است. نهایتاً، روش SLSQP-PE منجر به بهبود دقت پاسخ مسئله شده است، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. در مثال حاضر، روش SORM به دلیل کوچک بودن مقدار شاخص قابلیت اعتماد، تأثیر چندانی در بهبود دقت نهایی نداشته است.



شکل ۴. رویه‌ی نمونه‌سازی جهت بهبود دقت محاسبات برای مثال ۲.

### جدول ۳. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۲.

روش	$\beta$	$P_f$	تکرارها	فراخوان تابع
DSTM	—	—	—	—
CFSL	$1/796$	$0/0362447$	$100$	$100$
SORM	$3/706$	$0/003404$	—	$6 + \text{Hessian}$
SLSQP	$2/270$	$0/003400$	$6$	$6$
SLSQP-PE	$2/740$	$0/003072$	$6 + 9$	$6 + 9$
MCS	$2/745$	$0/003025$	$10^6$	$10^6$

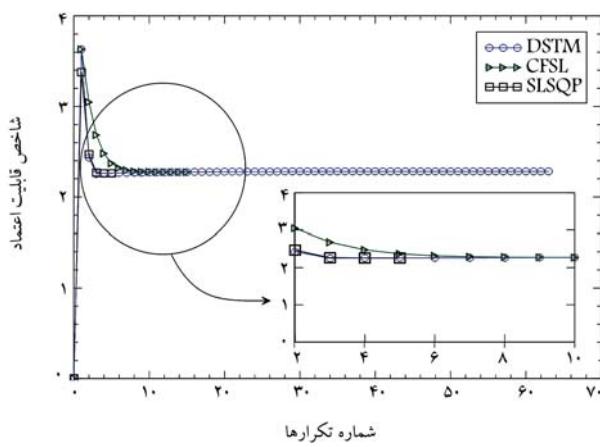
میانگین خطای محاسبه شده و نتیجه‌ی آن، تعیین شاخص قابلیت اعتماد برابر با  $2/740$  است که موافق با پاسخ روش شمیمه‌سازی مونت‌کارلو  $2/745$  است. در جدول ۳، نتایج نهایی شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست متناظر به دست آمده برای روش‌های مختلف ارائه شده است.

### ۳.۴. مثال ۳: تابع حالت حدی دارای نوین

تابع حالت حدی دارای ترم نویز در مثال ۳ مطابق رابطه‌ی ۲۹ بررسی شده است. [۴۳، ۴۴] دو متغیر تصادفی استفاده شده در مثال کنونی، دارای توزیع نرمال با میانگین‌های به ترتیب برابر با  $1/5$  و  $2/5$  هستند و مقدار انحراف معیار برای هر دو متغیر تصادفی  $1/10$  است.

$$G(X) = \frac{(X_1^r + \mathfrak{r})(X_1 - 1)}{r^{\circ}} - \sin\left(\frac{\Delta X_1}{r}\right) - \mathfrak{r} \quad (29)$$

تمامی گام‌های محاسباتی به همراه بزرگ‌نمایی گام‌های اولیه به منظور درک بهتر رفتار روش‌ها در شبکه ۵ مشاهده می‌شود. مشابه مثال‌های قبلی، روش DSTM نوسان بین پاسخ‌های اشتباه و عدم توانایی در یافتن پاسخ را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، روش CFSL دچار ناپایداری عددی شده و از ادامه‌ی حل مستثنی، بعد از ۱۹ بازمانده است. قابلیت اعتماد برابر با  $1/185$  به پایان رسیده است که این پاسخ بهترین پاسخ در حالت خطی سازی تابع حالت حدی، یعنی کمترین فاصله



شکل ۸. تاریخچه‌ی تکرارها برای مثال ۴.

تاریخچه‌ی همگرایی روش‌های محاسباتی و عدم توانایی همگرایی سریع روش DSTM، در شکل ۸ کاملاً نمایان است. نکته‌ی قابل توجه در مسئله‌ی حاضر، یکسان بودن نتایجی ۴ گام ابتدایی برای روش‌هاست. در مثال کنونی، نیز همگرایی سریع برای روش SLSQP بوده است. نتایج روش‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. در مسئله‌ی مهندسی حاضر، تمامی روش‌ها به پاسخ پایدار و نهایی رسیده‌اند. با توجه به جدول ۷، خطای روش DSTM نسبت به سایر روش‌ها بالاتر بوده است. دو روش CFSL و SLSQP، پاسخ‌های نزدیک به یکدیگر را گزارش کرده‌اند. تفاوت اصلی در هزینه‌ی محاسباتی بین روش‌های ذکر شده است که روش CFSL عملکرد مناسب‌تری را نسبت به روش DSTM با ۶۴ تکرار و ۵۶۷ تراکار، ۶۷۳ تکرار و ۵۶۷ فراخوانی تابع حالت حدی و ۶/۸۳ ثانیه زمان حل برای عملیات‌های محاسباتی نتیجه داده است. با این حال، روش SLSQP فقط با نیاز به ۵ تکرار، ۴۶ فراخوانی تابع حالت حدی، و زمان تقریبی ۱ ثانیه سریع‌تر نسبت به روش CFSL، عملکرد بسیار مناسبی را نشان داده است. در ادامه، اصلاح پاسخ نتیجه‌ی روش بهینه‌سازی با استفاده از روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی صورت پذیرفته است، که به ساختار قابلیت اعتماد ۲/۱۸۴۶۲ رسیده است، که با دقت ۴ رقم اعشار به پاسخ روش شبیه‌سازی مونتکارلو نزدیک شده است و فقط ۰/۱۳ ثانیه زمان بیشتر نسبت به روش SLSQP نیاز دارد، که تأییدی بر کارایی مناسب روش است. بیشتر بودن تعداد فراخوانی تابع حالت حدی نسبت به تعداد تکرارها در مسئله‌ی حاضر، به عملت صریح بودن تابع حالت حدی و استفاده از روش تفاضلات محدود جهت تعیین گردیدن تابع حالت حدی است.

نقشه‌ی طراحی به دست آمده برای مسئله‌ی حاضر براساس ترتیب ارائه شده در جدول ۴ برابر است با:

$$A_1 = 0/0021 \quad A_2 = 0/0019$$

$$A_3 = 0/0009 \quad A_4 = 0/00119$$

$$A_5 = 0/00219 \quad A_6 = 0/0015$$

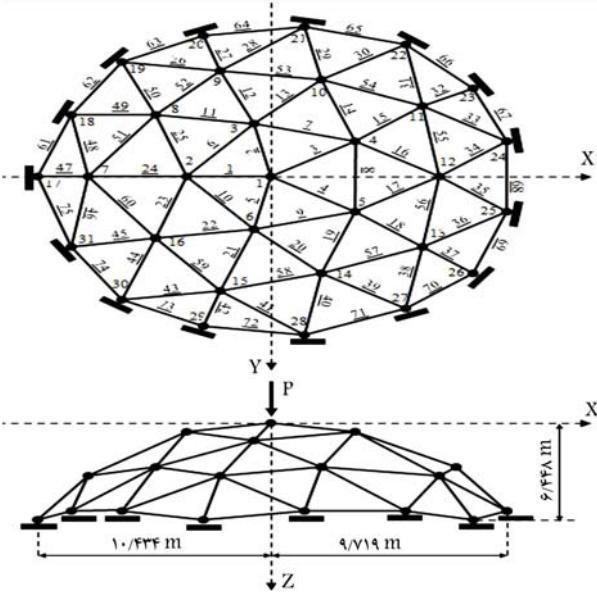
$$E = 68/627 \quad P = 10.8/83$$

## ۵. نتیجه‌گیری

روش‌های تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد به شکل گستردگی جهت تعیین احتمال شکست یا ایمنی و تعیین شرایط بهینه در مسائل مهندسی استفاده می‌شوند که

جدول ۴. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۳.

روش	$\beta$	$P_f$	فرآخوان تابع	تکرارها
DSTM	—	—	—	—
CFSL	—	—	—	—
SORM	۰/۱۹۱	۰/۱۱۶۸۲	—	۶ + Hessian
SLSQP	۰/۱۸۵	۰/۱۱۷۹۷	۶	—
SLSQP-PE	۰/۸۴۰	۰/۰۳۱۷۹	۶ + ۰°	—
MCS	۰/۸۶۱	۰/۰۳۱۳۳	۱۰۶	۱۰۶



جدول ۵. مختصات هندسی گره‌ها برای مثال ۴.

(X, Y, Z) meter	Node	(X, Y, Z) meter	Node
(-10/424, +0/000, +6/448)	17	(+0/000, +0/000, +0/000)	1
(-9/246, -3/808, +5/608)	18	(-4/004, +0/000, +0/704)	2
(-8/479, -7/817, +5/608)	19	(-1/237, -3/808, +0/704)	3
(+8/448, -9/923, -3/224)	20	(+0/709, -2/354, +1/237)	4
(+0/765, -9/971, +5/608)	21	(+3/240, +2/354, +0/704)	5
(+5/242, -8/516, +5/608)	22	(-3/240, +3/808, +0/704)	6
(+8/441, -6/133, +6/448)	23	(-8/009, +0/000, +3/182)	7
(+9/719, -2/354, +5/608)	24	(-5/729, -4/162, +2/395)	8
(+9/719, +2/354, +5/608)	25	(-2/475, -7/617, +2/882)	9
(+8/441, +6/133, +6/448)	26	(+2/188, -6/725, +2/395)	10
(+5/242, +8/516, +5/608)	27	(+6/479, -4/708, +3/182)	11
(+0/765, +9/971, +5/608)	28	(+7/082, +6/479, +3/182)	12
(-3/224, +9/923, +6/448)	29	(+6/479, +4/708, +3/182)	13
(-6/479, +7/817, +5/608)	30	(+2/188, +6/725, +2/395)	14
(-9/246, +3/808, +5/608)	31	(-2/475, +7/617, +3/182)	15
		(-5/729, +4/162, +2/395)	16

جدول ۶. متغیرهای تصادفی و توزیع‌های احتمالاتی برای مثال ۴.

انحراف معیار	میانگین	نوع توزیع	متغیر
°/000375	°/0025	نرمال	A <sub>1</sub> - A <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> )
°/00024	°/0020	نرمال	A <sub>6</sub> - A <sub>10</sub> (m <sup>3</sup> )
°/00008	°/0010	نرمال	A <sub>11</sub> - A <sub>25</sub> (m <sup>3</sup> )
°/000096	°/0012	نرمال	A <sub>26</sub> - A <sub>50</sub> (m <sup>3</sup> )
°/00022	°/0022	نرمال	A <sub>51</sub> - A <sub>60</sub> (m <sup>3</sup> )
°/00015	°/0015	نرمال	A <sub>61</sub> - A <sub>75</sub> (m <sup>3</sup> )
3/5	7°	نرمال	E (GPa)
12/0	8°	گامبل	P (kN)

جدول 7. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۴.

روش	$\beta$	$P_f$	تکرارها	فراخوان تابع	زمان (s)
DSTM	2/28211	°/01121	64	576	6/830
CFSL	2/27227	°/01150	16	144	2/068
SORM	2/15001	°/01577	—	46 + Hessian	3/280
SLSQP	2/26053	°/01189	5	46	1/117
SLSQP-PE	2/18460	°/01445	5 + 5°	46 + 5°	1/130
MCS	2/18462	°/01445	6/5 × 10 <sup>6</sup>	6/5 × 10 <sup>6</sup>	896/0

روش مذکور برای تعداد محدودی مثال در مطالعه‌ی حاضر نشان داده شده است. تخمین نقطه‌ی طراحی در فضای خطی سازی شده با استفاده از روش SLSQP اولین اقدام است که در مقایسه با سایر روش‌ها، با نرخ همگرایی سریع‌تری صورت می‌پذیرد. گام بعدی در روش ارائه شده، اصلاح پاسخ به دست آمده است، تا پاسخی بهینه‌سازی غیرخطی عددی را بررسی کرده است که دارای فیلترهای ساده است و در دستیابی به پاسخ‌های پایدار و همگرایی سریع بسیار موفق عمل می‌کند و نیز جهت جلوگیری از ناپایداری‌های عددی، مسئله‌ی بهینه‌سازی اولیه را با یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن کمترین فاصله جایگزین می‌کند. عملکرد مناسب و کارایی بالای وسیله ماتریس هسیان به دست آمده از روش SLSQP به فضای کاهش یافته و

اساس کار آن‌ها، خطی‌سازی تابع حالت حدی است. غیرخطی بودن تابع حالت حدی، چالشی در همگرایی روش‌های مذکور را وارد می‌کند، که نیاز به توسعه و ترکیب‌های جدید در این زمینه را الزامی می‌دارد. نوشتار حاضر، روشی براساس بهینه‌سازی غیرخطی عددی را بررسی کرده است که دارای فیلترهای ساده است و در دستیابی به پاسخ‌های پایدار و همگرایی سریع بسیار موفق عمل می‌کند و نیز جهت جلوگیری از ناپایداری‌های عددی، مسئله‌ی بهینه‌سازی اولیه را با یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن کمترین فاصله جایگزین می‌کند. عملکرد مناسب و کارایی بالای

و درک بهتر مثال‌های ارائه شده در نوشتار حاضر و تعدادی از مثال‌های مهندسی حل شده با استفاده روش پیشنهادی، ابزار محاسباتی و نرم‌افزار با نام BI توسط www.betaindexsoftware.com نویسنده‌گان نوشتار حاضر تهیه و در آدرس قرار داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مثال‌های عددی، سرعت و پایداری روش ارائه شده تأیید شده است. از نظر دقت محاسباتی نیز راهکاری همچون به کارگیری روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی در کنار استفاده از اطلاعات ماتریس هسیان معرفی شده است. ساختارسازی ارائه شده، این امکان را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد تا در مسائل پیچیده و دارای دشواری‌های محاسباتی، یک ابزار توانمند و مقرن به صرفه از نقطه نظر حجم محاسباتی را در اختیار داشته باشند.

جهت‌های اصلی انتقال پیدا کرده و در مرحله‌ی پایانی، با استفاده از روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی، اصلاح پاسخ و افزایش دقت محاسباتی صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است روش مذکور در مسائل، دارای تابع حالت حدی محدب و دارای یک نقطه‌ی طراحی، نتایج مطلوبی را نتیجه می‌دهد و با توجه به همگراپی سریع مناسب برای مسائل مهندسی، دارای تابع حالت حدی ضمنی است. این در حالی است که در مسائل دارای چند نقطه‌ی طراحی، روش اخیر فقط یک نقطه‌ی طراحی ارائه می‌دهد و توانایی یافتن تمامی نقاط طراحی را ندارد که این مورد متغیرهای همبسته با ضریب همبستگی غیرخطی است که به منظور برطرف کردن آن، نیاز به استفاده از روش توانمند تبدیل متغیرهای تصادفی است. به منظور بررسی جامع تر

## پانوشت‌ها

1. First Order Reliability Method (FORM)
2. Hasofer & Lind
3. Rackwitz & Flessler
4. Zhang & Kiureghian
5. Santos
6. Stability Transformation Method (STM)
7. Roudak
8. Meng
9. Gong
10. Keshtegar
11. Schittkowski
12. Kraft

## منابع (References)

1. Chen, G. and Yang, D. "Direct probability integral method for stochastic response analysis of static and dynamic structural systems", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **357**, p. 112612 (2019).
2. Dodwell, T.J., Kynaston, S., Butler, R. and et al. "Multilevel monte carlo simulations of composite structures with uncertain manufacturing defects", *Probabilistic Eng. Mech.*, **63**, p. 103116 (2021).
3. Yun, W., Lu, Z., Wang, L. and et al. "Error-based stopping criterion for the combined adaptive Kriging and importance sampling method for reliability analysis", *Probabilistic Eng. Mech.*, **65**, p. 103131 (2021).
4. Guo, Q., Liu, Y., Chen, B. and et al. "An active learning Kriging model combined with directional importance sampling method for efficient reliability analysis", *Probabilistic Eng. Mech.*, **60**, p. 103054 (2020).
5. Xu, Z., Cao, J., Zhang, G. and et al. "Active learning accelerated Monte-Carlo simulation based on the modified K-nearest neighbors algorithm and its application to reliability estimations", *Def Technol* (In Press) (2022).
6. Betz, W., Papaioannou, I. and Straub, D. "Bayesian post-processing of monte carlo simulation in reliability analysis", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **227**, p. 108731 (2022).
7. Xiao, S. and Nowak, W. "Reliability sensitivity analysis based on a two-stage Markov chain Monte Carlo simulation", *Aerosp. Sci. Technol.*, **130**, p. 107938 (2022).
8. Rahgozar, N., Pouraminian, M. and Rahgozar, N. "Reliability-based seismic assessment of controlled rocking steel cores", *J. Build. Eng.*, **44**, p. 102623 (2021).
9. Pouraminian, M. and Ekranejad, H. "Reliability analysis of concrete arch dam under stage construction and hydrostatic pressure by MCS and RS methods", *Sharif J. Civ. Eng.*, **37.2**(3.2-3), pp. 135-145 (2021).
10. Bjerager, P. "Probability integration by directional simulation", *J. Eng. Mech.*, **114**(8), pp. 1285-1302 (1988).
11. Engelund, S. and Rackwitz, R. "A benchmark study on importance sampling techniques in structural reliability", *Struct. Saf.*, **12**(4), pp. 255-276 (1993).
12. Hsu, W.C. and Ching, J. "Evaluating small failure probabilities of multiple limit states by parallel subset simulation", *Probabilistic Eng. Mech.*, **25**(3), pp. 291-304 (2010).
13. Au, S.-K. and Beck, J.L. "Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation", *Probabilistic Eng. Mech.*, **16**(4), pp. 263-277 (2001).
14. Breitung, K. "40 years FORM: Some new aspects", *Probabilistic Eng. Mech.*, **42**, pp. 71-77 (2015).
15. Xiang, Y. and Liu, Y. "Application of inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction", *Probabilistic Eng. Mech.*, **26**(2), pp. 148-156 (2015).
16. Zhao, Y.G., Zhang, X.Y. and Lu, ZH. "Complete monotonic expression of the fourth-moment normal transformation for structural reliability", *Comput. Struct.*, **196**, pp. 186-199 (2018).
17. Lutes, L.D. and Winterstein, S.R. "A dynamic inverse FORM method: Design contours for load combination problems", *Probabilistic Eng. Mech.*, **44**, pp. 118-127 (2016).

18. Hasofer, A.M. and Lind, N.C. "Exact and invariant second-moment code format", *J. Eng. Mech. Div.*, **100**(1), pp. 111-121 (1974).
19. Rackwitz, R. and Flessler, B. "Structural reliability under combined random load sequences", *Comput. Struct.*, **9**(5), pp. 489-494 (1978).
20. Zhang, Y. and Kiureghian, A. "Two improved algorithms for reliability analysis", *Reliab. Optim. Struct. Syst.*, Boston, MA: Springer US, pp. 297-304 (1995).
21. Santos, S.R., Matioli, L.C. and Beck, A.T. "New optimization algorithms for structural reliability analysis", *C - Comput. Model Eng. Sci.*, **83**, pp. 23-55 (2012).
22. Roudak, M.A., Shayanfar, M.A. and Karamloo, M. "Improvement in first-order reliability method using an adaptive chaos control factor", *Structures*, **16**, pp. 150-156 (2018).
23. Meng, Z., Li, G., Yang, D. and et al. "A new directional stability transformation method of chaos control for first order reliability analysis", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **55**, pp. 601-612 (2017).
24. Gong, J.-XX and Yi, P. "A robust iterative algorithm for structural reliability analysis", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **43**(4), pp. 519-527 (2011).
25. Keshtegar, B. "A hybrid conjugate finite-step length method for robust and efficient reliability analysis", *Appl. Math. Model.*, **45**, pp. 226-237 (2017).
26. Wang, X., Zhao, W., Chen, Y. and et al. "A first order reliability method based on hybrid conjugate approach with adaptive Barzilai-Borwein steps", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **401**, 115670 (2022).
27. Liu, P.L. and Der Kiureghian, A. "Optimization algorithms for structural reliability", *Struct. Saf.*, **9**(3), pp. 161-177 (1991).
28. Lalee, M., Nocedal, J. and Plantenga, T. "On the implementation of an algorithm for large-scale equality constrained optimization", *SIAM J. Optim.*, **8**(3), pp. 682-706 (1998).
29. Schittkowski, K. "A robust implementation of a sequential quadratic programming algorithm with successive error restoration", *Optim. Lett.*, **5**, pp. 283-296 (2011).
30. Byrd, R.H., Hribar, M.E. and Nocedal, J. "An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming", *SIAM J. Optim.*, **9**(4), pp. 877-900 (1999).
31. Schittkowski, K. "The nonlinear programming method of Wilson, Han, and Powell with an augmented Lagrangian type line search function - Part 2: An efficient implementation with linear least squares subproblems", *Numer. Math.*, **38**, pp. 115-127 (1982).
32. Kraft, D. "A software package for sequential quadratic programming", Koln, 88 (1988).
33. Lawson, C.L., Lawson, C.L. and Hanson, R.J. "Solving least squares problems", Prentice-Hall (1974).
34. Rashki, M. "Structural reliability reformulation", *Struct. Saf.*, **88**, p. 102006 (2021).
35. Kang, S.B., Park, J.W. and Lee, I. "Accuracy improvement of the most probable point-based dimension reduction method using the hessian matrix", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **111**(3), pp. 203-217 (2017).
36. Yang, M., Zhang, D. and Han, X. "New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **366**, p. 113018 (2020).
37. Roudak, M.A. and Karamloo, M. "Establishment of non-negative constraint method as a robust and efficient first-order reliability method", *Appl. Math. Model.*, **68**, pp. 281-305 (2019).
38. Jiang, C., Han, S., Ji, M. and et al. "A new method to solve the structural reliability index based on homotopy analysis", *Acta Mech.*, **226**, pp. 1067-1083 (2015).
39. Zhao, Y.-G. and Ono, T. "New point estimates for probability moments", *J. Eng. Mech.*, **126**, pp. 433-436 (2000).
40. Huang, P., Huang, H.Z. and Huang, T. "A novel algorithm for structural reliability analysis based on finite step length and Armijo line search", *Appl. Sci.*, **9**(12), p. 2546 (2019).
41. Roudak, M.A., Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A. and et al. "A robust approximation method for nonlinear cases of structural reliability analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, **133**, pp. 11-20 (2017).
42. Gong, J., Yi, P. and Zhao, N. "Non-gradient-based algorithm for structural reliability analysis", *J. Eng. Mech.*, **140**(6), 04014029 (2014).
43. Liu, B. and Xie, L. "An improved structural reliability analysis method based on local approximation and parallelization", *Mathematics*, **8**(2), p. 209 (2020).
44. Bichon, B.J., Eldred, M.S., Swiler, L.P. and et al. "Efficient global reliability analysis for nonlinear implicit performance functions", *AIAA J.*, **46**(10), pp. 2459-2468 (2008).
45. Keshtegar, B. and Chakraborty, S. "A hybrid self-adaptive conjugate first order reliability method for robust structural reliability analysis", *Appl. Math. Model.*, **53**, pp. 319-332 (2018).



# طراحی بهینه‌ی قاب‌های مهاربندی فولادی دوگهواره‌ی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌ی ثانویه

محمد تقی رفیعی محمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

وحید بروجردان\* (دانشیار)

اسماعیل محمدی ده‌چشم (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

به منظور کاهش آثار مودهای بالاتر در سیستم گهواره‌ی، اضافه کردن مفصل گهواره‌ی ثانویه در ارتفاع سازه رایج است. محل بهینه‌ی مفصل ثانویه به علت بازتوزع نیروهای داخلی بین صفحات گهواره‌ی، چالش برانگیز است. در پژوهش حاضر، قاب مهاربندی فولادی دوگهواره‌ی دارای تعداد طبقات ۱۸ و ۲۴، با استفاده از روش برهم‌نیه مodal اصلاح شده طراحی شده است. سپس محل مفصل ثانویه در هر طبقه تغییر یافته است تا محل بهینه برای کمینه‌سازی برش، لنگر و ایگونی، بیشینه‌ی شتاب و جایه‌جایی نسبی طبقه تعیین شود. قاب‌های مورد بررسی تحت مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل، نزدیک گسل و نزدیک گسل با پالس قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که قرار دادن مفصل در ۴۰٪ ارتفاع در اغلب موارد باعث کمینه‌سازی هر چهار تفاضا شده است. همچنین لنگر و ایگونی دارای بیشترین حساسیت به محل مفصل ثانویه بوده و تغییرات مجموع آن به نحوی با برش همبستگی داشته است. از این‌رو، انتخاب لنگر و ایگونی به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود.

m.rafie@civileng.iust.ac.ir  
broujerdian@iust.ac.ir  
esmhd.dehcheshmeh@gmail.com

واژگان کلیدی: سیستم دوگهواره‌ی، روش برهم‌نیه مodal اصلاح شده، بهینه‌یابی محل مفصل گهواره‌ی دوم، جایه‌جایی پسماند، بیشینه‌ی شتاب طبقه.

## ۱. مقدمه

سطح طراحی، در دهه‌های گذشته توسعه یافته‌اند. یک دسته از سیستم‌های مقاوم لرزه‌ی کم خسارت، سیستم‌های مرکزگرا هستند. سیستم‌های مرکزگرا معمولاً به منظور جلوگیری از خسارت‌های سازه‌ی به جای تسلیم مصالح، به غیرخطی بودن هندسه‌ی متکی هستند. سازه‌های گهواره‌ی از نسل‌های جدید سیستم‌های مرکزگرا هستند. مطابق شکل ۱، در سیستم دوگهواره‌ی، کابل پس‌تنیده در طرفین قاب و میراگر در پایه‌ی گهواره‌ی و ارتفاع قاب قرار دارد. سازه‌های گهواره‌ی از طریق بلندشدنگی و حرکت گهواره‌ی در پایه، آسیب‌های سازه‌ی را به فیوزهای انالاف کمتده‌ی ارزی قابل تعویض محدود می‌کنند. با این‌کار، اعضاء سازه‌ی اصلی به شکلی طراحی می‌شوند که در محدوده‌ی ارتعاعی باقی بمانند و در عوض میراگرهای مختلف، ارزی زلزله را جذب می‌کنند. عملکرد مرکزگرایی سیستم‌های گهواره‌ی، تغییرشکل‌های باقیمانده را کاهش می‌دهد یا حذف می‌کند. در این‌گونه سازه‌های که دارای دوره‌ی تناوب اصلی طولانی هستند، با کاهش تناقض‌های مود اول از طریق دستگاه‌های ایالات انرژی،

وقوع حوادث زلزله‌های اخیر نشان داده است که خسارت‌های شدیدی در ساختمان‌هایی که براساس آینین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی اخیر طراحی شده‌اند، ایجاد می‌شود. زلزله‌های اخیر کانتربوری<sup>۱</sup> به تخریب کامل منطقه‌ی اقتصادی مرکزی منجر شدند و بعد از زلزله، به جای تعمیر دریبیش از ۷۰٪ سازه‌ها، تصمیم به تخریب آن‌ها گرفته شد.<sup>[۱]</sup> آینین‌نامه‌ها به منظور ایلاف ارزی زلزله، اجازه‌ی وقوع خسارت‌های بزرگ و تغییرشکل‌های خمیری را به عنانصر اصلی سازه می‌دهند. علاوه بر این، خسارت و خمیری شدن معمولاً با تغییرشکل‌های باقیمانده بزرگ همراه می‌شود که تعمیر آن‌ها را در پایان رویداد لرزه‌ی دشوار یا از نظر اقتصادی گران می‌کند. سیستم‌های جدید مقاوم لرزه‌ی برای کاهش خسارت‌های ساختمان در هنگام زلزله با شدت‌های مختلف، از جمله در

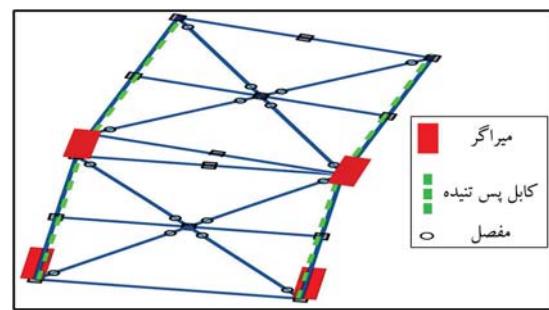
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۹/۱/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۹/۱/۱۴۰۱، پذیرش ۵/۹/۱۴۰۱.

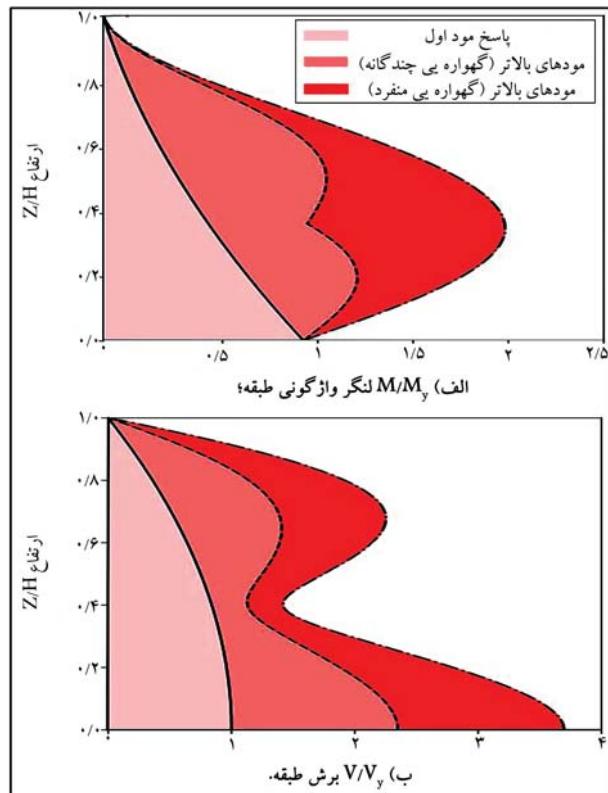
DOI:10.24200/J30.2022.61242.3156

استناد به این مقاله:

رفیعی محمدی، محمد تقی، بروجردان، وحید و محمدی ده‌چشم، اسماعیل (۱۴۰۰). «طراحی بهینه‌ی قاب‌های مهاربندی فولادی دوگهواره‌ی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌ی ثانویه»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ص. ۳۹-۲۰.



