



مقالات پژوهشی:

- تهیه ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه های سختی منفی و کاربرد آن در پل های تحت اثر زلزله
محمد موزی نائی و عباس کرم الدین
- پیش بینی مؤلفه های زوال ستون های بتن مسلح با استفاده از روش های یادگیری ماشین
آزاده خشکرویدی، حسین پروینی نائی و مجتبی احمی
- بهینه سازی سازه های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه ای ANP
سیما سمدیان فرد و وهب توفیق
- توزیع پذیری محلول نانوسیلیس کلونیدی در ماسه ی کربناته ی پوشش با درصد لای مختلف
احسان آذینی، رضا ضیائی مؤید و سید ابوالحسن تائیدی
- روشی برای حل مسائل تحکیم غیرخطی با استفاده از مفهوم حالت آشفتگی
احمد لوریا
- تأثیر هندسه ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه ی ۶۰°
وحید بابایی زاد و بابک خورسندی
- غیب پایی در صفحه های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته ی یک بُعدی و شکل های
مود ارتعاشی دوتایی
- آزمون مام مزیری و محاسبه ی حان احمدی
- بهبود کارایی یک مدل منطق فازی در پیش بینی شاخص خسارت لرزه ای با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
مبستنی بر جستجوی تطبیقی هدایت شده
- امید زیستاییان، توحید پورستو، مهدی فقیهتی، عبدالرضا سرور مقدم، علی گل صورت پهلوانی
- بهینه سازی الگوریتم بهینه سازی غیرخطی برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه ها
مهرشاد قربانزاده، پیمان همامی و محسن شهروری
- طراحی بهینه ی قاب های مهاربندی فولادی دوگهوارهی با تغییر موقعیت بلوک گهواره ای تائیده
محمدتالی رفیعی محمدی، وحید بروجردیان و اسماعیل محمدی دهچشمه

یادداشت فنی:

- مدل سازی عددی تأثیر زاویه ی فراگیری ژئوتکستایل در لایه ی اساس و زیراساس روسازی رام
رضا مودیر، محمدرضا مطهری و بهزاد سریدانی
- اعتبارسنجی مدل های آشفتگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل های دایره و مربع با زاویه ی تخلیه ی ۴۵°
وحید بابایی زاد 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. Parvini Sani and M. Aajami
- Optimization of Thermal Characteristics of Industrial Structures Using Analytic Network Process (ANP)
S. Samadianfard and V. Touligh
- Injectability of Colloidal Nano-Silica in Bushehr Carbonate Sand with Different Silt Content
E. Azini, R. Ziaei Moayed 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°
V. Babaiynejad and B. Khorsandi
- 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
- Improving the Performance of a Fuzzy Logic Model in Seismic Damage Prediction Using a Guided Adaptive Search-Based Particle Swarm Optimization Algorithm
O. Zarbafian, T. Pourrostam, M. Fazlali, A. S. Moghadam and A. Golsoorat Pahlaviani
- Establishing a Nonlinear Optimization Method for Structural Reliability Analysis
M. Ghorbanzadeh, P. Homami and M. Shahrouzi
- Optimized Design of Bi-Rocking Steel Braced Frames Via Changing the Second Rocking Joint Location
M. Rafei Mohammadi, V. Broujerdian and E. Mohammadi Dehcheshmeh

RESEARCH NOTES:

- Numerical Modeling of the Geotextile Positioning Angle in the Base and Subbase Layer of the Road Pavement
R. Moayedfar, M. Motahari and B. Serydani
- Validation of Turbulence Models for Dense Effluent Discharged from Circular and Square Nozzles with a Discharge Angle of 45°
V. Babaiynejad and R. Hajj Seyed Mohammad Shirazi

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

سردبیر: دکتر محسن قائمیان

سردبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی

مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف‌خان

ویرایش: رزیتا رستخیز پادار

حروف‌چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی

صفحه‌آرایی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیمیا آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

طراح لوگو: زنده‌یاد مرتضی ممیز

طرح روی جلد و ساختار صفحه‌آرایی: 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: ۶۶۰۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

پست تصویری: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی سایت: <http://journal.sharif.ir>

سایت اسپرینگر: www.globalsciencejournals.com

پست الکترونیکی: pajouhesh@sharif.edu

چاپ: کارگاه گرافیک فرگاهی، <http://www.fargahi.com>

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بیتا آیتی

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 تجریشی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیررضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر حسین رحامی

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 محمدتقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدجواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر حسن میرزابزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

دکتر علی نورزاد

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

دکتر جواد واشقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه 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 برخوردار

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

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسنیمی

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 امیررضا 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 زهرایی

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 شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمجدالدین میرمحمدحسینی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدشهاب الدین یثربی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

هیأت مشاوران

دکتر محمود اکبری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه کاشان

دکتر فریدون امیری نسب

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه لرستان

دکتر مجید پورامینیان

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی رامسر

دکتر وحید توفیق

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته

دکتر سیدشهاب حسینی نسب

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه رازی

دکتر علی حیدری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهرکرد

دکتر عبدالغفور خادم‌الرسول

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید چمران

دکتر حسین خزیمه نژاد

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بیرجند

دکتر سیدمحمد سیدپور

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شمال

دکتر حمید شیرمحمدی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه ارومیه

دکتر محمدحسین طالب‌پور

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه دامغان

دکتر جعفر عسگری مارنانی

دانشکده‌ی فنی مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

دکتر مازیار فهمیمی فرزام

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مراغه

دکتر مهدی ماجدی اصل

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مراغه

دکتر میرحامد معراجی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه خلیج فارس

دکتر محمود ملکوتی علون‌آبادی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه خلیج فارس

دکتر علی اکبر یحیی آبادی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بروجرد

مقالات پژوهشی:

- ۳ تهیه‌ی طیف عملکرد برای طراحی دستگاه‌های سختی منفی و کاربرد آن در پل‌های تحت اثر زلزله
محمد مویری ثانی و عباس کرم‌الدین
- ۱۵ پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال ستون‌های بتن مسلح با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین
آزاده خشک‌رودی، حسین پروینی 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 تخریب‌پذیری محلول نانوسیلیس کلئیدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لای مختلف
احسان آذینی، رضا ضیائی مؤید و سید ابوالحسن ناائینی
- ۳۹ روشی برای حل مسائل تحکیم غیرخطی با استفاده از مفهوم حالت آشفستگی
احد اوریا
- ۴۹ تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به‌صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی 60°
وحید بابایی‌نژاد و بابک خورسندی
- 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 محتشم خان احمدی
- ۷۱ بهبود کارایی یک مدل منطق‌فازی در پیش‌بینی شاخص خسارت لرزه‌یی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی
ازحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده
امید زریافان، توحید پوررستم، مهدی فضیلتی، عبدالرضا سروقدمقدم، علی گلصورت پهلوانی
- ۸۱ ویژه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها
مهرشاد قربانزاده، پیمان همای و محسن شهری
- ۹۳ طراحی بهینه‌ی قاب‌های مهاربندی فولادی دوگهواره‌یی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌یی ثانویه
محمدتقی رفیعی محمدی، وحید بروجردیان و اسماعیل محمدی ده‌چشمه

یادداشت فنی:

- ۱۰۵ مدل‌سازی عددی تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و زیراساس روسازی راه
رضا مویدفر، محمدرضا مطهری و بهژاد سریدانی
- ۱۱۵ اعتبارسنجی مدل‌های آشفستگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی 45°
وحید بابایی‌نژاد و رضا حاجی سیدمحمد شیرازی

ضمائم:

- 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

مهندسی عمران شریف (پیاو ۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماری ۱، ص. ۳-۱۳، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، طیف عملکرد برای سازه‌های یک درجه آزادی برشی مجهز به دو نوع از دستگاه سختی منفی غیرفعال ارائه شده است. با استفاده از روش تحلیلی 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، ۱۲ رکورد زلزله با طیف طراحی آیین‌نامه‌ی ایران (استاندارد 2800) انطباق داده شده‌اند. از پارامترهای نسبت نیروی تسلیم دستگاه و سازه، 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.

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

۱. مقدمه

یکی از چالش‌آمیزترین مسائل در طراحی سازه‌ها، طراحی در برابر بارهای لرزه‌یی است. از آنجایی که زلزله‌ها در زمان‌های مختلف ماهیت دینامیکی و عدم قطعیت بالایی دارند، طراحی سازه در برابر زلزله، اهمیت بسیاری دارد.

پژوهشگران همواره به دنبال مؤثرترین راه برای حفاظت از سازه‌ها در برابر زلزله بوده‌اند. بنابراین دانش کنترل سازه برای بررسی و بهبود رفتار سازه در برابر زلزله ایجاد شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۷۲، کنترل سازه توسط یاقو^[۱] 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، ص. ۳۹-۲ (۱)

جالب در این زمینه، دستگاه‌های مرکزگرا^۲ و سختی منفی^۳ هستند، که مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. هر دو سیستم مرکزگرا 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. تفاوت دو روش اخیر، در عملکرد آنها برای رسیدن به هدف ذکر شده است. سیستم‌های مرکزگرا، عمدتاً توسط برخی از عناصر پیش‌تنیده، 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 میراگرها، 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 منجر 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. بنابراین، 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

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 اتلاف انرژی، مانند میراگرهای ویسکوز، به موازات سیستم سختی منفی استفاده می‌شود.

روش سختی منفی به صورت: غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال قابل اجراست. اولین بار ایمرآ (۲۰۰۵)، یک جداگر با قابلیت سختی منفی را ارائه کرد. [۲] ناگاراچایا و همکارانش (۲۰۱۱-۲۰۱۴)، نیز یک دستگاه سختی منفی با استفاده از یک فنر فشرده ارائه دادند، که سختی منفی واقعی را تولید می‌کرد. [۳-۶] عطاری (۲۰۱۵)، با استفاده از چند چرخ‌دنده، یک دستگاه سختی منفی دورانی را ایجاد کرد. [۷] توکویا (۲۰۱۵)، یک جداگر با قابلیت سختی منفی را برای سازه‌ی پل‌های راه‌آهن معرفی کرد. [۸] لیو و ژو (۲۰۱۵)، ابتدا یک دستگاه سختی منفی برای کنترل ارتعاش کابل‌ها در پل‌های معلق [۹] و سپس یک سیستم جدید با استفاده از فنرهای فشرده و آلیاژهای حافظه‌دار [۸] ارائه کردند، که دو قابلیت سختی منفی و مرکزگر را هم‌زمان ارائه می‌کرد. [۱۰] هوان لی (۲۰۲۱)، یک دستگاه سختی منفی تطبیقی اصلاح شده با توانایی ارائه‌ی سختی منفی جانبی و میرایی غیرخطی با پیکربندی فنرهای خطی و میراگرهای ویسکوز خطی برای رفع مشکل در بسامدهای بالا پیشنهاد کرد. [۱۱] سان (۲۰۲۱)، نشان داد عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مجهز به کمر بند خربایی میرا شده‌ی معمولی با ترکیب سختی منفی به موازات میراگر ویسکوز بهبود می‌یابد. [۱۲] ژاو و وانگ (۲۰۲۲)، یک سیستم جداساز تقویت شده با سختی منفی جدید (NSAS-IS) را برای ارتقاء عملکرد لرزه‌ی سازه‌های اطراف راکتور هسته‌ی ارائه کرده‌اند. [۱۳] تقیب‌الاسلام (۲۰۲۲)، یک ترکیب جدید از میراگرهای سختی منفی واقعی (NSDs) و دستگاه‌های اینترتر (Inerter) را به عنوان میراگرهای موازی (NSID) [۱۲] برای کنترل پاسخ سازه‌های جداسازی شده استفاده کرده است. [۱۴] تمامی دستگاه‌های اشاره شده، سختی منفی را به روش غیرفعال تولید می‌کنند.

ایمرآ (۲۰۰۳)، حلقه‌ی هیستریزس سختی شبه‌منفی در کاهش پاسخ لرزه‌ی مؤثر را برای اولین بار ارائه داد. [۱۵] لی (۲۰۲۱)، یک سیستم سختی منفی جدید پیشنهاد کرده است که سختی منفی تطبیقی و ویژگی‌های میرایی را ادغام می‌کند. [۱۶] ژیانگ شی (۲۰۲۱)، یک روش جدید جداسازی ارتعاش مبتنی بر فنر سختی منفی غیرفعال (NSS) و یک دستگاه نیمه‌فعال را با هدف دستیابی به عملکرد جداسازی فعال با استفاده از روش نیمه‌فعال کم توان پیشنهاد کرده است. [۱۷] سالواتوره (۲۰۲۲)، سختی منفی توسط مکانیسم‌های دارای دو وضعیت پایدار همراه با سوپرکشسانی قابل تنظیم توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌ی (SMA) را ارائه کرده است، که می‌تواند اعطاف‌پذیری دینامیکی یک سازه را در زمینه‌ی جداسازی ارتعاش افزایش دهد. [۱۸] لی (۲۰۲۲)، یک میراگر سختی منفی شبه‌فعال جدید برای حفاظت لرزه‌ی مؤثر و مقاوم با ادغام عنصر سختی منفی و عنصر میرایی قابل کنترل با هم، پیشنهاد داده است. [۱۹] در منابع فارسی نیز پژوهش‌هایی بر روی سختی منفی صورت پذیرفته است، که به جهت اختصار فقط به ذکر منبع آنها اکتفا شده است. [۲۰ و ۲۱]

با توجه به ویژگی‌های بسیار خوب سیستم سختی منفی، یکی از مسائل مهم در این زمینه، نحوه‌ی طراحی و ظرفیت مورد نیاز سیستم‌های سختی منفی با توجه به ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ی اصلی است. امروزه برای طراحی‌های سازه‌های جدید، استانداردهایی مانند: ASCE-۷، ASCE-۴۱ و FEMA۴۵۰، [۲۲-۲۴] ضوابطی را برای طراحی و کنترل سیستم‌های میرایی ارائه کرده‌اند، اما استانداردهای مذکور بر تحلیل سیستم‌های میرایی تمرکز دارند و مبتنی بر آزمون و خطا هستند. بنابراین لازم است روش مناسبی برای انتخاب پارامترهای بهینه در طراحی و تولید ظرفیت مناسب

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 و ۲۶] 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 و ۲۶] ولی تاکنون طیف عملکرد برای سیستم‌های سختی منفی تهیه نشده است.

۲. معرفی سیستم

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

۱.۲. دستگاه سختی منفی (NSD)

ناگاراچایا [۲۷] و همکارانش، [۲۸] اولین بار مفهوم سختی منفی واقعی را برای کاربردهای سازه‌ی معرفی کردند. سختی منفی واقعی، نیازی به منبع تغذیه‌ی خارجی ندارد و کاملاً از فنر تشکیل می‌شود و یک سختی منفی کشسان غیرخطی واقعی ایجاد می‌کند. دستگاه سختی منفی توسعه یافته توسط ناگاراچایا و همکارانش، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دستگاه سختی منفی، شامل یک فنر پیش‌فشرده 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 فشرده شده، نیرویی در جهت حرکت یا نیروی منفی ایجاد می‌کند. همچنین نمودار شماتیک دستگاه در وضعیت تغییرشکل یافته پس از جابه‌جایی بالای دستگاه در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

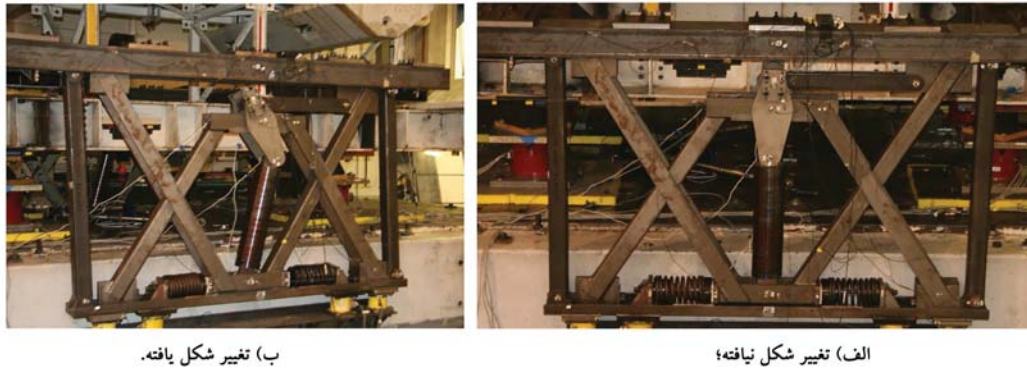
بر اساس معادلات تعادل، l_s طول فنر تغییرشکل یافته به صورت رابطه‌ی ۱ است:

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

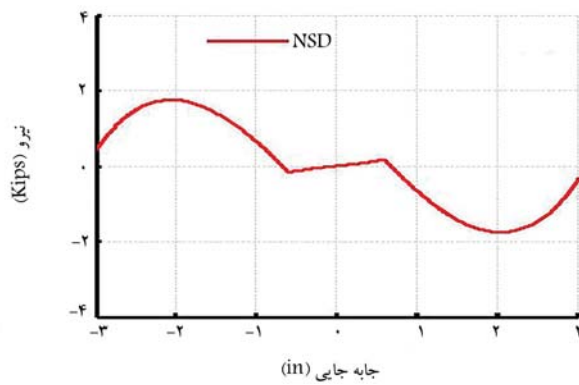
شکل نهایی رابطه‌ی نیروی تولید شده توسط NSD به صورت تابعی از تغییرشکل دستگاه به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:

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

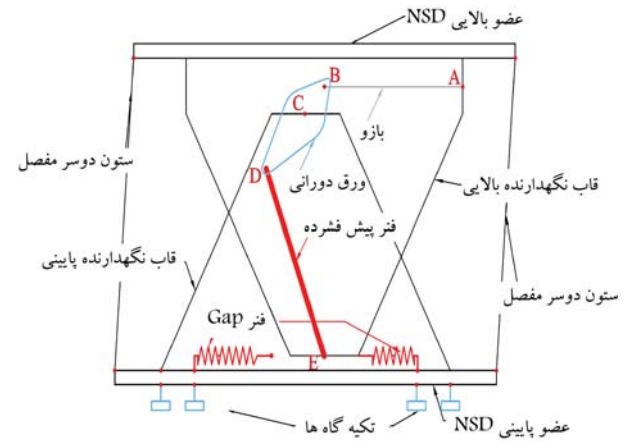
که در آن، F_g نیروی فنر gap است، که برای جابه‌جایی یکنواخت مثبت به صورت



شکل ۱. دستگاه سختی منفی NSD. [۵]



شکل ۳. نمودار نیرو - جابه جایی NSD. [۴]



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

رابطه ی 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، l_p طول فنر پیش فشرده در زمانی است که NSD تغییر شکل نیافته است، l_1 فاصله ی بین دو نقطه ی C و D، l_2 فاصله ی نقاط B و C است. u جابه جایی کل دستگاه و P_{in} نیروی پیش فشردگی فنر است و باید مقدار مثبت داشته باشد، K_s سختی فنر فشرده، K_{g1} و K_{g2} سختی های فنرهای gap در پایین دستگاه و d_{gap} یک جابه جایی مشخص در فنر gap در حالتی است که باز می شود.

بازوی AB، یک جابه جایی در بالا (نقطه ی B) ایجاد می کند، که ورق دورانی حول نقطه ی C می چرخد. از آن جا که ورق چرخشی حول نقطه ی C دوران می کند، نقطه ی D در جهت خلاف حرکت جابه جایی اعمال شده حرکت می کند. نقطه ی E به صورت کاملاً صلب به بالای دستگاه متصل است و بنابراین، جابه جایی برابر با جابه جایی اعمال شده دارد. با توجه به حرکت نقاط D و E، فنر فشرده چرخش می یابد و نیروی فشردگی آن، باعث جابه جایی بیشتر می شود. همان طور که دستگاه تغییر شکل می دهد، فنر باز می شود و بنابراین نیروی فشردگی آن کاهش می یابد؛ در حالی که زاویه ی آن افزایش و مقدار سختی تولید شده توسط دستگاه کاهش می یابد. در نهایت، کاهش سختی تدریجی اخیر، منجر به سختی مثبت در جابه جایی های بزرگ می شود. در شکل ۳، نمودار نیرو - جابه جایی NSD مشاهده می شود.

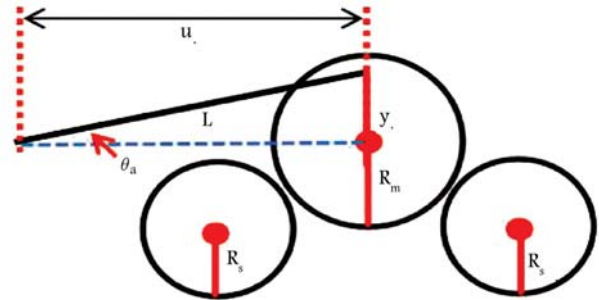
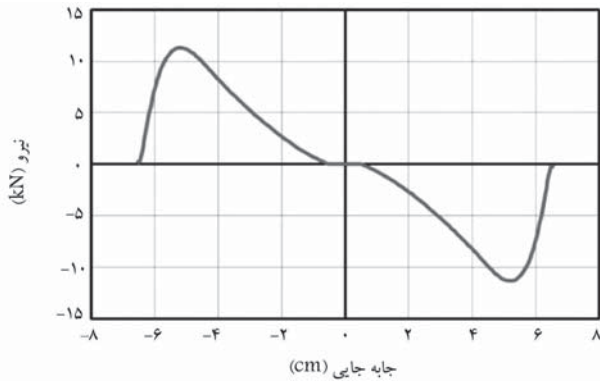


شکل ۴. نمونه ی RBMAP-S ساخته شده اولیه. [۷]

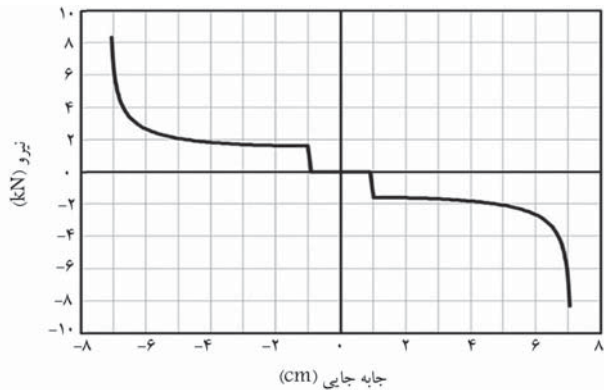
۲.۲. دستگاه سختی منفی دورانی (RBMAP - S) [۱۹]

نوید عطاری و همکاران (۲۰۱۵)، یک دستگاه غیرفعال مکانیکی تطبیقی (RBMAP - S) پیشنهاد کرده اند، که می تواند در هنگام زلزله، سختی منفی در سازه ایجاد و حرکت انتقالی یک سازه را به حرکت دورانی تبدیل کند. [۷] در شکل ۴، دستگاه متشکل از سه چرخ دنده مشاهده می شود. چرخ دنده ی اولیه به وسیله ی یک بازوی اتصال مفصلی به سازه متصل می شود و دو چرخ دنده ی ثانویه، برای کنترل حرکت چرخ دنده ی اولیه و در نتیجه تأثیر در پاسخ سازه طراحی شده است. در شکل ۵، طرح کلی دستگاه مشاهده می شود.

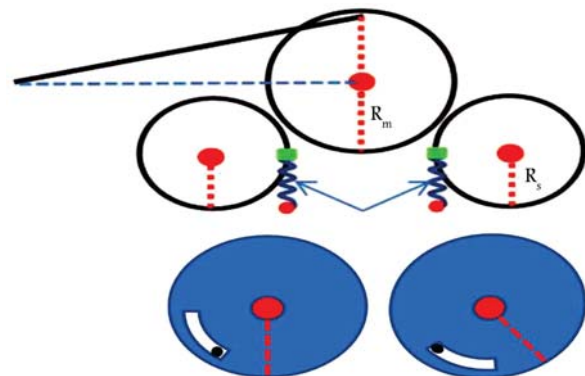
دستگاه اولیه ی ارائه شده دو مشکل داشته است، که توسط عطاری اصلاح شده است: ۱. درگیر شدن ناگهانی چرخ دنده ی ثانویه، ۲. ناپایداری در جابه جایی های



شکل ۵. طرح کلی دستگاه سختی منفی RBMAP-S [۷]



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



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

۳. تهیه طیف عملکرد برای طراحی NSD و

RBMAP - S

یکی از مشکلات مهندسان برای استفاده از سیستم‌های کنترل در سازه‌ها، انتخاب پارامترهای بهینه برای یک هدف عملکردی معین است. استانداردهای موجود، از جمله: FEMA ۴۵۰ [۱۹] و ASCE ۷ [۱۷]، برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر، متکی به فرایند آزمون و خطا هستند، که بر تعیین عملکرد یک سازه‌ی مجهز به میراگر متمرکز است و روش آموزنده‌ی برای تعیین طراحی بهینه نیست. طراحی سیستم‌های میرایی غیرفعال، شامل تنظیم پارامترهای سازه‌ی است که پاسخ‌های چندگانه‌ی مورد نیاز را در سطوح 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 جابه‌جایی، بیشینه‌ی برش و شتاب پایه را به پارامترهای قابل کنترل دستگاه و سازه ارتباط می‌دهد. گوا و کریستوپولوس، [۲۶، ۲۵] برای اولین بار طیف عملکردی را برای میراگرهای هیستریزیس و ویسکوکشسان پیشنهاد کرده‌اند.

برای رسم طیف عملکرد یک سیستم، سازه به صورت یک سیستم یک درجه آزادی الاستوخمیری دوخطی با نسبت سختی ثانویه ۵٪ سختی اولیه مدل‌سازی 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 $S_a(T_f, \xi)m$ هستند.

$$V_f = V_{bf} / S_a(T_f, \xi) m \quad (۸)$$

بزرگ. در شکل ۶، نمودار نیرو - جابه‌جایی دستگاه در حالت اولیه شکل ۴ و ناپایداری 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.

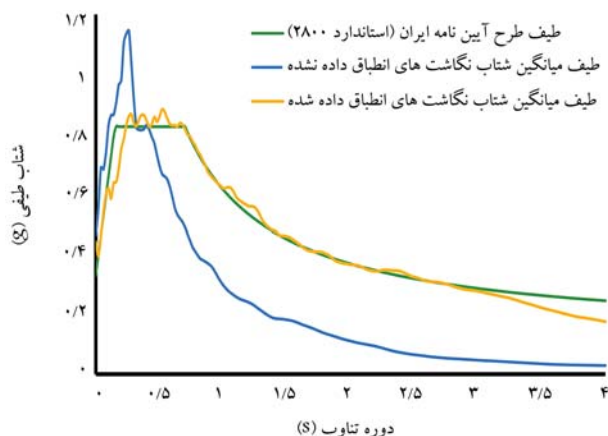
مشابه NSD، معادلات نیرو - جابه‌جایی (معادلات ۴ الی ۷) برای RBMAP - S ارائه شده‌اند:

$$u = \sqrt{L^2 - y_s^2 \cos^2 \theta_m} + y_s \sin \theta_m - u_s \quad (۴)$$

$$F_x = \frac{\left(T_s - K_s \frac{R_m}{R_s} (\theta_m - \theta_s) \right) \frac{R_m}{R_s}}{y_s \cos \theta_m} \sqrt{L^2 - y_s^2 \cos^2 \theta_m} \quad (۵)$$

جدول ۱. فهرست شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل‌های تاریخی‌های زمانی غیرخطی. [۲۳]

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



شکل ۹. طیف طرح آیین‌نامه‌ی ایران برای زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (سبز) و طیف میانگین شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل تاریخی‌های 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 شتاب‌نگاشت‌ها به مقیاس در آورده شوند. بر اساس آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ی ایران (ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰)، فقط روش مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها ارائه شده است. روش دیگری که در آیین‌نامه‌های دیگر، از جمله ۱۶ - ASCEV،^[۲۵] ارائه شده است، روش انطباق شتاب‌نگاشت با یک طیف طراحی هدف است، که روش‌های مختلفی برای انجام آن پیشنهاد شده است؛ که از جمله‌ی آن‌ها، روش انطباق در حوزه‌ی زمان است، که شتاب‌نگاشت‌ها در نرم‌افزار SeismoMatch با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آبراهامسون^{۲۱} (۱۹۹۲)،^[۲۹] در بازه‌ی ۰٫۵T تا ۲T با طیف طراحی استاندارد ۲۸۰۰ انطباق داده شده‌اند. طیف آیین‌نامه‌ی ایران بر اساس زمین نوع III و پهنه با خطر نسبی زیاد (A = ۰٫۳) ترسیم شده است. در شکل ۹، طیف طراحی استاندارد شماره‌ی ۲۸۰۰ و طیف میانگین انطباق داده شده و انطباق داده نشده‌ی ۱۲ شتاب‌نگاشت انتخابی

که در آن، $S_d(T_f, \xi)$ شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب T_f و میرایی ذاتی ξ است و V_{bf} مقاومت سیستم الاستوخمیری معادل است. بنابراین، مقدار V_{bf} به جابه‌جایی هدف و سختی ثانویه‌ی سیستم بستگی دارد. با توجه به رفتار غیرخطی سیستم‌های NSD و RBMAP-S نشان داده شده در بخش قبل، پارامترهای α و β برای رسم طیف عملکرد مطابق روابط ۹ و ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\alpha = K_s / K_f \quad (۹)$$

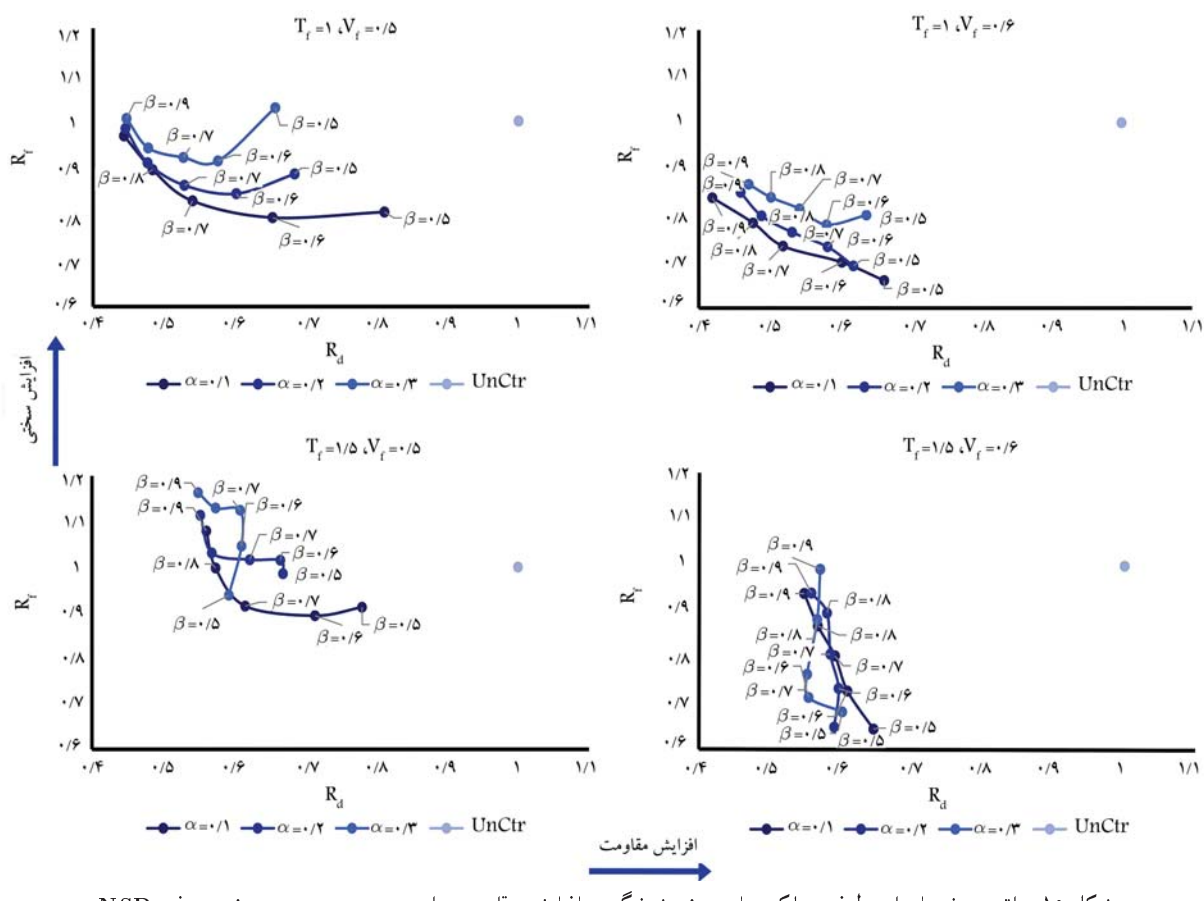
$$\beta = F_{yn} / F_{yo} \quad (۱۰)$$

که در آنها، K_s سختی فنر فشرده، K_f سختی سازه‌ی یک درجه آزادی، F_{yn} نیروی تسلیم سیستم سختی منفی و سازه و F_{yo} نیروی تسلیم سازه هستند. در مورد سیستم RBMAP-S، به جای استفاده از پارامتر α از پارامتر θ ، که میزان دوران اولیه‌ی فنر پیچشی را نشان می‌دهد، استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای بدون بعد R_d و R_f (مطابق روابط ۱۱ و ۱۲)، برای به دست آوردن نسبت جابه‌جایی و نیروی تسلیم و کارایی عملکرد سیستم در نظر گرفته شده‌اند:

$$R_d = D_{N+f} / D_f \quad (۱۱)$$

$$R_f = F_{N+f} / F_f \quad (۱۲)$$

که در آنها، R_d و R_f نسبت بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی به بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه، $D_{(N+f)}$ و $F_{(N+f)}$ به ترتیب بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی مجهز به سیستم سختی منفی، D_f و F_f به ترتیب بیشینه‌ی جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه‌ی اولیه هستند. طیف عملکرد، نموداری است که پاسخ‌های نرمال شده‌ی R_f را در برابر R_d به‌اراء پارامترهای مختلف α و β برای V_f های مختلف ترسیم می‌کند. طیف عملکرد با استفاده از پاسخ‌های میانگین تحلیل تاریخی‌های زمانی غیرخطی توسط ۱۲ شتاب‌نگاشت رسم می‌شود. شتاب‌نگاشت‌ها مبتنی بر موارد میدان دور معرفی شده در دستورالعمل FEMAP - ۶۹۵ انتخاب شده‌اند.^[۲۷] در جدول ۱، فهرست شتاب‌نگاشت‌ها و ویژگی‌های 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.

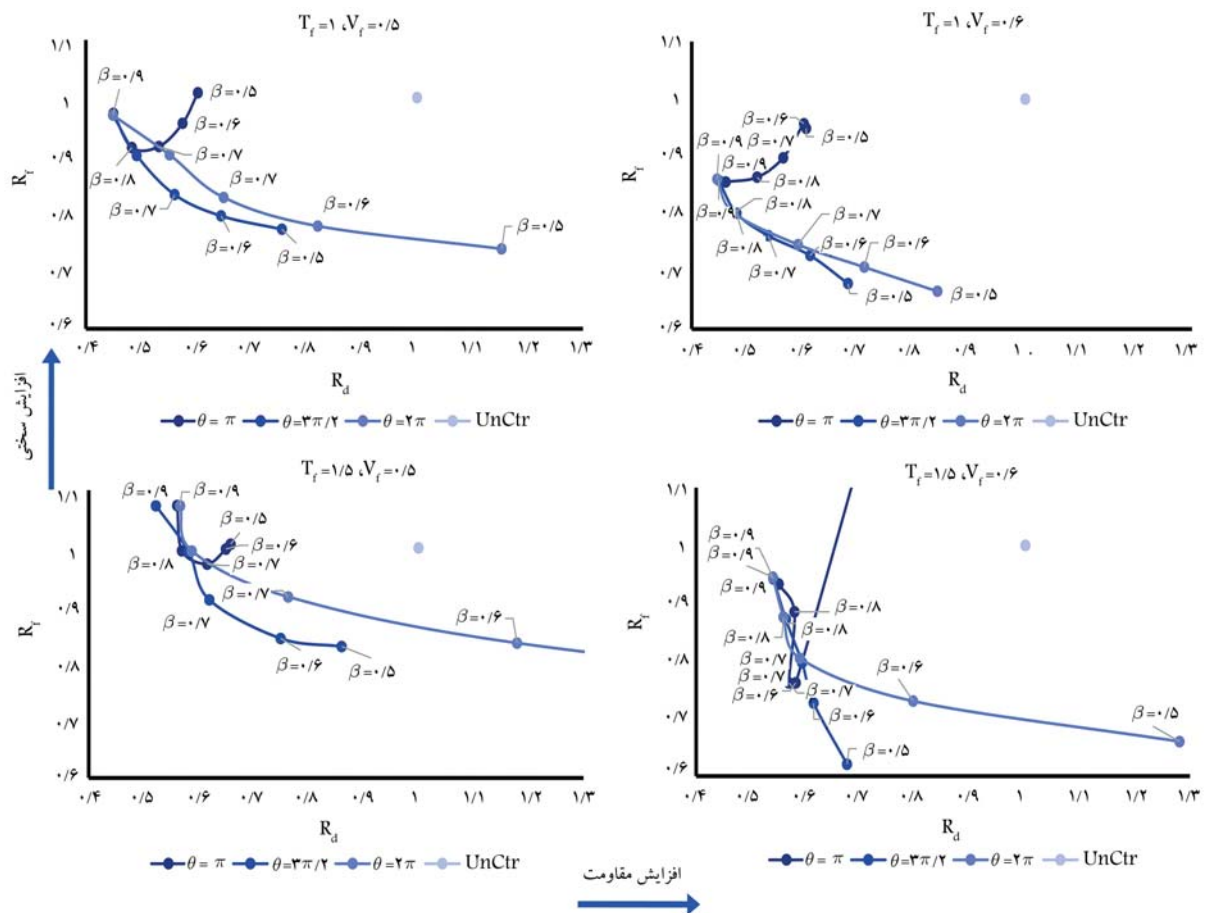
۴. بررسی طیف عملکرد بر روی پل بزرگراهی معیار

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^[۳۰] (۲۰۰۴)، 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 بتنی پیش‌تنیده با دو دهانه‌ی 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 پایه‌ی پیش‌تنیده 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 بتنی تشکیل شده است. ارتفاع ستون‌ها تقریباً ۶/۹ متر است. عرشه‌ی پل با استفاده از ۴ تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی در هر تکیه‌گاه جداسازی می‌شود و در مجموع ۸ عدد جداگر بین تکیه‌گاه‌های انتهایی و عرشه نصب شده‌اند. در مدل ایجاد شده از پل، برای جایگزینی ۸ تکیه‌گاه الاستومری غیرلرزه‌یی از جداسازهای لاستیکی سرب‌ی استفاده شده است، زیرا جداگرهای لرزه‌یی می‌توانند عملکرد لرزه‌یی را بهبود بخشند. با این حال، در مطالعه‌ی حاضر، دستگاه‌های کنترلی سختی منفی بین عرشه و تکیه‌گاه‌های انتهایی پل نصب شدند تا عملکرد آن‌ها بررسی شود. برای مدل‌سازی در محیط متلب^{۲۲}، جرم و سختی المان‌ها در گره‌های سازه متمرکز شدند تا ماتریس‌های سختی و جرم کلی در متلب ایجاد شوند. سپس عناصر غیرخطی

مشاهده می‌شود. طیف میانگین اخیر برای سازه‌های با دوره‌ی تناوب ۱/۵ ثانیه انطباق داده شده است. تحلیل‌های تاریخی زمانی برای $V_f = 0.7 - 0.4$ ، $T_f = 0.5 - 2$ و $\beta = 0.5 - 0.9$ ، $\alpha = 0.1 - 0.3$ است.

طیف عملکرد دو نوع سیستم سختی منفی NSD و RBMAP-S برای ۱/۵، $T_f = 1.0$ و $V_f = 0.5, 0.6$ 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 ۲۰٪ 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.

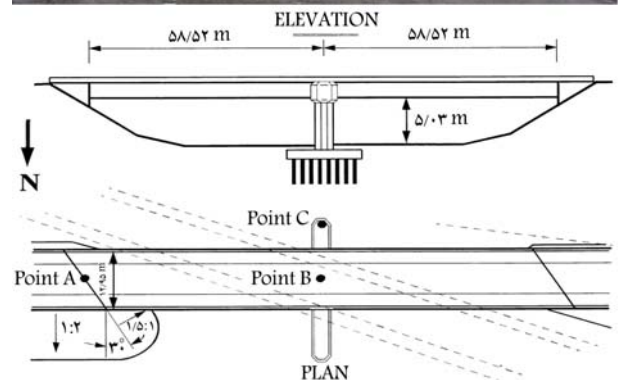
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به شکل ماتریس مرتب شده‌اند، که امکان بررسی دامنه‌ی وسیع‌تری از احتمالات را فراهم می‌کنند. همان‌طور که در طیف عملکرد در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، در سیستم NSD، تغییر پارامتر α تأثیر کمی در مشخصات سیستم دارد و تغییرات β ، پاسخ را بیشتر کنترل می‌کند؛ بنابراین، پارامتر اصلی در طراحی NSD، نیروی پیش‌فشارده‌ی فنر است. همچنین در طیف عملکرد سیستم RBMAP-S در شکل ۱۱، علاوه بر β ، نقش θ نیز در طراحی سیستم مؤثر است. با افزایش مقاومت و سختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش می‌یابد. با 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.



شکل ۱۱. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت سازی مجهز به سیستم سختی منفی RBMAP – S.

به مدل پل اضافه شده‌اند. به هر جرم متمرکز گرهی عرشه و کوله، ۶ درجه آزادی دینامیکی اختصاص داده شده است. عرشه‌ها و کوله‌ها، با فرض صلب بودن، با استفاده از المان‌های سه درجه آزادی (دو انتقالی و یک پیچشی) مدل شده‌اند. رفتار لنگر- انحنا غیرخطی دو ستون مرکزی با یک مدل دوخطی مدل‌سازی شده است. برای ساده‌سازی، روابط نیرو- تغییر مکان برای رفتار محوری، برشی و پیچشی خطی فرض شده و فقط دو رابطه‌ی لنگرخمششی - انحنا، دوخطی در نظر گرفته شده است. همچنین اندرکنش بین بار محوری و لنگرخمششی در حین زلزله در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، پاسخ‌های غیرخطی در هر دو جهت مستقل در نظر گرفته شده‌اند. مدل غیرخطی کامل پل، ۴۳۰ درجه آزادی دارد، که برای ارزیابی پل استفاده می‌شود. از ارائه‌ی مدل غیرخطی پل به دلیل اختصار خودداری و فقط منبع آن ذکر شده است.^[۳۰]

از آن‌جا که پاسخ‌های پل معیار، در دسترس بوده و نتایج آن بررسی شده است، به دلیل اختصار از ارائه‌ی نتایج راستی‌آزمایی آن خودداری شده است.^[۳۰] برای بررسی عملکرد پل بزرگراهی معیار و به دست آوردن مشخصات دینامیکی پل، آنالیز مودال بر روی پل صورت گرفته و در جدول ۲، مشخصات مودهای غالب پل ارائه شده است؛ که مطابق آن، اولین مود غالب انتقالی سازی پل، مود ۴ با دوری تناوب ۰/۵۹ ثانیه است. بنابراین، می‌توان از طیف عملکرد با دوری تناوب ۰/۵ ثانیه با دقت مناسبی استفاده کرد. سختی اولیه، ۵۰۰۰ KN/m و مقاومت تسلیم ۳۳۳/۳۳ KN بوده است. لذا با توجه به مشخصات سازه براساس دوری تناوب و طیف طراحی، مقدار $V_f = ۰/۵۷$ به دست آمده است. همچنین با درون‌یابی



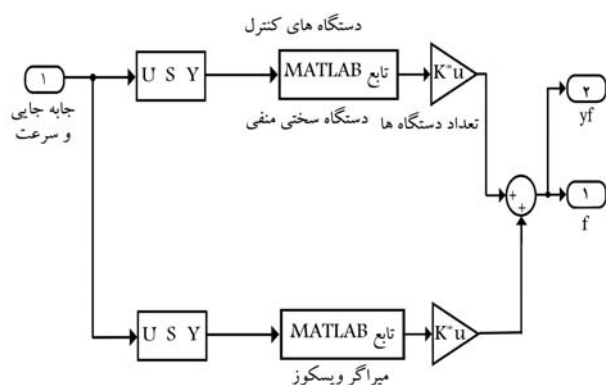
شکل ۱۲. (الف) پل بزرگراهی معیار، (ب) پلان و برش پل.^[۳۶]

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

شماره‌ی مود	نوع مود	دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۱	پیچشی	۰/۸۱
۲	پیچشی + 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 $J_e = \max \left\{ \frac{\max_t \ F_{bt}(t)\ }{\ F_{ob}^{\max}\ } \right\}$	برش پایه $J_1 = \max \left\{ \frac{\max_{i,t} F_{bt}(t) }{F_{ob}^{\max}} \right\}$
لنگر واژگونی $J_v = \max \left\{ \frac{\max_t \ M_{bt}(t)\ }{\ M_{ob}^{\max}\ } \right\}$	لنگر واژگونی $J_r = \max \left\{ \frac{\max_{i,t} M_{bt}(t) }{M_{ob}^{\max}} \right\}$
جابه‌جایی در وسط دهانه $J_\lambda = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{y_{ml}(t)}{y_{om}^{\max}} \right\ \right\}$	جابه‌جایی در وسط دهانه $J_r = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{y_{ml}(t)}{y_{om}^{\max}} \right \right\}$
شتاب در وسط دهانه $J_\lambda = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{\ddot{y}_{ml}(t)}{\ddot{y}_{om}^{\max}} \right\ \right\}$	شتاب در وسط دهانه $J_r = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{\ddot{y}_{ml}(t)}{\ddot{y}_{om}^{\max}} \right \right\}$
جایجایی جداساز $J_{1,1} = \max \left\{ \max_t \left\ \frac{y_{bt}(t)}{y_{ob}^{\max}} \right\ \right\}$	جایجایی جداساز $J_o = \max \left\{ \max_{i,t} \left \frac{y_{bt}(t)}{y_{ob}^{\max}} \right \right\}$



شکل ۱۳. مدل NSD در محیط SIMULINK.

متن 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، نیز نتایج معیارهای ارزیابی برای سیستم‌های سختی منفی در دو نوع سیستم NSD و RBMAP-S ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دستگاه سختی منفی NSD، ۳۳٪ و سیستم RBMAP-S، ۲۱٪ میزان برش پایه را کاهش داده‌اند. همچنین دستگاه سختی منفی NSD باعث کاهش ۳۳٪ و سیستم RBMAP-S، ۲۰٪ در میزان لنگر واژگونی شده‌اند. جابه‌جایی در وسط دهانه‌ی دستگاه سختی منفی NSD، ۳۵٪ و در وسط دهانه‌ی سیستم RBMAP-S، ۳۷٪ کاهش و نیز شتاب در وسط دهانه‌ی دستگاه سختی منفی NSD، ۱۵٪ کاهش و در وسط دهانه‌ی سیستم RBMAP-S، 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 سختی منفی به صورت فنر پیش‌فشرده‌ی خطی و دورانی ارائه شده است. طیف مذکور در دوره‌های تناوب ۰/۵ تا ۲/۵ ثانیه، که دوره‌ی تناوب غالب سازه‌هاست، بر اساس پارامترهای دینامیکی مختلف دستگاه سختی منفی ترسیم شده است. پارامترهای مذکور، شامل نسبت نیروی تسلیم‌شوندگی مجموع دستگاه سختی منفی به نیروی تسلیم‌سازی اولیه در هر دو سیستم است. علاوه بر این، نسبت سختی فنر فشرده به سختی سازه در سیستم NSD و میزان زاویه‌ی دوران اولیه فنر پیچشی در RBMAP-S نیز به عنوان پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. ماتریس نمودارهای طیف عملکرد برای دوره‌ی تناوب ۱/۵ 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 سختی منفی بدون سعی و خطا پرداخت. بر اساس طیف‌های ترسیم شده ملاحظه می‌شود که سیستم NSD عمدتاً توسط β یعنی نیروی پیش‌فشرده‌ی فنر دستگاه کنترل می‌شود، ولی در سیستم RBMAP-S علاوه بر β ، نقش θ در کنترل سازه و نیز انتخاب میزان دوران اولیه فنر پیچشی در عملکرد دستگاه تأثیرگذار هستند. با افزایش مقاومت و سختی سازه، تأثیر سیستم کنترلی افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سختی، تأثیر

از طیف‌های عملکرد با $V_f = 0.5$ ، $V_f = 0.6$ ، می‌توان پارامترهای طراحی سیستم‌های سختی منفی را به دست آورد. با استفاده از طیف‌های عملکرد برای سیستم NSD، $\beta = 0.7$ و $\alpha = 0.3$ و برای سیستم RBMAP-S $\beta = 0.7$ و $\theta = 3\pi/2$ مشخصات اختیار شده‌اند. بنابراین، بر اساس پارامترهای اخیر و روابط ۹ و ۱۰، مشخصات دستگاه‌های سختی منفی طراحی شده است.

برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ی پل تحت ۱۲ شتاب‌نگاشت انتخابی و مقایسه‌ی رفتار پل قبل و بعد از استفاده از سیستم‌های سختی منفی، مجموعه‌ی از چند معیار ارزیابی برای بررسی اثربخشی دستگاه‌ها توسعه داده شده است. ۵ معیار ارزیابی اول، برای اندازه‌گیری کاهش در مقادیر پاسخ پیشینه‌ی پل معیار تعریف شده‌اند، که فهرست آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

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

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

مدل سازی پل و سیستم‌های سختی منفی در محیط SIMULINK در نرم‌افزار

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	Friuli	
J1	-۰/۵۵۱	-۰/۸۵۲	-۰/۵۶۳	-۰/۸۷۲	-۰/۴۴۸	-۰/۴۰۴	-۰/۷۹۷	-۰/۶۶۰	-۰/۶۱۱	-۰/۴۷۹	۱/۰۴۹	-۰/۷۵۱	-۰/۶۷۰
J2	-۰/۵۳۴	-۰/۸۸۹	-۰/۵۴۳	-۰/۸۶۵	-۰/۴۳۵	-۰/۴۱۰	-۰/۷۹۸	-۰/۶۵۰	-۰/۵۹۵	-۰/۴۸۶	۱/۰۲۹	-۰/۸۱۰	-۰/۶۷۰
J3	-۰/۶۸۵	-۰/۷۹۵	-۰/۳۲۹	-۰/۶۴۸	-۰/۳۵۰	-۰/۳۶۶	-۰/۸۰۰	-۰/۶۷۲	-۰/۷۷۹	-۰/۷۴۱	-۰/۹۹۰	-۰/۶۸۱	-۰/۶۵۳
J4	-۰/۸۴۵	۱/۲۴۸	۱/۰۲۴	-۰/۷۷۲	-۰/۵۷۹	-۰/۵۸۵	-۰/۷۸۸	-۰/۸۶۴	۱/۰۶۶	-۰/۶۳۶	-۰/۸۰۳	۱/۰۵۹	-۰/۸۵۶
J5	-۰/۶۸۳	-۰/۷۸۸	-۰/۳۲۲	-۰/۶۵۲	-۰/۳۳۸	-۰/۳۶۲	-۰/۸۴۰	-۰/۶۷۵	-۰/۷۸۰	-۰/۷۱۴	-۰/۹۹۹	-۰/۶۶۹	-۰/۶۵۲
J6	-۰/۴۵۵	-۰/۵۸۶	-۰/۳۸۸	-۰/۹۰۰	-۰/۴۹۸	-۰/۳۰۸	-۰/۶۳۲	-۰/۴۶۷	-۰/۶۱۷	-۰/۵۵۴	۱/۲۵۸	-۰/۳۹۱	-۰/۵۸۸
J7	-۰/۴۵۲	-۰/۵۸۲	-۰/۳۸۲	-۰/۸۹۷	-۰/۴۹۲	-۰/۳۰۹	-۰/۶۲۶	-۰/۴۶۲	-۰/۶۰۸	-۰/۵۵۱	۱/۲۵۷	-۰/۳۸۷	-۰/۵۸۴
J8	-۰/۵۱۶	-۰/۷۵۱	-۰/۱۸۹	-۰/۸۸۱	-۰/۳۱۳	-۰/۳۳۸	-۰/۶۵۱	-۰/۴۹۱	-۰/۷۷۰	۱/۱۲۵	۲/۶۵۱	-۰/۶۱۸	-۰/۷۶۶
J9	-۰/۸۶۵	۱/۱۱۳	-۰/۹۰۷	-۰/۹۳۳	-۰/۷۶۵	-۰/۶۰۵	-۰/۹۰۶	-۰/۹۸۸	۱/۱۱۸	-۰/۸۲۸	-۰/۹۷۱	۱/۰۴۲	-۰/۹۲۰
J10	-۰/۵۱۳	-۰/۷۴۳	-۰/۱۸۱	-۰/۸۸۴	-۰/۳۰۳	-۰/۳۳۶	-۰/۶۱۸	-۰/۴۸۹	-۰/۷۸۸	۱/۱۴۲	۲/۶۸۳	-۰/۶۰۸	-۰/۷۶۶

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

معیار ارزیابی	نام رکورد												میانگین
	Northridge	Duzce	Imperial Valley	Kobe	Kocaeli	Landers	Loma Prieta	Manjil	Superstition	Chi Chi	San Fernando	Frilly	
J1	-۰/۶۵۱	۱/۳۱۶	-۰/۶۹۱	-۰/۸۷۲	-۰/۵۶۴	-۰/۴۴۱	۱/۰۹۷	-۰/۷۲۸	-۰/۶۱۱	-۰/۵۵۹	۱/۱۰۳	-۰/۸۲۷	-۰/۷۸۸
J2	-۰/۶۹۷	۱/۴۳۹	-۰/۷۱۸	-۰/۸۶۰	-۰/۵۷۳	-۰/۴۵۲	۱/۰۹۴	-۰/۷۲۰	-۰/۶۰۱	-۰/۵۶۳	۱/۰۸۴	-۰/۸۱۱	-۰/۸۰۱
J3	-۰/۵۸۴	-۰/۶۶۷	-۰/۳۷۲	-۰/۶۰۸	-۰/۳۵۸	-۰/۲۵۶	۱/۰۵۶	-۰/۶۸۸	-۰/۷۰۶	-۰/۷۲۳	-۰/۸۳۲	-۰/۶۷۸	-۰/۶۲۷
J4	۱/۷۵۸	۱/۳۴۷	۱/۰۹۸	۱/۶۱۱	-۰/۸۸۳	-۰/۵۸۸	۱/۴۰۸	۱/۲۳۸	۱/۵۴۲	-۰/۸۵۱	-۰/۸۲۷	-۰/۹۹۵	۱/۱۸۵
J5	-۰/۵۶۰	-۰/۷۸۹	-۰/۳۷۰	-۰/۵۸۴	-۰/۳۴۳	-۰/۲۶۸	۱/۰۵۰	-۰/۶۹۰	-۰/۶۹۲	-۰/۷۴۰	-۰/۸۵۰	-۰/۶۷۵	-۰/۶۳۴
J6	-۰/۶۶۱	۱/۹۷۱	-۰/۵۷۶	-۰/۴۷۸	-۰/۵۶۰	-۰/۳۵۶	۱/۲۲۰	-۰/۴۳۶	-۰/۶۴۴	-۰/۶۲۶	۱/۴۹۲	-۰/۴۱۴	-۰/۷۸۶
J7	-۰/۶۵۹	۱/۹۶۷	-۰/۵۷۲	-۰/۴۷۲	-۰/۵۵۶	-۰/۳۵۷	۱/۲۱۳	-۰/۴۳۱	-۰/۶۳۷	-۰/۶۲۳	۱/۴۹۲	-۰/۴۱۱	-۰/۷۸۳
J8	-۰/۳۸۳	۱/۱۳۱	-۰/۳۶۶	-۰/۵۰۰	-۰/۳۰۵	-۰/۱۵۶	۱/۷۶۷	-۰/۶۶۰	-۰/۶۹۶	۱/۱۴۴	۲/۹۳۹	-۰/۷۳۳	-۰/۸۹۸
J9	۱/۰۵۵	۱/۱۸۶	-۰/۹۴۱	۱/۲۱۷	-۰/۸۷۳	-۰/۶۰۶	۱/۱۰۲	۱/۰۳۱	۱/۱۴۸	-۰/۹۲۲	۱/۰۱۸	۱/۰۶۳	۱/۰۱۳
J10	-۰/۳۸۱	۱/۱۴۲	-۰/۳۶۶	-۰/۴۹۰	-۰/۳۰۲	-۰/۱۸۴	۱/۶۹۹	-۰/۷۰۳	-۰/۶۹۳	۱/۲۰۲	۲/۹۶۷	-۰/۷۴۳	-۰/۹۰۶

روش طراحی، با استفاده از پارامترهای بهینه، نتایج مطلوب‌تری از حالتی که از طیف عملکرد استفاده نمی‌شود، به دست می‌آید. همچنین در بررسی حاضر، دستگاه NSD عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌ها نسبت به دستگاه RBMAP-S نشان داده است. با استفاده از سیستم سختی منفی به همراه میراگر ویسکوز، می‌توان هم‌زمان مقدار برش پایه، لنگر واژگونی و جابه‌جایی سازه را تا حدود ۳۰٪ کاهش داد، که این خود باعث کاهش خسارت در این زیرساخت حیاتی می‌شود.

میراگر ویسکوز در کاهش جابه‌جایی 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 نرم‌افزار متلب مدل‌سازی 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 خطا از

پانویس‌ها

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

4. Iemura
5. Nagarajaiah
6. Tokooya
7. Liu & Zhou
8. Shape Memory Alloy
9. Huan Li

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 negative 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

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دردی ۲ - ۳۹، شمار ۱، ص. ۲۰-۱۵، (پژوهشی)

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 داده‌ی آزمایشگاهی مربوط به ستون‌های بتن مسلح از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۲، برای پیش‌بینی با روش‌های مختلف یادگیری ماشین انتخاب شده‌اند، که چهار سه نوع شکست: خمشی، برشی و خمشی - برشی بوده‌اند. در ادامه، عملکرد روش‌های یادگیری ماشین، شامل: آداپوست، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) با هم مقایسه شده‌اند. در این راستا، تحلیل‌های دقیق توسط نرم‌افزار پایتون بررسی شدند و نتایج به دست آمده نشان دادند که مدل جنگل تصادفی دارای دقتی برابر ۹۱٪ برای پیش‌بینی چرخش خمیری بعد از تسلیم (θ_p)، ۸۱٪ برای چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال مقاومت تا نقطه‌ی صفر مقاومت (θ_{pc}) و ۸۸٪ برای ظرفیت استهلاک انرژی نرمالیز شده (λ) نسبت به سایر الگوریتم‌ها بوده است. در ضمن، مدل جنگل تصادفی، نسبت به مدل‌های تحلیلی، بهبود پیش‌بینی قابل ملاحظه‌یی در تعیین مؤلفه‌های زوال داشته است.

