دوره ی ۴۰
شماره ی ۴
فصلنامه
زمستان
۱۴۰۳
۴

مهندسی عمران

شریف

مقالات پژوهشی:

- کاربرد مدل‌های هوش مبتنی بر محاسبات نرم در بررسی میزان ضریب تخلیه دریچه کشویی در حالت جریان آزاد و آستانه متقارن به کمک مدل‌های GEP، ANN، KNN و SVM
  حمیدرضا عباس‌زاده، یوسف حسن‌زاده، رسول دانشفراز و رضا نوروزی
- استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین
  سامان باقری و حسین حیاتی‌راد
- تصفیه‌ی آب های زیرزمینی توسط تلفیق فرایند الکتروکینتیک با مواقع واکنش دهنده‌ی نفوذپذیر حاوی کربن فعال دانه یی
  مریم السادات رکن الدین و نادر مختارانی
- بررسی تأثیر حرکت شتابدار جرم متحرک در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق
  محمدعلی فیوضات، هاتف عبدوس و علیرضا خالو
- ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران
  رامین فضلی، محمد شامخی امیری و حسین پهلوان
- تأثیر بافت اُرتوتروپ ناهمگنی مدفون در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین
  سعید مجتبی‌زاده حسنلویی، مهدی پنجی و محسن کمالیان

یادداشت فنی:

- توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی
  بهناز یادگاری، امیرمسعود رحیمی و محسن ابوطالبی اصفهانی
- آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده جهت ارزیابی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن
  عرفان شبانی ، داود مستوفی‌نژاد و علیرضا سنجوقیان
- بهسازی خاک ماسه‌یی رس‌دار با استفاده از نانوذره
  سعید رحمتی سردشت و علی‌اکبر حشمتی رفسنجانی
- تاثیر آلاینده های نفتی مختلف بر روی خواص نشست پذیری ماسه ی رس‌دار
  مهیار عربانی و حامد حق شنو

مهندسی عمران شریف

Civil Engineering **SHARIF**

۴
4

Civil Engineering

Sharif

Volume 40
Number 4
Quarterly
Winter
2025
4

ISSN 2676-4768

ARTICLES:

- Application of Intelligence Models Based on Soft Computing In Investigating The Discharge Coefficient of the Sluice Gate Under Free-Flow Condition and Symmetrical Sill with the Help of KNN, ANN, GEP and SVM Models
  H. Abbaszadeh, Y. Hassanzadeh, R. Daneshfaraz and R. Norouzi
- Derivation and Parametric Evaluation of Frequency Response Functions of Elastic and Inelastic Structures Under Pulse-Type Ground Excitations
  S. Bagheri, H and Hayati Raad
- Groundwater Treatment by Combining the Electrokinetic Process with Permeable Reactive Barriers Containing Granular Activated Carbon
  M. Rokneddini and N. Mokhtarani
- Investigating the Effect of Accelerating/Decelerating Motion of a Moving Mass on the Out-of-Plane Dynamics of Horizontally Curved Beams
  M.A. Foyouzat, H. Abdoos and A.R. Khaloo
- Intelligent Assessment of Damage and Prediction of Seismic Damage Spectrum Under the Effect of Near-Fault Earthquakes In Iran
  R. Fazli, M. Shamekhi Amiri and H. Pahlavan
- The Orthotropy Effect of Underground Inclusion on the Seismic Response of Ground Surface
  S. Mojtabazadeh-Hasanlouei, M. Panji and M. Kamalian

RESEARCH NOTES:

- Innovative Hybrid Algorithm for Solving Vehicle Routing Problem with Time Window
  B. Yadegari, A.M. Rahimi and M. Aboutalebi Esfahani
- Lap Shear-Prestressed Bond Test to Evaluate Prestressed Frp Concrete Joint
  E. Shabani, D. Mostofinejad and A. Saljoughian
- Soil Improvement of Clayey Sand Using Nanoparticle
  S. Rahmati Sardasht and A.A. Heshmati R
- The Effect of Various Oil Pollutants on The Compressibility Properties of Clayey Sand
  M. Arabani and H. Haghsheno

به نام خدا

مهندسی عمران

شریف

دوره‌ی ۴۰
شماره‌ی ۴
زمستان
۱۴۰۳

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف
مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی
مدیرنشریه: دکتر رضا نقدآبادی
سردبیر: دکتر میرمصدق جمالی
سردبیرهیات‌تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار

صفحه‌آرایی و امور گرافیکی : غزل احمدی میرقائد و راضیه قربانی

امور اجرایی: شیما آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

مجله‌ی مهندسی عمران شریف در پایگاه‌های DOAJ، ISC و SID نمایه می‌شود.