شکل ۱. پیکربندی سیستم در گهواره‌بی.



شکل ۲. آثار مود بالاتر در سیستم‌های گهواره‌بی با درنظر گرفتن نیروهای برشی طبقه به صورت نرمال شده و لنگرهای و ازگونی. [۲]

تحلیل مودال اجرا کرد.<sup>[۵]</sup> از قیاس تیر طره برای استخراج برخی معادلات در روش‌های طراحی دیگر نیز استفاده شده است.<sup>[۶]</sup> البته در دیوارهای لاغر گهواره‌بی، رفتار خمی تعیین‌کننده است.<sup>[۷]</sup> پس با درنظر گرفتن ترکیب رفتار برشی و خمی می‌توان دقت روش قیاس تیر طره را بهبود بخشید.<sup>[۸]</sup>

ب) روش بارگذاری معادل<sup>۵</sup> و تحلیل طیفی اصلاح شده<sup>۶</sup> : استیل و ویب (۲۰۱۶)<sup>۶</sup> از معادلات مبتنی بر قیاس تیر طره برخی برای محاسبه‌ی توزیع بار اینرسی مودهای دوم و سوم استفاده کرده‌اند که می‌توانند علاوه بر بارهای جانبی تجویزی آینه‌نامه با اضافه‌ی مقاومت، به عنوان نیروهای استاتیکی به یک مدل کشسان پایه ثابت اضافه شوند. آن‌ها در روش تحلیل طیفی اصلاح شده برای مدل کشسان قاب گهواره‌بی از ۱) نیروهای مود اول مبتنی بر نیروهای لزه‌بی معادل، ۲) نیروهای مود بالاتر مبتنی بر تحلیل طیفی پاسخ، و ۳) شرایط مرزی اصلاح شده استفاده کرده‌اند. هر دو روش در میزان خطای خوبی یا بهتر از روش‌های پیش از خود عمل کرده‌اند.<sup>[۹]</sup>

ج) روش مبتنی بر جایه‌جایی مستقیم توسعه یافته<sup>۷</sup> : رهگذر و رهگذر<sup>۸</sup> (۲۰۲۰)، با توسعه‌ی روش مبتنی بر جایه‌جایی مستقیم، نیروهای مود بالاتر را در سیستم‌های مهاربندی گهواره‌بی تعیین کردن و مقادیر خطای برآورده تلاش‌ها را کاهش دادند.<sup>[۱۰]</sup> د) برهم‌نهی مودال اصلاح شده (زمان دوام)<sup>۹</sup> : روش زمان دوام، شامل برهم‌نهی نیروهای غیرکشسان مود اول با نیروهای کشسان مودهای بالاتر است. مارتبین و همکاران (۲۰۱۹)، روند اخیر را برای قاب مهاربندی فولادی گهواره‌بی اجرا کرده‌اند. در روش زمان دوام از دو ایده‌آل سازی مجزا برای تحلیل نیروهای عضو قاب ناشی از ۱) بارهای ثقلی و نیروهای پس‌تندی، و ۲) آثار بارگذاری زلزله‌ی جانبی استفاده می‌شود. روند پیشنهادی از روش‌های استیل و ویب (۲۰۱۶) به نحوی دقیق‌تر بوده و در روش مذکور، میزان خطای کاهش یافته است.<sup>[۱۱]</sup> روش زمان دوام، بعدها برای سیستم دوگهواره‌بی نیز قابلیت استفاده یافته.<sup>[۱۲]</sup> هر سه روش (ب) الی (د)، قابل اجرا در نرم‌افزارهای تجاری هستند.<sup>[۱۰] [۱۱] [۱۲]</sup> بعضاً با استفاده از مفاهیم مشترک روش‌های ذکر شده، روش طراحی مخصوص سازه‌ی گهواره‌بی نوین، ارائه و ارزیابی شده است.<sup>[۱۳]</sup> روش زمان دوام برای تحلیل و طراحی لزه‌بی سازه‌ها براساس عملکرد استفاده می‌شود. اجرای روش زمان دوام، برای سازه‌های گهواره‌بی نشان داد در مقایسه با روش تاریخچه‌ی زمانی، سرعت و دقت مناسبی دارد. روش اخیر در طراحی بهینه سازه‌های که نیاز به تحلیل‌های مکرر و سنگین دینامیکی دارد، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.<sup>[۱۴]</sup>

از سیستم‌های گهواره‌بی می‌توان برای سازه‌های بلندمرتبه استفاده کرد، که جهت تسکین آثار مود بالاتر به دو مفصل گهواره‌بی نیاز دارند. یافتن محل مناسب مفصل گهواره‌بی به عمل پاسخ زلزله ناشی از آثار مود بالاتر و توزیع مجدد غیرخطی نیروهای داخلی بین صفحات گهواره‌بی، چالش‌برانگیز است. چالش این است که همراه با کاهش تقاضای نیروی لزه‌بی، تغییرسکل‌ها نیز کنترل شوند. لذا مطابق جدول ۱، پژوهشگران در سیستم‌های گهواره‌بی چندگانه به بررسی محل بهینه‌ی مفصل گهواره‌بی پرداخته‌اند. به منظور انتخاب تابع هدف بهینه‌یابی در برخی از پژوهش‌ها، به تقاضاهای برش، لنگر و ازگونی، و جایه‌جایی نسبی پسمند میان طبقه‌بی،<sup>[۱۵]</sup> در برخی دیگر، به جایه‌جایی نسبی پسمند و میزان جذب انرژی سیستم توجه شده است.<sup>[۱۶]</sup> با افزایش تعداد تحلیل‌ها در فرایند بهینه‌یابی ممکن است فقط تابع هدف لنگر و ازگونی ارزیابی شود.<sup>[۱۵]</sup> اولویت انتخاب تابع هدف بهینه‌سازی از میان تقاضاهای لزه‌بی سیستم‌های گهواره‌بی کستر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

قاب مهاربندی فولادی گهواره‌بی در پژوهش حاضر براساس روش زمان

مودهای بالاتر مشارکت نسبتاً بیشتری از پاسخ لزه‌بی کل در مقایسه با سیستم‌های مرسوم دارند. این موضوع باعث می‌شود که نیروهای اعضا سازه، در طول ارتفاع به طور قابل توجهی افزایش یابد.<sup>[۱۷]</sup> مطابق شکل ۲، به عنوان یک روش مؤثر با سازوکار حرکت گهواره‌بی چندگانه، تقاضای مود بالاتر کاهش می‌یابد. این کاهش برای سازه‌های بلندمرتبه مشهودتر است.<sup>[۱۸]</sup>

روش‌های طراحی پیشنهادی باید قادر باشند آثار مود بالاتر و رفتار صحیح سیستم را در نظر بگیرند و همچنین روشی کارا و در عین حال دقیق باشند. روش‌های طراحی پیشنهادی در پژوهش‌های پیشین به این صورت است:

(الف) روش قیاس تیر طره<sup>۲</sup> : ویب و کریستپولوس (۲۰۱۵)<sup>۳</sup>، رفتار سیستم‌های گهواره‌بی را شبیه یک تیر طره‌ی برشی فرض کردن. به منظور برآورده تقاضاهای لزه‌بی، می‌توان از روش‌های فرم بسته<sup>۴</sup> براساس قیاس تیر طره استفاده کرد. عبارت‌های بدست آمده از روش‌های فرم بسته در جدول‌های گستردگی بدون انجام

## جدول ۱. پژوهش‌های انجام شده به منظور یافتن محل بهینه‌ی مفصل گهواره‌بی چندگانه و شکاف مطالعاتی پژوهش حاضر.

عنوانین مورد بررسی/پژوهش‌ها	[۱۶]	[۱۵]	[۱۷، ۱۸]	پژوهش حاضر
بررسی هر طبقه جهت قرارگیری مفصل ثانویه				•
کمینه‌سازی خسارت به اجزاء غیرسازی			•	•
بررسی سیستم با بیش از دو مفصل گهواره‌بی		•	•	•
بررسی اثر نوع شتاب‌نگاشت				•
ارزیابی حساسیت محل قرارگیری مفصل ثانویه				•

پیش‌تئیدگی اولیه و تعداد کابل با استفاده از معادلات ما و همکاران (۲۰۱۱)، [۱۹] به دست می‌آید.

$$k_{PT} = N EPT A_s / L_{PT} \quad (۳)$$

### ۲. تخمین دریفت بهینه

با توجه به شکل ۳، نسبت دریفت بام در تسیلیم ( $\theta_y$ ) از جمع تغییرشکل کشسان قاب و بلندشده‌ی پایه‌ی گهواره‌بی به دست می‌آید. نسبت دریفت بام در بلندشده‌ی اولیه ( $\theta_{up}$ ) با تقسیم جابه‌جایی بام بر ارتفاع سازه در مدل پایه‌ی ثابت قاب گهواره‌بی تحت بار استاتیکی معادل محاسبه می‌شود.  $\theta_{ULR,y}$  یا پرخشنش بلندشده‌ی تسیلیم از تقسیم جابه‌جایی تسیلیم میراگر بر  $X_{ED}$  آن به دست می‌آید.  $M_{up}$  برابر  $M_{ul}$  و نسبت  $M_y$  به  $M_{up}$  برابر  $9/5$  تنظیم می‌شود.  $\theta_y$  مطابق معادله‌ی ۴، [۱۰] محاسبه می‌شود:

$$\theta_y = \theta_{up} \left( \frac{M_y}{M_{up}} \right) + \theta_{ULR,y} \quad (۴)$$

و لنگر واژگونی کلی مطابق معادله‌ی ۵، [۱۰] به دست می‌آید:

$$M(\theta) = M_y + (\theta - \theta_y)(K_{PT} + b_{ED} K_{ED}) \quad (۵)$$

که در آن،  $K_{PT}$  و  $K_{ED}$  در معادله‌ی ۵ سختی لنگری ناشی از  $X_{PT}$  و  $X_{ED}$  هستند و  $b_{ED}$  نسبت پس از تسیلیم میراگر است. به منظور تخمین دریفت بام در رویکرد زمان دوام، یک سیستم SDOF معادل به نمایندگی از قاب گهواره‌بی انتخاب می‌شود. در معادله‌های ۶ و ۷، [۱۰]  $m_i$  و  $h_i$  جرم لرزه‌بی و ارتفاع طبقه‌ی آن،  $n$  تعداد طبقه،  $H_e$  و  $M_e$  نیز ارتفاع و جرم معادل مدل SDOF هستند.

$$H_e = \sum_{i=1}^n m_i h_i \quad (۶)$$

$$M_e = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n m_i h_i \right]^2}{\sum_{i=1}^n m_i h_i} \quad (۷)$$

روند سعی و خطا جهت تخمین اولیه‌ی دریفت بهینه ( $\theta_{MCE}$ ) به این صورت خلاصه می‌شود: [۱۰]

۱. تخمین اولیه،  $\theta_{MCE}$

۲. محاسبه‌ی بیشینه‌ی لنگر واژگونی  $M_{MCE}$  براساس معادله‌ی ۵،

$$K_s = M_{MCE} / \theta_{MCE} \quad (۸)$$

۳. محاسبه‌ی سختی سکانتی  $K_{eff} = \lambda K_s$  که  $\lambda$  برابر  $1/8$  فرض می‌شود،

۴. محاسبه‌ی سختی مؤثر  $K_{eff} = \lambda K_s$  که  $\lambda$  برابر  $1/8$  فرض می‌شود،

دوام طراحی شده است. آثار مودهای بالاتر نیز در روش زمان دوام در فرایند طراحی لحاظ شده است. قاب‌های مورد بررسی دارای تعداد طبقات ۱۲، ۱۸ و ۲۴ بودند و دو بخش گهواره‌بی (سیستم دوگهواره‌بی) داشتند. قاب‌ها به صورت دو بعدی در نرم‌افزار OpenSees مدل شدند و تحت مجموعه‌ی ۲۱ شتاب‌نگاشت که شامل شتاب‌نگاشت‌های: دور از گسل (FF)، نزدیک گسل بدون پالس (NF-No Pulse) و نزدیک گسل با پالس (NF-Pulse) بودند، قرار گرفتند.

به منظور یافتن محل بهینه‌ی مفصل در ارتفاع سازه، مفصل گهواره‌بی ثانویه در طبقات مختلف جایه‌جا می‌شود. بهینه‌یابی با ترکیب اهداف کمینه‌سازی مقداری برش طبقه، لنگر واژگونی طبقه، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جایه‌جایی نسبی طبقه انجام می‌شود که مقادیر مورد بررسی اخیر، به ترتیب به نمایندگی از نیروهای مهاربندها، نیروی‌های محوری ستون‌ها و دو مورد آخر خسارت به اجزاء غیرسازی هستند. حساسیت محل قرارگیری مفصل ثانویه با ارزیابی انحراف معیار استاندارد داده‌ها صورت می‌پذیرد و دید مناسبی به پژوهشگران در انتخاب تابع هدف بهینه‌سازی در سیستم‌های دوگهواره‌بی می‌دهد.

## ۲. روش پژوهش

### ۲.۱. طراحی کابل‌های پس‌تئیده و میراگر جاذب انرژی

در طراحی برهم‌نهی مodal اصلاح شده، ابتدا کابل‌های پس‌تئیده و میراگر جاذب انرژی طراحی می‌شوند و سپس اعضاء قاب با استفاده از روش طراحی ظرفیتی ارائه شده، طراحی می‌شوند. نیروی پس‌تئیدگی اولیه و نیروی تسیلیم در میراگر به ترتیب مطابق معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند: [۱۰]

$$F_{PTi} = \frac{1}{X_{PT}} \left[ \frac{M_u}{\phi} \frac{SC}{1+SC} - X_{D} P_D \right] \quad (۱)$$

$$F_{EDy} = \frac{1}{X_{ED}} \left[ \frac{M_u}{\phi} \times \frac{1}{1+SC} \right] \quad (۲)$$

که در آن،  $F_{PTi}$  نیروی پس‌تئیدگی کابل،  $F_{EDy}$  نیروی میراگر و  $P_D$  بار مرده‌ی اجزاء قاب هستند.  $X_{PT}$ ،  $X_{ED}$  و  $N$  نیز خروج از مرکزیت متناظر آن‌ها هستند. لنگر واژگونی در پایه‌ی قاب ( $M_u$ ) با فرض توزیع نیروی جانبی مشابه با روند نیروی جانبی معادل یا همان روش تحلیل استاتیکی معادل آین نامه‌ی ASCE7 [۱۸] به دست می‌آید.  $SC$  یا نسبت مرکزگردایی برابر با نسبت لنگر بازگرداننده‌ی کابل‌ها و بار تقلیلی به لنگر بازگرداننده‌ی میراگرهاست.

سختی کشسان کابل با توجه به معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود که در آن:  $N$  تعداد کابل،  $E_{PT}$  مدول کشسانی کابل،  $A_s$  سطح مقطع و  $L_{PT}$  طول آن هستند. میران

گهواره‌بی از SRSS<sup>۱۰</sup> اصلاح شده استفاده می‌شود که مطابق معادله‌ی <sup>۹</sup>، <sup>۱۱</sup> می‌باشد:

$$f_{MMS} = \frac{|f_1|}{R_1} + \frac{|f_2|}{R_2} + \sqrt{f_3^2 + \dots + f_m^2} \quad (9)$$

که در آن،  $f_m$  تا  $f_1$  نیروهای مود اول تا  $m$  و  $R_1$  و  $R_2$  ضریب کاهش مودهای اول و دوم هستند. نیروی نهایی اعضا از طریق معادله‌ی <sup>۱۰</sup> می‌باشد:

$$f = (f_D + f_{PT})_{fix} + (f_{MMS})_{rock} \quad (10)$$

که در آن،  $f_D$  و  $f_{PT}$  به ترتیب نیروی ناشی از بار ثقلی و پس‌تنیدگی در مدل پایه‌ی ثابت و  $f_{MMS}$  نیروی مodal ترکیب شده در مدل پایه – گهواره‌بی هستند. ضریب مطابق معادله‌ی <sup>۱۱</sup>، <sup>۱۰</sup> می‌باشد:

$$R_1 = \frac{M_{elastic,1}}{M_{MCE}} \quad (11)$$

که در آن،  $M_{MCE}$  از روند سعی و خطای دریفت بیشینه و  $M_{elastic,1}$  از معادله‌ی <sup>۱۱</sup>، <sup>۱۰</sup> به دست می‌آید:

$$M_{elastic,1} = M_{RSA,1} + M_{PT} \quad (12)$$

که در آن،  $M_{RSA,1}$  تحلیل طیفی پاسخ مود اول در مدل پایه‌ی گهواره‌بی و لنگر  $M_{PT}$  لنگر پس‌تنیدگی اولیه  $M_{PT} = F_{PT} \cdot X_{PT}$  هستند. از آن‌جا که در سیستم دو گهواره‌بی، مود دوم نیز به محدوده‌ی غیرخطی می‌رود؛ جهت محاسبه‌ی ضریب کاهش مود دوم از معادله‌ی <sup>۱۳</sup>، <sup>۱۰</sup> استفاده شده است. فرض بر آن است که مفصل واقع در ارتفاع سازه در مود دوم ازگذار است.

$$R_2 = \frac{M_2}{M_{MCE}} \Big|_{z=z_2} \quad (13)$$

که در آن،  $M_2$  لنگر مود دوم حاصل از قیاس تیر طردی برشی و  $M_{MCE}$  درون‌بایی خطی از  $M_{MCE}$  در محل مفصل گهواره‌بی ثانویه‌ی  $z_2$  است. مطابق معادله‌ی <sup>۱۰</sup>، <sup>۱۱</sup> محاسبه می‌شود؛ که در آن،  $S_a(T) = S_a(T) \cdot 2/3$  شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب  $T$  است و دوره‌ی تناوب مود دوم تیر پایه‌ی مفصلی  $1/3$  فرض می‌شود.  $W_{trib}/g$  سهم جرم کل و  $H$  ارتفاع کل و  $z$  ارتفاع بالای پایه هستند.

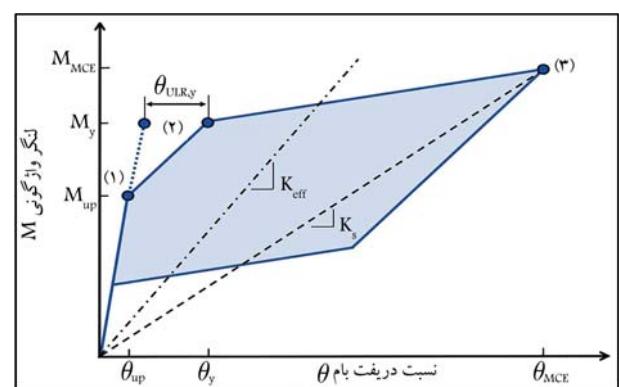
$$M_{r,max(z)} = 0.0282 [S_a(T/3)] \left( \frac{W_{trib}}{g} \right) H \left| \sin 4/49 \left( \frac{z}{H} \right) + 0.976 \left( \frac{z}{H} \right) \right| \quad (14)$$

همچنین،  $M_{MCE}$  در محل مفصل مطابق معادله‌ی <sup>۱۵</sup> می‌باشد:

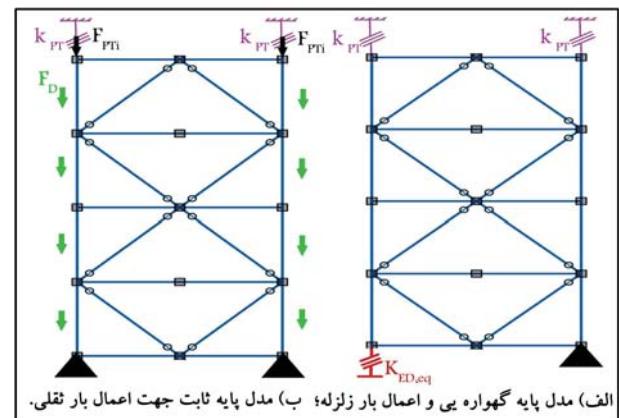
$$M_{MCE}(z_2) = M_{MCE}(1 - \frac{z_2}{H}) \quad (15)$$

#### ۴.۲. مدل‌های عددی بررسی شده

ساختمان مورد مطالعه، <sup>۱۰</sup> دارای ارتفاع هر طبقه برابر با  $4/57$  و با دهانه‌های  $9/14$  متری بوده است. وزن موثر لرزه‌بی طبقات و بام به ترتیب برابر با  $9857$  و  $7588$  کیلونیون بوده است. پلان ساختمان موردنظر در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، چهار قاب گهواره‌بی در هر راستا وجود دارد. در پژوهش حاضر، یکی از قاب‌ها با سهم بار ناشی از آثار P-Delta بررسی شده است. نمای یکی از قاب‌های بررسی



شکل ۳. رفتار نیرو - تغییرشکل قاب مهاربندی گهواره‌بی. <sup>[۱۰]</sup>



شکل ۴. مدل طراحی به روش زمان دوام.

۵. محاسبه‌ی سختی مؤثر  $k_e = K_{eff}/H_e$ ،  $SDOF$

۶. به دست آوردن دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم  $T_{SDOF}$  از رابطه‌ی  $2\pi\sqrt{M_e/k_e}$

۷. محاسبه‌ی مجدد دریفت بیشینه براساس دوره‌ی تناوب طبیعی و طیف پاسخ جایه‌جایی  $\theta_{MCE}^* = S_d(T_{SDOF})/H_e$

۸. تکرار مجدد مراحل ۱ الی ۷ تا همگرایی  $10^{\circ}$  تا  $10^{\circ}$   $|\theta_{MCE}^* - \theta_{MCE}|$

### ۳.۲. طراحی ظرفیتی مقاطع قاب به روش برهم‌نهی مodal اصلاح

شده

به منظور برآورده تقادسی لرزه‌بی در قاب مهاربندی فولادی با دو مفصل گهواره‌بی از دو مدل سازه‌بی مجزا استفاده می‌شود که شامل: ۱) اعمال بارهای ثقلی و نیروهای پس‌تنیدگی، و ۲) اعمال بار زلزله هستند. با توجه به شکل ۴، مدل (ب) تکیه‌گاه پایه‌ی ثابت دارد؛ در حالی که مدل (الف) یک تکیه‌گاه ستون جهت حرکت گهواره‌بی برداشته شده است. کابل و میراگر در هر دو مدل، توسط فنرهای معادل به تکیه‌گاه‌ها متصل باقی می‌مانند. مفصل ثانویه در میانه‌ی ارتفاع نیز با یک رابط خطی مدل می‌شود. سختی فنر کابل برابر  $k_{PT}$  و سختی فنر میراگر مطابق معادله‌ی <sup>۸</sup>، <sup>۱۰</sup> محاسبه می‌شود.

$$k_{ED,eq} = \frac{K_{eff} - K_{PT}}{X_{ED}^*} \quad (8)$$

فقط مودهای اول و دوم در قاب مهاربندی فولادی با دو مفصل گهواره‌بی به محدوده‌ی غیرخطی می‌روند؛ از این رو، جهت ترکیب مقادیر مودال در مدل

## جدول ۲. مشخصات طراحی کابل و میراگر.

طبقات / پارامترها	۲۴	۱۸	۱۲
$M_u(kN.m)$	۱۶۳۶۰.۸	۱۱۲۳۸۲	۶۲۷۹۳
$P_D(kN)$	۸۰۰	۶۰۰	۴۰۰
$F_{PTi}(kN)$	۱۱۱۲۳	۷۵۹۷	۴۱۸۰
$F_{EDy}(kN)$	۷۹۵۶	۵۴۶۵	۳۰۵۳
$k_{PT}(kN/mm)$	۱۵/۷۷	۱۶/۰۹	۱۶/۷۵
$k_{ED}(kN/mm)$	۱۰۵۹/۹	۱۰۷۱/۵۲	۶۰۳

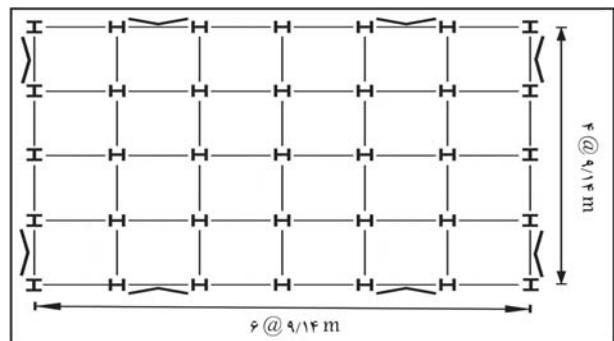
## جدول ۳. پارامترهای طراحی در روش زمان دوام.

طبقات / پارامترها	۲۴	۱۸	۱۲
$\theta_y$	۱/۱۳	۰/۶۹	۰/۳۷۲
$\theta_{MCE}$	۲/۰۷	۲	۲/۰۱
$M_{MCE}(kN.m)$	۲۲۲۷۰.۸	۱۸۹۱۹۷	۱۲۵۷۷۶
$k_{ED,eq}(kN/mm)$	۲۳۷/۳	۱۸۸/۳	۱۱۷/۹۶
$R_1$	۱/۶	۱/۸	۱/۷۷
$R_2$	۲/۵۹	۱/۸۷	۱/۲۴

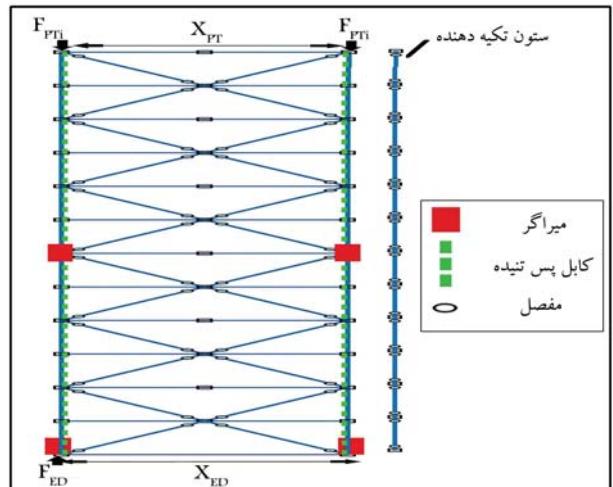
طراحی شده است. نسبت مرکزگرایی در طراحی برابر با  $1/5$  بدين معناست که لنگر بازگردنده کابل ها و بار تقلیلی،  $1/5$  برابر لنگر بازگردنده میراگرهاست. دورهی تناوب تجربی سازه های مذکور، برابر با حد فاصل دیوار بر بشی بتن مسلح و قاب واگرا لحاظ شده است. همچنین فرض شده است که قاب گهواره بی، سهم وزنی از ساختمان متحمل نمی شود (بدون بار تقلیلی). میراگر انتخابی از نوع فیوز پروانه بی شکل فولادی با مدول کشسانی  $200$  گیگاپاسکال، تنش تسلیم  $345$  مگاپاسکال، جابه جایی تسلیم  $1/5$  میلی متر و نسبت پس از تسلیم  $5/4$  بوده است. کابل مورد استفاده دارای  $7$  سیم با قطر  $15/2$  میلی متر مربع، تنش تسلیم  $1657$  مگاپاسکال، تنش نهایی  $1860$  مگاپاسکال و مدول کشسانی  $193$  گیگاپاسکال بوده است. همچنین طول کابل به اندازه می، ارتفاع قاب بوده است. در جدول ۲، مشخصات طراحی کابل و میراگر در روش زمان دوام ذکر شده و در آن  $k_{ED}$  سختی کشسان میراگر است. پس از تعیین مشخصات کابل ها و فیوزهای جاذب اتزی، مقاطع مهاربند و ستون برای نیروی محوری طراحی می شوند. همچنین در پژوهش حاضر، پارامترهای روش طراحی زمان دوام مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده اند.

## ۲.۵. فرایند مدل سازی عددی در نرم افزار OpenSees

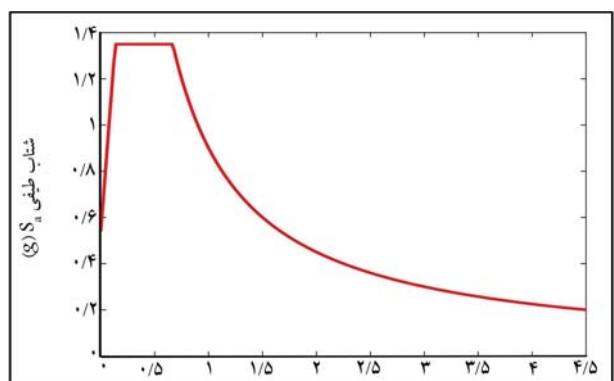
به منظور مدل کردن آثار P-Delta با روش P-Delta، یک ستون تکیه دهنده در کنار قاب مدل می شود؛ که گره آن با قاب در راستای  $X$  جابه جایی یکسان دارد و در اتصال ستون های P-Delta به هم از فنر با سختی ناچیز استفاده می شود. المان ستون از جنس تیر - ستون کشسان و دارای سطح مقطع و ممان اینرسی  $D$  برابر ستون قاب است. اعضاء قاب از آن جهت که در محدوده کشسان باقی میمانند، برای تیرها و ستون های قاب از المان تیر - ستون کشسان و برای مهاربند از المان corot Truss و مصالح کشسان استفاده شده است. تعریف کابل پس تیله با المان corot Truss در پایه متصل می شود که در راستای جابه جایی دورانی و افقی مقید است. سپس گره پایه به گره بی کیردار با استفاده المان بدون طول gap فقط کششی با سختی زیاد متصل می شود تا کابل فقط در کشش عمل کند. در مدل سازی میراگر از المان



شکل ۵. پلان ساختمان بررسی شده.