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

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی جهت استفاده از الگوریتم‌های مختلف جهت پیش‌بینی پارامترهای سازه‌یی انجام شده است. بیو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، مقاومت فشاری و کششی بتن با کارایی بالا را توسط الگوریتم ترکیبی به دست آوردند، که شامل: مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)^۲ و الگوریتم کرم شب‌تاب اصلاح شده بوده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که سیستم ترکیبی، عملکرد بالایی نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است.^۱ نخاله‌های ساختمانی و پسماندهای کشاورزی، از جمله نگرانی‌های عمده‌ی زیست‌محیطی در جهان هستند. سالانه بیش از ۲۵۴/۵ میلیون تن پوسته‌ی برنج برای دفع، در دسترس است، که مقدار زیادی از آنها را می‌توان بازیافت و به عنوان سنگ‌دانه در بتن استفاده کرد. جتاهون^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، برای پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی خاکستر پست برنج، از

مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) استفاده کرده‌اند.^۱ 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 (۲۰۱۸)، به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) پرداخته‌اند.^۳ اونیاری و آیکوتون^۴ (۲۰۱۸)، از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و خمشی ملات ساخته شده با افزودنی زئولیت اصلاح شده استفاده کرده‌اند.^۴ پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های تحت بار جانبی، یکی از مسائل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک بوده و تا کنون روش‌های متفاوتی برای ارزیابی آن ارائه شده است، اردکانی و کوهستانی (۲۰۱۷)، از روش ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک‌های رسی استفاده کرده‌اند.^۵ 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^۵ و همکاران (۲۰۱۸)، از

* نویسنده مسئول

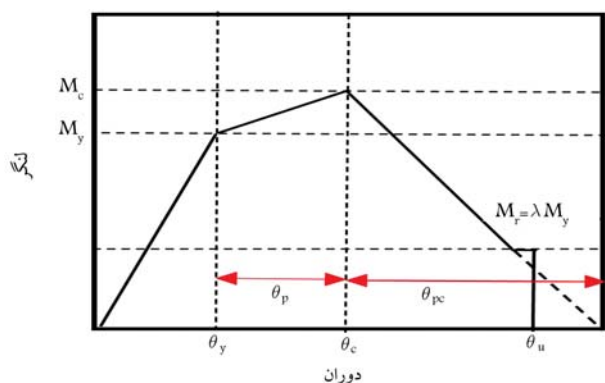
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۷، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2022.60697.3116

استاد 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،

(۱) ۲-۳۹، ص. ۲۰-۱۵



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.^[۱۵] سانتوس^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۷)، از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص ناهنجاری در پل‌ها استفاده کرده‌اند.^[۱۶] منگالاسو و همکاران (۲۰۲۰)، از مدل‌های یادگیری ماشین جنگلی تصادفی (RF)^{۱۲} برای پیش‌بینی حالت شکست ستون‌های بتن مسلح و دیوارهای برشی و نیز از یک روش توضیحی افزایشی تطبیقی SHAP^{۱۳} برای رتبه‌بندی متغیرهای ورودی بابت 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.^[۱۷]

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 آداپوست^{۱۴} 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 ۲۰۲۰ جمع‌آوری و انتخاب شده‌اند.^[۱۸] 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، مدل‌هایی نیاز است که بتوانند رفتار اعضا سازه را تشریح کنند. منحنی‌های بک - بُن^{۱۵} یا یک‌جهته، مدل‌های چندخطی هستند که شامل مؤلفه‌های زوال هستند، (شکل ۱). رویکرد تحلیلی، برای ایجاد مدل‌هایی برای 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. 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، مدل‌هایی نیاز است که بتوانند رفتار اعضا سازه را تشریح کنند. منحنی‌های بک - بُن یا منحنی‌های یک‌جهته، 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 و جزئیات ساخت و ساز را فراهم و در نتیجه، فرصت مناسبی برای برآورد قابل اطمینان از چرخه‌ی عمر گازه‌های گلخانه‌ی ایجاد کرده‌اند.^[۶] در مطالعات دیگری، طبقه‌بندی مدهای شکست در سازه‌های بتن مسلح با میانقاب بنایی از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسط هوانگ و بارتون^۶ (۲۰۱۹) انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که بیشتر الگوریتم‌ها، دقتی بیش از ۸۰٪ دارند، که در این میان بالاترین دقت برای الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و تقویتی تطبیقی بوده است.^[۷] در این راستا، منگالاسو و ژئون^۷ (۲۰۱۸)، توانستند مدهای شکست قبل و بعد از تسلیم عضو، همچنین مقاومت‌های برشی اتصال‌ها در تیرها و ستون‌های بتن مسلح تحت بارهای لرزه‌ی را از طریق یادگیری ماشین به دست آورند.^[۸] سیام^۸ و همکاران (۲۰۱۸)، نیز برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی عملکرد دیوارهای برشی آجری مسلح از روش‌های یادگیری ماشین استفاده کرده‌اند. ایشان ابتدا از یک الگوریتم بدون نظارت برای خوشه‌بندی دیوارها بر اساس مشخصات هندسی و مکانیکی استفاده کرده و سپس از طریق الگوریتم‌های تحت نظارت به طبقه‌بندی دیوارها و پیش‌بینی جابه‌جایی جانبی با توجه به مدهای شکست پرداخته‌اند.^[۹] کیانی و همکاران (۲۰۱۹)، پاسخ‌های لرزه‌ی و منحنی‌های شکنندگی را از طریق ابزارهای یادگیری ماشین به دست آورده‌اند. آنها از ۱۰ الگوریتم یادگیری ماشین استفاده کرده و دریافته‌اند 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 شکنندگی استفاده کرده‌اند، که نتایج به دست آمده حاکی از دقت و کارایی بالای روش مذکور است.^[۱۰] ژئون^۹ و همکاران (۲۰۱۴)، مدل‌های آماری برای مقاومت برشی اتصال‌های تیر به ستون بتنی مسلح را براساس روش‌های یادگیری ماشین ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیون خطی چندگانه‌ی معمولی و روش یادگیری ماشین پیشرفته‌ی ماریچ رگرسیون خطی سازگار چندگانه (MARS)، تأثیر پارامترهای مختلفی، مانند: خواص ماده، پارامترهای طراحی و پیکربندی اتصال (مقاومت برشی اتصال) را بررسی کردند و دریافته‌اند که روش MARS، دقت و پیش‌بینی بالایی دارد.^[۱۱] رفیعی و عادلی (۲۰۱۷)، از یک مدل جدید برای پایش سلامت سازه‌های بلندمرتبه از طریق ترکیب یادگیری ماشین بدون نظارت، ماشین بولترمن محدود و یک الگوریتم طبقه‌بندی تحت نظارت به نام طبقه‌بندی دینامیک عصبی استفاده کرده‌اند. ایشان نتایج به دست آمده را با سه الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده مقایسه کرده و دریافته‌اند که طبقه‌بندی دینامیکی عصبی، دقت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.^[۱۲] فلاح و همکاران (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: خوشه‌بندی، رگرسیون و طبقه‌بندی آسیب در سازه‌های مختلف، از جمله: ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها، تونل‌ها و غیره را انجام می‌دهد و از این طریق می‌تواند شکاف‌های دانش فعلی و نیازهای مطالعات آینده را مشخص کند.^[۱۳] چارالامپاکیس^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰)، دوره‌ی تناوب اصلی سازه‌های بتن‌آرمه‌ی مسلح میانقاب با مصالح بنایی را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین تخمین زدند و نشان دادند که دوره‌ی تناوب، که به ارتفاع سازه‌ها، طول دهانه‌ی بین ستون‌ها، نسبت بازشدگی 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.^[۱۴] منگالاسو و همکاران (۲۰۲۰)، مدهای شکست لرزه‌ی، دیوارهای برشی بتن مسلح را توسط ۸ الگوریتم یادگیری ماشین به دست آوردند، 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.

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

۲. مروری بر روش‌های یادگیری ماشین

در نوشتار حاضر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و اثر کلی مدل‌های یادگیری که در پیش‌بینی مؤلفه‌های زوال اعضا بتنی به کار می‌روند، بررسی شده‌اند. در مدل‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین از نرم‌افزار Python ۳/۸ استفاده شده است. در یادگیری ماشین، داده‌ها به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شوند، که بخش راستی آزمایشی 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 اعمال شده است. نتایج به دست آمده از مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و توسط معیارهای ارزیابی میزان دقت و صحت نتایج بیان شده‌اند، که در ادامه، به طور خلاصه معرفی شده‌اند:

۱.۲. شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌ی عصبی، مجموعه‌ی از نورون‌هاست که با قرار گرفتن در لایه‌های مختلف، معماری خاصی را بر 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 بردارها 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 فعال‌سازی، لایه‌های ورودی، لایه‌ی پنهان و لایه‌ی خروجی هستند. لایه‌های شبکه‌های عصبی تا جایی تغییر می‌کنند که الگوریتم مذکور قادر به ارائه‌ی جواب تصادفی نباشد.^[۱۹]

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 تعلق دارد و می‌تواند برای

در مطالعه‌ی حاضر، داده‌های مربوط به ۲۵۵ مؤلفه‌ی زوال مربوط به ستون‌های بتن مسلح و همچنین روابط تجربی به دست آمده، توسط هسلتون^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۸] استفاده شده است. معادله‌ی ۱، چرخش خمیری بعد از تسلیم θ_p ، معادله‌ی ۲، چرخش خمیری بعد از تسلیم ساده شده θ_p ؛ معادله‌ی ۳، چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال تا نقطه‌ی صفر مقاومت θ_{pc} و معادله‌ی ۴، ظرفیت استهلاك انرژی نرمالایز شده λ هستند.^[۱۸] 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، $\frac{P_b}{P}$ نسبت نیروی محوری بالانس شده به نیروی محوری، f'_c تنش فشاری بتن، f_y تنش تسلیم میلگرد، ρ نسبت مساحت میلگرد طولی به مساحت کل، d_b قطر میلگرد طولی، s فاصله‌ی میلگردهای عرضی، s_n ضریب کمانش میلگرد، ρ_{sh} نسبت مساحت میلگردهای عرضی به مساحت کل، $\rho_{sh,eff}$ نسبت مساحت مؤثر میلگردهای عرضی به مساحت کل و 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 θ_p ؛ چرخش خمیری از نقطه‌ی زوال تا نقطه‌ی صفر مقاومت θ_{pc} و ظرفیت استهلاك انرژی نرمالایز شده λ هستند، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. ستون‌ها نیز بعد از انهدام، دچار 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) نمایش داده شده‌اند. تابع توزیع داده‌ها به صورت گاوسی در نظر گرفته شده است.

۲.۱. روابط تحلیلی موجود

$$\theta_p = 0.12(1 + 0.55a_{sl})(0.16)^v(0.2 + 4\rho_{sh})^{0.22} (0.54)^{0.1} units f'_c (0.66)^{0.1} s_n (2.27)^{10\rho} \quad (1)$$

ب) ضریب تعیین (R^2)^{۱۹}

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (Y_{test}^{\wedge} - Y_{testi})^2}{\sum_{i=1}^{N_i} (Y_{test} - Y_{testi})^2} \quad (6)$$

ج) خطای مطابق میانگین (MAE)^{۲۰}

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

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

جدول ۲. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در θ_p .

مجموعه‌ها	روش‌ها	R^2	RMSE	MAE
نتایج آزمایشی	آداپوست	۰/۵۷	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۷۴
	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۶۶	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۸۴
	جنگل تصادفی	۰/۶۷	۰/۰۱۲۶	۰/۰۰۰۸
نتایج آموزشی	آداپوست	۰/۶۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۷
	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۷۷	۰/۰۰۱۴۳	۰/۰۰۰۹۴
	جنگل تصادفی	۰/۹۱	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۷۲

جدول ۳. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در θ_{pc} .

مجموعه‌ها	روش‌ها	R^2	RMSE	MAE
نتایج آزمایشی	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۳۲	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۸۳
	آداپوست	۰/۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۳۲
	جنگل تصادفی	۰/۴۰۴	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۴
نتایج آموزشی	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۴۲	۰/۰۰۱۲۶	۰/۰۰۹
	آداپوست	۰/۷۲	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۶۷
	جنگل تصادفی	۰/۸۱	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۵

جدول ۴. مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی و آموزشی در λ .

مجموعه‌ها	روش‌ها	R^2	RMSE	MAE
نتایج آزمایشی	آداپوست	۰/۵۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۵
	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۷۴	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۲
	جنگل تصادفی	۰/۸۵	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۵
نتایج آموزشی	آداپوست	۰/۶۶	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۸۶
	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰/۷۵	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۷
	جنگل تصادفی	۰/۸۸	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۳۹

مشکلات طبقه‌بندی و رگرسیون (پیش‌بینی و بیان تغییرات یک متغیر بر اساس اطلاعات متغیر دیگر) در یادگیری ماشین استفاده شود. روش RF، مبتنی بر مفهوم یادگیری گروه است، که یک فرایند ترکیب چند طبقه‌بندی‌کننده برای حل یک مسئله‌ی پیچیده و بهبود عملکرد مدل است. جنگل تصادفی (RF)، اساساً مانند کیسه‌بی است که شامل n درخت تصمیم‌گیری است، که مجموعه‌ی متفاوت دارد و در زیرمجموعه‌های مختلف داده‌ها آموزش داده می‌شوند. یکی از بزرگ‌ترین مزایای جنگل تصادفی (RF)، تطبیق‌پذیری آن برای کارهای رگرسیون و طبقه‌بندی است. همچنین در مورد مشاهده‌ی اهمیت نسبی، که به ویژگی‌های ورودی اختصاص می‌یابد، جنگل تصادفی یک الگوریتم بسیار مفید است؛ زیرا ابرپارامترهای پیش‌فرضی که از مشاهدات و ویژگی‌ها استفاده می‌کنند، اغلب نتیجه‌ی پیش‌بینی خوبی ایجاد می‌کنند. ابرپارامترهای جنگل تصادفی اعدادی هستند که باید به طور صحیح انتخاب شوند. روش خاصی در انتخاب ابرپارامترها وجود ندارد. پارامترهای مذکور تا جایی تغییر می‌کنند، که دیگر الگوریتم RF، قادر به ارائه‌ی جواب تصادفی نباشد.^[۲۰]

۳.۲. آداپوست

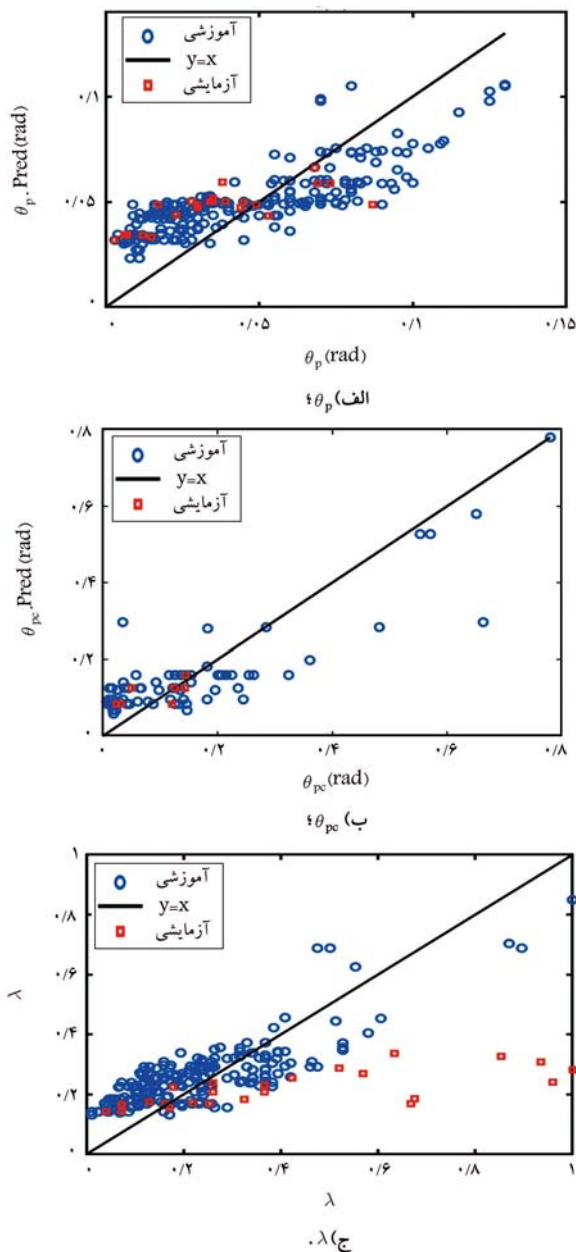
آداپوست (AdaBoost) مخفف برجسب‌زنی تطبیقی^{۱۷}، یک الگوریتم طبقه‌بندی آماری و یادگیری ماشین است. آداپوست، روش یادگیری ترکیبی و شناخته شده‌ترین روش از خانواده‌ی برجسب‌زنی است. در الگوریتم آداپوست، مدل‌ها به طور پی‌درپی یاد گرفته می‌شوند، به طوری که در هر نوبت، یک مدل آموزش داده می‌شود. در پایان هر نوبت، 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، آداپوست یک مثال الگوریتم است، که به منظور ارتقاء عملکرد و رفع مشکل رده‌های نامتوازن همراه دیگر الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. الگوریتم آداپوست نسبت به داده‌های نویز و پرت حساس است، ولی نسبت به مشکل پیش‌پردازش، از بیشتر الگوریتم‌های یادگیری برتری دارد.^[۲۱]

۳. عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین

برای تعیین بهترین عملکرد در میان سه الگوریتم استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، از ۲۵۵ 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 بر اساس روش Kennard-Stone Algorithm بوده است. سه الگوریتم: شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF) و آداپوست برای پیش‌بینی استفاده و عملکرد آنها ارزیابی شده‌اند. سه پارامتر ارزیابی، عملکرد شامل این موارد هستند:

الف) ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE)^{۱۸}

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



شکل ۲. الگوریتم آدابوست.

جدول ۸. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی برحسب مدل تحلیلی برای θ_p .

MAE	RMSE	R^2	روش‌ها
۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۹۸	۰/۹۱	جنگل تصادفی
۰/۰۲	۰/۰۲۷	۰/۱۹	معادله‌ی ۱
۰/۰۲۱	۰/۰۲۷	۰/۱۸	معادله‌ی ۲
۶۴	۶۳/۷	۷۹	بهبود نسبت به معادله‌ی ۱ (%)
۶۵/۷	۶۳/۷	۸۰/۲	بهبود نسبت به معادله‌ی ۲ (%)

تحلیلی مشاهده می‌شوند. مدل جنگل تصادفی در مقایسه با دیگر مدل‌های تحلیلی، پارامترهای R^2 ، $RMSE$ و MAE 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 θ_p .

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

جدول ۶. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها و روابط تحلیلی برای θ_{pc} .

MAE	RMSE	R^2	روش‌ها	مجموعه‌ها
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	
۰/۰۹۶	۰/۱۴	۰/۲	معادله‌ی ۳	

جدول ۷. مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها و روابط تحلیلی برای λ .

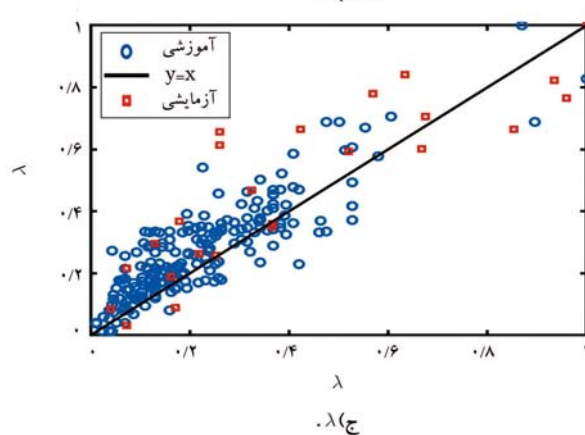
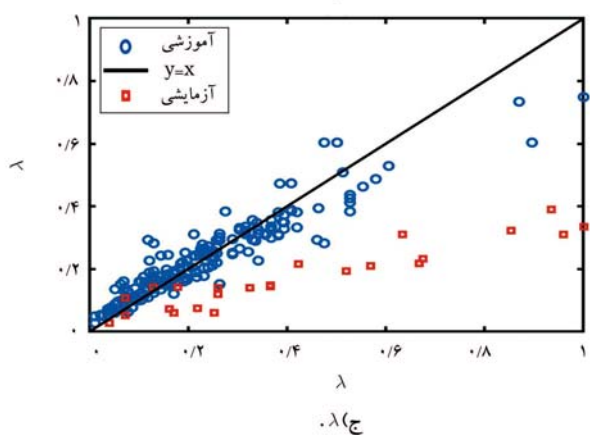
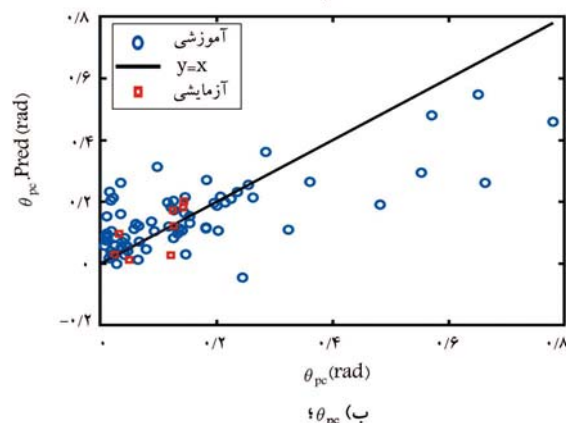
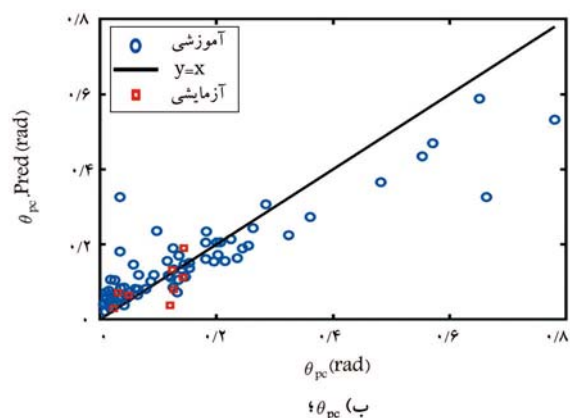
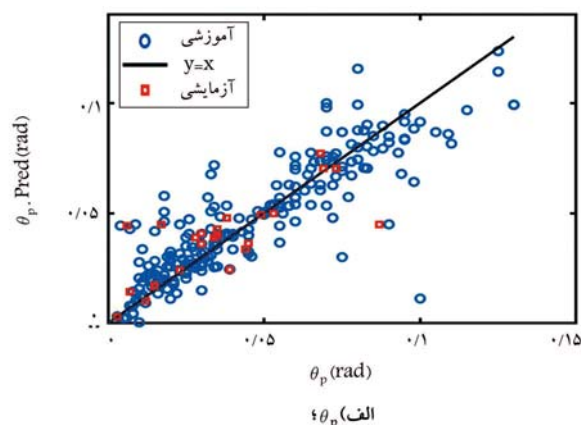
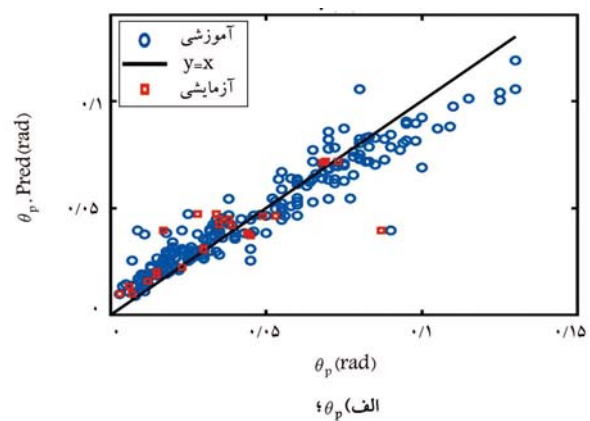
MAE	RMSE	R^2	روش‌ها	مجموعه‌ها
۰/۰۸۶	۰/۰۹۸	۰/۶۶	آدابوست	نتایج آموزشی
۰/۰۷	۰/۰۹۳	۰/۷۵	شبکه‌ی عصبی مصنوعی	
۰/۰۳۹	۰/۰۵۷	۰/۸۸	جنگل تصادفی	
۰/۰۳۷	۰/۴۳	۰/۴۷	معادله‌ی ۴	

$Y_{test,i}^{\wedge}$ مقادیر واقعی برای i آمین مشاهده در داده‌های آزمایشی و $Y_{test,i}$ مقادیر پیش‌بینی شده در i آمین 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 براساس ۱۴ پارامتر اشاره شده انجام شده است. نتایج به دست آمده برای ارزیابی الگوریتم‌ها نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی با $R^2 = ۰/۹۱$ ، $RMSE = ۰/۰۰۹۸$ و $MAE = ۰/۰۰۷۲$ برای θ_p ، با $R^2 = ۰/۸۱$ ، $RMSE = ۰/۰۷۲$ و $MAE = ۰/۰۵$ برای θ_{pc} و همچنین $R^2 = ۰/۸۸$ ، $RMSE = ۰/۰۵۷$ و $MAE = ۰/۰۳۹$ برای λ ، 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.

جدول ۹. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی برحسب مدل تحلیلی برای θ_{pc} .

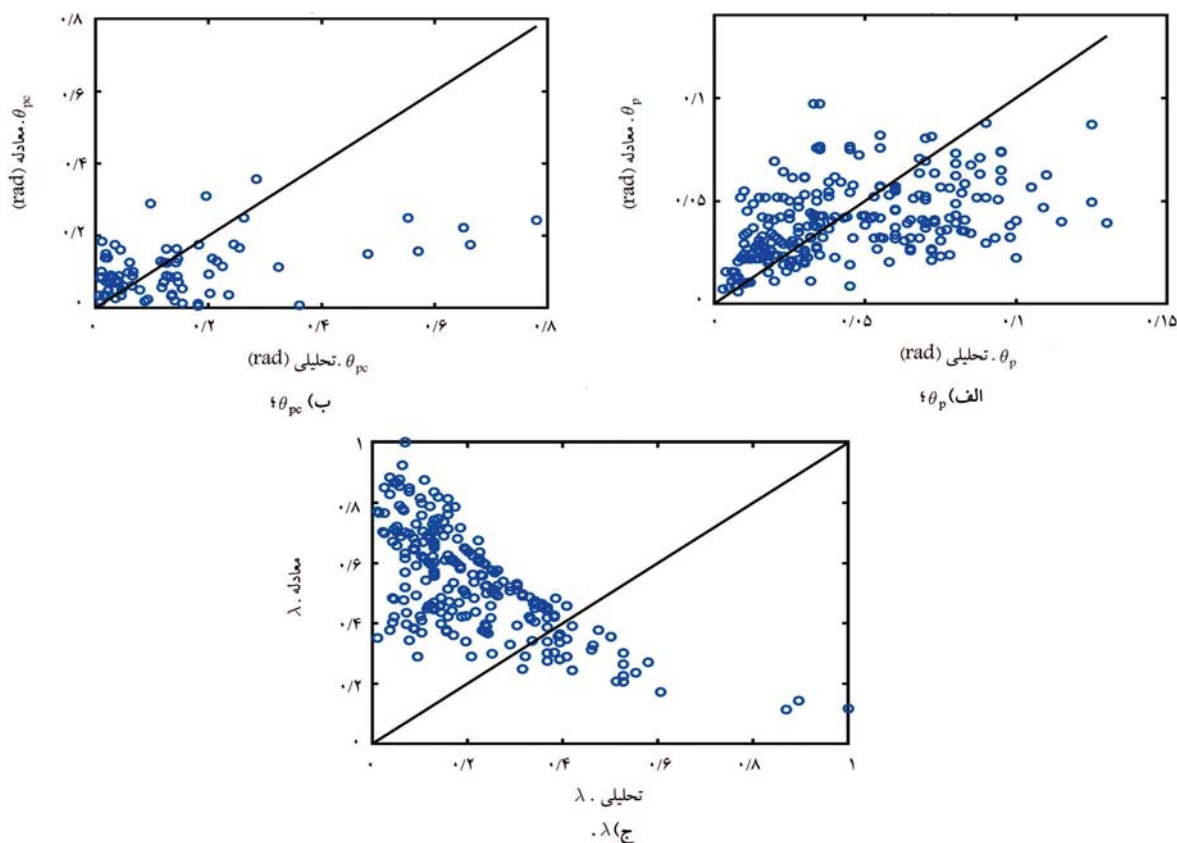
روش‌ها	R^2	RMSE	MAE
جنگل تصادفی	۰/۸۱	۰/۰۷۲	۰/۰۵
معادله‌ی ۳	۰/۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹۶
بهبود نسبت به معادله‌ی ۳ (%)	۷۵/۳	۴۸/۵	۹۲

جدول ۱۰. مقایسه‌ی عملکرد مدل جنگل تصادفی برحسب مدل تحلیلی برای λ .

روش‌ها	R^2	RMSE	MAE
جنگل تصادفی	۰/۸۸	۰/۰۵۷	۰/۰۳۹
معادله‌ی ۴	۰/۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۳۷
بهبود نسبت به معادله‌ی ۴ (%)	۴۶/۵	۸۶/۷	۸۹/۴

۵. نتیجه‌گیری

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



شکل ۵. پیش‌بینی انجام شده توسط روابط تحلیلی.

بر اساس داده‌های آموزشی، برای θ_p برابر ۹۱٪، برای θ_{pc} برابر ۸۱٪ برای λ برابر ۸۸٪ بوده و لذا، بهترین پیش‌بینی را داشته است. همچنین روش RF برای داده‌های آزمایشی دارای دقت: ۶۷٪ برای θ_p ، ۴۰٪ برای θ_{pc} و ۵۲٪ λ بوده است. میزان بهبودی که مدل جنگل تصادفی نسبت به روابط تحلیلی داشته است، در R^2 برابر ۴۶/۵٪، در RMSE، ۸۶/۷٪ و در MAE ۸۹/۴٪ بوده است.

حاضر، از ۲۵۵ داده‌ی آزمایشگاهی استفاده شده است، که به صورت تصادفی به دو قسمت آموزشی و آزمایشی تقسیم‌بندی شده‌اند (۹۰٪ داده‌ها آموزشی و ۱۰٪ 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

پانویس‌ها

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

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, 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 Environment*, **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-Dakhkhni, 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 Engineering & 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 13th International Conference* (1996).

بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ی ANP

سیمما صمدیان فرد (دانشجوی دکتری)

وهب توفیق* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف (پیاپی ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۲ - ۳۹، شماره‌ی ۱، ص. ۲۳-۲۷، (پژوهشی)

روند فزاینده‌ی 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 سازه‌ی و غیرسازه‌ی در کنار ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی علاوه بر گسترش زمینه‌های کاربردی مصالح مذکور، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی میزان انرژی مصرفی و کاهش پیامدهای مخرب زیست‌محیطی می‌شود، که هم‌سو با اهداف توسعه‌ی پایدار نیز است. در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء‌یافته‌ی تحلیل شبکه‌ی (ANP) به منظور انتخاب پانل سازه‌ی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌ی، 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 هزینه‌ی ساخت هستند. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور، با مدل‌سازی یک سوله‌ی سه دهانه‌ی در نرم‌افزار $SAP2000 \times V19/2$ و با استفاده از روش ANP، انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی میسر شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که سوله با فولاد ST37 و استفاده از پانل با ضخامت ورق عایق 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 ST52، تا 30% میزان رسانش حرارتی را کاهش می‌دهد.^[۴] به همین علت، بررسی تأثیر استفاده از پانل‌های عایق 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 سازه‌ی باید در کنار تأمین پارامترهای مقاومتی و حرارتی، از نظر هزینه نیز در وضعیت مطلوبی باشد.^[۵] بنابراین انتخاب چنین سیستمی نیازمند روش‌های انتخاب چندمعیاره است. یکی از روش‌های مذکور، روش تحلیل شبکه‌ی (ANP) است.^[۶] روش ANP با ایجاد شبکه‌ی 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^[۷] (۲۰۱۲)، نحوه‌ی توزیع انرژی از نیروگاه‌ها را بررسی کردند. همچنین یوهان و همکاران^[۸] (۲۰۱۵)، با استفاده از روش ANP، یک روش سودمند بهسازی در چین، و میلانی و همکاران^[۹] (۲۰۱۳)، نیز با استفاده از روش اخیر، مصالح مناسبی برای یک فضایما انتخاب کردند.

نرخ فزاینده‌ی نیاز به کاهش مصرف انرژی و بهبود سطح عملکرد زیرساخت‌های موجود، روش‌های نوین ساخت و ساز و تعبیه‌ی سیستم‌های جدید عایق حرارتی برای سازه‌های صنعتی را مورد توجه پژوهشگران سازه قرار داده است.^[۱] 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.^[۲] به همین دلیل، باید این میزان انرژی مصرفی که به عنوان اصلی تغییر اقلیم شناخته شده است، کنترل و روش‌های کاهش آن ارائه شوند.^[۳]

بخش اعظمی از اتلاف انرژی سازه‌های صنعتی از سطوح غیرسازه‌ی آن صورت می‌پذیرد. با این حال، ۲۵٪ از این میزان اتلاف 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 ۱۴۰۱/۴/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2022.60619.3120

استناد به این مقاله:

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

در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء یافته‌ی تحلیل شبکه‌یی به منظور انتخاب پانل سازه‌یی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌یی - به عبارت بهتر، سازه‌ی بهینه از نظر انرژی - استفاده شده است. المان‌های منتخب برای انتخاب سازه‌ی بهینه در مطالعه‌ی حاضر، ضریب رسانش حرارتی پانل‌ها، مدت زمان تأخیر حرارتی، وزن سازه، و هزینه بوده‌اند. در نهایت، با استفاده از روش ANP، نیز انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی میسر شده است. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور، سوله‌ی سه دهانه‌یی در نرم‌افزار SAP2000 V19/2 مدل شده است.

۲. تئوری و فرضیات خصوصیات رفتاری مصالح

۱.۲. مدت زمان تأخیر و ضریب کاهشی

پروفیل دمایی در راستای ضخامت دیوار بستگی 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 پدیده‌ی 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:

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

که در آن، $T_{\max, \text{out}}$ بیشینه‌ی دما و $T_{\min, \text{out}}$ کمینه‌ی دمایی است که سطح خارجی دیوار که در تماس با محیط بیرون است، تجربه می‌کند. به طور مشابه، $T_{\max, \text{in}}$ بیشینه‌ی دما و $T_{\min, \text{in}}$ کمینه‌ی دمایی است که سطح داخلی دیوار تجربه می‌کند. در شکل ۱، نمای شماتیک 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، Φ به عنوان مدت زمان تأخیر شناخته می‌شود که همان مدتی است که طول می‌کشد تا هر دو طرف دیوار به بیشترین دمای خود برسند.

۲.۲. ضریب رسانش حرارتی

ویژگی‌های نارسائیی حرارتی سازه‌ها به پارامترهای حرارتی مواد سازنده‌ی آن‌ها،

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 پوشاننده‌ی جداره‌ی ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد. برقراری جریان حرارتی در داخل نمونه برای به دست 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 نرخ جریان حرارتی (W)، dT اختلاف دمایی بین دو سمت نمونه ($^{\circ}C$)، dx ضخامت نمونه (m) و k ضریب هدایت حرارتی ($W^{\circ}C^{-1}m^{-1}$) هستند. روش‌های اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به دو گروه اصلی روش‌های پایا و گذرا تقسیم می‌شوند و عوامل قابل ملاحظه‌یی در تعیین آن‌ها تأثیر می‌گذارند، که عبارت‌اند 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 قرار می‌گیرد به صورت تابع توانی با زمان گرم می‌شود. شرایط مرزی 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.

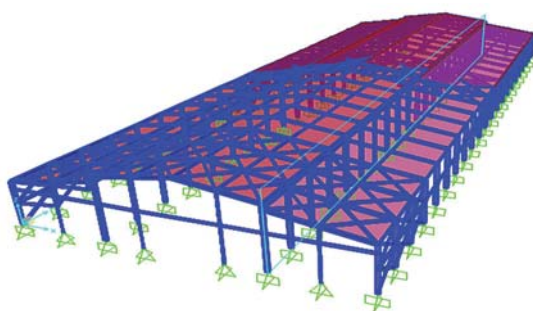
نرخ افزایش دمای سیم به قابلیت رسانش ماده بستگی دارد. در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای محاسبه‌ی رسانش حرارتی مواد پیشنهاد شده است. مشکل اصلی روش‌های پایا، مدت زمان طولانی است که برای آزمایش صرف می‌شود. در صورت استفاده از محیط‌های بسته، هوای محبوس موجب افزایش فشار داخلی محفظه می‌شود. با توجه به اینکه پارامترهای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

۳. روش پژوهش

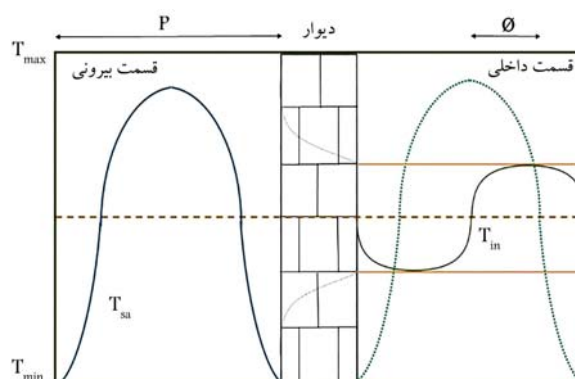
۱.۳. مدل سازی سوله

به منظور مطالعه‌ی پارامترهای وزن و هزینه، سوله‌ی نشان داده شده در شکل ۲، در نرم‌افزار SAP2000 مدل شده است.

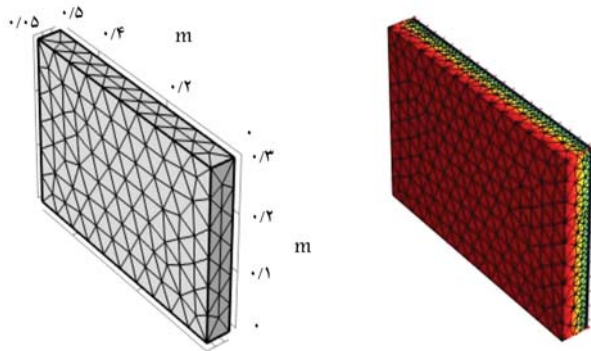
سازه‌ی صنعتی مورد مطالعه، یک سوله با دو نیم‌سوله‌ی مجاور بوده است (شکل ۳) که هر یک از آن‌ها، دارای جرثقیل بوده است؛ به طوری که ظرفیت جرثقیل



شکل ۲. نمای سه‌بعدی سوله.



شکل ۱. نمای شماتیک پارامتر مدت زمان تأخیر.



شکل ۵. نمونه‌یی از پانل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL MULTI-PHYSICS.

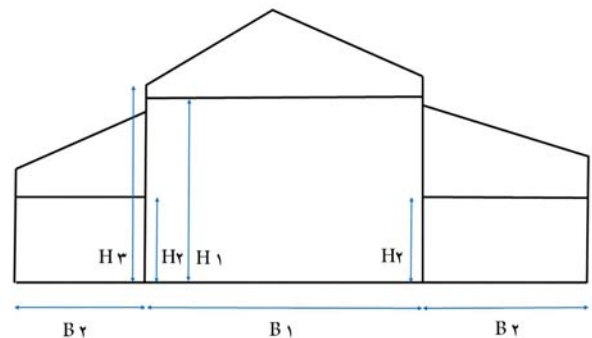
۳.۳. روش ANP

طراحی یک سازه‌ی صنعتی که از نظر مصرف انرژی بهینه باشد، باید از جهات متفاوتی ارزیابی شود. به طور خلاصه، بهبود عملکرد حرارتی، تأمین مقاومت مورد نظر و استفاده از مواد کم‌هزینه و با وزن کم، پارامترهای اصلی طراحی هستند، با وجود اینکه برخی از پارامترها در تضاد با هم هستند. به عنوان مثال، طراحی یک سازه با وزن پایین، مستلزم استفاده از مصالح گران‌قیمت است. روش ANP حالت تعمیم‌یافته‌ی روش AHP^۴ است. [۶] در روش AHP، انتخاب‌ها مستقیماً توسط معیارها رتبه‌بندی می‌شوند. در بالای هرم، گره ارزش میزان اهمیت هر معیار را مشخص می‌کند. در پایین هرم مذکور، نیز انتخاب‌ها مستقیماً توسط معیارهای پذیرش ارزیابی می‌شوند. بنابراین، در روش AHP، همبستگی معیارها در نظر گرفته نمی‌شود. در روش AHP، انتخاب‌ها نیز تأثیری در معیارها ندارند. روش ANP، این محدودیت‌ها را برطرف کرده است، به گونه‌یی که معیارها بر هم تأثیر گذاشته و بازخورد آن در نتایج آشکار می‌شود. المان‌های تصمیم‌گیری به صورت گره‌های یک شبکه در گروه‌های مجزا قرار می‌گیرند. نمای شماتیک دو روش ANP و AHP در شکل ۶ مشاهده می‌شود. چهارگام در حل یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری به این صورت است:

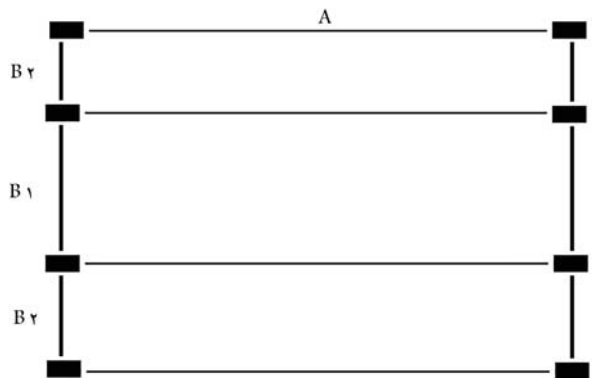
۱. انتخاب المان‌های تصمیم‌گیری،
۲. تعیین ارتباط بین معیارها،
۳. مطالعه‌ی مقایسه‌یی گره به گره معیارها،
۴. ایجاد یک ماتریس وزنی و غیروزی (شکل ۷).

۴. تحلیل نتایج

پارامترهای بهینه‌سازی، شامل: وزن، هزینه، ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی بوده‌اند. پارامترهای حرارتی مطابق جدول ۳ محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه‌ی XPS، از مقدار ضریب هدایت حرارتی کاسته شده و مدت زمان تأخیر حرارتی افزایش یافته است. با این حال، عدم وجود ورق آلومینیومی، تأثیر قابل توجهی در افزایش مدت زمان تأخیر با افزایش ضخامت XPS داشته است. از طرف دیگر، با طراحی سازه به روش تحلیل طیفی و با دو نوع فولاد ST۳۷ و ST۵۲، وزن سازه به ترتیب ۳۲۰ و ۲۲۵ تن به دست آمده است. به علاوه، هزینه‌ی ساخت سوله نیز کاهش یافته است. قابل ذکر است که تفاوت در هزینه‌ی ساخت پانل‌ها، موجب تفاوت چشمگیری در هزینه‌ی کلی ساخت سوله



شکل ۳. نمای جانبی سازه‌ی مطالعه شده.



شکل ۴. پلان سازه.

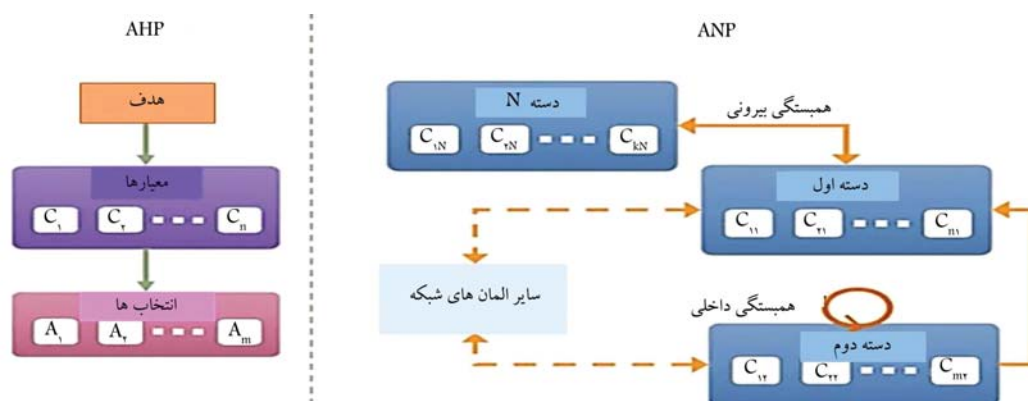
جدول ۱. ابعاد سازه.

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

سازه‌ی اصلی، ۱۰۰ تن و جرقه‌ییل سازه‌های 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. سازه‌ی اشاره شده، یک بار با مقاطع ساخته شده از فولاد ST۳۷ و بار دیگر با فولاد ST۵۲ تحلیل و طراحی شده است.

۲.۳. تعریف پانل‌های عایق

در مطالعه‌ی حاضر، ۵ نوع پانل بررسی شده و ضخامت ورق XPS^۲ در هر یک از آن‌ها از ۱ تا ۵ سانتی‌متر متغیر بوده است. سه نوع از پانل‌های مذکور (P۱، P۲، P۳) دارای ورق آلومینیوم ۴۰۰۰ بودند. با افزایش ضخامت و داشتن ورق آلومینیومی، قیمت پانل تا ۲/۵ برابر پانل ساده افزایش می‌یابد. در جدول ۲، مشخصات پانل‌های بررسی شده در مطالعه‌ی حاضر ارائه شده است. ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی پانل‌های مذکور - مطابق روش ذکر شده در نوشتار توفیق و صمدیان‌فرد (۲۰۲۰)، [۲] با استفاده از نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۵، ابعاد دیوار مدل شده، ۵ × ۵ × ۳۰ سانتی‌متر بوده و به صورت مثلثی با طول ضلع بیشینه‌ی ۵ سانتی‌متری، مش بندی شده است. به منظور مدل‌سازی دیوار از ماژول 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 شده‌اند.



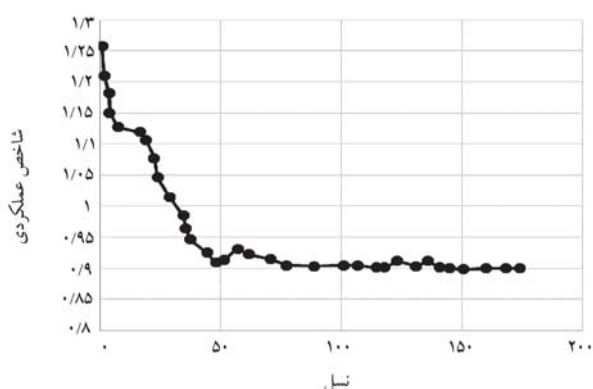
شکل ۶. نمای شماتیک شبکه‌های ANP و AHP. [۶]

جدول ۲. مشخصات پانل‌ها.

شماره	عبارت معرف پانل	ضخامت ورق XPS (cm)	ورق آلومینیوم	هزینه (واحد)	وزن واحد سطح (g/m ²)
۱	P۱	۱	دارد	۱/۰	۹۷۰
۲	P۲	۲	دارد	۱/۷	۱۱۵۰
۳	P۳	۳	دارد	۲/۵	۱۳۴۰
۴	P۴	۴	ندارد	۱/۶۵	۱۲۷۰
۵	P۵	۵	ندارد	۲/۱	۱۳۲۰

جدول ۳. ویژگی‌های حرارتی پانل‌های عایق.

شماره	عبارت معرف پانل	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	مدت زمان تاخیر (m)
۱	P۱	۰/۲۴	۹۴
۲	P۲	۰/۱۸	۱۱۱
۳	P۳	۰/۱۲	۱۲۰
۴	P۴	۰/۱۱	۱۴۸
۵	P۵	۰/۰۹	۱۵۶



شکل ۸. شاخص عملکردی روش ANP.

۵. نتیجه‌گیری

به منظور یافتن سازه‌ی صنعتی بهینه با در نظر گرفتن پارامترهای حرارتی، یک سوله با ابعاد ذکر شده به روش تحلیل طیفی یک‌بار با فولاد ST۳۷ و بار دیگر با فولاد ST۵۲ 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 در نظر گرفتن 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 ST۳۷ و استفاده از پانل P۴ به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. ملاحظه می‌شود در صورتی که طراحی با فولاد ST۵۲ انجام گیرد، با وجود اینکه سازه وزن کمتری خواهد داشت، به دلیل افزایش خارج از محدوده‌ی هزینه‌ها، طرح ST۵۲ اقتصادی نخواهد بود.

$$\begin{pmatrix} W_{11} & \dots & W_{1k} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{k1} & \dots & W_{kk} & \dots & W_{kn} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{nk} & \dots & W_{nn} \end{pmatrix}$$

شکل ۷. ماتریس ANP. [۶]

خواهد شد. با اجرای روش بهینه‌سازی ANP، پس از ۱۷۸ نسل، حالت بهینه به دست آمد. ساخت سوله با استفاده از فولاد ST۳۷ و استفاده از پانل P۴ به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. این در حالی است که استفاده از فولاد ST۵۲، 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.

پانوشته‌ها

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

منابع (References)

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., Zeghamati, 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.; Shaniyan, 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).

تزریق پذیری محلول نانوسیلیس کلوتیدی در ماسه ی کربناته ی بوشهر با درصد لای مختلف

احسان آذینی (دانشجوی دکتری)

رضا ضیائی مؤید* (استاد)

سید ابوالحسن نائینی (استاد)

دانشکده ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دربی ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۳۸-۲۹، (پژوهشی)

در مطالعه ی حاضر، تزریق پذیری روی خاک کربناته ی خلیج فارس (بوشهر) با محلول نانوسیلیس با ساخت نمونه های یک متری بررسی شده است. نمونه های ماسه ی کربناته با ترکیب مختلف لای با درصدهای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و ۳ غلظت محلول با درصدهای (۱۰، ۲۰ و ۳۰) تزریق شده اند، تا بتوان اثر عواملی، مانند: غلظت محلول، درصد ریزدانه و فشار تزریقی در میزان تزریق پذیری، نفوذ، و ارتباط آنها با یکدیگر را بررسی کرد. همچنین به منظور به دست آوردن غلظت بهینه ی تزریق، آزمایش های تک محوری با مقادیر مختلف درصد لای، ۳ درصد مختلف غلظت و در ۳ دوره ی عمل آوری انجام و مشاهده شد که تثبیت مؤثر و تمامی غلظت ها تزریق پذیر بوده است؛ به نحوی که غلظت ۳۰٪، بهینه ی غلظت تزریقی است، که بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت داشته است. همچنین غلظت ۳۰٪، نسبت به غلظت ۱۰٪، به طور میانگین ۴۰٪ افزایش مقاومت را در پی داشته است.

واژگان کلیدی: ماسه ی کربناته ی لای دار بوشهر، نانوسیلیس کلوتیدی، تزریق پذیری، بهسازی خاک، آزمایش تک محوری.

e_azini@yahoo.com
ziaie@eng.ikiu.ac.ir
naeini@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

مهندسی با هم دارند و انواع مختلفی از آنها به صورت خوب سیمانته شده تا غیرسیمانته در طبیعت یافت می شود، که رفتار مهندسی منحصر به فرد دارند.^[۲] در مناطق گرم استوایی، مانند سواحل خلیج فارس، خاک های کلسیتی^۱ (کربناته) یافت می شوند، که از بقایای اسکلت جانداران دریایی هستند و رفتار آنها با خاک هایی از جمله خاک های سیلیسی متفاوت است. خاک های کربناته می توانند کانی های کربناته داشته باشند، یا ماده ی سیمانته کننده ی آنها دارای مواد کربناته باشند و یا هر دو مورد ذکر شده وجود داشته باشد.^[۳]

سیلیس کلوتیدی، تثبیت کننده یی مناسب برای تثبیت خاک های ماسه ی سست است.^[۴-۶] سیلیس کلوتیدی تعلیقی، کلوتیدی است که فاز پیوسته ی آن، آب و ذرات پراکنده ی آن، ذرات سیلیس است و در صورتی پایدار می ماند که رسوب نکند و یا لخته شدن در آنها با سرعت کم رخ دهد. ژل شدگی^۲، فرایندی است که طی آن محلول سیلیس به ساختار زنجیره یی شکل به حالت ژل در می آید. زمان ژل شدگی نانوسیلیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیس، اندازه ی ذرات نانوسیلیس، pH و حرارت محلول بستگی دارد. با ثابت ماندن درجه حرارت و اندازه ی ذرات عامل pH باقی می ماند. کوتاه ترین زمان ژل شدگی در محدوده های $4 < pH < 7$ رخ

امروزه بهسازی خاک های مسئله دار، یکی از مسائل پیش روی جامعه ی مهندسی است. یکی از خاک های مسئله دار، خاک ماسه ی کربناته ی سست است، که در جنوب ایران، از جمله: هرمز، قشم، کیش و بوشهر یافت می شوند. منطقه ی خلیج فارس به ویژه بندر بوشهر، از منطقه های راهبردی کشور است، که در آن ماسه ی کربناته با درصد لای مختلف به وفور یافت می شود. لذا مطالعه ی دقیق بهسازی خاک منطقه ی خلیج فارس، اهمیت به سزایی دارد. خواص ماسه ی کربناته، که جزء خاک های مسئله دار محسوب می شود، را می توان با تثبیت کننده های شیمیایی به ویژه محلول نانوسیلیس کلوتیدی افزایش داد.

خاک های کربناته به خاک هایی گفته می شود که مقادیر قابل ملاحظه یی کربنات کلسیم دارند (عمدتاً در حدود ۵۰٪ یا بیشتر). اگر بیش از ۵۰٪ مواد حل شده از خاکی در اسید هیدروکلریک، از نوع کربناته باشد، آن خاک کربناته تلقی می شود.^[۱] رسوبات کربناته، تنوع بسیار زیادی هم از لحاظ منشأ تولید و هم از نظر ویژگی های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۳۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۸.

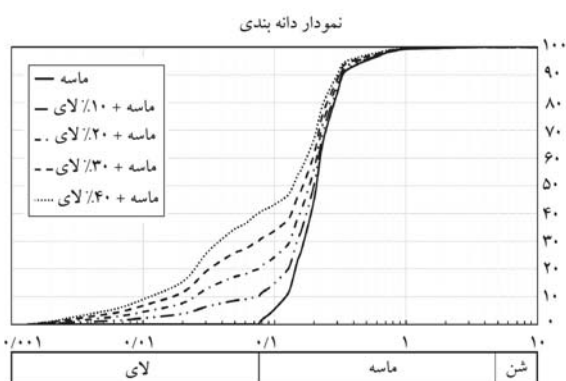
DOI:10.24200/J30.2022.60975.3135

استناد به این مقاله:

آذینی، احسان، ضیائی مؤید، رضا و نائینی، سید ابوالحسن (۱۴۰۲). «تزریق پذیری محلول نانوسیلیس کلوتیدی در ماسه ی کربناته ی بوشهر با درصد لای مختلف»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۳۸-۲۹

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح.

مشخصات خاک (gr/cm^3)								نوع خاک
C_c	C_u	D_{50}	γ_{dmin} (gr/cm^3)	γ_{dmax} (gr/cm^3)	e_{min}	e_{max}	G_s	
۰/۹۶۴۰	۱/۸۷۰	۰/۲۰۸	۱/۶۰	۱/۹۱	۰/۴۳۱	۰/۷۰۲	۲/۷۳	ماسه ی خالص
۱/۳۸۸	۲/۸۸۰	۰/۲۰۰	۱/۵۹	۱/۹۶	۰/۳۹۵	۰/۷۲	۲/۷۴	ماسه با ۱۰٪ لای
۳/۳۵۳	۸/۷۵۰	۰/۱۹۰	۱/۵۴	۱/۹۷	۰/۴۰	۰/۷۹	۲/۷۶	ماسه با ۲۰٪ لای
۱/۵۹۸	۱۳/۸۷۰	۰/۲۰۰	۱/۵۲	۱/۹۷	۰/۴۱۶	۰/۸۳۳	۲/۷۹	ماسه به ۳۰٪ لای
۰/۸۱۷	۱۶/۱۸۰	۰/۱۴۰	۱/۴۸	۱/۹۵	۰/۴۴۹	۰/۹	۲/۸۲	ماسه با ۴۰٪ لای



شکل ۱. دانه بندی ترکیب های مختلف ماسه - لای به کار رفته در پژوهش حاضر.

نانوسیلیس، تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر، بررسی ها در خصوص تزریق پذیری ماسه ی کربناته ی بوشهر در درصد های مختلف لای انجام شده است. همچنین نقش مؤثر محلول تزریقی (نانوسیلیس کلئیدی) تحت تأثیر عواملی از جمله: درصد لای، غلظت و pH محلول بررسی شده و هدف نهایی پژوهش حاضر، رسیدن به غلظت بهینه و مؤثر در خاک ماسه ی کربناته ی لای دار بوده است، که بر اساس نتایج آزمایش های تک محوری به دست آمده است.

۲. مشخصات مصالح و محلول استفاده شده

۱.۲. مشخصات ماسه ی استفاده شده

در سواحل شمالی خلیج فارس، عمدتاً خاک هایی دارای کربنات کلسیم ($CaCO_3$) هستند. در پژوهش حاضر از ماسه ی کربناته ی بوشهر استفاده شده است. با توجه به اطلاعات لاگ گمانه، که از پروژه های مختلف منطقه ی بوشهر به دست آمده است، درصد لای در خاک های ماسه ی لای دار در مکان های مختلف بین ۱۰ تا ۴۲ درصد بوده است.^[۱۹] بنابراین در پژوهش حاضر، درصد وزنی لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ انتخاب شده است. به دست آوردن درصد کربنات کلسیم خاک ماسه ی بوشهر نیز بر اساس استاندارد BS ۱۳۷۷-۳ انجام شده است، که مقدار آن ۷۲/۵٪ بوده است.^[۲۷] دانه بندی بر اساس استاندارد ASTM D ۶۹۱۳-۱۷ انجام شده است، که در شکل ۱ مشاهده می شود.^[۲۸] بر اساس استاندارد ASTM D ۴۲۵۴-۱۶، نسبت تخلخل بیشینه و بر اساس استاندارد ASTM D ۴۲۵۴-۱۶، نسبت تخلخل کمینه به دست آمده اند.^[۲۹ و ۳۰] همچنین جهت به دست آوردن چگالی ویژه (G_s) از استاندارد ASTM D ۸۵۴-۱۴ استفاده شده است.^[۳۱] در جدول ۱، مشخصات فیزیکی مصالح ارائه شده است. همچنین عکس های SEM گرفته شده از ماسه ی لای دار

می دهد و خارج از محدوده ی اخیر، به شدت این زمان می تواند افزایش یابد.^[۷ و ۸] موضوع تزریق پذیری خاک های دانه یی، سال هاست که مورد پژوهش پژوهشگران مختلف بوده و در بیشتر موارد از دوغاب های زبر، مانند سیمان، استفاده کرده اند.^[۹ و ۱۰] در پژوهش های مذکور، اثر اندازه ی دانه های خاک و سیمان ارزیابی شده است. در حالی که در مطالعات دیگری، پارامترهای: اندازه ی خاک و ماده ی سوسپانسیون تزریق، درصد ریزدانه، فشار تزریق، چگالی نسبی و نسبت آب به سیمان بررسی شده اند.^[۱۱ و ۱۲] دانو^۳ و همکاران (۲۰۰۴)، تزریق پذیری خاک دانه یی از ماسه تا سیلت را با تزریق دوغاب سیمان پرتلند بسیار ریز بررسی کرده اند.^[۱۳] با توجه به استفاده ی گسترده از تزریق نفوذی^۴ با سیمان در بهسازی خاک ها، تولید سیمان مشکلاتی را در پی دارد. برای تولید سیمان پرتلند انرژی زیادی مصرف می شود و همچنین صنعت سیمان سبب انتشار حدود ۷٪ گاز کربنیک در جهان می شود.^[۱۴] لذا استفاده از مصالح جایگزین به ویژه بهسازی با مواد شیمیایی، که غیرسمی و دوستدار محیط زیست هستند (به ویژه نانوسیلیس) رواج یافته است. مطالعات مختلفی بر روی تثبیت خاک ها با استفاده از مواد مختلف، از جمله: ژئولیت، بنتونیت و محلول سیلیکات سدیم انجام گرفته است. اما کمتر به مطالعه ی تزریق پذیری و عوامل مؤثر در تزریق با مواد ذکر شده پرداخته شده است. از جمله در مطالعه ی حسنلو راد و صرافی یگانه (۱۳۹۲)، بر روی قابلیت تزریق پذیری خاک های ماسه یی با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم پرداخته اند.^[۱۵] آنچه در مورد تزریق پذیری دوغاب سیلیکات سدیم مطرح است، ویسکوزیته ی آنهاست، به طوری که با افزایش لزجت از تزریق پذیری خاک کاسته می شود. در پژوهش نوری و همکاران (۱۳۹۵)، به تزریق پذیری خاک ماسه یی به وسیله ی دوغاب بنتونیت پرداخته اند.^[۱۶] به دلیل این که اخیراً، استفاده از نانومواد در پروژه های مهندسی عمران به دلیل مزایای متعدد و افزایش خواص مهندسی افزایش یافته است^[۱۷ و ۱۸] و از طرفی تاکنون مطالعاتی در خصوص تزریق نانوسیلیس کلئیدی در ماسه ی کربناته انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، به قابلیت تزریق پذیری محلول نانوسیلیس و عوامل مؤثر بر آن در ماسه ی کربناته ی لای دار پرداخته شده است.

با توجه به گزارش های ژئوتکنیک می توان گفت که در بیشتر موارد، خاک های بندر بوشهر تا عمق حدود ۱۲ متری از ماسه ی لای دار تشکیل شده اند.^[۱۹] با توجه به این نکته که مطالعات صورت گرفته در خاک های منطقه ی خلیج فارس در ماسه های تمیز صورت گرفته است،^[۲۰-۲۶] نیاز به بررسی رفتار ماسه های لای دار در منطقه ی خلیج فارس به شدت احساس می شود. همچنین از آنجایی که نقش حضور ریزدانه ی غیرخمیری در تزریق پذیری خاک های کربناته در مطالعات پیشین کمتر به چشم می خورد، بنابراین بررسی تأثیر درصد ریزدانه ی غیرخمیری در پارامترهای تزریق پذیری در خاک های کربناته ی منطقه ی خلیج فارس (بندر بوشهر) اهمیت زیادی پیدا می کند. از طرفی، در مورد بررسی اثر ریزدانه ها با حضور محلول تثبیت کننده ی

جدول ۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوتیدی با غلظت ۳٪ استفاده شده در پژوهش حاضر.

فرمول شیمیایی	$\text{SiO}_2\text{NH}_2\text{O}$
غلظت	۳/۰
حالت	مایع
رنگ	سفید شیری
وزن مولکولی	$60/0 \text{ kg/mol}$
چگالی ویژه	$1/19 - 1/21 (25^\circ \text{C})$
مقدار PH	۹/۰ - ۱۰/۰
لزجت	5 mPa.s
سایز ذره	۱۲-۲۵ nm
نقطه جوش اولیه	100°C

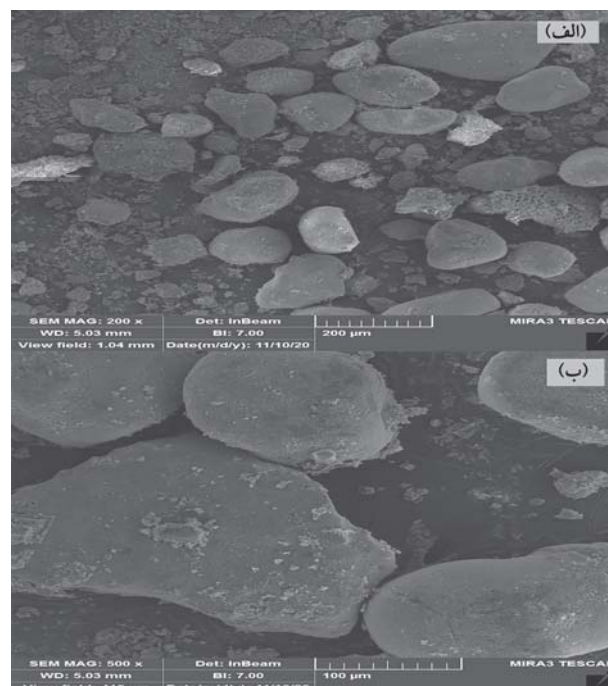


شکل ۳. دستگاه تزریق با اعمال فشار و مکش قابل تنظیم.