شکل ۶. پیکربندی قاب مهاربندی گهواره بی به همراه نیروهای وارد بر آن.



شکل ۷. طیف طراحی سطح MCE برای تحلیل طیفی در روش زمان دوام.

شده در شکل ۶ مشاهده می شود؛ که مطابق آن، در پیکربندی قاب مورد بررسی، میراگرها و کابل های پس تیله در طرفین قاب قرار دارند. به منظور مدل کردن آثار P-Delta با روش P-Delta، یک ستون تکیه دهنده در کنار قاب مدل شده است. محل سازه مورد نظر در جنوب سانفراسیسکو<sup>۱۱</sup> با خاک کلاس D است. شتاب طیفی طرح ASCE7<sup>[۱۲]</sup> برای دورهی تناوب کوتاه و یک ثانیه به ترتیب  $S_{ds} = ۰/۶g$  و  $S_{d1} = ۰/۹g$  در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، طیف طراحی روش زمان دوام مطابق آین نامه ASCE7<sup>[۱۳]</sup> برای موقعیت مکانی MCE مشاهده می شود. قاب مورد نظر برای نسبت مرکزگرایی  $5/1$  و ضریب رفتار  $R = 8$

جدول ۴. مجموعه‌ی ۷ شتاب نگاشت نزدیک گسل با پالس.

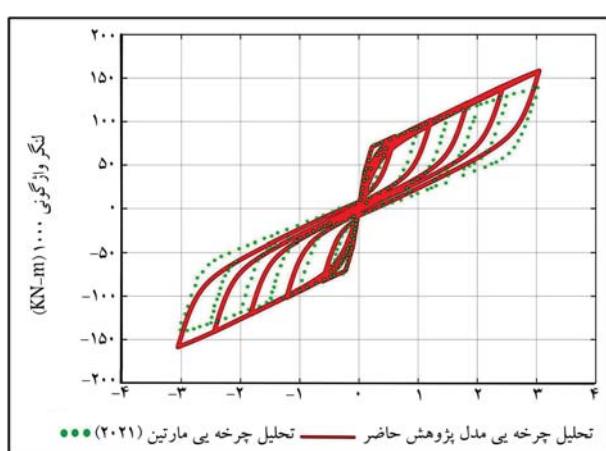
PGA max (g)	RJb (km)	Mw	ایستگاه	سال	زلزله	شماره
۰/۴۵	۰	۶/۵۳	El Centro Array #۶	۱۹۷۹	Imperial Valley-۰۶	۱
۰/۴۷	۰/۵۶	۶/۵۳	El Centro Array #۷	۱۹۷۹	Imperial Valley-۰۶	۲
۰/۴۳	۰/۹۵	۶/۵۴	Parachute Test Site	۱۹۸۷	Superstition Hills-۰۲	۳
۰/۵	۰	۶/۶۹	Erzincan	۱۹۹۲	Erzincan-Turkey	۴
۰/۸۷	۰	۶/۶۹	Rinaldi Receiving Sta	۱۹۹۴	Northridge-۰۱	۵
۰/۷۹	۰/۵۷	۷/۶۲	TCU-۶۵	۱۹۹۹	Chi-Chi-Taiwan	۶
۰/۵۱	۰	۷/۱۴	Duzce	۱۹۹۹	Duzce-Turkey	۷

جدول ۵. مجموعه‌ی ۷ شتاب نگاشت نزدیک گسل بدون پالس.

PGA max (g)	RJb (km)	Mw	ایستگاه	سال	زلزله	شماره
۰/۷۳	۲/۹۲	۶/۸	Karakyr	۱۹۷۶	Gazli-USSR	۱
۰/۷۷	۰/۴۴	۶/۵۳	Bonds Corner	۱۹۷۹	Imperial Valley-۰۶	۲
۰/۲۷	۷/۲۹	۶/۵۳	Chihuahua	۱۹۷۹	Imperial Valley-۰۶	۳
۱/۱۹	۲/۴۸	۶/۶۷	Site ۱	۱۹۸۵	Nahanni-Canada	۴
۰/۹۳	۰	۶/۶۹	LA-Sepulveda VA Hospital	۱۹۹۴	Northridge-۰۱	۵
۰/۴۶	۰	۶/۶۹	Northridge ۱۷۶۴۵ Saticoy St	۱۹۹۴	Northridge-۰۱	۶
۰/۳۲	۱/۳۸	۷/۵۱	Yarimca	۱۹۹۹	Kocaeli-Turkey	۷

جدول ۶. مجموعه‌ی ۷ شتاب نگاشت دور از گسل.

PGA max (g)	RJb (km)	Mw	ایستگاه	سال	زلزله	شماره
۰/۵۲	۹/۴	۶/۷	Beverly Hills-Mulhol	۱۹۹۴	Northridge	۱
۰/۴۸	۱۱/۴	۶/۷	Canyon Country-WLC	۱۹۹۴	Northridge	۲
۰/۸۲	۱۲	۷/۱	Bolu	۱۹۹۹	Duzce, Turkey	۳
۰/۳۵	۲۲	۶/۵	Delta	۱۹۷۹	Imperial Valley	۴
۰/۳۸	۱۲/۵	۶/۵	El Centro Array #۱۱	۱۹۷۹	Imperial Valley	۵
۰/۲۴	۱۹/۱	۶/۹	Shin-Osaka	۱۹۹۵	Kobe, Japan	۶
۰/۳۶	۱۳/۶	۷/۵	Duzce	۱۹۹۹	Kocaeli, Turkey	۷



بدون طول در راستای Y استفاده می‌شود. المان میراگر از ترکیب مصالح gap فقط فشاری با سختی زیاد و steel<sup>۰۲</sup> به صورت سری ساخته می‌شود، تا المان کرنش فشاری نداشته باشد. همچنین برای دوران و جابه‌جایی افقی پایه‌ی قاب، از اتصال المان بدون طول gap فقط فشاری استفاده می‌شود.

به منظور اطمینان و راستی آزمایی مدل ساخته شده، یک قاب دوگهواره‌ی ۱۲ طبقه مطابق پژوهش مارتین و همکارش (۲۰۲۱)<sup>[۴]</sup> در نرم‌افزار OpenSees ساخته شده و تحت تحلیل چرخه‌ی پوش‌آور<sup>۱۲</sup> قرار گرفته و سپس نمودار نیرو- دریفت با مدل مذکور ترسیم شده است. در شکل ۸، نیز نمودار رفتار پرچمی شکل حاصل از پژوهش حاضر و نوشتار مرجع (مارتین و همکارش)،<sup>[۴]</sup> مشاهده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده‌ی دقیق مدل مناسب مدل سازی پژوهش حاضر در نرم‌افزار OpenSees است.

## ۶.۲. شتاب نگاشت‌های لرزه‌یی بررسی شده

مطابق جدول‌های ۴ الی ۶، مجموعاً ۲۱ رکورد از شتاب نگاشت‌های دور از گسل، ۱۲ طبقه‌یی پژوهش حاضر و نوشتار مرجع<sup>[۴]</sup> نزدیک گسل با پالس براساس دستورالعمل FEMAP ۶۹۵<sup>[۲۰]</sup> دریفت

پالس به طورکلی متناسب بوده و ویژگی مذکور در شتاب نگاشت‌های دیگر مشاهده نشده است. همچنین این همبستگی در نتایج برش و لنگر واژگونی در تمامی حالت‌ها به نحوی مشاهده می‌شود. در شتاب نگاشت‌های دور از گسل و نزدیک گسل، کاهش برش و لنگر واژگونی می‌تواند به افزایش جایه‌جایی نسبی طبقه منجر شود. از این رو کنترل جایه‌جایی نسبی طبقه در سازه‌ی دوگهواره‌ی امری ضروری است.

انتخاب شده‌اند. به ازاء هر جفت رکورد، شتاب نگاشتی با بیشینه‌ی PGA انتخاب شده است. نسبت طیف پاسخ آین نامه به طیف هر رکورد در سه نقطه‌ی دوره‌ی تناوب ۰/۲T، T و ۳T محسابه<sup>[۴]</sup> و سپس میانگین سه ضریب به عنوان ضریب مقیاس رکورد معروفی و اعمال شده است. سه نقطه‌ی انتخابی، طیف رکورد را در دوره‌های تناوب کوتاه و بلند سازه با طیف آین نامه مقیاس می‌کند. بیشینه‌ی ضریب مقیاس برای هر رکورد برابر ۳ تنظیم شده است، تا نماینده‌ی مناسبی از حرکت زمین باشد.<sup>[۴]</sup>

### ۳. بررسی حساسیت محل قرارگیری مفصل ثانویه

مجموع مقادیر برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جایه‌جایی نسبی تمام طبقات به ازاء محل قرارگیری مفصل به دست می‌آید. کمترین مقدار مجموع محاسبه شده، بینگر بهینه‌ترین حالت قرارگیری مفصل ثانویه است؛ سپس سایر محل‌های قرارگیری مفصل ثانویه نسبت به آن طبقه‌ی بهینه ارزیابی و درصد اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. با توجه به جدول‌های ۸ الی ۱۱، انحراف معیار جدول ۸. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع لنگر واژگونی طبقات با بهینه‌ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت‌ها			
۲۴	۱۸	۱۲	
۱۱/۸۹	۱۶/۷۱	۲۲/۲۳	FF
۶/۲۶	۱۰/۶۱	۲۰/۱۰	NF-No Pulse
۱۰/۹۶	۱۱/۹۱	۹/۹۷	NF-Pulse

جدول ۹. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع برش طبقات با بهینه‌ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت‌ها			
۲۴	۱۸	۱۲	
۶/۹۵	۱۱/۶۴	۱۶/۴۲	FF
۴/۴۶	۶/۷۴	۱۲/۸۶	NF-No Pulse
۷/۱۵	۹/۶	۸/۷۷	NF-Pulse

جدول ۱۰. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع بیشینه‌ی شتاب طبقات با بهینه‌ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت‌ها			
۲۴	۱۸	۱۲	
۱/۹۸	۴/۱۶	۷/۵۲	FF
۱/۶۵	۲/۵۱	۵/۴۷	NF-No Pulse
۲/۹۴	۴/۱۸	۶/۹۶	NF-Pulse

جدول ۱۱. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع بیشینه‌ی جایه‌جایی نسبی طبقه با بهینه‌ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت‌ها			
۲۴	۱۸	۱۲	
۳/۱۷	۳/۵۶	۱۰/۲۳	FF
۲/۸۷	۳/۴	۷/۴۳	NF-No Pulse
۲/۸۱	۲/۹	۲/۱۵	NF-Pulse

انتخاب شده‌اند. به ازاء هر جفت رکورد، شتاب نگاشتی با بیشینه‌ی PGA انتخاب شده است. نسبت طیف پاسخ آین نامه به طیف هر رکورد در سه نقطه‌ی دوره‌ی تناوب ۰/۲T، T و ۳T محسابه<sup>[۴]</sup> و سپس میانگین سه ضریب به عنوان ضریب مقیاس رکورد معروفی و اعمال شده است. سه نقطه‌ی انتخابی، طیف رکورد را در دوره‌های تناوب کوتاه و بلند سازه با طیف آین نامه مقیاس می‌کند. بیشینه‌ی ضریب مقیاس برای هر رکورد برابر ۳ تنظیم شده است، تا نماینده‌ی مناسبی از حرکت زمین باشد.<sup>[۴]</sup>

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. یافتن طبقه‌ی بهینه‌ی جهت قرارگیری مفصل ثانویه

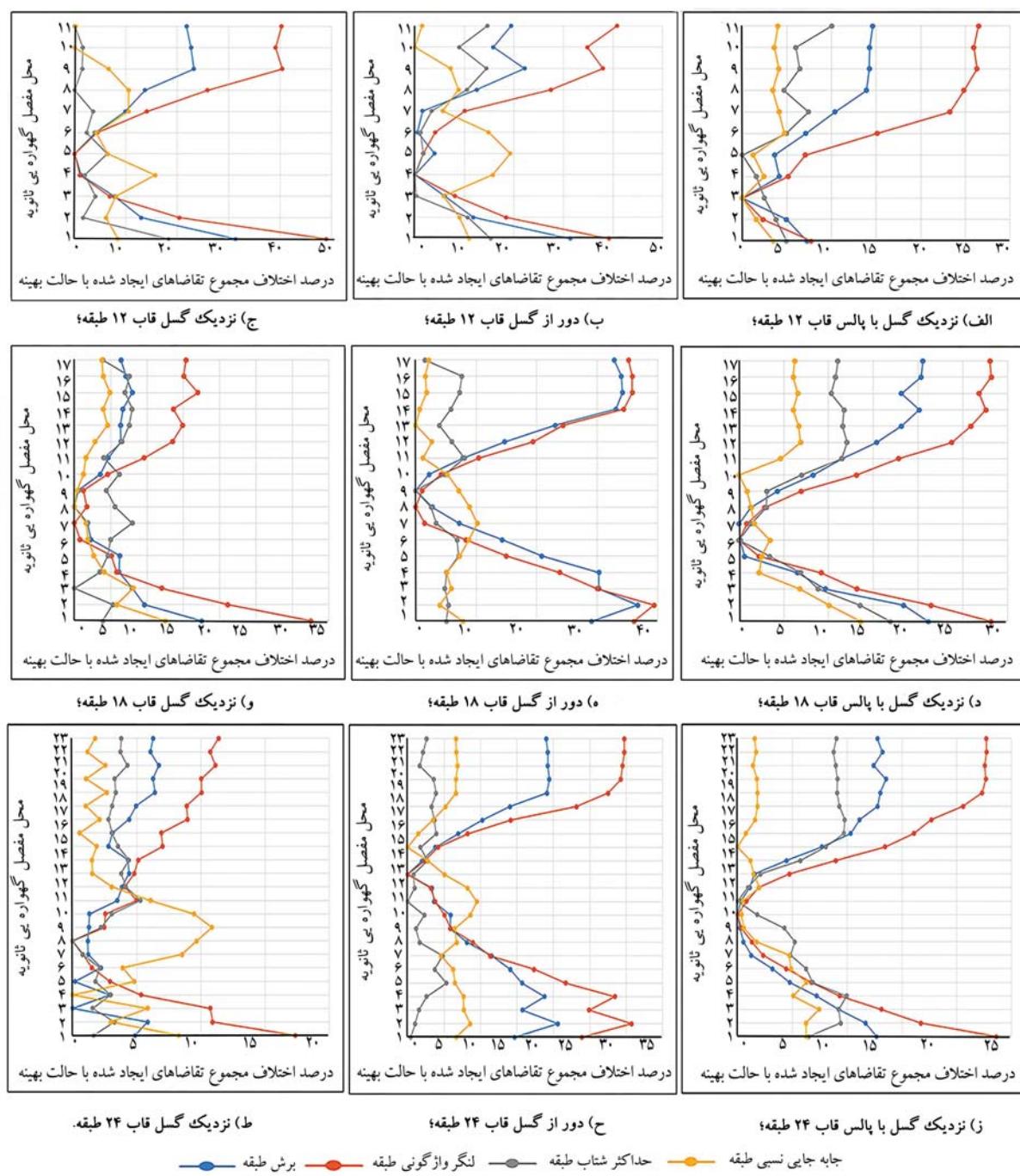
تمامی شتاب نگاشت‌های بیان شده در قسمت قبلی در سطح MCE به قاب گهواره‌ی اعمال شده و محل مفصل دوم از بالای طبقه‌ی اول (طبقه‌ی دوم) تا بالای طبقه‌ی ماقبل آخر (طبقه‌ی بام) تغییر کرده است. بیشینه‌ی قدر مطلق مقادیر برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جایه‌جایی نسبی برای هر طبقه‌ی خروجی گرفته شده است. میانه‌ی مقادیر به ازاء هر نوع شتاب نگاشت محاسبه شده است. مجموع مقادیر برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جایه‌جایی نسبی تمام طبقات به ازاء محل قرارگیری مفصل به دست آمده است. کمترین مقدار مجموع محاسبه شده، بینگر بهینه‌ترین حالت قرارگیری مفصل ثانویه است؛ سپس سایر محل‌های قرارگیری مفصل ثانویه نسبت به آن طبقه‌ی بهینه، ارزیابی و درصد اختلاف آن‌ها به دست آمده است. می‌توان گفت محل قرارگیری بهینه‌ی مفصل، طبقاتی هستند که میانگین درصد اختلاف برش و لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه، و جایه‌جایی نسبی آن‌ها با بهینه‌ترین حالت کمتر از ۵٪ باشد.

مطابق جدول ۷، با افزایش تعداد طبقات، نماینده‌های طبقات بهینه افزایش یافته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قرار دادن مفصل ثانویه در میانه‌ی ارتفاع هر قاب در اغلب موارد هر چهار تقاضای لرزه‌ی را به میزان کمینه رسانده است که نتیجه‌ی به دست آمده مطابق با فرض مرسوم نوشتارها در طراحی سیستم‌های با دو مفصل گهواره‌ی است.<sup>[۱۶،۱۵،۲]</sup> اگرچه در قاب ۱۲ طبقه در شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس این موضوع صادق نیست و مفصل ثانویه تماشی به قرارگیری در نیمه‌ی پایین قاب دارد. در این حالت تقاضای لنگر واژگونی قاب ۱۲ طبقه، ۱۵٪ با حالت بهینه اختلاف دارد. قرار دادن مفصل ثانویه در ۴۰٪ ارتفاع در اغلب حالت‌ها، هر چهار تقاضای لرزه‌ی را به میزان کمینه می‌رساند.

در شکل ۹، درصد اختلاف مجموع هر یک از تقاضاهای با بهینه‌ترین حالت‌شان مشاهده می‌شود که مطابق آن، کاهش یا افزایش درصد اختلاف با حالت بهینه برای هر چهار تقاضای لرزه‌ی در هر سه قاب در شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با

جدول ۷. درصد ارتفاع بهینه‌ی جهت قرارگیری مفصل ثانویه به ازاء در نظر گرفتن اختلاف بیشینه‌ی ۵ درصدی میانگین درصد هر چهار تقاضای لرزه‌ی با بهینه‌ترین حالت.

درصد ارتفاع/شتاب نگاشت‌ها			
۲۴	۱۸	۱۲	
۳۷-۶۲	۴۴-۵۶	۳۳-۲۵	FF
۱۲-۷۵	۲۲-۶۱	۳۳-۵۰	NF-No Pulse
۲۵-۵۴	۲۸-۵۰	۱۷-۴۲	NF-Pulse



شکل ۹. درصد اختلاف مجموع تقاضاهای ایجاد شده با حالت بهینه به ازاء محل مفصل گهواره‌ی ثانویه تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف لرزه‌ی MCE و قاب‌های با طبقات مختلف.

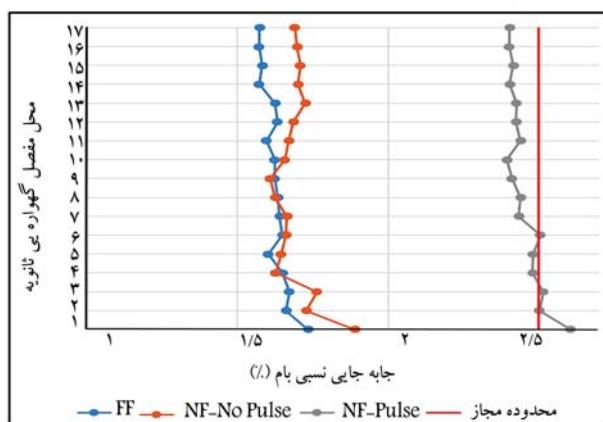
در شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse نمی‌تواند آثار مود بالاتر را به طور چشمگیری کاهش دهد. تقاضای لیگر واژگونی طبقه از میان تقاضاهای بیشترین حساسیت را دارد. به طورکلی، با افزایش تعداد طبقات، میزان حساسیت به محل قرارگیری مفصل کاهش می‌یابد.

**۳.۳. بیشینه‌ی جایه‌جایی نسبی پسماند میان طبقه**  
در جدول ۱۲، میانه‌ی جایه‌جایی‌های نسبی پسماند میان طبقه‌ی به ازاء رکوردهای

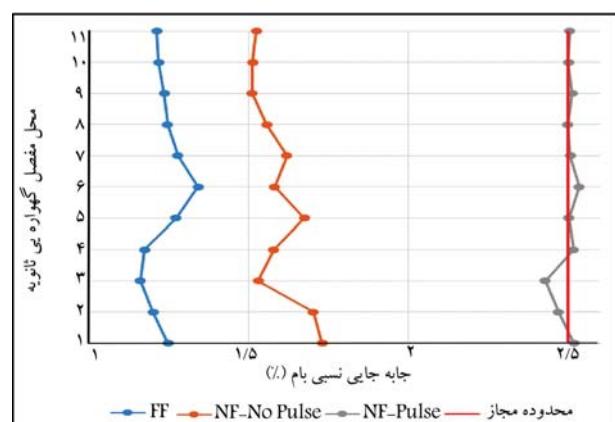
استاندارد این درصدهای اختلاف به ازاء هر نوع شتاب‌نگاشت در سطح محسوبه می‌شود. سپس از ۷ انحراف معیار استاندارد هر دسته میانگین‌گیری می‌شود. مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت با انحراف معیار استاندارد بیشتر بیانگر حساسیت آن مجموعه در قرارگیری محل مفصل ثانویه است؛ به عبارتی با افزایش انحراف استاندارد آن قاب تحت رکوردهای مدنظر، رفتار قابل پیش‌بینی ندارد و دارای پیچیدگی است. به طورکلی در هر چهار تقاضا، شتاب‌نگاشت‌های FF، بیشترین حساسیت و شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse، کمترین حساسیت را به محل قرارگیری مفصل ثانویه دارند. اگرچه محمدی و بروجردیان (۲۰۲۲)،<sup>[۱۷]</sup> نشان دادند که سازه‌ی دوگهواره‌ی

جدول ۱۲. بیشینه‌ی درصد جابه‌جایی نسبی پسماند میان طبقه.

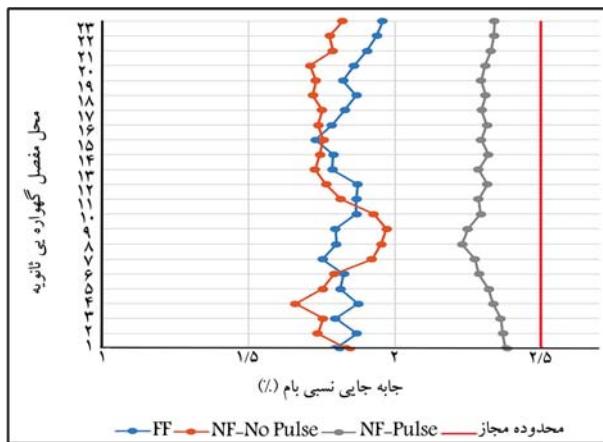
طبقات/شتاب نگاشت	۲۴	۱۸	۱۲
	۰/۱۳۹۶	۰/۱۰۶	۰/۰۳۴
	(طبقه‌ی ۱۹ مفصل در طبقه‌ی ۷)	(طبقه‌ی ۱۶ مفصل در طبقه‌ی ۳)	(طبقه‌ی ۱۱ مفصل در طبقه‌ی ۷)
	۰/۱۸۱۵	۰/۱۰۶۸	۰/۰۴۲۶
NF-No Pulse	(طبقه‌ی ۱۶ مفصل در طبقه‌ی ۱۱)	(طبقه‌ی ۱۸ مفصل در طبقه‌ی ۱)	
	۰/۲۱۶۴	۰/۱۰۵۴	۰/۰۴۲۳
NF-Pulse	(طبقه‌ی ۱۷ مفصل در طبقه‌ی ۱۰)	(طبقه‌ی ۱۹ مفصل در طبقه‌ی ۷)	(طبقه‌ی ۱۱ مفصل در طبقه‌ی ۱۰)



شکل ۱۱. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۱۸ طبقه.



شکل ۱۲. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۱۲ طبقه.



شکل ۱۳. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۲۴ طبقه.

۱۲ طبقه در حالت قرارگیری مفصل دوم در طبقه‌ی ۱/۲، ۶٪ اختلاف با حد مجاز و در قاب ۱۸ طبقه در حالت قرارگیری در طبقه‌ی ۱، ۴٪ اختلاف با حد مجاز دارد.

### ۵.۳. بیشینه‌ی تنش در کابل‌ها

میانه‌ی بیشینه‌ی تنش کابل پس تنیده به ازاء هر مجموعه‌ی شتاب نگاشت در سطح MCE محاسبه و ملاحظه شد که در تمامی حالت‌ها، تنش تسلیم کابل کمتر بوده

مختلف بررسی شده در سطح MCE ارائه شده است. بیشینه‌ی مقدار در طول تمام طبقات و تمام محل‌های قرارگیری مفصل ثانویه برای هر مجموعه‌ی شتاب نگاشت به دست آمده است. با توجه به توصیه‌ی ۰/۲٪ قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه ساختمان با جابه‌جایی نسبی پسماند کمتر از ۰/۲٪ می‌باشد. در قاب ۲۴ طبقه، فقط در حالت قرارگیری مفصل در طبقه‌ی ۱۰ و تحت شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس در سه نقطه از حد مجاز بیشتر بوده است. با توجه به آنکه بیشینه‌ی اختلاف با حد مجاز فقط ۰/۸٪ و سطح زلزله‌ی موردنظری MCE بوده است، این موضوع عادی است. جابه‌جایی‌های نسبی پسماند تحت شتاب نگاشت‌های دور از گسل، مقدار کمتری نسبت به سایر رکوردهای لرزه‌ی دارند.

### ۴.۳. جابه‌جایی نسبی بام

مطابق شکل ۱۰ الی ۱۲، برای هر مجموعه‌ی ۷ شتاب نگاشتی، میانه‌ی جابه‌جایی نسبی بام به دست آمده است. شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس، بیشترین جابه‌جایی نسبی بام را دارند. حد مجاز جابه‌جایی نسبی بام ۰/۲٪ تحت رکوردهای MCE در نظر گرفته شده است.<sup>[۲]</sup> این موضوع در شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس در بعضی محل‌های قرارگیری مفصل نقض می‌شود. اختلاف ۱ درصدی با این حد مجاز شمرده می‌شود. در شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس قاب

اصلاح شده طراحی و آثار مود بالاتر در روند طراحی لحاظ شده است. سپس قاب های مذکور تحت مجموعه ای شتاب نگاشت های دور از گسل (FF)، نزدیک گسل بدون پالس (NF-No Pulse)، و نزدیک گسل با پالس (NF-Pulse) و در سطح زلزله ای MCE قرار گرفته اند. محل مفصل گهواره بی ثانویه در طول ارتفاع سازه، طبقه به طبقه تغییر یافته است تا محل بهینه ای مفصل جهت کمینه سازی توانمند برش، لنگر و ازگونی، بیشینه ای شتاب طبقه و جابه جایی نسبی طبقه به دست آید. نتایج حاصل به این شرح هستند:

-- قرارگیری مفصل ثانویه در ۴۰٪ ارتفاع در اغلب موارد باعث کمینه شدن برش، لنگر و ازگونی، بیشینه ای شتاب طبقه، و جابه جایی نسبی طبقه شده است. فرض مرسوم قراردادن مفصل ثانویه در میانه ای ارتفاع برای قاب ۱۲ طبقه در شتاب نگاشت های NF-Pulse، صادق نیست. تقاضای لنگر و ازگونی قاب ۱۲ طبقه در این حالت ۱۵٪ با حالت بهینه اختلاف داشته است.

-- فقط در شتاب نگاشت های NF-Pulse در هر سه قاب، کاهش یا افزایش درصد اختلاف با حالت بهینه ای هر چهار تقاضای لرزه بی، الگویی مشابه دارد و می توان اذعان داشت بهینه شدن یک تقاضا، سبب بهینه شدن سه تقاضای دیگر می شود. همچنین این همبستگی در نتایج برش و لنگر و ازگونی در تمامی حالت ها به نحوی مشاهده می شود.

-- در شتاب نگاشت های دور از گسل و نزدیک گسل، کاهش برش و لنگر و ازگونی می تواند به افزایش جابه جایی نسبی طبقه منجر شود.