شکل ۴. قالب تزریق استوانه‌ای مدرج با قطر داخلی ۳/۸ و طول ۱۰۰ سانتی متر 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 براساس 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



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

کربناته‌ی بوشهر در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که در دسته‌ی نیمه تیرگوشه تا تیرگوشه قرار گرفته و بر اساس تقسیم‌بندی دانه‌های کربناته، که در نوشتار فوکز و هایجین باتوم^۵ (۱۹۷۵)،^[۳۲] 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 خردشدگی دانه‌ها در اثر فشار می‌شود. لازم به ذکر است که با بررسی چشمی، خاک باقیمانده‌ی ذرات پوسته‌های صدفی^۶ و باقیمانده‌ی خارتان^۷ مشاهده می‌شود.

۲.۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوتیدی استفاده شده

سیلیس کلوتیدی تعلیقی، کلوتیدی 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. ژل‌شدگی، فرایندی است که طی آن محلول سیلیس به ساختار زنجیره‌ی شکل به حالت ژل در می‌آید. زمان ژل‌شدگی نانوسیلیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیس، اندازه‌ی ذرات نانوسیلیس، قدرت یونی، pH و حرارت محلول بستگی دارد. مشخصات دوغاب سیلیس کلوتیدی با استعلام از شرکت دانش بنیان صنایع نانوسیلیس ايسانتيس تهیه شده است (جدول ۲).

۳. روش پژوهش

۳.۱. دستگاه و قالب‌های تزریق

برای انجام تزریق از دستگاهی 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 رؤیت باشد (شکل ۴). در حین تزریق، شفاف بودن قالب باعث شده است که



الف) نمای کلی قالب تزریق

ب) قطعات تشکیل دهنده قالب تزریق

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



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

۳.۳. غلظت‌های محلول نانوسیلیس کلئیدی

همان گونه که پیشتر گفته شد، هدف پژوهش حاضر، تزریق محلول نانوسیلیس است. از آنجایی که نانوسیلیس توسط شرکت داخلی تولید می‌شود، هزینه آن تا حدی پایین است و از سوی دیگر، به جهت خاصیت کلئیدی بودن آن در خاک‌های ماسه‌یی ریزو 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 کریناته‌ی لای دار، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بوده است. لازم به ذکر است که نهایتاً مقدار غلظت بهینه با استفاده از آزمایش تک‌محوره به دست آمده است، که در ادامه بیان شده است.

۴. روش تزریق و عمل‌آوری

همان طوره که در بخش مقدمه عنوان شده است، مصالح ریزدانه‌ی موجود در دوغاب می‌توانند به راحتی سبب بسته شدن ۱۰ منافذ بین ذرات خاک شوند. [۳۵] جهت بررسی تزریق پذیری از لوله‌ی ۱ متری شفاف با قطر داخلی ۳/۸ سانتی‌متر استفاده

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

۲.۳. روش ساخت نمونه

در مطالعه‌ی قنبری و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از روش تراکم کاهش یافته به نمونه‌سازی خاک ماسه‌ی کریناته‌ی لای دار بوشهر پرداخته شده است. [۳۲] ایشان به منظور کنترل همگن بودن نمونه در لایه‌های مختلف از روش تزریق ژلاتین^۸ استفاده کرده و دریافته‌اند که با استفاده از تراکم کاهش یافته، نمونه‌سازی همگن در نمونه‌های ماسه‌ی لای دار کریناته‌ی بوشهر امکان پذیر است. لذا در پژوهش حاضر، از روش تراکم کاهش یافته^۹ استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی قنبری و همکاران (۱۴۰۱)، که بر روی خاکی مشابه انجام شده است، برای رسیدن به نمونه‌ی همگن نیاز به ۸٪ رطوبت بهینه بوده است. [۳۲]

به منظور انتخاب درصد تراکم، بر اساس مطالعات رسولی و حسنلو (۱۳۹۴)، مشاهده شد که ظاهراً ماسه‌های کریناته‌ی خلیج فارس و دریای عمان نسبت به ماسه‌های سایر نقاط جهان، در محدوده‌ی ماسه‌های با قابلیت فشردگی کم تا نسبتاً زیاد قرار دارند. [۳۳] همچنین در مطالعه‌ی زارع و حاجیان (۱۳۹۶)، پس از بررسی عدد نفوذ استاندارد و تراکم نسبی رسوب‌های شهر بوشهر مشاهده شد که در اعماق ۱۵ متری، تراکم نسبی ماسه‌ی لای دار، متوسط و سست گزارش شده است. [۱۹] بنابراین جهت انجام آزمایش از چگالی نسبی ۵۰٪ استفاده شده است.

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 مورد نظر خاک با توجه به چگالی نسبی ۵۰٪ به دست آمده است. در روش مذکور، خاک در ۶ لایه در قالب مورد نظر با دستگاه کوبش ریخته می‌شود. از آنجایی که در روش تراکم کاهش یافته، لایه‌های بالایی باعث تراکم شدن لایه‌های پایینی می‌شوند، جهت ساخت نمونه‌ها از دستگاه کوبش تراکم کاهش یافته، 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 کوبیده شد تا جایی که به ارتفاع مورد نظر برسد. سپس لایه‌ی بعدی ریخته و مجدداً کوبیده شد و این کار ادامه یافت تا ارتفاع قالب پر شود. شایان ذکر است میزان رطوبت در روش مذکور، به میزان ۸٪ به دست آمده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش تزریق پذیری در لوله ی ۱ متری بر اساس طول نفوذ (سانتی متر) و فشار تزریق (کیلو پاسکال) در مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و مقادیر غلظت نانوسیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

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

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

۱.۴. اثر pH و زمان ژل شدگی

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

۵. نتایج و بحث

۱.۵. 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 لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، با تراکم ۵۰٪ و سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، در لوله ی 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٪ مشاهده می شود. نتایج نشان می دهند که محلول حاضر با غلظت های ذکر شده با فشارهای نسبتاً کم در ماسه ی بدون درصد ریزدانه (ماسه ی خالص) تا ماسه ی حاوی بیشترین درصد ریزدانه (۴۰٪)، به آسانی تا انتهای طول نفوذ (شعاع ۱ متری) و بدون ایجاد هیچ گونه ترک و شکافی نفوذ کرده است.

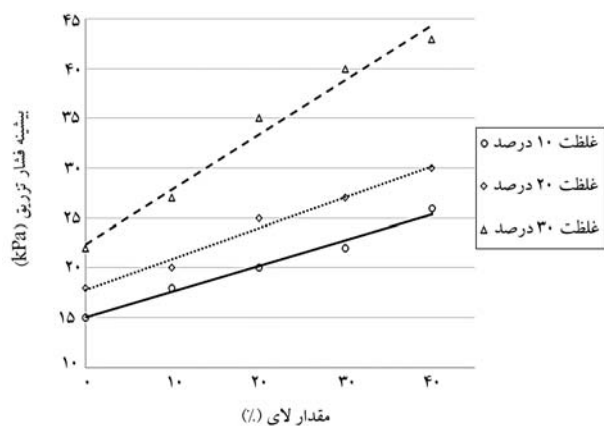
بر اساس شکل ۸، در یک درصد لای ثابت (به عنوان مثال ۴۰٪) با افزایش غلظت به دلیل کاهش لزجت، به فشار تزریق بیشتری احتیاج است و روند ذکر شده در تمامی مقادیر لای قابل مشاهده است.

شده است. همچنین به منظور تعیین غلظت بهینه ی محلول (از بین غلظت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) از آزمایش های تک محوره استفاده شده است، که نیازمند تزریق در قالب استوانه یی است. در ادامه، روش تزریق در قالب لوله یی ۱ متری و قالب استوانه یی توضیح داده شده است.

جهت تزریق در لوله ی ۱ متری، در ابتدا محلول نانوسیلیس با اسید هیدروکلریک در یک pH حدوداً ۶/۵ می رسد و سپس در مخزن دستگاه تزریق وارد می شود. بر اساس چگالی نسبی ۵۰٪، خاک مورد نظر در درون قالب ریخته می شود. در ابتدا با فشار تزریق ۵ کیلو پاسکال تزریق آغاز می شود و بعد از گذشت دقایقی سرعت نفوذ مایع کاهش می یابد و تقریباً ثابت می شود. با توجه به این که قالب شیشه یی مدرج است، طول نفوذ یادداشت می شود، سپس فشار تزریق افزایش می یابد (۵ کیلو پاسکال)، که مشاهده می شود مجدداً به سرعت نفوذ اولیه باز می گردد. پس از مدتی مجدداً امکان دارد سرعت نفوذ کاهش یابد، که عدد طول نفوذ را قرائت می کند و مرحله ی قبل مجدداً تکرار می شود تا محلول طول یک متر را طی کند و از لوله ی خروجی خارج شود.

جهت ساخت نمونه های آزمایش تک محوره از قالب استوانه یی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی متری استفاده شده است. مشابه تزریق در لوله ی 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 کیلو پاسکال به قالب تزریق می شود. معمولاً سعی می شود با کمینه ی فشار، تزریق صورت گیرد تا ساختار یکنواخت نمونه های ساخته شده تغییر نکند. محلول تزریق شده از پایین نمونه وارد و از بالای نمونه خارج می شود. جهت اطمینان از اشباع شدن نمونه تا ۲ برابر حجم قالب (حدود ۴۰۰ CC) خارج می شود. [۳۶ و ۳۷]

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 مابین حفره ها شده است و پس از تکمیل تزریق می توان گفت آب ما بین حفره ها، از نمونه خارج و کلیه ی حفره های نمونه با محلول پر می شود. پس از تزریق، نمونه های تک محوره جهت عمل آوری، پس از گذشت ۲ ساعت، از قالب خارج می شوند. سپس نمونه ها در دمای تقریبی ۲۳ درجه ی سیلیسیوس اتاق، برای طی زمان عمل آوری، یعنی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، نگهداری می شوند. با گذر



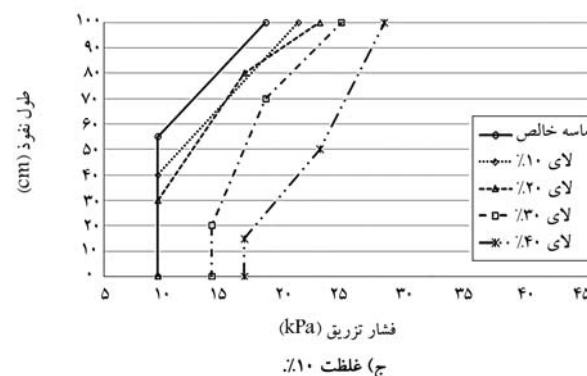
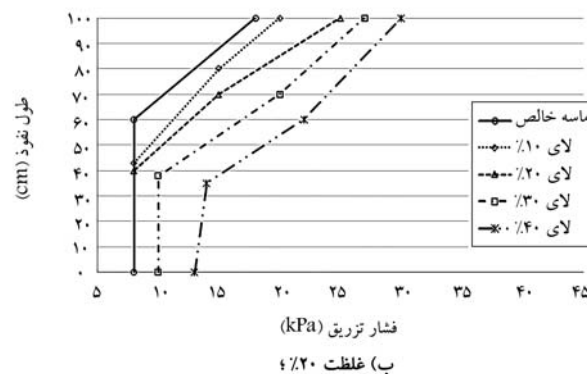
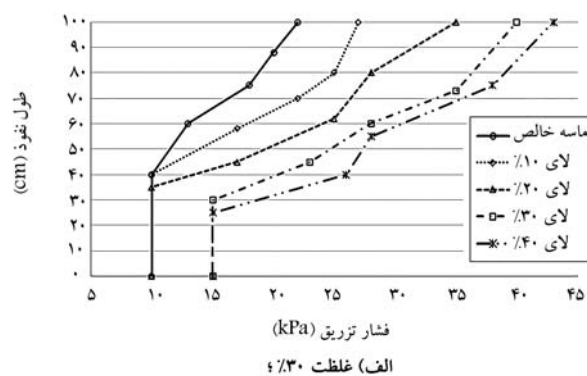
شکل ۹. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به مقدار لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در غلظت محلول نانوسیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

از سوی دیگر در شکل ۹ می‌توان پی برد که با افزایش درصد لای، به فشار تزریق بیشتری نیاز است؛ به طوری که در ماسه‌ی خالص با کمترین فشار، تزریق صورت می‌گیرد، اما با افزایش درصد لای به دلیل کاهش حفره‌های نمونه، به فشار بیشتری مورد نیاز است، برای مثال، برای لای ۴۰٪، به بیشترین فشار تزریق در حدود ۴۵ کیلوپاسکال نیاز است. اما در نمونه‌های فاقد لای (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.

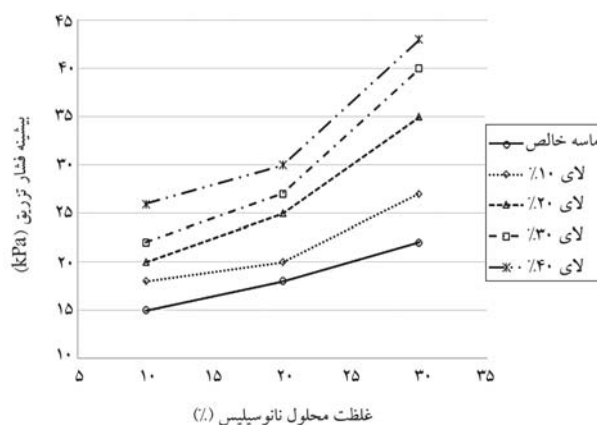
۲.۵. آزمایش فشاری محدود نشده

بیشتر مواقع از آزمایش تک‌محوری به عنوان معیاری برای ارزیابی بهسازی خاک در فرایند تثبیت استفاده می‌شود. خاک مورد نظر در حالت تثبیت نشده، هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. در واقع، ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار به سبب سست بودن، فاقد مقاومت تک‌محوری است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، یکی از اهداف پژوهش حاضر، به دست آوردن غلظت بهینه‌ی محلول جهت تزریق است. به همین منظور ۴۵ آزمایش تک‌محوری مطابق دستورالعمل ASTM D۴۲۱۹ [۳۸]، در ۵ درصد مختلف لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد)، یک درصد تراکم (۵۰٪)، ۳ دوره‌ی عمل‌آوری (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 ۰/۳ (٪/mm) افزایش یافته است. در آزمایش‌های انجام شده برای رسیدن به گسیختگی از دو معیار بیشینه‌ی بار بر واحد سطح یا بار واحد سطح در کرنش ۲۰٪، به طوری که هر کدام زودتر به وقوع به پیوندد، استفاده شده است. [۳۹] در جدول ۴، نتایج آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های تزریق شده با نانوسیلیس کلونی‌داری ارائه شده است.

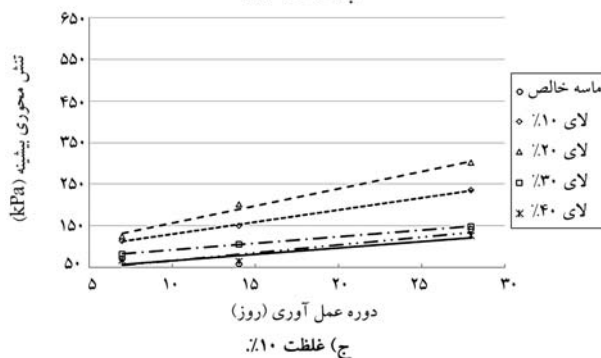
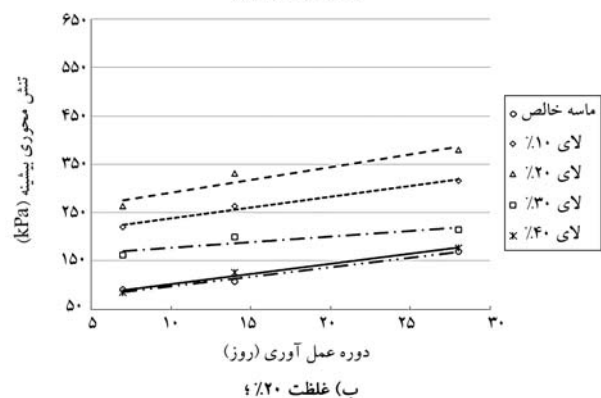
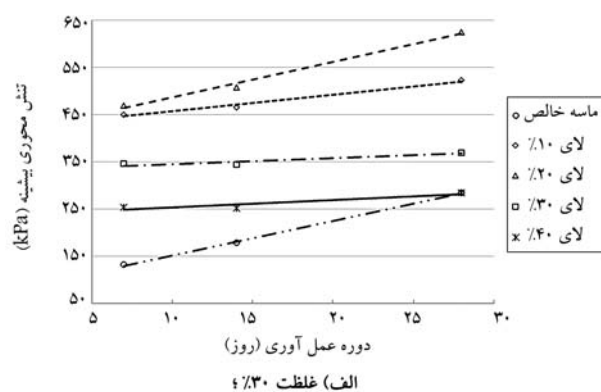
شایان ذکر است همان‌گونه که در بخش ۱.۳ بیان شده است، ابعاد نمونه‌های تک‌محوری استوانه‌یی به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر هستند، که بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۱۹، نمونه‌های آزمایش باید دارای نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۳ باشند. همچنین قطر نمونه باید بیشتر از ۱۰ برابر اندازه‌ی بیشینه‌ی ذرات نمونه و کمتر از ۳۵ میلی‌متر باشد، [۳۸] که ابعاد انتخابی این شرایط را احراز می‌کند. از طرفی دیگر،



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



شکل ۸. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به غلظت محلول نانوسیلیس کلونی‌داری ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد و با مقدار لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.



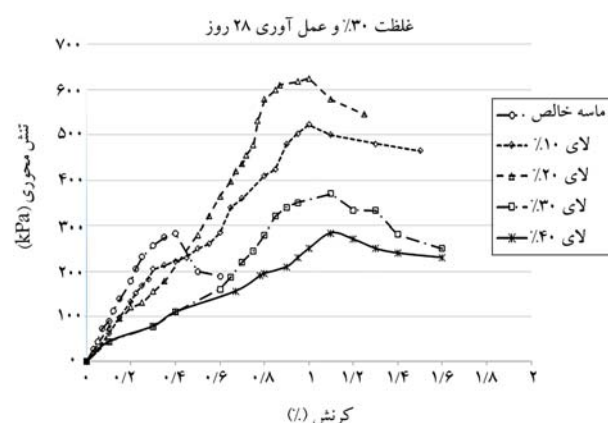
شکل ۱۱. تغییرات تنش محوری بیشینه به دوری عمل آوری در درصد لای‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰.

اما حضور لای فضای بین دانه‌های ماسه را پر کرده و تا حد نسبتاً خوبی باعث افزایش مقاومت شده است. در تمامی نمونه‌ها می‌توان بیان کرد بیشترین مقاومت تک‌محوری مربوط به لای ۲۰٪ و در تراکم ۵۰٪ و عمل‌آوری ۲۸ روزه بوده است، که مقدار ۶۲۵ کیلوپاسکال به دست آمده و پس از آن مربوط به لای ۱۰٪ با مقدار ۵۲۴ کیلوپاسکال بوده است (جدول ۳). در حقیقت می‌توان گفت حفره‌های ماسه‌ای بدون لای (ماسه‌ی خالص) فقط با نانوسیلیس پر می‌شود، ولی با اضافه کردن لای به ساختار ماسه، سختی نمونه به شدت تا لای ۲۰٪ افزایش می‌یابد، که حد نهایی را می‌توان لای ۲۰٪ عنوان کرد؛ اما با افزایش لای به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد، ذرات لای علاوه بر پر کردن حفره‌های ماسه، ساختار نمونه را سست کرده و سیر نزولی مقاومت تک‌محوری ادامه داشته است، به طوری که کمترین مقاومت‌ها مربوط به ماسه‌ی خالص و ماسه‌ی حاوی لای ۴۰٪ بوده است.

دوروی عمل‌آوری، یکی از عوامل مؤثر در شبیه نمونه‌ها و مقاومت تک‌محوری است. در شکل ۱۱، تغییرات تنش محوری بیشینه به دوری عمل‌آوری (۷، ۱۴ و

جدول ۴. نتایج آزمایش تک‌محوره روی نمونه‌های تزریق شده با نانوسیلیس در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و تراکم ۵۰٪.

مقدار لای (%)	غلظت نانوسیلیس (%)	مقاومت فشاری تک‌محوری بیشینه‌ی (کیلوپاسکال)		
		روزه ۲۸	روزه ۱۴	روزه ۷
۰	۱۰	۱۴۲	۷۱	۵۸
۱۰	۱۰	۲۳۵	۱۵۱	۱۱۴
۲۰	۱۰	۳۰۲	۲۰۲	۱۲۵
۳۰	۱۰	۱۴۹	۱۰۶	۸۳
۴۰	۱۰	۱۲۷	۶۶	۶۷
۰	۲۰	۱۷۰	۱۰۷	۹۰
۱۰	۲۰	۳۱۷	۲۶۳	۲۲۰
۲۰	۲۰	۳۸۰	۳۳۱	۲۶۳
۳۰	۲۰	۲۱۴	۲۰۰	۱۶۲
۴۰	۲۰	۱۷۶	۱۲۶	۸۵
۰	۳۰	۲۸۴	۱۷۹	۱۳۳
۱۰	۳۰	۵۲۴	۴۶۵	۴۵۱
۲۰	۳۰	۶۲۵	۵۰۸	۴۷۰
۳۰	۳۰	۳۶۹	۳۴۴	۳۴۵
۴۰	۳۰	۲۸۵	۲۵۱	۲۵۳



شکل ۱۲. نمودار تغییرات تنش محوری محدود نشده (کیلوپاسکال) به کرنش (%) در لای‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، غلظت ۳۰٪، تراکم ۵۰٪ و دوری عمل‌آوری ۲۸ روزه.

در بیشتر دستگاه‌های آزمایش، از جمله سه‌محوری، 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 ۱۲، نمودار تنش - کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه روی مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، در غلظت ۳۰٪ و تراکم ۵۰٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشینه‌ی مقاومت تک‌محوری مربوط به لای ۲۰٪ و سپس ۱۰٪ بوده و با افزایش میزان لای از ۳۰ به ۴۰ درصد، مقاومت کاهش یافته است. همچنین، شیب نمودار (سختی) در ابتدا زیاد بوده است، که مربوط به لای ۲۰٪ بوده و سپس به ترتیب برای لای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش یافته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۲، کمترین کرنش‌ها مربوط به ماسه‌ی خالص بوده است، که به دلیل ماهیت شکننده بودن دانه‌های ماسه‌ی کربناته بوده است،

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 عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری افزایش یافته است؛ به طوری که در عمل‌آوری‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت به دست آمده است. در واقع رشد مقاومت در بیشتر نمونه‌ها با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری چشمگیر بوده است. از سوی دیگر، غلظت محلول تزریقی، عامل تعیین‌کننده‌ی دیگری در فرایند 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 D۴۶۰۹ (۲۰۰۸)، در صورتی که مقاومت فشاری تک‌محوری به مقدار ۳۴۵kPa یا بیشتر برسد، تثبیت خاک را می‌توان مؤثر در نظر گرفت.^[۳۰] در پژوهش حاضر، همان طور که پیشتر عنوان شد، غلظت (۳۰٪) بیشینه‌ی غلظت استفاده شده (در تمامی نمونه‌ها، خصوصاً لای ۴۰٪، تزریق پذیر بوده و از سوی دیگر، با توجه به عمل‌آوری ۷ روزه‌ی بیشتر نمونه‌ها، مقاومت آنها بیش از ۳۴۵ kPa به دست آمده و با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری، 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 عمل‌آوری (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 تزریق‌پذیری با محلول نانوسیلیس کلوئیدی با ۳ غلظت متفاوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به داخل خاک ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر و با ۵ ترکیب درصد متفاوت لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و نیز در چگالی نسبی ۵۰٪ انجام شده است. همچنین به جهت تعیین غلظت بهینه‌ی محلول نانوسیلیس و مؤثر بودن تثبیت خاک، یک سری آزمایش‌های تک‌محوری در ۵ میزان مختلف درصد لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰)، ۳۰٪ غلظت (۱۰، ۲۰ و ۳۰)، چگالی نسبی

۵۰٪ و نهایتاً ۳ دوره‌ی عمل‌آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) انجام شده است. براساس 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 کمینه‌ی در حدود ۲۵ کیلوپاسکال تزریق انجام شده است.

۳- از آنجایی که نمونه‌های تثبیت نشده هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند، با تزریق محلول نانوسیلیس براساس نتایج آزمایش تک‌محوری، مقاومت چندین برابر افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی مؤثر بودن تزریق در بهسازی خاک کربناته‌ی 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 عمل‌آوری، 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 عمل‌آوری، در بیشتر نمونه‌ها، مقاومت به بیش از ۳۴۵ کیلوپاسکال رسیده و با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری 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.

پانویس‌ها

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

9. Undercompaction
10. Coagulate

منابع (References)

1. Valle, C., Camacho, B.I., Stokoe, K.H. and et al. "Comparison of the dynamic properties and undrained shear strength of offshore calcareous sand and artificially ce-

- mented sand", *22th International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineering (ASME) (2003).
2. 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).
3. 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).
4. Gallagher, P.M. and Mitchel, J.K. "Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loess sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9), pp. 1017-1026 (2002).
5. Gallagher, P.M., Pamuk, A. and Abdoun, T. "Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout", *Journal of Material in Civil Engineering*, **19**(1), pp. 33-40 (2007).
6. Gallagher, P.M. and Y.L. "Colloidal silica transport through liquefiable porous media", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(11), pp. 1702-1712 (2009).
7. DuPont. "Ludox colloidal silica: properties, uses, storage, and handling", *Product Information, Wilmington, Del* (1997).
8. Gallagher, P.M. "Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk", *Ph.D. dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va (2000).
9. Herndon, J. and Lenahan, T. "Grouting in oils", *Design and operations Manual, Federal Highway Traction, Alliburton Services, Duncan, Oklahoma*, technical Report, 2 (1976).
10. Bell, F.G. "Engineering treatment of soils", *E and FN Spon*, London, pp. 10-160 (1993).
11. Akbulut, S. "The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting", *Ph.D. Thesis, The Institute of the Istanbul Technical University*, Istanbul (1999).
12. Kutzner, C. "Grouting of rock and soil", *Bulkema, Netherlands*, pp. 10-195 (1996).
13. Dano, C., Hicher, P-Y. and Tailliez, S. "Engineering properties of grouted sands", *Geotechnol. And Geoenviron. Eng.*, **130**(3), pp. 328-338 (2004).
14. 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).
15. 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).
16. Nori, A., Ziaie Moayed, R. and Hassanlourad, M. "Injectability of sands using bentonite", *Journal of Engineering Geology*, **11**, pp. 299-318, (In Persian) (1394/2016).
17. Choobbasti, 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).
18. 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).
19. Zare, M. and Hajiani Boushehrian, A. "Boushehr liquefaction hazard zonation based on SPT and result presentation by using GIS plat form resenatation by Using 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).
20. 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).
21. 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).
22. 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).
23. 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).
24. Shahnazari, H. and Rezvani, R. "Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study", *Engineering Geology*, **159**, pp. 98-105 (2013).
25. 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).
26. 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).
27. BS1377-3, "BS 1377: Part 3 chemical and electrochemical tests", London: BSI (1990).
28. ASTM D6913-17, "Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis", ASTM (2017).
29. 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).
30. 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., Ziaie 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 cementitious 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 آشفستگی

احد اوریا (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۳۹-۴۷، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، روشی برای حل معادله دیفرانسیل تحکیم غیرخطی با نفوذپذیری تراکم‌پذیری و ضخامت لایه متغیر ارائه شده است، که بر اساس مفهوم حالت‌های آشفستگی است. در روش مذکور، جواب‌های معادله تحکیم غیرخطی به صورت ترکیبی از جواب‌های معادله تحکیم ترازقی در دو شرایط اولیه و نهایی ارائه شده است. برای ترکیب جواب‌های معادله ترازقی از تابع حالتی استفاده شده است که بر اساس نتایج به دست آمده از روش تفاضلات 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 آزمایشی روش ارائه شده از نتایج روش تفاضلات 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 آشفستگی، تراکم‌پذیری،

نفوذپذیری، درصد تحکیم.

aouria@uma.ac.ir

۱. مقدمه

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، معرفی مفهوم تنش مؤثر در خاک‌ها توسط ترازقی (۱۹۹۶) بوده است، که بر اساس آن، تئوری تحکیم ترازقی توسعه یافته است.^[۱] بر اساس تئوری تحکیم ترازقی، تغییر شکل توده‌ی جامد خاک اشباع مستلزم خروج آب از منافذ بین دانه‌های جامد خاک است. در واقع، معادله‌ی تحکیم یک‌بعدی ترازقی، یک رابطه‌ی سازگاری بین تغییرات حجم توده‌ی جامد خاک و تغییرات حجم آب منفذی است، که به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:^[۱]

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

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

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۸.

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 آشفستگی»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۳۹-۲، ص. ۳۹-۴۷.

طبق تئوری تحکیم ترازقی، 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 کاستی‌های ناشی از فرضیات ذکر شده در تئوری تحکیم ترازقی، 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 ترازقی برای شرایط تنش و جریان یک‌بعدی در دستگاه ادنومتر توسعه یافته است. بایوت^۱ (۱۹۴۱)، در فرمول‌بندی معادلات تحکیم، شرایط تنش - تغییر شکل 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.^[۲] دیویس و ریموند^۲ (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.^[۳] اساس بسیاری از تئوری‌های توسعه‌یافته‌ی تحکیم، مطالعات گیبسون^۳ و همکاران است.^[۴] گیبسون و همکاران (۱۹۸۱)،^[۵] معادله‌ی دیفرانسیل تحکیم را بر اساس اختلاف سرعت حرکت ذرات جامد خاک و سیال منفذی توسعه داده‌اند. برخلاف تئوری ترازقی، تئوری تحکیم گیبسون، قابلیت اعمال رفتار غیرخطی ناشی

مینا، k ضریب نفوذپذیری و k_e ضریب نفوذپذیری مینا در نسبت تخلخل b و M شیب نمودار ضریب نفوذپذیری در برابر تخلخل در مقیاس نیمه‌لگاریتمی هستند. عباسی و همکاران (۲۰۰۷)^[۷] و آن - فنگ و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۵] 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 ترزاقی کرد:

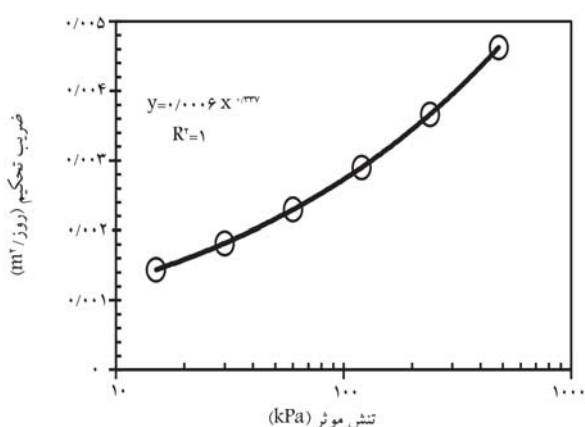
$$c_v(\sigma') \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

که در آن، $c_v(\sigma')$ ضریب تحکیم غیرخطی است، که مطابق معادله‌ی ۶، تابعی از سطح تنش مؤثر است:^[۱۵]

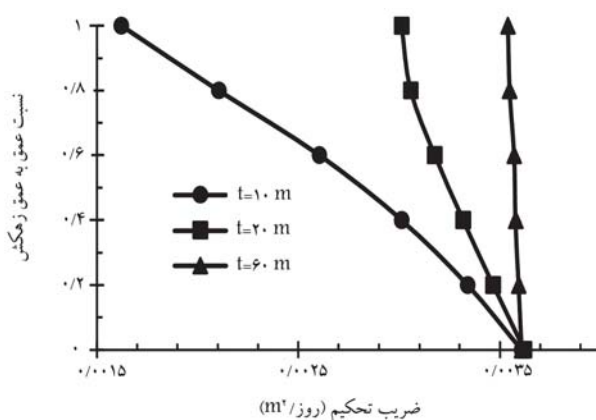
$$c_v(\sigma') = \frac{\gamma_w (1 + e_s)}{c_e \gamma_w} \left(10^{\frac{e_s - b}{M}} \sigma' \left(1 - \frac{c_e}{M} \right) \right) \quad (6)$$

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 سیلتی، که در آزمایش تحکیم هیدرولیکی توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷)^[۷] 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 بر اساس تنش مؤثر برای نمونه‌ی رس سیلتی.^[۷]



شکل ۲. تغییرات ضریب تحکیم طی فرایند تحکیم در عمق نمونه‌ی رس سیلتی.^[۷]

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^۴ (۱۹۹۴)^[۶] تحکیم غیرخطی خاک‌های رسی را مطالعه و روش‌های تحلیلی برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی تحکیم ارائه کرده‌اند. عباسی و همکاران (۲۰۰۷)^[۷] 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 تفاضلات محدود، روشی برای حل معادله‌ی غیرخطی تحکیم ارائه کرده‌اند. توفیق و اوریا (۲۰۰۹)^[۸] نیز روشی برای حل معادلات غیرخطی تحکیم تحت بارگذاری متناوب ارائه کرده‌اند، که با استفاده از نوعی نگاشت در فضای زمان، تئوری تحکیم ترزاقی را برای استفاده در شرایط بارگذاری متناوب تعمیم داده‌اند. ابولناجا و پندر^۵ (۲۰۱۲)، با تغییر نمودارهای درصد تحکیم ترزاقی، روشی برای اعمال آثار تغییرات مشخصات خاک طی فرایند تحکیم در جواب‌های معادله‌ی تحکیم ارائه داده‌اند.^[۹] بو^۶ و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۰] بر اساس آنالیزهای حدی، روشی برای حل معادله‌ی غیرخطی تحکیم ارائه داده‌اند، که علاوه بر تغییرات مشخصات خاک، تأثیر گسترش 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.^[۱۱-۱۴]

با توجه به این‌که بروز نشست‌های ناشی از تحکیم یک فرایند زمان‌بر است و نشانه‌های آن بعد از تکمیل پروژه و در زمان بهره‌برداری نمایان می‌شود، امکان اصلاح و بازبینی طرح محدود است. از این رو، ارائه‌ی روش‌هایی که به سادگی امکان اعمال شرایط غیرخطی در محاسبات و تعیین دقیق تر نشست‌ها را فراهم کند، 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 ترزاقی در دو حالت مینای اولیه و نهایی تعیین می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تحکیم غیرخطی یک بُعدی

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

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

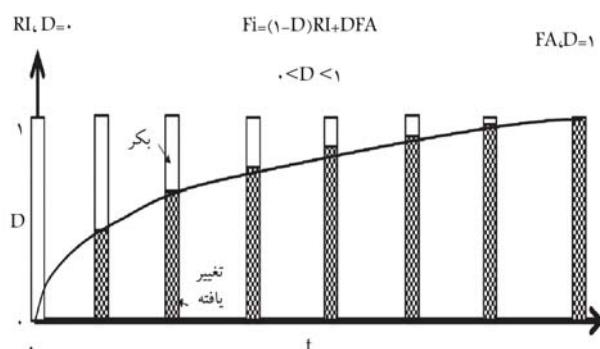
که در آن، γ_w ، a_v ، k ، e ، نسبت تخلخل، ضریب نفوذپذیری، نشانه‌ی فشردگی در فضای تنش - نسبت تخلخل در مقیاس معمولی و وزن مخصوص سیال منفذی (آب) هستند.

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

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

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

که در آن‌ها، c_e نشانه‌ی فشردگی در مقیاس نیمه‌لگاریتمی، σ' تنش مؤثر، σ'_0 تنش مؤثر مینا، که برابر یک واحد تنش در نظر گرفته می‌شود، a نسبت تخلخل در تنش



شکل ۳. مفهوم حالت آشفته‌گی.

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

از آنجایی که فرایند تحکیم، تابع مشخصات خاک است، درصد تحکیم در شرایط غیرخطی نیز تابع درصد تحکیم در دو شرایط اولیه و نهایی خواهد بود. در نتیجه با توجه به توضیحات اخیر، تعمیم مفهوم حالت آشفته به مسئله‌ی تحکیم غیرخطی با مشخصات مصالح و ضخامت متغیر به صورت رابطه ۸ خواهد بود: [۲۳]

$$U_{NI}(t) = DU_{LFA}(t) + (1 - D)U_{LRI}(t) \quad (8)$$

که در آن، U_{NI} متوسط درصد تحکیم در تحلیل غیرخطی با ضخامت و ضریب تحکیم متغیر، U_{LRI} متوسط درصد تحکیم در تحلیل خطی با ضریب تحکیم و ضخامت ثابت برابر با مقادیر اولیه، نظیر تنش مؤثر در زمان قبل از شروع تحکیم و U_{LFA} متوسط درصد تحکیم در تحلیل خطی با ضریب تحکیم و ضخامت ثابت برابر با مقادیر نهایی نظیر تنش مؤثر در زمان اتمام تحکیم هستند.

مهم‌ترین بخش استفاده از مفهوم حالت آشفته‌گی برای حل مسائل مختلف، تعیین تابع حالت است. روش‌های مختلفی مانند فرمول‌بندی ریاضی یا مشاهده‌های آزمایشگاهی برای تعیین تابع حالت استفاده می‌شود. با توجه به این‌که هدف پژوهش حاضر، حل معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم است، لذا از روش فرمول‌بندی ریاضی برای تعیین تابع حالت استفاده شده است. برای این منظور، با استفاده از رابطه‌ی ۸، می‌توان تابع حالت را به صورت رابطه‌ی ۹ بیان کرد: [۱۶]

$$D = \frac{U_{NL} - U_{LRI}}{U_{LFA} - U_{LRI}} \quad (9)$$

با 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 اولیه‌ی ثابت (U_{LRI}) و خطی با مشخصات نهایی ثابت (U_{LFA}) تحلیل شود. برای تحلیل‌های خطی از جواب‌های تئوری تحکیم ترازقی استفاده می‌شود، ولی برای تحلیل تحکیم غیرخطی از روش تفاضلات محدود برای تعیین جواب‌های معادله‌ی ۵ استفاده شده است.

۳.۲. حل معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم با استفاده از روش تفاضلات محدود

با استفاده از روش تفاضلات محدود می‌توان معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم را حل کرد. در شکل ۴، شبکه‌ی تفاضلات محدود در دامنه‌ی زمان و مکان، که

در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقدار ضریب تحکیم 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 تحکیم نظیر تنش مؤثر قبل از شروع تحکیم و مقدار نهایی، که برابر ضریب تحکیم نظیر تنش مؤثر پس از تکمیل فرایند تحکیم 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 نفوذناپذیر خواهد بود، که با گذشت زمان مقادیر تنش مؤثر در تمامی نقاط به مقدار تنش مؤثر نهایی نزدیک خواهد شد، که نشان‌دهنده‌ی ناهمگن بودن توده‌ی خاک در حال تحکیم است.

بر اساس مفهوم حالت آشفته‌گی، [۱۶] مشخصات توده‌ی خاک غیرهمگن ناشی از تغییرات تنش 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 قسمت‌های مختلف آن محیط غیرهمگن بیان کرد. در نتیجه، اگر بتوان جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی تحکیم را به صورت ترکیبی غیرخطی از جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل خطی تحکیم ترازقی در دو شرایط اولیه و نهایی قبل و بعد از تحکیم بیان کرد، در این صورت می‌توان تئوری تحکیم ترازقی را به شرایط غیرخطی تعمیم داد.

۲.۲. مفهوم حالت آشفته‌گی

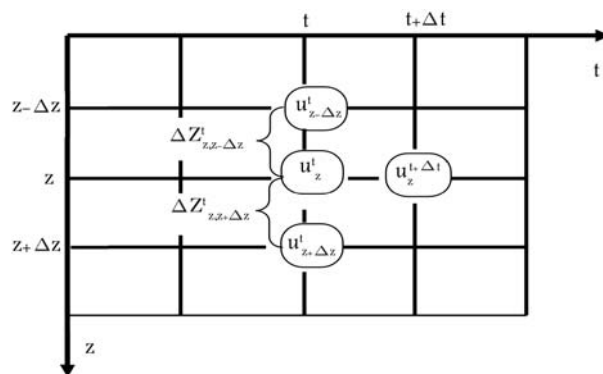
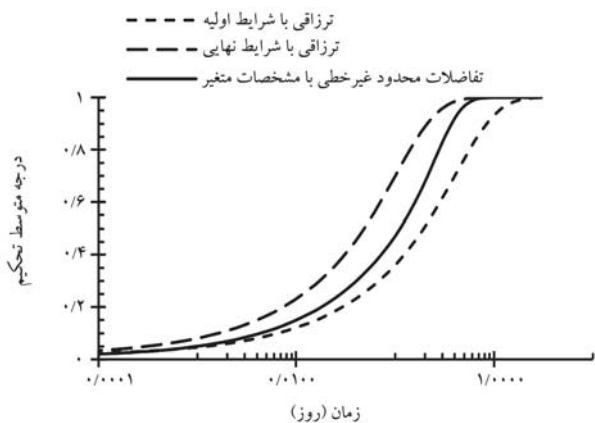
بر اساس مفهوم حالت آشفته‌گی، واکنش یک جسم می‌تواند بر اساس ترکیبی از واکنش‌های اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن بیان شود. به عبارتی، عوامل محرک خارجی موجب تغییر حالت یک جسم از حالت موجود به یک حالت تعادلی جدید می‌شوند. در عمل ممکن است نقش دقیق اجزاء مختلف جسم در فرایند تغییر حالت جسم به یک حالت پایدار جدید قابل اندازه‌گیری نباشد، ولی در عوض رفتار اولیه‌ی 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. [۱۷-۲۲] سپس برای انواع دیگر مسائل ژئوتکنیک، مانند تحکیم خاک‌های اشباع [۲۳] و فروریزش خاک‌های غیراشباع، [۲۴] 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: [۱۶]

$$F_i = DFA + (1 - D)RI \quad (7)$$

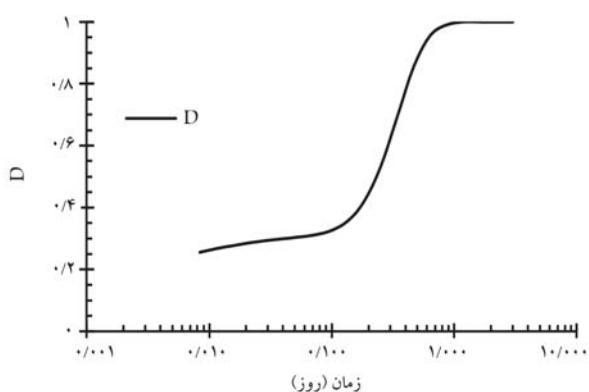
که در آن، F_i پاسخ مصالح در هر حالت دلخواه و D تابع حالت است.

برای تطبیق مفهوم حالت آشفته‌گی با مسئله‌ی تحکیم، در شکل ۳ مفهوم حالت آشفته‌گی 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 در آن قسمت‌ها به تنش اولیه نزدیک بوده است، مشابه مشخصات



شکل ۴. شبکه بندی تفاضلات محدود لایه‌ی خاک در فضای زمان و مکان.

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.

۰/۱ 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 شامل نتایج یک 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 ۰/۱ مترمربع بر روز به مقدار نهایی ۱ مترمربع بر روز و ضخامت لایه از مقدار اولیه‌ی ۱ متر به مقدار نهایی ۰/۵ متر رسیده (F_i) است.

مطابق شکل ۵، در ابتدای فرایند تحکیم، نتایج تحلیل غیرخطی منطبق 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 نتیجه گرفت که مفهوم حالت آشفته‌گی در مورد جواب‌های مسئله‌ی غیرخطی تحکیم نیز صدق می‌کند. مفهوم حالت آشفته‌گی برای مسائل تابع زمان نیز قبلاً استفاده شده است.^[۱۹]

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^۹ یا سیگماوار است. توابع سیگموئید کاربرد زیادی در هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و اقتصاد دارند.^[۲۵] چندین نوع معادله‌ی ریاضی برای تولید توابع سیگموئید کاربرد دارند، که یکی از کلی‌ترین و ساده‌ترین فرم‌های آن مطابق رابطه‌ی ۱۵ است، که در

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:^[۸]

$$u_z^{t+\Delta t} = \alpha_{z-\Delta z}^t u_{z-\Delta z}^t + \alpha_{z+\Delta z}^t u_{z+\Delta z}^t + (1 - \alpha_{z-\Delta z}^t - \alpha_{z+\Delta z}^t) u_z^t \quad (10)$$

که در آن، $\alpha_{z-\Delta z}^t$ از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$\alpha_{z-\Delta z}^t = \frac{c_{v,z-\Delta z}^t \Delta t}{(\Delta Z_{Z,Z-\Delta z}^t)^2} \quad (11)$$

که در آن، $c_{v,z-\Delta z}^t$ و $\Delta Z_{Z,Z-\Delta z}^t$ مطابق رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

$$c_{v,z-\Delta z}^t = \frac{2/3(1 + e_{z,z-\Delta z}^t) \gamma_0^{a-b/M} \left[\frac{(\sigma_{z-\Delta z}^{It} + (\sigma_z^{It}))}{2} \right]^{(1-\frac{c}{M})}}{c_c \gamma_w} \quad (12)$$

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

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

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

نتایج روش تفاضلات محدود، که به صورت صریح فرمول‌بندی شده‌اند، به صورت مشروط هم‌گرا هستند و شرط هم‌گرایی آن‌ها، $\alpha_z^t < 0.5$ 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 هم‌گرایی جواب‌ها، کنترل مقادیر اولیه و نهایی α_z^t ، که نظیر تنش مؤثر قبل و بعد از تکمیل تحکیم است، ضروری است. علاوه بر شرط هم‌گرایی، با توجه به غیرخطی بودن معادله‌ی حاکم، انتخاب گام‌های زمانی کوچک جهت افزایش دقت نتایج ضروری است.

۴.۲. 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:

$$\alpha = 2.036CH_r^{1.02395} \quad (18)$$

$$\beta = 0.02 \ln CH_r + 0.126 \quad (19)$$

$$\delta = 0.41e^{-0.002CH_r} \quad (20)$$

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 به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ قابل محاسبه است:

$$U_{NI}(t) = \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta U_{LFA}(t) + \left(1 - \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \right) U_{LRI}(t) \quad (21)$$

که در آن، U_{LFA} و U_{LRI} از معادله‌ی تحکیم نرزاری تعیین می‌شوند، که برای ساده‌سازی بیشتر، می‌توان از رابطه‌ی تقریبی هانسن،^[۲۶] مطابق روابط ۲۲ و ۲۳ استفاده کرد:

$$U_{LRI}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{M^2 T_{vRI}} \simeq \sqrt{\frac{2T_{vRI}^2}{1+2T_{vRI}^2}} \quad (22)$$

$$U_{LFA}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{M^2 T_{vFA}} \simeq \sqrt{\frac{2T_{vFA}^2}{1+2T_{vFA}^2}} \quad (23)$$

که در آن‌ها، $M = 0.5\pi(2m+1)$ است و T_{vFA} و T_{vRI} مطابق روابط ۲۴ و ۲۵ محاسبه می‌شوند:

$$T_{vRI} = \frac{c_{vRI}t}{H_{dRI}^2} \quad (24)$$

$$T_{vFA} = \frac{c_{vFA}t}{H_{dFA}^2} \quad (25)$$

در نهایت با جایگذاری روابط ۲۲ و ۲۳ در رابطه‌ی ۲۱، درصد تحکیم متوسط در یک لایه‌ی خاک با تراکم‌پذیری، نفوذپذیری و ضخامت متغیر به‌صورت رابطه‌ی ۲۶ محاسبه می‌شود:

$$U_{NI}(t) = \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \left(\sqrt{\frac{2T_{vFA}^2}{1+2T_{vFA}^2}} \right) + \left(1 - \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \right) \left(\sqrt{\frac{2T_{vRI}^2}{1+2T_{vRI}^2}} \right) \quad (26)$$

۳. راستی‌آزمایی روش ارائه شده

۳.۱. راستی‌آزمایی بر اساس نتایج روش تفاضلات محدود

در جدول‌های ۱ الی ۳، ضریب تحکیم و ضخامت‌های اولیه و نهایی سه لایه‌ی خاک و پارامترهای مدل ارائه شده، 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 به‌گونه‌ی انتخاب شده است که مقادیر 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

پژوهش حاضر به‌عنوان فرم کلی تابع حالت انتخاب شده است.

$$D = \left(\frac{1}{1+e^{-\alpha(T_{vRI}-\beta)}} \right)^\delta \quad (15)$$

که در آن، α ، β و δ پارامترهای مدل و بدون بُعد هستند و T_{vRI} عامل زمان و بدون بُعد است و بر اساس مشخصات اولیه‌ی خاک طبق رابطه‌ی ۱۶ تعیین می‌شود:

$$T_{vRI} = \frac{c_{vRI}t}{H_{dRI}^2} \quad (16)$$

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.

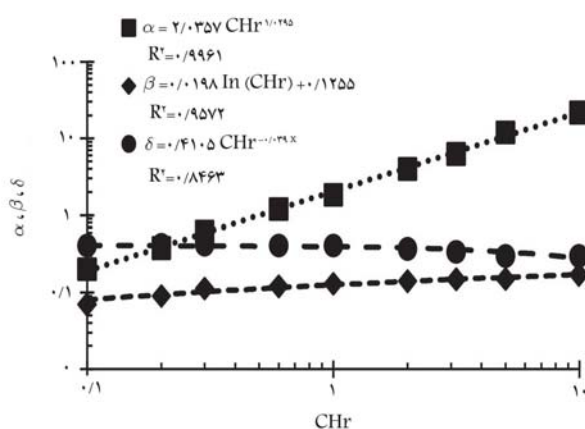
با استفاده از اصول آنالیز ابعادی و قضیه‌ی پی - بوکینگهام،^{۱۰} پارامتر بدون بُعد دیگری تعریف شده است تا پارامترهای α ، β و δ و بر اساس دو پارامتر بدون بُعد، که بیانگر مشخصات خاک و ضخامت لایه در شرایط اولیه و نهایی هستند، تعریف شوند. چهار پارامتر ضریب تحکیم در شرایط تنش اولیه، ضریب تحکیم در شرایط تنش 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 پی - بوکینگهام، دو پارامتر بدون بُعد مستقل برای مسئله‌ی مذکور قابل تعریف است. اولین پارامتر بدون بُعد مطابق رابطه‌ی ۱۵ است و همان عامل زمان برای مشخصات اولیه‌ی مسئله است. پارامتر بدون بُعد دوم به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ تعریف می‌شود، که در واقع نشان‌دهنده‌ی روند تغییرات ضریب تحکیم و ضخامت لایه‌ی خاک است.

$$CH_r = \frac{c_{vFA}}{c_{vRI}} \left(\frac{H_{dRI}}{H_{dFA}} \right)^2 \quad (17)$$

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

برای تعیین پارامترهای مدل از روش کمینه‌ی مربعات استفاده شده است. برای این منظور، تحلیل‌های مختلفی با مقادیر مختلف CH_r انجام شده و با استفاده از روش کمینه‌ی مربعات، مقادیر بهینه‌ی α ، β و δ 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.

جدول ۱. مشخصات لایه‌ی خاک ۱ برای راستی‌آزمایی عددی.

کمیت	واحد	مقدار
ضخامت اولیه	متر	۱
ضخامت نهایی	متر	۰/۵
ضریب تحکیم اولیه	متر مربع بر روز	۱
ضریب تحکیم نهایی	متر مربع بر روز	۱
CH_r	بدون بُعد	۴
α	بدون بُعد	۸/۵
β	بدون بُعد	۰/۱۵
δ	بدون بُعد	۰/۳۵

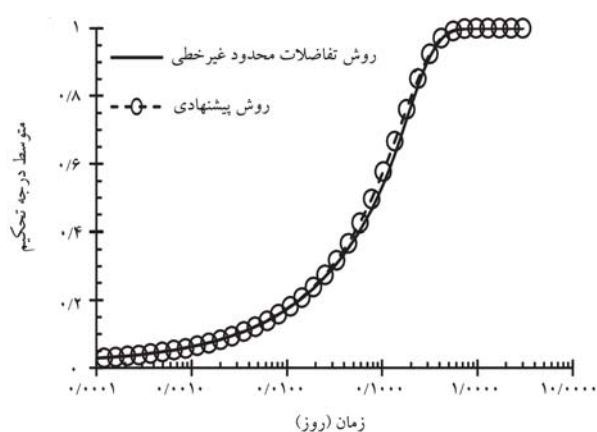
جدول ۲. مشخصات لایه‌ی خاک ۲ برای راستی‌آزمایی عددی.

کمیت	واحد	مقدار
ضخامت اولیه	متر	۱
ضخامت نهایی	متر	۱
ضریب تحکیم اولیه	متر مربع بر روز	۱
ضریب تحکیم نهایی	متر مربع بر روز	۰/۲۵
CH_r	بدون بُعد	۰/۲۵
α	بدون بُعد	۰/۰۴۵
β	بدون بُعد	۰/۱
δ	بدون بُعد	۰/۴

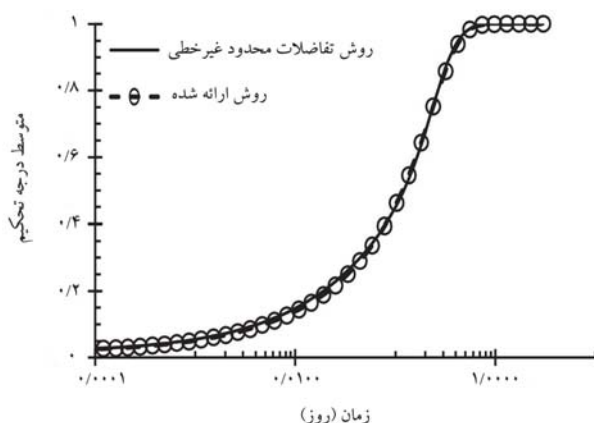
جدول ۳. مشخصات لایه‌ی خاک ۳ برای راستی‌آزمایی عددی.

کمیت	واحد	مقدار
ضخامت اولیه	متر	۱
ضخامت نهایی	متر	۰/۵
ضریب تحکیم اولیه	متر مربع بر روز	۱
ضریب تحکیم نهایی	متر مربع بر روز	۰/۲۵
CH_r	بدون بُعد	۱
α	بدون بُعد	۱/۸۵
β	بدون بُعد	۰/۱۳
δ	بدون بُعد	۰/۴۱

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 ترازقی خواهد بود. برای بررسی درستی روش ارائه شده، سه حالت ممکن مذکور در نظر گرفته شده است.



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



شکل ۹. مقایسه‌ی 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. عملاً، چنین شرایطی زمانی رخ می‌دهد که پارامترهای c_v 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.

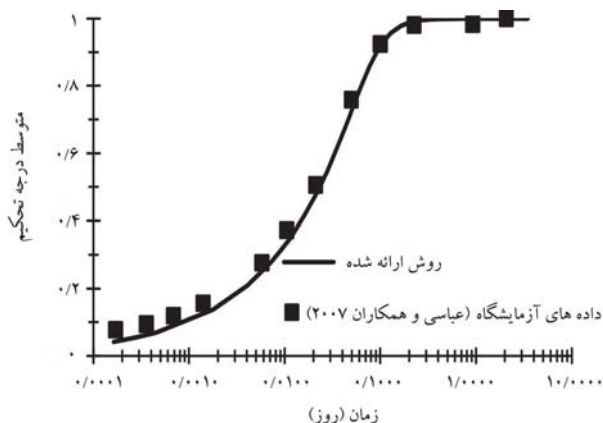
در شکل ۸، مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده برای لایه‌ی ۱ با مشخصات جدول ۱، با نتایج روش تفاضلات محدود غیرخطی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج روش ارائه شده تطابق مناسبی با نتایج روش تفاضلات محدود دارد. در آنالیز انجام شده، اختلاف روش ارائه شده با روش عددی، کمتر از ۳٪ بوده است. با توجه به کاهش ۵۰ درصدی ضخامت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

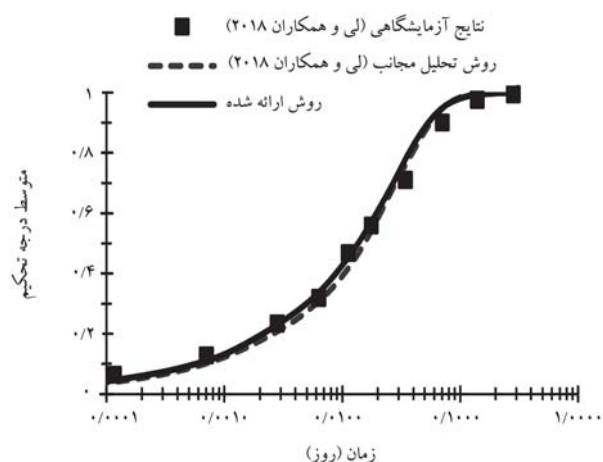
در تحلیل‌های اخیر، بیشینه‌ی مقدار اختلاف نتایج روش ارائه شده با روش تفاضلات محدود کمتر از ۱٪ بوده است. نتایج آنالیزهای ذکر شده نشان می‌دهد که

جدول ۵. مشخصات لایه‌ی خاک ۵ برای راستی‌آزمایی با نتایج آزمایشگاهی.^[۱۰]

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	بدون بُعد	۱/۵
α	بدون بُعد	۳/۰۹
β	بدون بُعد	۰/۱۳۴
δ	بدون بُعد	۰/۳۸۷



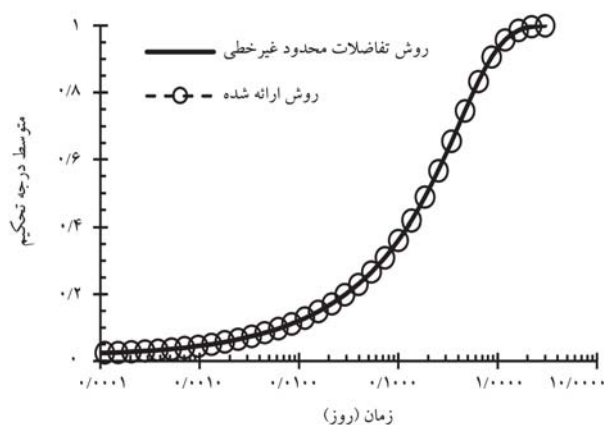
شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷).^[۷]



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل مجانب ارائه شده توسط لی و همکاران (۲۰۱۸).^[۱۰]

که در دستگاه تحکیم هیدرولیکی آزمایش شده است، ارائه شده است. آزمایش کنونی برای راستی‌آزمایی 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.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج روش ارائه شده با نتایج روش عددی با مشخصات متغیر مشابه تئوری ترزاقی.

جدول ۴. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی ارائه شده توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷).^[۷]

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 بُعد	۲/۰۹
α	بدون بُعد	۴/۳۵
β	بدون بُعد	۰/۱۴
δ	بدون بُعد	۰/۳۸

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 ترزاقی 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. راستی‌آزمایی بر اساس نتایج آزمایشگاهی و روش‌های دیگر

برای مقایسه‌ی بیشتر عملکرد روش ارائه شده، نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷)،^[۷] و همچنین بو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰] استفاده شده است. در جدول ۴، مشخصات نمونه‌ی رس سیلتی (نمونه‌ی ۱) که توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۷)،^[۷] 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 (۲۰۰۷)،^[۷] 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 لی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰]

۴. نتیجه‌گیری

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

در دو شرایط اولیه و نهایی قابل تعیین است. در روش ارائه شده علاوه بر این که مشخصات خاک متغیر در نظر گرفته می‌شود، تغییرات ضخامت لایه‌ی خاک و طول مسیر زهکشی نیز وارد محاسبات می‌شود. با استفاده از روش ارائه شده، می‌توان جواب‌های معادله‌ی تحکیم ترزاقی 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 فرمول‌بندی ساده، دقت بالایی دارد و بین نتایج آزمایشگاهی و روش عددی، همبستگی کاملی وجود دارد.

پانویس‌ها

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- π
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 Interface 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 ۶۰°

وحید بابایی نژاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران - آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بابک خورسندی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۴۹-۵۷ (پژوهشی)

کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب به‌جای 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 روش‌ها برای کاهش آثار زیست‌محیطی پساب‌های مذکور است. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به تخلیه‌ی پساب چگال از نازل دایره‌ای است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ (RNG) به شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره، مثلث و لوزی پرداخته شده است. پساب به‌صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه نسبت به افق در محیط آبی ساکن و پویا تخلیه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه پساب به‌صورت صفحه‌ای 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 بستر و 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

با سیال محیط پذیرنده مخلوط شود.^[۲] استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، که پساب را به‌صورت جت تخلیه می‌کنند، مناسب‌ترین روش برای تخلیه‌ی پساب چگال است.^[۳] طبق شکل ۱، پساب تخلیه شده در دو مرحله با سیال محیط پذیرنده مخلوط می‌شود. در مرحله‌ی اول، پساب به شکل جت از نازل خارج می‌شود. میزان اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده در مرحله‌ی اول به عواملی مانند شار مومنتوم و عدد فرود (F) جت خروجی و همچنین زاویه‌ی نازل نسبت به افق بستگی دارد. جت خروجی باعث هم‌آوری سیال محیط به درون جت می‌شود، که این مسئله باعث کاهش غلظت و شار مومنتوم جت خروجی می‌شود. مرحله‌ی دوم، هنگامی آغاز می‌شود که شار مومنتوم جت کاهش قابل توجهی می‌یابد و در مقایسه با شار شناوری می‌توان از مقدار آن صرف‌نظر کرد. در این حالت پساب از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود (چنانچه $F > 1$ باشد، جریان به شکل جت خواهد بود و اگر $F < 1$ باشد، جریان به شکل پلوم خواهد بود). با توجه به این‌که چگالی پساب نسبت به چگالی سیال محیط پذیرنده بیشتر است، پساب در حالت پلوم به واسطه‌ی شار شناوری به سمت کف دریا حرکت می‌کند. در این حالت، تماس

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، به‌عنوان 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 آلودگی دریایی تبدیل شوند، زیرا حاوی نمک با غلظت بالا و همچنین مواد شیمیایی گوناگون هستند.^[۱] 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 به‌گونه‌ی انجام شود که پساب بعد از تخلیه در فاصله‌ی زمانی کوتاهی

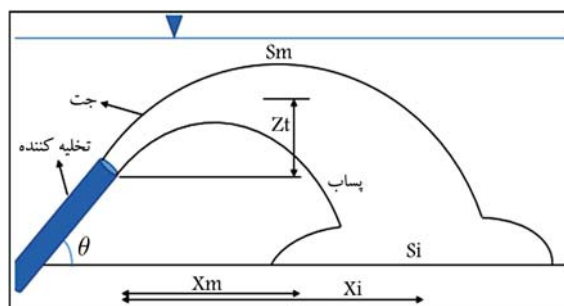
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۶/۱۴۰، اصلاحیه ۱۴/۸/۱۴۰، پذیرش ۱۴/۸/۱۴۰.

DOI:10.24200/J30.2022.61005.3137

استاد به این مقاله:

بابایی نژاد، وحید و خورسندی، بابک (۱۴۰۲). «تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به‌صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی ۶۰°»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۴۹-۵۷



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.^[۴] 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 نتیجه کاهش غلظت پساب می‌شود.^[۵] میزان رقیق‌شدگی پساب (S) (در اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه‌ی پایین‌دست تخلیه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که در آن، C_o غلظت پساب قبل از تخلیه، C_a غلظت سیال محیط پذیرنده و C میزان غلظت در نقطه‌ی موردنظر است.

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

$$F = \frac{U_j}{\sqrt{Dg'}} \quad (2)$$

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

$$g' = g \frac{(\rho_o - \rho_a)}{\rho_a} \quad (3)$$

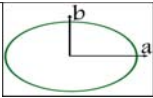
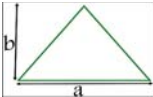
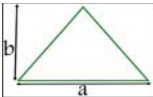
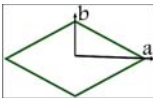
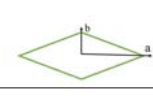
که در آن، ρ_o چگالی اولیه‌ی پساب، ρ_a چگالی محیط و g شتاب گرانش است. و در شکل ۱ X_m فاصله‌ی افقی محل ارتفاع بیشینه‌ی صعود جت از نازل، X_i فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل، S_m رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت، S_i میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین و θ زاویه‌ی 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^۱ و همکاران (۱۹۷۱)، بهینه‌ترین روش‌های تخلیه‌ی پساب چگال را بررسی کردند و برای یافتن مناسب‌ترین روش تخلیه‌ی پساب چگال، نازل‌هایی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق را بررسی کردند و دریافتند که زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.^[۶] در همین زمینه، پژوهش‌گران بسیاری در مطالعه‌های خود، زاویه‌ی ۶۰ درجه را مناسب‌ترین زاویه برای تخلیه‌ی پساب با شنآوری منفی در محیط ساکن معرفی کرده‌اند.^[۷-۱۲] رابرتز^۲ و همکاران (۱۹۸۷)، به بررسی تأثیر جریان محیط در میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده با زاویه‌های مختلف پرداختند و دریافتند که پساب تخلیه شده با زاویه‌ی ۹۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.^[۱۱] چوی^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، به صورت

عددی و تجربی به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل دایره‌ای در محیط پویا پرداختند و دریافتند که جریان محیط باعث افزایش مقدار X_i ، کاهش Z_t و افزایش میزان رقیق‌سازی می‌شود. همچنین ایشان نشان دادند نتایج مدل انتگرالی VISJET، مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.^[۱۳] عباسی^۴ و رابرتز (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)، مطالعات خود را روی رقیق‌سازی پساب شور چگال تخلیه شده از دیفیوزرهای چندپورتی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن و پویا انجام دادند. آن‌ها مهم‌ترین عامل در طراحی دیفیوزرهای چندپورتی را فاصله‌ی دهانه‌های خروجی از هم دانستند. طبق نتایج ایشان، در صورتی که جت‌ها با هم ادغام شوند، مقدار Z_t ، X_i و S_i در محیط ساکن و پویا کاهش می‌یابد.^[۱۲، ۱۱] فرناندز^۵ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۷] به بررسی استفاده از دیفیوزر در تخلیه‌ی پساب شور و اثر آن در میزان رقیق‌سازی پساب شور پرداختند و با استفاده از مدل CORMIX،^[۱۳] نشان دادند که استفاده از دیفیوزر برای تخلیه‌ی پساب شور حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن، آثار زیست‌محیطی پساب شور را به شدت کاهش می‌دهد. یان^۶ و محمدیان (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل‌های $(k - \varepsilon)$ 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 $(k - \varepsilon)$ RNG عملکرد بهتری در مقایسه با مدل $(k - \varepsilon)$ Standard دارد.^[۱۴] رضایی و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل این‌فوم، به بررسی تأثیر فاصله‌ی دهانه‌ی نازل (با زاویه‌های تخلیه‌ی ۳۰ و ۴۵ درجه) از بستر دریا 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 ۳۰ درجه، هنگامی که مقدار پارامتر y_o/L_M (ارتفاع نازل از سطح زمین، L_M مقیاس طولی جت به پلوم) به کمتر از ۰/۱۴ می‌رسد، مقدار رقیق‌سازی کاهش می‌یابد.^[۱۵] جیانگ^۷ 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، منقار اردکی و ستاره را با یکدیگر مقایسه کردند. طبق نتایج ایشان، تخلیه‌ی پساب با نازل‌های منقار اردکی و ستاره‌یی، میزان رقیق‌سازی را نسبت به نازل دایره‌یی به میزان ۱۵٪ افزایش داد. همچنین استفاده از نازل‌های مربع و لوزی، میزان رقیق‌سازی را در مقایسه با نازل دایره‌یی به مقدار قابل ملاحظه‌ی کاهش داده است. همچنین ایشان نشان دادند که تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل منقار اردکی در حالت جریان هم‌راستا با جت، میزان رقیق‌سازی را نسبت به نازل با دهانه‌ی دایره‌یی افزایش می‌دهد.^[۱۷، ۱۶]

امروزه بیشتر کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب چگال خود را با استفاده از نازل دایره‌یی تخلیه می‌کنند. هندسه‌ی نازل، یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل است.^[۱۷، ۱۶] در زمینه‌ی تخلیه‌ی پساب چگال، مطالعات بسیاری انجام شده و بیشتر آن‌ها مربوط به تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل دایره‌یی 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 (ساکن 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 ، $Z_t/F.De$ ، $X_i/F.De$ برای هر کدام از نازل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نازل‌ها.

نازل	هندسه‌ی نازل	ابعاد نازل (mm)	قطر معادل نازل (mm)	مساحت (mm)
دایره		$a = ۱۰$ $b = ۱۰$	۲۰	۳۱۴
مثلث ۱		$a = ۲۳/۳۲$ $b = ۲۶/۹۳۶$	۲۰	۳۱۴
مثلث ۲		$a = ۵۰$ $b = ۱۲/۵۶$	۲۰	۳۱۴
لوزی ۱		$a = ۱۲/۵۳$ $b = ۱۲/۵۳$	۲۰	۳۱۴
لوزی ۲		$a = ۲۵/۰۶$ $b = ۶/۲۶۵$	۲۰	۳۱۴

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.^[۱۸]

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 ونزین^۸ (۲۰۱۶)،^[۱۹] از مدل آشفستگی (RNG) $k - \varepsilon$ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار k (انرژی جنبشی آشفستگی) و ε (نرخ استهلاك) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u} k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (۵)$$

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

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^2} \quad (۶)$$

مقدار ثابت‌های معادلات با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و ونزین^۸ (۲۰۱۶)،^[۱۹] عبارت‌اند: $\eta_0 = ۴/۳۷۷$ ، $\beta = ۰/۱۲$ ، $C_{1\varepsilon} = ۱/۴۴$ ، $C_{2\varepsilon} = ۱/۶۸$ و $\sigma_\varepsilon = ۱$.

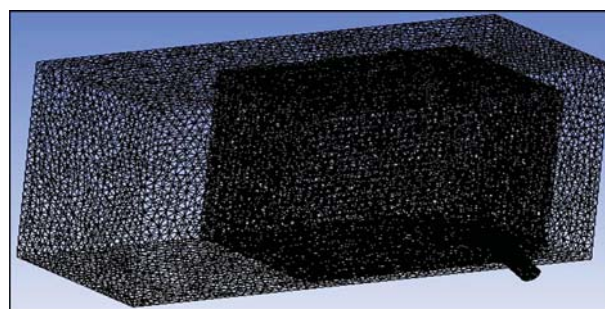
۱.۲. مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مشخصات پساب چگال تخلیه شده (S_i و S_m ، X_i ، X_m) پرداخته شده است. پساب با غلظت بالای نمک به صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ 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 ($A = ۳۱۴ \text{ mm}^2$) و با قطر معادل (D_e) ۲ سانتی‌متر 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 ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ و در محیط پویا برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است. در محیط پویا، سرعت محیطی متغیر $۰/۳۷۴ \text{ m/s} < U_a < ۰/۶ \text{ m/s}$ معادل $۱/۸۷ < U_r F < ۰/۳$ ، $U_r = U_a/U_j$ بوده است. با توجه به این‌که در پساب حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن (به روش اسمز معکوس)، دمای پساب تغییر قابل توجهی نمی‌کند،^[۲۰] اختلاف دمای پساب و سیال محیط پذیرنده برای ساده‌سازی (همانند بیشتر مطالعات موجود در این زمینه) یکسان فرض شده است. اطلاعات اولیه‌ی ورودی به نرم‌افزار در جدول ۲ ارائه شده است.

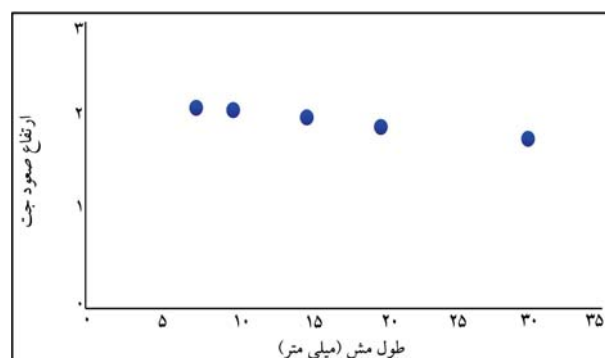
برای شبیه‌سازی، ابتدا هندسه‌ی مدل طراحی و سپس مش‌زنی مطابق شکل ۲ صورت گرفته است. همچنین در شکل ۳، تأثیر اندازه‌ی مش‌ها در مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تخلیه شده از نازل دایره‌ی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با کاهش ابعاد مش (R) از ۱۰ میلی‌متر به ۷/۵ میلی‌متر، نتایج ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تغییر چندانی نکرده و به همین دلیل ابعاد مش برابر ۸/۵ 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 آشفستگی (RNG) $k - \varepsilon$ انتخاب و برای ثابت‌های مدل منتخب از پیش‌فرض‌های نرم‌افزار

جدول ۲. اطلاعات ورودی به نرم افزار.

$D_e (mm)$	$U_a (m/s)$	F	$\theta (^\circ)$	$\rho_o (kg/m^3)$	$\rho_a (kg/m^3)$
۲۰	۰/۰۶	۲۰	۶۰	۱۰۳۲	۹۹۸/۲
	۰/۱۴				
	۰/۲۵				
	۰/۳۷				
۲۰	۰	۱۰	۶۰	۱۰۳۲	۹۹۸/۲
		۲۰			
		۳۰			
		۴۰			



شکل ۲. شماتیک مش بندی دامنه ی محاسباتی.

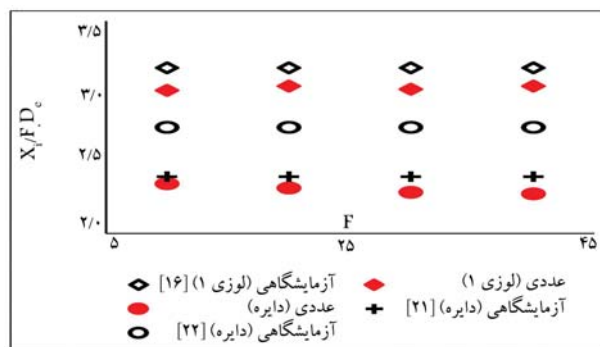


شکل ۳. تأثیر طول مش در ارتفاع صعود بیشینه ی جت تخلیه شده از نازل دایره.

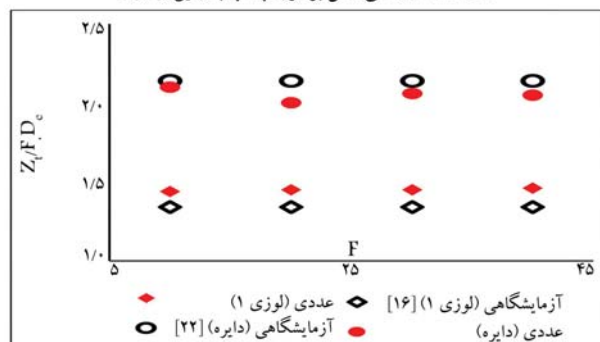
استفاده شده است. برای به دست آوردن گام زمانی مناسب، نتایج به دست آمده از گام زمانی ۰/۰۳۵ و ۰/۰۰۲ ثانیه برای تخلیه ی پساب با عدد فرود ثابت تطابق بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند و برای دقت بیشتر، گام زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه انتخاب شده است. زمان شبیه سازی در ابتدا ۲۰ ثانیه انتخاب و مشاهده شد که نتایج مدل، با نتایج مطالعه ی آزمایشگاهی اختلاف بالایی دارد. با افزایش زمان شبیه سازی، نتایج مدل به نتایج مطالعه های آزمایشگاهی نزدیک تر شده است. برای زمان های بیشتر از ۸۰ ثانیه، نتایج مدل تغییر قابل توجهی نکرد؛ به همین دلیل مدت زمان شبیه سازی ۱۰۰ ثانیه انتخاب شد، تا اطمینان حاصل شود که جریان کاملاً توسعه یافته است.

۳. اعتبارسنجی مدل

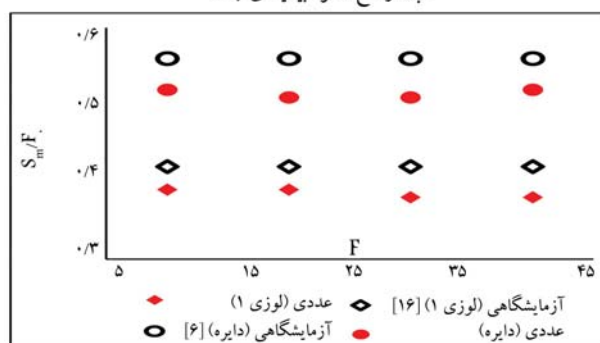
در بخش حاضر، برای راستی آزمایی مدل، نتایج به دست آمده از طریق FLUENT



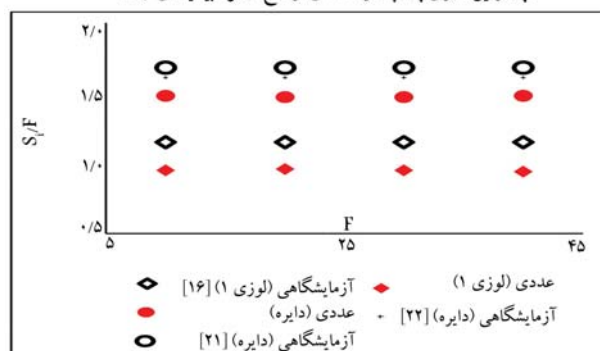
الف) فاصله ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل؛



ب) ارتفاع صعود بیشینه ی جت؛



پ) رقیق سازی پساب در نقطه ی ارتفاع صعود بیشینه ی جت؛

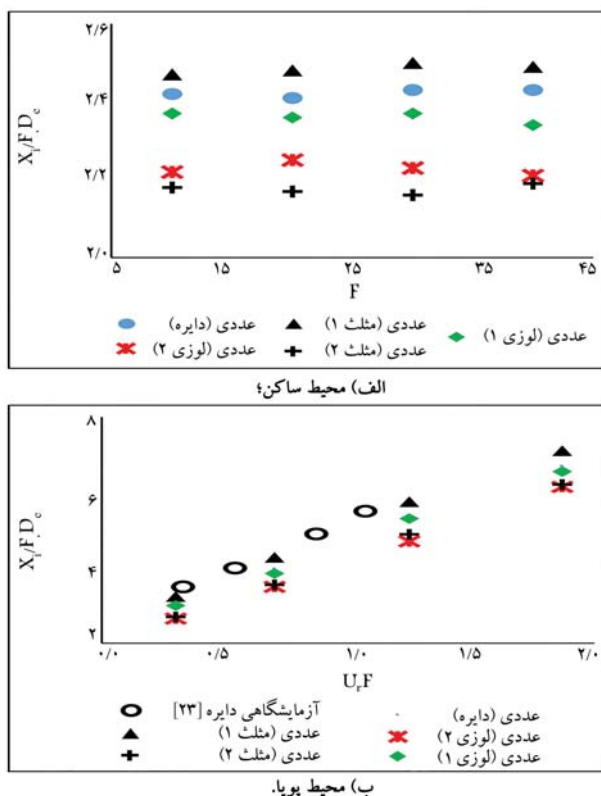


ت) رقیق سازی پساب در نقطه ی برخورد به زمین.

شکل ۴. مقایسه ی نتایج مشخصات پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن FLUENT با مطالعات تجربی [۲۱، ۲۰، ۱۶، ۶].

با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پژوهشگران مختلف مقایسه شده است.

در شکل ۴، مقدار پارامتر بدون بعد $X_i/F.D_e$ (شکل ۴ - الف)، $Z_t/F.D_e$ (شکل ۴ - ب)، S_i/F (شکل ۴ - پ) و S_i/F_m (شکل ۴ - ت) به دست آمده از نرم افزار FLUENT برای تخلیه ی پساب چگال به صورت مستغرق مایل (زاویه ی



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

مثلاً ۲ و لوزی ۲، کمترین مقدار را داشته است. استفاده از نازل‌های با مقطع مثلث ۲ و لوزی ۲ (در محیط ساکن و پویا)، باعث کاهش مقدار $X_i/F.D_e$ نسبت به نازل‌های با مقطع مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره شده است. در این مورد می‌توان گفت هر چه پساب به صورت صفحه‌بی^{۱۰} از نازل خارج شود، باعث هم‌آوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شود. افزایش هم‌آوری 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، لوزی 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، لوزی ۱ و مثلث ۱ نسبت به نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ (که پساب را به صورت صفحه‌بی تخلیه می‌کنند)، مناسب‌تر است.

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

در شکل ۶، مقدار پارامتر بدون بُعد $Z_t/F.D_e$ برای پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه مشاهده می‌شود. پساب با استفاده از نازل با شکل دایره، مثلث و لوزی 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 لوزی ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بوده است. در محیط ساکن، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌ها با هندسه‌ی مثلث ۱، دایره، لوزی ۱، مثلث ۲ و لوزی ۲ به ترتیب برابر ۲/۲، ۲/۱، ۲/۰۳، ۱/۹۱ و ۱/۸۳ بوده است. با توجه به شکل ۵ - ب، مدل RNG مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت را

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

مطالعه‌ی تجربی	$X_i/F.D_e$	$Z_t/F.D_e$	S_m/F	S_i/F
جیانگ (لوزی) ^[۱۶]	۰/۸۸	۰/۰۶۳	۰/۰۲	۰/۰۴۴
رابرتز (دایره) ^[۲۱]	۰/۰۶۵	-	-	۰/۰۷۲
پاکنتیس (دایره) ^[۲۲]	۰/۲۲	۰/۰۶	-	۰/۱۱
زیتون (دایره) ^[۶]	-	-	۰/۰۲۸	-

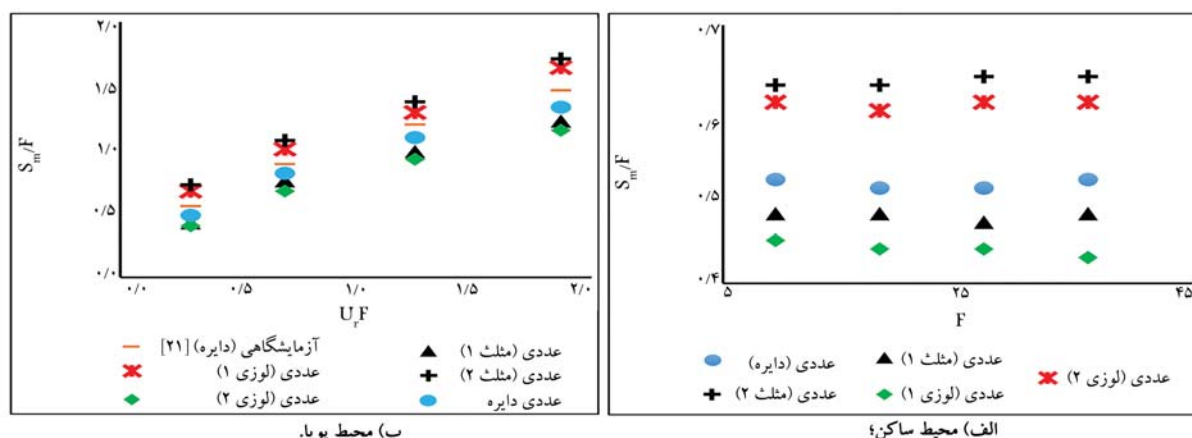
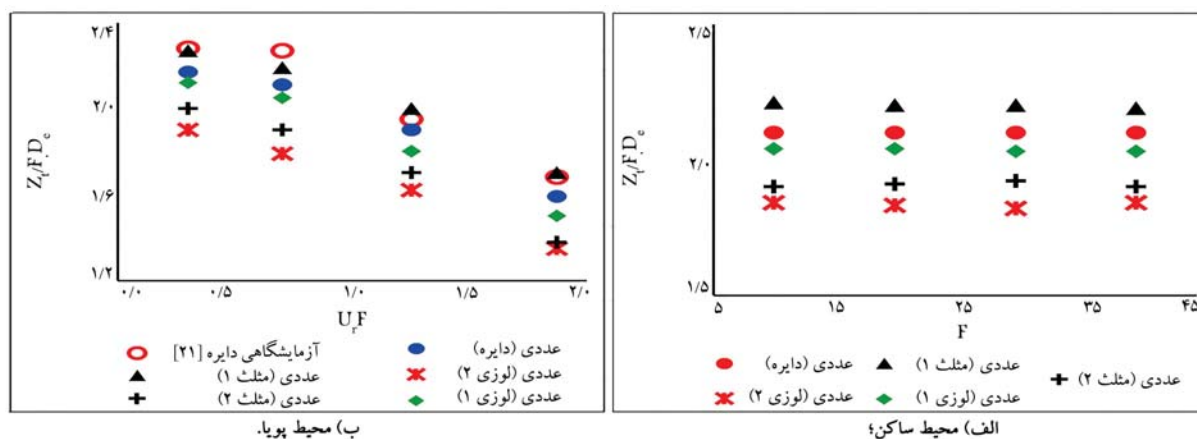
تخلیه‌ی ۶۰ درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل دایره و زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵ درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوزی در محیط ساکن برای اعداد فرود مختلف ارائه شده است. نتایج FLUENT مطابقت خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی داشته و برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوزی، نیز مقدار $X_i/F.D_e$ ، $Z_t/F.D_e$ و S_m/F و S_i/F را در مقایسه با نتایج تجربی،^[۱۶] به ترتیب با انحرافی در حدود ۷/۳، ۶/۹، ۹/۷ و ۱۰/۴ درصد دست پایین تخمین زده است. همچنین FLUENT مقادیر $X_i/F.D_e$ ، $Z_t/F.D_e$ و S_m/F را برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی ۶۰ درجه با مقطع دایره به ترتیب با انحرافی در حدود ۵، ۶/۳، ۹/۴ و ۱۱ درصد خطا نسبت به مطالعه‌ی تجربی،^[۲۱، ۲۰، ۶] 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 ارائه‌ی نتایج مدل FLUENT در تخمین تأثیر هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی و تراکتوری پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل 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 ۶۰ درجه از نازل با هندسه‌های مختلف (دایره، مثلث ۱، مثلث ۲، لوزی ۱ و لوزی 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 بیشترین و کمترین مقدار را در اعداد فرود مختلف داشته است. در محیط پویا (شکل ۵ - ب)، با افزایش $U.F$ مقدار $X_i/F.D_e$ برای همه‌ی نازل‌ها به صورت خطی افزایش یافته و همچنین نتایج مدل تطابق نسبتاً خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی چوی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲۳] داشته و مقدار خطای میانگین مجذور مربعات^۹ برای نازل دایره‌بی، ۰/۱۳ بوده است. مطابق شکل ۵، مقدار $X_i/F.D_e$ برای پساب تخلیه شده (با همه‌ی مقاطع) 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)، علاوه بر 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



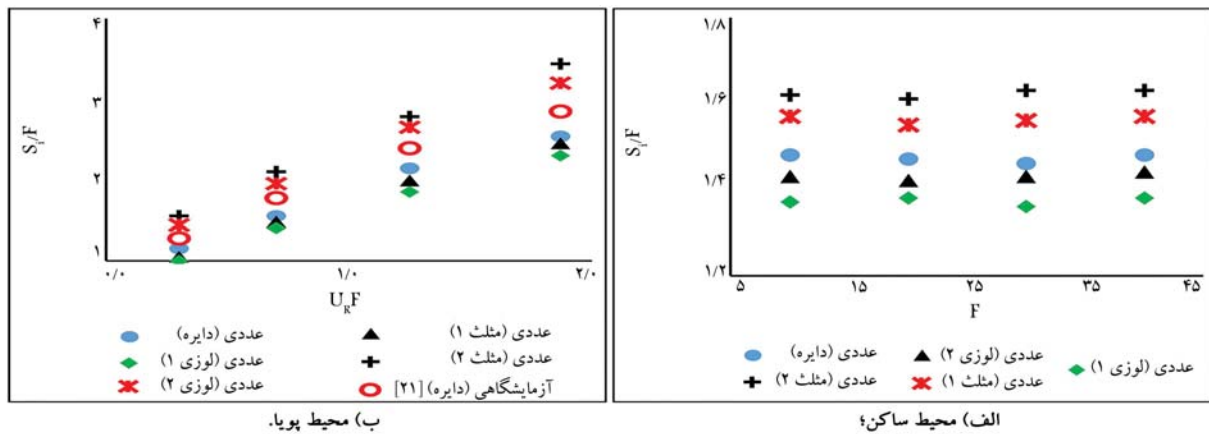
۳.۴. رقیق سازی در محل ارتفاع صعود بیشینه جت (S_m/F)

در شکل ۷، مقدار بدون بُعد رقیق سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه جت برای نازل با هندسه‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به تخلیه پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن (شکل ۷ - الف) و پویا (شکل ۷ - ب) است.

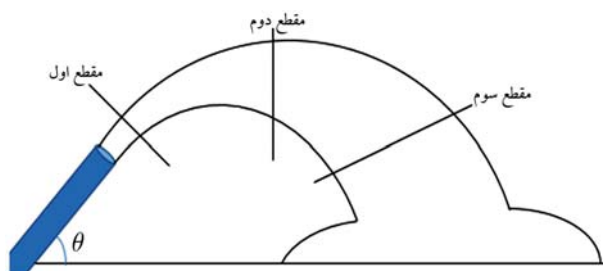
در محیط ساکن، مقدار S_m/F برای تخلیه‌ی پساب با نازل‌های مثلث ۱ ($S_m/F = ۰/۴۸$)، لوزی ۱ ($S_m/F = ۰/۴۵$) و دایره ($S_m/F = ۰/۵۲$) کمترین مقدار و برای نازل‌های مثلث ۲ ($S_m/F = ۰/۶۳$) و لوزی ۲ ($S_m/F = ۰/۶۱$) بیشترین مقدار را داشته است. تخلیه‌ی پساب با جت صفحه‌یی، تماس بدنه‌ی جت با سیال محیط را افزایش می‌دهد و بنابراین 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 رابترز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] داشته و مقدار خطای میانگین مجذور مربعات برای میزان S_m نازل دایره‌یی، ۰/۱۲ 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 اختلاط پساب تخلیه شده در محیط آبی، متأثر از عوامل مختلفی

به خوبی ($RMSE = ۰/۱۱$) در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی رابترز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] برآورد 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 بدنه‌ی 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 کاهش می‌یابد. در محیط پویا، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ (که به صورت صفحه‌یی از نازل تخلیه می‌شوند)، کمتر از مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌های مثلث ۱، دایره و لوزی است. هر چه جت 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 بیشینه 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. بنابراین 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. شاتیک مقاطع عرضی جت در نقاط مختلف.

مقدار رقیق‌سازی پساب نسبت به محیط ساکن افزایش می‌یابد. [۲۴] با توجه به نتایج، استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، که پساب را به صورت جت صفحه‌یی تخلیه می‌کنند، میزان رقیق‌سازی را به مقدار قابل توجهی (نسبت به نازل دایره‌یی) افزایش می‌دهند و مناسب‌ترین روش برای تخلیه‌ی پساب چگال است.

۵.۴. 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 20° ترسیم شده است C_c مقدار غلظت در مرکز جت، C غلظت در نقطه‌ی موردنظر، r فاصله‌ی شعاعی از مرکز جت و b_c محلی است که: $C = C_c = \frac{1}{e}$.

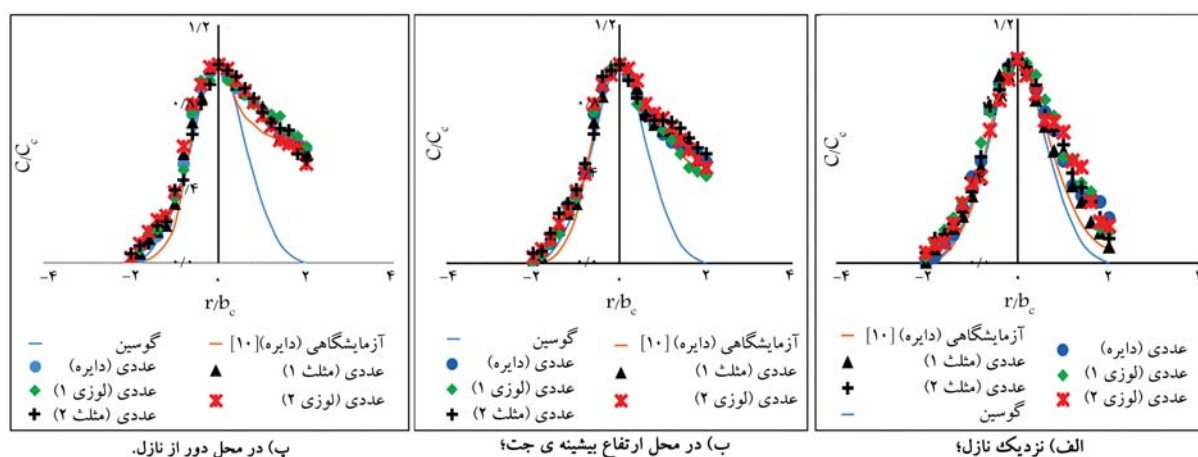
در شکل اخیر، سمت چپ نمودار مربوط به قسمت خارجی جت (نزدیک سطح آب) و سمت راست نمودار مربوط به قسمت داخلی جت (نزدیک بستر) است. رفتار پروفیل‌های عرضی غلظت با توجه به ناحیه‌ی آن متفاوت است. به شکل ۱۰ الف، در مقطع اول (نزدیک به محل تخلیه)، پروفیل‌های غلظت در لبه‌های داخلی و خارجی جت، اختلاف کمی با هم دارند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

است که جریان محیط، یکی از مهم‌ترین آن‌هاست و رفتار پساب تخلیه شده در محیط ساکن، متفاوت از محیط پویاست. [۲۱] 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.

۴.۴. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین (S_i)

در بخش حاضر، به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در میزان 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 60° درجه در محیط ساکن (شکل ۸ - الف) و پویا (شکل ۸ - ب) در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میزان 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 $1/42$ ، $1/38$ و $1/47$ و برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به ترتیب برابر $1/57$ و $1/63$ بوده است.

با توجه به شکل ۸، میزان رقیق‌سازی برای همه‌ی نازل‌ها در محیط پویا بیشتر از میزان رقیق‌سازی در محیط ساکن بوده است. با افزایش سرعت جریان محیط، میزان رقیق‌سازی در محیط پویا در تمام نازل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. نتایج مدل برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی 60° درجه، همخوانی خوبی ($RMSE = 0.21$) با مطالعه‌ی رابرتز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] 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، ۲۹٪ 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 توسط 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، میزان همآوری سیال محیط به درون جت (تماس پساب با سیال محیط) و در نتیجه



شکل ۱۰. پروفیل‌های بی‌بعد شده‌ی عرضی غلظت در مقایسه با نتایج مطالعاتی تجربی. [۱۰]

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

فهرست علائم

D : قطر نازل دایره‌یی؛	D_e : قطر معادل سطح دایره‌یی؛
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 : اثر جنبشی آشفتگی؛
ε : نرخ استهلاك؛	C : غلظت در نقطه‌ی موردنظر؛
C_e : غلظت در مرکز جت؛	C_o : 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؛
θ : زاویه‌ی دهانه‌ی نازل نسبت به افق (درجه)؛	ρ_a : چگالی محیط؛
ρ_o : 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 گاوسی شده است. در لبه‌ی خارجی جت، هم‌آوری سیال محیطی به درون جت بدون هیچ محدودیتی رخ داده و به همین دلیل، رفتار جت همانند پروفیل گاوسی بوده است. اما در لبه‌ی داخلی جت با دور شدن از منبع تخلیه، به دلیل ناپایداری شار شناوری و همچنین وجود بستر و اثر کواندا، که مانع از هم‌آوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شوند، نمودار از حالت گاوسی فاصله گرفته است. با توجه به نتایج مشخص شد 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 S_i ، S_m ، X_i ، Z_t پرداخته شده است. با مقایسه‌ی نتایج مدل آشفتگی ($k-\varepsilon$ (RNG)) با نتایج مطالعه‌های تجربی مشخص شد که مدل ($k-\varepsilon$ (RNG))، توانایی بالایی 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 لوزی 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 دایره‌یی به ترتیب ۲۰ و ۱۰ 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 صفحه‌یی باعث افزایش تعامل پساب با سیال محیط پذیرنده می‌شود و بنابراین، میزان رقیق‌سازی افزایش می‌یابد. استفاده از نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲، باعث کاهش ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت نسبت به نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱ شده است. به همین دلیل، با استفاده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به جای نازل‌های دایره، لوزی 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

منابع (References)

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 Off-shore 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 یک‌بُعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دوبُعدی

آرمان مام عزیزی* (استادیار)

محشتم خان احمدی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، 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 آسیب جلوگیری کرد و خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی احتمالی را کاهش داد. در صنعت ساختمان، استفاده از صفحات جدارنازک فولادی رو به افزایش است. آسیب در اعضاء صفحه‌یی و به‌طور خاص دیوارهای برشی فولادی می‌تواند به‌صورت پیش‌رونده به سایر المان‌ها انتقال یابد و ایجاد خسارت سازه‌یی کلی کند. در نوشتار حاضر، به تشخیص و تعیین موقعیت آسیب‌های جزئی در المان صفحه‌یی فولادی پرداخته شده است. الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی و شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دوبُعدی پیشنهاد و شاخص‌های تشخیصی DI-W و DI-L ارائه شده‌اند. نتایج نموداری بررسی‌های مربوط به هر دو شاخص پیشنهادی، کارآمدی و قابلیت تشخیص دوبُعدی موقعیت‌های مختلف آسیب را نشان می‌دهد؛ به‌نحوی که در منطقه‌ی آسیب، قله‌هایی برآمده از مقادیر شاخص‌های تشخیصی به صورت بی‌نظمی و اغتشاش پدید آمده است.

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

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

۱. مقدمه

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 ناحیه‌ی آسیب‌دیده 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

مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل کرد. تحلیل پاسخ‌های سازه با استفاده از تبدیل ریاضی توانمندی، مانند تبدیل موجک^۱، 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 محلی‌سازی پاسخ سازه در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل می‌شود.^[۱] تاکنون مطالعات متعددی بر مبنای استفاده از تبدیلات موجک در ارتباط با شناسایی آسیب انجام و در ادامه، خلاصه‌ی برخی از آن‌ها ارائه شده است: کاتونین^۲ (۲۰۱۰)،^[۲] 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 نوفه از ضرایب موجک لازم است. ژانگ و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۵، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲.

DOI: 10.24200/J30.2022.61052.3143

استناد به این مقاله:

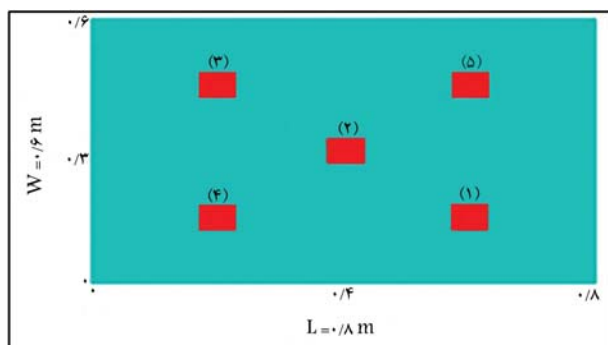
مام عزیزی، آرمان و خان احمدی، محشتم (۱۴۰۲). «عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دوبُعدی»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۵۹-۶۹

ایادجی^۳ (۲۰۱۱)،^[۴] با استفاده از تبدیل موجک ایستا^۴ و داده‌های مودال، موفق به شناسایی آسیب ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده شده‌اند. ژو^۵ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۴] نیز با بکارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دوبعدی^۶ و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر^۷ موفق به شناسایی آسیب در صفحات شده‌اند. لی^۸ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۵] با استفاده از روش آنالیز موجک نسبی پیوسته^۹ به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابایی پرداخته و نشان داده‌اند که این روش قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرابایی را دارد. کاتونین (۲۰۱۵)،^[۶] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوپنیکانکس^{۱۰} تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود صفحات کامپوزیتی آسیب‌دیده پرداخته و نشان داده است که با استفاده از موجک‌های مذکور، مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۷] با تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت‌شده‌ی تراز هر طبقه از یک ساختمان بتنی برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. نادرپور و فخاریان (۲۰۱۶ و ۲۰۲۲)،^[۸] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ی به شناسایی پارامترهای مودال سازه پرداختند و پاسخ ارتعاش آزاد سازه را توسط تبدیل موجک بسته‌ی تجزیه کردند. سپس سیگنال تجزیه شده‌ی را که دارای انرژی یکسان با سیگنال اصلی بود، برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. عملکرد روش اخیر در شناسایی، با استفاده از نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد تأیید واقع شد.

عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ی مبتنی بر موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرها پرداختند و با بهره‌گیری از تبدیل موجک، محل‌های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌ها شدند. یانگ و ایادجی^{۱۲} (۲۰۱۷)،^[۱۱] روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال^{۱۳} ارائه دادند و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال، موقعیت آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه را شناسایی کردند. نوری و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۲] با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان، می‌توان شناسایی آسیب موفق‌تری را انجام داد. یونسی و همکاران^[۱۳-۱۶] بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب جداولی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST)^{۱۴} پرداختند. ایشان آسیب جداولی را توسط یک لایه‌ی پلی استایرن نازک در یک وجه ستون بین بتن و فولاد در نظر گرفتند و با به‌کارگیری تبدیل موجک پیوسته، موفق به شناسایی موقعیت آسیب جداولی شدند. وانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۷] تبدیل موجکی مبتنی بر روش بردار نیروی باقی‌مانده برای تشخیص آسیب در سازه‌های تونلی پیشنهاد دادند و برای مدل المان محدود تونل با انواع آسیب استفاده کردند و نتایج شناسایی مطلوبی به دست آوردند. میرزایی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] با روشی مشابه روش عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] به شناسایی آسیب در سازه‌ی خرابایی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند. در ابتدا، المان‌های محتمل آسیب را شناسایی و سپس مقدار خسارت در هر یک از المان‌ها را محاسبه کردند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۹] با استفاده از تحلیل موجک دوبعدی شکل‌های مود صفحه‌ی فولادی به مقایسه‌ی ضرایب موجک وضعیت‌های با و بدون آسیب پرداختند و نشان دادند که اغتشاش‌ها در ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت‌های محتمل آسیب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت بدون آسیب در موقعیت‌های مختلف

آسیب چشم‌گیر است و در تمامی مودها می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد. ایشان در مطالعات دیگری با استفاده از روش‌های مبتنی بر موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات فولادی پیش‌ساخته‌ی پانلی و چندلایه‌ی کامپوزیتی شدند.^[۲۰-۲۴] همچنین، آن‌ها نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع پیوسته و گسسته‌ی تبدیلات موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب در تیر را به درستی شناسایی کرد.^[۲۴-۲۲] ایشان در مطالعات دیگری،^[۲۵-۲۶] با بکارگیری تبدیل موجک به شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر اوج سیگنال‌های خروجی با صرف‌نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، موقعیت‌های آسیب را نشان دادند. همچنین آن‌ها در ادامه‌ی مطالعات‌شان، شاخص‌های مبتنی بر شیب و انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود را برای شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پیشنهاد دادند.^[۲۷-۲۸] حنطه^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۹-۳۰] بر مبنای تحلیل موجک پیوسته‌ی شکل‌های مود یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب نشان دادند که موقعیت آسیب با ایجاد جهش‌های نسبی بیشینه و کمینه در ضرایب موجک قابل شناسایی است. ما^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۳۱] بر مبنای تحلیل موجک انحنای استاتیکی تیرها به شناسایی آسیب‌های چندگانه پرداختند و به نتایج شناسایی مطلوبی دست یافتند. سان^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۲] استفاده از تبدیل موجک و همبستگی تصاویر دیجیتال را برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت پیشنهاد دادند، که یک روش شناسایی کارآمد است. مام عزیزی و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۳] برای شناسایی موقعیت‌های جداولی در ستون‌های کامپوزیت CFST، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی شکل‌های مود را پیشنهاد کردند و حساسیت آن را به موقعیت‌های جداولی و شدت‌های مختلف آسیب نشان دادند. در پژوهش دیگری، خان احمدی و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۴] با تعریف یک سیگنال ورودی و به‌کارگیری تبدیل موجک پیوسته به شناسایی منطقه‌ی جداولی در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و نشان دادند که در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری از ضرایب موجک به محدوده‌ی آسیب وجود دارد؛ با این حال در مقیاس‌های بالاتر، منطقه‌ی آسیب با وضوح مناسب‌تری قابل شناسایی است. همچنین ایشان در مطالعه‌ی دیگری،^[۳۵] مقایسه‌ی ضرایب جزئیات به دست آمده از تحلیل موجک شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی برای شناسایی آسیب در تیرها را پیشنهاد کرده و نشان داده‌اند که با استفاده از روش مذکور، بدون در نظر گرفتن آثار نوفه، موقعیت‌های آسیب با خطای کمتر از ۲٪ قابل شناسایی است.

تحلیل ویژگی‌های بسامدی در سایر مباحث مهندسی سازه نیز مهم است. به عنوان مثال، قله‌کی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۳۶-۳۷] برای سازه‌های دارای دیوار برشی فولادی با بسامد بزرگ‌تر از ۲ هرتز، ضریب رفتار در حدود ۱۱ تا ۱۳، برای سازه‌های بلندمرتبه برابر با ۸، و برای سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه در حدود ۹ را پیشنهاد کرده‌اند. با توجه به استفاده‌ی روزافزون از صفحه‌های فولادی در صنعت ساختمان و امکان انتقال و گسترش آسیب‌های جزئی در میان‌قاب‌های صفحه‌ی به دیگر المان‌ها، شناسایی آسیب در صفحات مهم بوده و مورد توجه نویسندگان نوشتار حاضر واقع شده است. از طرفی اغلب مطالعات انجام شده در ارتباط با پایش سلامت در المان‌های صفحه‌ی بر مبنای استفاده از تبدیلات حوزه‌ی زمان - بسامد (همانند تبدیل موجک) با زمینه‌ی تئوری دوبعدی بوده است. در نوشتار حاضر، یک الگوریتم تشخیصی مبتنی بر شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دوبعدی و تبدیل موجک پیوسته با زمینه‌ی تئوری یک‌بعدی برای شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب در صفحه‌های فولادی، پیشنهاد و کارایی تشخیصی آن بررسی شده است.



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
D۱	۳	۱	۰/۶۰	۰/۱۵
		۲	۰/۴۰	۰/۳۰
		۳	۰/۲۰	۰/۴۵
D۲	۴	۱	۰/۶۰	۰/۱۵
		۳	۰/۲۰	۰/۴۵
		۴	۰/۲۰	۰/۱۵
		۵	۰/۶۰	۰/۴۵
		۵	۰/۶۰	۰/۴۵
D۳	۵	۱	۰/۶۰	۰/۱۵
		۲	۰/۴۰	۰/۳۰
		۳	۰/۲۰	۰/۴۵
		۴	۰/۲۰	۰/۱۵
		۵	۰/۶۰	۰/۴۵

۴. تحلیل مودال

۴.۱. بررسی اثر آسیب در مقادیر بسامد

از دینامیک سازه‌ها، معادله‌ی ارتعاش آزاد بدون میرایی یک سیستم سازه‌ی n درجه آزادی مطابق رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$M\ddot{U} + KU = \{0\}_{n \times 1} \quad (5)$$

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:

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (6)$$

که در آن، ω بسامد طبیعی سازه است. معادله‌ی مشخصه‌ی ۶، با یک معادله‌ی چندجمله‌ی n درجه متناظر است که از حل آن، n مقدار متمایز برای بسامد حاصل می‌شود و هر بسامد نظیر 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

تبدیل موجک یک تبدیل ریاضی پردازشی سیگنال‌هاست که مشخصات بسامدی سیگنال را در یک بازه‌ی زمانی کوتاه استخراج می‌کند و نشان می‌دهد که با گذشت زمان، چگونه تغییر می‌کند. تبدیل موجک، مجموعه‌ی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن بسامدی تغییر می‌کند و اجزاء بسامدی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آیند.^[۳۸] در یک تقسیم‌بندی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)^{۱۹} و تبدیل موجک گسسته (DWT)^{۲۰} تعریف می‌شوند که در نوشتار حاضر، با توجه به اینکه نوع پیوسته‌ی تبدیل موجک مد نظر بوده است، از بیان مبانی تئوری نوع گسسته‌ی آن صرف‌نظر شده است. تبدیل موجک پیوسته‌ی سیگنال $f(t)$ در بازه‌ی $-\infty$ تا ∞ مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:^[۳۹، ۴۰]

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

که در آن، s و τ به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند و ψ تابع موجک است. مقیاس‌های بالا ($s > 1$) متناظر با جزئیات^{۲۱} و مقیاس‌های پایین ($s < 1$) متناظر با تقریب‌های^{۲۲} سیگنال هستند. در رابطه‌ی ۱، تابع موجک باید این ویژگی‌ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد:^[۴۰، ۴۱]

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

۲. انرژی آن محدود باشد:^[۴۰، ۴۱]

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (3)$$

۳. باید در رابطه‌ی ۴ صدق کند:^[۴۰، ۴۲]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega^{-1} |\Psi(\omega)|^2 d\omega < +\infty \quad (4)$$

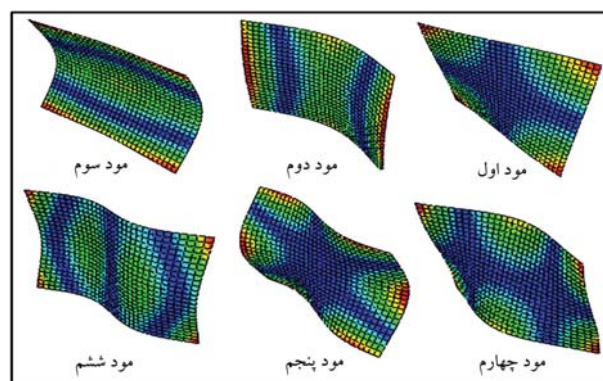
که در آن، Ψ تبدیل فوری ψ و ω بیانگر بسامد هستند. رابطه‌ی ۲ پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه‌ی ۳، به این معنی است که بیشترین انرژی موجک برای یک بازه‌ی زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود.^[۴۱]

۳. مدل‌سازی اجزاء محدود صفحه‌ی فولادی

صفحه‌ی فولادی (مطابق شکل ۱) به ابعاد 0.8×0.6 متر با ضخامت ۲ میلی‌متر و موقعیت‌های آسیب مربعی به طول ضلع ۵ سانتی‌متر به شماره‌های ۱ تا ۵ در نرم‌افزار آباکوس^{۲۳} با مشخصات مکانیکی مدول کشسانی ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۳ و شرایط لبه‌ی آزاد با استفاده از المان Shell۳D مدل‌سازی شده است. مشخصات آسیب در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار ۱۰٪ کاهش مدول کشسانی فولاد در هر یک از موقعیت‌های آسیب به عنوان خسارت در نظر گرفته شده است. در این صورت، مدول کشسانی موقعیت‌های آسیب برابر با ۰/۹ مدول کشسانی نواحی بدون آسیب خواهد بود.

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

شماره‌ی مود	حالت سالم			حالت آسیب
	D۱	D۲	D۳	
	بسامد طبیعی (Hz)			
۱	۱۳/۶۰۸	۱۳/۵۹۵	۱۳/۵۹۴	۱۳/۵۸۸
۲	۱۶/۲۲۵	۱۶/۲۰۹	۱۶/۲۱۲	۱۶/۲۰۲
۳	۳۰/۱۸۱	۳۰/۱۴۷	۳۰/۱۵۷	۳۰/۱۳۵
۴	۳۲/۲۴۷	۳۲/۲۳۰	۳۲/۲۱۳	۳۲/۲۱۳
۵	۳۹/۴۰۹	۳۹/۳۸۹	۳۹/۳۷۰	۳۹/۳۷۰
۶	۴۷/۵۷۵	۴۷/۵۲۶	۴۷/۴۷۸	۴۷/۴۷۷



شکل ۲. شکل‌های مود صفحه‌ی فولادی سالم.

می‌شود؛ بنابراین، از بررسی پاسخ‌ها می‌توان پایش سلامتی در سازه را مورد پژوهش قرار داد. تحلیل مودال صفحه‌ی فولادی با وضعیت‌های سلامتی بدون آسیب و با آسیب (حالت‌های آسیب D۱ تا D۳) با در نظر گرفتن ابعاد مش تحلیلی به طول ۲/۵ سانتی‌متر در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. در جدول ۲، مقادیر بسامدی ۶ مود اول ارائه و در شکل ۲، شکل‌های مود نظیر هر بسامد وضعیت سالم مشاهده می‌شود که مطابق آن، در اثر آسیب، مقدار بسامد موده‌های مختلف حالت‌های آسیب از بسامد متناظر از حالت سالم کمتر است. همچنین، مقادیر بسامدی حالت‌های آسیب D۱ و D۲ از مقادیر بسامدی حالت آسیب D۳ کمتر است؛ به عبارتی، با اضافه شدن موقعیت‌های جدید آسیب، مقادیر بسامدی کاهش یافته است.

۲.۴. بررسی اثر آسیب در زاویه‌ی بین شکل‌های مود ارتعاشی

یکی از مفاهیمی که به کمک آن می‌توان تأثیر آسیب در جابه‌جایی درجه‌های آزادی شکل‌های مود ارتعاشی سازه را مطالعه و بررسی کرد، زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی موده‌های ارتعاشی است که عبارت از زاویه با ابتدای مشترک بردارهای شکل موده‌های اولیه و ثانویه است که مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

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

که در آن، ϕ_i^u و ϕ_j^d به ترتیب شکل اولیه‌ی مود i ام و شکل ثانویه‌ی مود j ام هستند.

مقادیر زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود محاسبه و در جدول‌های ۳ الی ۵ گزارش شده‌اند. در صورتی که هیچ‌گونه آسیبی در صفحه اتفاق نیفتاده باشد، مقدار زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه برای تمامی موده‌های متناظر صفر محاسبه می‌شود. به عبارتی دیگر، بردارهای جابه‌جایی درجه‌های آزادی اولیه و ثانویه‌ی مود i ام بر هم منطبق خواهند شد؛ در غیر این صورت، مقادیر زاویه‌ی غیرصفر محاسبه می‌شوند. مقادیر قطری گزارش شده در جدول‌های ۳ الی ۵، غیرصفر هستند که به دلیل وجود آسیب در صفحه است.

۵. شناسایی آسیب

از قابلیت‌های تبدیلات موجک، شناسایی موقعیت‌های مکانی یا زمانی است که در آنجا، سیگنال موردنظر دچار ناپیوستگی‌های ناگهانی می‌شود. بررسی‌های اولیه‌ی انجام شده نشان می‌دهند که ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک سیگنال‌های فرضی، اطلاعات مفیدی برای شناسایی نقاط ناپیوستگی دارند. بنابراین، در نوشتار حاضر، برای شناسایی آسیب در صفحه، الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی ارائه شده است که با استفاده از شاخص‌های پیشنهادی، موقعیت‌های آسیب با ایجاد قله‌های برآمده از بی‌نظمی قابل شناسایی است.

۱.۵. الگوریتم تشخیص آسیب

گام ۱: فراخوانی سیگنال‌های اولیه و ثانویه‌ی شکل مود به محیط نرم‌افزار متلب؛
گام ۲: درون‌یابی سیگنال‌های فراخوانی شده بر مبنای طول و عرض صفحه (L و W)؛

گام ۳: انجام تحلیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی سیگنال‌های دوبعدی حاصل از گام ۲ و تشکیل ماتریس‌های شاخص‌های آسیب DI-W و DI-L (پیوست ۱)؛
گام ۴: اختصاص درایه‌های ماتریس شاخص‌های تشخیصی به درجه‌های آزادی صفحه‌ی فولادی و شناسایی آسیب (پیوست ۱).

۲.۵. شناسایی موقعیت‌های آسیب

در نرم‌افزار متلب (R۲۰۲۱a)، کدنویسی‌ها برای محاسبه‌ی شاخص‌های تشخیصی در دو بُعد طول و عرض صفحه انجام شده است (پیوست‌های ۱ و ۲) و مقادیر محاسبه شده به درجه‌های آزادی نظیرشان در صفحه‌ی فولادی اختصاص داده شده‌اند. در شکل‌های ۳ الی ۵، نتایج نموداری مربوط به شاخص‌های تشخیصی DI-L سه مود اول وضعیت‌های آسیب D۱، D۲ و D۳ ترسیم شده است. همچنین، در شکل‌های ۶ الی ۸، نتایج نموداری سه مود اول وضعیت‌های آسیب براساس شاخص‌های تشخیصی DI-W مشاهده می‌شوند. ضرایب موجک تعریف‌کننده‌ی شاخص‌های تشخیصی بر مبنای استفاده از تابع موجک coif5 محاسبه شده‌اند.

۳.۵. بررسی تغییر شرایط گیرداری لبه‌ها

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

جدول ۳. زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۱.

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 ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۲.

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	۹۰/۳۳۰	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 ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۳.

شماره‌ی مود وضعیت بدون آسیب						زاویه‌ی بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۱۳	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۳۴۳	۰/۰۲۱	۹۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۵۳	۹۰/۳۲۹	۹۰	۳
۹۰	۹۰	۰/۰۲۲	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۹۱/۰۰۵	۰/۱۱۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۰/۱۳۲	۹۰/۷۸۰	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)، (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.

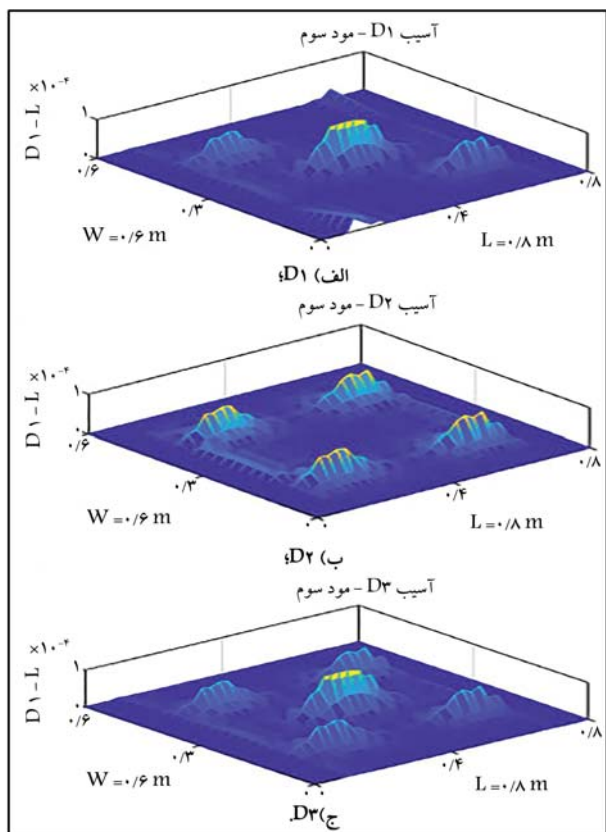
گیرداری کامل لبه‌ها در مود اول بررسی و مشاهده شد که با استفاده از روش اخیر می‌توان موقعیت‌های آسیب در صفحه را با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها شناسایی کرد. نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L و DI-W مود اول (شکل ۹) برای وضعیت آسیب D۳ با مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

۴.۵. بررسی اثر تغییر شدت آسیب در شاخص‌های تشخیص آسیب

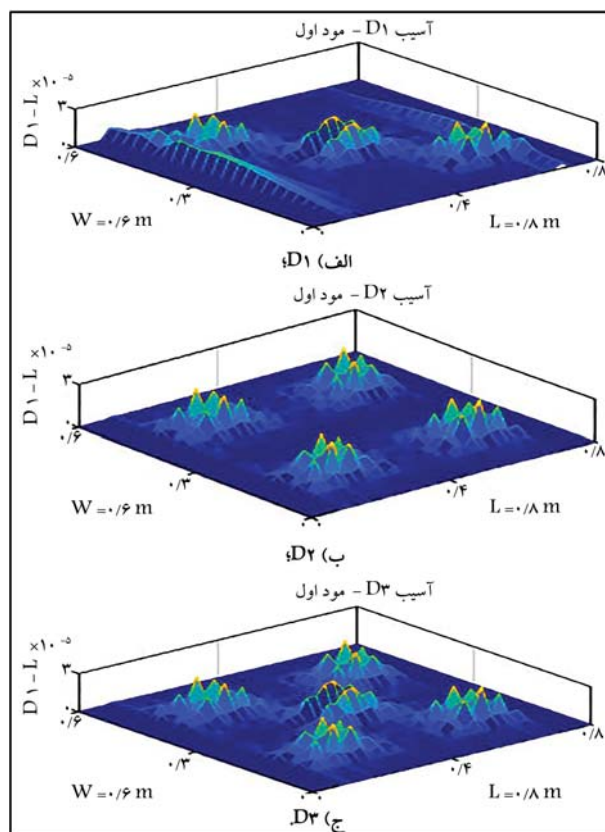
شاخص‌های تشخیصی آسیب معرفی‌شده در نوشتار حاضر به مقدار خسارت رخ داده در موقعیت‌های آسیب حساس هستند و با افزایش مقدار خسارت رخ داده در یک موقعیت آسیب، ارتفاع قله‌های ایجادشده از بی‌نظمی‌ها، در همان موقعیت آسیب افزایش می‌یابد. در بررسی‌های تشخیص آسیب که در

۵.۵. شناسایی آسیب با دیگر توابع موجک

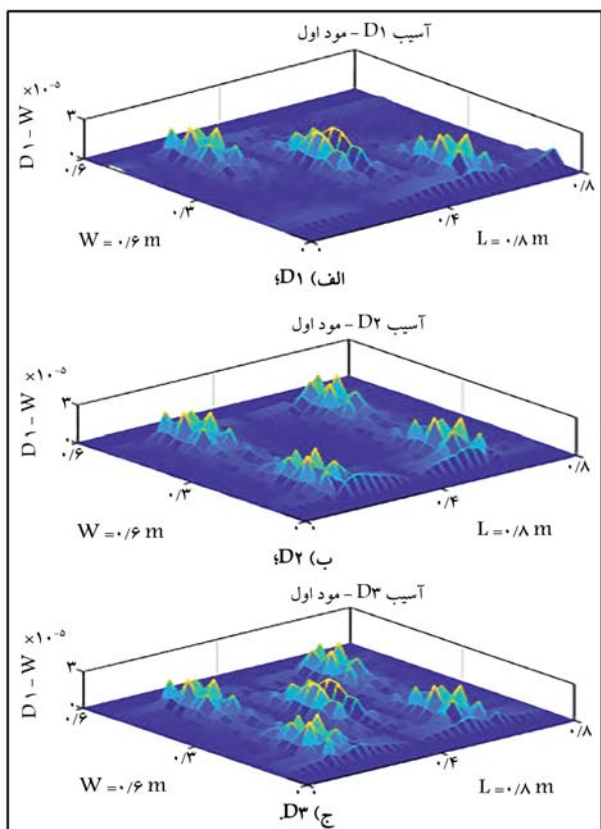
یکی از مشکلاتی که در روش‌های تشخیص آسیب بر پایه‌ی تبدیلات موجک وجود دارد، این است که با کدام تابع موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب را به درستی



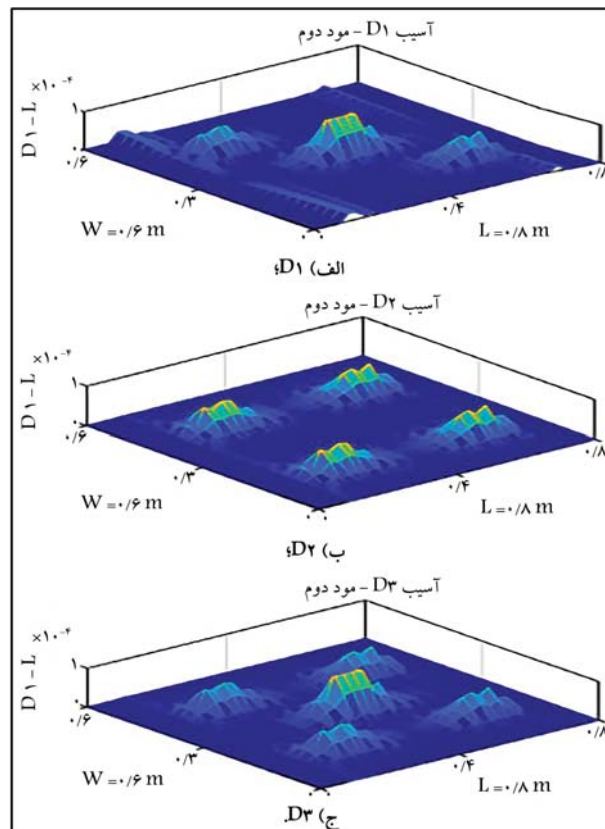
شکل ۵. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود سوم برای وضعیت آسیب.