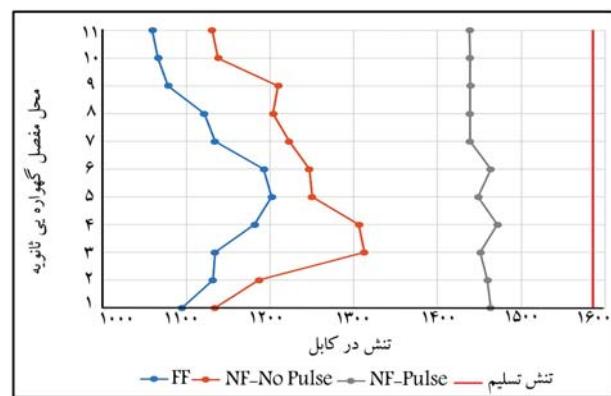
-- به طور کلی در هر سه تقاضا، شتاب نگاشت های FF بیشترین حساسیت و شتاب نگاشت های NF-Pulse کمترین حساسیت را به محل قرارگیری مفصل ثانویه دارند. همچنین لنگر و ازگونی در میان تقاضاها، بیشترین حساسیت را برای محل مفصل ثانویه دارد. به طور کلی با افزایش تعداد طبقات، میزان حساسیت به محل قرارگیری مفصل کاهش می یابد.

-- با توجه به حساسیت بیشتر لنگر و ازگونی به محل قرارگیری مفصل ثانویه و همچنین همبستگی آن با برش طبقه، می توان اذعان داشت که انتخاب لنگر و ازگونی به عنوان تابع هدف بهینه سازی نسبت به سه تقاضای دیگر ارجحیت دارد. اگرچه این انتخاب می تواند به افزایش جابه جایی نسبی طبقه منجر شود.

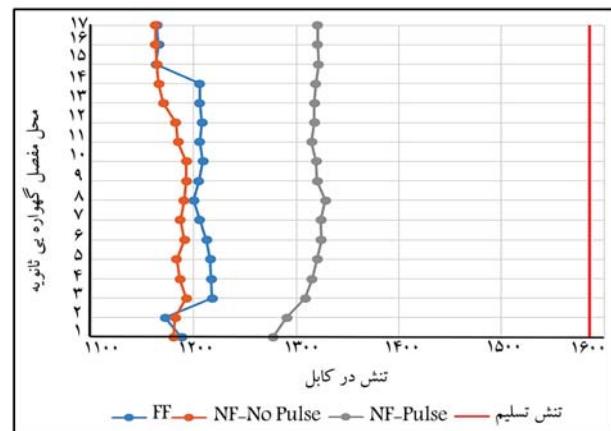
-- اغلب مقادیر جابه جایی نسبی پسمند میان طبقه بی از حد مجاز ۰/۲٪ کمتر است. در قاب ۲۴ طبقه، فقط در حالت قرارگیری مفصل در طبقه دهم و در شتاب نگاشت NF-Pulse در سه نقطه از حد مجاز بیشتر بوده است. با توجه به آنکه بیشینه ای اختلاف با حد مجاز فقط ۰/۸٪ و سطح زلزله ای مورد بررسی MCE بوده است، که این موضوع عادی است. این جابه جایی با افزایش ارتفاع سازه، افزایش می یابد. سازه ها تحت شتاب نگاشت های FF، دچار مقادیر کمتر جابه جایی نسبی پسمند میان طبقه بی می شوند.

-- شتاب نگاشت های NF-Pulse بیشترین جابه جایی نسبی بام را دارند. فقط در دو مورد از محل های قرارگیری مفصل از حد مجاز ۰/۵٪، بیشینه ای ۰/۴٪ فراتر رفته است؛ که این موضوع دقت بالای روش طراحی انتخابی را نشان می دهد.

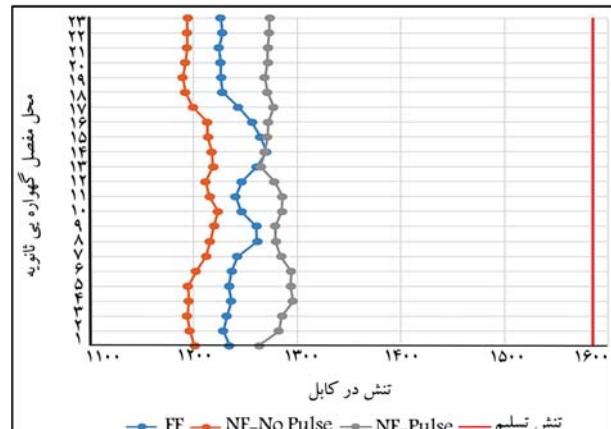
-- ملاحظه شد که تنش کابل در تمام حالت ها از تنش تسليم کمتر بوده است. بیشینه ای تنش برای تمامی قاب ها در شتاب نگاشت های NF-Pulse اتفاق افتاده است.



شکل ۱۳. بیشینه ای تنش در کابل پس تنبیه (مگاپاسگال) قاب ۱۲ طبقه.



شکل ۱۴. بیشینه ای تنش در کابل پس تنبیه (مگاپاسگال) قاب ۱۸ طبقه.



شکل ۱۵. بیشینه ای تنش در کابل پس تنبیه (مگاپاسگال) قاب ۲۴ طبقه.

است. همچنین بیشینه ای تنش برای تمامی قاب ها در شتاب نگاشت های نزدیک گسل با پالس اتفاق افتاده است (شکل های ۱۳ الی ۱۵).

#### ۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، قاب مهاربندی فولادی دو گهواره بی براساس روش پر هم نهی مودال

1. Canterbury
2. Cantilever Beam Analogy
3. Christopoulos & Wiebe
4. Closed-Form
5. Equivalent Lateral Force
6. Modified Response Spectrum Analysis
7. Extension of Direct Displacement-Based Design
8. Navid Rahgozar and Nima Rahgozar
9. Modified Modal Superposition (MMS)
10. Square-Root-of-the-Sum-of the-Squares
11. San Francisco
12. Cyclic Pushover Analysis

## (References) مراجع

1. Christchurch Central Development Unit, "Introducing the christchurch central recovery plan" (2012).
2. Broujerdiān, V. and Mohammadi Dehcheshmeh, E. "Development of fragility curves for self-centering base-rocking walls subjected to far and near field ground motions", *Sharif J. Civ. Eng.*, **37.2**(3.1), pp. 99-110 (Nov., 2021).
3. Broujerdiān, V. and Mohammadi Dehcheshmeh, E. "Locating the rocking section in self-centering bi-rocking walls to achieve the best seismic performance", *Bull. Earthq. Eng.*, **20**, pp. 2441-2468 (2022).
4. Martin, A. and Deierlein, G.G. "Generalized modified modal superposition procedure for seismic design of rocking and pivoting steel spine systems", *J. Constr. Steel Res.*, **183**, p. 106745 (2021).
5. Wiebe, L. and Christopoulos, C. "A cantilever beam analogy for quantifying higher mode effects in multi-storey buildings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **44**(11), pp. 1697-1716 (2015).
6. Steele, T.C. and Wiebe, L.D. A. "Dynamic and equivalent static procedures for capacity design of controlled rocking steel braced frames", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **45**(14), pp. 2349-2369 (2016).
7. Rahgozar, N. and Rahgoz, N. "Extension of direct displacement-based design for quantifying higher mode effects on controlled rocking steel cores", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **29**(16), p. e1800 (2020).
8. Abbasi, N., Akbarzadeh Bengar, H., Jafari, A. and et al. "Numerical modeling of seismic response and damage estimation of concrete rocking walls under seismic loading", *Sharif J. Civ. Eng.*, **37(2.2)**, pp. 35-45 (2021).
9. Veladi, H., Azar, B.F. and Gendeshmin, S.R. "Quantifying higher mode effects in rocking systems considering shear-flexural behavior", *Structures*, **27**, pp. 542-558 (2020).
10. Martin, A., Deierlein, G.G. and Ma, X. "Capacity design procedure for rocking braced frames using modified modal superposition method", *J. Struct. Eng.*, **145**(6), p. 4019041 (2019).
11. Majumerd, M.J.E., Dehcheshmeh, E.M., Broujerdiān, V. and et al. "Self-centering rocking dual-core braced frames with buckling-restrained fuses", *J. Constr. Steel Res.*, **194**, p. 107322 (2022).
12. Ebrahimi Majumerd, M.J., Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdiān, V. "Feasibility study of using endurance time method for seismic evaluation of self-centering buckling restrained braced frame (SC-BRC-BF)", *Modares Civ. Eng. J.*, **22**(2), pp. 107-123 (2022).
13. Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdiān, V. "Determination of optimal behavior of self-centering multiple-rocking walls subjected to far-field and near-field ground motions", *J. Build. Eng.*, **45**, p. 103509 (2022).
14. Ahadpour Khaneghah, M.R., Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdiān, V. "Optimized design and investigation of cyclic behavior of dual intermediate steel moment resisting system equipped with self-centering buckling restrained 2-story-X-brace", *Sharif J. Civ. Eng.*, **37**(2.1), pp. 51-60 (2021).
15. Martin, A. "Capacity design and topology optimization of rocking spine systems for nonlinear earthquake response", Stanford University (2020).
16. Li, T., Berman, J.W. and Wiebe, R. "Parametric study of seismic performance of structures with multiple rocking joints", *Eng. Struct.*, **146**, pp. 75-92 (2017).
17. Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Broujerdiān, V. "Probabilistic evaluation of self-centering birocking walls subjected to far-field and near-field ground motions", *J. Struct. Eng.*, **148**(9), p. 4022134 (2022).
18. Standard, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7, American Society of Civil Engineers (2017).
19. Ma, X.; Krawinkler, H. and Deierlein, G.G. "Seismic design and behavior of self-centering braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses", John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report 174 (2011).
20. P.695 FEMA and others, "Quantification of building seismic performance factors", Washington, DC (2009).
21. Qureshi, M.I. and Warnitchai, P. "Reduction of inelastic seismic demands in a mid-rise rocking wall structure designed using the displacement-based design procedure", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **26**(2), p. e1307 (Feb., 2017).
22. FEMA, "58-1. Seismic performance assessment of buildings volume 1-methodology", Appl. Technol. Coun. Calif. Redw. City (2012).



# مدل سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس رو سازی راه

مهمنگی عمران شریف (پیاپی ۱۴۰) دوری ۲ - ۳، شماره ۱، ۱۰۵-۱۱۳، (پایاپی شنبه)

رضا هؤیدر\* (استاد بار)

محمد رضا مطهری (دانشیار)

بهزاد سریدانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آرال

روش‌های گوناگونی برای بهبود پایداری خاکریز پیشنهاد می‌شود که از بین آن‌ها می‌توان به تسلیح خاک اشاره کرد. هدف از نوشتار حاضر، بهبود ضریب اطمینان خاکریز مسلح شده توسعه ژئوتکستایل با زوایای گوناگون و مستقر بر خاک نرم با کمک نرم‌افزار PLAXIS بوده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که تغییر زاویه‌ی ژئوتکستایل از  $0^\circ$  تا  $95^\circ$  درجه در خاک ماسه‌یی، باعث کاهش ۵۳ درصدی ضریب اطمینان خاکریز شده است. اما تغییر زاویه‌ی اخیر، در خاک رسی تأثیر اندکی گذاشته است، به نحوی که با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل از  $0^\circ$  تا  $20^\circ$  درجه، کاهش  $2/9$  درصدی در ضریب اطمینان آن مشاهده شده است. به علاوه، با افزایش حدود  $2/86$  برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین  $14/31$ ٪ و در خاک رسی  $2/125$ ٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش اخیر مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه‌ی قبل از گسیختگی،  $6/64$ ٪ بیشتر شده است.

r-moayedfar@araku.ac.ir  
m-motahari@araku.ac.ir  
behzad735421@yahoo.com

واژگان کلیدی: پایداری خاکریز، بهبود ضریب اطمینان، ژئوتکستایل، تسلیح خاک، نرم‌افزار PLAXIS.

## ۱. مقدمه

پژوهه‌های ساخت بشر استفاده می‌شوند. این دسته از ژئوستیک‌ها در واقع مانند مسنجاتی هستند که به جای کاربرد الیاف طبیعی، همانند نخ، ابریشم، یا پشم، از الیاف مصنوعی و عمده‌ای پلیمری در آن‌ها استفاده می‌شود که متخالخل و نفوذپذیرند و از نظر ضخامت در ابعاد مختلف تولید می‌شوند.<sup>[۱]</sup>

### ۱.۱. تاریخچه‌ی پژوهش

تاکنون مدل سازی‌های عددی بسیاری در زمینه‌ی تسلیح با ژئوتکستایل صورت گرفته است که از جمله می‌توان به مدل سازی با آزمایش CBR<sup>۱</sup> چهت تأثیر ژئوتکستایل در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس مسلح شده با ژئوگرید و بررسی همبستگی آن‌ها اشاره کرد؛ که در نتیجه‌ی آن، با مسلح ساختن خاک و افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و همچنین بهبود شرایط اندرکنش، مقدار مدول کشسانی و ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد و باعث کاهش میزان کرنش

احداث سازه‌های روی خاک موجود در محل، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های مجاور و بهینه‌سازی هزینه‌ی ساخت و ساز، همواره هدفی است که مهندسان به آن توجه دارند. در مواردی، با توجه به وزن و ابعاد سازه‌های موردنظر، نیاز به مقاومت برشی زیاد خاک یا حتی مقاومت کششی در خاک است. این در حالی است که خاک به خوبی در مقابل فشار مقاومت می‌کند، اما در برای نیروی کششی از خود مقاومت چندانی نشان نمی‌دهد. در چنین مواردی، روش‌های مختلفی برای بهبود خاک پیشنهاد شده است. از روش‌های رایج در دو دهه‌ی اخیر، استفاده از ژئوتکستایل‌ها به عنوان مسلح‌کننده‌ی خاک را می‌توان برشمرد. استاندارد (۲۰۰۶) ASTM D ۴۴۳۹، ژئوستیک را چنین تعریف می‌کند: مواد و مصالحی پلیمری هستند که به همراه خاک، سنگ و یا دیگر مصالح مرتبه ژئوتکنیکی، در سازه‌ها و

\* نویسنده مسئول  
تاریخ: دریافت ۱/۸/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲/۸/۱۴۰۱، پذیرش ۹/۱۴۰۱.

DOI: 10.24200/J30.2022.60708.3119

استناد به این مقاله:

مویدر، رضا، مطهری، محمد رضا و سریدانی، بهزاد (۱۴۰۲). «مدل سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس رو سازی راه»، مهندسی عمران شریف، ۱۰۵-۱۱۳، ص. ۳۹-۲.

۱۰٪ و جایه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین با کاهش ۳/۵ درصدی در شبیخ خاکریز میزان بیشینه‌ی جایه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز ۲۶٪ کاهش یافته است.<sup>[۱]</sup> برگادو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۲)، در یک مطالعه‌ی موردنی خاکریزهای آزمایشی در مقیاس کامل، با و بدون تقویت ژئوتکستایل، ساخته شده بر روی خاک رس نرم و مقایسه با تحلیل المان محدود خاکریز مذکور در یافته‌ی ژئوتکستایل با مقاومت بالا، تغییرشکل‌های خمیری خاک زیرلایه‌های روسازی را کاهش و ارتفاع بحرانی (شکست) خاکریز را نسبت به خاکریز مسلح نشده، ۱/۵ برابر افزایش داده است.<sup>[۱۰]</sup> مجیدی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز در نوشتاری با عنوان «تأثیر مسلح کردن خاکریز در پایداری و نشست: تحلیل المان محدود بر ا نوع مختلف مسلح سازی و شرایط سازه»، به بررسی اثر سختی محوری ژئوگردید، تعداد لایه‌های مسلح کننده و زاویه‌ی شبیخ خاکریز در خاک رسی با استفاده از نرم افزار PLAXIS پرداخته و دریافته‌اند که استفاده از مسلح کننده‌ها، منجر به کاهش تغییرشکل سطح خاکریز افزایش پایداری آن شده است، به گونه‌ی که با مسلح کردن خاکریز جایه‌جایی افقی پنجه‌ی خاکریز بین ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش مقاومت ژئوگیری از (kN/m) ۱۲۵۰ به (kN/m) ۵۰۰۰، میزان ضربی اطمینان خاکریز در حدود ۹٪ افزایش یافته است.<sup>[۱۱]</sup> خاکریز مدل سازی شده در نوشتار حاضر، در نرم افزار PLAXIS دو بعدی با یک مدل کرنش مسطح مدل سازی صورت گرفته و از المان ۱۵ گرهی (برای مدل کردن لایه‌های خاکی پایه از اجزاء مثلثی ۱۵ گرهی و یا ۶ گرهی استفاده کرد)، جهت دقت بیشتر استفاده شده است. با توجه به اهداف پژوهش، باید به تعداد کافی مدل سازی صورت گیرد. به همین منظور، پارامترهای مقاومتی خاک، نظری: مدول کشسانی، نسبت پواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کششی ژئوتکستایل به عنوان متغیرهای مستقل و ضربی اطمینان پایداری خاکریز به عنوان متغیر وابسته تعریف شده‌اند.

## ۲. انواع ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌ها، در دو گروه عده طبقه‌بندی می‌شوند. در صورتی که الیاف ساخته شده از آن‌ها توسط دستگاه‌های بافتندگی و به صورت دو مجموعه‌ی نخ عمود بر هم (تار و پود) بافته شوند، نوع محصول به ژئوتکستایل بافته شده<sup>۶</sup> موسوم است. ژئوتکستایل بافته، عموماً استحکام و سفتی بالای دارد. اگر الیاف به صورت نامنظم و تصادفی در کنار هم قرار گیرند و توسط روش‌های حرارتی، مکانیکی و یا شیمیایی به هم متصل شوند، ژئوتکستایل بافته نشده<sup>۷</sup> به وجود می‌آید. ژئوتکستایل بافته نشده، ویژگی‌های: استحکام، سفتی متوسط، خواص درازشگی در گسیختگی و نیز قابلیت زهکشی مناسب دارد. با توجه به تفاوت در مقاومت کششی در دو نوع ژئوتکستایل بافته شده و بافته نشده در نوشتار حاضر، جهت مدل سازی از هر دو نوع اخیر استفاده شده است. جهت انتخاب ژئوتکستایل، مشخصه‌ی جرم در واحد سطح، یکسان در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۲]</sup>

## ۳. معیار انتخاب و کاربرد ژئوتکستایل در روسازی

ژئوتکستایل، یکی از اعضاء پرکاربرد خانواده ژئوستیک‌هاست که از مهم‌ترین خصوصیات آن‌ها می‌توان به: مقاومت کششی بالا، قابلیت اتساعی پایین برای کاهش خریز روی زئومیترین، مقاومت سوراخ‌شوندگی بالا، فیلتر مناسب و چشممه‌های با اندازه‌ی گوناگون اشاره کرد.<sup>[۱۳]</sup> از جمله مهم‌ترین کاربردهای ژئوتکستایل می‌توان به عنوان: جداکننده و ایجاد مرز بین مصالح برای جلوگیری از ورود دانه‌های خاک از

گسیختگی می‌شود. در نوشتار عابدی و همکاران (۲۰۱۷)، با در برگرفتن ژئوگردید توسط لایه‌های ژئوتکستایل، به طور قابل توجهی مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس از طریق افزایش اندرکش سطح تماس بهبود یافته است.<sup>[۲]</sup> مینا و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌ی بر روی جاده‌های بدون آسفالت در هند که فقط با

مشخصات خاک (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک) طراحی می‌شوند، انجام داده‌اند که اگر چسبندگی خاک در طراحی مذکور، معیار استحکام در نظر گرفته شود، مقاومت باربری کمتری ایجاد می‌شود که به تبع آن ضخامت لایه‌ی سنگدانه بیشتر خواهد شد و در نتیجه، هزینه‌ی ساخت راه افزایش خواهد یافت. در مطالعه‌ی مذکور، با افزودن یک لایه‌ی ژئوتکستایل در زیرلایه‌ی سنگدانه و تخمین ظرفیت باربری خاک در حضور و غیاب مسلح کننده‌ی مذکور، گزارش شده است که در نتیجه‌ی افزایش مقاومت ژئوتکستایل‌ها، ضخامت لایه‌ی سنگدانه و تخمین ظرفیت باربری خاک در حضور و غیاب مسلح کننده‌ی مذکور، گزارش شده است که در نتیجه‌ی افزایش مقاومت ژئوتکستایل، نشان داده است که ژئوتکستایل به طور فرازینده‌ی به عنوان تقویت در خاکریز جاده‌ی خاک نرم استفاده شده است. در پژوهش ایشان، استحکام کششی مطلوب ژئوتکستایل به عنوان تقویت در خاکریز جاده با توجه به ضربی مجاز اطمینان و جایه‌جایی تعیین شده و نتایج نشان داده‌اند که ضربی اطمینان تمايل دارد با افزایش مقاومت کششی ژئوتکستایل مسلح کننده افزایش یابد. از آنجا که جایه‌جایی با افزایش استحکام کششی ژئوتکستایل اثر معنی داری نداشته است، برای تعیین مقاومت کششی مطلوب ژئوتکستایل، می‌توان پارامتر مذکور را نادیده گرفت.<sup>[۱]</sup>

جلالی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، با مطالعه‌ی رفتار روسازی انعطاف‌پذیر که دارای نتایج آزمون CBR مختلف بوده است، با کمک مدل سازی نرم افزار المان محدود تحت بازگذاری استاتیکی و با وجود مشخصات غیرخطی خاک در حالت زهکشی شده، به این نتایج دست یافته که تشابه زیادی در مقدار جایه‌جایی سطح راه بین آزمون‌های عملی و مدل سازی با نرم افزار PLAXIS وجود دارد.<sup>[۵]</sup> کرمانی (۲۰۱۸)، مطالعات متعددی در مورد تأثیر ژئوتکستایل به عنوان لایه‌ی جداساز و فیلتراسیون در جهت کاهش جایه‌جایی ریزدانه‌های به لایه‌ی زیراساس نفوذ کرده‌اند، براساس داده و دریافته است که ریزدانه‌هایی که به لایه‌ی زیراساس نفوذ کرده‌اند، در جرم خاک زیراساس، در آزمایش‌های بدون ژئوتکستایل ۶/۳۹٪ و با حضور ژئوتکستایل به ۱/۸۱٪ کاهش یافته است. همچنین وجود ژئوتکستایل باعث کاهش ۳۰ درصدی در میزان خرایی شیارشده‌گی روسازی شده است.<sup>[۶]</sup>

لین<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعات خود بر روی نوع جدیدی از ژئوتکستایل‌ها با بافت فیلته مانند که برتری خاصی نسبت به ژئوتکستایل‌های رایج در زهکشی جانبی دارند، به این نتایج دست یافته که با بهره‌گیری از ژئوتکستایل‌های مذکور می‌توان براساس طراحی استاندارد ایالات متحده، ضخامت لایه‌ی اساس را نزدیک به ۵۰٪ و همچنین عمق خرایی شیارشده‌گی سطح روسازی را تا ۳۵٪ کاهش داد.<sup>[۷]</sup> نتایج مطالعات حیمی و اسدی (۲۰۱۴)، در مورد تحلیل شیروانی‌ها نشان داده است که استفاده از مدل PLAXIS دو بعدی، نتایج نزدیک‌تری نسبت به مدل سه بعدی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی برای تعیین مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری قبل از گسیختگی خاکریز ارائه خواهد داد.<sup>[۸]</sup> سیاوش‌نیا (۲۰۱۰)، در نوشتار خود با عنوان «ازرایابی خاکریز مسلح شده با ژئوتکستایل بر روی خاک رس نرم»، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، کاهش شبیخ خاکریز، مقاومت ژئوتکستایل و طول مؤثر ژئوتکستایل در رفتار خاکریز ماسه‌ی سیلیتی تقویت شده بر روی خاک رس نرم را بررسی کرده و دریافته‌اند که کاهش شبیخ و ارتفاع خاکریزی، عرض تاج و ارتفاع مقاومت ژئوتکستایل می‌تواند جایه‌جایی‌های سطح خاکریز را کاهش دهد. به نحوی که با اضافه کردن یک لایه‌ی ژئوتکستایل، جایه‌جایی قائم سطح خاکریز در حدود

جدول ۱. پارامترهای اولیه‌ی خاک.<sup>[۱۴]</sup>

اساس					زیراساس
۲	۱	۲	۱		
۲۰	۱۶/۲	۲۲	۲۳/۵	وزن مخصوص اشباع $\frac{kN}{m^2}$	
۱۸	۱۵/۵	۲۰	۲۲/۲	وزن مخصوص غیراشباع $\frac{kN}{m^2}$	
۱	۱	۱	۱	نفوذپذیری در جهت افق ( $\frac{m}{day}$ )	
۱	۱	۱	۱	نفوذپذیری در جهت قائم ( $\frac{m}{day}$ )	
۲۰	۱	۳۰	۱	چسبندگی ( $\frac{kN}{m^2}$ )	
۴۰	۴۰	۴۳	۴۳	زاویه‌ی اصطکاک	
۱۴	۱۰	۱۳	۱۳	زاویه‌ی اتساع	
۵۰۰۰	۴۲۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	مدول کشسانی ( $\frac{kN}{m^2}$ )	
۰	۰	۰	۰	نسبت پواسون	
۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	ضخامت (mm)	
۴۰۰	۳۸۰	۳۰۰	۲۵۰		

جدول ۲. خواص لایه‌ی زیر خاکریز.

خاک رس	پارامترها
۱۵	وزن مخصوص اشباع ( $\frac{kN}{m^2}$ )
۱۸	وزن مخصوص غیراشباع ( $\frac{kN}{m^2}$ )
۰/۰۱	نفوذپذیری در جهت افق ( $\frac{m}{day}$ )
۰/۰۱	نفوذپذیری در جهت قائم ( $\frac{m}{day}$ )
۲۰	چسبندگی ( $\frac{kN}{m^2}$ )
۲۴	زاویه‌ی اصطکاک
۰	زاویه‌ی اتساع
۱۰۰۰	مدول کشسانی ( $\frac{kN}{m^2}$ )
۰/۳۳	نسبت پواسون
۴۰۰۰	ضخامت (mm)

برداخته و مشاهده شده است تسليح روسازی در بارگذاری استاتیکی، تأثیرگذار اما در بارگذاری دینامیکی، فقط برای بسامد بالا نتیجه بخش بوده است. نکته‌ی قابل توجه در این است که رویکرد مدل‌سازی در دو نوشتار اخیر به این صورت بوده است که هندسه‌ی مدل خاکریز به صورت کاملاً افقی و شرایط تکیه‌گاهی در سرتاسر مدل در نظر گرفته شده است؛ اما در مطالعه‌ی حاضر، هندسه‌ی مدل مشابه خاکریز اجرایی انتهاه شیب خاکریز آزاد بوده است، تا جایه‌ی جایی تسليح‌کننده در بنجه‌ی خاکریز مشاهده شود.<sup>[۱۵]</sup>

با توجه به جدول ۱، فقط پارامتر  $R_{inter}$  باقی می‌ماند که برای معرفی میزان درگیری سطح تنسی بین دو سطح مختلف است. بنابراین مقدار ۱ برای ضریب مذکور در نظر گرفته شده است. برای خاک رسی خوب دانه‌بندی شده در نظر گرفته شده است. برای خاک بسته نیز خاک رسی خوب دانه‌بندی شده در نظر گرفته شده است. خاک‌های رسی تمايل به قور ندارند، بنابراین زاویه‌ی اتساع برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت پواسون که حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده‌ی استاندارد است و در بیشتر موارد مقدار آن بین ۰/۳

لایه‌های مختلف، تقویت‌کننده‌ی مقاومت کششی خاک، زهکش مایعات و گازهای محبوس در لایه‌ی خاک و فیلتر جهت ایجاد مرزی پایدار بین خاک و زهکش در مسیر حرکت آب نام برد. از بین کاربردهای گوناگون ژئوتکستایل در نرم‌افزار عددی، فقط به عنوان تقویت‌کننده جهت افزایش مقاومت کششی خاک مد نظر قرار می‌گیرد.<sup>[۱]</sup>

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

برای راستی‌آزمایی نرم‌افزار PLAXIS از نوشتاری با عنوان «مدل‌سازی عددی خاکریز بزرگراه با روش‌های مختلف بهسازی زمین»، استفاده شده است؛ که در آن، با مدل‌سازی خاکریز راه با نرم‌افزار PLAXIS برای مصالح متفاوت سعی بر یافتن بیشترین ضریب اطمینان شده است. همچنین برای مدل‌سازی از چهار نوع مصالح در مدل موهر - کلمب<sup>۸</sup>، به صورت خاک ساده، خاک به همراه خاکسترهای خاک مسلح شده با ژئوگرید، و خاک به همراه خاکسترهای خاک مسلح شده با ژئوگرید استفاده شده است.<sup>[۱۳]</sup>

جهت راستی‌آزمایی نیز در نوشتار حاضر، از حالت اول (خاک ساده) استفاده شده است. ضریب اطمینان به دست آمده در نوشتار اخیر<sup>[۱۲]</sup> برای حالت اول، معادل ۱/۴۰۶ و ضریب اطمینان حاصل شده توسط نرم‌افزار PLAXIS در نوشتار حاضر، معادل ۱/۴۰۷ بوده است (مدل حاصل در دسترس است). بنابراین با استناد به نتایج به دست آمده، نرم‌افزار PLAXIS قابلیت بررسی نوشتار حاضر را دارد.

## ۳. مدل‌سازی

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد فراوانی کاربرد و اهمیت ژئوتکستایل‌ها در شیروانی خاکی و برخلاف سایر مطالعات رایج که مسلح‌کننده‌های خاکریز در مزین خاک بسته و لایه‌های روسازی و یا مزین لایه‌های روسازی و رویه‌ی آسفالت قرار گرفته‌اند، در نوشتار حاضر، مسلح‌کننده‌ها در داخل لایه‌های اساس و زیراساس و با هدف تأثیر تغییر زاویه‌ی ژئوتکستایل با تغییر هم‌زمان شیب گوهی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکستایل در دو نوع خاک رسی و ماسه‌ی بی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات قرار گرفته‌اند. جهت ساخت مدل در نرم‌افزار PLAXIS، نیاز به یک سری پارامتر اولیه است، پارامترهای مذکور از چند نوشتار استخراج و بررسی شده‌اند.