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



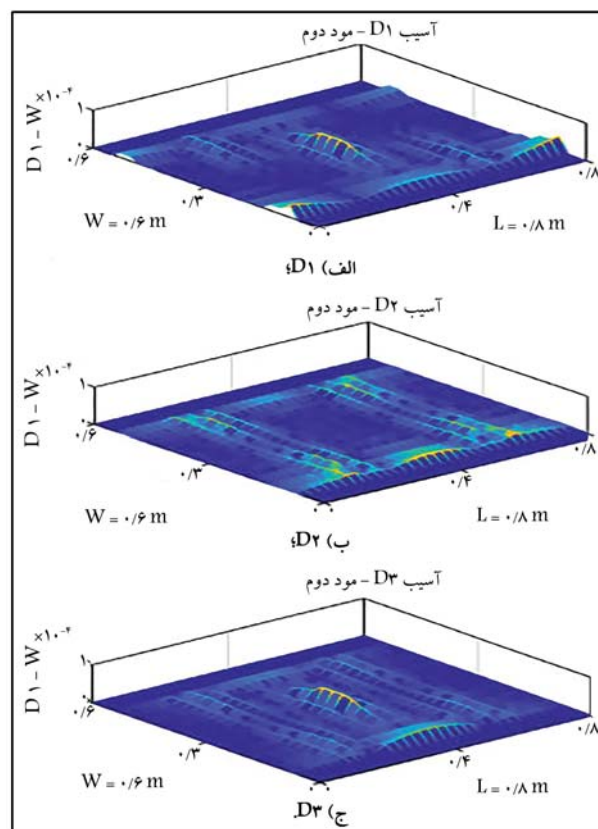
شکل ۶. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-W مود اول برای وضعیت آسیب.



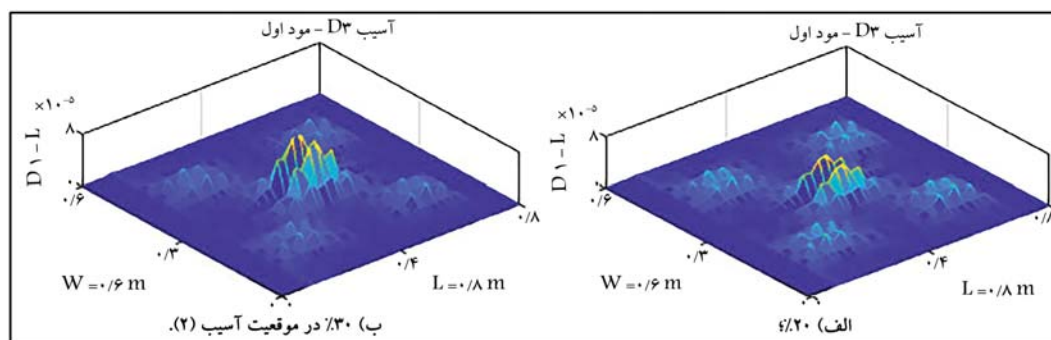
شکل ۴. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود دوم برای وضعیت آسیب.

شناسایی کرد؛ به عبارتی، انتخاب تابع موجک مناسب به عنوان یکی از چالش‌های روش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر تبدیلات موجک مطرح است. در نوشتار حاضر، فرایند آشکارسازی موقعیت‌های آسیب در صفحه با توابع موجک متعددی بررسی و مشاهده شد که می‌توان با استفاده از شمار زیادی از توابع موجک، موقعیت‌های آسیب را به درستی شناسایی کرد که این موضوع بر قابلیت اعتماد تشخیصی روش پیشنهادی نوشتار حاضر می‌افزاید. به عنوان مثال، در شکل ۱۲، نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L، مود اول برای وضعیت آسیب D۳ با توابع موجک rbio5/5 ، bior5/5 ، sym4 و db8 مشاهده می‌شود که تأییدی بر درستی مطالب بخش حاضر است.

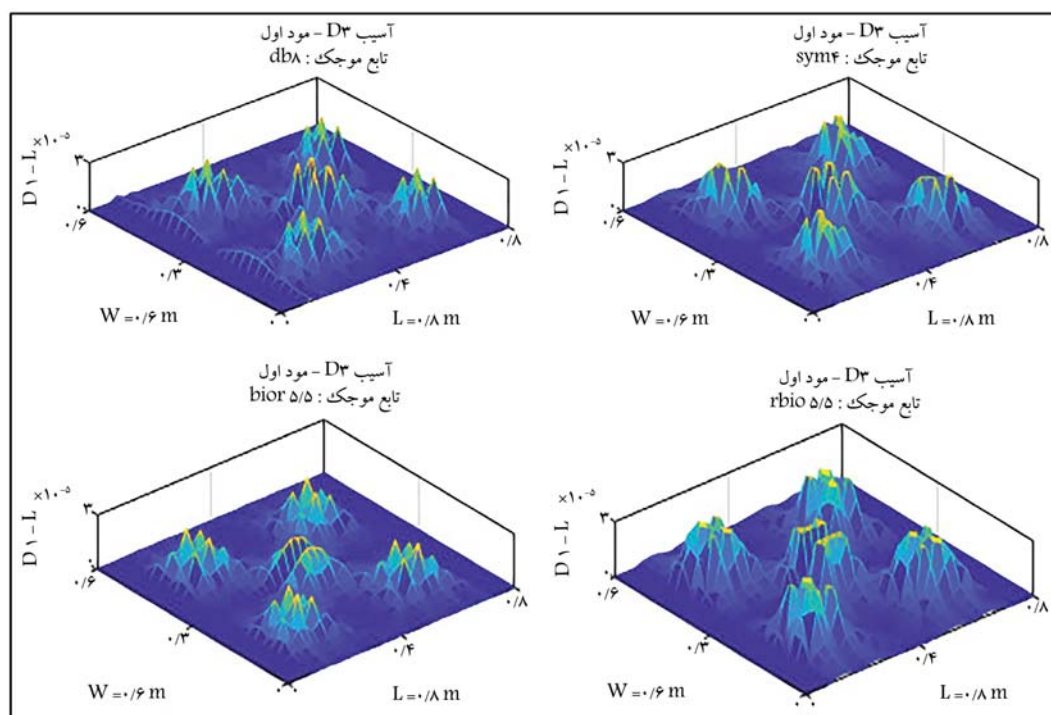
پایش سلامت در سازه‌های مهندسی، از زمینه‌های پژوهشی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است که همواره شناسایی و تعیین موقعیت‌های آسیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل آن در سازه‌ها مطرح بوده است. امروزه استفاده از صفحه‌های جدار نازک فولادی در صنعت ساختمان، به ویژه به عنوان دیوار برشی فولادی، رو



65



شکل ۱۱. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D^۳ با مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب (۱)، (۳)، (۴) و (۵) و مقدار خسارت (الف) ۲۰٪ و ب) ۳۰٪ در موقعیت آسیب (۲).



شکل ۱۲. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D^۳ با استفاده از توابع موجک dba، sym4، bior5/5 و rbio5/5.

۳. در اثر آسیب، زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی غیرصفر است؛ به عبارتی، بردار جابه‌جایی مودال درجه‌های آزادی متناظر از دو وضعیت اولیه و ثانویه بر هم انطباق ندارند.

۴. اندازه‌ی زاویه‌ی بین شکل اولیه‌ی مود i و شکل ثانویه‌ی مود j ($i \neq j$) برابر با مقدار تقریبی ۹۰ درجه محاسبه شده است؛ که ویژگی اصلی تعامد 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 ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دوتعدی و تبدیل موجک پیوسته یک‌بعدی ارائه شده است. خروجی الگوریتم پیشنهادی، ماتریس‌های شاخص تشخیصی DI-W و DI-L هستند که:

الف) از اختصاص مقادیر درایه‌ی 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 نوشتار حاضر، صفحه‌ی فولادی با وضعیت‌های با و بدون آسیب در نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی و اطلاعات مودال شامل بسامدهای 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 D^۱ و D^۲ با مقادیر بسامدی متناظر با وضعیت آسیب D^۳ 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 موقعیت‌های آسیب رضایت‌بخش نیست و حال آنکه با استفاده از DI-L، موقعیت‌های مختلف آسیب به‌درستی شناسایی شده‌اند.

ج) مقدار بی‌نظمی‌های ایجاد شده در نمودار شاخص‌های تشخیصی در یک موقعیت آسیب به مقدار خسارت موجود در همان موقعیت آسیب وابسته است و با افزایش مقدار خسارت، ارتفاع قله‌های بی‌نظمی در آن موقعیت آسیب افزایش می‌یابد.

د) طبق الگوریتم پیشنهادی با استفاده از توابع موجک متعددی می‌توان موقعیت‌های آسیب در صفحه را با شرایط مختلف گیرداری لبه‌ها شناسایی کرد.

آزادی نظیرشان در صفحه‌ی فولادی، قله‌هایی از بی‌نظمی‌ها و اغتشاش‌ها در موقعیت‌های آسیب ایجاد می‌شوند که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های آسیب را به‌درستی شناسایی کرد.

ب) مقایسه‌ی نتایج نموداری حاصل از ترسیم ماتریس‌های شاخص‌های تشخیصی نشان می‌دهد که شاخص‌های تشخیصی امتداد طولی یا DI-L نسبت به شاخص‌های تشخیصی امتداد عرضی یا DI-W عملکرد شناسایی مطلوبی ارائه می‌دهد، به‌طوری که در مود دوم مشاهده می‌شود با استفاده از DI-W،

پانویس‌ها

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., Radzienski, 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", *KSCE 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 Yousefbeck, 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., Altabay, 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., Yousefibeik 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-Ghalehahman, 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):

```
k\ = floor (n\ / \°);
DIL (:, \ : k\ + \) = °; DIL (:, n\ - k\ : n\) = °
for j = \ : n\
if Teta (Ui (:, j), Di (:, j)) > ۹°
DIW (:, j) = abs (cwt (Ui (:, j) + Di (:, j), scale, wname));
else
DIW (:, j) = abs (cwt (Ui (:, j) - Di (:, j), scale, wname));
end
end
k۲ = floor (m\ / \°);
DIW (\ : k۲ + \, :) = °; DIW (m\ - k۲ : m\, :) = °
%.Step۴
figure (\); surf (X۲, Y۲, DIL)
figure (۲); surf (X۲, Y۲, DIW)
%.End
```

پیوست ۲. (کد متلب تابع Teta):

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

```
%.Step۱
U = xlsread ('Undamaged Signal.xls', 'Sheet۱');
D = xlsread ('Damaged Signal.xls', 'Sheet۱');
%.Step۲
[m, n] = size (U);
x\ = linspace (°, L, n); y\ = linspace (°, W, m); N = ۲;
x۲ = linspace (°, L, N * n); y۲ = linspace (°, W, N * m);
[X\, Y\] = meshgrid (x\, y\);
[X۲, Y۲] = meshgrid (x۲, y۲);

{
Ui = interp۲ (X\, Y\, U, X۲, Y۲, 'spline');
Di = interp۲ (X\, Y\, D, X۲, Y۲, 'spline');
}
%.Step۳
[m\, n\] = size (Ui);
DIL = zeros (m\, n\); DIW = zeros (m\, n\);
wname = 'coif۵'; scale = ۲;
```

```
{
for i = \ : m\
if Teta (Ui (i, :), Di (i, :)) > ۹°
DIL (i, :) = abs (cwt (Ui (i, :) + Di (i, :), scale, wname));
else
DIL (i, :) = abs (cwt (Ui (i, :) - Di (i, :), scale, wname));
end
end
end
```


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

امید زریافیان (دانشجوی دکتری)

توحید پوررستم* (استادیار)

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

مهدی فضیلتی (استادیار)

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

عبدالرضا سروقد مقدم (دانشیار)

بزرگه‌شگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

علی گلصورت پهلویانی (استادیار)

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

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دوره ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۷۱-۸۰ (پژوهشی)

عملیات غربال‌گری سریع بصری (RVS)، ساده‌ترین و سریع‌ترین روش برای بررسی آسیب‌های لرزه‌یی یک ساختمان است. به دلیل وجود عدم قطعیت در ساختار RVS، از یک مدل منطق فازی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌یی در نوشتار حاضر استفاده شده است. به منظور آموزش مدل فازی نیز از یک الگوریتم اخیراً پیشنهاد شده بهینه‌سازی ازدحام 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 موردی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل فازی آموزش‌دیده با الگوریتم GuASPSO به ترتیب در ۶۷، ۷۸ و ۷۸ 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 لرزه‌یی دارد.

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

zaribafian@yahoo.com
pourroostam@gmail.com
fazilati2001@pci.iaun.ac.ir
moghadam@iies.ac.ir
ali.golsoorat_pahlaviani@iauctb.ac.ir

۱. مقدمه

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

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۵، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۸، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۸.

DOI:10.24200/J30.2022.61047.3142

استناد به این مقاله:

زریافیان، امید، پوررستم، توحید، فضیلتی، مهدی، سروقدمقدم، عبدالرضا و گلصورت پهلویانی، علی (۱۴۰۲). «بهبود کارایی یک مدل منطق فازی در پیش‌بینی شاخص خسارت لرزه‌یی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۷۱-۸۰

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

روش RVS^۱ از یک بازرسی سریع بصری (چشمی) توسط یک غربالگر با تجربه از طریق بررسی بیرونی ساختمان بدون هیچگونه محاسبات سازه‌یی بهره می‌گیرد. هدف اصلی RVS، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌یی یک ساختمان به‌صورت سریع و اقتصادی و ارائه‌ی یک رتبه‌ی ایمنی برای آن است. بدیهی است، نتایج ارزیابی RVS به دلیل سرعت و سادگی فرایند آسیب‌پذیری لرزه‌یی، تقریبی است و چه بسا یک ساختمان نیاز به بررسی‌های دیگری داشته باشد که بسیار پیچیده‌تر و زمان‌برتر هستند و حتی محاسبات سازه‌یی را نیز شامل می‌شوند.^[۲] گزارش فیما-۱۵۴ (FEMA)^[۵] در ایالات متحده که یکی از معتبرترین دستورالعمل‌های RVS است، پارامترهای مختلفی، مانند: تعداد طبقات، قدمت ساخت، آیین‌نامه‌ی لرزه‌یی استفاده شده، نقایص سازه‌یی و غیره را که در رفتار لرزه‌یی ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد، در نظر می‌گیرد. تجربه‌ی زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد نقایص سازه‌یی (نظیر: نامنظمی در پلان، نامنظمی در ارتفاع، و غیره) می‌توانند آسیب‌پذیری لرزه‌یی ساختمان‌ها را افزایش دهند.

حریرچیان^۳ و همکاران (۲۰۲۰، ۲۰۲۱)^[۷،۶] بررسی جامعی در زمینه‌ی روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌یی 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.^[۸] روش RVS یک روش تجربی است که از ماهیت ساده و سریع خود در عین غیرقطعی بودن، بهره می‌برد. روش‌های متعددی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی روش RVS با بهره‌گیری از مدل‌های ابتکاری و محاسبات نرم پیشنهاد شده‌اند.^[۹-۶] مدل‌های آماری و مدل‌های مهندسی تحلیلی، هر یک محدودیت‌های جدی خود را دارند،^[۲] بنابراین استفاده از مدل‌های ابتکاری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله روش‌های ابتکاری می‌توان به روش‌های ابتکاری مبتنی بر قواعد،^[۸،۹] سیستم‌های استنتاج فازی برای شبیه‌سازی عرشی بل‌های بتن مسلح،^[۱۲] روش‌های مبتنی بر منطق فازی برای ساختمان‌های بتنی،^[۱۳] مدل‌سازی منطق فازی نظارت شده،^[۱۴] مدل منطق فازی آموزش‌دیده توسط الگوریتم ژنتیک برای ساختمان‌ها،^[۱۵] شبکه‌های عصبی مصنوعی،^[۱۶] و غیره اشاره کرد.

چنانکه پیشتر نیز بیان شده است، داده‌های جمع‌آوری شده در روش‌های RVS، به اندازه‌ی کافی دقیق نیستند و به دلیل تکیه بر بازرسی‌های چشمی توسط انسان، مبتنی بر اعمال سلیقه و نظر شخص بازرس هستند. نقص مذکور می‌تواند منجر به بروز طبیعی عدم قطعیت^۴ در تحلیل‌ها شود که به نوبه‌ی خود ممکن است قدرت پیش‌بینی مدل‌هایی که از روش‌های ذکر شده استفاده می‌کنند، را کاهش دهد. یک رویکرد برای لحاظ کردن کامل این عدم قطعیت و در نتیجه کاهش تأثیر آن در پیش‌بینی غیردقیق مدل‌های مذکور، استفاده از منطق فازی است.^[۹-۸] منطق فازی با فراهم ساختن چارچوبی جهت ملحوظ ساختن قطعیت‌های موجود در روش RVS، نقش بسیاری در بالاتر بردن دقت نتایج ایفا می‌کند.^[۱۰]

تسفاماریام و ساعتچی‌اوغلو^۵ (۲۰۰۸)، از RVS در چارچوب یک مدل منطق فازی جهت ارزیابی ریسک موجود در تعیین مقدار کمتی شاخص آسیب‌پذیری لرزه‌یی و توسعه‌ی روش رتبه‌بندی ساختمان‌های بتن مسلح به لحاظ خسارت‌پذیری

لرزه‌یی بهره برده‌اند.^[۱] در رویکرد آن‌ها، ریسک 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 نورتریج^۶ (۱۹۹۴) اعتبارسنجی کرده‌اند.

به‌رغم آنکه منطق فازی از نظر تئوری قادر به مدیریت عدم قطعیت در روش RVS است؛ اما عملاً این امر مستلزم تنظیم دقیق پارامترهای داخلی^۷ مدلی است که در ساختار خود از داده‌های ناشی از روش RVS سود می‌برد. میزان بهینگی 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 نوین ازدحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده (GuASPPO)^[۸،۱۷] به منظور آموزش مدل اصلی تسفاماریام و ساعتچی‌اوغلو (۲۰۰۸)،^[۱] استفاده و نتایج ناشی از مدل طراحی شده با الگوریتم GuASPPO، با نتایج همین مدل زمانی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^[۹،۱۸] و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)^[۱۰،۱۹] آموزش دیده است، مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جست‌وجوی تطبیقی

هدایت شده (GuASPPO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جست‌وجوی تطبیقی هدایت شده (GuASPPO) که نخستین بار توسط رضائی و صفوی^[۱۱] (۲۰۲۰)، ارائه شده است، نسخه‌ی جدیدی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است که نخستین بار توسط کندی و ابرهارت^[۱۲] (۱۹۹۵)،^[۱۸] پیشنهاد شده است. در بخش حاضر، ابتدا 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 جست‌وجوگر الگوریتم PSO سعی در جست‌وجوی جواب بهینه و در نتیجه، حل 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 به‌روزرسانی می‌شوند:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_1(Pbest_i^t - X_i^t) + c_2r_2(Gbest^t - X_i^t) \quad (۱)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (۲)$$

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

$$V_i^{t+1} = \chi[V_i^t + \phi_1(Pbest_i^t - X_i^t) + \phi_2(Gbest^t - X_i^t)] \quad (۳)$$

که در آن، $W_i(t)$ بردار وزن نرون i ام در تکرار t ام و $W_i(t+1)$ بردار وزن نرون i 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. رابطه محاسبه نرخ یادگیری در رابطه ۹ ارائه شده است:

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

که در آن، $\eta(0)$ معمولاً برابر 0.1 فرض می‌شود و τ_1 برابر بیشینه تعداد تکرارهای SOM است که در الگوریتم GuASPSO مساوی با ۴ برابر تعداد بردارهای ورودی به شبکه یا همان تعداد ذرات Pbest در نظر گرفته شده است. روشن است که تعداد ذرات Pbest نیز برابر اندازه جمعیت الگوریتم GuASPSO است. بنابراین SOM ذرات Pbest را به تعداد متغیری از کلاسترها تقسیم‌بندی می‌کند که از طریق رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

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

که در آن، t_{max} بیشینه تعداد تکرارهای الگوریتم GuASPSO است. سپس معکوس تعداد ذرات Pbest که در هر کلاستر فعال (هر کلاستر دارای حداقل یک ذره Pbest است) قرار گرفته‌اند، محاسبه و به عنوان وزن هر کلاستر که میزان سهم آن کلاستر را در هدایت ذرات مختلف در فضای جست‌وجو مشخص می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۱۱، نحوه محاسبه ذره 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، $Gbest_i^t$ ذره بهینه سراسری متناظر با ذره i ام در تکرار t ام، وزن محاسبه شده برای کلاستر i ام در تکرار t ام، $Cbest_j^t$ بهترین ذره ($Cbest$) واقع در کلاستر i ام در تکرار t ام و $c(i)$ کلاستری است که i امین ذره Pbest در آن قرار گرفته است. در این صورت با تبدیل ذره بهینه سراسری عمومی $Gbest^t$ به ذره بهینه سراسری منحصر به هر ذره با عنوان $Gbest_i^t$ در الگوریتم GuASPSO، رابطه ۳ در الگوریتم PSO به رابطه ۱۲ در الگوریتم پیشنهادی GuASPSO تبدیل می‌شود. خاطر نشان می‌شود که سایر محاسبات، روابط به‌روزرسانی و سایر تنظیمات پارامترهای الگوریتم GuASPSO دقیقاً مشابه همین موارد در الگوریتم استاندارد اصلی PSO هستند.

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

در الگوریتم GuASPSO، تعداد کلاسترها در تکرارهای اولیه الگوریتم زیاد است، به گونه‌ای که میزان برازندگی (تابع هدف) ذرات $Cbest$ ضریب تأثیر کمتری در هدایت ذرات در فضای جست‌وجو می‌یابد و در عوض تنوع ذرات مذکور، ضریب تأثیر بالایی دارد. به مرور تعداد کلاسترها کمتر می‌شوند و ذرات Pbest دارای برازندگی نامناسب، ولی به شدت مشابه یکدیگر، در کلاستر یکسانی جمع می‌شوند. در نتیجه، ضریب تأثیر شاخص تنوع ذرات، کمتر و ضریب تأثیر شاخص برازندگی، به مراتب بیشتر می‌شود. این فرایند می‌تواند به برقراری یک تعادل بسیار مناسب میان مراحل اکتشاف و استخراج کمک شایانی کند. نحوه کمک به برقراری این تعادل

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

$$\varphi_1 = c_1 r_1; \varphi_2 = c_2 r_2$$

که در آن، χ ضریب انقباض^{۱۳} نامیده می‌شود. پارامتر k در رابطه ۴ که همواره در محدوده $[0, 1]$ مقداردهی می‌شود، گذار الگوریتم PSO از مرحله اکتشاف^{۱۴} به مرحله استخراج^{۱۵} را کنترل می‌کند و براساس رابطه ۵ 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 0.9 و 0.4 در نظر گرفته می‌شوند. همچنین t شماره تکرار جاری الگوریتم و t_{max} بیشینه تعداد تکرارهای الگوریتم است. الگوریتم GuASPSO سعی در تغییر سازوکار مرسوم موجود در الگوریتم PSO دارد، به گونه‌ای 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)^{۱۶} به منظور محاسبه ذرات راهنمای منحصر به فرد Gbest اختصاصی به ذرات استفاده می‌شود. شبکه SOM از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی موسوم به لایه کوهن^{۱۷} تشکیل شده است. لایه خروجی می‌تواند تک - یا دو - بعدی باشد. به منظور توضیحات بیشتر پیرامون شبکه‌های SOM به نوشتار هایکین^{۱۸} (۲۰۰۹)، [۲۰] مراجعه شود. الگوریتم حاکم بر شبکه‌های SOM در اینجا تشریح شده است.^[۲۰] بردار ورودی یا الگوی ورودی به شبکه SOM به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

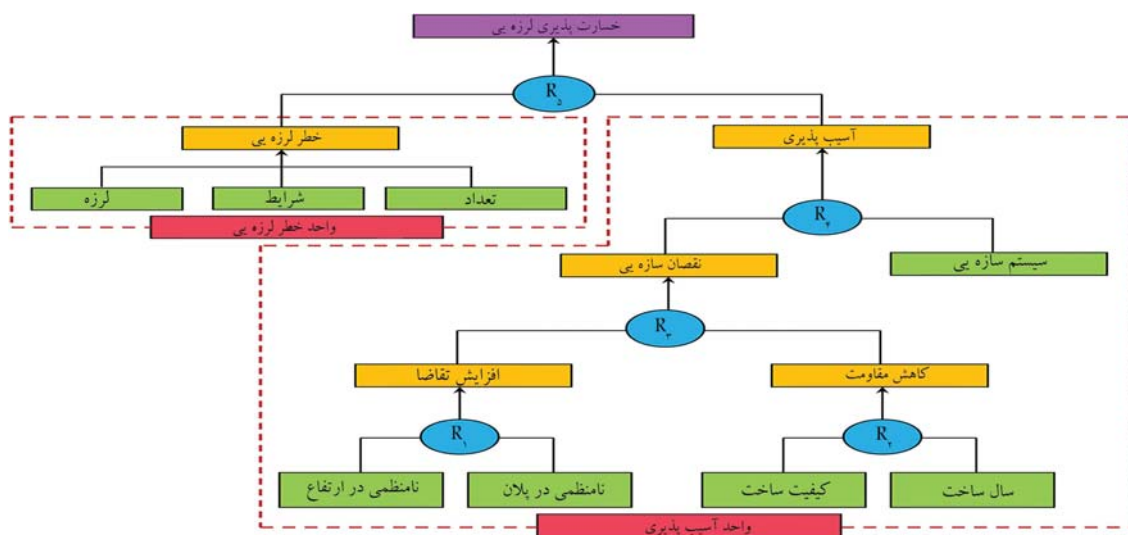
$$X = [x_1, x_2, \dots, x_D]^T \quad (6)$$

که در آن، D تعداد عناصر موجود در بردار ورودی X به شبکه است. بردارهای وزن مربوط به هر نرون در لایه خروجی از شبکه SOM به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شوند:

$$W_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{Di}]^T; i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

که در آن، W_i بردار وزن مربوط به نرون i ام در لایه خروجی است که عملاً یک خوشه (کلاستر) را نمایندگی می‌کند. همچنین D تعداد کل عناصر موجود در بردار وزن نرون‌ها و M تعداد کل نرون‌هاست (کلاسترها) مشابه هر نوع دیگری از شبکه‌های عصبی، شبکه عصبی SOM نیز باید به منظور یافتن قابلیت خوشه‌بندی (کلاستربندی) داده‌های ورودی به آن، ابتدا آموزش ببیند. در مرحله آموزش، تمامی الگوهای ورودی که در پژوهش حاضر، در حقیقت همان بردارهای موقعیت ذرات بهینه انفرادی‌ها (Pbest)ها هستند، به صورت یک به یک به شبکه اعمال می‌شوند. هر زمان که یک الگوی ورودی به شبکه SOM معرفی می‌شود، رقابتی میان نرون‌های شبکه در می‌گیرد، که در آن فاصله اقلیدسی میان بردار وزن هر نرون و بردار (الگو) ورودی محاسبه می‌شود و نرونی که حائز کمترین فاصله 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 (ذره Pbest) که کمترین فاصله و بیشترین تشابه را با آن داشته باشد، حرکت می‌کند. این حرکت مطابق رابطه ۸ 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 PI و VI 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 برگزیده‌ی سه حالت "poor"، "average" و "good" است که آن‌ها نیز در کالیبراسیون مدل، شکل کمی به خود می‌گیرند. سیستم سازه‌ی ساختمان نیز در مدل ذکر شده، شامل سه سیستم قاب خمشی (MRF)، قاب خمشی و دیوار برشی (سیستم دوگانه) (MSW) و قاب خمشی با دیوارهای ساخته شده از مصالح بتانی پُرکننده (MRFI) است که هر سه به نوبه‌ی خود در جریان آموزش مدل فازی به صورت بهینه تنظیم می‌شوند. همچنین چهار سیستم اول از سیستم‌های فازی پنج‌گانه‌ی R_1, R_2, R_3, 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 می‌گیرند. 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. نحوه‌ی عملکرد مدل منطق فازی در پیش‌بینی خسارت لرزه‌ی
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 سوگنو هستند، تالی‌های اخیر به صورت اعداد فازی منفرد (Singleton) در نظر گرفته شده‌اند و یک مجموعه‌ی فازی، در برگزیده‌ی 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 متناسب 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 استارام 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 تسفاماریام و ساعتچی‌اوغلو (۲۰۰۸)،^[۱] پیشنهاد شده است، جهت پیش‌بینی شاخص خسارت‌پذیری لرزه‌ی ساختمان‌های بتن‌آرمه استفاده شده است. مدل مذکور از ۵ سیستم قاعده - بنیاد فازی به نام‌های R_1, R_2, R_3, R_4 و R_5 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 لرزه‌ی سایت زلزله. واحد اول، عواقب ناشی از ویژگی‌های خود ساختمان در طراحی، مانند افزایش تقاضای لرزه‌ی (ID) و کاهش مقاومت در برابر زلزله (DR) را در نظر می‌گیرد، که این دو عامل نیز خود میزان نقصان سازه‌ی ساختمان (SD) در برابر بار زلزله را نشان می‌دهند. نامنظمی در پلان (PI) و نامنظمی در ارتفاع ساختمان (VI) از مهم‌ترین عواملی هستند که افزایش تقاضای لرزه‌ی 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 سازه‌ی ساختمان (SS) نیز به همراه نقصان سازه‌ی آن (SD) در شکل‌گیری پارامتری با عنوان شاخص آسیب‌پذیری ساختمان (I^{BV}) نقش دارند. آسیب‌پذیری ساختمان خروجی واحد اول از سیستم سلسله مراتبی فازی موردنظر در نوشتار حاضر است. اما در واحد دوم، خطر لرزه‌ی سایت زلزله (I^{SH}) مطرح است که خود تابعی از سه پارامتر لرزه‌خیزی سایت، شرایط سایت و تعداد طبقات ساختمان است. با توجه به این نکته که خطر لرزه‌ی سایت می‌تواند مستقیماً از طیف پاسخ ساختمان نیز به دست آید، این پارامتر طبق توصیه‌ی تسفاماریام و ساعتچی‌اوغلو (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.

۴.۲. کالیراسیون مدل منطق فازی

مدل منطق فازی، پیش‌بینی‌کننده‌ی سطح خسارت لرزه‌یی مانند هر مدل هوشمند داده - محور دیگری نیازمند کالیراسیون (آموزش) است. در مرحله‌ی کالیراسیون، تمام پارامترهای مجهول مدل، شامل ضرایب تبدیل پارامترهای مشاهداتی در روش RVS و نیز کل مقادیر کمّی 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)^[۱۸]، و گرگ خاکستری (GWO)^[۱۹] و نیز یک الگوریتم پیشرفته‌ی ازدحام ذرات با عنوان الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مبتنی بر جست‌وجوی تطبیقی هدایت‌شده (GuASPSo)^[۲۰] استفاده شده است. در پایان، نتایج آموزش مدل منطق فازی توسط هر سه الگوریتم بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه و الگوریتم برتر انتخاب شده است. کد نویسی هر سه الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب^{۱۹} (۲۰۱۸b) انجام شده است. در مجموع، ۷۲ ساختمان در سایت لرزه‌یی سرپل 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، کمینه‌سازی جذر میانگین مربعات خطای میان سطح خسارت محاسباتی توسط مدل فازی و مشاهداتی توسط روش RVS است، اصطلاحاً RMSE نامیده می‌شود. تابع هدف بهینه‌سازی و قیود مرتبط به شرح روابط ۲۱ الی ۲۵ است:

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

Subject to :

$$VI, PI: \circ_{\text{I}} \circ_{\text{I}} \setminus <'' no'' < \circ_{\text{I}} \circ_{\text{I}} \setminus; \circ_{\text{I}} \circ_{\text{I}} \setminus <'' yes'' < \circ_{\text{I}} \circ_{\text{I}} \setminus \quad (22)$$

$$CQ : \circ/\Delta \setminus <'' \textit{poor}'' < \circ/\textcircled{A};$$

$$\circ/\textcircled{A} \setminus <'' \textit{average}'' < \circ/\textcircled{B}; \circ/\circ \setminus <'' \textit{good}'' < \circ/\Delta \quad (23)$$

$$\begin{aligned} SS : \circ <'' MSW'' < \circ, \textcircled{25}; \circ, \textcircled{25} <'' MRFI'' < \circ, \textcircled{70}; \\ \circ, \textcircled{70} <'' MRF'' < \textcircled{1} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} ID, DR, SD, I^{BV} : \circ <'' L'' < \circ / \mathfrak{V} \mathfrak{D}; \\ \circ / \mathfrak{V} \mathfrak{D} <'' M'' < \circ / \mathfrak{V} \circ; \circ / \mathfrak{V} \circ <'' H'' < \circ / \mathfrak{V} \mathfrak{D} \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن‌ها، MSW ، $MRFI$ و MRF به ترتیب نشانگر سیستم‌های باربر لرزه‌یی قاب خمشی و دیوار برشی (سیستم دوگانه)، قاب خمشی به همراه دیوارهای مصالح بنایی پُرکننده و قاب خمشی هستند. همچنین N تعداد ساختمان‌ها در مجموعه‌ی آموزشی و I_{BD}^B و $I_{BD'}^B$ به ترتیب سطح خسارت مشاهداتی و محاسباتی برای زمین ساختمان از ۵° ساختمان موجود در مجموعه‌ی داده‌های آموزشی است.

از آنجایی که یک مدل پیش‌بینی‌کننده‌ی منطقی فازی باید در هر دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی، عملکرد قابل قبولی را از خود بروز دهد، باید به دنبال کمینه‌سازی $RMSE$ 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، کمینه‌سازی شود. از آنجا که میانگین هندسی برخلاف میانگین حسابی این قابلیت را دارد که هم میانگین و هم میزان شباهت متغیرهای میانگین‌گیری شده را به طور همزمان ارائه کند، در صورتی که میانگین هندسی دو عدد کمینه شود،

از غیرفازی‌ساز مرکز نقل استفاده شده است. به منظور روشن 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 مقدمه‌ها و نیز نحوه‌ی ترکیب مقدمه‌های مذکور در نوشتار تسفاماریام (۲۰۰۸)،^[۲۱] قابل مشاهده است.

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

$$\mathbf{R}_r : \text{If } I^{BV} \text{ is } \mathbf{VL} \text{ AND } I^{SH} \text{ is } \mathbf{L} \text{ THEN } I^{BD} = \setminus \quad (\mathbf{14})$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{r}} : \text{If } I^{BV} \text{ is } \mathbf{VL} \text{ AND } I^{SH} \text{ is } \mathbf{M} \text{ THEN } I^{BD} = \setminus \quad (\text{15})$$

$$\mathbf{R}_f : \text{If } I^{BV} \text{ is } \mathbf{VL} \text{ AND } I^{SH} \text{ is } \mathbf{H} \text{ THEN } I^{BD} = \mathfrak{Y} \quad (\mathfrak{A}\mathfrak{E})$$

$$\mathbf{R}_{\Delta}: \text{If } I^{BV} \text{ is } \mathbf{VL} \text{ AND } I^{SH} \text{ is } \mathbf{VH} \text{ THEN } I^{BD} = \mathfrak{Y} \quad (\mathbf{IV})$$

$$\begin{array}{cccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{R}_{\mathbf{r0}} : If\ I^{BV}\ is\ \mathbf{VH}\ AND\ I^{SH}\ is\ \mathbf{VH}\ THEN\ I^{BD} = \Delta & & & \end{array} \quad (\vee \wedge)$$

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 تشکیل همه‌ی ۲۵ قانون مذکور از پنجمین سیستم فازای مدل سلسله مراتبی فازای، روش غیرفازای‌ساز مرکز ثقل به صورت رابطه‌ی ۱۹ به محاسبه‌ی عدد نهایی سطح خسارت می‌پردازد:

$$I^{BD*} = \frac{\sum_{i=1}^{r_0} I_i^{BD} \times \mu_{C_i}(I_i^{BD})}{\sum_{i=1}^{r_0} \mu_{C_i}(I_i^{BD}) + \varepsilon} \quad (19)$$

که در آن، $\mu_{C_i}(I_i^{BD}) = \mu_{A_i}(I_i^{BV}) \times \mu_{B_i}(I_i^{SH})$ ، i شمارنده‌ی قوانین فازی است که از ۱ تا ۲۵ متغیر است. μ بیانگر درجه عضویت فازی است و A_i, B_i و C_i به ترتیب توابع عضویت فازی تعریف شده برای شاخص‌های I_i^{BV}, I_i^{BD} و I_i^{SH} هستند. I_i^{BD*} خروجی نهایی مدل سلسله مراتبی فازی و ε یک عدد مثبت بسیار کوچک است که برای جلوگیری از مخرج کسر I_i^{BD*} استفاده شده است. از آنجا که I_i^{BD*} در حالت کلی یک عدد حقیقی (اعشاری) است، در حالی که باید برابر کمیته‌ی گسسته، مانند: ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ یا به عنوان سطح خسارت لرزه‌یی باشد، بنابراین از رابطه‌ی ۲۰ جهت گسسته‌سازی I_i^{BD*} استفاده می‌شود:

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

که در آن، I_{dis}^{BD*} شاخص نهایی خسارت پذیری و با همان سطح خسارت لرزه‌ی محاسبه شده توسط مدل فازی است که در روابط آتی به اختصار I^{BD} نامیده می‌شود. محاسبات سایر سیستم‌های فازی پنج‌گانه نیز به طریقی مشابه صورت می‌گیرد، با این تفاوت که تالی سیستم‌های ذکر شده برخلاف سیستم R_0 ، یک کمیت مجهول است که خود طی فرایند کالیبراسیون (آموزش) مدل فازی محاسبه و تعیین می‌شود.

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

$$OPI = \sqrt[\frac{1}{W_1+W_2}]{\prod_{i=1}^N (RMSE_{max} - RMSE_i)^{W_i}} \quad (26)$$

$$= \left\{ (3 - RMSE_1)^{W_1} \times (3 - RMSE_2)^{W_2} \right\}^{1/(W_1+W_2)}$$

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، ۵۰ مرتبه، مجموعه‌هایی از داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به نسبت ۷۰٪ به ۳۰٪ انتخاب و پس از هر بار انتخاب دو مجموعه، ۵ مرتبه الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده است. همچنین در هر بار اجرای الگوریتم، فرایند بهینه‌سازی در ۱۰۰۰ تکرار و با ۳۰ عامل جست‌وجوگر به‌عنوان اندازه‌ی جمعیت الگوریتم انجام شده است. در مجموع، ۲۲ 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 شکل گرفته و آماده‌ی استفاده در فرایند شبیه‌سازی خسارت‌پذیری لرزه‌یی ساختمان‌هایی شده است که به لحاظ موقعیت جغرافیایی و نیز پارامترهای ورودی تقریباً در همان محدوده‌یی قرار دارند که پارامترهای مدل طراحی شده با اعمال داده‌های مربوط به آن بهینه می‌شوند.

۵.۲. معیارهای کارایی مدل منطق فازی

علاوه بر معیار بسیار معروف و شناخته‌شده‌ی $RMSE$ ، معیارهای دیگری نیز جهت ارزیابی کارایی مدل منطق فازی ایجاد شده وجود دارند که به صورتی کامل و جامع می‌توانند میزان قدرت نسبی یک مدل شبیه‌ساز را در تخمین خروجی موردانتظار از آن ارائه کنند که در روابط ۲۷ الی ۳۴ ارائه شده‌اند:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{I_i^{BD'} - I_i^{BD}}{I_i^{BD'}} \right| \quad (27)$$

$$RRMSE = \frac{1}{|I^{BD'}|} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - I_i^{BD})^2}{N}} \quad (28)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})(I_i^{BD} - \overline{I^{BD}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (I_i^{BD} - \overline{I^{BD}})^2}} \quad (29)$$

$$PI = \frac{RRMSE}{R + 1} \quad (30)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - I_i^{BD})^2}{\sum_{i=1}^N \left(\left| I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}} \right| + \left| I_i^{BD} - \overline{I^{BD}} \right| \right)^2} \quad (31)$$

$$SI_{obs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD'} - \overline{I^{BD'}})^2}{N}} \quad (32)$$

$$SI_{comp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{BD} - \overline{I^{BD}})^2}{N}} \quad (33)$$

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

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 پراکندگی سطوح خسارت مشاهداتی، SI_{comp} شاخص پراکندگی سطوح خسارت محاسباتی و DSI قدرمطلق تفاضل این دو شاخص هستند.^[۲۲] لازم به ذکر است که شاخص پراکندگی برابر نسبت انحراف معیار یک مجموعه داده به میانگین آن‌هاست. بنابراین، شاخص پراکندگی با حذف اثر مقیاس داده‌ها، میزان تنوع میان آن‌ها را در مقایسه با داده‌های دیگر به شکل منطقی‌تری منعکس می‌کند.

هر چه مقادیر معیارهای $MAPE$ و $RRMSE$ کوچک‌تر باشند، دقت مدل در پیش‌بینی سطح خسارت لرزه‌یی بیشتر خواهد بود و مقادیر بزرگ‌تر معیارهای R و d نیز بیانگر عملکرد بهتر مدل فازی هستند. همچنین، هر چه مقادیر معیارهای SI_{obs} و SI_{comp} بزرگ‌تر باشند، مجموعه‌های داده‌های مشاهداتی و محاسباتی متنوع‌ترند و بنابراین مدل فازی ایجاد شده را می‌توان با اطمینان بالاتری در شبیه‌سازی فرایندهای مشابه به کار گرفت. آخرین معیار، DSI است که هر چه کوچک‌تر باشد، به معنای تطابق بیشتر مجموعه‌های داده‌های مشاهداتی و محاسباتی و بالاتر بودن دقت مدل در شبیه‌سازی و تخمین خسارت لرزه‌یی است.

۳. مطالعه‌ی موردی

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 ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی با بزرگای گشتاوری ۷/۳ 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) ۲۰^۰ ثبت شده در سرپل ذهاب به میزان ۶۸۴ گال ۲۱ بوده و اغلب خسارت‌های شدید ساختمانی نیز در سرپل ذهاب رخ داده است. طی یک پروژه‌ی پژوهشی، به کمک روش ارزیابی سریع بصری (RVS)،^[۲۳] اغلب ساختمان‌های آسیب‌دیده در منطقه‌ی زلزله‌زده از جمله شهر سرپل ذهاب بررسی و میزان خسارت‌پذیری لرزه‌یی ساختمان‌های بتنی در شهر زلزله‌زده‌ی سرپل ذهاب، در پژوهش حاضر ارزیابی شده‌اند.

۴. نتایج و بحث

جهت آموزش مدل فازی پیش‌بینی‌کننده‌ی خسارت لرزه‌یی از دو الگوریتم شناخته‌شده‌ی بهینه‌سازی فراابتکاری ازدحام ذرات (PSO) و گرگ خاکستری (GWO) به همراه یک سویه‌ی جدید و پیشرفته از الگوریتم ازدحام ذرات (GuASPSO) استفاده شده است. طی فرایند آموزش مدل شبیه‌ساز فازی، که اصطلاحاً کالیبراسیون نیز خوانده می‌شود، پارامترهای داخلی مجهول مدل فازی همگی به صورت بهینه تعیین

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

معیارهای کارایی	الگوریتم‌ها			تفاوت (%)	
	GuASPSO	PSO	GWO	GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO
MAPE	۰/۱۷۱۳	۰/۱۶۲۰	۰/۱۸۳۷	۵/۷۴۱(-)	۶/۷۵(+)
RMSE	۰/۸	۰/۸۱۲۴	۰/۸۷۱۸	۱/۵۲۶۳(+)	۸/۲۳۵۸(+)
RRMSE	۰/۲۰۷۳	۰/۲۰۸۳	۰/۲۲۵۹	۰/۴۸۰۱(+)	۸/۲۳۳۷(+)
PI	۰/۱۲۸۳	۰/۱۳۴۳	۰/۱۴۶۴	۴/۴۶۷۶(+)	۱۲/۳۶۳۴(+)
R	۰/۶۱۵۲	۰/۵۵۱۱	۰/۵۴۲۴	۱۱/۶۳۱۳(+)	۱۳/۴۲۱۸(+)
d	۰/۵۷۴۷	۰/۴۹۹۱	۰/۵۱۱۰	۱۵/۱۴۷۳(+)	۱۲/۴۶۵۸(+)
SI_{obs}	۰/۲۰۹۴	۰/۱۸۸۶	۰/۲۰۲۸	۱۱/۰۲۸۶(+)	۳/۲۵۴۴(+)
SI_{comp}	۰/۲۴۶۰	۰/۲۳۹۱	۰/۲۶۱۸	۲/۸۸۵۸(+)	۶/۰۳۵۱(-)
DSI	۰/۰۳۶۶	۰/۰۵۰۵	۰/۰۵۹۰	۲۷/۵۲۴۸(+)	۳۷/۹۶۶۱(+)

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

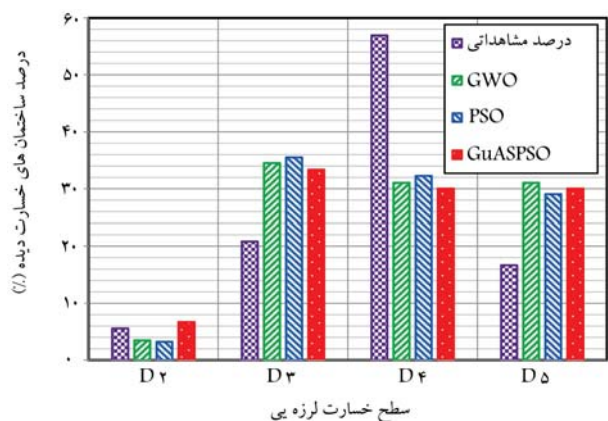
معیارهای کارایی	الگوریتم‌ها			تفاوت (%)	
	GuASPSO	PSO	GWO	GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO
MAPE	۰/۱۴۵۵	۰/۱۷۴۲	۰/۱۷۴۲	۱۶/۴۷۵۳(+)	۱۶/۴۷۵۳(+)
RMSE	۰/۳۸۱۴	۰/۴۱۷۴	۰/۴۱۷۴	۸/۶۲۴۸(+)	۸/۶۲۴۸(+)
RRMSE	۰/۰۹۹۹	۰/۱۱۲۰	۰/۱۰۹۳	۱۰/۸۰۳۶(+)	۸/۶(+)
PI	۰/۰۶۲۰	۰/۰۷۰۲	۰/۰۷۵۶	۱۱/۶۸۰۹(+)	۱۷/۹۸۹۴(+)
R	۰/۶۱۱۹	۰/۵۹۵۶	۰/۴۴۵۹	۲/۷۳۶۷(+)	۳۷/۲۲۸۱(+)
d	۰/۴۸۱۱	۰/۶۱۷۱	۰/۵۱۸۹	۲۲/۰۳۸۶(-)	۷/۲۸۴۶(-)
SI_{obs}	۰/۱۷۴۰	۰/۲۲۱۹	۰/۱۹۱۹	۲۱/۵۸۶۳(-)	۹/۳۲۷۸(-)
SI_{comp}	۰/۲۵۶۳	۰/۲۵۰۹	۰/۲۴۳۵	۲/۱۵۲۳(+)	۴/۴۸۴۳(+)
DSI	۰/۰۸۲۳	۰/۰۲۹۰	۰/۰۵۱۶	۱۸۳/۷۹۳۱(-)	۵۹/۴۹۶۱(-)

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

معیارهای کارایی	الگوریتم‌ها			تفاوت (%)	
	GuASPSO	PSO	GWO	GUAPSO vs.PSO	GUAPSO vs.GWO
MAPE	۰/۱۶۳۴	۰/۱۶۵۷	۰/۱۸۰۸	۱/۳۸۳۸۱(+)	۹/۶۲۳۹(+)
RMSE	۰/۴۰۴۳	۰/۴۰۷۱	۰/۴۲۵۲	۰/۶۸۷۸(+)	۴/۹۱۵۳(+)
RRMSE	۰/۱۰۵۱	۰/۱۰۵۸	۰/۱۱۰۵	۰/۶۶۱۶(+)	۴/۸۸۶۹(+)
PI	۰/۰۶۵۲	۰/۰۶۷۵	۰/۰۷۲۹	۳/۴۰۷۴(+)	۱۰/۵۶۲۴(+)
R	۰/۶۱۲۰	۰/۵۶۷۸	۰/۵۱۶۰	۷/۷۸۴۴(+)	۱۸/۶۰۴۷(+)
d	۰/۵۵۲۲	۰/۵۴۴۰	۰/۵۱۴۰	۱/۵۰۷۴(+)	۷/۴۳۱۹(+)
SI_{obs}	۰/۱۹۸۳	۰/۱۹۸۳	۰/۱۹۸۳	۰(≈)	۰(≈)
SI_{comp}	۰/۲۴۷۷	۰/۲۴۱۵	۰/۲۵۴۶	۲/۵۶۷۳(+)	۲/۷۱۰۱(-)
DSI	۰/۰۴۹۴	۰/۰۴۳۲	۰/۰۵۶۳	۱۴/۳۵۱۹(-)	۱۲/۲۵۵۸(+)

همچنین ۹ معیار کارایی بیشتر ذکر شده جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های منطق فازی در پیش‌بینی خسارت‌پذیری لرزه‌ی 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. در جدول‌های ۱ الی ۳، علائم (+)، (-) و (≈) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی برتری، عدم برتری و تساوی الگوریتم پیشرفته‌ی GuASPSO در مقایسه با دو

شده‌اند. پارامترهای ذکر شده شامل کمیت‌های مبهم منتسب به متغیرهای زبانی: ۱. نامنظمی در ارتفاع (VI)؛ ۲. نامنظمی در پلان (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)^[۲۴] تعیین شده‌اند؛ ۵. سیستم باربر لرزه‌ی ساختمان (SS)؛ ۶. شاخص خطر لرزه‌ی 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 GuASPSO 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^{۲۳} در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج این تحلیل نیز حاکی از برتری مطلق مدل فازی آموزش‌دیده با الگوریتم GuASPSO بر مدل‌های کالیبره‌شده 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 عمده‌ی 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 دقیق‌تر سازی فرایند شبیه‌سازی 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 منطقه‌ی سرپل‌دهاب رخ داده در سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. در نوشتار حاضر، به منظور آموزش مدل فازی استفاده شده از سه الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ خاکستری (GWO)، ازدحام ذرات (PSO) و یک الگوریتم جدیداً پیشنهاد شده با عنوان الگوریتم ازدحام

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

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = 72
D2	0	1	2	1	D2
D3	0	4	10	1	D3
D4	16	9	13	3	D4
D5	9	3	0	0	D5
دقت (%)	36	52/94	40	20	

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

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = 72
D2	0	1	2	1	D2
D3	0	3	11	1	D3
D4	17	10	13	1	D4
D5	9	3	0	0	D5
دقت (%)	34/62	58/82	42/31	33/33	

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

خسارت محاسباتی					
حساسیت (%)	D5	D4	D3	D2	N = 72
D2	0	1	1	2	D2
D3	0	3	10	2	D3
D4	19	9	13	0	D4
D5	9	3	0	0	D5
دقت (%)	32/14	56/25	41/67	50	

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

الگوریتم	متوسط دقت (%)	متوسط (%)
GWO	37/24	41/16
PSO	42/27	49/43
GuASPSO	45/02	53/41

الگوریتم بهینه‌ساز دیگر هستند. بهترین معیار کارایی مربوط به مدل فازی در هر یک از جدول‌های مذکور با اندازه‌ی درشت^{۲۲} (پررنگ‌تر) 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 مدل های مختلف فازی در سه مرحله طراحی مدل ها.

مرحله	الگوریتم ها			تفاوت (%)	
	GuASPSO	PSO	GWO	GUAPSO vs. PSO	GUAPSO vs. GWO
آموزش	۰/۸۱۶۶	۲/۰۷۵۰	۲/۶۰۹۶	۶۰/۶۴۶۷(+)	۶۸/۷۰۷۷(+)
اعتبارسنجی	۱/۷۳۲۱	۱/۸۸۴۴	۲/۵۸۹۲	۸/۰۸۵۸(+)	۳۳/۱۰۴۴(+)
کل	۰/۷۰۸۲	۱/۱۸۴۳	۲/۶۴۵۸	۴۰/۱۹۹۰(+)	۷۳/۲۳۲۵(+)

جدول ۹. پارامترهای داخلی محاسبه شده ی مدل منطق فازی (متغیرهای تصمیم بهینه شده توسط الگوریتم های مختلف بهینه سازی).

پارامترهای کالیبره شده	الگوریتم آموزش مدل فازی		
	GuASPSO	PSO	GWO
$VI(no)$	۰/۳۹۵۸	۰/۲۵۹۵	۰/۰۱۳۳
$VI(yes)$	۰/۷۹۳۵	۰/۵۰۰۹	۰/۵۴۳۹
$PI(no)$	۰/۳۰۴۵	۰/۴۲۲۴	۰/۳۷۱۵
$PI(yes)$	۰/۶۷۶۷	۰/۶۷۲۷	۰/۷۶۸۲
$CQ(poor)$	۰/۸۸۹۱	۰/۷۸۱۲	۰/۹۹
$CQ(average)$	۰/۶۳۸۶	۰/۲۸۵۴	۰/۷۱۵۷
$CQ(good)$	۰/۱۵۲۶	۰/۱۲۷۵	۰/۲۴۴۰
$SS(MSW)$	۰/۲۱۹۲	۰/۰۳۷۳	۰/۰۱۳۸
$SS(MRFI)$	۰/۴۱۲۸	۰/۶۴۳۸	۰/۴۲۳۵
$SS(MRF)$	۰/۷۴۷۹	۰/۸۸۴۵	۰/۷۶۵۲
$R_1(L)$	۰/۱۷۰۳	۰/۲۰۹۹	۰/۲۵
$R_1(M)$	۰/۴۹۲۲	۰/۵۴۹۶	۰/۶۲۷۶
$R_1(H)$	۰/۸۳۳۴	۰/۷	۰/۸۹۹۱
$R_2(L)$	۰/۱۳۲۸	۰/۲۴۸۹	۰/۰۳۳۰
$R_2(M)$	۰/۶۱۷۵	۰/۷	۰/۵۰۲۲
$R_2(H)$	۰/۹۴۱۸	۰/۹۳۲۱	۱
$R_3(L)$	۰/۰۸۱۱	۰/۰۵۷۴	۰/۱۴۶۷
$R_3(M)$	۰/۳۶۴۵	۰/۴۰۵۴	۰/۴۰۵۹
$R_3(H)$	۰/۷۸۱۰	۰/۹۲۴۵	۰/۷۱۶۲
$R_4(L)$	۰/۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۶۹
$R_4(M)$	۰/۳۳۴۰	۰/۲۶۵۲	۰/۲۷۴۸
$R_4(H)$	۰/۷۸۵۶	۰/۹۰۰۵	۰/۸۱۲۵

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 بهینه سازی بزرگ - مقیاس استاندارد و نیز در حل دو مثال کاربردی دیگر نشان داده بود، نتایج نوشتار حاضر می تواند بر اعتبار الگوریتم GuASPSO در حل انواع مسائل بهینه سازی بیافزاید. از این روستفاده از الگوریتم GuASPSO در حل سایر انواع مسائل طراحی مهندسی نیز توصیه می شود.

ذرات مبتنی بر جست و جوی تطبیقی هدایت شده (GuASPSO) استفاده شده است.

جهت ارزیابی کارایی هر یک از مدل های 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 ی: آموزش، اعتبارسنجی و در کل مجموعه ی داده ها، عملکرد کاملاً مناسب تری را در مقایسه با دو الگوریتم شناخته شده ی دیگر از خود نشان داده است. نتایج یک تحلیل چندمعیاره نیز حاکی از برتری

پانویس ها

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., Umamo, 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 optimization. 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 sarpol-e 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 قربانزاده (دانشجوی دکتری)

پیمان همایی* (استادیار)

محسن شهروزی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف (پیاو ۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۸۱-۹۱ (پژوهشی)

روش مرتبه‌ی اول هاسفر لین - راکویتر فیسار به شکل گسترده‌ی در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها استفاده شده است. با این حال، مرتبه‌ی بالای غیرخطی بودن تابع حالت حدی می‌تواند به ناپایداری 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 مربعات برای حل یک مسئله‌ی 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 مربعات از طریق گسسته‌سازی‌های پایدار برای ماتریس همسان جابجین می‌کند و همواره یک حل پایدار را نتیجه می‌دهد. بعد از دستیابی به پاسخ در مرحله‌ی خطی‌سازی، روش میانگین موردانتظار احتمالاتی با در نظر گرفتن ماتریس همسان و فضای دوران‌یافته استفاده شده است. تا دقت محاسباتی پاسخ به دست آمده را به دقتی نزدیک به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو اصلاح کند.

st.d.mehrshad.ghorbanzadeh@khu.ac.ir
homami@khu.ac.ir
shahruzi@khu.ac.ir

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد سازه‌ها، احتمال شکست، بهینه‌سازی عددی، احتمال موردانتظار، برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات.