### ۱.۳. مواد و روش‌ها

در نوشتار حاضر، برای مدل‌سازی خاکریز راه، علاوه بر هندسه‌ی مدل و تعیین شرایط محیطی، مهم‌ترین موضوع تعیین پارامترهای اولیه‌ی خاک بسته و لایه‌های روسازی بوده است (جدول ۱) که برای تعیین آن‌ها، از دو نوشتار با عنوان‌های «آنالیز اجراء محدود روسازی انعطاف‌پذیر با ژئوگریدها»<sup>[۱۴]</sup> و «مدل‌سازی المان محدود با نرم‌افزار PLAXIS از روسازی آسفالتی مسلح شده با ژئوگرید»<sup>[۱۵]</sup> استفاده شده است که رویکردی مشابه با مطالعه‌ی حاضر داشته‌اند. با این تفاوت که در نوشتار اول، به بررسی و تحلیل روسازی با نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است، و علاوه بر استفاده از ژئوگرید، ضخامت لایه‌های روسازی را افزایش داده‌اند. در نتیجه، تغییر شکل سطح راه افزایش یافته است، ولی در تمامی حالت‌ها با حضور مسلح‌کننده، تغییر شکل سطح راه کاهش یافته است. در نوشتار دوم، به مدل‌سازی روسازی تسليح شده و تسليح نشده با ژئوگرید به همراه بارگذاری دینامیکی و استاتیکی در نرم‌افزار المان محدود

جدول ۳. مراحل آنالیز مدل.

Time (Day)	Loading input	Calculation	Start from	Phase no.	identification
۰	N/A	N/A	۰	۰	Initial phase
۲	Staged construction	Plastic analysis	۰	۱	< Phase <sup>۰</sup> >
۵	Staged construction	Consolidation analysis	۱	۲	< Phase <sup>۱</sup> >
۲۰	Staged construction	Consolidation analysis	۱	۳	< Phase <sup>۲</sup> >
۵	Staged construction	Consolidation analysis	۲	۴	< Phase <sup>۳</sup> >
-	Minimum Pore pressure	Consolidation analysis	۶	۴	< Phase <sup>۴</sup> >
-	Incremental multipliers	Phi/c reduction	۴	۵	< Phase <sup>۵</sup> >

جدول ۴. شرایط در نظر گرفته شده در ساخت مدل.

زاویه ژوئنستایل (درجه)	مقامات های ژوئنستایل (kN/m)	شیب های خاکریز	نوع خاکریز
۰ - ۰/۴۸ - ۰/۷۲ - ۰/۹۵	۱۴ - ۴۰	۰/۱۸ - ۰/۲۴	۱
۰ - ۰/۶۷ - ۱/۳۴ - ۲/۰۱	۱۴ - ۴۰	۰/۱۸ - ۰/۲۳	۲

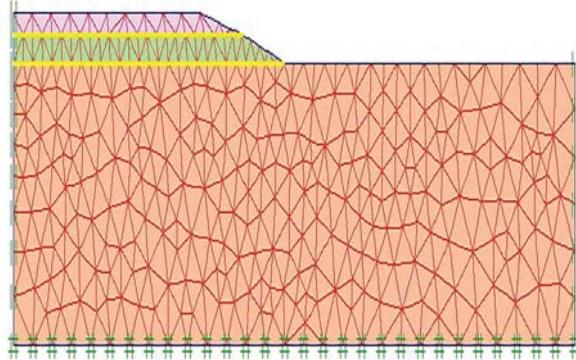
شرایط اولیه پروژه به ایجاد فشارهای آب، غیرفعال کردن سازه‌ها و بارها و ایجاد تنش‌های اولیه نیاز دارد. فشار آب براساس ورود ترازهای ایستابی و ارتفاعات آب زیرزمینی است. بنابراین جهت تعریف تراز ایستابی عمومی، به طور اتوماتیک برای همه توده‌ها جهت تولید فشارهای منفذی تخصیص داده شده است. سطح ایستابی آب زیرزمینی ۵٪ متر از سطح زمین اصلی پایین‌تر است.

### ۲.۳. آنالیز مدل

پس از معرفی هندسه‌ی مدل و تکمیل قسمت ورودی مدل‌سازی، نوبت به آنالیز مدل می‌رسد. در آنالیز مدل با توجه به وجود خاک بستر در مدل مذکور، ابتدا خاکریز راه با آنالیز خمیری جهت ایجاد خاک بستر آغاز شد. سپس با فرایند تحقیم، لایه زیرساز در مدت ۵ روز ساخته و در فاز بعدی، همان لایه به مدت ۲۰ روز آنالیز تحقیم انجام شده است. مجدداً برای لایه ای اساس، با آنالیز تحقیم در ۵ روز، ساخت آن مدل شده و در مرحله‌ی بعد برای بررسی رفتار خاکریز در سال‌های آینده، آنالیز تحقیم تا راfeld شدن کامل فشار آب حفره‌ی و با استفاده از گزینه‌ی Minimum pore pressure انجام شده است. برای دستیابی به میزان ضریب اطمینان که شروع آن از انتهای مرحله‌ی قبل آغاز و با آنالیز Ignore undrained Phi/c-reduction انجام می‌شود، با فعال کردن گزینه‌ی

behaviour، رفتار زهکشی نشده به علت طولانی بودن این فاز محاسباتی در نظر گرفته نشده است. در جدول ۳، فازهای مربوط به آنالیز مدل ارائه شده است.

با توجه به توضیحاتی که ارائه شده است، برای ساخت مدل‌ها به این صورت عمل شده است که ۲ نوع خاکریز از لحاظ جنس خاک، با ۲ شیب متفاوت خاکریز نسبت به افق (مقدار واقع در جدول حاصل تقسیم ارتفاع به عرض گوهی شیب خاکریز است)، ۲ نوع ژوئنستایل از نظر مقاومت و با ۴ زاویه گوناگون نسبت به افق برای ژوئنستایل که این شرایط در جدول ۴ ارائه شده است، باعث ایجاد



شکل ۱. تصویری از مش.

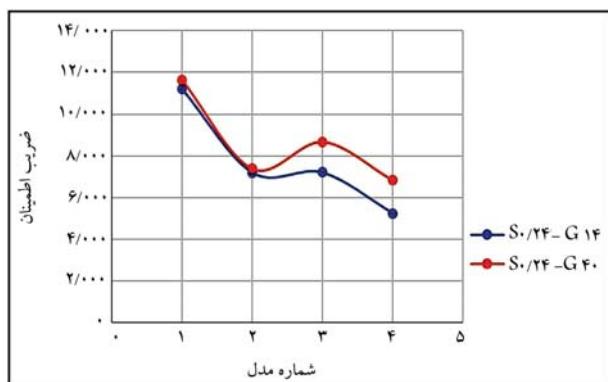
تا ۴٪ است، به همین دلیل در نوشтар حاضر نسبت پواسون معادل ۰/۳۳ فرض شده است.<sup>[۱۶]</sup> همچنین، برای نشان دادن دانه‌بندی خوب با نفوذپذیری پایین، مقدار نفوذپذیری در هر دو جهت افقی و قائم برابر ۰/۰ فرض شده است. پس از ایجاد مدل هندسی و تعیین مشخصات مصالح، هندسه‌ی مدل باید به المان‌های محدود به مدل نظرور انجام محاسبات المان محدود تقسیم شود. مش‌بندی در نرم‌افزار PLAXIS به صورت خودکار برای تمام مدل انجام شده است که برای افزایش دقت در محاسبات، مش‌بندی مطابق شکل ۱، ریز در نظر گرفته شده است.

معمولًا در مسائل مهم ژوئنستایک، یک مدل رفتاری پیشرفتی برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک‌ها، بسته به هدف مورد نظر لازم است که در نوشтар حاضر، از مدل موهر- کلمب استفاده شده است. با نرم‌افزار مذکور می‌توان خاک برداری و خاکریزی مرحله‌یی با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گره‌ی و ۱۵ گره‌ی مدل‌سازی کرد. با توجه به اینکه در مرزها در جهت‌های خاصی، مدل از لحاظ حرکت و تغییرشکل محدود است، کمیته‌ی ابعاد مدل باید طوری باشد که شرایط مرزی در نتایج تأثیرگذار نباشد.

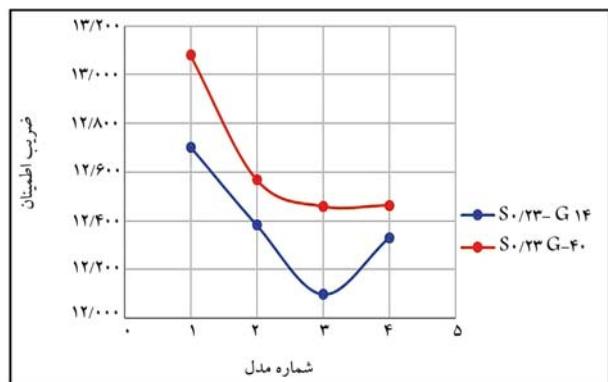
جدول ۵. ضریب اطمینان مدل‌های ایجاد شده.

نوع	شماره‌ی خاکریز	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل
۱		۱۲/۰۵۲	۱۲	۱۳/۱۵۹	۹	۱۲/۰۸۰	۵	۱۲/۷۰۳	۱											
۲		۱۳/۱۵۹	۱۴	۱۳/۰۱۶	۱۰	۱۲/۵۶۸	۶	۱۲/۲۸۲	۲											
۳		۱۳/۰۷۸	۱۵	۱۳/۰۱۸	۱۱	۱۲/۴۵۹	۷	۱۲/۰۹۸	۳											
۴		۱۴/۲۵۴	۱۶	۱۲/۹۵۳	۱۲	۱۲/۴۶۴	۸	۱۲/۳۳۰	۴											
نوع	شماره‌ی خاکریز	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل	ضریب	شماره‌ی اطمینان	مدل
۱۷		۱۲/۰۵۱	۲۹	۱۲/۸۵۲	۲۵	۱۱/۶۲۳	۲۱	۱۱/۱۹۸												
۱۸		۹/۹۵۶	۳۰	۷/۰۲۵	۲۶	۷/۳۹۱	۲۲	۷/۱۹۶												
۱۹		۱۰/۹۸۹	۳۱	۹/۷۷۷	۲۷	۸/۶۷۹	۲۳	۷/۲۰۳												
۲۰		۹/۰۳۴	۳۲	۱۰/۳۴۲	۲۸	۶/۸۳۹	۲۴	۵/۲۵۰												

مدل شده است. ضرایب اطمینان شیروانی خاکریز برای تمامی مدل‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۲. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به نوع ژئوتکستایل در خاک رسی ۱۲۵٪/۲٪ افزایش یافته است. در سایر مطالعات به این نتیجه دست یافته که با  $4\%$  برابر کردن مقاومت مسلح‌کننده، ضریب اطمینان خاکریز در حدود  $8/69$  افزایش یافته است.<sup>[۱۱]</sup>



شکل ۳. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به نوع ژئوتکستایل در خاک رسی.

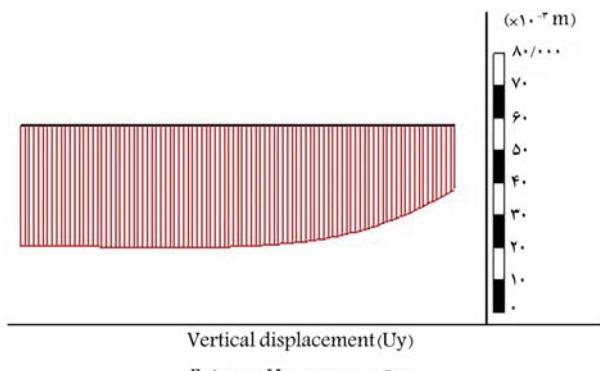
مطابق آن‌ها، به علت زهکشی و تحکیم، ژئوتکستایل در کل طول خود دارای حرکت به سمت پایین بوده است. همچنین ذکر این نکته لازم است که جهت بررسی میزان نشست ژئوتکستایل، نمونه‌یی بررسی شده است که ژئوتکستایل به صورت افقی بر روی سطح لایه قرار گرفته باشد تا غیربرگشکل مسلح‌کننده، نشان‌دهنده‌ی تغییر سطح

با توجه به تعداد بالای نمودارها، برای نامگذاری آن‌ها به این صورت عمل شده که به عنوان مثال  $S.0/24-G.14$  یعنی مدل با شیب خاکریز  $24/0^{\circ}$  و مقاومت ژئوتکستایل  $(kN/m)$  است. با نامگذاری ذکر شده (در شکل‌های ۲ و ۳) این نتیجه حاصل شد که با شیب خاکریز برابر و مقایسه با زاویه‌ی مساوی با افزایش حدود  $2/86$  برابر مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین  $14/31$ ٪ افزایش در میزان ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. با بررسی دیگر نوشتارها، پس از تغییر شیب خاکریز  $(1:1)$  به  $(1:2)$ ، مقدار ضریب اطمینان  $8/74$ ٪ افزایش یافته است که به نتیجه‌ی بررسی مطالعه‌ی حاضر در خاک ماسه‌یی نزدیک بوده است.<sup>[۱۱]</sup> همچنین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که با تأثیر بودن تمامی پارامترها و فقط با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از  $۰\text{ تا }9/۹۰^{\circ}$  درجه در خاک درشت‌دانه، ضریب اطمینان خاکریز در حدود  $5/3$ ٪ کاهش یافته است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از  $۰\text{ تا }2/۰۱^{\circ}$  درجه، کاهش  $2/۹$  درصدی در ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. بنابراین، بهینه‌ترین حالت برای قرارگیری مسلح‌کننده در لایه‌های روسازی به صورت افقی است.

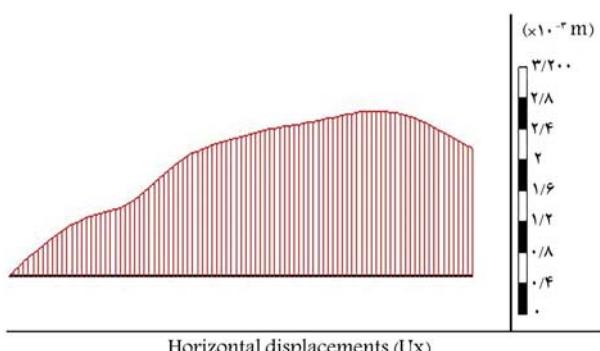
در شکل‌های ۸ الی ۱۱، تغییرشکل‌های قائم، افقی، کلی و میزان نیروی وارد بر ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵، در لایه‌ی زیراساس پس از انتها‌ی تحکیم با بزرگ‌نمایی  $5^{\circ}$  برابر به همراه مقیاس کنارشکل مشاهده می‌شوند که

#### ۴. بحث و نتایج

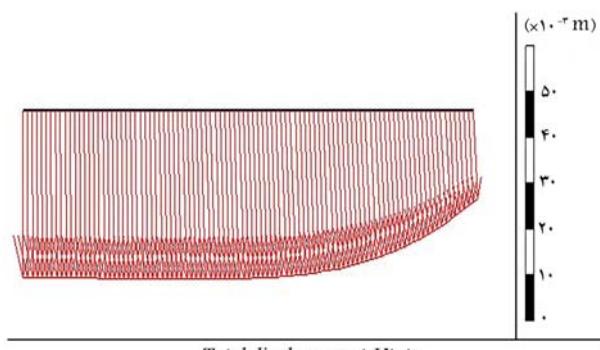
با توجه به تعداد بالای نمودارها، برای نامگذاری آن‌ها به این صورت عمل شده که به عنوان مثال  $S.0/24-G.14$  یعنی مدل با شیب خاکریز  $24/0^{\circ}$  و مقاومت ژئوتکستایل  $(kN/m)$  است. با نامگذاری ذکر شده (در شکل‌های ۲ و ۳) این نتیجه حاصل شد که با شیب خاکریز برابر و مقایسه با زاویه‌ی مساوی با افزایش حدود  $2/86$  برابر مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین  $14/31$ ٪ افزایش یافته است. در سایر مطالعات به این نتیجه دست یافته که با  $4\%$  برابر کردن مقاومت مسلح‌کننده، ضریب اطمینان خاکریز در حدود  $8/69$  افزایش یافته است.<sup>[۱۱]</sup>



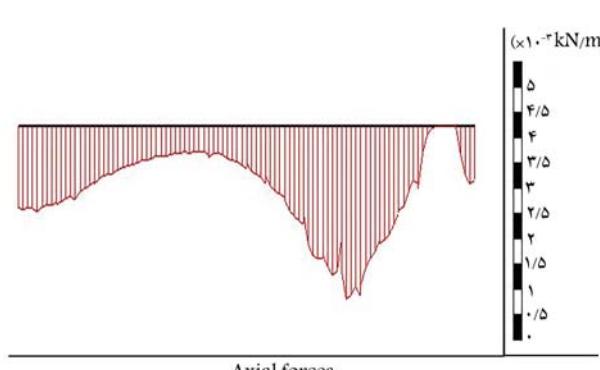
شکل ۸. تغییر مکان قائم ژئوتکستایل پس از تحرکیم در لایه ای اساس.



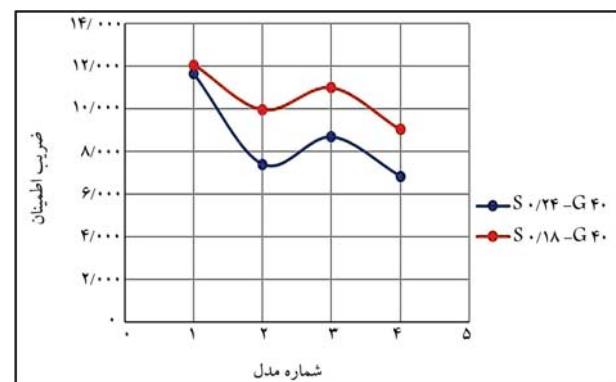
شکل ۹. تغییر مکان افقی ژئوتکستایل پس از تحرکیم در لایه ای اساس.



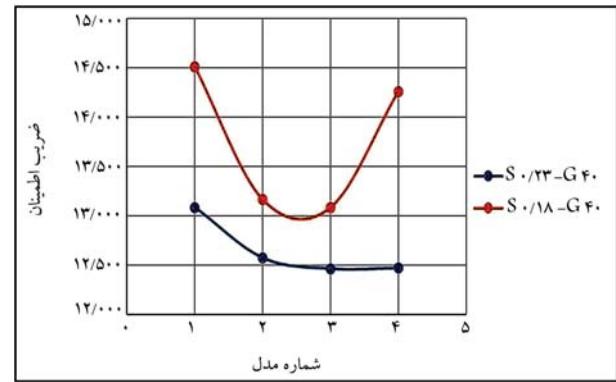
شکل ۱۰. تغییر مکان کلی ژئوتکستایل پس از تحرکیم در لایه ای اساس.



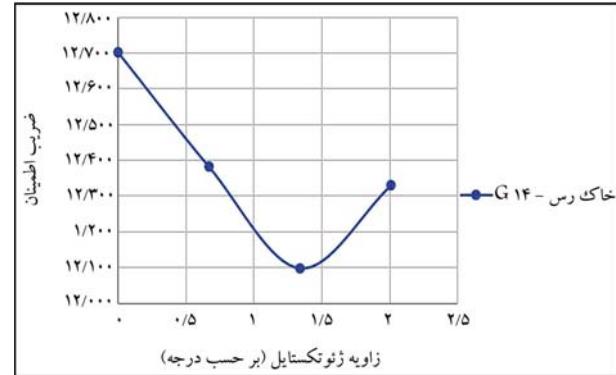
شکل ۱۱. میزان نیروی واردہ به ژئوتکستایل در لایه ای اساس.



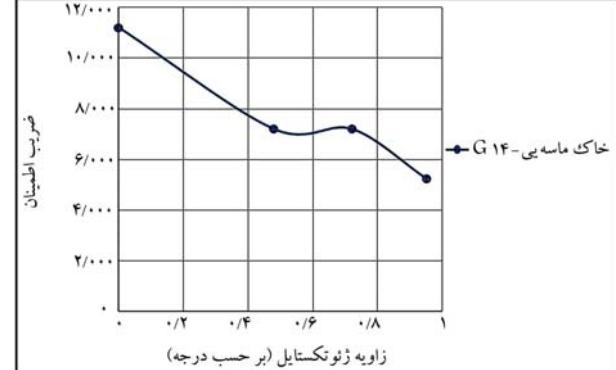
شکل ۴. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک ماسه بی.



شکل ۵. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک رسی.



شکل ۶. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه ی ژئوتکستایل در خاک رسی.



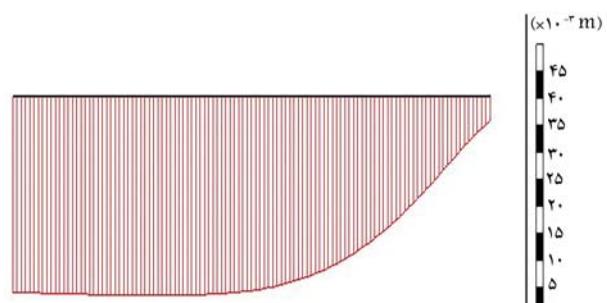
شکل ۷. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه ی ژئوتکستایل در خاک ماسه بی.

لایه‌های روسازی نیز باشد. تصاویر ارائه شده، از یک نمونه انتخاب شده است، در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار جابه‌جایی قائم ژئوتکستایل در پاشنه یا وسط خاکریز معادل ۳۷/۲۷ میلی‌متر و کمترین مقدار مربوط به پنجه‌ی خاکریز بوده است.

همچنین در شکل ۹، بیشترین تغییرشکل افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم، معادل ۲/۱۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد در پنجه‌ی خاکریز، ژئوتکستایل تمایل حرکت به سمت بیرون خاکریز را داشته است. در شکل ۱۰، تصویری از تغییرشکل کلی ژئوتکستایل که نمایی از مجموع حرکت افقی و قائم خاکریز است، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مربوط به پاشنه‌ی خاکریز، معادل ۳۱/۳۷ میلی‌متر بوده است.

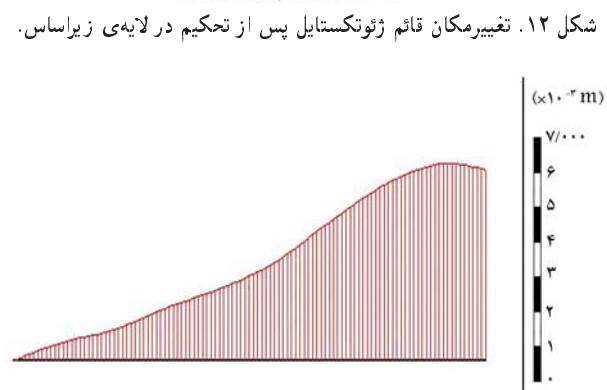
در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ که مربوط به لایه‌ی زیراساس هستند و شباهت بسیاری با تغییرمکان ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس دارد، مشاهده می‌شود که بیشترین تغییرمکان قائم مسلح‌کننده در پاشنه‌ی خاکریز معادل ۲/۲۱ میلی‌متر و بیشینه‌ی تغییرمکان افقی معادل ۵/۷۶ میلی‌متر و درنهایت برابر با تغییرمکان های قائم و افقی معادل ۳۷/۲۴ میلی‌متر بوده است، که می‌توان گفت با تغییرمکان کلی ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس برابر است. اما با مقایسه‌ی نمودارها، نیروی وارد بر ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس، که معادل  $40/0.34 \text{ kN/m}$  و در لایه‌ی زیراساس معادل  $40/0.1624 \text{ kN/m}$  بوده است، نتایج نشان می‌دهد که ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس نسبت به لایه‌ی زیراساس،  $0.06/0.06 \times 100\%$  نیروی کمتری را تحمل کرده است. بنابراین می‌توان برای افزایش بهره‌وری و بهینه شدن طرح، مسلح‌کننده‌ی داخل لایه‌ی اساس را با مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی زیراساس انتخاب کرد.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، یک نمای کلی از خاکریز که میزان تغییرشکل‌های



Vertical displacements (Uy)

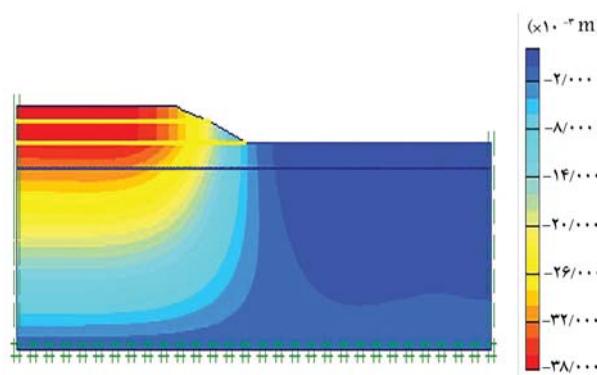
Extreme Uy  $37/21 \times 10^{-3} \text{ m}$



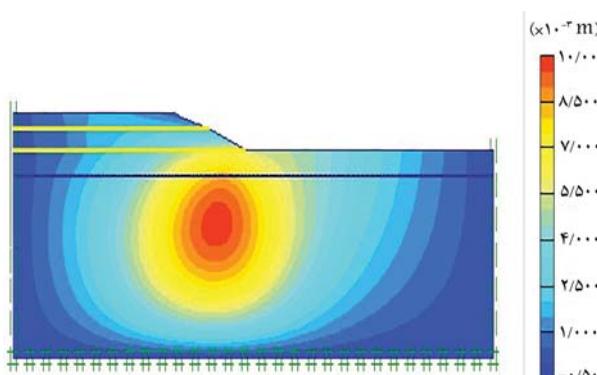
Horizontal displacements (Ux)

Extreme Ux  $5/76 \times 10^{-3} \text{ m}$

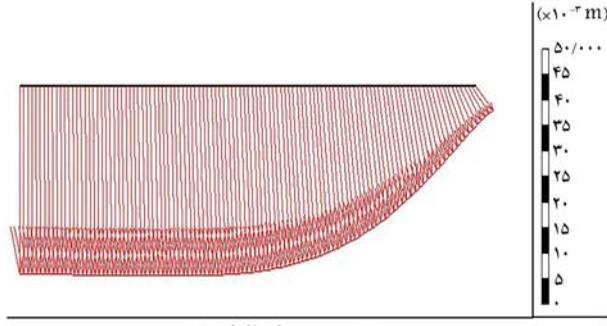
شکل ۱۲. تغییرمکان قائم ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیراساس.



شکل ۱۶. میزان نشست بعد از تحکیم نهایی.



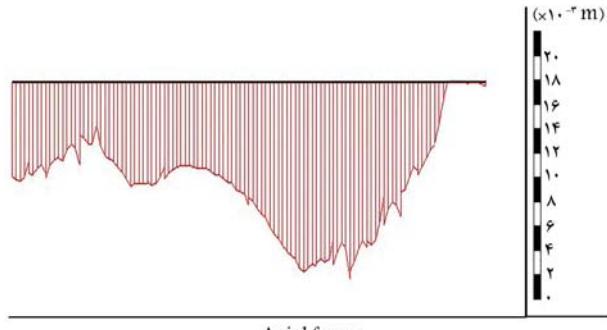
شکل ۱۷. میزان تغییرمکان جانبی بعد از تحکیم نهایی.



Total displacement (Utot)

Extreme Utot  $37/24 \times 10^{-3} \text{ m}$

شکل ۱۴. تغییرمکان کلی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیراساس.



Axial forces

Extreme axial force  $16/24 \times 10^{-3} \text{ kN/m}$

شکل ۱۵. میزان نیروی وارد به ژئوتکستایل در لایه‌ی زیراساس.

PLAXIS به این صورت عمل شده است که از ۲ نوع خاکریز متفاوت از لحاظ جنس خاک، با ۲ شیب متفاوت خاکریز نسبت به افق، ۲ نوع ژئوتکستایل از نظر مقاومت و با ۴ زاویه‌ی گوناگون نسبت به افق برای ژئوتکستایل که درنهایت ۳۲ مدل به دست آمده است، به منظور بررسی و مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر استفاده شده است.

۱. با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌ی به طور میانگین ۳۱/۱۴٪ و در خاک رسی به طور میانگین ۲/۱۲۵٪ افزایش یافته است، که نشان از اهمیت بیشتر وجود مسلح‌کننده در خاک ماسه‌ی است.

۲. ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس نسبت به لایه‌ی زیراساس، ۰/۰۶٪ نیروی کمتری را تحمل کرده است. بنابراین می‌توان برای افزایش بهره‌وری و بهینه شدن طرح، مسلح‌کننده‌ی داخل لایه‌ی اساس را با مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی زیراساس انتخاب کرد.

۳. با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از ۰° تا ۹۵° درجه در خاک درشت‌دانه، ضریب اطمینان پاشنه‌ی خاکریز و پاشنه‌ی خاکریز و بیشینه‌ی افقی مربوط به پنجه‌ی خاکریز است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از ۰° تا ۲/۰۱ درجه، ضریب اطمینان ۹/۲٪ کاهش یافته است. بنابراین، بهینه‌ترین حالت برای قرارگیری مسلح‌کننده در لایه‌های روسازی به صورت افقی است.

۴. با توجه به هندسه‌ی مدل، بیشترین میزان نشست مربوط به پاشنه‌ی خاکریز و بیشینه‌ی جایه‌جایی افقی مربوط به پنجه‌ی خاکریز است. همچنین تغییر‌شکل کلی لایه‌های روسازی (اساس و زیراساس) با هم برابر و مشابه بوده است.