۱. مقدمه

و ترکیب روش مونت‌کارلو با روش رویه‌ی پاسخ برای تحلیل سد بتنی قوسی در مطالعه‌ی پورامیان و اکرانژاد (۲۰۲۱)، اشاره کرد.^[۹] 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 یا مسائل دارای احتمال شکست کوچک، ناکارآمد محسوب می‌شوند.^[۱۰-۱۳] 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. در بین روش‌های مبتنی بر تکرار، روش تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد (FORM)^۱ شناخته شده و پرکاربردترین روش محسوب می‌شود.^[۱۴-۱۷]

تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد (FORM)، شامل بسط مرتبه‌ی اول تیلور از رویه‌ی حالت حدی یا یک اُبر سهمی 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 در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرهای تصادفی، امری دشوار و در مواقعی ناممکن می‌شود.^[۱۸] روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نمونه‌گیری، اهمیت جابجین‌های معرفی شده‌ی انتگرال‌گیری مستقیم جهت تعیین احتمال شکست هستند.^[۲-۷] 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 راه‌گذر و همکاران (۲۰۲۱)، برای کاهش خسارت ناشی از بارگذاری جانبی لرزه‌ی برای سازه‌های فولادی،^[۸]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2022.61036.3138

استناد به این مقاله:

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

نخستین بار توسط هاسفرو لین^۲ (۱۹۷۴)، معرفی شده است. راکویتز و فیسلر^۳ (۱۹۷۸)، روش هاسفرو 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 مشکل ساز است. ژانگ و کورگیان^۴ (۱۹۹۵)، و ساتوس^۵ و همکاران (۲۰۱۲)،^[۲۱] بعدها روش‌های اصلاح شده‌ی iHLRF و nHLRF را معرفی کردند که با بکارگیری قانون آرمیو، مقادیر مناسبی را برای اندازه‌ی جهت در هر گام به‌دست می‌آوردند، تا پایداری بهتری برای حل مسئله تأمین شود. تعیین اندازه‌ی جهت مذکور با مشاهده‌ی تغییرات به‌وجود آمده بر روی تابع برازندگی یا تابع لاگرانژین حاکم بر مسئله‌ی بهینه‌سازی در هر گام به‌دست می‌آید. این اصلاحات تا حدود زیادی مشکل پایداری نسخه‌ی ابتدایی روش تحلیل مرتبه‌ی اول را اصلاح کرده‌اند، اما تعداد زیاد مراحل محاسباتی در مسائل دارای پیچیدگی شدید و نرخ پایین سرعت همگرایی در روش‌های مذکور باقی مانده است. روش تبدیل پایدار (STM)^۶ روش دیگری برای حل ناپایداری روش HLRF است، که توسط یانگ معرفی شده و براساس تئوری کنترل آشفتگی بوده است. روداک^۷ و همکاران (۲۰۱۸)، نسخه‌ی تطبیقی روش STM را به منظور جلوگیری از تعداد تکرارهای زیاد در روش STM توسعه داده‌اند.^[۲۲]

منگ^۸ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۲۳] توسعه‌ی روش STM را ادامه 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^۹ و همکاران (۲۰۱۱)، توسعه یافته و یک پارامتر جدید برای کنترل اندازه‌ی گام در آن معرفی شده است. روش FSL، مستقل از تابع برازندگی 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^{۱۰} (۲۰۱۷)، ترکیبی از دو روش FSL و جست‌وجوی جهت مزدوج را استفاده و روش CFSL معرفی کرده است،^[۲۵] که پیشرفته‌ترین 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 برابری نیز در نظر گرفته شود، که در این حالت روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی، گزینه‌های مناسب برای تعیین پاسخ مسئله محسوب می‌شوند. روش‌های تصویرگردایان (GP)، روش اگمنت لاگرانژ (ALM) و روش برنامه‌ریزی توالی مربعات (SQP)، روش مرتبه‌ی اول مبتنی بر جست‌وجوی مزدوج با گام‌های تطبیقی،^[۲۶] نمونه‌هایی از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی هستند.^[۲۷] روش SQP، یک روش شناخته شده مبتنی بر گردایان در بین روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی عددی است که روش‌های زیادی با توجه به آن توسعه یافته‌اند.^[۲۸-۳۰] روش برنامه‌ریزی توالی کمیته‌ی مربعات (SLSQP)، یکی از روش‌های توسعه‌یافته‌ی مذکور با نرخ سریع همگرایی از مرتبه‌ی خطی است. قواعد روش SLSQP توسط شیتکوفسکی^{۱۱} (۱۹۸۲) ارائه شده،^[۳۱] و کرافت^{۱۲} (۱۹۸۸)، الگوریتم آن را برای یک بهینه‌سازی در علوم هوافضا به کار گرفته است.^[۳۲]

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 برازندگی نرم L_1 امکان‌پذیر است. این الگوریتم بهینه‌سازی، مسئله‌ی بهینه‌سازی اولیه را به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یافتن کمترین فاصله که از دامنه‌ی پایین محدود است،

تبدیل می‌کند و پاسخ آن را با سرعت بالایی از دیدگاه همگرایی نتیجه می‌دهد. در نوشتار حاضر، رویه‌سازی روش SLSQP برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها و ترکیب آن با روش میانگین موردانتظار احتمال شکست مدنظر قرار گرفته است تا توسط آن روشی جامع برای حل مسائل قابلیت اعتماد سازه‌ها در دسترس باشد که در کنار نرخ سریع همگرایی با دقت محاسباتی مشابه روش‌های نمونه‌گیری را نتیجه دهد. بدین منظور، علاوه بر روش بهینه‌سازی، روش ساده‌ی میانگین موردانتظار احتمال شکست با در نظر گرفتن ماتریس هسیان به‌دست 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 موردانتظار نوشتار حاضر ارائه شده است. در بخش سوم، روش کاهش و کنترل خطای روش بهینه‌سازی بررسی شده است؛ و در بخش چهارم، مثال‌های چالشی به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی و مقایسه بین نتایج حل روش پیشنهادی و روش سایر پژوهشگران ارائه شده است.

۲. رویه‌سازی برنامه‌ریزی توالی کمیته‌ی مربعات برای

تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها

برنامه‌ریزی توالی کمیته‌ی 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 برابری مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:^[۳۰]

$$\begin{cases} \min & f(x) = \sigma / \delta \|x\|^2 \\ \text{subject to} & G(x) = \sigma \end{cases} \quad (1)$$

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 برابری G دارای مشتق مرتبه‌ی دوم پیوسته در نقطه‌ی طراحی هستند. در روش ذکر شده، تبدیل مسئله‌ی عمومی بهینه‌سازی رابطه‌ی ۱ به مسئله‌ی بهینه‌سازی با فرمت SQP، اولین گام محسوب می‌شود؛ که شامل یک تابع هدف مربعی شده و قید خطی‌سازی شده مطابق رابطه‌ی ۲ خواهد بود:

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

که در آن، $\nabla f(x_k)$ و $\nabla G(x_k)$ به ترتیب برابر با بردارهای گردایان تابع هدف و تابع حالت حدی نسبت به متغیر x ، d_k بردار جهت گام و B_k ماتریس هسیان متناظر با تابع لاگرانژین 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، λ ضریب لاگرانژین است. با برابر صفر قرار دادن گردایان تابع لاگرانژین که در رابطه‌ی ۴ ارائه شده است، معادله‌ی موردنظر برای تعیین ضریب لاگرانژین به‌دست می‌آید:

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

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 معرفی شده است که در آن z همواره مثبت باشد و روش حل آن، استفاده از روش کمینه‌ی مربعات غیرمنفی ($nmls$) است. [۲۳] 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 کنترل تابع برازندگی صورت می‌پذیرد. تابع برازندگی یا فیلتر در مسئله‌ی بهینه‌سازی اخیر از ترکیب تابع هدف و قید برابری تشکیل شده است، که در ادبیات فنی به تابع برازندگی L_1 معروف است و در رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است:

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

گاردیان تابع برازندگی مطابق رابطه‌ی ۱۵، جهت کنترل کاهش تابع برازندگی در گام‌های حل مسئله استفاده می‌شود:

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

این کنترل به صورت رابطه‌ی نابرابری 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 ۰/۵ است و پارامتر c مطابق رابطه‌ی ۱۷ تعیین می‌شود:

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

که در آن، $\gamma = ۲$ و $\eta = ۱۰$ 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 ۰ و ۱ است، که معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر k ، نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی تکرار جاری است که از مقدار ۰ شروع می‌شود و در صورت عدم برقراری رابطه‌ی ۱۶، با اضافه شدن مقدار واحد به آن تا یک مقدار بیشینه‌ی از پیش تعیین شده، اندازه‌ی جهت مناسب تعیین می‌شود. به این ترتیب با استفاده از رابطه‌ی تکرار جست‌وجوی 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 لاگرانژین با استفاده از روش کمینه‌ی مربعات، مطابق رابطه‌ی ۵، تعیین می‌شود. در صورت معکوس‌پذیر نبودن عبارت داخل براکت در رابطه‌ی ۵، بکارگیری گسسته‌سازی QR و ترکیب آن با روش کمینه‌ی مربعات جهت تعیین ضریب لاگرانژین استفاده می‌شود:

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

همچنین علت اصلی نام‌گذاری این روش بهینه‌سازی، استفاده از روش کمینه‌ی مربعات برای تعیین ضریب لاگرانژین 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_0 در اولین گام به کار گرفته می‌شود. به این ترتیب رابطه‌ی بهینه‌سازی ۲ به یک مسئله‌ی کمینه‌ی مربعات قابل تبدیل است. به این منظور ابتدا نیاز است تا ماتریس هسیان با گسسته‌سازی $L D L^T$ ، مطابق رابطه‌ی ۹ بازنویسی شود:

$$B = L D L^T \quad (9)$$

که در آن، L ماتریس پایین‌مثلثی 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، $D^{1/2} = \text{diag}(\sqrt{\delta_1}, \dots, \sqrt{\delta_n})$ طوری تعریف شده است که از مثبت و معین بودن ماتریس هسیان اطمینان حاصل شود و پارامتر δ_i برابر با λ_{\min} 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:

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

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:

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

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 گرادیان تابع هدف: $\nabla f(x_k)$ و گرادیان تابع حالت حدی: $\nabla G(x_k)$;
۵. تعیین ضریب لاگرانژین λ به وسیله روش کمینه‌ی مربعات;
۶. محاسبه‌ی B_k به وسیله روش BFGS (انتخاب ماتریس همانی در گام اول);
۷. به‌دست آوردن جهت گام d_k به وسیله حل مسئله‌ی بهینه‌سازی کمینه‌ی فاصله;
۸. اگر $|\nabla f^T(x_k)| + \lambda |G(x_k)| < tol$ تمام فرایند و چاپ نتایج.
در غیر این صورت:
۹. به‌روزرسانی جهت گام با تابع برازندگی و اندازه‌ی جهت s_m ;
۱۰. محاسبه 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 $|f_{k+1} - f_k| < tol$ تمام فرایند و چاپ نتایج.
در غیر این صورت:
۱۳. مقداردهی $k = k + 1$;
۱۴. اگر $k > k_{max}$ تمام فرایند و چاپ نتایج.
در غیر این صورت:
۱۵. بازگشت به مرحله‌ی ۴ و تکرار چرخه.

که در آن، P_f مقدار دقیق احتمال شکست، \bar{P}_f مقدار احتمال شکست به‌دست آمده از یک روش تقریبی مانند روش مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد و ξ خطای تقریبی محاسبات است. ترم خطا در رابطه‌ی ۲۲ می‌تواند دقیق، بالادست یا پایین‌دست تخمین زده شود که به ترتیب برابر با حالت‌های $\xi = 0$ ، $\xi < 0$ و $\xi > 0$ است. براساس قانون میانگین موردانتظار، رابطه‌ی ۲۲ به صورت رابطه‌ی ۲۳ بازنویسی می‌شود:

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

که در آن، μ_g مقدار میانگین خطای تقریبی است. اگر تخمین خطا توسط رابطه‌ی اخیر، نازیب باشد؛ آنگاه ترم $E(\bar{P}_f)$ ، یک تخمین دقیق از احتمال شکست را نتیجه می‌دهد. به طور خلاصه، اگر میانگین خطای تقریبی برابر با صفر باشد، میانگین مورد انتظار احتمال شکست به‌دست آمده به‌وسیله‌ی یک روش مبتنی بر جست‌وجوی تحلیل قابلیت اعتماد می‌تواند مطابق رابطه‌ی ۲۴ به‌دست بیاید:

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

که در آن، β_1 و β_2 مقدار فاصله‌ی تابع حالت حدی برای هر نمونه در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو نسبت به مقدار میانگین مورد انتظار هستند. به‌منظور یافتن پاسخ رابطه‌ی ۲۴، نیاز به حل دو مسئله است.

اولین مسئله، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای تعیین اندازه‌ی باقیمانده‌ی هر نمونه در راستای بردار اهمیت تا رویه‌ی حالت حدی است، که در رابطه‌ی ۲۵ 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 α بردار اهمیت است که خروجی یک تحلیل مرتبه‌ی اول قابلیت اعتماد است و از نسبت گرادیان تابع حالت حدی به اندازه‌ی این بردارگرادیان به‌دست می‌آید. پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی مذکور، فاصله‌ی بین نمونه‌ی بررسی شده تا نقطه‌ی بی روی حالت حدی ($G = 0$)، 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 استاندارد نرمال است.

مسئله‌ی دوم، یک مسئله‌ی ریشه‌یابی ساده است (مطابق رابطه‌ی ۲۶) که هدف از حل آن، تعیین فاصله بین موقعیت تصویرسازی شده‌ی نمونه‌ی مورد بررسی بر روی رویه‌ی حالت حدی تا خطی است که مرکز مختصات را قطع می‌کند و موازی با خطی‌سازی تابع حالت حدی در نقطه‌ی طراحی به‌دست آمده از روش مبتنی بر جست‌وجوی 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 جست‌وجو 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 مورد نیاز 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.^[۲۵] در روش کاهش ابعاد مبتنی بر ماتریس هسیان، نمونه‌های تولید شده در راستاهای اصلی حول نقطه‌ی طراحی

که عبارت اول در رابطه‌ی اخیر، نمایانگر بیشینه‌ی کاهش به‌دست آمده برای تابع هدف در جهت بردارگرادیان است و عبارت دوم آن، مقدار قید حاکم بر مسئله‌ی بهینه‌سازی است که توسط ضریب لاگرانژین به‌دست آمده در هرگام حل مسئله، وزندهی می‌شود. رابطه‌ی ۲۰ بیان می‌کند که اگر مقدار کاهش در تابع هدف و قید مسئله از مقدار از پیش تعیین‌شده‌ی tol کمتر باشد، الگوریتم به همگرایی دست یافته است. معیار دوم در کنترل همگرایی مطابق رابطه‌ی ۲۱ بیان می‌شود:

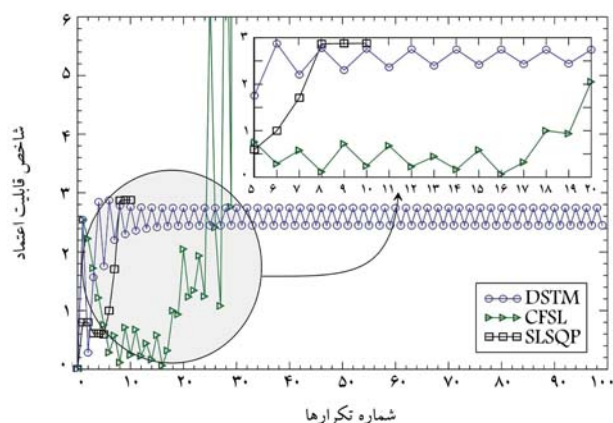
$$|f_{k+1} - f_k| < tol \quad (21)$$

این معیار جهت جلوگیری از ادامه‌ی تکرارها در صورت تغییرات ناچیز در تابع حالت حدی است. مقدار tol در مطالعه‌ی حاضر برابر با 10^{-5} در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، مراحل موردنیاز برای برنامه‌ریزی توالی کمینه‌ی مربعات به طور خلاصه ارائه شده است.

۳. میانگین موردانتظار احتمالاتی با ماتریس هسیان

اخیراً، رشکی (۲۰۲۱)،^[۲۴] به منظور بهبود دقت روش تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها، روشی براساس تئوری شک ارائه کرده است (مطابق رابطه‌ی ۲۲) 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. تاریخچه تکرارها برای مثال ۱.

شده و مقدار ضریب کنترل $0.1/^\circ$ برای روش DSTM، مقدار اندازه‌ی گام و ضریب تطبیقی برای روش CFSL به ترتیب برابر 5° 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 به‌دست آمده با استفاده از روش‌های SORM و مونت‌کارلو (MCS)، نیز به‌وسیله‌ی $10^6 \times 1$ 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 به‌وسیله‌ی نرم‌افزار BI هستند که یک نرم‌افزار تحت ویندوز برای تحلیل‌های قابلیت اعتماد سازه‌هاست و توسط نویسندگان نوشتار حاضر توسعه یافته است که در آدرس 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 ۲۷ است.^[۳۶،۳۸]

$$G(X) = X_1 - 1.7X_2 + 1.5(X_1 + 1.7X_2)^2 + 5 \quad (27)$$

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 نتیجه داده و در ادامه‌ی روند حل مسئله به دلیل نیافتن اندازه‌ی گام‌های مناسب، موفقیتی برای اصلاح پاسخ به‌دست 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 $(1/5264, -2/4408)$ است.

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 توسعه‌یافته نیز حل شده است. براساس نوشتار یانگ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۳۶] پاسخ روش مذکور با 2852 فراخوانی تابع حالت حدی با استفاده از روش iHLRF برابر با $2/8787$ و نتیجه‌ی مشابه با روش STM بوده

تولید می‌شوند، که این امر در کاهش خطا و حجم محاسبات بسیار مؤثر واقع می‌شود. کاهش خطا 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 (N تعداد متغیرهای تصادفی در مسئله)، محاسبه شود. روش گرام اشمیت برای تعیین ماتریس دوران استفاده می‌شود، با این تفاوت که ورودی آن، که ماتریس هسیان در فضای U است، نیاز به محاسبه‌ی مجدد ندارد و ماتریس هسیان مذکور به‌عنوان خروجی روش SLSQP در دسترس است. به این ترتیب بعد از تولید نمونه‌های مورد نیاز 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 $V_i = \{0, \dots, v_i, \beta\}$ هستند و مختصات نقطه‌ی طراحی به‌دست آمده از روش SLSQP نیز به صورت $V^* = \{0, \dots, 0, \dots, \beta\}$ است. این بدان معناست که سطوح ماتریس دوران R ، عمود بر بردار اهمیت به‌دست 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.

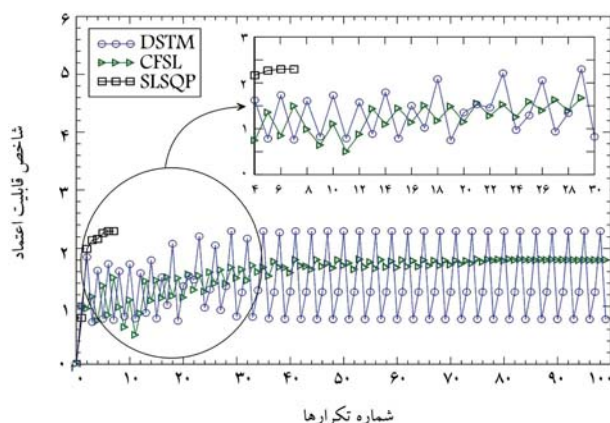
با داشتن محورهای اصلی در نقطه‌ی طراحی می‌توان نمونه‌های مورد نیاز را به روش مربع - گاوسی تولید کرد و به صورت نمونه‌سازی خطی در هر جهت به حل مسئله پرداخت. نکته‌ی مهم در این زمینه برای مسائلی است که دارای شعاع انحناء متفاوت در طرفین نقطه‌ی طراحی هستند، که برای این مسائل می‌توان با انتقال نمونه‌ها بر روی 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، ترکیبی از دو روش بیان شده در قسمت‌های پیشین است. در روش SLSQP-PE، ابتدا نقطه‌ی طراحی با استفاده از روش SLSQP که دارای نرخ 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 نمونه حول نقطه‌ی طراحی تولید خواهد شد که آن‌ها با استفاده از روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی و حرکت در جهت محورهای اصلی و کاهش به‌دست 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 به‌دست 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 DSTM و CFSL که برای مقابله با غیرخطی بودن تابع حالت حدی توسعه‌یافته و پیش‌تر توضیح داده شده‌اند، مقایسه شده است. به منظور آماده‌سازی دو روش مذکور جهت مقایسه‌ی نتایج، از تنظیمات ارائه شده در نوشتارهای یانگ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۳۶] و روداک و کرم‌لو (۲۰۱۹)^[۳۷] استفاده

جدول ۲. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۱.

روش	β	P_f	تکرارها	فراخوان تابع
DSTM	—	—	—	—
CFSL	—	—	—	—
SORM	۳/۳۳۰	۰/۰۰۰۴۳۴	—	۶ + Hessian
SLSQP	۲/۸۷۸	۰/۰۰۰۲۰۰۱	۶	۶
SLSQP-PE	۳/۳۴۰	۰/۰۰۰۰۴۱۸	۶ + ۹	۶ + ۹
MCS	۳/۳۳۹	۰/۰۰۰۰۴۲۰	۱۰۶	۱۰۶



شکل ۳. تاریخچه‌ی تکرارها برای مثال ۲.

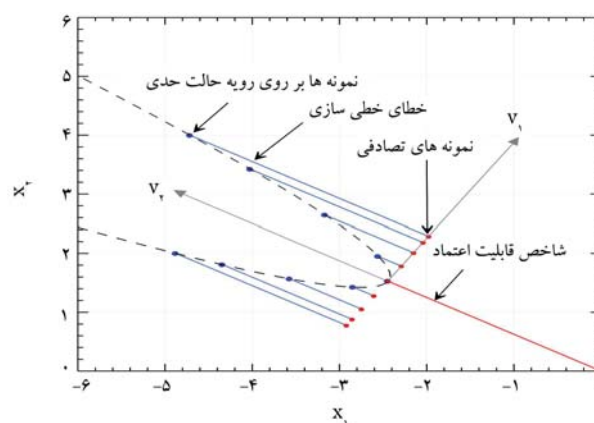
رابطه‌ی (۲۸) در نظر گرفته شده است. [۴۰، ۳۷، ۲۴]

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

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 به‌دست آمده 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 (۲۰۱۷)، [۴۱] روش گنگ (۲۰۱۱)، [۴۲] روش پیشنهادی گنگ و همکاران (۲۰۱۴)، [۴۳] روش‌های ذکر شده، توانایی مقابله با غیرخطی بودن تابع حالت حدی را داشته‌اند، اما تلاش محاسباتی آن‌ها، به‌میزان کمینه 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 به‌دست آمده است. مشابه مثال ۱، مثال ۲ از دو متغیر تصادفی تشکیل شده است که دو بُعد را پوشش می‌دهد. روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی، بار دیگر به کار گرفته خواهد شد تا خطای خطی‌سازی را کاهش دهد. بعد از دوران و انتقال به محورهای اصلی v_1 و v_2 از ۹ نقطه به روش مربعی - گاوسی استفاده شده است. در شکل ۴، فرایند تعیین خطای هر نمونه مشابه توضیحات ارائه شده در مثال ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. رویه‌ی نمونه‌سازی جهت بهبود دقت محاسبات برای مثال ۱.

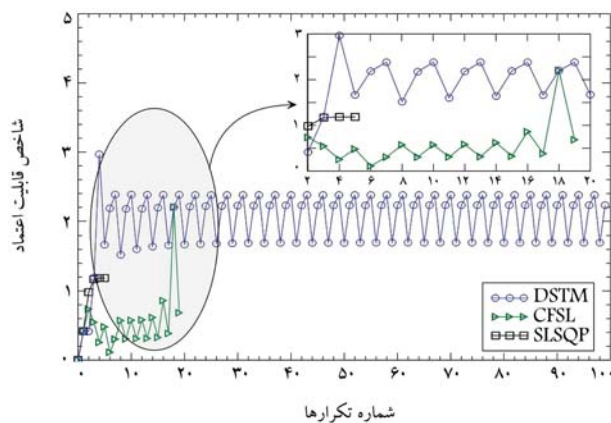
است، که با ۳۰۲ فراخوانی تابع حالت حدی به‌دست آمده است. گام بعدی حل مسئله، بهبود دقت محاسباتی است. در شکل ۲، فرایند استفاده شده برای تعیین میانگین مورد انتظار احتمالاتی جهت کاهش خطای خطی‌سازی مشاهده می‌شود. مسئله‌ی کنونی از دو جهت تشکیل شده است. در روش مورد نظر این امکان وجود دارد تا از نمونه‌های تصادفی استفاده شود؛ اما مطالعه‌ی حاضر، روش جایگزین مربع - گاوسی، [۴۱] را برای تولید نمونه‌های تصادفی به کار گرفته است، که برای مثال حاضر، از ۹ 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 قبلی، نقطه‌ی طراحی و بردار حساسیت به‌وسیله‌ی روش SLSQP محاسبه شده است. نقاط مذکور با رنگ‌های آبی در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. مرحله‌ی بعد، تعیین خطای هر نمونه نسبت به شاخص قابلیت اعتماد به‌دست آمده از روش SLSQP است.

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

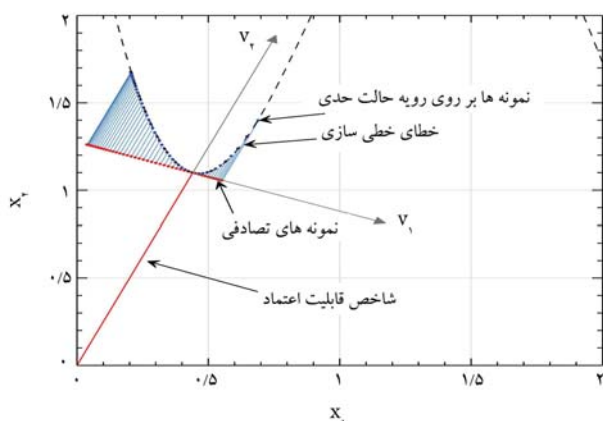
در جدول ۲، خلاصه‌ی نتایج پایانی روش‌های مختلف ارائه شده است، که β شاخص قابلیت اعتماد، p_f احتمال شکست و تعداد تکرار موردنیاز و تعداد دفعات فراخوانی تابع حالت حدی برای هر روش ارائه شده است. پاسخ نهایی روش بهینه‌سازی که در آن از اصلاح به روش میانگین مورد انتظار استفاده شده است، به شکل SLSQP-PE در جدول ۲ نام برده شده است. کارایی مناسب روش پیشنهادی جهت مقابله با غیرخطی بودن تابع حالت حدی، سرعت بالای همگرایی و اصلاح خطای خطی‌سازی با مکانیسم ارائه شده از نتایج به‌دست آمده‌ی قابل برداشت است.

۲.۴. مثال ۲: تابع حالت حدی نمایی - لگاریتمی

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



شکل ۵. تاریخچه تکرارها برای مثال ۳.

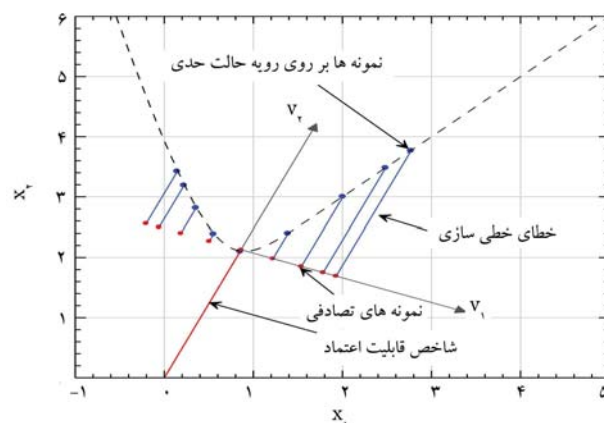


شکل ۶. رویه‌ی نمونه‌سازی جهت بهبود دقت محاسبات برای مثال ۳.

بین مرکز مختصات و رویه‌ی حالت حدی در فضای استاندارد نرمال است. اما پاسخ اخیر با نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (۱/۸۶۱) تفاوت زیادی داشته است، که نیاز به اصلاح را یادآورد می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که این مورد ضعف روش بهینه‌سازی نبوده است، زیرا وظیفه‌ی روش SLSQP، یافتن نزدیک‌ترین فاصله‌ی ذکر شده در حالت خطی‌سازی بوده و این امر صورت پذیرفته است.

نقطه‌ی طراحی به‌دست آمده دارای مختصات (۱/۱۰۰۰۷، ۰/۴۴۰۹۷) بوده است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. خطای محاسباتی مثال حاضر، به وجود ترم نویز شعاع انحناء 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 متقارن نسبت به محور v_2 تأثیر چندانی در بهبود خطای مسئله رخ نخواهد داد. به این دلیل، برای مسئله‌ی حاضر 50° نقطه به روش مربع - گاوسی و انتقال به سمت چپ محور مذکور به مقدار 0.15 استفاده شده است. همچنین در شکل ۶، نمونه‌های تولید شده برای 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 خطی‌سازی 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	β	P_f	تکرارها	فراخوان تابع
DSTM	—	—	—	—
CFSL	۱/۷۹۶	۰/۰۳۶۲۴۷	۱۰۰	۱۰۰
SORM	۳/۷۰۶	۰/۰۰۳۴۰۴	—	۶ + Hessian
SLSQP	۲/۲۷۰	۰/۰۰۳۴۰۰	۶	۶
SLSQP-PE	۲/۷۴۰	۰/۰۰۳۰۷۲	۶ + ۹	۶ + ۹
MCS	۲/۷۴۵	۰/۰۰۳۰۲۵	۱۰۶	۱۰۶

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

روش SLSQP علاوه بر کارایی مناسب در برابر غیرخطی بودن تابع حالت حدی، حجم محاسباتی بهینه را نیز نتیجه داده است و در ترکیب با روش میانگین مورد انتظار احتمالاتی به دقتی در حد روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو رسیده است. این در حالی است که فقط از ۹ نمونه برای اصلاح دقت پاسخ استفاده شده است.

۳.۴. مثال ۳: تابع حالت حدی دارای نویز

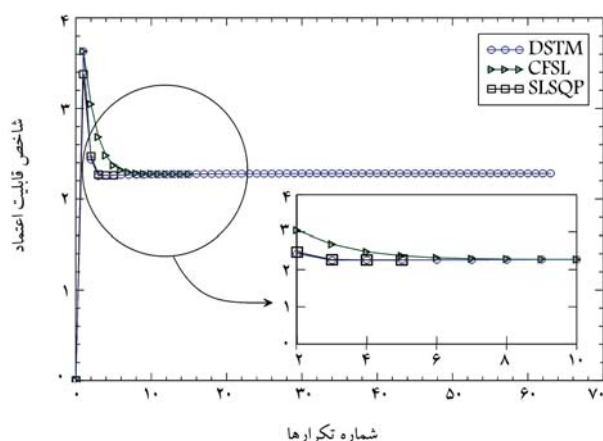
تابع حالت حدی دارای ترم نویز در مثال ۳ مطابق رابطه‌ی ۲۹ بررسی شده است. [۲۴،۲۳] دو متغیر تصادفی استفاده شده در مثال کنونی، دارای توزیع نرمال با میانگین‌های به ترتیب برابر با $1/5$ و $2/5$ هستند و مقدار انحراف معیار برای هر دو متغیر تصادفی برابر $1/10$ است.

$$G(X) = \frac{(X_1^2 + 4)(X_2 - 1)}{20} - \sin\left(\frac{5X_1}{2}\right) - 2 \quad (29)$$

تمامی گام‌های محاسباتی به همراه بزرگ‌نمایی گام‌های اولیه به منظور درک بهتر رفتار روش‌ها در شکل 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 مسئله، بعد از گام ۱۹ بازمانده است. قابلیت اعتماد برابر با $1/185$ به پایان رسیده است که این پاسخ بهترین پاسخ در حالت خطی‌سازی تابع حالت حدی، یعنی کمترین فاصله

جدول ۴. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۳.

روش	β	P_f	تکرارها	فراخوان تابع
DSTM	—	—	—	—
CFSL	—	—	—	—
SORM	۱/۱۹۱	۰/۱۱۶۸۲	—	۶ + Hessian
SLSQP	۱/۱۸۵	۰/۱۱۷۹۷	۶	۶
SLSQP-PE	۱/۸۴۰	۰/۰۳۱۷۹	۶ + ۵۰	۶ + ۵۰
MCS	۱/۸۶۱	۰/۰۳۱۳۳	۱۰۶	۱۰۶



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 تقریبی 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، 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 شاخص 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 علت صریح بودن تابع حالت حدی و استفاده از روش تفاضلات محدود جهت تعیین گردادیان تابع حالت حدی است.

نقطه‌ی طراحی به‌دست آمده برای مسئله‌ی حاضر براساس ترتیب ارائه شده در جدول ۴ برابر است با:

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

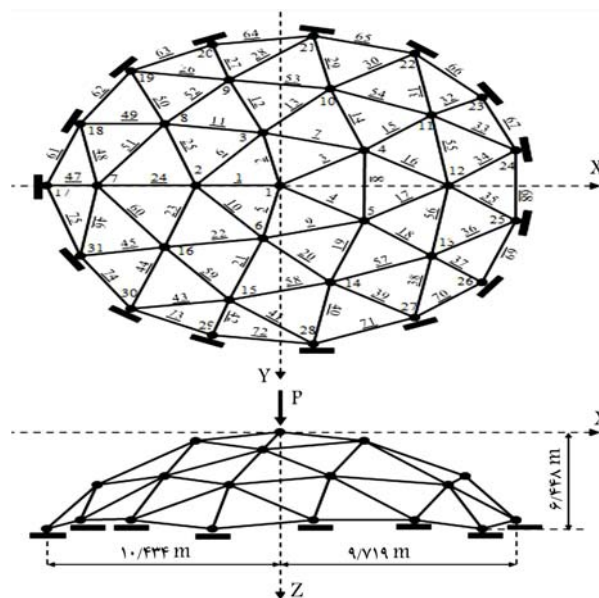
$$A_3 = 0/0009 \quad A_4 = 0/00119$$

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

$$E = 68/627 \quad P = 108/83$$

۵. نتیجه‌گیری

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



شکل ۷. سازه‌ی خرابی گنبد مثال ۴.

۴.۴. مثال ۴: مسئله‌ی مهندسی گنبد (سازه‌ی خرابی فضایی)

سازه‌ی گنبد یا سازه‌ی خرابی فضایی با ۷۵ عضو در مسئله‌ی حاضر مدنظر قرار گرفته است، تا کارایی روش پیشنهادی برای یک مسئله‌ی مهندسی با ابعاد زیاد نشان داده شود. تغییر مکان بیشینه در گره مرکزی سازه برای ساخت یک تابع حالت حدی صریح، برخلاف مثال‌های گذشته، استفاده شده است. تابع حالت حدی در رابطه‌ی ۳۰ ارائه شده است.^[۴۵]

$$G(X) = 0/0035 - \Delta_1' \quad (30)$$

شماره و مختصات هندسی تمامی گره‌های تشکیل‌دهنده‌ی سازه در جدول ۵ ارائه شده‌اند. در شکل ۷، مدل اجزاء محدود سازه‌ی گنبد مشاهده می‌شود. شکل ۷، شامل المان‌ها، گره‌ها، و شماره‌ی آن‌هاست. شماره‌های ساده (بدون خط زیر) مربوط به گره‌ها و شماره‌هایی که زیرشان خط دارند، مرتبط با المان‌ها هستند. مدل سازه‌ی اخیر، شامل ۳۱ گره، ۷۵ المان خرابی با مصالح یکسان، ۱۵ تکیه‌گاه ساده و یک نیروی متمرکز در گره ۱ (گره مرکزی) در راستای محور Z بوده است. سطح مقطع اعضا، مدول کشسانی و بار اعمال شده بر روی سازه، به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند؛ که مشخصات مربوط به توزیع آماری و سایر پارامترهای مورد نیاز آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. مختصات هندسی گره‌ها برای مثال ۴.

Node	(X, Y, Z) meter	Node	(X, Y, Z) meter
۱	(+۰/۰۰۰, +۰/۰۰۰, +۰/۰۰۰)	۱۷	(-۱۰/۴۳۴, +۰/۰۰۰, +۶/۴۴۸)
۲	(-۴/۰۰۴, +۰/۰۰۰, +۰/۷۰۹)	۱۸	(-۹/۲۴۶, -۳/۸۰۸, +۵/۶۵۸)
۳	(-۱/۲۳۷, -۳/۸۰۸, +۰/۷۰۹)	۱۹	(-۶/۴۷۹, -۷/۶۱۷, +۵/۶۵۸)
۴	(+۰/۷۰۹, -۲/۳۵۴, +۱/۲۳۷)	۲۰	(+۶/۴۴۸, -۹/۹۲۳, -۳/۲۲۴)
۵	(+۳/۲۴۰, +۲/۳۵۴, +۰/۷۰۹)	۲۱	(+۰/۷۶۵, -۹/۹۷۱, +۵/۶۵۸)
۶	(-۳/۲۴۰, +۳/۸۰۸, +۰/۷۰۹)	۲۲	(+۵/۲۴۲, -۸/۵۱۶, +۵/۶۵۸)
۷	(-۸/۰۰۹, +۰/۰۰۰, +۳/۱۸۳)	۲۳	(+۸/۴۴۱, -۶/۱۳۳, +۶/۴۴۸)
۸	(-۵/۷۲۹, -۴/۱۶۲, +۲/۳۹۵)	۲۴	(+۹/۷۱۹, -۲/۳۵۴, +۵/۶۵۸)
۹	(-۲/۴۷۵, -۷/۶۱۷, +۲/۸۸۳)	۲۵	(+۹/۷۱۹, +۲/۳۵۴, +۵/۶۵۸)
۱۰	(+۲/۱۸۸, -۶/۷۳۵, +۲/۳۹۵)	۲۶	(+۸/۴۴۱, +۶/۱۳۳, +۶/۴۴۸)
۱۱	(+۶/۴۷۹, -۴/۷۰۸, +۳/۱۸۳)	۲۷	(+۵/۲۴۲, +۸/۵۱۶, +۵/۶۵۸)
۱۲	(+۷/۰۸۲, +۶/۴۷۹, +۳/۱۸۳)	۲۸	(+۰/۷۶۵, +۹/۹۷۱, +۵/۶۵۸)
۱۳	(+۶/۴۷۹, +۴/۷۰۸, +۳/۱۸۳)	۲۹	(-۳/۲۲۴, +۹/۹۲۳, +۶/۴۴۸)
۱۴	(+۲/۱۸۸, +۶/۷۳۵, +۲/۳۹۵)	۳۰	(-۶/۴۷۹, +۷/۶۱۷, +۵/۶۵۸)
۱۵	(-۲/۴۷۵, +۷/۶۱۷, +۳/۱۸۳)	۳۱	(-۹/۲۴۶, +۳/۸۰۸, +۵/۶۵۸)
۱۶	(-۵/۷۲۹, +۴/۱۶۲, +۲/۳۹۵)		

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

متغیر	نوع توزیع	میانگین	انحراف معیار
$A_1 - A_0 (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۳۷۵
$A_6 - A_{10} (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۰۲۴
$A_{11} - A_{25} (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۰۸
$A_{26} - A_{50} (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۰۹۶
$A_{51} - A_{60} (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۰۲۲
$A_{61} - A_{75} (m^2)$	نرمال	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۱۵
E (GPa)	نرمال	۷۰	۳/۵
P (kN)	گامیل	۸۰	۱۲/۰

جدول ۷. نتایج روش‌های مختلف برای مثال ۴.

روش	β	P_f	تکرارها	فراخوان تابع	زمان (s)
DSTM	۲/۲۸۳۱۱	۰/۰۱۱۲۱	۶۴	۵۷۶	۶/۸۳۰
CFSL	۲/۲۷۳۲۷	۰/۰۱۱۵۰	۱۶	۱۴۴	۲/۰۶۸
SORM	۲/۱۵۰۰۱	۰/۰۱۵۷۷	—	۴۶ + Hessian	۳/۲۸۰
SLSQP	۲/۲۶۰۵۳	۰/۰۱۱۸۹	۵	۴۶	۱/۱۱۷
SLSQP-PE	۲/۱۸۴۶۰	۰/۰۱۴۴۵	۵ + ۵۰	۴۶ + ۵۰	۱/۱۳۰
MCS	۲/۱۸۴۶۲	۰/۰۱۴۴۵	۶/۵ × ۱۰ ^۶	۶/۵ × ۱۰ ^۶	۸۹۶/۰

روش مذکور برای تعداد محدودی مثال در مطالعه‌ی حاضر نشان داده شده است. تخمین نقطه‌ی طراحی در فضای خطی‌سازی 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 ارائه‌شده، اصلاح پاسخ به‌دست آمده است، تا پاسخی نزدیک به روش‌های شبیه‌سازی و تقریب مناسب را نتیجه دهد. به این منظور، تعدادی نمونه‌ی تصادفی حول نقطه‌ی طراحی تولید شده است، که این نقاط به وسیله ماتریس هسیان به‌دست 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 نویسندگان نوشتار حاضر تهیه و در آدرس www.betaindexsoftware.com 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 مقرون به صرفه از نقطه‌نظر 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 همگرایی 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 از محدودیت‌های آن است. محدودیت بعدی روش SLSQP برای مسائل دارای 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 جامع‌تر

پانویس‌ها

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 دوگهواره‌یی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌یی ثانویه

محمدتقی رفیعی محمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

وحید بروجردیان* (دانشیار)

اسماعیل محمدی ده‌چشمه (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف (پیاو ۱۴۰۲)
دربی ۲ - ۳۹، شماری ۱، ص. ۱۰۳-۹۳، (پژوهشی)

به منظور کاهش آثار مودهای بالاتر در سیستم گهواره‌یی، اضافه کردن مفصل گهواره‌یی ثانویه در ارتفاع سازه رایج است. محل بهینه‌ی مفصل ثانویه به علت بازتوزیع نیروهای داخلی بین صفحات گهواره‌یی، چالش برانگیز است. در پژوهش حاضر، قاب مهاربندی فولادی دوگهواره‌یی دارای تعداد طبقات ۱۲، ۱۸ و ۲۴، با استفاده از روش برهم‌نهی مودال اصلاح شده طراحی شده است. سپس محل مفصل ثانویه در هر طبقه تغییر یافته است تا محل بهینه برای کمینه‌سازی برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب و جابه‌جایی 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 تقاضا شده است. همچنین لنگر واژگونی دارای بیشترین حساسیت به محل مفصل ثانویه بوده و تغییرات مجموع آن به نحوی با برش همبستگی داشته است. از این رو، انتخاب لنگر واژگونی به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم دوگهواره‌یی، روش برهم‌نهی مودال اصلاح شده، بهینه‌یابی محل مفصل گهواره‌یی دوم، جابه‌جایی پسماند، بیشینه‌ی شتاب طبقه.

۱. مقدمه

وقوع حوادث زلزله‌های اخیر نشان داده است که خسارت‌های شدیدی در ساختمان‌هایی که براساس آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی اخیر طراحی شده‌اند، ایجاد می‌شود. زلزله‌های اخیر کانتر بوری^۱ به تخریب کامل منطقه‌ی اقتصادی مرکزی منجر شدند و بعد از زلزله، به جای تعمیر در بیش از ۷۰٪ سازه‌ها، تصمیم به تخریب آن‌ها گرفته شد. [۱] آیین‌نامه‌ها به منظور اتلاف انرژی زلزله، اجازه‌ی وقوع خسارت‌های بزرگ و تغییر شکل‌های خمیری را به عناصر اصلی سازه می‌دهند. علاوه بر این، خسارت و خمیری شدن معمولاً با تغییر شکل‌های باقیمانده بزرگ همراه می‌شود که تعمیر آن‌ها را در پایان رویداد لرزه‌یی دشوار یا از نظر اقتصادی گران می‌کند. سیستم‌های جدید مقاوم لرزه‌یی برای کاهش خسارت‌های ساختمان در هنگام زلزله با شدت‌های مختلف، از جمله در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۲۹، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۵.

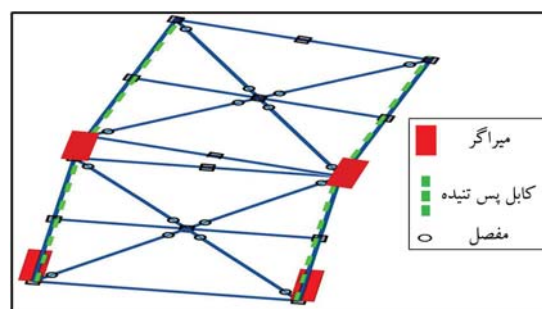
DOI:10.24200/J30.2022.61242.3156

استناد به این مقاله:

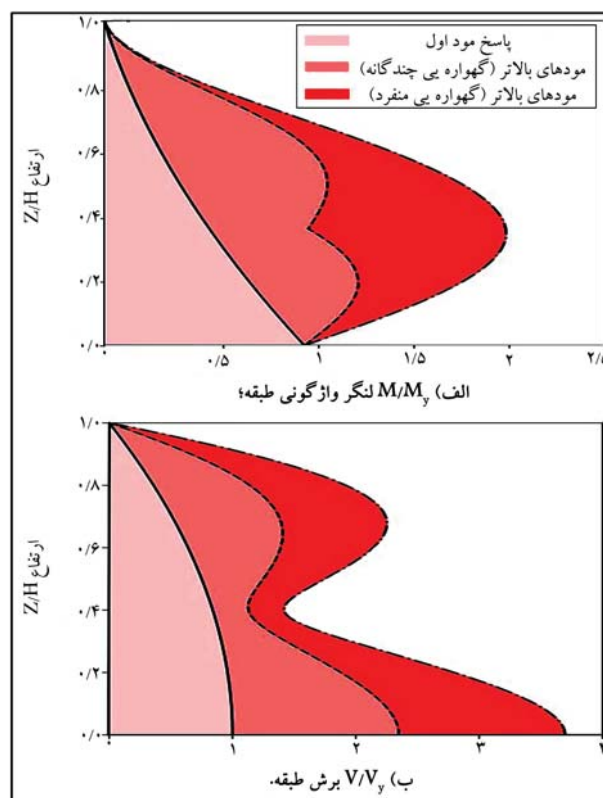
سطح طراحی، در دهه‌های گذشته توسعه یافته‌اند. یک دسته از سیستم‌های مقاوم لرزه‌یی کم‌خسارت، سیستم‌های مرکزگرا هستند. سیستم‌های مرکزگرا معمولاً به منظور جلوگیری از خسارت‌های سازه‌یی به جای تسلیم مصالح، به غیرخطی بودن هندسی متکی هستند. سازه‌های گهواره‌یی از نسل‌های جدید سیستم‌های مرکزگرا هستند. مطابق شکل ۱، در سیستم دوگهواره‌یی، کابل پس‌تنیده در طرفین قاب و میراگر در پایه‌ی گهواره‌یی و ارتفاع قاب قرار دارد. سازه‌های گهواره‌یی از طریق بلندشدگی و حرکت گهواره‌یی در پایه، آسیب‌های سازه‌یی را به فیوزهای اتلاف‌کننده‌ی انرژی قابل تعویض محدود می‌کنند. با این کار، اعضاء سازه‌ی اصلی به شکلی طراحی می‌شوند که در محدوده‌ی ارتجاعی باقی بمانند و در عوض میراگرهای مختلف، انرژی زلزله را جذب می‌کنند. عملکرد مرکزگرایی سیستم‌های گهواره‌یی، تغییر شکل‌های باقیمانده را کاهش می‌دهد یا حذف می‌کند. در این‌گونه سازه‌ها که دارای دوره‌ی تناوب اصلی طولانی هستند، با کاهش تقاضاهای مود اول از طریق دستگاه‌های اتلاف انرژی،

رفیعی محمدی، محمدتقی، بروجردیان، وحید و محمدی ده‌چشمه، اسماعیل (۱۴۰۲). «طراحی بهینه‌ی قاب‌های مهاربندی فولادی دوگهواره‌یی با تغییر موقعیت بلوک گهواره‌یی ثانویه»،

مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۱۰۳-۹۳



شکل ۱. پیکر بندی سیستم دوگهواره‌یی.



شکل ۲. آثار مود بالاتر در سیستم‌های گهواره‌یی با در نظر گرفتن نیروهای برشی طبقه به صورت نرمال شده و لنگرهای واژگونی.^[۴]

مودهای بالاتر مشارکت نسبتاً بیشتری از پاسخ لرزه‌یی کل در مقایسه با سیستم‌های مرسوم دارند. این موضوع باعث می‌شود که نیروهای اعضاء سازه، در طول ارتفاع به طور قابل توجهی افزایش یابد.^[۲] مطابق شکل ۲، به عنوان یک روش مؤثر با سازوکار حرکت گهواره‌یی چندگانه، تقاضای مود بالاتر کاهش می‌یابد. این کاهش برای سازه‌های بلندمرتبه مشهودتر است.^[۳]

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^۲: ویب و کریستولوس^۳ (۲۰۱۵)، رفتار سیستم‌های گهواره‌یی را شبیه یک تیر طره‌ی برشی فرض کردند. به منظور برآورد تقاضاهای لرزه‌یی، می‌توان از روش‌های فرم بسته^۴ براساس قیاس تیر طره استفاده کرد. عبارت‌های بدست آمده از روش‌های فرم بسته در جدول‌های گسترده بدون انجام

تحلیل مودال اجرا کرد.^[۵] از قیاس تیر طره برای استخراج برخی معادلات در روش‌های طراحی دیگر نیز استفاده شده است.^[۶،۷] البته در دیوارهای لاغر گهواره‌یی، رفتار خمشی تعیین‌کننده است.^[۸] پس با در نظر گرفتن ترکیب رفتار برشی و خمشی می‌توان دقت روش قیاس تیر طره را بهبود بخشید.^[۹]

ب) روش بار جانبی معادل^۵ و تحلیل طیفی اصلاح شده^۶: استیل و ویب (۲۰۱۶)، از معادلات مبتنی بر قیاس تیر طره‌ی برشی برای محاسبه‌ی توزیع بار اینرسی مودهای دوم و سوم استفاده کرده‌اند که می‌توانند علاوه بر بارهای جانبی تجویزی آیین‌نامه 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 گهواره‌یی از: (۱) نیروهای مود اول مبتنی بر نیروهای لرزه‌یی معادل، (۲) نیروهای مود بالاتر مبتنی بر تحلیل طیفی پاسخ، و (۳) شرایط مرزی اصلاح شده استفاده کرده‌اند. هر دو روش در میزان خطا به خوبی یا بهتر از روش‌های پیش از خود عمل کرده‌اند.^[۶]

ج) روش مبتنی بر جابه‌جایی مستقیم توسعه یافته^۷: رهگذر و رهگذر^۸ (۲۰۲۰)، با توسعه‌ی روش مبتنی بر جابه‌جایی مستقیم، نیروهای مود بالاتر را در سیستم‌های مهاربندی گهواره‌یی تعیین کردند و مقادیر خطای برآورد تلاش‌ها را کاهش دادند.^[۷] د) برهم‌نهی مودال اصلاح شده (زمان دوام)^۹: روش زمان دوام، شامل برهم‌نهی نیروهای غیرکشسان مود اول با نیروهای کشسان مودهای بالاتر است. مارتین و همکاران (۲۰۱۹)، روند اخیر را برای قاب مهاربندی فولادی گهواره‌یی اجرا کرده‌اند. در روش زمان دوام از دو ایده‌آل‌سازی مجزا برای تحلیل نیروهای عضو قاب ناشی از: (۱) بارهای ثقلی و نیروهای پس‌تیدگی، 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 خطا کاهش یافته است.^[۱۰] روش زمان دوام، بعدها برای سیستم دوگهواره‌یی نیز قابلیت استفاده یافت.^[۴] هر سه روش (ب) الی (د)، قابل اجرا در نرم‌افزارهای تجاری هستند.^[۱۰،۷،۶] بعضاً با استفاده از مفاهیم مشترک روش‌های ذکر شده، روش طراحی مخصوص سازه‌ی گهواره‌یی نوین، ارائه و ارزیابی شده است.^[۱۱] روش زمان دوام برای تحلیل و طراحی لرزه‌یی سازه‌ها براساس عملکرد استفاده می‌شود. اجرای روش زمان دوام، برای سازه‌های گهواره‌یی نشان داد در مقایسه با روش تاریخی‌ی زمانی، سرعت و دقت مناسبی دارد. روش اخیر در طراحی بهینه‌ی سازه‌ها که نیاز به تحلیل‌های مکرر و سنگین دینامیکی دارد، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.^[۱۲]

از سیستم‌های گهواره‌یی می‌توان برای سازه‌های بلندمرتبه استفاده کرد، که جهت تسکین آثار مود بالاتر به دو مفصل گهواره‌یی نیاز دارند. یافتن محل مناسب مفصل گهواره‌یی به علت پاسخ زلزله ناشی از آثار مود بالاتر و توزیع مجدد غیرخطی نیروهای داخلی بین صفحات گهواره‌یی، چالش برانگیز است. چالش این است که همراه با کاهش تقاضای نیروی لرزه‌یی، تغییر شکل‌ها نیز کنترل شوند. لذا مطابق جدول ۱، پژوهشگران در سیستم‌های گهواره‌یی چندگانه به بررسی محل بهینه‌ی مفصل گهواره‌یی پرداخته‌اند. به منظور انتخاب تابع هدف بهینه‌یابی در برخی از پژوهش‌ها، به تقاضاهای برش، لنگر واژگونی، و جابه‌جایی نسبی پسماند میان طبقه‌یی،^[۱۳] و در برخی دیگر، به جابه‌جایی نسبی پسماند و میزان جذب انرژی سیستم توجه شده است.^[۱۴] با افزایش تعداد تحلیل‌ها در فرایند بهینه‌یابی ممکن است فقط تابع هدف لنگر واژگونی ارزیابی شود.^[۱۵] اولویت انتخاب تابع هدف بهینه‌سازی از میان تقاضاهای لرزه‌یی سیستم‌های گهواره‌یی کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

قاب مهاربندی فولادی گهواره‌یی در پژوهش حاضر براساس روش زمان

جدول ۱. پژوهش‌های انجام‌شده به منظور یافتن محل بهینه‌ی مفصل گهواره‌ی در سیستم‌های گهواره‌ی چندگانه و شکاف مطالعاتی پژوهش حاضر.

عناوین مورد بررسی / پژوهش‌ها	[۱۶]	[۱۵]	[۱۷، ۱۳]	پژوهش حاضر
بررسی هر طبقه جهت قرارگیری مفصل ثانویه		•		•
کمینه‌سازی خسارت به اجزاء غیرسازه‌ی				•
بررسی سیستم با بیش از دو مفصل گهواره‌ی	•	•	•	
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.

$$k_{PT} = N E P T A_s / L_{PT} \quad (3)$$

۲.۲. تخمین دررفت بیشینه

با توجه به شکل ۳، نسبت دررفت بام در تسلیم (θ_y) از جمع تغییرشکل کشسان قاب و بلندشدگی پایه‌ی گهواره‌ی به دست می‌آید. نسبت دررفت بام در بلندشدگی اولیه (θ_{up}) با تقسیم جابه‌جایی بام بر ارتفاع سازه در مدل پایه‌ی ثابت قاب گهواره‌ی تحت بار استاتیکی معادل محاسبه می‌شود. $\theta_{ULR,y}$ یا چرخش بلندشدگی تسلیم از تقسیم جابه‌جایی تسلیم میراگر بر X_{ED} آن به دست می‌آید. M_{up} برابر M_u و نسبت M_y به M_y برابر $9/10$ تنظیم می‌شود. θ_y مطابق معادله‌ی [۱۰]، ۴ محاسبه می‌شود:

$$\theta_y = \theta_{up} \left(\frac{M_y}{M_{up}} \right) + \theta_{ULR,y} \quad (4)$$

و لنگر واژگونی کلی مطابق معادله‌ی [۱۰]، ۵ به دست می‌آید:

$$M(\theta) = M_y + (\theta - \theta_y)(K_{PT} + b_{ED} K_{ED}) \quad (5)$$

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 تسلیم میراگر است. به منظور تخمین دررفت بام در رویکرد زمان دوام، یک سیستم SDOF معادل به نمایندگی از قاب گهواره‌ی انتخاب می‌شود. در معادله‌های ۶ و ۷، [۱۰] m_i و h_i جرم لرزه‌ی و ارتفاع طبقه‌ی i ام، n تعداد طبقه، H_e و M_e نیز ارتفاع و جرم معادل مدل SDOF هستند.

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n m_i h_i} \quad (6)$$

$$M_e = \frac{\left[\sum_{i=1}^n m_i h_i \right]^2}{\sum_{i=1}^n m_i h_i^2} \quad (7)$$

روند سعی و خطا جهت تخمین اولیه‌ی دررفت بیشینه (θ_{MCE}) به این صورت خلاصه می‌شود: [۱۰]

۱. تخمین اولیه θ_{MCE}

۲. محاسبه‌ی بیشینه‌ی لنگر واژگونی M_{MCE} براساس معادله‌ی ۵،

۳. محاسبه‌ی سختی سکانتی $K_s = M_{MCE} / \theta_{MCE}$

۴. محاسبه‌ی سختی مؤثر $K_{eff} = \lambda K_s$ که λ 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 گهواره‌ی (سیستم دوگهواره‌ی) داشتند. قاب‌ها به صورت دویعدی 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 گهواره‌ی ثانویه در طبقات مختلف جابه‌جا می‌شود. بهینه‌یابی با ترکیب اهداف کمینه‌سازی مقادیر برش طبقه، لنگر واژگونی طبقه، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جابه‌جایی 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 غیرسازه‌ی 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 دوگهواره‌ی می‌دهد.

۲. روش پژوهش

۲.۱. طراحی کابل‌های پس‌تئیده و میراگر جاذب انرژی

در طراحی برهم‌نهی مودال 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 تسلیم در میراگر به ترتیب مطابق معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند: [۴]

$$F_{PTi} = \frac{1}{X_{PT}} \left[\frac{M_u}{\phi} \frac{SC}{1 + SC} - X_D P_D \right] \quad (1)$$

$$F_{EDy} = \frac{1}{X_{ED}} \left[\frac{M_u}{\phi} \times \frac{1}{1 + SC} \right] \quad (2)$$

که در آن‌ها، F_{PTi} نیروی پیش‌تئیدگی کابل، F_{EDy} نیروی میراگر و P_D بار مرده‌ی اجزاء قاب هستند. X_{PT} ، X_{ED} و X_D 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 آیین‌نامه‌ی ASCE ۷ [۱۸] به دست می‌آید. SC یا نسبت مرکزگرایی برابر با نسبت لنگر بازگرداننده‌ی کابل‌ها و بار ثقلی 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. میزان

گهواره‌یی از SRSS^{۱۰} اصلاح شده استفاده می‌شود که مطابق معادله‌ی ۹، [۴]

$$f_{MMS} = \frac{|f_1|}{R_1} + \frac{|f_2|}{R_2} + \sqrt{f_1^2 + \dots + f_m^2} \quad (9)$$

که در آن، f_1 تا f_m نیروهای مود اول تا m ام و R_1 و R_2 ضریب کاهش مدهای اول و دوم هستند. نیروی نهایی اعضا از طریق معادله‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$f = (f_D + f_{PT})_{fix} + (f_{MMS})_{rock} \quad (10)$$

که در آن، f_D و f_{PT} به ترتیب نیروی ناشی از بار ثقلی و پس‌تندگی در مدل پایه‌ی ثابت و f_{MMS} نیروی مودال ترکیب شده در مدل پایه - گهواره‌یی هستند. ضریب R_1 مطابق معادله‌ی ۱۱، [۱۰] محاسبه می‌شود:

$$R_1 = \frac{M_{elastic,1}}{M_{MCE}} \quad (11)$$

که در آن، M_{MCE} از روند سعی و خطای درخت پیشینه و $M_{elastic,1}$ از معادله‌ی ۱۲، [۱۰] به‌دست 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 گهواره‌یی و M_{PT} لنگر پس‌تندگی اولیه $F_{PTi} X_{PT}$ هستند. از آنجا که در سیستم دوگهواره‌یی، مود دوم نیز به محدوده‌ی غیرخطی می‌رود؛ جهت محاسبه‌ی ضریب کاهش مود دوم از معادله‌ی ۱۳، [۴] استفاده شده است. فرض بر آن است که مفصل واقع در ارتفاع سازه در مود دوم انگرگذار 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 طره‌ی برشی و M_{MCE} درون‌یابی خطی از M_{MCE} در محل مفصل گهواره‌یی ثانویه z_2 است. M_2 مطابق معادله‌ی ۱۴، [۵] محاسبه می‌شود؛ که در آن، $S_a(T)$ شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب T است و دوره‌ی تناوب مود دوم تیر پایه‌ی مفصلی $T_1/3$ فرض می‌شود. W_{trib}/g سهم جرم کل و H ارتفاع کل و z ارتفاع بالای پایه هستند.

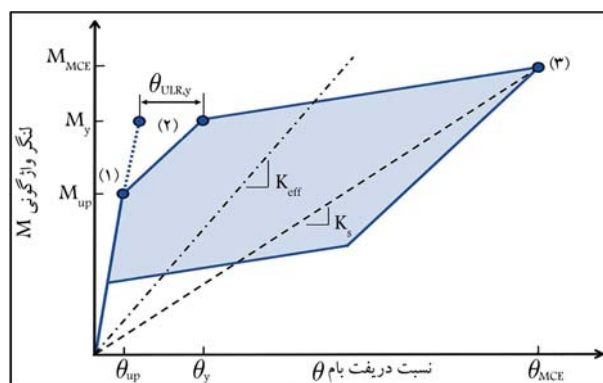
$$M_{2,max(z)} = 0.282 [S_a(T_1/3)] \left(\frac{W_{trib}}{g} \right) H \left| \sin 4.49 \left(\frac{z}{H} \right) + 0.976 \left(\frac{z}{H} \right) \right| \quad (14)$$

همچنین، M_{MCE} در محل مفصل مطابق معادله‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود:

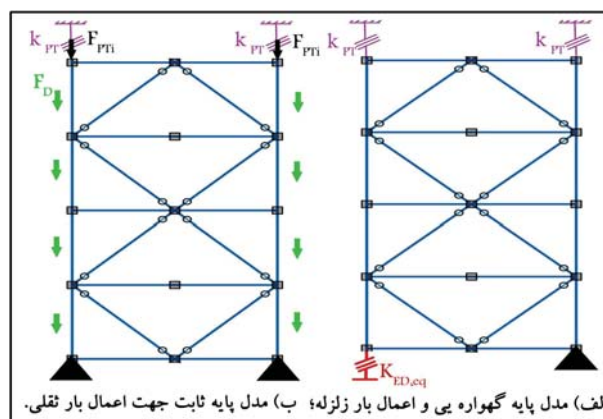
$$M_{MCE}(z_2) = M_{MCE}(1 - \frac{z_2}{H}) \quad (15)$$

۴.۲. مدل‌های عددی بررسی شده

ساختمان مورد مطالعه، [۴] دارای ارتفاع هر طبقه برابر با ۴/۵۷ و با دهانه‌های ۹/۱۴ متری بوده است. وزن موثر لرزه‌یی طبقات و بام به ترتیب برابر با ۷۵۸۸ و ۹۸۵۷ کیلونیوتن بوده است. پلان ساختمان موردنظر در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، چهار قاب گهواره‌یی 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 - تغییر شکل قاب مهاربندی گهواره‌یی. [۱۰]



شکل ۴. مدل طراحی به روش زمان دوام.