۵. با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری در مقاومت ژئوتکستایل، میزان نشست مسلح‌کننده در لحظه‌ی گسیختگی در کف لایه‌ی اساس به میزان ۶۰/۶٪ افزایش یافته است. بنابراین با افزایش مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه‌ی قبل از گسیختگی خاکریز بیشتر شده است.

۶. با کاهش حدود ۳۳/۳۳ درصدی شیب خاکریز به طور میانگین در خاک ماسه‌ی، ۲۲/۲۴٪ و در خاک رسی، ۷۴/۸٪ افزایش در میزان ضریب اطمینان مشاهده می‌شود.

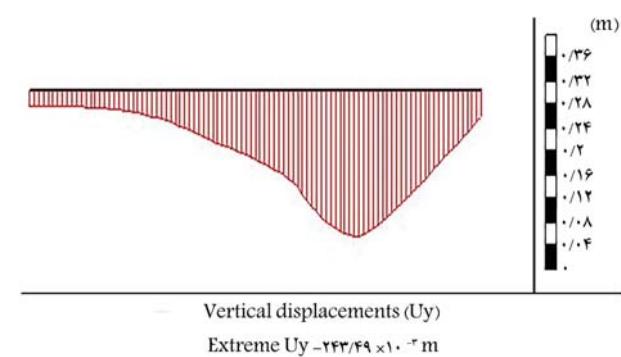
به این نکته نیز باید اشاره کرد که نتایج مطالعه‌ی حاضر، فقط برای فرایند ساخت لایه‌های روسازی انجام گرفته است و می‌توان در مطالعات آتی، تأثیر بارگذاری دینامیکی را نیز اعمال و بررسی کرد. همچنین مسلح‌کننده‌های لایه‌های روسازی به صورت مجرما در هر لایه قرار گرفته‌اند که با توجه به مقاومت کششی بالای ژئوتکستایل‌ها، پیشنهاد می‌شود مسلح‌کننده مذکور در سرتاسر محیط لایه‌ی روسازی قرار گیرد و نتایج از نظر جایه‌جایی سطح روسازی بررسی شود.

## ۶. بیانیه‌ی در دسترس بودن داده‌ها

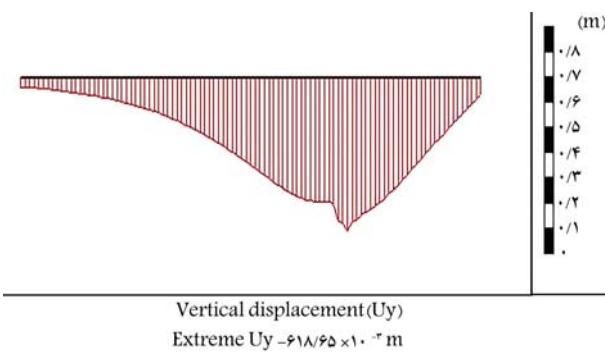
تمام داده‌ها، مدل‌ها، نتایج خروجی نرم افزار، که یافته‌های مطالعه‌ی حاضر را پشتیبانی می‌کنند، براساس درخواست منطقی از نویسنده‌ی مسئول نوشتار در دسترس است.

## پانوشت‌ها

1. California Boring Ratio



شکل ۱۸. تغییر‌مکان قائم ژئوتکستایل با مقاومت (kN/m) ۱۴ در لحظه‌ی شکست در لایه‌ی اساس.



شکل ۱۹. تغییر‌مکان قائم ژئوتکستایل با مقاومت (kN/m) ۴۰ در لحظه‌ی شکست در لایه‌ی اساس.

لایه‌های روسازی را پس از فرایند تحکیم نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، بیشینه‌ی میزان تغییر‌شکل‌های قائم در پاشنه‌ی خاکریز و تغییر‌شکل جانشی قابل توجه در پنجه‌ی خاکریز بوده است. قابل ذکر است که جایه‌جایی‌های ژئوتکستایل نیز تأییدکننده‌ی تغییر‌شکل‌های لایه‌های روسازی است. نحوه‌ی تغییر‌شکل در خاکریز مشابه با نتایج به دست آمده در سایر نوشتارهاست.<sup>[۱۱]</sup> در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، تأثیر مقاومت ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس در میزان نشست آن‌ها در لحظه‌ی گسیختگی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش حدود ۲/۸۶ برابری در مقاومت ژئوتکستایل، میزان نشست مسلح‌کننده در کف لایه‌ی اساس از ۴۹/۲۴ میلی‌متر به ۶۵/۱۸ میلی‌متر، یعنی به میزان ۶۰/۶٪ افزایش یافته است. بنابراین، با افزایش مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه‌ی قبل از گسیختگی خاکریز بیشتر شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های بهبود پایداری خاکریز، تسلیح خاک است. نوشتار حاضر، با هدف تأثیر تغییر زاویه‌ی ژئوتکستایل با تغییر هم‌مان شیب گوهی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکستایل در دو نوع خاک رسی و ماسه‌ی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات صورت گرفته است. جهت ساخت مدل‌ها در نرم افزار

2. Wulandari
3. Djellali
4. Lin

5. Bergado
6. Woven
7. Non-Woven
8. Mohr-Coulomb

## مراجع (References)

1. Shafabakhsh, Gh. "Embankment reinforcement with using of geogrid", Deputy of Education, Research and Technology, Transportation Research Center (In Persian) (1383/2005).
2. Abedi, M.M. and et al. "Study of the influence of geotextile on increasing shear strength and boring capacity of reinforced clay with geogrid and considering the correlation coefficients", *Science and Engineering Elite Journal*, 2538-581X (In Persian) (1395/2017).
3. Shivraj, M., Choudhary, L. and Dey, A. "Quasi-Static analysis subgrade", *2nd Conference of Transportation Research Group of India* (2013).
4. Wulandari, P.S. and Tjandra, D. "Analysis of geotextile reinforced road embankment using PLAXIS 2D", *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum*, pp. 358-362 (2015).
5. Djellali, A., Houam, A., Saghafi, B. and et al. "Static analysis of flexible pavements over expansive soils", Iran University of Science (2016).
6. Kermani, B., Xiao, M., Stoffels, Sh.M. and et al. "Reduction of subgrade fines migration into subbase of flexible pavement using geotextile", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(4), pp. 377-383 (2018).
7. Lin, Ch., Galinmoghadam, J., Han, J. and et al. "Quantifying and Incorporating the Benefits of Wicking Geotextile into Pavement Design", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **147**(3), p. 04021044 (2021).
8. Halimi, B. and Asadi, B. "Validation the numerical and experimental prediction of parametric models of the reinforced gable with full scale geotextile", *2ed National Conference on Geotechnical Engineering*, Kermanshah (In Persian) (1393/2014).
9. Siavoshnia, M., Kalantari, F. and Shakiba, A. "Assessment of geotextile reinforced embankment on soft clay soil", The 1st International Applied Geological Congress, Islamic Azad University- Mashad Branch (2010).
10. Bergado, D.T., Long, Ph.V. and Srinivasa Murthy, B.R. "A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground", *Geotextiles and Geomembranes*, **20**(6), pp. 343-365 (2002).
11. Majedi, P., Karimi Ghalehjough, B., Akbulut, S. and et al. "Effect of reinforcement on stability and settlement of embankment: A finite element analysis of different kinds of reinforcing and construction conditions", *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, **4**(10), pp. 759-764 (2017).
12. Emami, R. and Badoo, K. "Subsidence Analysis of Shahid Kalantari road in 7+800 kilometer", Msc Thesis, Orumia University (In Persian) (1386/2007).
13. Abbas, S. and Khan, S. "Numerical modelling of highway embankment by different ground improvement techniques", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, (IJIRAE), pp. 2349-2163 (2014).
14. Faheem, H. and Hassan, A.M. "2D PLAXIS finite element modeling of asphalt concrete pavement reinforced with geogrid", *Journal of Engineering Sciences Assiut University*, (2014).
15. Ahirwar, S.K. and Mandal, J.N. "Finite element analysis of flexible pavement with geogrids", *Procedia Engineering*, **189**, pp. 411-416 (2017).
16. Behpor Ghohari, and et al. "Plaxis manual", 2<sup>nd</sup>, Tabriz, Frozsh, (In Persian) (1393/2015).



# اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی $45^\circ$

وحید بابایی نژاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران - آب، دانشگاه آزاد اسلامی

رضا حاجی سید‌محمد شیرازی \* (استادیار)

گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

پساب شور کارخانه‌های آب‌شیرین کن باعث تغیر پ محیط‌زیست می‌شود. در صورت تخلیه‌ی مناسب پساب، آثار زیست‌محیطی شیرین‌سازی آب کاهش می‌یابد. مدل‌های عددی، یکی از بهترین روش‌ها برای شاخت رفتار پساب تخلیه شده در محیط آبی هستند. در پژوهش حاضر، به اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی (SST)  $k - \omega$  و Standard و RNG  $\epsilon - K$  برای تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل‌های دایره و مربع پرداخته شده است. طبق نتایج بدست آمد، مدل‌های SST، Standard و RNG، مقدار  $Z$  را به ترتیب با خطای در حدود  $17 - 24$  و  $12 - 5$  و  $17 - 9$  درصد تخمین زده‌اند. مقدار  $S_m$  توسط مدل Standard با  $24 - 19$  درصد خطأ و توسط مدل SST نیز با  $25 - 30$  درصد خطأ براورد شده است. مدل RNG عملکرد بهتری داشته و مقدار  $S_m$  را با خطای  $13 - 18$  درصد پیش‌بینی کرده است. مدل‌های SST، Standard و RNG، مقدار  $S$  را به ترتیب در حدود  $25 - 35$  و  $20 - 25$  درصد کمتر نسبت به نتایج مطالعه‌ی تجربی ارائه داده‌اند.

واژگان کلیدی: هندسه‌ی نازل، آب‌شیرین‌کن، رقیق‌سازی، جت، پساب.

vahidbabaiynejad@aut.ac.ir  
r-shirazi@srbiau.ac.ir

## ۱. مقدمه

محیط آبی، یکی از روش‌های بررسی آلودگی منابع آب و رسیدن به گزینه‌های مطلوب در راسته با طراحی خروجی پساب است که کمترین آسیب‌های زیست‌محیطی را بر محیط پذیرنده داشته باشد. پساب کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن به دلیل غلظت بالای نمک نسبت به غلظت سیال محیط پذیرنده، پس از تخلیه بالا‌فصله به سمت بستر دریا حرکت می‌کند که این موضوع باعث افزایش غلظت نمک سیال محیط پذیرنده در نزدیکی محل تخلیه می‌شود.<sup>[۱]</sup> برای کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی، پساب تخلیه شده باید در کمترین زمان و مکان ممکن با سیال محیط پذیرنده مخلوط شود. در افزایش میزان اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده، عامل‌های مختلفی تأثیرگذار است، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، روش تخلیه‌ی پساب است.<sup>[۲]</sup> پساب‌های تولیدی به دو صورت سطحی (وله یا کانال) یا مستغرق مایل (شکل ۱) تخلیه می‌شوند. پساب خروجی در دو ناحیه‌ی میدان نزدیک و میدان دور با سیال محیط پذیرنده ترکیب می‌شود. میدان نزدیک از لحظه‌ی خروج پساب از نازل تا لحظه‌ی برخورد پساب به زمین را شامل می‌شود. اما میدان دور از زمان برخورد پساب به زمین شروع می‌شود

امروزه به دلیل کمبود منابع آب قابل شرب در مناطق مختلف جهت توسعه‌ی شهری و روستایی، مشکلات جدی در زمینه‌ی مدیریت و تأمین منابع آب وجود دارد. از جمله راهکارهایی که به حل مشکل اخیر در مناطق ساحلی کمک می‌کند، استفاده از سیستم‌های آب‌شیرین‌کن است. احداث طرح‌های مذکور در کنار آثار مشیتی که در جهت تأمین آب موردنیاز دارند، می‌تواند منجر به بروز مشکلات زیست‌محیطی و تغییر وضعیت طبیعی محدوده نیز شود، که باید تلاش کرد تا آثار منفی مذکور به میزان کمینه برسد. پساب باید به‌گونه‌ی تخلیه شود که در کمترین زمان و مکان ممکن با سیال محیط پذیرنده ادغام شود، چون در غیر این صورت غلظت نمک در اطراف محل تخلیه به شدت بالا می‌رود و این موضوع باعث از بین رفتن آبزیان در اطراف محل تخلیه می‌شود. به همین دلیل، امروزه شبیه‌سازی نحوی پخش پساب‌ها در

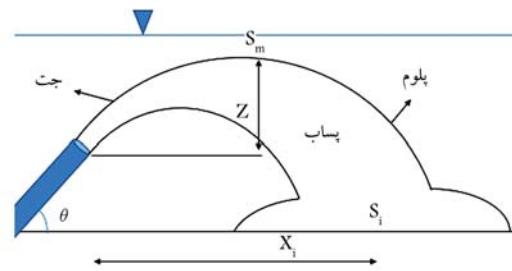
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۴/۷/۱، اصلاحیه ۱۶/۱/۱، پذیرش ۲/۹/۱، ۱۴۰۱/۱/۱۴۰

DOI: 10.24200/J30.2022.61208.3154

استناد به این مقاله:

بابایی نژاد، وحید و حاجی سید‌محمد شیرازی، رضا (۱۴۰۲). «اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^\circ$ »، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۳۹-۲، ص. ۱۱۵-۱۲۳.



شکل ۱. مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل.

فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل را با اختلاف بالای در مقایسه با نتایج تجربی تخمین می‌زنند. همچنین مدل‌های CORJET, VISJET<sup>۳</sup> و میران رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و رقیق‌سازی در محل برخورد پساب به زمین را در محیط ساکن با خطابی در حدود ۶۵-۵۰ درصد (در مقایسه با نتایج مطالعه‌های تجربی) برآورده‌اند.<sup>[۱]</sup> فرناند و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۲]</sup> به بررسی استفاده از دیفیوزر در میران رقیق‌سازی پساب شور تخلیه شده در محیط آبی ساکن پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از مدل CORMIX نشان دادند که استفاده از دیفیوزر برای تخلیه‌ی پساب شور، آثار زیست‌محیطی پساب ذکر شده را به شدت کاهش می‌دهد.<sup>[۳]</sup> جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۴]</sup> با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی (ANSYS-FLUENT) به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل با هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند. طبق نتایج ایشان، هندسه‌ی نازل تأثیر زیادی در میران رقیق‌سازی و طول مسیر حرکت پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی دارد. با توجه به نتایج ایشان، نازل ستاره به دلیل مومنتوم بالا، طول مسیر حرکت زیادی دارد که این موضوع باعث هماوری بیشتر سیال محیط به درون جت و در نتیجه افزایش میران اختلاط پساب با سیال محیط می‌شود.<sup>[۵]</sup> یان<sup>۲</sup> و محمدیان (۲۰۱۹)<sup>[۶]</sup> با استفاده از مدل‌های (k-ε) و Standard (k-ε) RNG به شبیه‌سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده با استفاده از نازل‌های چندپرتویی پرداخته‌اند. طبق نتایج ایشان، مدل‌های عددی قابلیت خوبی در شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های چندپرتویی دارند. همچنین مدل RNG عملکرد بهتری در مقایسه با مدل Standard دارد.<sup>[۷]</sup>

با توجه به محدودیت و هزینه‌ی بالای مطالعه‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های عددی به منظور کاهش هزینه‌ها، امری ضروری است. اولین قدم برای استفاده از مدل‌های عددی، اطمینان از نتایج مربوط به آن مدل است. نتایج مدل‌های انتگرالی به دلیل درنظر نگرفتن آشفتگی جریان، قابل اعتماد نیستند و این مدل‌ها معمولاً میران رقیق‌سازی پساب را در مقایسه با مطالعه‌های تجربی با خطابی تخمین می‌زنند. به همین دلیل در پژوهش حاضر، برای اولین بار به اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی (ω) (k-ε) و Standard (k-ε) RNG با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT به بررسی رفتار پساب شور تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع (با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵°) پرداخته شده است. برای این منظور، نتایج مدل‌های SST, Standard و RNG با نتایج مطالعه‌های مختلف مقایسه شده‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT به شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی ساکن پرداخته شده است. مدل‌های مختلف آشفتگی مانند DNS<sup>۴</sup> و RANS<sup>۵</sup> برای مدل سازی عددی در جریان‌های مختلف قابل استفاده هستند. استفاده از مدل‌های DNS و LES، دقت و هزینه‌ی محاسبات را بالا می‌برد.<sup>[۸]</sup> مدل‌های (RNG, Standard) K-ε (RNG, Standard) که تخلیه شده در شبیه‌سازی رفتار پساب تخلیه شده به صورت جت آرائه شده است. مدل (SST) ω-κ، نیز یکی از مدل‌های پرکاربرد در زمینه‌ی شبیه‌سازی جت تخلیه شده در محیط آبی است و عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رفتار جت دارد.<sup>[۹]</sup> مدل‌های LES, SST, RNG و Standard در شبیه‌سازی محاسباتی کمتری نسبت به مدل‌های DNS دارند و نتایج مناسبی را نیز آرائه می‌دهند.<sup>[۱۰]</sup> به همین دلیل، در پژوهش حاضر برای اولین بار به اعتبارسنجی مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی رفتار پساب

و تا لحظه‌ی اختلاط کامل پساب با سیال محیط پذیرنده ادامه می‌یابد. در میدان نزدیک، پساب در دو مرحله با سیال محیط پذیرنده ترکیب می‌شود. در مرحله‌ی اول، پساب با سرعت بالا و به صورت جت از نازل خارج می‌شود و رفتار آن به عدد فرود جت خروجی و همچنین زاویه‌ی نازل نسبت به افق بستگی دارد. هم‌آوری سیال محیط به درون جت، باعث کاهش غلظت و شار مومنتوم جت (سرعت جت) تقریباً صفر می‌شود. در این حالت پساب از جت به پلوم تبدیل می‌شود (اگر  $F > 1$ ) باشد، رفتار سیال به صورت پلوم است.<sup>[۱۱]</sup> در میدان نزدیک، بسیار بیشتر از میدان دور است.<sup>[۱۲]</sup> پساب در میدان نزدیک، به اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه از پایین دست محل تخلیه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$S = \frac{C_o - C_a}{C - C_a} \quad (1)$$

عدد فرود جت نیز به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{U}{\sqrt{Dg}} \quad (2)$$

شتاب گرانش اصلاح شده به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$g' = g \frac{(\rho_o - \rho_a)}{\rho_a} \quad (3)$$

با توجه به اینکه تخلیه‌ی پساب ناشی از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن و دیگر صنایع به آب دریاها و اقیانوس‌ها باعث آسیب رساندن به محیط می‌شود و آب‌بیان می‌شود، گروهی از پژوهشگران به منظور یافتن روش‌های مناسب تخلیه و کاهش آسیب‌های تخلیه‌ی پساب، آغاز به انجام مطالعاتی در این زمینه کرده و نتایج مختلفی را آرائه داده‌اند. فرناند<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۱]</sup>، به مقایسه‌ی نتایج آرائه شده توسط ۴ مدل انتگرالی MEDVSA برای تخلیه‌ی پساب CORMIX, CORJET, UM<sup>۳</sup> و DNS<sup>۴</sup>، به مقایسه‌ی نتایج آرائه شده توسط ۴ مدل چگال در محیط آبی پرداخته و دریافت‌هاین که همه مدل‌ها به جز مدل UM<sup>۳</sup> نتایج مربوط به رقیق‌سازی پساب، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین را با خطابی بالای در مقایسه با نتایج تجربی برآورده‌اند.<sup>[۱]</sup> پلارو و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۱]</sup>، به منظور اعتبارسنجی مدل‌های CORJET در پژوهش حاضر، نتایج به دست آمده برای تخلیه‌ی پساب چگال در محیط ساکن و بیان می‌کنند. هر سه مدل پارامترهای مربوط به ارتفاع و مشخص شده است که در محیط ساکن، هر سه مدل پارامترهای مربوط به ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت، فاصله‌ی افقی محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت از نازل و

### ۱. آنالیز ابعادی جریان جت با شناوری منفی

آنالیز ابعادی، یک روش مناسب برای کاهش تعداد متغیرهای مؤثر در پدیده‌های فیزیکی است. مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلفی برای بررسی رابطه‌های آنالیز ابعادی مربوط به پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی انجام شده است. جیانگ و همکاران [۲۰۱۹] با درنظر گرفتن یک جریان آشفته در یک محیط آبی ساکن نشان دادند که در آنالیز ابعادی، همه‌ی پارامترها تابعی از دبی جرمی (Q)، شار مومتم (M) و شار شناوری (B) هستند، که توسط یک ضریب تابعی از صورت مقیاس طولی (رابطه‌ی ۷) تعریف می‌شوند:

$$Z, X, S : \int_1(Q, M, B) = \int_2(L_Q, L_M) \quad (7)$$

مقدار مقیاس طولی تخلیه ( $L_Q$ ) و مقیاس طولی مومتم ( $L_M$ ) به صورت

رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شوند:

$$L_Q = Q/M^{1/5}, L_M = (M^{1/75})/(B^{1/5}) \quad (8)$$

با استفاده از تقریب بوسینسک و با توجه به اینکه  $L_M << L_Q$ ، می‌توان گفت:  $L_M = 0.94 D.F$ . بنابراین برای یک زاویه ثابت، پارامترهای مختلف تخلیه‌ی پساب چگال، تابعی از عدد فرود و قطر تخلیه‌کننده هستند که در حالت بی‌بعد، آن‌ها به صورت:  $S_m/F = N_1, S_i/F = N_2, Z/F.D = N_3, X_i/F.D = N_4$  بیان می‌شوند.  $N_1, N_2$  و  $N_4$  ضریب ثابتی هستند که از مطالعه‌های تجربی و عددی محاسبه می‌شوند. هر کدام از آن‌ها براساس نتایج مطالعه‌ی انجام شده در بازه‌ی خاصی از عدد فرود جت خروجی، معتبر هستند.

### ۴. نتایج و بحث

در بخش حاضر نتایج مدل‌های Standard و SST و RNG برای تخلیه‌ی پساب چگال با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی جیانگ<sup>۶</sup> و همکاران [۲۰۱۹] مقایسه شده‌اند. پساب از نازل‌های مربع و دایره در محیط ساکن به صورت مستقر مایل  $9^{\circ} = 45^{\circ}$  تخلیه شده است. میران خطایین دو عدد با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$E = [(J_E - J_N)/J_E] * 100 \quad (9)$$

### ۴. فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده ( $X_i$ )

در شکل ۲، نتایج مربوط به پارامتر بی‌بعد فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین نازل‌های دایره (شکل ۲ الف) و مربع (شکل ۲ ب) با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^{\circ}$  درجه به اعداد فرود ۱۱، ۱۷ و ۲۶ مشاهده می‌شود. مقدار  $D_i/X_i$  برای هر دو نازل با افزایش عدد فرود به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. با افزایش عدد فرود (به دلیل افزایش سرعت جت خروجی)، مومتم جت افزایش یافته و به همین دلیل پساب در فاصله‌ی دورتری از نازل با بسترهای پدیده‌نده برخورد کرده است. [۱۸] با توجه به نتایج جیانگ و همکاران [۲۰۱۹]، مقدار  $D_i/X_i$  برای نازل‌های مختلف مقاومت و مقدار  $D_i/X_i$  برای نازل دایره بیشتر از نازل مربع بوده است. اما مدل‌های عددی، مقدار  $D_i/X_i$  را برای هر دو نازل،

چگال تخلیه شده در محیط ساکن از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^{\circ}$  پرداخته شده است. در مدل RNG، مقدار  $K$  (انرژی جنبشی آشفتگی) و  $\varepsilon$  (برخ استهلاک) به ترتیب از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند: [۱۶]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u} k) = \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u} \varepsilon) = \nabla \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon}^* G_{k,m} - C_{\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (5)$$

که در آن‌ها،  $\mu_{t,m}$  لزجت آشفتگی و  $G_{k,m}$  انرژی سینماتیک آشفتگی هستند. همچنین مقدار  $C_{\varepsilon}^*$  مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

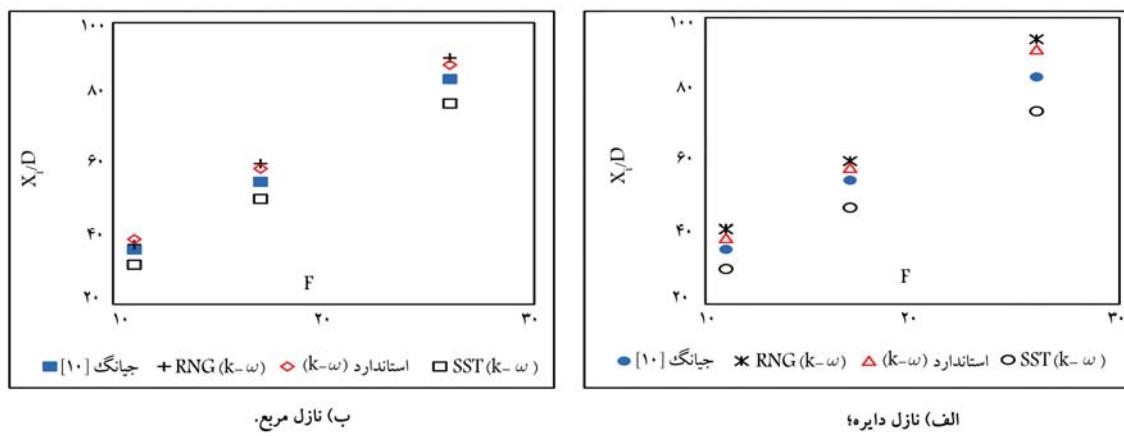
$$C_{\varepsilon}^* = C_{\varepsilon} - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_*} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

مقدار ثابت‌های معادله‌های اخیر، عبارت‌اند از:  $\eta_* = 4/377$ ،  $\beta = 0/012$ ،  $C_{\varepsilon} = 1/44$  و  $\sigma_\varepsilon = 1/68$ . برای اختصار، معادله‌های مدل‌های Standard، SST در نوشتار حاضر ارائه نشده است. اطلاعات کامل در مورد آن‌ها در برخی مراجع [۱۷، ۱۸] موجود است.

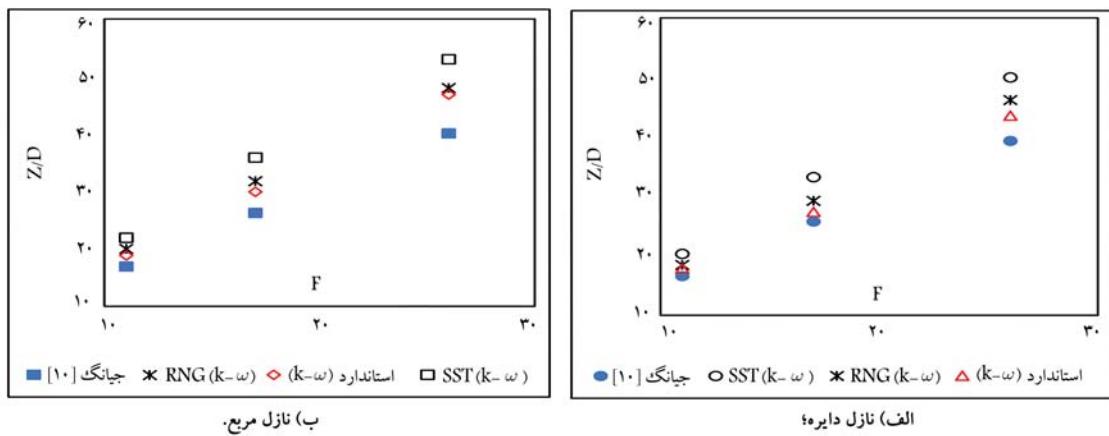
### ۳. مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌های آشفتگی SST و Standard در محیط ساکن از نازل‌های دایره و مربع با عدد فرود ۱۱ ( $U = 0/052 m/s$ ) و ۲۶ ( $U = 0/79 m/s$ ) تخلیه شده است. سپس به منظور اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی، نتایج مدل‌ها با نتایج مطالعه‌های مختلف مقایسه شده‌اند. پساب به صورت جت مستقر مایل ( $\theta = 45^{\circ}$ ) در محیط ساکن از نازل‌های دایره و مربع با عدد فرود ۱۱ ( $U = 0/052 m/s$ ) و ۲۶ ( $U = 0/79 m/s$ ) تخلیه شده است. سطح مقطع هر دو نازل یکسان و برابر  $50/28 mm^2$  با قطر معادل ( $D_e$ ) بوده است.  $D_e$  به عنوان قطر دایره‌ی برابر با مساحت یک ناحیه‌ی غیردایره‌ی تعریف شده است. چگالی پساب تولیدی برابر  $10.26 kg/m^3$  بوده است که در یک محیط آبی با چگالی  $9.8 kg/m^3$  تخلیه شده است. اختلاف دمای بین پساب و سیال محیط پذیرنده، صفر بوده است.