۵. محاسبه‌ی سختی مؤثر $SDOF$ ، $k_e = K_{eff}/H_e$

۶. به‌دست آوردن دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم $SDOF$ از رابطه‌ی $T_{SDOF} = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{M_e/k_e}$

۷. محاسبه‌ی مجدد دررفت پیشینه براساس دوره‌ی تناوب طبیعی و طیف پاسخ جابه‌جایی $\theta_{MCE}^* = S_d(T_{SDOF})/H_e$

۸. تکرار مجدد مراحل ۱ الی ۷ تا همگرایی $|\theta_{MCE}^* - \theta_{MCE}| < 0.01$

۳.۲. طراحی ظرفیتی مقاطع قاب به روش برهم‌نهی مودال اصلاح شده

به منظور برآورد تقاضای لرزه‌یی در قاب مهاربندی فولادی با دو مفصل گهواره‌یی از دو مدل سازه‌یی مجزا استفاده می‌شود که شامل: (۱) اعمال بارهای ثقلی و نیروهای پس‌تندگی، 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 گهواره‌یی 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 ۸، [۴] محاسبه می‌شود.

$$k_{ED,eq} = \frac{K_{eff} - K_{PT}}{X_{ED}^2} \quad (8)$$

فقط مدهای اول و دوم در قاب مهاربندی فولادی با دو مفصل گهواره‌یی به محدوده‌ی غیرخطی می‌روند؛ از این رو، جهت ترکیب مقادیر مودال در مدل

جدول ۲. مشخصات طراحی کابل و میراگر.

طبقات / پارامترها	۱۲	۱۸	۲۴
$Mu(kN.m)$	۶۲۷۹۳	۱۱۲۳۸۲	۱۶۳۶۰۸
$P_D(kN)$	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰
$F_{PTi}(kN)$	۴۱۸۰	۷۵۹۷	۱۱۱۳۳
$F_{EDy}(kN)$	۳۰۵۳	۵۴۶۵	۷۹۵۶
$k_{PT}(kN/mm)$	۱۶/۷۵	۱۶/۰۹	۱۵/۷۷
$k_{ED}(kN/mm)$	۶۰۳	۱۰۷۱/۵۲	۱۵۵۹/۹

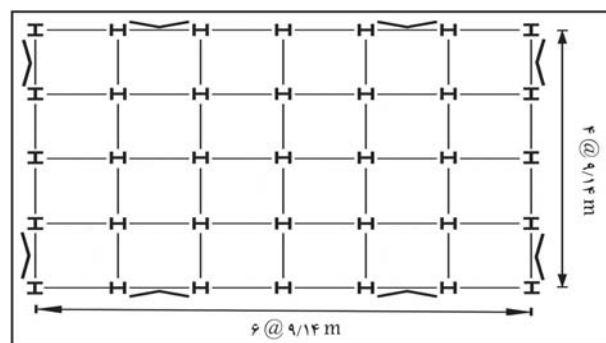
جدول ۳. پارامترهای طراحی در روش زمان دوام.

طبقات / پارامترها	۱۲	۱۸	۲۴
θ_y	۰/۳۷۲	۰/۶۹	۱/۱۳
θ_{MCE}	۲/۰۱	۲	۲/۰۷
$M_{MCE}(kN.m)$	۱۲۵۷۷۶	۱۸۹۱۹۷	۲۴۲۷۰۸
$k_{ED,eq}(kN/mm)$	۱۱۷/۹۶	۱۸۸/۳	۲۳۷/۳
R_1	۱/۷۷	۱/۸	۱/۶
R_r	۱/۲۴	۱/۸۷	۲/۵۹

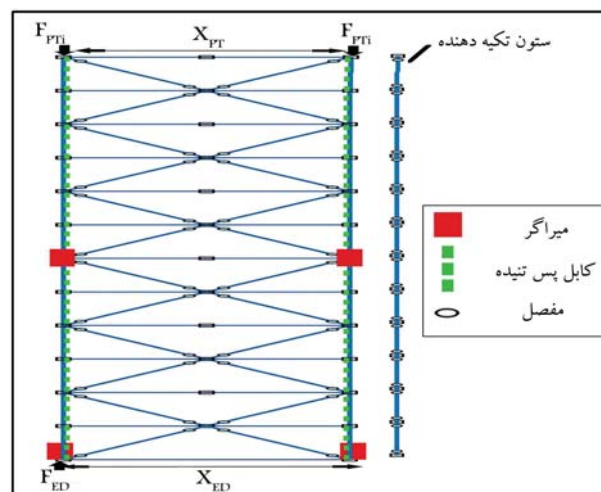
طراحی شده است. نسبت مرکزگرایی در طراحی برابر با ۱/۵ بدین معناست که لنگر بازگرداننده‌ی کابل‌ها و بار ثقلی، ۱/۵ برابر لنگر بازگرداننده‌ی میراگرهاست. دوره تناوب تجربی سازه‌های مذکور، برابر با حد فاصل دیوار برشی بتن مسلح و قاب واگرا لحاظ شده است. همچنین فرض شده است که قاب گهواره‌یی، سهم وزنی از ساختمان متحمل نمی‌شود (بدون بار ثقلی). میراگر انتخابی از نوع فیوز پروانه‌یی شکل فولادی با مدول کشسانی ۲۰۰ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال، جابه‌جایی تسلیم ۵/۱ میلی‌متر و نسبت پس از تسلیم ۰/۴ بوده است. کابل مورد استفاده دارای ۷ سیم با قطر ۱۵/۲ میلی‌متر مربع، تنش تسلیم ۱۶۵۷ مگاپاسکال، تنش نهایی ۱۸۶۰ مگاپاسکال و مدول کشسانی ۱۹۳ گیگاپاسکال بوده است. همچنین طول کابل به اندازه‌ی 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 کابل‌ها و فیوزهای جاذب انرژی، مقاطع مهاربند و ستون برای نیروی محوری طراحی می‌شوند. همچنین در پژوهش حاضر، پارامترهای روش طراحی زمان دوام مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند.

۵.۲. فرایند مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار OpenSees

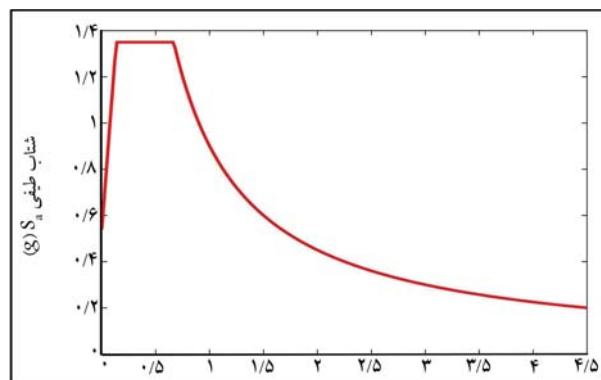
به منظور مدل کردن اثر P-Delta بار ثقلی، یک ستون تکیه‌دهنده در کنار قاب مدل می‌شود؛ که گره آن با قاب در راستای X جابه‌جایی یکسان دارد و در اتصال ستون‌های P-Delta به هم از فنر با سختی ناچیز استفاده می‌شود. المان ستون از جنس تیر - ستون کشسان و دارای سطح مقطع و ممان اینرسی ده برابر ستون قاب است. اعضاء قاب از آن جهت که در محدوده‌ی کشسان باقی می‌مانند، برای تیرها و ستون‌های قاب از المان تیر - ستون کشسان و برای مهاربند از المان corot Truss و مصالح کشسان استفاده شده است. تعریف کابل پس‌تینده با المان corot Truss و مصالح steel ۲ و با مقطع فایبر دایروی انجام شده است. کابل از گره بام به گره‌یی در پایه متصل می‌شود که در راستای جابه‌جایی دورانی و افقی مقید است. سپس گره پایه به گره‌یی گیردار با استفاده المان بدون طول gap فقط کششی با سختی زیاد متصل می‌شود تا کابل فقط در کشش عمل کند. در مدل‌سازی میراگر از المان



شکل ۵. پلان ساختمان بررسی شده.



شکل ۶. پیکربندی قاب مهاربندی گهواره‌یی به همراه نیروهای وارد بر آن.



شکل ۷. طیف طراحی سطح MCE برای تحلیل طیفی در روش زمان دوام.

شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در پیکربندی قاب مورد بررسی، میراگرها و کابل‌های پس‌تینده در طرفین قاب قرار دارند. به منظور مدل کردن اثر P-Delta بار ثقلی، یک ستون تکیه‌دهنده در کنار قاب مدل شده است. محل سازه‌ی مورد نظر در جنوب سانفرانسیسکو^{۱۱} با خاک کلاس D است. شتاب طیفی طرح ASCE^[۱۸]، برای دوره‌ی تناوب کوتاه و یک ثانیه به ترتیب $S_{d1} = 0/6g$ و $S_{d5} = 0/9g$ در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، طیف طراحی روش زمان دوام مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE^[۱۸] برای موقعیت مکانی ساختمان و سطح خطر MCE مشاهده می‌شود.

قاب مورد نظر برای نسبت مرکزگرایی $SC = 1/5$ و ضریب رفتار $R = 8$

جدول ۴. مجموعه‌ی ۷ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل با پالس.

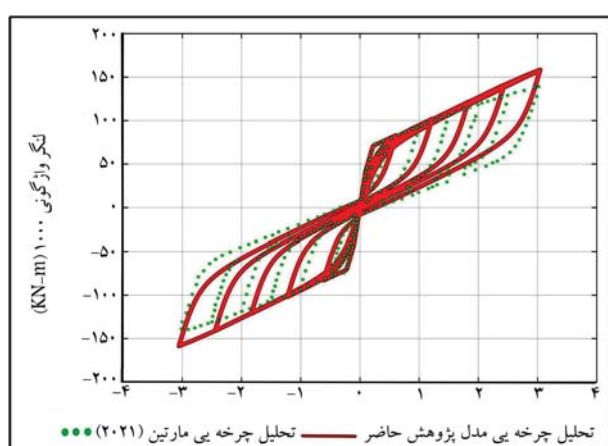
شماره	زلزله	سال	ایستگاه	Mw	RJb (km)	PGA max (g)
۱	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	El Centro Array #۶	۶/۵۳	۰	۰/۴۵
۲	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	El Centro Array #۷	۶/۵۳	۰/۵۶	۰/۴۷
۳	Superstition Hills-۰۲	۱۹۸۷	Parachute Test Site	۶/۵۴	۰/۹۵	۰/۴۳
۴	Erzican-Turkey	۱۹۹۲	Erzincan	۶/۶۹	۰	۰/۵
۵	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Rinaldi Receiving Sta	۶/۶۹	۰	۰/۸۷
۶	Chi-Chi-Taiwan	۱۹۹۹	TCU ۰۶۵	۷/۶۲	۰/۵۷	۰/۷۹
۷	Duzce-Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۷/۱۴	۰	۰/۵۱

جدول ۵. مجموعه‌ی ۷ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل بدون پالس.

شماره	زلزله	سال	ایستگاه	Mw	RJb (km)	PGA max (g)
۱	Gazli-USSR	۱۹۷۶	Karakyr	۶/۸	۳/۹۲	۰/۷۳
۲	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	Bonds Corner	۶/۵۳	۰/۴۴	۰/۷۷
۳	Imperial Valley-۰۶	۱۹۷۹	Chihuahua	۶/۵۳	۷/۲۹	۰/۲۷
۴	Nahanni-Canada	۱۹۸۵	Site ۱	۶/۶۷	۲/۴۸	۱/۱۹
۵	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	LA-Sepulveda VA Hospital	۶/۶۹	۰	۰/۹۳
۶	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Northridge ۱۷۶۴۵ Saticoy St	۶/۶۹	۰	۰/۴۶
۷	Kocaeli-Turkey	۱۹۹۹	Yarimca	۷/۵۱	۱/۳۸	۰/۳۲

جدول ۶. مجموعه‌ی ۷ شتاب‌نگاشت دور از گسل.

شماره	زلزله	سال	ایستگاه	Mw	RJb (km)	PGA max (g)
۱	Northridge	۱۹۹۴	Beverly Hills-Mulhol	۶/۷	۹/۴	۰/۵۲
۲	Northridge	۱۹۹۴	Canyon Country-WLC	۶/۷	۱۱/۴	۰/۴۸
۳	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	Bolu	۷/۱	۱۲	۰/۸۲
۴	Imperial Valley	۱۹۷۹	Delta	۶/۵	۲۲	۰/۳۵
۵	Imperial Valley	۱۹۷۹	El Centro Array # ۱۱	۶/۵	۱۲/۵	۰/۳۸
۶	Kobe, Japan	۱۹۹۵	Shin-Osaka	۶/۹	۱۹/۱	۰/۲۴
۷	Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۷/۵	۱۳/۶	۰/۳۶



بدون طول در راستای Y استفاده می‌شود. المان میراگر از ترکیب مصالح gap فقط فشاری با سختی زیاد و ۲° steel 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 راستی‌آزمایی مدل ساخته شده، یک قاب دوگهواره‌ی ۱۲ طبقه مطابق پژوهش مارتین و همکارش^[۴] (۲۰۲۱) در نرم‌افزار OpenSees ساخته شده و تحت تحلیل چرخه‌ی بی‌پوش‌آور^{۱۲} قرار گرفته و سپس نمودار نیرو - دررفت بام قاب مذکور ترسیم شده است. در شکل ۸، نیز نمودار رفتار پرچمی شکل حاصل از پژوهش حاضر و نوشتار مرجع (مارتین و همکارش)^[۴] مشاهده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب مدل‌سازی پژوهش حاضر در نرم‌افزار OpenSees است.

۶.۲. شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ی بررسی شده

مطابق جدول‌های ۴ الی ۶، مجموعاً ۲۱ رکورد از شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل، نزدیک گسل و نزدیک گسل با پالس براساس دستورالعمل FEMAP۶۹۵^[۲۰]

شکل ۸. نمودار راستی‌آزمایی تحلیل چرخه‌ی بی‌پوش‌آور غیرخطی قاب دوگهواره‌ی ۱۲ طبقه‌ی پژوهش حاضر و نوشتار مرجع^[۴]

پالس به طور کلی متناسب بوده و ویژگی مذکور در شتاب نگاشت های دیگر مشاهده نشده است. همچنین این همبستگی در نتایج برش و لنگر واژگونی در تمامی حالت ها به نحوی مشاهده می شود. در شتاب نگاشت های دور از گسل و نزدیک گسل، کاهش برش و لنگر واژگونی می تواند به افزایش جابه جایی نسبی طبقه منجر شود. از این رو کنترل جابه جایی نسبی طبقه در سازه ی دو گهواره یی امری ضروری است.

۲.۳. بررسی حساسیت محل قرارگیری مفصل ثانویه

مجموع مقادیر برش، لنگر واژگونی، بی شینه ی شتاب طبقه و جابه جایی نسبی تمام طبقات به ازاء محل قرارگیری مفصل به دست می آید. کمترین مقدار مجموع محاسبه شده، بیانگر بهینه ترین حالت قرارگیری مفصل ثانویه است؛ سپس سایر محل های قرارگیری مفصل ثانویه نسبت به آن طبقه ی بهینه ارزیابی و درصد اختلاف آن ها به دست می آید. با توجه به جدول های ۸ الی ۱۱، انحراف معیار

جدول ۸. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع لنگر واژگونی طبقات با بهینه ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت ها	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۲۲/۲۳	۱۶/۷۱	۱۱/۸۹
NF-No Pulse	۲۰/۱۰	۱۰/۶۱	۶/۲۶
NF-Pulse	۹/۹۷	۱۱/۹۱	۱۰/۹۶

جدول ۹. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع برش طبقات با بهینه ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت ها	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۱۶/۴۲	۱۱/۶۴	۶/۹۵
NF-No Pulse	۱۲/۸۶	۶/۷۴	۴/۴۶
NF-Pulse	۸/۷۷	۹/۶	۷/۱۵

جدول ۱۰. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع بیشینه ی شتاب طبقات با بهینه ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت ها	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۷/۵۲	۴/۱۶	۱/۹۸
NF-No Pulse	۵/۴۷	۲/۵۱	۱/۶۵
NF-Pulse	۶/۹۶	۴/۱۸	۲/۹۴

جدول ۱۱. میانگین انحراف معیار استاندارد درصد اختلاف مجموع بیشینه ی جابه جایی نسبی طبقه با بهینه ترین حالت.

طبقات/شتاب نگاشت ها	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۱۰/۲۳	۳/۵۶	۳/۱۷
NF-No Pulse	۷/۴۳	۳/۴	۲/۸۷
NF-Pulse	۲/۱۵	۲/۹	۲/۸۱

انتخاب شده اند. به ازاء هر جفت رکورد، شتاب نگاشتی با بیشینه یی PGA انتخاب شده است. نسبت طیف پاسخ آیین نامه به طیف هر رکورد در سه نقطه ی دوره ی تناوب $T/0.5$ و T و $3T$ محاسبه^[۴] و سپس میانگین سه ضریب به عنوان ضریب مقیاس رکورد معرفی و اعمال شده است. سه نقطه ی انتخابی، طیف رکورد را در دوره های تناوب کوتاه و بلند سازه با طیف آیین نامه مقیاس می کند. بیشینه ی ضریب مقیاس برای هر رکورد برابر ۳ تنظیم شده است، تا نماینده ی مناسبی از حرکت زمین باشد.^[۴]

۳. نتایج و بحث

۳.۱. یافتن طبقه ی بهینه جهت قرارگیری مفصل ثانویه

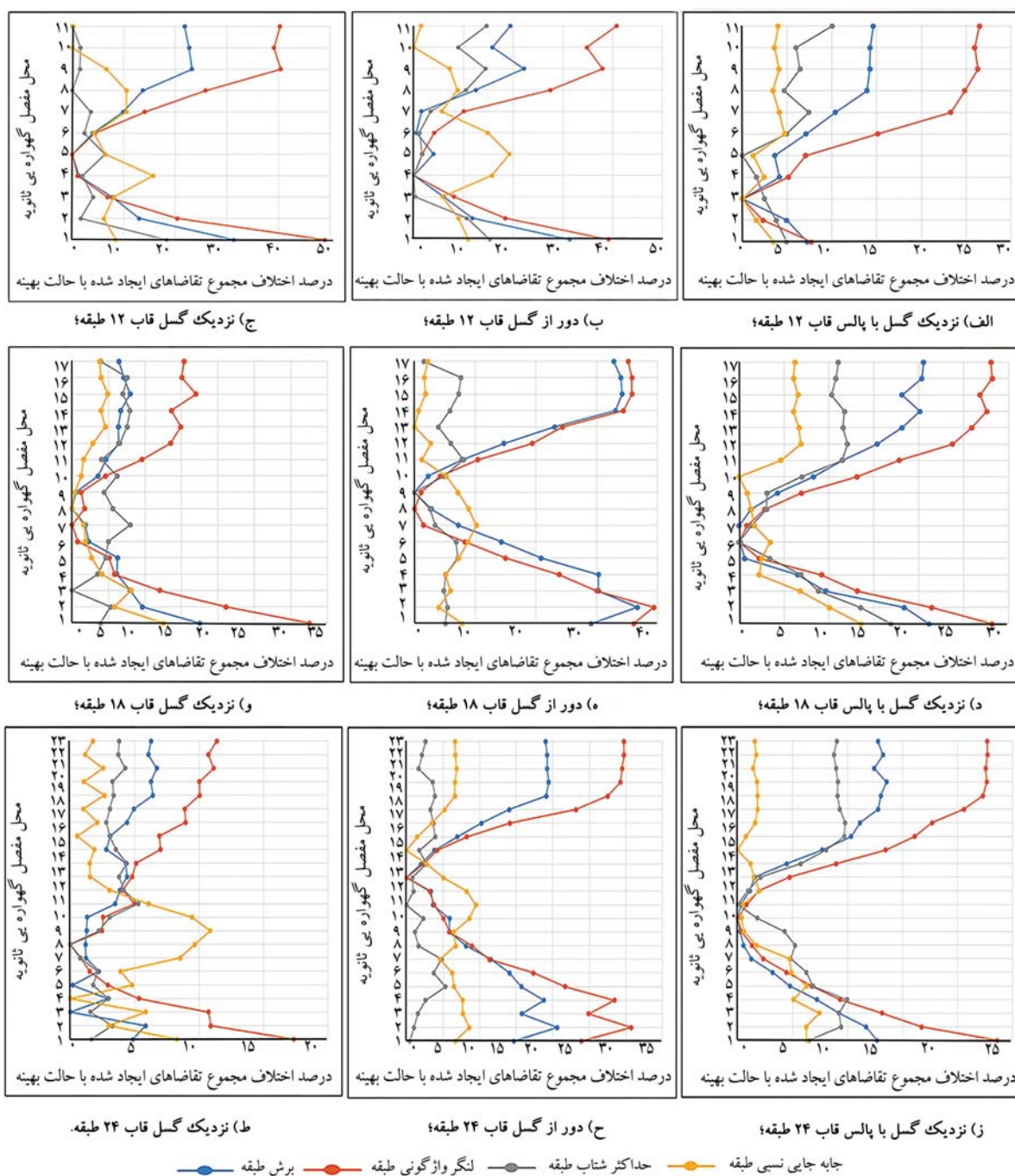
تمامی شتاب نگاشت های بیان شده در قسمت قبلی در سطح MCE به قاب گهواره یی اعمال شده و محل مفصل دوم از بالای طبقه ی اول (طبقه ی دوم) تا بالای طبقه ی ماقبل آخر (طبقه ی بام) تغییر کرده است. بیشینه ی قدرمطلق مقادیر برش، لنگر واژگونی، بیشینه ی شتاب طبقه و جابه جایی نسبی برای هر طبقه ی خروجی گرفته شده است. میانه ی مقادیر به ازاء هر نوع شتاب نگاشت محاسبه شده است. مجموع مقادیر برش، لنگر واژگونی، بیشینه ی شتاب طبقه و جابه جایی نسبی تمام طبقات به ازاء محل قرارگیری مفصل به دست آمده است. کمترین مقدار مجموع محاسبه شده، بیانگر بهینه ترین حالت قرارگیری مفصل ثانویه است؛ سپس سایر محل های قرارگیری مفصل ثانویه نسبت به آن طبقه ی بهینه، ارزیابی و درصد اختلاف آن ها به دست آمده است. می توان گفت محل قرارگیری بهینه ی مفصل، طبقاتی هستند که میانگین درصد اختلاف برش و لنگر واژگونی، بیشینه ی شتاب طبقه، و جابه جایی نسبی آن ها با بهینه ترین حالت کمتر از ۵٪ باشد.

مطابق جدول ۷، با افزایش تعداد طبقات، نماینده های طبقات بهینه افزایش یافته است. همان طور که ملاحظه می شود، قرار دادن مفصل ثانویه در میانه ی ارتفاع هر قاب در اغلب موارد هر چهار تقاضای لرزه یی را به میزان کمینه رسانده است که نتیجه ی به دست آمده مطابق با فرض مرسوم نوشتارها در طراحی سیستم های با دو مفصل گهواره یی است.^[۲۱،۱۶،۱۵،۴] اگرچه در قاب ۱۲ طبقه در شتاب نگاشت های نزدیک گسل با پالس این موضوع صادق نیست و مفصل ثانویه تمایل به قرارگیری در نیمه ی پایین قاب دارد. در این حالت تقاضای لنگر واژگونی قاب ۱۲ طبقه، ۱/۱۵٪ با حالت بهینه اختلاف دارد. قرار دادن مفصل ثانویه در ۴۰٪ ارتفاع در اغلب حالت ها، هر چهار تقاضای لرزه یی را به میزان کمینه می رساند.

در شکل ۹، درصد اختلاف مجموع هر یک از تقاضاها با بهینه ترین حالت شان مشاهده می شود که مطابق آن، کاهش یا افزایش درصد اختلاف با حالت بهینه برای هر چهار تقاضای لرزه یی در هر سه قاب در شتاب نگاشت های نزدیک گسل با

جدول ۷. درصد ارتفاع بهینه جهت قرارگیری مفصل ثانویه به ازاء در نظر گرفتن اختلاف بیشینه ی ۵ درصدی میانگین درصد هر چهار تقاضای لرزه یی با بهینه ترین حالت.

درصد ارتفاع/شتاب نگاشت ها	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۲۳-۳۳	۵۶-۴۴	۶۲-۳۷
NF-No Pulse	۵۰-۳۳	۶۱-۲۲	۷۵-۱۲
NF-Pulse	۴۲-۱۷	۵۰-۲۸	۵۴-۲۵



شکل ۹. درصد اختلاف مجموع تقاضاهای ایجاد شده با حالت بهینه به ازاء محل مفصل گهواره‌ریی ثانویه تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف لرزه‌یی MCE و قاب‌های با طبقات مختلف.

در شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse نمی‌تواند آثار مود بالاتر را به طور چشم‌گیری کاهش دهد. تقاضای لنگر واژگونی طبقه از میان تقاضاها، بیشترین حساسیت را دارد. به‌طورکلی، با افزایش تعداد طبقات، میزان حساسیت به محل قرارگیری مفصل کاهش می‌یابد.

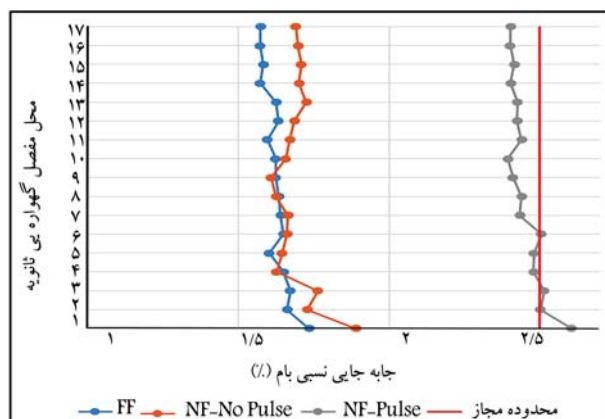
۳.۳. بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی پسماند میان طبقه

در جدول ۱۲، میانه‌ی جابه‌جایی‌های نسبی پسماند میان طبقه‌یی به ازاء رکوردهای

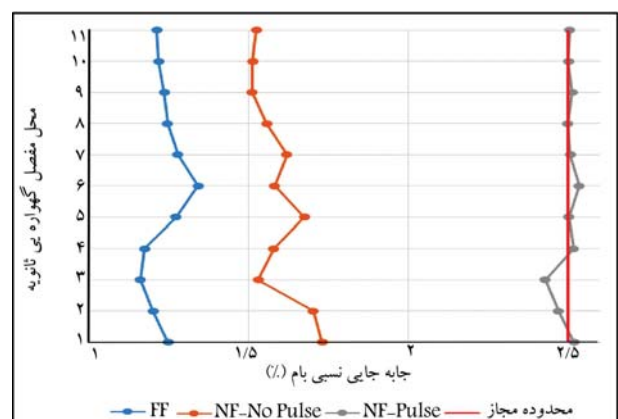
استاندارد این درصدهای اختلاف به ازاء هر نوع شتاب‌نگاشت در سطح MCE محاسبه می‌شود. سپس از ۷ انحراف معیار استاندارد هر دسته میانگین‌گیری می‌شود. مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت با انحراف معیار استاندارد بیشتر بیانگر حساسیت آن مجموعه در قرارگیری محل مفصل ثانویه است؛ به عبارتی با افزایش انحراف استاندارد آن قاب تحت رکوردهای مدنظر، رفتار قابل پیش‌بینی ندارد و دارای پیچیدگی است. به‌طورکلی 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)^[۱۷] نشان دادند که سازه‌ی دوگهواره‌یی

جدول ۱۲. بیشینه‌ی درصد جابه‌جایی نسبی پسماند میان‌طبقه.

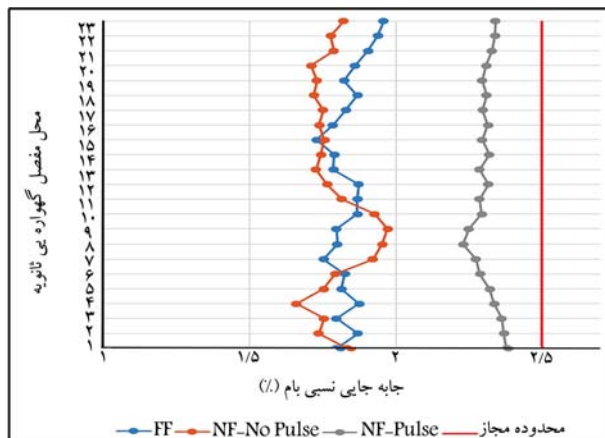
طبقات/شتاب‌نگاشت	۱۲	۱۸	۲۴
FF	۰/۰۳۴	۰/۱۰۶	۰/۱۳۹۶
	(طبقه‌ی ۱۱ مفصل در طبقه‌ی ۳)	(طبقه‌ی ۱۶ مفصل در طبقه‌ی ۳)	(طبقه‌ی ۱۹ مفصل در طبقه‌ی ۷)
NF-No Pulse	۰/۰۴۲۶	۰/۱۰۶۸	۰/۱۸۱۵
	(طبقه‌ی ۱۱ مفصل در طبقه‌ی ۱)	(طبقه‌ی ۱۶ مفصل در طبقه‌ی ۱۱)	(طبقه‌ی ۱۸ مفصل در طبقه‌ی ۱۰)
NF-Pulse	۰/۰۴۲۳	۰/۱۰۵۴	۰/۲۱۶۴
	(طبقه‌ی ۱۱ مفصل در طبقه‌ی ۱۰)	(طبقه‌ی ۱۷ مفصل در طبقه‌ی ۷)	(طبقه‌ی ۱۹ مفصل در طبقه‌ی ۱۰)



شکل ۱۱. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۱۸ طبقه.



شکل ۱۰. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۱۲ طبقه.



شکل ۱۲. درصد جابه‌جایی نسبی بام به ازاء محل مفصل ثانویه‌ی قاب ۲۴ طبقه.

۱۲ طبقه در حالت قرارگیری مفصل دوم در طبقه‌ی ۶، ۱/۲٪ 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 پس‌تنیده به ازاء هر مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت در سطح MCE محاسبه و ملاحظه شد که در تمامی حالت‌ها، تنش تسلیم کابل کمتر بوده

۴.۳. جابه‌جایی نسبی بام

مطابق شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، برای هر مجموعه‌ی ۷ شتاب‌نگاشتی، میان‌ه‌ی جابه‌جایی نسبی بام به‌دست آمده است. شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس، بیشترین جابه‌جایی نسبی بام را دارند. حد مجاز جابه‌جایی نسبی بام ۲/۵٪ تحت رکوردهای MCE در نظر گرفته شده است.^[۱] این موضوع در شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس در بعضی محل‌های قرارگیری مفصل نقض می‌شود. اختلاف ۱ درصدی با این حد مجاز شمرده می‌شود. در شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس قاب

اصلاح شده طراحی و آثار مود بالاتر در روند طراحی لحاظ شده است. سپس قاب‌های مذکور تحت مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل (FF)، نزدیک گسل بدون پالس (NF-No Pulse)، و نزدیک گسل با پالس (NF-Pulse) و در سطح زلزله‌ی MCE قرار گرفته‌اند. محل مفصل گهواره‌یی ثانویه در طول ارتفاع سازه، طبقه به طبقه تغییر یافته است تا محل بهینه‌ی مفصل جهت کمینه‌سازی توانان برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه و جابه‌جایی نسبی طبقه به دست آید. نتایج حاصل به این شرح هستند:

-- قرارگیری مفصل ثانویه در ۴۰٪ ارتفاع در اغلب موارد باعث کمینه‌شدن برش، لنگر واژگونی، بیشینه‌ی شتاب طبقه، و جابه‌جایی نسبی طبقه شده است. فرض مرسوم قراردادن مفصل ثانویه در میانه‌ی ارتفاع برای قاب ۱۲ طبقه در شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse، صادق نیست. تقاضای لنگر واژگونی قاب ۱۲ طبقه در این حالت ۱۵/۱٪ با حالت بهینه اختلاف داشته است.

-- فقط در شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse در هر سه قاب، کاهش یا افزایش درصد اختلاف با حالت بهینه‌ی هر چهار تقاضای لرزه‌یی، الگویی مشابه دارد و می‌توان اذعان داشت بهینه‌شدن یک تقاضا، سبب بهینه‌شدن سه تقاضای دیگر می‌شود. همچنین این همبستگی در نتایج برش و لنگر واژگونی در تمامی حالت‌ها به نحوی مشاهده می‌شود.

-- در شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل و نزدیک گسل، کاهش برش و لنگر واژگونی می‌تواند به افزایش جابه‌جایی نسبی طبقه منجر شود.

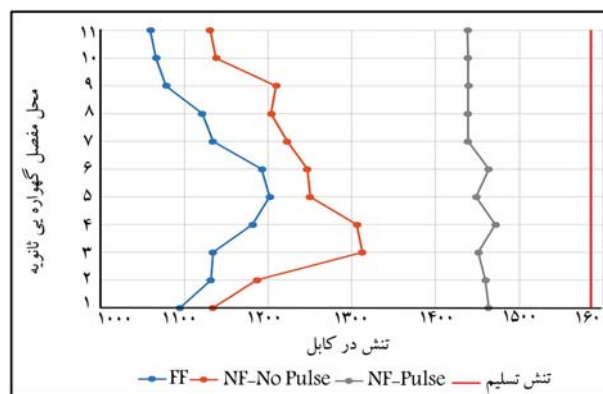
-- به‌طور کلی در هر سه تقاضا، شتاب‌نگاشت‌های FF بیشترین حساسیت و شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse کمترین حساسیت را به محل قرارگیری مفصل ثانویه دارند. همچنین لنگر واژگونی در میان تقاضاها، بیشترین حساسیت را برای محل مفصل ثانویه دارد. به‌طور کلی با افزایش تعداد طبقات، میزان حساسیت به محل قرارگیری مفصل کاهش می‌یابد.

-- با توجه به حساسیت بیشتر لنگر واژگونی به محل قرارگیری مفصل ثانویه و همچنین همبستگی آن با برش طبقه، می‌توان اذعان داشت که انتخاب لنگر واژگونی به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی نسبت به سه تقاضای دیگر ارجحیت دارد. اگر چه این انتخاب می‌تواند به افزایش جابه‌جایی نسبی طبقه منجر شود.

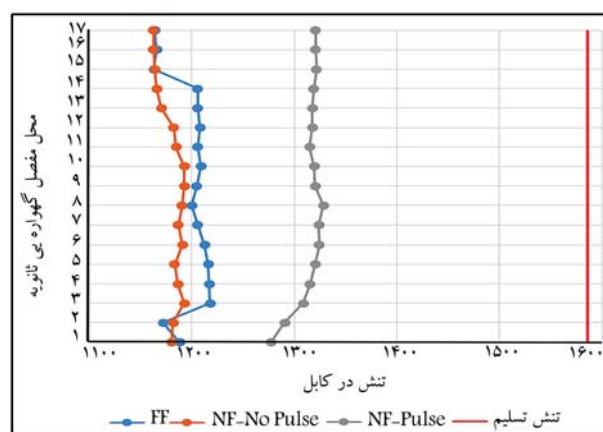
-- اغلب مقادیر جابه‌جایی نسبی پسماند میان‌طبقه‌یی از حد مجاز ۲/۰٪ کمتر است. در قاب ۲۴ طبقه، فقط در حالت قرارگیری مفصل در طبقه‌ی دهم و در شتاب‌نگاشت NF-Pulse در سه نقطه از حد مجاز بیشتر بوده است. با توجه به آنکه بیشینه‌ی اختلاف با حد مجاز فقط ۸٪ و سطح زلزله‌ی مورد بررسی MCE بوده است، که این موضوع عادی است. این جابه‌جایی با افزایش ارتفاع سازه، افزایش می‌یابد. سازه‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های FF، دچار مقادیر کمتر جابه‌جایی نسبی پسماند میان‌طبقه‌یی می‌شوند.

-- شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse بیشترین جابه‌جایی نسبی بام را دارند. فقط در دو مورد از محل‌های قرارگیری مفصل از حد مجاز ۲/۵٪، بیشینه‌ی ۴٪ فراتر رفته است؛ که این موضوع دقت بالای روش طراحی انتخابی را نشان می‌دهد.

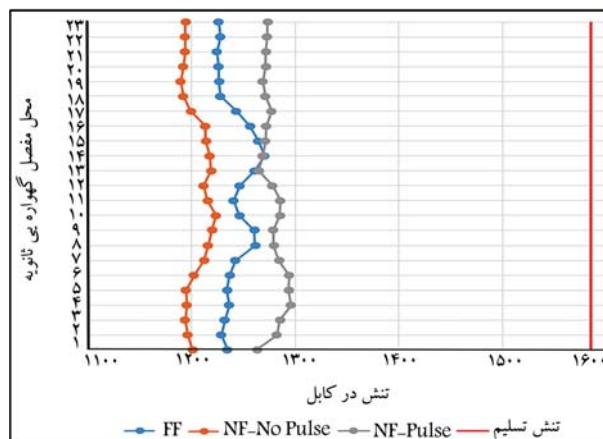
-- ملاحظه شد که تنش کابل در تمام حالت‌ها از تنش تسلیم کمتر بوده است. بیشینه‌ی تنش برای تمامی قاب‌ها در شتاب‌نگاشت‌های NF-Pulse اتفاق افتاده است.



شکل ۱۳. بیشینه‌ی تنش در کابل پس‌تنیده (مگا پاسگال) قاب ۱۲ طبقه.



شکل ۱۴. بیشینه‌ی تنش در کابل پس‌تنیده (مگا پاسگال) قاب ۱۸ طبقه.



شکل ۱۵. بیشینه‌ی تنش در کابل پس‌تنیده (مگا پاسگال) قاب ۲۴ طبقه.

است. همچنین بیشینه‌ی تنش برای تمامی قاب‌ها در شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل با پالس اتفاق افتاده است (شکل‌های ۱۳ الی ۱۵).

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، قاب مهاربندی فولادی دوگهواره‌یی براساس روش برهم‌نهی 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

منابع (References)

1. Christchurch Central Development Unit, "Introducing the christchurch central recovery plan" (2012).
2. Broujerdian, 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. Broujerdian, 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., Broujerdian, 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 Broujerdian, 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 Broujerdian, 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 Broujerdian, 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 Broujerdian, 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. Council. Calif. Redw. City (2012).

مدل سازی عددی تأثیر زاویه ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه ی اساس و زیراساس روسازی راه

رضا مؤیدفر* (استادیار)

محمدرضا مطهری (دانشیار)

بهزاد سریدانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف (پیاو ۲۰۲۰)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۱۰۵-۱۱۳، (پادداشت ثقی)

روش های گوناگونی برای بهبود پایداری خاکریز پیشنهاد می شود که از بین آن ها می توان به تسلیح خاک اشاره کرد. هدف از نوشتار حاضر، بهبود ضریب اطمینان خاکریز مسلح شده توسط ژئوتکستایل با زوایای گوناگون و مستقر بر خاک نرم با کمک نرم افزار PLAXIS بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییر زاویه ی ژئوتکستایل از 0° تا 9.5° درجه در خاک ماسه یی، باعث کاهش 53% درصدی ضریب اطمینان خاکریز شده است. اما تغییر زاویه ی اخیر، در خاک رسی تأثیر اندکی گذاشته است، به نحوی که با افزایش زاویه ی ژئوتکستایل از 0° تا 1° 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 ماسه یی به طور میانگین $3/14\%$ و در خاک رسی $2/125\%$ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش اخیر مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه ی قبل از گسیختگی، $64/6^\circ\%$ بیشتر شده است.

واژگان کلیدی: پایداری خاکریز، بهبود ضریب اطمینان، ژئوتکستایل، تسلیح خاک، نرم افزار PLAXIS.

۱. مقدمه

پروژه های ساخت بشر استفاده می شوند. این دسته از ژئوسنتتیک ها در واقع مانند منسوجاتی هستند که به جای کاربرد الیاف طبیعی، همانند نخ، ابریشم، یا پشم، از الیاف مصنوعی و عمدتاً پلیمری در آن ها استفاده می شود که متخلخل و نفوذپذیرند و از نظر ضخامت در ابعاد مختلف تولید می شوند.^[۱]

۱.۱. تاریخچه ی پژوهش

تاکنون مدل سازی های عددی بسیاری در زمینه ی تسلیح با ژئوتکستایل صورت گرفته است که از جمله می توان به مدل سازی با آزمایش CBR^۱ جهت تأثیر ژئوتکستایل در افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس مسلح شده با ژئوگرید و بررسی همبستگی آن ها اشاره کرد؛ که در نتیجه ی آن، با مسلح ساختن خاک و افزایش تعداد لایه های مسلح کننده و همچنین بهبود شرایط اندرکنش، مقدار مدول کشسانی و ظرفیت باربری خاک افزایش می یابد و باعث کاهش میزان کرنش

احداث سازه های روی خاک موجود در محل، حفاظت از گودبرداری ها و ساختمان های مجاور و بهینه سازی هزینه ی ساخت و ساز، همواره هدفی است که مهندسان به آن توجه دارند. در مواردی، با توجه به وزن و ابعاد سازه های مورد نظر، 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 می کند، اما در برابر نیروی کششی از خود مقاومت چندانی نشان نمی دهد. در چنین مواردی، روش های مختلفی برای بهبود خاک پیشنهاد شده است. از روش های رایج در دو دهه ی اخیر، استفاده از ژئوسنتتیک ها به عنوان مسلح کننده ی خاک را می توان برشمرد. استاندارد (ASTM D4439)، ژئوسنتتیک را چنین تعریف می کند: مواد و مصالحی پلیمری هستند که به همراه خاک، سنگ و یا دیگر مصالح مرتبط ژئوتکنیکی، در سازه ها و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۲۸، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2022.60708.3119

استناد به این مقاله:

مؤیدفر، رضا، مطهری، محمدرضا و سریدانی، بهزاد (۱۴۰۲). «مدل سازی عددی تأثیر زاویه ی قرارگیری ژئوتکستایل در لایه ی اساس و زیراساس روسازی راه»، مهندسی عمران شریف،

(۱۱) ۳۹-۲، ص. ۱۰۵-۱۱۳

گسیختگی می‌شود. در نوشتار عابدی و همکاران (۲۰۱۷)، با در برگرفتن ژئوگرید توسط لایه‌های ژئوتکستایل، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس از طریق افزایش اندرکنش سطح تماس بهبود یافته است.^[۲] مینا و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعاتی بر روی جاده‌های بدون آسفالت در هند که فقط با مشخصات خاک (چسبندگی و زاویه 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 مسلح‌کننده‌ی مذکور، گزارش شده است که در نتیجه‌ی افزایش مقاومت ژئوتکستایل‌ها، ضخامت لایه‌ی سنگدانه کاهش یافته است.^[۳] مطالعات ولاندی^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، نشان داده است که ژئوتکستایل به‌طور فرایندیهی 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 ضریب مجاز اطمینان و جابه‌جایی تعیین شده و نتایج نشان داده‌اند که ضریب اطمینان نمایل دارد با افزایش مقاومت کششی ژئوتکستایل مسلح‌کننده افزایش یابد. از آنجا که جابه‌جایی با افزایش استحکام کششی ژئوتکستایل اثر معنی‌داری نداشته است، برای تعیین مقاومت کششی مطلوب ژئوتکستایل، می‌توان پارامتر مذکور را نادیده گرفت.^[۴]

جلالی^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، با مطالعه‌ی رفتار روسازی انعطاف‌پذیر که دارای نتایج آزمون CBR مختلف بوده است، با کمک مدل‌سازی نرم‌افزار المان محدود تحت بارگذاری استاتیکی و با وجود مشخصات غیرخطی خاک در حالت زهکشی شده، به این نتایج دست یافتند که تشابه زیادی در مقدار جابه‌جایی سطح راه بین آزمون‌های عملی و مدل‌سازی با نرم‌افزار PLAXIS وجود دارد.^[۵] کرمانی (۲۰۱۸)، مطالعات متعددی در مورد تأثیر ژئوتکستایل به عنوان لایه‌ی جداساز و فیلتراسیون در جهت کاهش جابه‌جایی ریزدانه‌های خاک بستر اشباع به لایه‌ی زیراساس انجام داده و دریافته است که ریزدانه‌هایی که به لایه‌ی زیراساس نفوذ کرده‌اند، براساس درصد 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 خرابی شیارشدگی روسازی شده است.^[۶]

لین^۴ و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعات خود بر روی نوع جدیدی از ژئوتکستایل‌ها با بافت فینله مانند که برتری خاصی نسبت به ژئوتکستایل‌های رایج در زهکشی جانبی دارند، به این نتایج دست یافتند که با بهره‌گیری از ژئوتکستایل‌های مذکور می‌توان براساس طراحی استاندارد ایالات متحده، ضخامت لایه‌ی اساس را نزدیک به ۵۰٪ و همچنین عمق خرابی شیارشدگی سطح روسازی را تا ۳۵٪ کاهش داد.^[۷] نتایج مطالعات حلیمی و اسدی (۲۰۱۴)، در مورد تحلیل شیروانی‌ها نشان داده است که استفاده از مدل PLAXIS دوبعدی، نتایج نزدیک‌تری نسبت به مدل سه‌بعدی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی برای تعیین مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری قبل از گسیختگی خاکریز ارائه خواهد داد.^[۸] سیاوش‌نیا (۲۰۱۰)، در نوشتار خود با عنوان «ارزیابی خاکریز مسلح شده با ژئوتکستایل بر روی خاک رس نرم»، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، کاهش شیب خاکریز، مقاومت ژئوتکستایل و طول مؤثر ژئوتکستایل در رفتار خاکریز ماسه‌ی سیلپتی تقویت شده بر روی خاک رس نرم را بررسی کرده و دریافته‌اند که کاهش شیب و ارتفاع خاکریزی، عرض تاج و افزایش مقاومت ژئوتکستایل می‌تواند جابه‌جایی‌های سطح خاکریز را کاهش دهد. به نحوی که با اضافه کردن یک لایه‌ی ژئوتکستایل، جابه‌جایی قائم سطح خاکریز در حدود

۱۰٪ و جابه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. همچنین با کاهش ۳/۵ درصدی در شیب خاکریز، میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در پنجه‌ی خاکریز، ۲۶/۷٪ کاهش یافته است.^[۹]

برگادو^۵ و همکاران (۲۰۰۲)، در یک مطالعه‌ی موردی 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 دریافته‌اند که 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.^[۱۰] مجیدی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز در نوشتاری با عنوان «تأثیر مسلح کردن خاکریز در پایداری و نشست: تحلیل المان محدود بر انواع مختلف مسلح‌سازی و شرایط سازه»، به بررسی اثر سختی محوری ژئوگرید، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و زاویه‌ی شیب خاکریز در خاک رسی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS پرداخته و دریافته‌اند که استفاده از مسلح‌کننده‌ها، منجر به کاهش تغییرشکل سطح خاکریز و افزایش پایداری آن شده است، به گونه‌ی که با مسلح کردن خاکریز، جابه‌جایی افقی پنجه‌ی خاکریز بین ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش مقاومت ژئوگرید از $1250 (kN/m)$ به $5000 (kN/m)$ ، میزان ضریب اطمینان خاکریز در حدود ۹٪ افزایش یافته است.^[۱۱] خاکریز مدل‌سازی شده در نوشتار حاضر، در نرم‌افزار PLAXIS دوبعدی با یک مدل کرنش مسطح مدل‌سازی صورت گرفته و از المان ۱۵ گره‌بی (برای مدل کردن لایه‌های خاکی باید از اجزاء مثلثی ۱۵ گره‌بی و یا ۶ گره‌بی استفاده کرد)، جهت دقت بیشتر استفاده شده است. با توجه به اهداف پژوهش، باید به تعداد کافی مدل‌سازی صورت گیرد. به همین منظور، پارامترهای مقاومتی خاک، نظیر: مدول کشسانی، نسبت بواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کششی ژئوتکستایل به عنوان متغیرهای مستقل و ضریب اطمینان پایداری خاکریز به عنوان متغیر وابسته تعریف شده‌اند.

۲.۱. انواع ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌ها، در دو گروه عمده طبقه‌بندی می‌شوند. در صورتی که الیاف ساخته شده از آن‌ها توسط دستگاه‌های بافندگی و به صورت دو مجموعه‌ی نخ عمود بر هم (تار و پود) بافته شوند، نوع محصول به ژئوتکستایل بافته شده^۶ موسوم است. ژئوتکستایل بافته، عموماً استحکام و سفتی بالایی دارد. اگر الیاف به‌صورت نامنظم و تصادفی در کنار هم قرارگیرند و توسط روش‌های حرارتی، مکانیکی و یا شیمیایی به هم متصل شوند، ژئوتکستایل بافته نشده^۷ به‌وجود می‌آید. ژئوتکستایل بافته نشده، ویژگی‌های: استحکام، سفتی متوسط، خواص درازشدگی درگسیختگی 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 مدل‌سازی از هر دو نوع اخیر استفاده شده است. جهت انتخاب ژئوتکستایل، مشخصه‌ی جرم در واحد سطح، یکسان در نظر گرفته شده است.^[۱]

۳.۱. معیار انتخاب و کاربرد ژئوتکستایل در روسازی

ژئوتکستایل، یکی از اعضاء پرکاربرد خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌هاست که از مهم‌ترین خصوصیات آن‌ها می‌توان به: مقاومت کششی بالا، قابلیت اتساعی پایین‌تر برای کاهش خزش روی ژئوممبرین، مقاومت سوراخ‌شوندگی بالا، فیلتر مناسب و چشمه‌های با اندازه‌ی گوناگون اشاره کرد.^[۱۲] از جمله مهم‌ترین کاربردهای ژئوتکستایل می‌توان به‌عنوان: جداکننده و ایجاد مرز بین مصالح برای جلوگیری از ورود دانه‌های خاک از

جدول ۱. پارامترهای اولیه ی خاک. [۱۵، ۱۴]

	اساس		زیراساس	
	۱	۲	۱	۲
وزن مخصوص اشباع $\frac{kN}{m^3}$	۲۳/۵	۲۲	۱۶/۲	۲۰
وزن مخصوص غیراشباع $\frac{kN}{m^3}$	۲۲/۲	۲۰	۱۵/۵	۱۸
نفوذپذیری در جهت افقی $(\frac{m}{day})$	۱	۱	۱	۱
نفوذپذیری در جهت قائم $(\frac{m}{day})$	۱	۱	۱	۱
چسبندگی $(\frac{kN}{m^2})$	۱	۳۰	۱	۲۰
زاویه ی اصطکاک	۴۳	۴۳	۴۰	۴۰
زاویه ی اتساع	۱۳	۱۳	۱۰	۱۴
مدول کشسانی $(\frac{kN}{m^2})$	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۴۲۰۰	۵۰۰۰
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳
ضخامت (mm)	۲۵۰	۳۰۰	۳۸۰	۴۰۰

جدول ۲. خواص لایه ی زیر خاکریز.

پارامترها	خاک رس
وزن مخصوص اشباع $(\frac{kN}{m^3})$	۱۵
وزن مخصوص غیراشباع $(\frac{kN}{m^3})$	۱۸
نفوذپذیری در جهت افقی $(\frac{m}{day})$	۰/۰۱
نفوذپذیری در جهت قائم $(\frac{m}{day})$	۰/۰۱
چسبندگی $(\frac{kN}{m^2})$	۲۰
زاویه ی اصطکاک	۲۴
زاویه ی اتساع	۰
مدول کشسانی $(\frac{kN}{m^2})$	۱۰۰۰
نسبت پواسون	۰/۳۳
ضخامت (mm)	۴۰۰۰

پرداخته و مشاهده شده است تسلیح روسازی در بارگذاری استاتیکی، تأثیرگذار اما در بارگذاری دینامیکی، فقط برای بسامد بالا نتیجه بخش بوده است. نکته ی قابل توجه در این است که رویکرد مدل سازی در دو نوشتار اخیر به این صورت بوده است که هندسه ی مدل خاکریز به صورت کاملاً افقی و شرایط تکیه گاهی در سرتاسر مدل در نظر گرفته شده است؛ اما در مطالعه ی حاضر، هندسه ی مدل مشابه خاکریز اجرایی انتهای شیب خاکریز آزاد بوده است، تا جابه جایی مسلح کننده در پنجه ی خاکریز مشاهده شود. [۱۵، ۱۴]

با توجه به جدول ۱، فقط پارامتر R_{inter} باقی می ماند که برای معرفی میزان درگیری سطح تماسی بین دو سطح مختلف است. بنابراین مقدار ۱ برای ضریب مذکور در نظر گرفته شده است. [۱۶] همچنین برای خاک بستر نیز فرضیات جدول ۲ در نظر گرفته شده است. برای خاک بستر نیز خاک رسی خوب دانه بندی شده مدنظر بوده است. خاک های رسی تمایل به تورم ندارند، بنابراین زاویه ی اتساع برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت پواسون که حاصل از آزمایش های سه محوری زهکشی شده ی استاندارد است و در بیشتر موارد مقدار آن بین ۰/۳

لایه های مختلف، تقویت کننده ی مقاومت کششی خاک، زهکش مایعات و گازهای محبوس در لایه ی خاک و فیلتر جهت ایجاد مرزی پایدار بین خاک و زهکش در مسیر حرکت آب نام برد. از بین کاربردهای گوناگون ژئوتکستایل در نرم افزار عددی، فقط به عنوان تقویت کننده جهت افزایش مقاومت کششی خاک مد نظر قرار می گیرد. [۱]

۲. روش شناسی پژوهش

برای راستی آزمایی نرم افزار PLAXIS از نوشتاری با عنوان «مدل سازی عددی خاکریز بزرگراه با روش های مختلف بهسازی زمین»، استفاده شده است؛ که در آن، با مدل سازی خاکریز راه با نرم افزار PLAXIS برای مصالح متفاوت سعی بر یافتن بیشترین ضریب اطمینان شده است. همچنین برای مدل سازی از چهار نوع مصالح در مدل موهر - کلمب^۸، به صورت خاک ساده، خاک به همراه خاکستر بادی، خاک مسلح شده با ژئوگرید، و خاک به همراه خاکستر بادی و مسلح شده با ژئوگرید استفاده شده است. [۱۳]

جهت راستی آزمایی نیز در نوشتار حاضر، از حالت اول (خاک ساده) استفاده شده است. ضریب اطمینان به دست آمده در نوشتار اخیر، [۱۳] برای حالت اول، معادل ۱/۴۰۶ و ضریب اطمینان حاصل شده توسط نرم افزار PLAXIS در نوشتار حاضر، معادل ۱/۴۰۷ بوده است (مدل حاصل در دسترس است). بنابراین با استناد به نتایج به دست آمده، نرم افزار PLAXIS، قابلیت بررسی نوشتار حاضر را دارد.

۳. مدل سازی

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد فراوانی کاربرد و اهمیت ژئوتکستایل ها در شیروانی خاکی و برخلاف سایر مطالعات رایج که مسلح کننده های خاکریز در مرز بین خاک بستر و لایه های روسازی و یا مرز بین لایه های روسازی و رویه ی آسفالت قرار گرفته اند، در نوشتار حاضر، مسلح کننده ها در داخل لایه های اساس و زیراساس و با هدف تأثیر تغییر زاویه ی ژئوتکستایل با تغییر همزمان شیب گوهی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکستایل در دو نوع خاک رسی و ماسه یی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات قرار گرفته اند. جهت ساخت مدل در نرم افزار PLAXIS، نیاز به یک سری پارامتر اولیه است، پارامترهای مذکور از چند نوشتار، استخراج و بررسی شده اند.

۱.۳. مواد و روش ها

در نوشتار حاضر، برای مدل سازی خاکریز راه، علاوه بر هندسه ی مدل و تعیین شرایط محیطی، مهم ترین موضوع تعیین پارامترهای اولیه ی خاک بستر و لایه های روسازی بوده است (جدول ۱) که برای تعیین آن ها، از دو نوشتار با عنوان های «آنالیز اجزاء محدود روسازی انعطاف پذیر با ژئوگریدها» [۱۴] و «مدل سازی المان محدود با نرم افزار PLAXIS از روسازی آسفالتی مسلح شده با ژئوگرید» [۱۵] استفاده شده است که رویکردی مشابه با مطالعه ی حاضر داشته اند. با این تفاوت که در نوشتار اول، به بررسی و تحلیل روسازی با نرم افزار المان محدود پرداخته شده است، و علاوه بر استفاده از ژئوگرید، ضخامت لایه های روسازی را افزایش داده اند. در نتیجه، تغییر شکل سطح راه افزایش یافته است، ولی در تمامی حالت ها با حضور مسلح کننده، تغییر شکل سطح راه کاهش یافته است. در نوشتار دوم، به مدل سازی روسازی تسلیح شده و تسلیح نشده با ژئوگرید به همراه بارگذاری دینامیکی و استاتیکی در نرم افزار 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	۷	< Phase ۰ >
۵	Staged construction	Consolidation analysis	۷	۱	< Phase ۱ >
۲۰۰	Staged construction	Consolidation analysis	۱	۲	< Phase ۲ >
۵	Staged construction	Consolidation analysis	۲	۶	< Phase ۳ >
-	Minimum Pore pressure	Consolidation analysis	۶	۴	< Phase ۴ >
-	Incremental multipliers	Phi/c reduction	۴	۵	< Phase ۵ >

جدول ۴. شرایط در نظر گرفته شده در ساخت مدل.

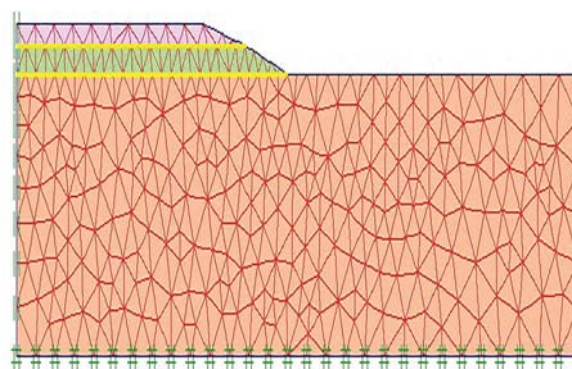
زاویه ی ژئوتکستایل (درجه)	مقامت های ژئوتکستایل (kN/m)	شیب های خاکریز	نوع خاکریز
$۰/۹۵ - ۰/۷۲ - ۰/۴۸$	$۱۴ - ۴۰$	$۰/۲۴ - ۰/۱۸$	۱
$۰/۰۱ - ۲/۳۴ - ۱/۶۷$	$۱۴ - ۴۰$	$۰/۲۳ - ۰/۱۸$	۲

شرایط اولیه ی پروژه به ایجاد فشارهای آب، غیرفعال کردن سازه ها و بارها و ایجاد تنش های 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 ی توده ها جهت تولید فشارهای منفذی تخصیص داده شده است. سطح ایستابی آب زیرزمینی $۵/۰$ متر از سطح زمین اصلی پایین تر است.

۲.۳. آنالیز مدل

پس از معرفی هندسه ی مدل و تکمیل قسمت ورودی مدل سازی، نوبت به آنالیز مدل می رسد. 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 تحکیم، لایه ی زیراساس در مدت ۵ روز ساخته و در فاز بعدی، همان لایه به مدت ۲۰۰ روز آنالیز تحکیم انجام شده است. مجدداً برای لایه ی اساس، با آنالیز تحکیم در ۵ روز، ساخت آن مدل شده و در مرحله ی بعد برای بررسی رفتار خاکریز در سال های آینده، آنالیز تحکیم تا زائل شدن کامل فشار آب حفره یی و با استفاده از گزینه ی Minimum pore pressure انجام شده است. برای دستیابی به میزان ضریب اطمینان که شروع آن از انتهای مرحله ی قبل آغاز و با آنالیز Ignore undrained 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 مدل ها 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 ژئوتکستایل از نظر مقاومت و با ۴ زاویه ی گوناگون نسبت به افق برای ژئوتکستایل که این شرایط در جدول ۴ ارائه شده است، باعث ایجاد ۳۲



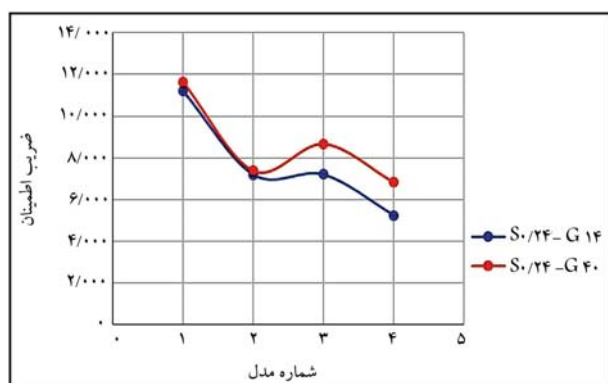
شکل ۱. تصویری از مش.

تا $۴/۰$ است، به همین دلیل در نوشتار حاضر نسبت پواسون معادل $۳۳/۰$ فرض شده است.^[۱۶] همچنین، برای نشان دادن دانه بندی خوب با نفوذپذیری پایین، مقدار نفوذپذیری در هر دو جهت افقی و قائم برابر $۱/۰$ فرض شده است. پس از ایجاد مدل هندسی و تعیین مشخصات مصالح، هندسه ی مدل باید به المان های محدود به منظور انجام محاسبات المان محدود تقسیم شود. مش بندی در نرم افزار PLAXIS به صورت خودکار برای تمام مدل انجام شده است که برای افزایش دقت در محاسبات، مش بندی مطابق شکل ۱، ریز در نظر گرفته شده است.

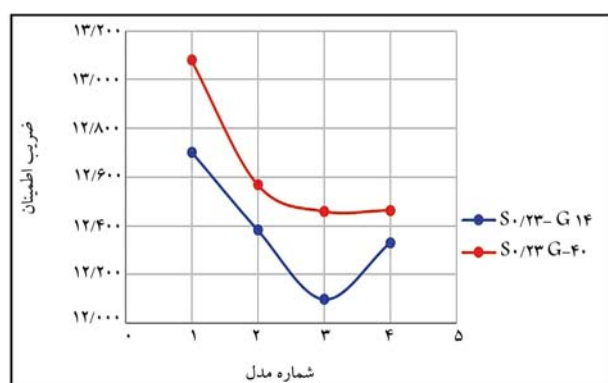
معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک ها، بسته به هدف مورد نظر لازم است که در نوشتار حاضر، از مدل موهر-کلمب استفاده شده است. با نرم افزار مذکور می توان خاک برداری و خاکریزی مرحله یی با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان های مثلثی ۶ گرهه یی و ۱۵ گرهه یی مدل سازی کرد. با توجه به اینکه در مرزها در جهت های خاصی، مدل از لحاظ حرکت و تغییر شکل محدود است، کمینه ی ابعاد مدل باید طوری باشد که شرایط مرزی در نتایج تأثیرگذار نباشد.

جدول ۵. ضریب اطمینان مدل‌های ایجاد شده.

نوع خاکریز	شماره‌ی مدل	ضریب اطمینان	شماره‌ی مدل	ضریب اطمینان	شماره‌ی مدل	ضریب اطمینان	شماره‌ی مدل	نوع خاکریز
۲	۱	۱۲/۷۰۳	۵	۱۳/۰۸۰	۹	۱۳/۱۵۹	۱۳	۱۴/۵۰۲
	۲	۱۲/۳۸۲	۶	۱۲/۵۶۸	۱۰	۱۳/۰۱۶	۱۴	۱۳/۱۵۹
	۳	۱۲/۰۹۸	۷	۱۲/۴۵۹	۱۱	۱۳/۰۱۸	۱۵	۱۳/۰۷۸
	۴	۱۲/۳۳۰	۸	۱۲/۴۶۴	۱۲	۱۲/۹۵۳	۱۶	۱۴/۲۵۴
۱	۱۷	۱۱/۱۹۸	۲۱	۱۱/۶۲۳	۲۵	۱۲/۸۵۲	۲۹	۱۲/۰۵۱
	۱۸	۷/۱۹۶	۲۲	۷/۳۹۱	۲۶	۷/۰۲۵	۳۰	۹/۹۵۶
	۱۹	۷/۲۰۳	۲۳	۸/۶۷۹	۲۷	۹/۷۷۷	۳۱	۱۰/۹۸۹
	۲۰	۵/۲۵۰	۲۴	۶/۸۳۹	۲۸	۱۰/۳۴۲	۳۲	۹/۰۳۴



شکل ۲. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به نوع ژئوتکستایل در خاک ماسه‌یی.



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 تغییر شکل مسلح‌کننده، نشان‌دهنده‌ی تغییر سطح

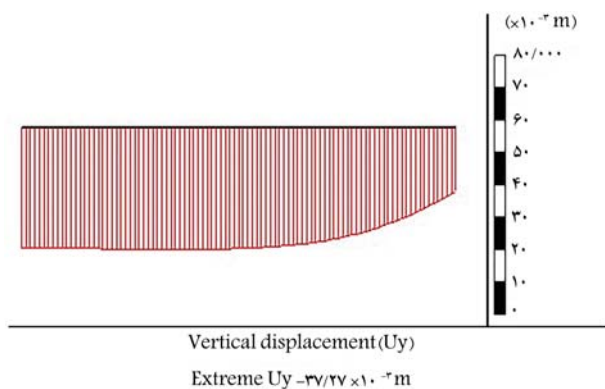
مدل شده است. ضرایب اطمینان شیروانی خاکریز برای تمامی مدل‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

۴. بحث و نتایج

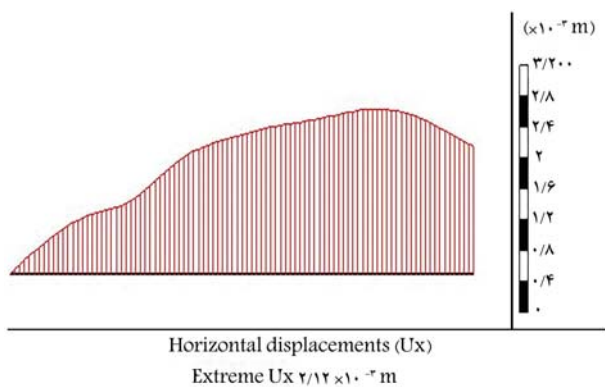
با توجه به تعداد بالای نمودارها، برای نام‌گذاری آن‌ها به این صورت عمل شد که به عنوان مثال $S_{0/24} - G_{14}$ یعنی مدل با شیب خاکریز 24° و مقاومت ژئوتکستایل 14 (kN/m) است. با نام‌گذاری ذکر شده (در شکل‌های ۲ و ۳) این نتیجه حاصل شد که با شیب خاکریز برابر و مقایسه با زاویه‌ی مساوی با افزایش حدود $2/86$ برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به طور میانگین $14/31\%$ و در خاک رسی، $2/125\%$ افزایش یافته است. در سایر مطالعات به این نتیجه دست یافتند که با ۴ برابر کردن مقاومت مسلح‌کننده، ضریب اطمینان خاکریز در حدود $8/69\%$ افزایش یافته است.^[۱۱]

همچنین با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، با بررسی ضریب اطمینان در حالت وجود مسلح‌کننده با مقاومت و زاویه‌ی قرارگیری یکسان با کاهش حدود $33/33$ درصدی شیب خاکریز، به طور میانگین در خاک ماسه‌یی $24/22\%$ و در خاک رسی $8/74\%$ افزایش در میزان ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. با بررسی دیگر نوشتارها، پس از تغییر شیب خاکریز از $(1 : 1)$ به $(2 : 1)$ ، مقدار ضریب اطمینان $33/5\%$ افزایش یافته است که به نتیجه‌ی بررسی مطالع‌ی حاضر در خاک ماسه‌یی نزدیک بوده است.^[۱۱] همچنین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که با ثابت بودن تمامی پارامترها و فقط با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا 95° درجه در خاک درشت‌دانه، ضریب اطمینان خاکریز در حدود 53% کاهش یافته است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا $2/1^\circ$ درجه، کاهش $2/9$ درصدی در ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. بنابراین، بهینه‌ترین حالت برای قرارگیری مسلح‌کننده در لایه‌های روسازی به صورت افقی است.

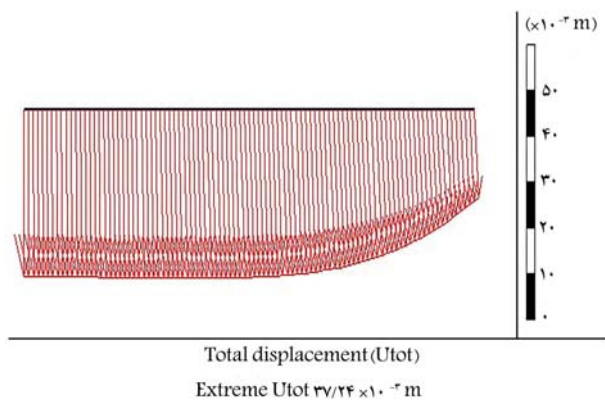
در شکل‌های ۸ الی ۱۱، تغییر شکل‌های قائم، افقی، کلی و میزان نیروی وارد بر ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس و در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵، در لایه‌ی زیراساس پس از انتهای تحکیم با بزرگ‌نمایی 5° برابر به همراه مقیاس کنار شکل مشاهده می‌شوند که



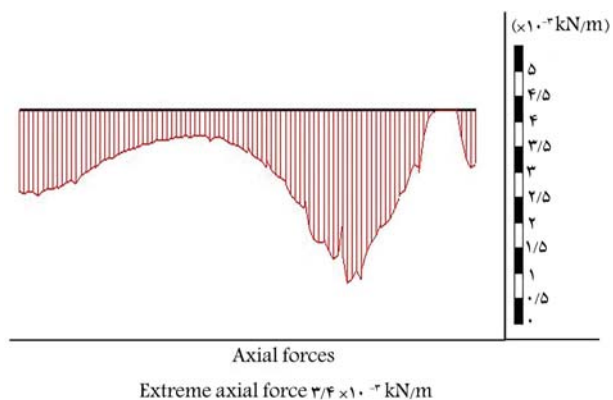
شکل ۸. تغییرمکان قائم ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



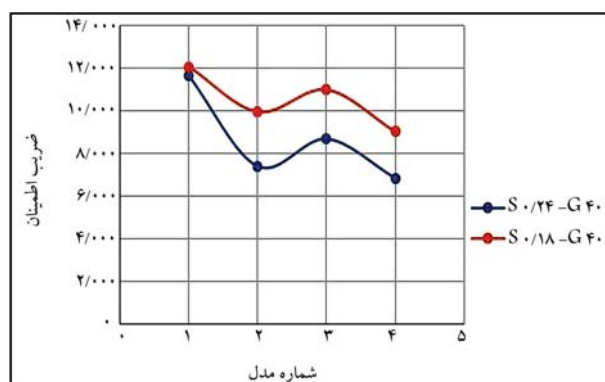
شکل ۹. تغییرمکان افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



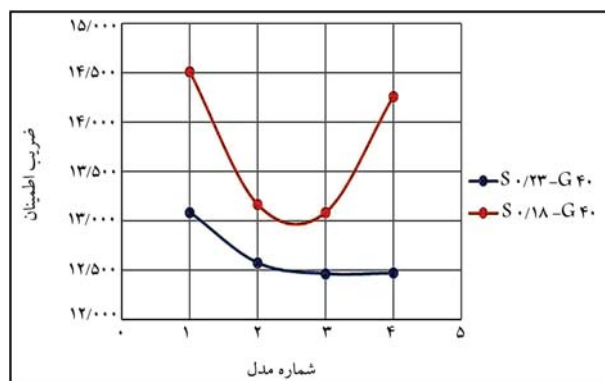
شکل ۱۰. تغییرمکان کلی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی اساس.



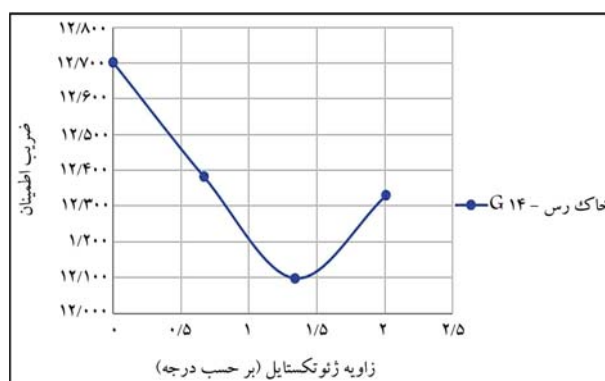
شکل ۱۱. میزان نیروی وارده به ژئوتکستایل در لایه‌ی اساس.



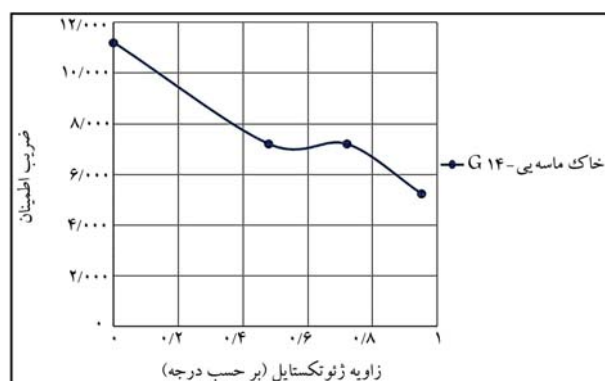
شکل ۴. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک ماسه‌یی.



شکل ۵. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به شیب خاکریز در خاک رسی.



شکل ۶. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه‌ی ژئوتکستایل در خاک رسی.



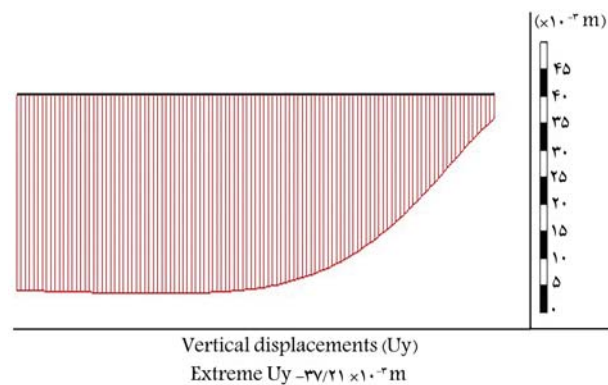
شکل ۷. ضریب اطمینان پایداری خاکریز با توجه به زاویه‌ی ژئوتکستایل در خاک ماسه‌یی.

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.

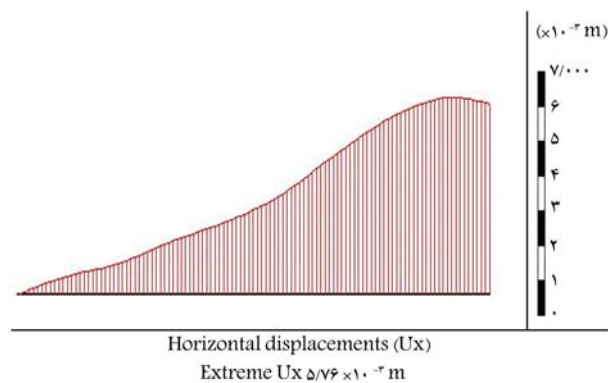
همچنین در شکل ۹، بیشترین تغییرشکل افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم، معادل ۲/۱۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد در پنجه‌ی خاکریز، ژئوتکستایل تمایل حرکت به سمت بیرون خاکریز را داشته است. در شکل ۱۰، تصویری از تغییرشکل کلی ژئوتکستایل که نمایی از مجموع حرکت افقی و قائم خاکریز است، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مربوط به پاشنه‌ی خاکریز، معادل ۳۷/۳۱ 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 ۳۷/۲۱ میلی‌متر و بیشینه‌ی تغییرمکان افقی معادل ۵/۷۶ میلی‌متر و در نهایت برابند تغییرمکان‌های 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 0.034 (kN/m) و در لایه‌ی زیراساس معادل 0.1624 (kN/m) بوده است، نتایج نشان می‌دهد که ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس نسبت به لایه‌ی زیراساس، ۷۹/۰۶٪ 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.

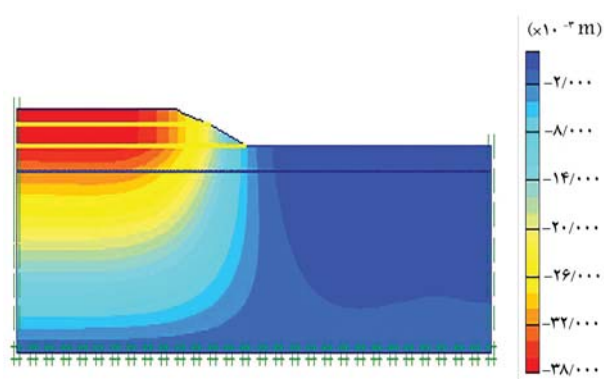
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، یک نمای کلی از خاکریز که میزان تغییرشکل‌های



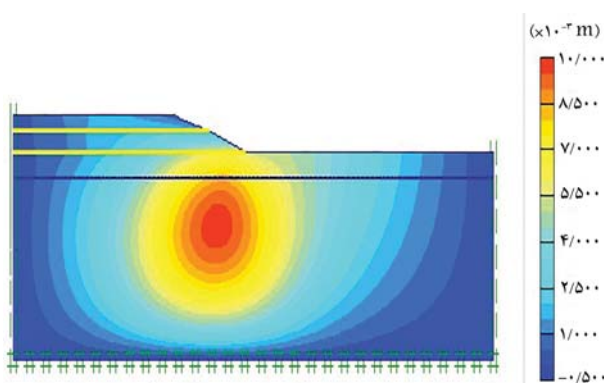
شکل ۱۲. تغییرمکان قائم ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیراساس.



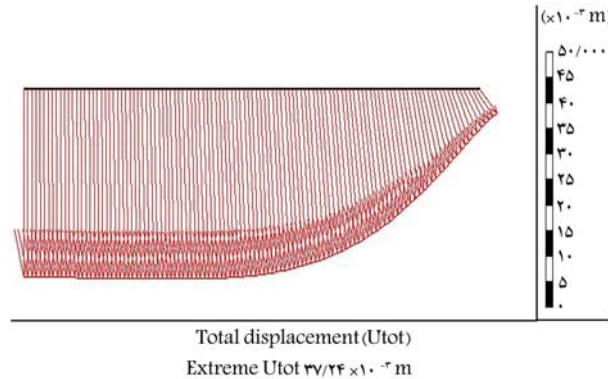
شکل ۱۳. تغییرمکان افقی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیراساس.



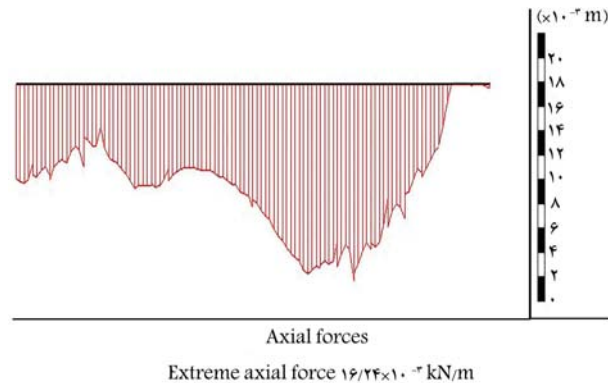
شکل ۱۶. میزان نشست بعد از تحکیم نهایی.



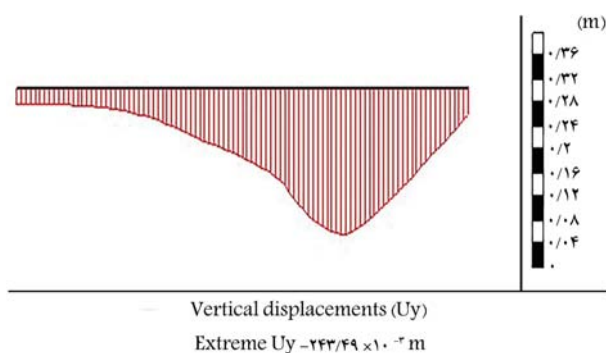
شکل ۱۷. میزان تغییرمکان جانبی بعد از تحکیم نهایی.



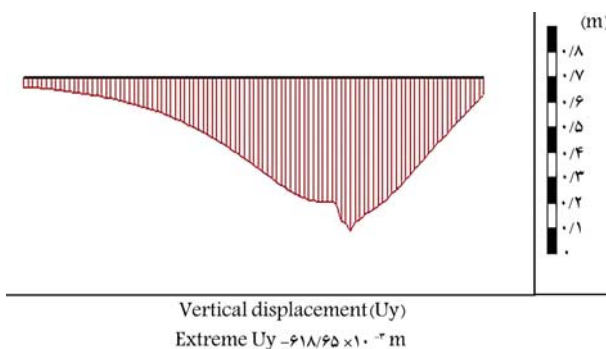
شکل ۱۴. تغییرمکان کلی ژئوتکستایل پس از تحکیم در لایه‌ی زیراساس.



شکل ۱۵. میزان نیروی وارد به ژئوتکستایل در لایه‌ی زیراساس.



شکل ۱۸. تغییر مکان قائم ژئوتکستایل با مقاومت 14 (kN/m) در لحظه‌ی شکست در لایه‌ی اساس.



شکل ۱۹. تغییر مکان قائم ژئوتکستایل با مقاومت 40 (kN/m) در لحظه‌ی شکست در لایه‌ی اساس.

لایه‌های روسازی را پس از فرایند تحکیم نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، بیشینه‌ی میزان تغییر شکل‌های قائم در پاشنه‌ی خاکریز و تغییر شکل جانبی قابل توجه در پنجه‌ی خاکریز بوده است. قابل ذکر است که جابه‌جایی‌های ژئوتکستایل نیز تأییدکننده‌ی تغییر شکل‌های لایه‌های روسازی است. نحوه‌ی تغییر شکل در خاکریز مشابه با نتایج به‌دست آمده در سایر نوشتارهاست.^[۱۱] 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 $2/86$ برابری در مقاومت ژئوتکستایل، میزان نشست مسلح‌کننده در کف لایه‌ی اساس از $243/49$ میلی‌متر به $618/65$ میلی‌متر، یعنی به میزان $64/60\%$ 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 هم‌زمان شیب گوه‌ی خاکریز و مقاومت کششی ژئوتکستایل در دو نوع خاک رسی و ماسه‌یی جهت دستیابی به ضریب اطمینان بیشتر نسبت به سایر مطالعات صورت گرفته است. جهت ساخت مدل‌ها در نرم‌افزار

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 در نهایت ۳۲ مدل به دست آمده است، به منظور بررسی و مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر استفاده شده است.

۱. با افزایش حدود $2/86$ برابری مقاومت ژئوتکستایل، ضریب اطمینان در خاک ماسه‌یی به‌طور میانگین $14/31\%$ و در خاک رسی به‌طور میانگین $2/125\%$ افزایش یافته است، که نشان از اهمیت بیشتر وجود مسلح‌کننده در خاک ماسه‌یی است.

۲. ژئوتکستایل موجود در لایه‌ی اساس نسبت به لایه‌ی زیراساس، $79/06\%$ نیروی کمتری را تحمل کرده است. بنابراین می‌توان برای افزایش بهره‌وری و بهینه‌شدن طرح، مسلح‌کننده‌ی داخل لایه‌ی اساس را با مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی زیراساس انتخاب کرد.

۳. با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا $95/0^\circ$ درجه در خاک درشت‌دانه، ضریب اطمینان خاکریز در حدود 53% کاهش یافته است. اما در خاک ریزدانه با افزایش زاویه‌ی ژئوتکستایل نسبت به افق از 0° تا $2/01^\circ$ درجه، ضریب اطمینان $2/9\%$ کاهش یافته است. بنابراین، بهینه‌ترین حالت برای قرارگیری مسلح‌کننده در لایه‌های روسازی به‌صورت افقی است.

۴. با توجه به هندسه‌ی مدل، بیشترین میزان نشست مربوط به پاشنه‌ی خاکریز و بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی مربوط به پنجه‌ی خاکریز است. همچنین تغییر شکل کلی لایه‌های روسازی (اساس و زیراساس) با هم برابر و مشابه بوده است.

۵. با افزایش حدود $2/86$ برابری در مقاومت ژئوتکستایل، میزان نشست مسلح‌کننده در لحظه‌ی گسیختگی در کف لایه‌ی اساس به میزان $64/60\%$ افزایش یافته است. بنابراین با افزایش مقاومت ژئوتکستایل، حد نشست خاکریز تا لحظه‌ی قبل از گسیختگی خاکریز بیشتر شده است.

۶. با کاهش حدود $33/33$ درصدی شیب خاکریز، به‌طور میانگین در خاک ماسه‌یی، $24/22\%$ و در خاک رسی، $8/74\%$ 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 به‌صورت مجزا 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 جابه‌جایی سطح روسازی بررسی شود.

۶. بیانیه‌ی در دسترس بودن داده‌ها

تمام داده‌ها، مدل‌ها، و نتایج خروجی نرم‌افزار، که یافته‌های مطالعه‌ی حاضر را پشتیبانی می‌کنند، براساس درخواست منطقی از نویسنده‌ی مسئول نوشتار در دسترس است.

پانویس‌ها

1. California Boring Ratio

2. Wulandari
3. Djellali
4. Lin

5. Bergado
6. Woven
7. Non-Woven
8. Mohr-Coulomb

منابع (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., Galinmoghdam, 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", 2nd, Tabriz, Frozsh, (In Persian) (1393/2015).

اعتبارسنجی مدل‌های آشفستگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵°

وحید بابایی‌نژاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران - آب، دانشگاه امیرکبیر

رضا حاجی سیدمحمد شیرازی* (استادیار)

گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

مهندسی عمران شریف (پهار ۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۱۱۵-۱۲۳، (پادداشت نوی)

پساب شور کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود. در صورت تخلیه‌ی مناسب پساب، آثار زیست‌محیطی شیرین‌سازی آب کاهش می‌یابد. مدل‌های عددی، یکی از بهترین روش‌ها برای شناخت رفتار پساب تخلیه شده در محیط آبی هستند. در پژوهش حاضر، به اعتبارسنجی مدل‌های آشفستگی (SST) $k - \omega$ و Standard و RNG $K - \varepsilon$ برای تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل‌های دایره و مربع پرداخته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، مدل‌های Standard، SST و RNG، مقدار Z را به ترتیب با خطایی در حدود ۱۷-۲۴، ۱۲-۵ و ۱۷-۹ درصد تخمین زده‌اند. مقدار S_{rm} توسط مدل Standard با ۱۹-۲۴ درصد خطا و توسط مدل SST نیز با ۲۵-۳۰ درصد خطا برآورد شده است. مدل RNG عملکرد بهتری داشته و مقدار S_{rm} را با خطای ۱۳-۱۸ درصد پیش‌بینی کرده است. مدل‌های Standard، SST و RNG، مقدار S_i را به ترتیب در حدود ۲۵، ۳۵ و ۲۰ 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 رابطه 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 بلافاصله به سمت بستر دریا حرکت می‌کند که این موضوع باعث افزایش غلظت نمک سیال محیط پذیرنده در نزدیکی محل تخلیه می‌شود.^[۱] 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.^[۲] پساب‌های تولیدی به دو صورت سطحی (لوله 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 مثبتی که در جهت تأمین آب موردنیاز دارند، می‌تواند مشجر 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 نحوه‌ی پخش پساب‌ها در

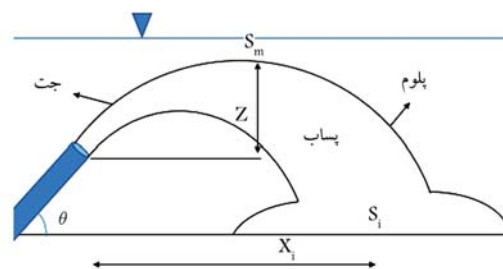
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2022.61208.3154

استناد به این مقاله:

بابایی‌نژاد، وحید و حاجی سیدمحمد شیرازی، رضا (۱۴۰۲). «اعتبارسنجی مدل‌های آشفستگی برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵°»، مهندسی عمران شریف، (۱)، ۲-۳۹، ص. ۱۱۵-۱۲۳



شکل ۱. مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل.

و تا لحظه‌ای اختلاط کامل پساب با سیال محیط پذیرنده ادامه می‌یابد. در میدان نزدیک، پساب در دو مرحله با سیال محیط پذیرنده ترکیب می‌شود. در مرحله 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 خروجی می‌شود. مرحله‌ی دوم هنگامی آغاز می‌شود که 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 جت و اگر $F < 1$ باشد، رفتار سیال به صورت پلوم است). با توجه به اینکه چگالی پساب نسبت به چگالی سیال محیط پذیرنده بیشتر است، پلوم به دلیل شار شناوری به سمت بستر محیط آبی سقوط می‌کند.^[۵۳] میزان رقیق‌سازی پساب در میدان نزدیک، بسیار بیشتر از میدان دور است.^[۷۶]

میزان رقیق‌شدگی پساب (S) (در اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه از پایین دست محل تخلیه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

عدد فرود جت نیز به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{U}{\sqrt{Dg'_i}} \quad (2)$$

شتاب گرانش اصلاح شده به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$g'_i = g \frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \quad (3)$$

با توجه به اینکه تخلیه‌ی پساب ناشی از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن و دیگر صنایع به آب دریاها و اقیانوس‌ها باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست و آبریزان 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 ارائه داده‌اند. فرناندز^۱ و همکاران (۲۰۱۲)، به مقایسه‌ی نتایج ارائه شده توسط ۴ مدل انتگرالی UM3، CORJET، CORMIX و MEDVSA برای تخلیه‌ی پساب چگال در محیط آبی پرداخته و دریافته‌اند که همه‌ی مدل‌ها به جز مدل UM3، نتایج مربوط به رقیق‌سازی پساب، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین را با خطای بالایی در مقایسه با نتایج تجربی برآورد کرده‌اند.^[۸] پالمرو و همکاران (۲۰۱۲)، به منظور اعتبارسنجی مدل‌های CORJET، VISJET و UM3، نتایج به دست آمده برای تخلیه‌ی پساب چگال در محیط ساکن و پویا توسط مدل‌ها را با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلف مقایسه کرده 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

فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل را با اختلاف بالایی در مقایسه با نتایج تجربی تخمین می‌زنند. همچنین مدل‌های VISJET، CORJET و UM3 میزان رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و رقیق‌سازی در محل برخورد پساب به زمین را در محیط ساکن با خطایی در حدود ۶۵-۵۰ درصد (در مقایسه با نتایج مطالعه‌های تجربی) برآورد کرده‌اند.^[۹] فرناندز و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی استفاده از دیفیوزر در میزان 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.^[۷] جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، 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 میزان 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 هم‌آوری بیشتر سیال محیط به درون جت و در نتیجه افزایش میزان اختلاط پساب با سیال محیط می‌شود.^[۱۱، ۱۵] یان^۲ و محمدیان (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل‌های Standard ($k - \varepsilon$) و RNG ($k - \varepsilon$) به شبیه‌سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده با استفاده از نازل‌های چندپورتی پرداخته‌اند. طبق نتایج ایشان، مدل‌های عددی قابلیت خوبی در شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های چندپورتی دارند. همچنین مدل RNG عملکرد بهتری در مقایسه با مدل Standard دارد.^[۱۳]

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 در نظر نگرفتن آشفتگی جریان، قابل اعتماد نیستند و این مدل‌ها معمولاً میزان رقیق‌سازی پساب را در مقایسه با مطالعه‌های تجربی با خطای بالایی تخمین می‌زنند. به همین دلیل در پژوهش حاضر، برای اولین بار به اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی SST ($k - \omega$)، Standard ($k - \varepsilon$) و RNG ($k - \varepsilon$) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT برای 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^۳، LES^۴ و RANS^۵ برای مدل‌سازی عددی در جریان‌های مختلف قابل استفاده هستند. استفاده از مدل‌های DNS و LES، دقت و هزینه‌ی محاسبات را بالا می‌برد.^[۱۴] مدل‌های (RNG، Standard، $k - \varepsilon$)، توانایی بالایی در شبیه‌سازی رفتار پساب تخلیه شده به صورت جت مستغرق مایل دارند.^[۱۳] مدل (SST) $k - \omega$ ، نیز یکی از مدل‌های پرکاربرد در زمینه‌ی شبیه‌سازی جت تخلیه شده در محیط آبی است و عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رفتار جت دارد.^[۱۵] مدل‌های SST، Standard و RNG، هزینه‌ی محاسباتی کمتری نسبت به مدل‌های LES و DNS دارند و نتایج مناسبی را نیز ارائه می‌دهند.^[۱۳] به همین دلیل، در پژوهش حاضر برای اولین بار به اعتبارسنجی مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی رفتار پساب

۱.۳. 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 سباب چگال تخلیه شده در محیط آبی انجام شده است. جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۰] با در نظر گرفتن یک جریان آشفته در یک محیط آبی ساکن نشان دادند که در آنالیز ابعادی، همه پارامترها تابعی از دبی جرمی (Q)، شارمونت (M) و شار شناوری (B) هستند، که توسط یک ضریب تناسب به صورت مقیاس طولی (رابطه 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 مونتوم (L_M) به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شوند:

$$L_Q = Q/M^{0.5}, L_M = (M^{0.75})/(B^{0.5}) \quad (8)$$

با استفاده از تقریب بوسینسک و با توجه به اینکه $L_Q \ll L_M$ ، می‌توان گفت: $L_M = 0.94 D.F$. بنابراین برای یک زاویه ثابت، پارامترهای مختلف تخلیه‌ی سباب چگال، تابعی از عدد فرود و قطر تخلیه‌کننده هستند که در حالت بی‌بعد، آن‌ها به صورت: $Z/F.D = N_1$ ، $S_i/F = N_2$ ، $S_m/F = N_3$ ، $X_i/F.D = N_4$ بیان می‌شوند. N_1 ، N_2 ، N_3 و N_4 ضرایب 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, SST, RNG برای تخلیه‌ی سباب چگال با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی جیانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۰] مقایسه شده‌اند. سباب از نازل‌های مربع و دایره در محیط ساکن به صورت مستغرق مایل ($\theta = 45^\circ$) تخلیه شده است. میزان خطا بین دو عدد با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$E = [(J_E - J_N)/J_E] * 100 \quad (9)$$

۱.۴. فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد سباب به زمین از تخلیه‌کننده

(X_i)

در شکل ۲، نتایج مربوط به پارامتر بی‌بعد فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد سباب به زمین نازل‌های دایره (شکل ۲الف) و مربع (شکل ۲ب) با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵ درجه برای اعداد فرود ۱۱، ۱۷ و ۲۶ مشاهده می‌شود. مقدار X_i/D 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)، ممتوم جت افزایش یافته و به همین دلیل سباب در فاصله‌ی دورتری از نازل با بستر محیط پذیرنده برخورد کرده است.^[۱۸] با توجه به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۰] مقدار X_i/D برای نازل‌های مختلف متفاوت و مقدار X_i/D برای نازل دایره بیشتر از نازل مربع بوده است. اما مدل‌های عددی، مقدار X_i/D را برای هر دو نازل،

چگال تخلیه شده در محیط ساکن از نازل‌های دایره و مربع با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵° پرداخته شده است. در مدل RNG، مقدار K (انرژی جنبشی آشفتگی) و ε (نرخ استهلاك) به ترتیب از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند:^[۱۶]

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

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

که در آن‌ها، $\mu_{t,m}$ لزجت آشفتگی و $G_{k,m}$ انرژی سینماتیک آشفتگی هستند. همچنین مقدار $C_{1\varepsilon}^*$ مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

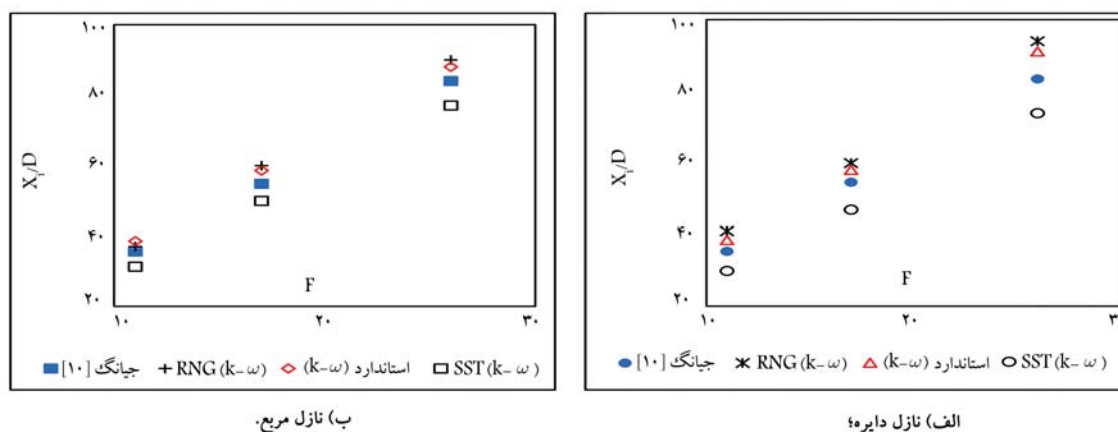
$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_*} \right)}{1 + \beta \eta^2} \quad (6)$$

مقدار ثابت‌های معادله‌های اخیر، عبارت‌اند از: $\beta = 0.012$ ، $\eta_* = 4/377$ ، $C_{2\varepsilon} = 1/68$ ، $C_{1\varepsilon} = 1/44$ ، $\sigma_\varepsilon = 1$ ، برای اختصار، معادله‌های مدل‌های Standard, SST در نوشتار حاضر ارائه نشده است. اطلاعات کامل در مورد آن‌ها در برخی مراجع^[۱۷,۱۲] موجود است.

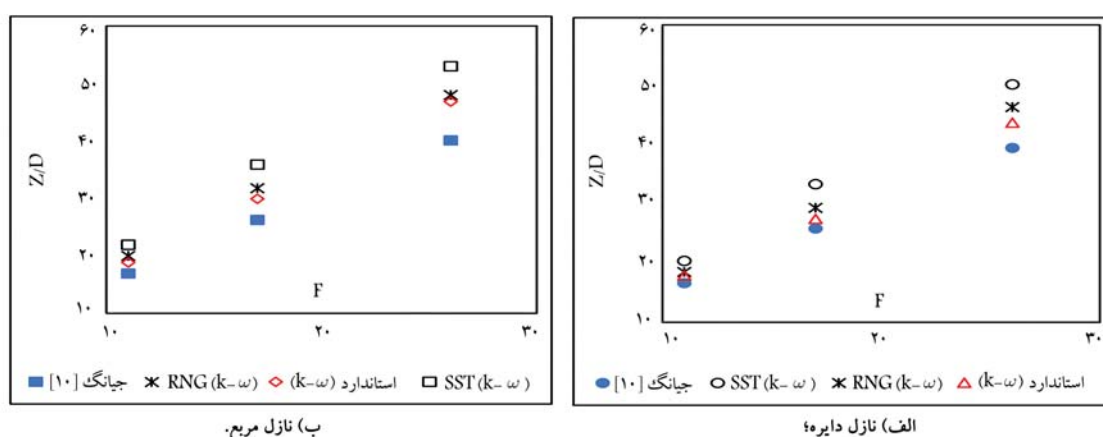
۳. مدل سازی

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌های آشفتگی Standard, SST, RNG به شبیه‌سازی رفتار سباب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع پرداخته شده است. سپس به منظور اعتبارسنجی مدل‌های آشفتگی، نتایج مدل‌ها با نتایج مطالعه‌های مختلف مقایسه شده‌اند. سباب به صورت جت مستغرق مایل ($\theta = 45^\circ$) در محیط ساکن از نازل‌های دایره و مربع با عدد فرود ۱۱ ($U = 0.52 \text{ m/s}$)، $U = 0.79 \text{ m/s}$ و $U = 1.21 \text{ m/s}$ تخلیه شده است. سطح مقطع هر دو نازل یکسان و برابر $28/50 \text{ mm}^2$ با قطر معادل $mm(D_e)$ بوده است. D_e به عنوان قطر دایره‌ی برابر با مساحت یک ناحیه‌ی غیردایره‌ی تعریف شده است. چگالی سباب تولیدی برابر $26/10 \text{ kg/m}^3$ بوده است که در یک محیط آبی با چگالی 998 kg/m^3 تخلیه شده است. اختلاف دمای بین سباب و سیال محیط پذیرنده، صفر بوده است.

برای شبیه‌سازی، ابتدا هندسه‌ی مدل در نرم‌افزار SPACE-CLAIM^[۱۲] طراحی و سپس با استفاده از ANSYS-MESHING^[۱۲] مش‌زنی صورت گرفته است. در نزدیکی محل تخلیه از مش‌های با طول بسیار کم استفاده شده و با افزایش فاصله از محل تخلیه، طول مش‌ها نیز افزایش یافته است. بعد از مش‌زنی، مدل جهت مقداردهی وارد نرم‌افزار FLUENT شد. برای دهانه‌ی نازل از شرط مرزی Velocity Inlet، برای بستر محل تخلیه از شرط مرزی No Slip و برای دیواره‌های اطراف محل تخلیه از شرط مرزی Symmetry استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از مدل‌های آشفتگی Standard, SST, RNG و برای ثابت‌های مدل از پیش‌فرض‌های نرم‌افزار استفاده شده است. برای مدل‌های Standard, RNG، گام زمانی ۰/۰۳ ثانیه و برای مدل SST، گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه انتخاب شده است. به جهت اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان، مدت زمان شبیه‌سازی، ۱۰۰ ثانیه انتخاب شده است.



شکل ۲. نتایج مدل‌های SST، Standard، و RNG برای فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل‌های مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰].



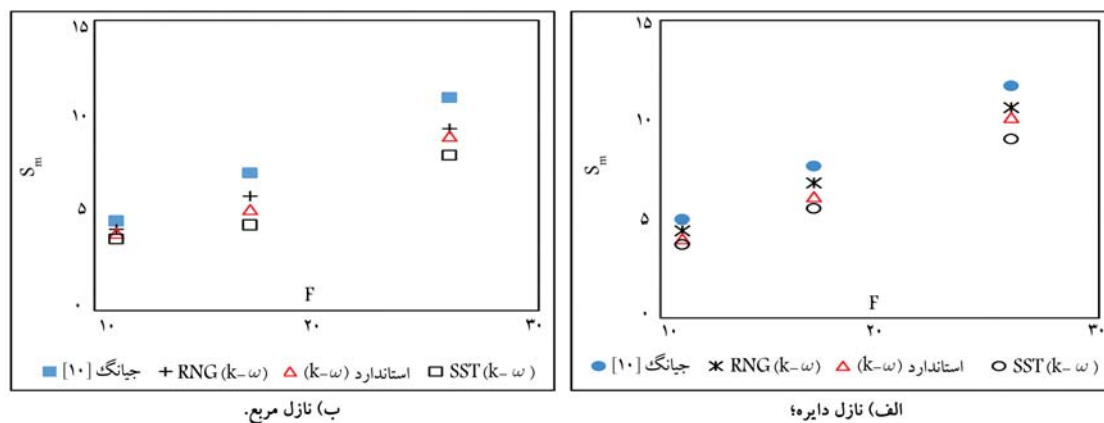
شکل ۳. نتایج مدل‌های SST، Standard، و RNG برای ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت نازل‌های مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران [۱۰].

درجه تخلیه شده است. با افزایش عدد فرود، مقدار Z/D برای همه‌ی نازل‌ها 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 همآوری بیشتر سیال به درون جت تخلیه شده از نازل دایره نسبت به نازل مربع بوده است. همآوری سیال به درون جت باعث کاهش سرعت محوری جت و در نتیجه کاهش ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت شده است. [۴] مدل SST مقدار Z/D را برای هر دو نازل در مقایسه با مطالعه‌ی آزمایشگاهی دست‌بالا تخمین زده است. SST مقدار Z/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با $23/5$ و $24/6$ درصد خطا پیش‌بینی کرده است. مدل RNG نسبت به مدل SST عملکرد بهتری داشته و مقدار Z/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با $13/6$ و $16/7$ درصد خطا برآورد کرده است. اما مدل Standard در مقایسه با دو مدل دیگر با اختلاف کمتری مقدار Z/D را برای نازل‌ها تخمین زده است. مدل Standard مقدار Z/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با 8 و $12/4$ درصد خطا نسبت به مطالعه‌ی تجربی دست‌بالا پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار Z/D برای نازل‌های مختلف مقدار متفاوتی داشته است که این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیرگذاری هندسه‌ی نازل در مقدار Z است. طبق نتایج، مدل‌های آشفتگی تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار Z را به خوبی تشخیص داده‌اند.

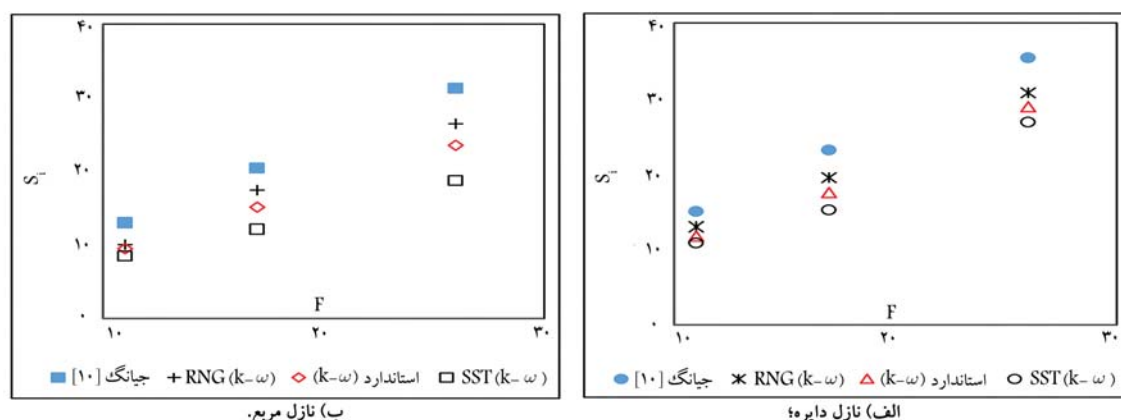
مقدار تقریباً یکسانی تخمین زده‌اند. مدل SST مقدار X_i/D را برای هر دو نازل مذکور در مقایسه با مطالعه‌ی آزمایشگاهی دست‌پایین تخمین زده است. مدل SST مقدار X_i/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با $14/5$ و 10 درصد خطا نسبت به نتایج جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه داده است. مدل Standard مقدار X_i/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با $7/9$ و 6 درصد خطا تخمین زده است. نتایج مدل RNG نزدیک به مدل Standard بوده و مقدار X_i/D را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با $8/5$ و $7/4$ درصد خطا برآورد کرده است. با توجه به نتایج، هر سه مدل مقدار X_i/D را برای نازل‌های دایره و مربع با خطای قابل قبولی تخمین زده‌اند که در بین آن‌ها، مدل Standard در مقایسه با مدل‌های دیگر، عملکرد نسبتاً بهتری داشته است.

۲.۴. ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت (Z)

در شکل ۳، نتایج به دست آمده توسط مدل‌های SST، Standard، و RNG و نتایج ارائه شده توسط جیانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت در اعداد فرود مختلف (۱۷، ۲۶ و ۱۱) مقایسه شده‌اند. پساب به صورت مستغرق مایل از نازل‌های دایره (شکل ۳الف) و مربع (شکل ۳ب) با زاویه‌ی تخلیه‌ی 45°



شکل ۴. نتایج مدل‌های SST، Standard، و RNG برای رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه جت تخلیه شده از نازل‌های مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹).^[۱۰]



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 (۲۰۱۹).^[۱۰]

ترتیب با ۱۸/۴ و ۲۲/۷ درصد خطا دست پایین برآورد کرده است. مدل RNG نیز مانند مدل‌های دیگر، مقدار S_m را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با ۱۲/۳ و ۱۷/۶ درصد خطا پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج ارائه شده، مدل RNG نسبت به مدل‌های دیگر، عملکرد بهتری برای تخمین مقدار S_m داشته است.

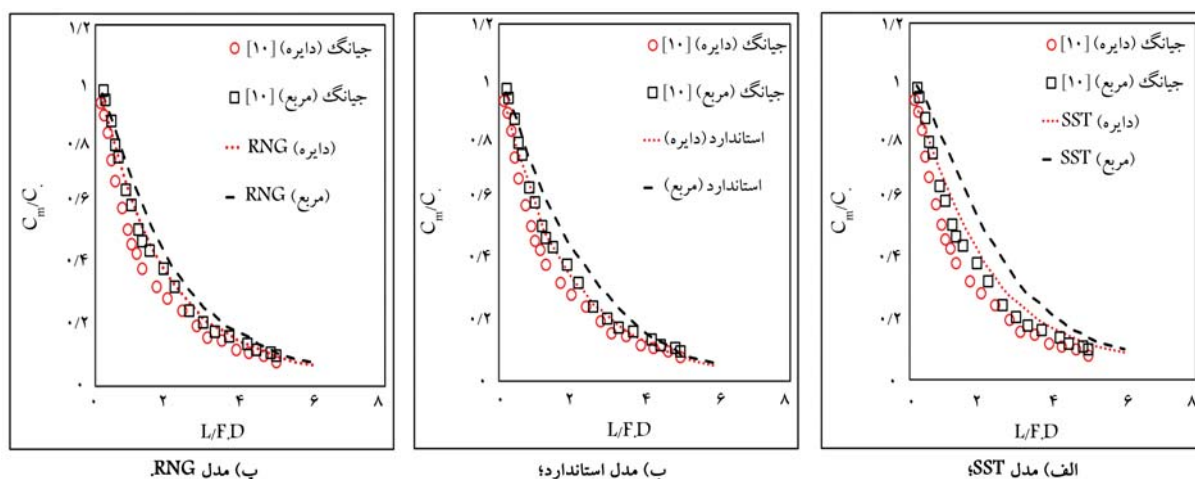
۴.۴. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین (S_i)

نتایج مدل‌های SST، Standard، و RNG برای رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)، در شکل ۵ مشاهده می‌شود. پساب از نازل‌های دایره (شکل ۵الف) و مربع (شکل ۵ب) به صورت مستغرق مایل و با عددهای فرود ۱۱، ۱۷، و ۲۶ 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. طبق نتایج، مقدار S_i برای نازل دایره بیشتر از نازل مربع بوده است که این موضوع به دلیل هم‌آوری بیشتر سیال به درون جت بوده است. همه‌ی مدل‌ها، مقدار رقیق‌سازی را برای هر دو نازل محافظه‌کارانه و دست پایین تخمین زده‌اند. مدل SST مقدار S_i را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با ۲۳/۳ و ۳۶/۸ درصد خطا دست پایین برآورد کرده است. مدل Standard میزان رقیق‌سازی در نقطه‌ی برخورد به زمین پساب تخلیه شده از نازل‌های دایره (با ۱۳/۷٪ خطا) و مربع (با

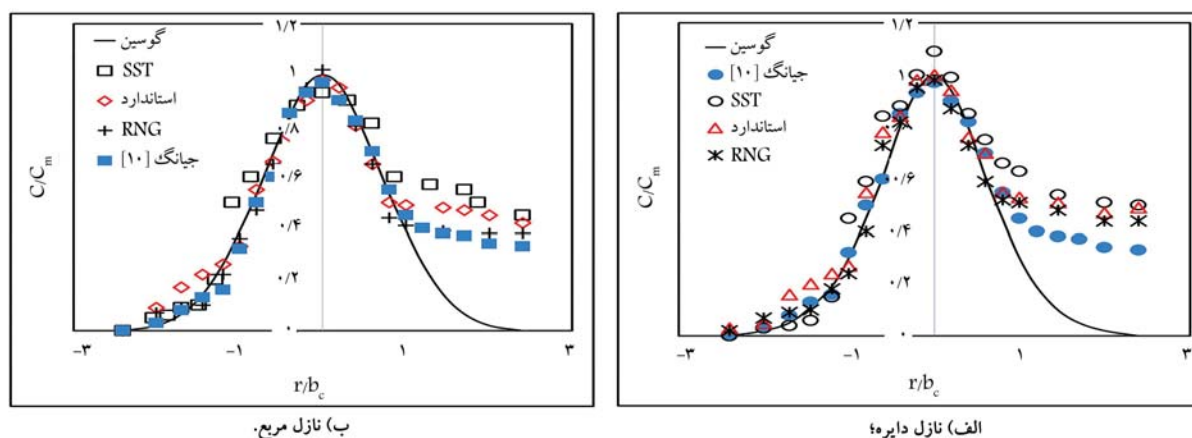
۳.۴. رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه جت (S_m)

نتایج مربوط به رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود بیشینه جت مدل‌های آشفته‌گی SST، Standard، و RNG و نتایج تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹).^[۱۰] برای اعداد فرود مختلف در شکل ۴ مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به نازل‌های دایره (شکل ۴الف) و مربع (شکل ۴ب) است. با توجه به شکل ۴، با افزایش عدد فرود، مقدار S_m برای همه‌ی مدل‌ها 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 تنش برشی ایجاد شده میان جت و سیال محیط پذیرنده و در نتیجه هم‌آوری سیال محیط به درون جت ایجاد می‌شود. هر چه محیط نازل بیشتر باشد، هم‌آوری سیال محیط به درون جت بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان رقیق‌سازی (اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده) افزایش می‌یابد.^[۱۸ و ۱۹] 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 ۲۵ و ۲۸/۴ درصد خطا تخمین زده و مدل Standard نیز در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹).^[۱۰] 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 (۲۰۱۹).^[۱۰]



شکل ۷. پروفیل بی‌بعدشده‌ی عرضی غلظت در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت مدل‌های آشفته‌گی مختلف در مقایسه با مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹).^[۱۰]

آن مقدار غلظت هر سه نازل بعد از $L/F.D > 4/5$ 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 (۲۰۱۹)،^[۱۰] 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 $L/F.D > 4/5$ 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 (۲۰۱۹)،^[۱۰] (برای هر دو نازل) دست بالا تخمین زده‌اند.

۲۵/۶٪ (خطا) را در مقایسه با مدل SST با خطای کمتری تخمین زده است. مدل RNG نیز مقدار S_i را برای نازل‌های دایره و مربع به ترتیب با ۱۱/۵ و ۲۰ درصد خطا نسبت به نتایج مطالعه‌ی تجربی جیانگ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۰] 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 (۲۰۱۹)،^[۱۰] 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 $L/F.D > 6$ برابر شده است. در این مورد می‌توان گفت با نزدیک شدن پساب به سطح زمین، هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی پساب تأثیر نداشته است.^[۱۰] نتایج مدل Standard نیز همانند مدل SST بوده است، فقط با این تفاوت که در

۶.۴. 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. پساب به صورت جت از نازل‌های دایره (شکل ۷الف) و مربع (شکل ۷ب) با عدد فرود ۱۱ تخلیه شده است. در شکل ۷، سمت راست نمودار، مربوط به قسمت داخلی جت (نزدیک بستر) و سمت چپ نمودار، مربوط به قسمت خارجی (نزدیک سطح آب) است. با توجه به شکل ۷، در لبه‌ی خارجی جت، نتایج هر دو مدل نزدیک به پروفیل گوسی بوده است؛ اما در لبه‌ی داخلی، نتایج

تخمین زده‌اند. میزان رقیق‌سازی توسط هر سه مدل آشفتگی، دست‌پایین برآورد شده است. مدل RNG میزان رقیق‌سازی را با ۱۸٪ خطا نسبت به میانگین مطالعه‌های آزمایشگاهی تخمین زده و عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های Standard (با ۲۴٪ خطا) و SST (با ۳۴٪ خطا) داشته است.

مدل‌های انتگرالی (JETLAG و UM۳، CORJET) به دلیل زمان و هزینه محاسباتی پایین، از پرکاربردترین مدل‌ها برای تخلیه‌ی انواع پساب (با استفاده از نازل دایره‌ای) در محیط آبی هستند.^[۹] 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 در نظر نگرفتن 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 $SST(k-\omega)$ ، $Standard(k-\varepsilon)$ و $RNG(k-\varepsilon)$ برای تخلیه‌ی پساب چگال (به صورت جت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵° نسبت به افق) با استفاده از نازل‌های دایره و مربع در محیط آبی ساکن پرداخته شده است. برای این منظور، نتایج مدل‌های SST، Standard و RNG با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده است: مدل SST، مقدار X_i را برای نازل‌های دایره و مربع، در مقایسه با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی دست‌پایین تخمین زده است. مدل‌های (Standard و RNG) $k-\varepsilon$ ، مقدار X_i را برای هردو نازل مربع و دایره دست‌پایین تخمین کرده‌اند، که نتایج مدل Standard در مقایسه با مدل RNG، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده است. مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت (Z) توسط هر سه مدل آشفتگی، دست‌پایین تخمین زده شده است که در بین آن‌ها، نتایج مدل Standard قابل اعتمادتر بوده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میزان X_i و Z برای نازل مربع بیشتر از نازل دایره بوده است که دلیل آن بیشتر بودن محیط دایره نسبت به محیط مربع (با سطح مقطع یکسان) است. بیشتر بودن محیط باعث بیشتر شدن هم‌آوری سیال به درون جت و در نتیجه، کاهش سرعت محوری جت شده است. هر سه مدل مذکور، مقدار رقیق‌سازی پساب (S_i و S_m) را دست‌پایین و محافظه‌کارانه تخمین زده‌اند. نتایج نشان داد که مدل‌های $K-\varepsilon$ نسبت به مدل $K-\omega$ ، نتایج دقیق‌تری را ارائه داده‌اند. مدل (RNG) $K-\varepsilon$ مقدار رقیق‌سازی پساب را در مقایسه با مدل (Standard) $K-\varepsilon$ و (SST) $K-\omega$ با خطای کمتری تخمین زده است. مدل RNG عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر در تخمین میزان رقیق‌سازی داشته و میزان رقیق‌سازی را برای هردو نازل مربع 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 در نظر گرفتن آشفتگی جریان، نسبت به نتایج مدل‌های انتگرالی قابل اعتمادتر بوده‌اند. طبق نتایج، مدل‌های آشفتگی ابزاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره و مربع هستند. مدل‌های Standard و RNG 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.

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، هم‌آوری سیال محیط به درون جت به سختی انجام شده است. اما در سطح خارجی جت، هیچ مانعی برای هم‌آوری سیال به درون جت وجود نداشته است.^[۱۸] 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)،^[۱۹] 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 شده‌ی مدل‌های آشفتگی با نتایج مطالعه‌های مختلف (آزمایشگاهی و عددی) با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵° مقایسه شده‌اند (جدول ۱). بیشتر مطالعه‌های انجام شده برای تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل دایره‌ای صورت گرفته و به همین دلیل در بخش کنونی، نتایج مربوط به نازل مربع ارائه نشده است. پارامترهای $X_i/F.D$ ، $Z/F.D$ و S_i/F در مطالعه‌های تجربی مختلف، مقادیر متفاوتی دارند، به همین دلیل میانگین آن‌ها با نتایج مدل‌های آشفتگی SST، Standard و RNG مقایسه شده است. با توجه به جدول ۱، مدل SST مقدار $X_i/F.D$ را در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی شائو^۷ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۰] و سیولینا^۸ و همکاران (۲۰۰۵)،^[۲۱] با اختلاف بسیار 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 خطا برآورد کرده‌اند. مدل‌های SST، Standard و RNG مقدار $Z/F.D$ را به ترتیب با ۱۷، ۹ و ۵ درصد خطا نسبت به میانگین نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی دست‌پایین

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌های مختلف برای نازل دایره.

مطالعه‌های مختلف	$X_i/F.D$	$Z/F.D$	S_i/F
شائو و همکاران ^[۲۰]	۲/۸۳	۱/۴۷	۱/۲۶
پاکنستا و همکاران ^[۵]	۳/۱۶	۱/۵۸	۱/۵۵
کیکرت و همکاران ^[۱]	۳/۲۶	۱/۶	۱/۷۱
سیولینا و همکاران ^[۲۰]	۲/۸۲	۱/۶۱	-
جیانگ و همکاران ^[۱۹]	۳/۲۱	۱/۵۱	۱/۳۶
میانگین مطالعه‌های تجربی	۳/۰۵	۱/۵۵	۱/۴۷
مدل انتگرالی CORJET ^[۹]	۲/۶۵	۱/۴۱	۰/۶۵
مدل انتگرالی UM۳ ^[۹]	۲/۳۲	۱/۲۴	۰/۶۳
مدل انتگرالی JETLAG ^[۹]	۲/۶۸	۱/۲۷	۰/۷۶
RNG (مطالعه‌ی حاضر)	۳/۴۵	۱/۷	۱/۲
Standard (مطالعه‌ی حاضر)	۳/۳۵	۱/۶۲	۱/۱۲
SST (مطالعه‌ی حاضر)	۲/۶۸	۱/۸۶	۰/۹۷

فهرست علائم

C_0 : غلظت اولیه‌ی پساب؛	D : قطر نازل دایره‌یی؛
C_a : غلظت محیط پذیرنده؛	De : قطر معادل سطح دایره‌یی؛
r : فاصله‌ی شعاعی نقطه‌ی موردنظر از مرکز نازل؛	D : قطر نازل؛
b_c : فاصله‌ی شعاعی که در آن: $C/C_c = 1/e$ ؛	U : سرعت خروجی پساب از نازل؛
R : طول مش؛	S : میزان رقیق‌سازی؛
L : امتداد طول خط مرکزی جت؛	S_m : میزان رقیق‌سازی پساب در مرکز محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت؛
θ : زاویه‌ی دهانه‌ی نازل نسبت به افق؛	S_i : میزان رقیق‌سازی پساب در مرکز محل برخورد به زمین؛
E : مقدار خطا بین دو عدد؛	X_i : فاصله‌ی افقی مرکز محل برخورد پساب به زمین از نازل؛
J_E : داده‌های آزمایشگاهی (عدد بزرگ‌تر)؛	Z : ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت از نازل؛
J_N : داده‌های عددی (عدد کوچک‌تر)؛	F : عدد فرود تخلیه؛
ρ_a : چگالی محیط؛	K : انرژی جنبشی آشفتگی؛
ρ_0 : چگالی پساب؛	ε : نرخ استهلاك؛
A : مساحت نازل؛	C : غلظت در نقطه‌ی موردنظر؛
L_Q : مقیاس طول تخلیه؛	C_c : غلظت در مرکز جت؛
L_M : مقیاس طولی مومتموم.	

پانویس‌ها

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. "Bench-scale investigation of inclined dense jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**(11), pp. 1017-1022 (2005).

* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، 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، نظیر مقدمه، عناوین 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 ضخامت کادر Apx و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا پسوند JPG یا Tif امکان پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه های لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (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 منابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه ای (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. "Forecasting 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 preformation of circular plat with four sided pyramidally - 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 مجله علمی و پژوهشی

شریف

مجله علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه های پژوهش های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه ای مفید است. چاپ مقالات در مجله شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه های علمی و فنی بوده و در مجله دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه ای دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته 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 ($k - \epsilon$), and RNG ($k - \epsilon$) 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 non-linear 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.

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

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.

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@khu.ac.ir

P. Homami(corresponding author)

homami@khu.ac.ir

M. Shahrouzi

shahrouzi@khu.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. Rafei Mohammadi

m_rafi@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- ϵ 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.

INJECTABILITY OF COLLOIDAL NANO-SILICA IN BUSHEHR CARBONATE SAND WITH DIFFERENT SILT CONTENT

E. Azini

e_azini@yahoo.com

R. Ziaei 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

- 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.

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)

hossein.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 (θ_p), 81% for Post-capping plastic-rotation capacity from the cap to point of zero strength (θ_{pc}), and 88% for normalized energy dissipation capacity (λ) 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% (θ_p), 75.3% θ_{pc} and 46.5% (λ) in (R^2), 63.7% θ_p , 48.5% θ_{pc} and 86.7 (λ) in (RMSE), 64% θ_p , 92% θ_{pc} and 89.4% (λ) 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

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](http://www.globalsciencejournals.com)

E-mail: 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. Ziaei 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. Pourroostam, 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. Broujerdian 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 ANGLE OF 45°**
V. Babaiynejad and R. Haji Seyed Mohammad Shirazi

APPENDIX

- 132 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**