برای شبیه‌سازی، ابتدا هندسه‌ی مدل در نرم‌افزار SPACE-CLAIM [۱۲] می‌شوند. این نرم‌افزار این مدل را با استفاده از ANSYS-MESHING شبیه‌سازی می‌کند. گرفته است. در نزدیکی محل تخلیه از مساحت‌های با طول سیار کم استفاده شده و با افزایش فاصله از محل تخلیه، طول مساحت‌های نیز افزایش یافته است. بعد از مساحت زنی، مدل جهت مقداردهی وارد نرم‌افزار FLUENT شد. برای دهانه نازل از شرط No Slip و برای مرزی Velocity Inlet، برای بسته محل تخلیه از شرط مرزی Symmetry استفاده شده است. برای دیواره‌های اطراف محل تخلیه از شرط مرزی Velocity Inlet استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از مدل‌های آشفتگی SST، Standard و RNG و برای ثابت‌های مدل از پیش فرض‌های نرم‌افزار استفاده شده است. برای مدل‌های Standard و RNG، گام زمانی  $3/00$  ثانیه و برای مدل SST، گام زمانی  $2/00$  ثانیه انتخاب شده است. به جهت اطمینان از توسعه‌یافتنی جریان، مدت زمان شبیه‌سازی،  $100$  ثانیه انتخاب شده است.



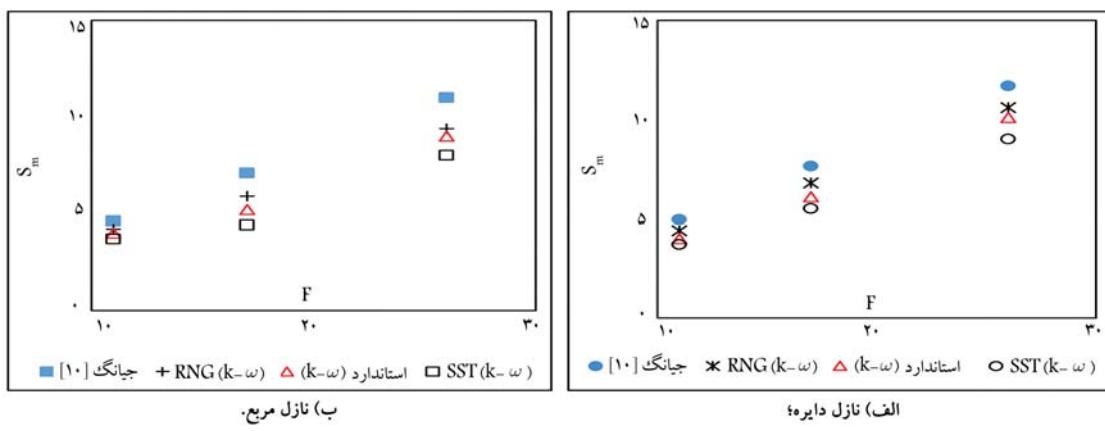
شکل ۲. نتایج مدل های SST، Standard و RNG برای فاصله ای افقی نقطه ای برخورد پس از زمین از نازل های مختلف در مقایسه با مطالعه ای تجربی جیانگ و همکاران [۱۰].



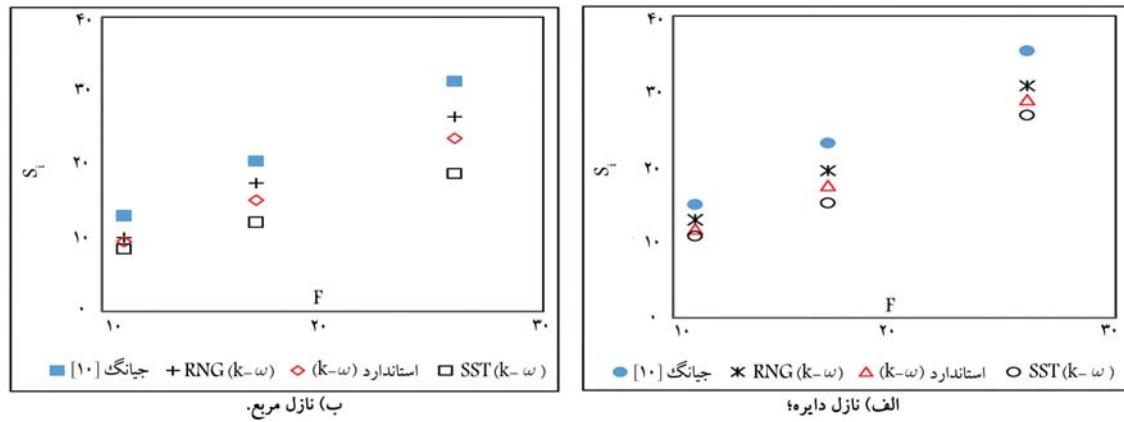
شکل ۳. نتایج مدل های SST و Standard برای ارتفاع صعود بیشینه جت نازل های مختلف در مقایسه با مطالعه ای تجربی جیانگ و همکاران [۱۰].

درجه تخلیه شده است. با افزایش عدد فرود، مقدار  $Z/D$  برای همه نازل ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. با توجه به شکل ۳، مقدار  $Z/D$  برای جت تخلیه شده از نازل مربع بیشتر از نازل دایره بوده است. این موضوع به دلیل هماوری بیشتر سیال به درون جت تخلیه شده از نازل دایره نسبت به نازل مربع بوده است. هماوری سیال به درون جت باعث کاهش سرعت محوری جت و در نتیجه کاهش ارتفاع صعود بیشینه جت شده است.<sup>[۱]</sup> مدل SST مقدار  $Z/D$  نسبت به مدل RNG نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه داده است. مدل درصد خطای نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) مقدار  $X_i/D$  را برای هر دو نازل مذکور در مقایسه با مطالعه ای آزمایشگاهی دست پایین تخمین زده است. مدل SST مقدار  $D_i$  را برای نازل های دایره و مربع به ترتیب با  $14/5$  و  $15$  درصد خطای نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه داده است. مدل Standard مقدار  $X_i/D$  را برای نازل های دایره و مربع به ترتیب با  $7/9$  و  $6$  درصد خطای نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه داده است. نتایج مدل RNG نزدیک به مدل درصد خطای نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) مقدار  $X_i/D$  را برای نازل های دایره و مربع را به ترتیب با  $8/5$  و  $7/4$  درصد خطای برآورد کرده است. با توجه به نتایج، هر سه مدل مقدار  $X_i/D$  را برای نازل های دایره و مربع با خطای قابل قبولی تخمین زده اند که در بین آنها، مدل Standard در مقایسه با مدل های دیگر، عملکرد نسبتاً بهتری داشته است.

**۲.۴. ارتفاع صعود بیشینه جت (Z)**  
در شکل ۳، نتایج به دست آمده توسط مدل های SST، Standard و RNG برای ارتفاع صعود بیشینه جت نازل های دایره و مربع به ترتیب با  $8$  و  $12/4$  درصد خطای نسبت به مطالعه ای تجربی دست بالا پیش بینی کرده است. با توجه به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار  $Z/D$  برای نازل های دایره و مربع به ترتیب با  $8$  و  $12/4$  درصد خطای نسبت به مطالعه ای تجربی دست بالا پیش بینی کرده است. با توجه به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار  $Z/D$  برای نازل های مختلف مختار مقادیر متفاوتی داشته است که این موضوع نشان دهنده تأثیرگذاری هندسه نازل در مقدار  $Z$  است. طبق نتایج، مدل های آشفتگی تأثیر هندسه نازل در مقدار  $Z$  را به خوبی تشخیص داده اند.



شکل ۴. نتایج مدل‌های SST، Standard و RNG برای رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تخلیه شده از نازل‌های مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۹]. [۲۰]

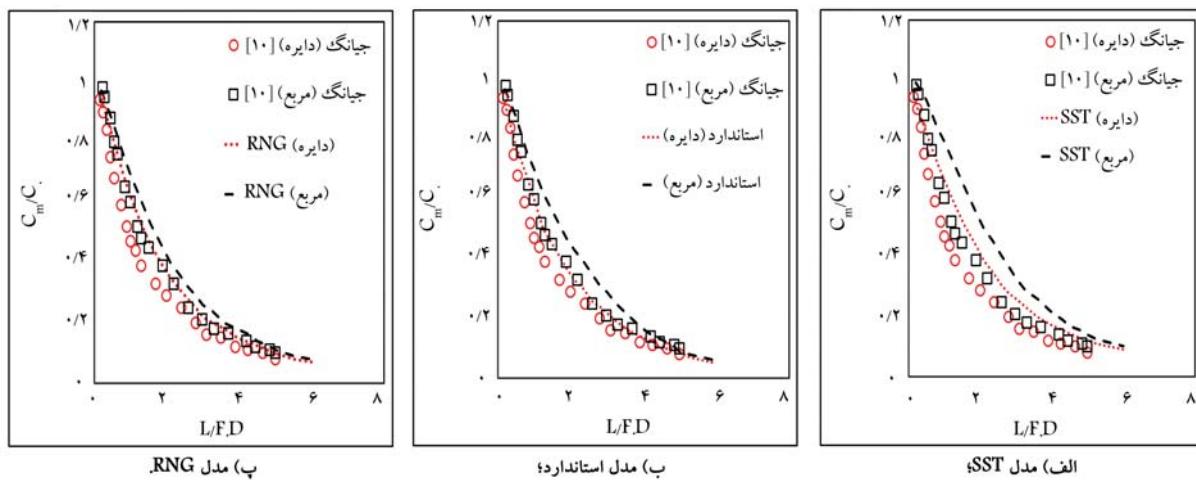


شکل ۵. نتایج مدل‌های SST، Standard و RNG برای رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۹]. [۲۰]

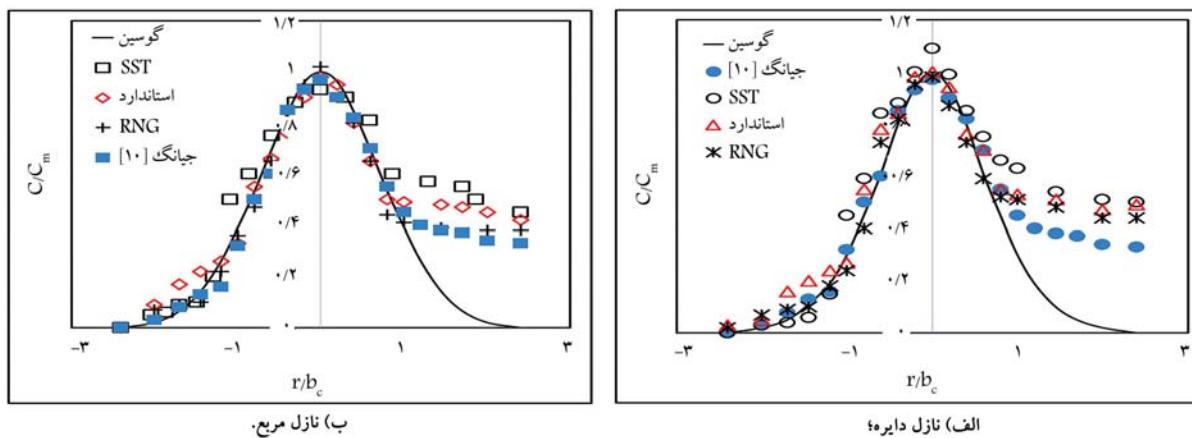
ترتیب با  $18/4$  و  $22/7$  درصد خطأ دست پایین برآورد کرده است. مدل RNG نیز مانند مدل‌های دیگر، مقدار  $S_m$  را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با  $12/3$  و  $17/6$  درصد خطأ پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج ارائه شده، مدل RNG نسبت به مدل‌های دیگر، عملکرد بهتری برای تخمین مقدار  $S_m$  داشته است.

**۴. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین ( $S_i$ )**  
 نتایج مدل‌های SST، Standard و RNG برای رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۹]، در شکل ۵ مشاهده می‌شود. پساب از نازل‌های دایره (شکل ۵(a)) و مربع (شکل ۵(b)) به صورت مستقرق مایل و با عده‌های فرود  $11$ ،  $17$ ،  $21$  و  $26$  در محیط آبی تخلیه شده است. با توجه به شکل ۵، مقدار  $S_i$  با افزایش عدد فرود به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. با توجه به نتایج مدل‌های عددی، مقدار  $S_m$  برای نازل دایره بیشتر از نازل مربع بوده است. رقیق‌سازی پساب به دلیل تنفس برشی ایجاد شده میان جت و سیال محیط پذیرنده و در نتیجه هماوری سیال محیط به درون جت ایجاد می‌شود. هر چه محیط نازل بیشتر باشد، هماوری سیال محیط به درون جت بیشتر می‌شود و در نتیجه میران رقیق‌سازی (اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده) افزایش می‌باید. [۱۹، ۱۸] به همین دلیل مقدار  $S_m$  پساب تخلیه شده با نازل دایره (به دلیل بیشتر بودن محیط نازل) بیشتر از نازل مربع بوده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، هر سه مدل اخیر، مقدار  $S_m$  را دست پایین برآورد کرده‌اند. مدل SST مقدار  $S_m$  را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با  $25$  و  $28/4$  درصد خطأ تخلیه زده و مدل Standard نیز در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۹]، [۲۰] مقدار  $S_m$  را برای نازل‌های دایره و مربع به



شکل ۶. کاهش غلظت در امتداد خط مرکزی جت تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹]



شکل ۷. پروفیل بی‌بعدشده عرضی غلظت در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت مدل‌های آشنازی مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹]

آن مقدار غلظت هر سه نازل بعد از  $4/5 < L/F.D < 4/5$  برابر شده است. با توجه به شکل ۶، مدل RNG کاهش غلظت در امتداد محور جت هر دو نازل را به خوبی و با اختلاف کمی نسبت به نتایج جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹] تخمین زده است. طبق نتایج مدل RNG، کاهش غلظت مرکز جت دایره سریع‌تر از نازل مربع صورت گرفته است. مدل RNG همانند مدل Standard، غلظت مرکز جت تخلیه شده از هر دو نازل را بعد از  $4/5 < L/F.D < 4/5$  برابر در نظر گرفته است. با توجه به شکل ۶، هر سه مدل مذکور، مقدار غلظت در محور جت را در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹] (برای هر دو نازل) دست بالا تخمین زده‌اند.

**۶. غلظت مقطع عرضی جت**  
 نتایج مدل‌های SST، Standard و RNG برای پروفیل عرضی غلظت در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت در فاصله‌های شعاعی مختلف از مرکز جت در شکل ۷ مشاهده می‌شود. پس از به صورت جت از نازل‌های دایره (شکل ۷) و مربع (شکل ۷) با عدد فرود ۱۱ تخلیه شده است. در شکل ۷، سمت راست نمودار، مریب‌شده می‌شود. با عدد فرود ۱۱ تخلیه شده است. در شکل ۷، سمت راست نمودار، مریب‌شده می‌شود. با توجه به شکل ۶، مقدار غلظت مرکز جت هر دو نازل بعد از  $6 < L/F.D < 11$  برابر شده است. در این مورد می‌توان گفت با نزدیک شدن پس از سطح زمین، هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی پس از تأثیر نداشته است. نتایج مدل Standard نیز همانند مدل SST بوده است، فقط با این تفاوت که در

خط  $25/6 < L/F.D < 25/6$  در مقایسه با مدل SST با خطای کمتری تخمین زده است. مدل RNG نیز مقدار  $S$  را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با  $11/5$  و  $20$  درصد خطای نسبت به نتایج مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹] دست پایین پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج ارائه شده، مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر عملکرد نسبتاً بهتری داشته است.

#### ۵.۴. غلظت خط مرکزی جت

در شکل ۶، نتایج مدل‌های SST (شکل ۶الف)، Standard (شکل ۶ب)، و RNG (شکل ۶پ) با نتایج مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰]. [۲۰۱۹] برای کاهش غلظت در امتداد خط مرکزی جت (L) با هندسه‌های مختلف نازل (دایره و مربع) برای عدد فرود ۱۱ مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج مدل SST (شکل ۶الف)، غلظت مرکز جت تخلیه شده از نازل دایره سریع‌تر از نازل مربع کاهش پیدا کرده است. با افزایش مقدار  $L/F.D$ ، غلظت مرکز هر دو جت به یکدیگر نزدیک شده است. با توجه به شکل ۶الف، مقدار غلظت مرکز جت هر دو نازل بعد از  $6 < L/F.D < 11$  برابر شده است. در این مورد می‌توان گفت با نزدیک شدن پس از سطح زمین، هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی پس از تأثیر نداشته است. نتایج مدل Standard نیز همانند مدل SST بوده است، فقط با این تفاوت که در

مدل‌ها از پروفیل گوسی فاصله گرفته‌اند که این موضوع نشان‌دهنده‌ی بیشتر بودن پخش در لبه‌ی خارجی جت نسبت به لبه‌ی داخلی آن است. در لبه‌ی داخلی به دلیل عواملی همچون اثرگذاری بستر محیط‌پذیرنده و اثر کواندا، هماوری سیال محیط به درون جت به سختی انجام شده است. اما در سطح خارجی جت، هیچ مانعی برای هماوری سیال به درون جت وجود نداشته است،<sup>[۱۸]</sup> و به همین دلیل پخش در لبه‌ی خارجی جت بیشتر از لبه‌ی داخلی آن بوده است. مدل‌های عددی مقدار غلظت در مقطع عرضی جت را در مقایسه با نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۹]</sup> به درستی تخمین زده‌اند. اما در بین آن‌ها، مدل‌های Standard و RNG عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با مدل SST داشته‌اند. همچنین با توجه به شکل ۷، پروفیل عرضی غلظت برای هر دو نازل تقریباً یکسان بوده است که این موضوع نشان‌دهنده‌ی عدم تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار غلظت در مقطع عرضی جت است.

## ۷.۴ مقایسه‌ی نتایج مدل‌های مختلف

در بخش حاضر، نتایج بی‌بعد شده مدل‌های آشفتگی با نتایج مطالعه‌های مختلف (آزمایشگاهی و عددی) با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^\circ$  مقایسه شده‌اند (جدول ۱). بیشتر مطالعه‌های انجام شده برای تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل دایره‌یی تخلیه‌ی  $45^\circ$  و به همین دلیل در بخش کنونی، نتایج مربوط به نازل مریع ارائه نشده است. پارامترهای  $S_i/F$  و  $Z/F.D$  در مطالعه‌های تجربی مختلف، مقادیر متفاوتی دارند، به همین دلیل میانگین آن‌ها با نتایج مدل‌های آشفتگی Standard و RNG مقدار متفاوتی دارند، با توجه به جدول ۱، مدل SST مقدار  $X_i/F.D$  را در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی شاون<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۲۰]</sup> و سیپولینا<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۵)،<sup>[۲۱]</sup> با اختلاف سیار کمی تخمین زده است. مدل SST با اختلاف تقریباً ۱۲ درصدی در مقایسه با میانگین مطالعه‌های تجربی، مقدار  $X_i/F.D$  را پیش‌بینی کرده و مدل‌های RNG و Standard نیز مقدار  $X_i/F.D$  را در مقایسه با میانگین مطالعه‌های تجربی به ترتیب با ۱۱ و ۹ درصد خطأ برآورد کرده‌اند. مدل‌های SST و RNG مقدار  $Z/F.D$  Standard به ترتیب با ۹ و ۵ درصد خطأ نسبت به میانگین نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی دست بالا

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌های مختلف برای نازل دایره.

مطالعه‌های مختلف	$S_i/F$	$Z/F.D$	$X_i/F.D$
شاون و همکاران <sup>[۲۰]</sup>	۱/۲۶	۱/۴۷	۲/۸۳
پاپاکنستا و همکاران <sup>[۲۱]</sup>	۱/۵۵	۱/۵۸	۳/۱۶
کیکرت و همکاران <sup>[۱۱]</sup>	۱/۷۱	۱/۶	۳/۲۶
سیپولینا و همکاران <sup>[۲۰]</sup>	-	۱/۶۱	۲/۸۲
جیانگ و همکاران <sup>[۱۰]</sup>	۱/۳۶	۱/۵۱	۳/۲۱
میانگین مطالعه‌های تجربی	۱/۴۷	۱/۵۵	۳/۰۵
مدل انتگرالی CORJET	۰/۶۵	۱/۴۱	۲/۶۵
مدل انتگرالی UMF <sup>۳</sup>	۰/۶۳	۱/۲۴	۲/۲۲
مدل انتگرالی JETLAG	۰/۷۶	۱/۲۷	۲/۶۸
(مطالعه‌ی حاضر) RNG	۱/۲	۱/۷	۳/۴۵
Standard (مطالعه‌ی حاضر)	۱/۱۲	۱/۶۲	۳/۳۵
SST (مطالعه‌ی حاضر)	۰/۹۷	۱/۸۶	۲/۶۸

تخمین زده‌اند. میزان رقیق‌سازی توسط هر سه مدل آشفتگی، دست‌پایین برآورد شده است. مدل RNG میزان رقیق‌سازی را با  $18\%$  خطأ نسبت به میانگین مطالعه‌های آزمایشگاهی تخمین زده و عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های Standard (با  $24\%$  خطأ) و SST (با  $34\%$  خطأ) داشته است.

مدل‌های انتگرالی (CORJET، UMF<sup>۳</sup> و JETLAG) به دلیل زمان و هزینه‌ی محاسباتی پایین، از پرکاربردترین مدل‌ها برای تخلیه‌ی انواع پساب (با استفاده از نازل دایره‌یی) در محیط آبی هستند.<sup>[۱]</sup> با توجه به جدول ۱، مدل‌های انتگرالی، پارامترهای مختلف پساب شور را کمتر از مقادیر مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های آشفتگی تخمین زده‌اند، که این موضوع به دلیل درنظر گرفتن میزان آشفتگی توسط مدل‌های انتگرالی بوده است. مدل‌های آشفتگی میزان رقیق‌سازی در نقطه‌ی برخورد به زمین را در مقایسه با مدل‌ها انتگرالی با خطای کمتری برآورد کرده‌اند.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT به اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی  $(\omega - \epsilon)$ ، SST( $k - \epsilon$ ) و Standard( $k - \epsilon$ ) برای RNG با تخلیه‌ی پساب چگال (به صورت جت مستقر مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی  $45^\circ$  نسبت به افق) با استفاده از نازل‌های دایره و مریع در محیط آبی ساکن پرداخته شده است. برای این منظور، نتایج مدل‌های SST و Standard با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده است: مدل SST، مقدار  $X_i$  را برای نازل‌های دایره و مریع در مقایسه با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی دست‌پایین تخمین زده است. مدل RNG و دایره مریع (با  $\epsilon = k$ )، مقدار  $X_i$  را برای هر دو نازل مریع و دایره دست‌پایین کرده‌اند، که نتایج مدل Standard در مقایسه با مدل RNG به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده است. مقدار ارتفاع صعود پیشینه‌ی جت (Z) توسط هر سه مدل آشفتگی، دست بالا تخمین زده شده است که در بین آن‌ها، نتایج مدل Standard قابل اعتمادتر بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، میزان  $X_i$  برای نازل مریع بیشتر از نازل دایره بوده است که دلیل آن بیشتر بودن محیط دایره نسبت به محیط مریع (با سطح مقطع یکسان) است. بیشتر بودن محیط باعث بیشتر شدن هماوری سیال به درون جت و در نتیجه، کاهش سرعت محوری جت شده است. هر سه مدل مذکور، مقدار رقیق‌سازی پساب ( $S_m$  و  $S_i$ ) را دست‌پایین و محافظه‌کارانه تخمین زده‌اند. نتایج نشان داد که مدل‌های  $\epsilon - K$  نسبت به مدل  $\omega - K$ ، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کنند. مدل  $\omega - K - \epsilon$  (RNG) نسبت به مدل  $\omega - K$ ، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کند. مدل  $\omega - K - \epsilon$  (Standard) و  $\omega - K - \epsilon$  (SST) با خطای کمتری تخمین زده است. مدل RNG عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر در تخمین میزان رقیق‌سازی داشته و میزان رقیق‌سازی را برای هر دو نازل مریع و دایره، در مقایسه با نتایج تجربی به خوبی پیش‌بینی کرده است. غلظت در مرکز جت نیز توسط مدل‌های عددی به خوبی تخمین زده شده است که در بین آن‌ها، مدل‌های Standard و RNG در مقایسه با مدل SST عملکرد بهتری داشته‌اند. نتایج مدل‌های آشفتگی به دلیل درنظر گرفتن آشفتگی جریان، نسبت به نتایج مدل‌های انتگرالی قابل اعتمادتر بوده‌اند. طبق نتایج، مدل‌های آشفتگی ابراری مناسب برای پیش‌بینی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مریع هستند. مدل‌های RNG و Standard رفتار مشابهی داشته و نتایج آن‌ها در مقایسه با نتایج مدل SST قابل اعتمادتر بوده است. مدل RNG مقدار رقیق‌سازی را در مقایسه با مدل‌های دیگر با اختلاف کمتری تخمین زده و به عنوان مدل برتر توصیه شده است.

## فهرست علاوه

$C$	: غلظت اولیه پس از;
$C_a$	: غلظت محیط پذیرنده;
$r$	: فاصله‌ی شعاعی نقطه‌ی مورد نظر از مرکز نازل;
$b_c$	: فاصله‌ی شعاعی که در آن: $C/C_c = 1/e$ ؛
$R$	: طول مش:
$L$	: امتداد طول خط مرکزی جت;
$\theta$	: زاویه‌ی دهانه‌ی نازل نسبت به افق;
$E$	: مقدار خطای دو عدد؛
$J_E$	: داده‌های آزمایشگاهی (عدد بزرگ‌تر);
$J_N$	: داده‌های عددی (عدد کوچک‌تر);
$\rho_a$	: چگالی محیط;
$\rho$	: چگالی پس از;
$A$	: مساحت نازل;
$L_Q$	: مقیاس طول تخلیه;
$L_M$	: مقیاس طولی مومنتوم.
$D$	: قطر نازل دایره‌ی؛
$De$	: قطر معادل سطح دایره‌ی؛
$D$	: قطر نازل;
$U$	: سرعت خروجی پس از نازل;
$S$	: میران رقیق‌سازی؛
$S_m$	: میران رقیق‌سازی پس از در مرکز محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت؛
$S_i$	: میران رقیق‌سازی پس از در مرکز محل برخورد به زمین؛
$X_i$	: فاصله‌ی افقی مرکز محل برخورد پس از زمین از نازل؛
$Z$	: ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت از نازل؛
$F$	: عدد فرود تخلیه؛
$K$	: انرژی جنبشی آشفتگی؛
$\epsilon$	: نرخ استهلاک؛
$C$	: غلظت در نقطه‌ی مورد نظر؛
$C_c$	: غلظت در مرکز جت؛

## پانوشت‌ها

1. Loya-Fernandez
2. Yan
3. Direct Numerical Simulation (DNS)
4. Large Eddy Simulation (LES)
5. Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)
6. Jiang
7. Choi
8. Cipollina

## منابع (References)

1. Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. "Inclined negatively buoyant discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(5), pp. 545-554 (2007).
2. Ramakanth, A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. "Laboratory study to quantify lower boundary influences on desalination discharges", *Desalination*, **529**, p. 115641 (2022).
3. Wang, X. "Numerical modeling of inclined dense jets in stagnant water on a sloped bottom", Doctoral dissertation, Universit d'Ottawa/ University of Ottawa (2020).
4. Shao, D. and Law, A.W.K. "Mixing and boundary interactions of 30 and 45 inclined dense jets", *Environmental Fluid Mechanics*, **10**(5), pp. 521-553 (2010).
5. Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. "Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements", *Journal of Hydraulic Research*, **49**(1), pp. 13-22 (2011).
6. Shrivastava, I. and Adams, E.E. "Pre-dilution of desalination reject brine: Impact on outfall dilution in different water depths", *Journal of Hydro-Environment Research*, **24**, pp. 28-35 (2019).
7. Loya-Fernandez, A., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Mendez, C. and et al. "Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges", *Desalination*, **431**, pp. 27-34 (2018).
8. Loya-Fernandez, A., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Mendez, C. and et al. "Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain", *Desalination*, **286**, pp. 217-224 (2012).
9. Palomar, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. "Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools", *Desalination*, **290**, pp. 28-42 (2012).
10. Jiang, M., Law, A.W.K. and Song, J. "Mixing characteristics of inclined dense jets with different nozzle geometries", *Journal of Hydro-environment Research*, **27**, pp. 116-128 (2019).
11. Jiang, M., Chen, W. and Law, A.W.K. "Mixing characteristics of 45° inclined duckbill dense jets in co-flowing currents", *Journal of Hydro-environment Research*, **36**, pp. 77-86 (2021).
12. Ansys, Inc. ANSYS Fluent User's Guide, Version 2019 R3 (2019).
13. Yan, X. and Mohammadian, A. "Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports", *Water*, **11**(10), p. 2077 (2019).
14. Wilcox, D.C. "Turbulence modeling for CFD (Vol. 2, pp. 103-217)", La Canada, CA: DCW industries (1998).

15. Yan, X., Ghodoosipour, B. and Mohammadian, A. "Three-dimensional numerical study of multiple vertical buoyant jets in stationary ambient water", *Journal of Hydraulic Engineering*, **146**(7), p. 04020049 (2020).
16. Meng, G. and Wenxin, H. "Numerical simulation of a round buoyant jet in a counterflow", *Procedia Engineering*, **154**, pp. 943-950 (2016).
17. Launder, B.E. and Spalding, D.B. "The numerical computation of turbulent flows", *In Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, **2**, pp. 96-116 Pergamon (1983).
18. Choi, K.W., Lai, C.C. and Lee, J.H. and et al. "Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(1), p. 04015041 (2016).
19. Roberts, P.J. and Toms, G. "Inclined dense jets in flowing current", *Journal of Hydraulic Engineering*, **113**(3), pp. 323-340 (1987).
20. Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and et al. "Benchmark investigation of inclined dense jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**(11), pp. 1017-1022 (2005).

## \* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوستونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تامی معادلات، علام ریاضی، رابطه ها الزاما فقط در محیط Mathtype) ارائه شود و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنمایی سایت مجله ای http://journal.sharif.ir به دفتر مجله ارسال شود.

\* ضمن معرفی نویسنده مسؤول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کالیه نویسنده کان قید شود.

\* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسمی نویسنده مسؤول و ذکر نویسنده مسؤول، درج آخرین درجه علمی کالیه نویسنده کان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

\* سایر اجزای اصلی مقاله، نظری مقدمه، عنوانی بخش های اصلی و زیربخش ها، نتیجه گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه - با احتساب شکل و نمودار - باشد.

\* کلیه عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

**نکته:** از آنجا که مطالب مجله در ستون های ۸/۵ سانتی متری آراسته می شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی متر با خصامت کادر ۸px و خط نمودار ۶px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با 600 Resolution JPG یا Tif امکان پذیر است.

\* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متدال فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

**یادآوری مهم و ضروری:** با توجه به یکسان سازی شکل های کالیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کاترور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با فرمت جنرال (عدد معمولی) ارائه شود (طبق شکل های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

\* کلیه متابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل)، و در متن مقاله در داخل کروشه [ ] مشخص شود. در بخش مراجع کالیه متابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انها واژه (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, 4(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The perforation of circular plat with four sided pyramidal - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

## راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

**الشريف**

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شريف» از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعترافی سطح داشن نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شريف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدین در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفت، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با تقدیم و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به تابع تازیمی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار بر جسته‌ی علمی و فنی باشند.

in coastal areas is the use of water desalination systems. The construction of these projects, in addition to the positive effects they have on water supply, can also lead to environmental problems and change the natural state of the area being used. Therefore, efforts should be made to minimize these negative effects. Given the limitations and high costs of laboratory studies, numerical models are necessary to reduce costs. This research focuses on the validation of the SST ( $k - \omega$ ), Standard ( $k - \varepsilon$ ), and RNG ( $k - \varepsilon$ ) turbulence models using ANSYS-FLUENT software to investigate the behavior of saline effluent discharged from circular nozzles and square nozzles (with a discharge angle of 45 degrees). For this purpose, the results of SST, Standard, and RNG models are compared with the results of different studies. To simulate the behavior of the effluent, the model geometry was first designed in SPACE-CLAIM software, and then meshed using ANSYS-MESHING. Short meshes were used near the discharge site, and the length of the meshes increased

as the distance from the discharge site increased. After meshing, the model was entered into the FLUENT software for quantification. The Velocity Inlet boundary condition was used for the nozzle opening, the No Slip boundary condition was used for the bed of the discharge area, and the Symmetry boundary condition was used for the walls around the discharge area. The results of turbulence models are more reliable than the results of integral models due to the consideration of flow turbulence. Based on the results, turbulence models are a suitable tool for predicting the behavior of concentrated wastewater discharged from circular and square nozzles. Standard and RNG models have similar behavior, and their results are more reliable compared to SST model results. The RNG model estimates the dilution value with a smaller difference compared to other models and is recommended as the best model.

**Key Words:** Nozzle geometry, desalination, dilution, jet, effluent.

of 12, 18, and 24 stories, modeled using OpenSees software in 2-dimensional frameworks. A total of 1071 nonlinear time-history analyses are carried out, and the results indicate that the conventional practice of placing the secondary joint in the mid-height is inadequate for the 12-story frame under NF-Pulse records, causing a 15.1% deviation from the optimal state of overturning moment. In most cases, placing the joint at 40% height reduces all four demands. To evaluate demand sensitivity, the standard deviation of their percentage difference with the optimal state is computed, with higher values indicating greater unpredictability. Among the sets of records, FF and among demands, overturning moment exhibit the highest sensitivity to the location of the secondary joint, with changes in overturning moment being correlated with shear. Therefore, we suggest selecting overturning moment as an optimization objective function.

**Key Words:** Bi-rocking system, modified-modal- superposition method, optimizing place of second rocking joint, residual inter-story drift, peak floor-acceleration.

geotechnics, given the high compressibility and low shear strength of loose soils, leading to long-term deformation and embankment instability, which decreases the useful life of the structure. Various methods, including soil reinforcement, have been proposed to improve embankment stability. This paper aims to improve the reliability coefficient of embankments reinforced by geotextile at different angles and placed on soft soil using the finite element method and the PLAXIS software. The results show that changing the geotextile angle from 0 to 0.95 degrees in sandy soil causes a 53% decrease in the embankment's safety factor, whereas this change had little effect on clay soil, with a 2.9% decrease in the safety factor by increasing the geotextile angle from 0 to 2.01 degrees. Furthermore, increasing the resistance of geotextile by about 2.86 times increases the reliability factor by an average of 14.31% in sandy soil and 2.125% in clay soil. This increase in geotextile resistance also raises the embankment's settlement limit until the moment before rupture by 60.64%.

**Key Words:** Stability of the embankment, improving the reliability, geotextile, reinforcing soil, PLAXIS software.

## NUMERICAL MODELING OF THE GEOTEXTILE POSITIONING ANGLE IN THE BASE AND SUBBASE LAYER OF THE ROAD PAVEMENT

**R. Moayedfar**(corresponding author)

r-moayedfar@araku.ac.ir

**M. Motahari**

m-motahari@araku.ac.ir

**B. Serydani**

behzad735421@yahoo.com

**Faculty of Engineering  
Arak University**

**DOI:10.24200/J30.2022.60708.3119**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 105-113, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 30 July 2022; received in revised form 19 November 2022; accepted 3 December 2022.

### Abstract

Geotextile is a useful member of the geosynthetics family, characterized by high tension resistance, good filtration, and flexibility. One of its main applications is as a separator and border creator between base and subbase materials, preventing the entrance of aggregates from other layers and providing good filtering at the border of the base and subbase layer. Designing and constructing embankments on loose subgrades is a critical issue in

## VALIDATION OF TURBULENCE MODELS FOR DENSE EFFLUENT DISCHARGED FROM CIRCULAR AND SQUARE NOZZLES WITH A DISCHARGE ANGLE OF 45°

**V. Babaiynejad**

vahidbabaiynejad@aut.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering-Water**

**Amirkabir University**

**R. Haji Seyed Mohammad Shirazi**(corresponding author)

r-shirazi@srbiau.ac.ir

**Dept. of Natural Resources and Environment**

**Science and Research Branch**

**Islamic Azad University**

**DOI:10.24200/J30.2022.61208.3154**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 115-123, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 16 October 2022; received in revised form 7 November 2022; accepted 3 December 2022.

### Abstract

Today, due to the lack of potable water resources in different areas for urban and rural development, serious problems arise in the field of water resources management and supply. One solution to help solve this problem

model is a significant step toward more accurate and practical seismic damageability simulations.

**Key Words:** Rapid visual screening, seismic damageability, reinforced concrete structures, optimization, GuASPSO, fuzzy logic, self-organizing map.

## ESTABLISHING A NONLINEAR OPTIMIZATION METHOD FOR STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS

**M. Ghorbanzadeh**

std\_mehrshad.ghorbanzadeh@knu.ac.ir

**P. Homami** (corresponding author)

homami@knu.ac.ir

**M. Shahrouzi**

shahruzi@knu.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Faculty of Engineering**

**Kharazmi University**

**DOI:10.24200/J30.2022.61036.3138**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 81-91, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 September 2022; received in revised form 31 October 2022; accepted 5 November 2022.

### Abstract

The Hasofer-Lind and Rackwitz-Fiessler (HLRF) algorithm, which is based on the first-order reliability method (FORM), is widely used to estimate failure probability, reliability index, and design point in structural reliability analysis. However, due to the high nonlinearity of the limit state surface, the HLRF algorithm can be unstable. To address this issue, this paper proposes an optimization method to locate and estimate the design point in the standard normal space and calculate the corresponding failure probability. The reliability problem is solved using sequential least squares programming (SLSQP) to improve accuracy, robustness, and efficiency. SLSQP replaces the quadratic programming problem with a linear least-squares problem, using a stable LDL factorization of the Hessian of the Lagrangian equation. The initial optimization problem is converted into a minimum distance optimization problem with a lower bound constraint. To eliminate linearization errors, the probability expectation method with rotation directions space is employed. The proposed algorithm is demonstrated in several benchmark numerical examples with both explicit and implicit limit state functions. Its fast convergence rate is a notable feature of the proposed algorithm,

which enhances its competitiveness in structural reliability analysis.

**Key Words:** Structural reliability analysis, failure probability, numerical optimization, probability expectation, sequential least squares programming.

## OPTIMIZED DESIGN OF BI-ROCKING STEEL BRACED FRAMES VIA CHANGING THE SECOND ROCKING JOINT LOCATION

**M. Rafiei Mohammadi**

m\_rafie@civileng.iust.ac.ir

**V. Broujerdian** (corresponding author)

broujerdian@iust.ac.ir

**E. Mohammadi Dehcheshmeh**

esmhd.dehcheshmeh@gmail.com

**School of Civil Engineering**

**Iran University of Science and Technology**

**DOI:10.24200/J30.2022.61242.3156**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 93-103, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 October 2022; received in revised form 20 November 2022; accepted 26 November 2022.

### Abstract

After an earthquake, plastic deformation of structural elements can render repairing uneconomical, thus necessitating the adoption of low-damage systems that mitigate the residual drift of structures. Among these, self-centering rocking-core systems have been extensively explored. However, due to the geometric nonlinearity of such systems, higher modes dominate their seismic responses, which necessitates the incorporation of secondary rocking joints to minimize their effects. Nevertheless, identifying the optimal location of such joints is challenging, given the redistribution of internal forces between the rocking plates. In this context, a bi-rocking steel braced frame is designed using the modified modal superposition method (MMS), accounting for higher mode effects. Subsequently, the secondary joint is moved floor by floor to determine its optimal location that minimizes shear, overturning moment, peak floor acceleration, and drift. To represent damage to non-structural components, peak floor acceleration and drift are chosen as key parameters. Three sets of seven ground motions, namely Far-Field (FF), Near-Field-Pulse (NF-Pulse), and Near-Field-no-Pulse (NF-No Pulse), are considered for frames

**M. Khanahmadi**

mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir  
**Dept. of Civil Engineering**  
**University of Kurdistan**  
**DOI:10.24200/J30.2022.61052.3143**

Sharif Civil Engineering Journal  
 Volume 39, Issue 1, Page 59-69, Original Article  
 © Sharif University of Technology

- Received 6 September 2022; received in revised form 21 November 2022; accepted 3 December 2022.

**Abstract**

In order to examine and monitor the health of structures, it is essential to identify and pinpoint the site of damage in structural elements and connections. After timely detection of various damage situations, it is possible to prevent the spread of damage by repairing the damage or, if necessary, replacing damaged elements, thereby mitigating potential social and economic losses. The construction industry is increasingly employing thin steel wall plates, particularly as steel plate shear walls. Damage to plate members, particularly steel plate shear walls, can be transferred to other elements and cause overall structural damage. Consequently, this article discusses detecting and determining various damage positions in the steel plate element. ABAQUS finite element analysis software was employed to model both the damaged and undamaged states of the steel plate. Subsequently, dynamic modal information was extracted, including natural frequencies and vibration mode shapes. The study observed a difference in frequency values between the primary and secondary states and an asymmetry of the angle matrix between the primary and secondary forms of the vibration modes due to the presence of damage. After that, a detection algorithm based on the use of primary and secondary shapes of two-dimensional vibration modes and continuous wavelet transform with a one-dimensional theoretical background was proposed, and the detection indices DI-L (detection index of longitudinal extension) and DI-W (detection index of transverse extension) were posited and calculated using the MATLAB.R2021a program. The graphical results of the investigations pertaining to the two proposed indices demonstrated the effectiveness and capability of two-dimensional detection of various damage situations, as peaks resulting from the values of detection indicators appeared in the form of irregularities and disturbances in the damage situations. In addition, the identification values achieved using the detection index matrix for the longitudinal extension were more accurate than those obtained using the detection index matrix for the transverse extension.

**Key Words:** Structural health monitoring, damage identification, 1-D continuous wavelet transform, vibration mode shapes, damage detection index.

## IMPROVING THE PERFORMANCE OF A FUZZY LOGIC MODEL IN SEISMIC DAMAGE PREDICTION USING A GUIDED ADAPTIVE SEARCH-BASED PARTICLE SWARM ALGORITHM OPTIMIZATION

**O. Zaribafian**

zaribafian@yahoo.com

**T. Pourrostam** (corresponding author)  
 pourrostam@gmail.com

**Dept. of Civil Engineering**

**Central Tehran Branch, Islamic Azad University**

**M. Fazilati**

fazilati2001@pci.iaun.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Najafabad Branch, Islamic Azad University**

**A. S. Moghadam**

moghadam@iiees.ac.ir

### International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)

**A. Golsoorat Pahlaviani**

ali.golsoorat\_pahlaviani@iauctb.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Central Tehran Branch, Islamic Azad University**

**DOI:10.24200/J30.2022.61047.3142**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 71-80, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 6 September 2022; received in revised form 30 October 2022; accepted 9 November 2022.

**Abstract**

This paper proposes a fuzzy logic model to improve the accuracy of seismic damageability simulations for buildings. The Rapid Visual Screening (RVS) method is often used to evaluate seismic damages in buildings due to its speed and simplicity, but it can be subject to human error and other uncertainties. The proposed model uses fuzzy logic to address these uncertainties and build a more robust simulator for estimating the seismic damage state. To fine-tune the hyperparameters of the fuzzy model, the Guided Adaptive Search-based Particle Swarm Optimization (GuASPSO) algorithm is used, which has been shown to be efficient and effective. The model is applied to simulate the damageability of reinforced concrete buildings damaged in the 2017 Sar-Pol-Zahab earthquake in Iran, and the results are compared to those obtained using two popular meta-heuristic optimizers, the PSO and GWO algorithms. The results demonstrate that the GuASPSO algorithm outperforms the other two in terms of performance metrics in the training, validation, and total data sets. The proposed

**Abstract**

This paper proposes a simplified solution for the nonlinear consolidation of soft soils under a wide range of loading using the disturbed state concept. The mechanical properties of soil are stress-dependent, and this affects the soil's compressibility and permeability. However, Terzaghi's conventional theory of consolidation neglects these changes in soil parameters during the consolidation process, which limits its applicability beyond materials with constant parameters. Other sophisticated theories for nonlinear consolidation require advanced calculations that cannot be performed without special programs and codes. The proposed method uses the disturbed state concept to determine the solutions of the nonlinear partial differential equation of consolidation based on the solutions of the linear consolidation partial differential equation in two reference states and a sigmoid form state function for interpolation. The state function is derived using the nonlinear finite difference method. The proposed method accounts for both material nonlinearity arising from changes in the compressibility and permeability of the soil layer and geometrical nonlinearity arising from changes in the thickness of the soil layer. The proposed method adopts the solutions of Terzaghi's theory of consolidation to the solutions of nonlinear consolidation. The results of the proposed method are verified using the results of the nonlinear finite difference method and laboratory data published in the literature. The verification of the results indicates the accuracy of the proposed method.

**Key Words:** Nonlinear consolidation, disturbed state concept, compressibility, permeability, degree of consolidation.

## THE EFFECT OF NOZZLE GEOMETRY ON THE BEHAVIOR OF SALINE EFFLUENT DISCHARGED IN AN INCLINED SUBMERGED FORM WITH AN ANGLE OF 60°

**V. Babaiynejad**

vahidbabaiynejad2@gmail.com

**Dept. of Civil Engineering-Water Amirkabir University**

**B. Khorsandi**(corresponding author)

b.khorsandi@aut.ac.ir

**Dept. of Civil and Environmental Engineering Amirkabir University of Technology**

**DOI:10.24200/J30.2022.61005.3137**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 49-57, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 4 September 2022; received in revised form 31 October 2022; accepted 5 November 2022.

**Abstract**

In recent decades, the increase in desalination plant construction along coastlines due to climate change and fresh water resource depletion has been a major concern. The discharge of concentrated wastewater directly into the sea has been shown to cause irreversible damage to the environment. Therefore, the use of appropriate dischargers is crucial in reducing the negative environmental effects of this waste. In this study, ANSYS-FLUENT software was used to simulate the behavior of condensed effluent discharged from circular, triangular, and diamond nozzles. To investigate the effect of nozzle geometry, diamond and triangle nozzles with different dimensions (triangle 1, triangle 2, diamond 1, and diamond 2) were modeled. The effluent was discharged obliquely at a discharge angle of 60 degrees to the horizon in both static and dynamic water environments. The K- $\epsilon$  turbulence model (RNG) was employed for modeling, and the results were validated by comparison with experimental data. The results showed that the height of the maximum jet ascent and the horizontal distance of the point of impact of the effluent with the ground decrease, while the dilution rate of the effluent increases as it leaves the nozzle in a sheet. Moreover, the results indicated that the spreading rate at the inner edge of the jet is lower than that at the outer edge of the jet due to the presence of the bed and the Coanda effect. However, the nozzle geometry was found to have no effect on the reduction of concentration in the center line of the jet. The use of diamond 2 and triangle 2 nozzles for the discharge of concentrated wastewater was found to reduce environmental damage. The findings of this study provide insight into the design of appropriate dischargers for desalination plants and highlight the importance of considering environmental impacts when discharging waste water.

**Key Words:** Jet, effluent, plume, dilution, desalination.

## DAMAGE IDENTIFICATION IN STEEL PLATES USING A DETECTION ALGORITHM BASED ON 1D CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM AND 2D VIBRATION MODE SHAPES

**A. Mamazizi**(corresponding author)

a.mamazizi@uok.ac.ir

duces energy consumption and minimizes harmful effects, aligning with the goals of sustainable development. The serviceability characteristics of a structure depend on several parameters that evaluate the thermal behavior of materials. Dynamic heat-transfer analyses of structural components play a critical role in designing energy-efficient new buildings. Thermal conductivity is a key dynamic parameter worth mentioning. However, the thermal conductivity of materials is highly dependent on operating temperatures and moisture content, and little information is available on the performance of insulation materials under actual climatic conditions. Furthermore, temperature profiles in materials are a function of the inside and outside temperatures and thermo-physical properties of the materials. When a heat wave strikes the outer surface of a wall, it travels through the wall and deforms based on the material properties before reaching the inner surface. This phenomenon is referred to as "time lag" and is a critical factor in understanding the thermal behavior of building materials. This study employs an advanced network analysis to determine the most energy-efficient structural panel and steel for constructing the structural components. The selection of the optimal structure is based on key criteria such as thermal conductivity of the panels, time lag, weight of the structure, and cost. By utilizing the Analytic Network Process (ANP) method, the best energy-efficient structure can be chosen. To calculate these parameters, a three-span silo was simulated in the SAP2000V19.2 software.

**Key Words:** Silos, building panels, energy reduction, thermal conductivity parameters, optimization.

- Received 22 August 2022; received in revised form 31 October 2022; accepted 9 November 2022.

### Abstract

The diverse carbonate materials found in Iran exhibit varied physical, mechanical and chemical behaviors, making their stabilization a subject of great interest. Further research is necessary to investigate their properties. The engineering properties of problematic soils, like carbonate sand, can be enhanced by using suitable chemical soil stabilizers. Colloidal nano-silica solution injection in carbonate soils is highly beneficial, especially in small pores where injecting cement slurry is not feasible. Colloidal nano-silica is a suspension of silica nanoparticles in water, having viscosity similar to water, facilitating injection into such soils. Moreover, it is environmentally and chemically non-toxic. In this study, carbonate soil with varying silt contents (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%), different nano-silica concentrations (10%, 20%, and 30%) and an average density of 50% were investigated for injectability along the Persian Gulf coast (Bushehr port). Injection was possible at a pH of about 6.5 with all concentrations, especially at 30%. Unconfined compression tests were carried out at different silt contents, curing periods, and nano-silica concentrations to determine the optimal injection concentration. The results showed that the unconfined compression resistance increased with higher concentrations of nano-silica, with 30% concentration demonstrating the best performance. Injecting colloidal nano-silica in carbonate soils, particularly silty sand, can serve as a stabilizing agent in construction.

**Key Words:** Bushehr carbonate silty sand, colloidal nano-silica, grouting, stabilization, unconfined compression test.

## INJECTABILITY OF COLLOIDAL NANO-SILICA IN BUSHEHR CARBONATE SAND WITH DIFFERENT SILT CONTENT

**E. Azini**

e\_azini@yahoo.com

**R. Ziae Moayed** (corresponding author)

ziaie@eng.ikiu.ac.ir

**S.A. Naeini**

naeini@eng.ikiu.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Imam Khomeini International University, Qazvin**

**DOI:10.24200/J30.2022.60975.3135**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 29-38, Original Article

© Sharif University of Technology

## A DISTURBED STATE CONCEPT-BASED SOLUTION FOR NONLINEAR CONSOLIDATION OF SOILS

**A. Ouria**

aouria@uma.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**University of Mohaghegh Ardabili**

**DOI:10.24200/J30.2022.60990.3136**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 39-47, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 August 2022; received in revised form 22 October 2022; accepted 9 November 2022.

designing negative stiffness systems and reducing the responses. The presented findings suggest the potential of using negative stiffness devices as an effective solution to reduce structural response during seismic events.

**Key Words:** Performance-Based design, negative stiffness device, benchmark structures, passive control.

## PREDICTION OF DETERIORATION COMPONENTS IN REINFORCEMENT CONCRETE COLUMNS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES

**A. Khoshkroodi**

khoshkroodi@iauz.ac.ir

**H. Parvini Sani**(corresponding author)

hosseini.parvini\_sani@iauz.ac.ir

**M. Aajami**

aajami@iauz.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Zanjan Branch, Islamic Azad university**

**DOI:10.24200/J30.2022.60697.3116**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 15-22, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 13 July 2022; received in revised form 29 October 2022; accepted 3 December 2022.

### Abstract

New performance-based design approaches in earthquake engineering aim to accurately and transparently assess the risk of loss of life and structural damage. Advanced analytical models are used to determine the performance of structures, with one of the key components being the deterioration of structural members under seismic loads. Multilinear backbone curves are commonly used in regulations and software to simplify the behavior of members subjected to seismic loads, including the deterioration components. This paper proposes using machine learning models to predict the deterioration components of reinforced concrete (RC) columns. A dataset of 255 experimental data from 1973 to 2002 is used to predict the deterioration components using different machine learning methods. The RC columns have three failure modes: Bending, shearing, and bending-shearing. The deterioration components predicted by the analytical relationships are compared with the results obtained from machine learning methods. The dataset includes 14 features as model inputs and 3 features as outputs. The paper examines three algorithms for predictions: AdaBoost, artificial neural network (ANN), and random forest (RF).

The analysis is conducted using Python software. The results show that the random forest model has an accuracy rate of 91% for the Plastic chord rotations from yield to cap( $\theta_p$ ), 81% for Post-capping plastic-rotation capacity from the cap to point of zero strength ( $\theta_{pc}$ ), and 88% for normalized energy dissipation capacity ( $\lambda$ ) compared to other algorithms.

Also, the results obtained from the predicting models have considerable accuracy compared to analytical relationships. Compared to analytical models, the random forest model has significantly been improved in terms of root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and coefficient determination ( $R^2$ ). These improvement are 79% ( $\theta_p$ ), 75.3%  $\theta_{pc}$  and 46.5% ( $\lambda$ ) in ( $R^2$ ), 63.7%  $\theta_p$ , 48.5%  $\theta_{pc}$  and 86.7 ( $\lambda$ ) in (RMSE), 64%  $\theta_p$ , 92%  $\theta_{pc}$  and 89.4% ( $\lambda$ ) in (MAE). The results showed that the random forest model has been significantly improved the accuracy of determination of deterioration components compared with analytical models.

**Key Words:** Deterioration of components, machine learning, artificial intelligence, artificial neural network, random forest.

## OPTIMIZATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL STRUCTURES USING ANALYTIC NETWORK PROCESS (ANP)

**S. Samadianfard**

sima.samadianfard@sharif.edu

**V. Toufigh**(corresponding author)

toufigh@sharif.edu

**Dept. of Civil Engineering**

**Sharif University of Technology**

**DOI:10.24200/J30.2022.60619.3120**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 23-27, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 13 July 2022; received in revised form 8 October 2022; accepted 7 November 2022.

### Abstract

The ever-increasing energy consumption rate in the construction industry has prompted structural engineers and designers to explore innovative ways to reduce energy consumption throughout the construction-to-demolition cycle. To achieve this, improving the thermal and mechanical characteristics of structural and non-structural elements, along with expanding the application of these materials, is paramount. This approach significantly re-

# Abstracts of Papers in English

## GENERATION OF PERFORMANCE SPECTRA FOR DESIGNING NEGATIVE STIFFNESS DEVICES AND THEIR APPLICATION IN BRIDGES UNDER EARTHQUAKES

M. Mavizi Sani

mmsani.pe@gmail.com

A. Karamodin (corresponding author)

a-karam@um.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Ferdowsi University of Mashhad

DOI:10.24200/J30.2022.60333.3096

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 1, Page 3-13, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 14 June 2022; received in revised form 31 October 2022; accepted 14 November 2022.

### Abstract

In this study, the authors present the performance spectrum (P-Spectra) for an idealized shear SDOF equipped

with two types of passive negative stiffness devices. The first device includes a pre-compressed spring, gap springs at the bottom, and a combination of frame elements and plates that hold the parts together. The other device consists of three gears designed to control the movement of the primary gear and affect the response of the structure. Negative stiffening devices are used to reduce the stiffness of the system and increase the displacement of the structure. To prevent displacement increase, a viscous damper with 20% damping is used in parallel to the negative stiffness device. The SDOF structure has a post-yield stiffness of 5% pre-yield stiffness. Using the NLA method, P-Spectra for 0.5 to 2.5 periods are plotted for different mechanical parameters of negative stiffness devices. To construct the performance spectrum, dimensionless parameters of spring stiffness ratio to structural stiffness and yield strength ratio of the device and structure to the structure are used. The performance spectrum is investigated in designing the parameters of the negative stiffness device and its effects on reducing the response of structures. The authors also use a benchmark highway bridge structure in MATLAB software to investigate the effectiveness of systems designed using this method. The obtained target parameters demonstrate the desired results of this method in

# Civil Engineering

**Sharif**

1

Spring  
2023

Editor-in-Chief: Mohsen Ghaemian

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, "Sharif" publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

**P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN**  
**Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983**  
**Web: <http://journal.sharif.ir/> <http://www.globalsciencejournals.com>**  
**E-mail: [pajouhesh@sharif.edu](mailto:pajouhesh@sharif.edu)**

## CONTENTS

3 **GENERATION OF PERFORMANCE SPECTRA FOR DESIGNING NEGATIVE STIFFNESS DEVICES AND THEIR APPLICATION IN BRIDGES UNDER EARTHQUAKES**  
M. Mavizi Sani and A. Karamodin

15 **PREDICTION OF DETERIORATION COMPONENTS IN REINFORCEMENT CONCRETE COLUMNS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES**  
A. Khoshkroodi, H. Parvini Sani and M. Aajami

23 **OPTIMIZATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL STRUCTURES USING ANALYTIC NETWORK PROCESS (ANP)**  
S. Samadianfard and V. Toufigh

29 **INJECTABILITY OF COLLOIDAL NANO-SILICA IN BUSHEHR CARBONATE SAND WITH DIFFERENT SILT CONTENT**  
E. Azini, R. Ziae Moayed and S. A. Naeini

39 **A DISTURBED STATE CONCEPT-BASED SOLUTION FOR NONLINEAR CONSOLIDATION OF SOILS**  
A. Ouria

49 **THE EFFECT OF NOZZLE GEOMETRY ON THE BEHAVIOR OF SALINE EFFLUENT DISCHARGED IN AN INCLINED SUBMERGED FORM WITH AN ANGLE OF 60°**  
V. Babaiynejad and B. Khorsandi

59 **DAMAGE IDENTIFICATION IN STEEL PLATES USING A DETECTION ALGORITHM BASED ON 1D CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM AND 2D VIBRATION MODE SHAPES**  
A. Mamazizi and M. Khanahmadi

71 **IMPROVING THE PERFORMANCE OF A FUZZY LOGIC MODEL IN SEISMIC DAMAGE PREDICTION USING A GUIDED ADAPTIVE SEARCH-BASED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**  
O. Zaribafian, T. Pourrostam, M. Fazilati, A. S. Moghadam and A. Golsoorat Pahlaviani

81 **ESTABLISHING A NONLINEAR OPTIMIZATION METHOD FOR STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS**  
M. Ghorbanzadeh, P. Homami and M. Shahrouzi

93 **OPTIMIZED DESIGN OF BI-ROCKING STEEL BRACED FRAMES VIA CHANGING THE SECOND ROCKING JOINT LOCATION**  
M. Rafiei Mohammadi, V. Broujerdi and E. Mohammadi Dehcheshmeh

## RESEARCH NOTE:

105 **NUMERICAL MODELING OF THE GEOTEXTILE POSITIONING ANGLE IN THE BASE AND SUBBASE LAYER OF THE ROAD PAVEMENT**  
R. Moayedfar, M. Motahari and B. Serydani

115 **VALIDATION OF TURBULENCE MODELS FOR DENSE EFFLUENT DISCHARGED FROM CIRCULAR AND SQUARE NOZZLES WITH A DISCHARGE DNGLE OF 45°**  
V. Babaiynejad and R. Haji Seyed Mohammad Shirazi

## APPENDIX

132 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**