نشانی: تهران ، صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵
دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳-۶۶۰۰۵۴۱۹
نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳
نشانی سایت: http://journal.sharif.ir
رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.
مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه

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، دانشکده فنی، 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 محمد کرمانشاه
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر موسی محمودی صاحبی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیرشهید 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 واثقی امیری
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دکتر ابوالحسن وفائی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه‌ی تخصصی

سردبیر تخصصی: دکترابوالحسن 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

دکترعباس افشار
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخورداری
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان
دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسنیمی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت‌مدرس

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 خویی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده رفوئی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیانپور
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکترسیدمهدی 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 شهید باهنرکرمان

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 وحیدرضا اوحدی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی سینا همدان

دکتر توحید اخلاقی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر محمدحسین ادیب‌راد
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه رازی کرمانشاه

دکترمحمدحسین باقری‌پور
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید باهنرکرمان

دکتر علی پاک
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسین پهلوان
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود

دکتر حسین تقدس
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر علی جوهری
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شیراز

دکتر احسان جباری
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه قم

دکتر احمد خدادادی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر رسول دانشفراز
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مراغه

دکتر مصطفی رضوانی شریف
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر پویا زکیان
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه اراک

دکتر نوید سیاه‌پلو
دانشکده‌ی مهندسی عمران - موسسه آموزشی جهاد دانشگاهی

دکتر اکبر صفرزاده
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر جعفر عسگری مارنانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

دکتر مازیار فهیمی فرزام
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مراغه

دکتر سید سینا کورهلی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر هوشنگ کاتبی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر کیوان کیانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علی لکی روحانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه زنجان

دکتر محمدنوید مقیم
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر سید حسام مدنی
دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

دکتر علی نیکخو
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و فرهنگ

دکتر منصور یخچالیان
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۳ **کاربرد مدل‌های هوش مبتنی بر محاسبات نرم در بررسی میزان ضریب تخلیه دریچه کشویی در حالت جریان آزاد و آستانه متقارن به کمک مدل‌های KNN، ANN، GEP و SVM**
حمیدرضا عباس‌زاده، یوسف حسن‌زاده، رسول دانشفراز و رضا نوروزی

۱۳ **استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین**
سامان باقری و حسین حیاتی‌راد

۲۷ **تصفیه‌ی آب‌های زیرزمینی توسط تلفیق فرایند الکتروکینتیک با موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر حاوی کربن فعال دانه‌یی**
مریم السادات رکن الدین و نادر مختارانی

۳۷ **بررسی تأثیر حرکت شتابدار جرم متحرک در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق**
محمدعلی فیوضات، هاتف عبدوس و علیرضا خالو

۵۰ **ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران**
رامین فضلی، محمد شامخی امیری و حسین پهلوان

۶۴ **تأثیر بافت اُرتوتروپ ناهمگنی مدفون در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین**
سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی، مهدی پنجی و محسن کمالیان

یادداشت فنی:

۸۵ **توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی**
بهناز یادگاری، امیرمسعود رحیمی و محسن ابوطالبی اصفهانی

۹۶ **آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده جهت ارزیابی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن**
عرفان شبانی ، داود مستوفی‌نژاد و علیرضا سلجوقیان

۱۰۸ **بهسازی خاک ماسه‌یی رس‌دار با استفاده از نانوذره**
سعید رحمتی سردشت و علی‌اکبر حشمتی رفسنجانی

۱۱۶ **تاثیر آلاینده های نفتی مختلف بر روی خواص نشست پذیری ماسه ی رس‌دار**
مهیار عربانی و حامد حق شنو

ضمائم:

۱۳۹ **چکیده انگلیسی مقالات**

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص.۳-۱۲ ، (پژوهشی)

Original Article

کاربرد مدل‌های هوش مبتنی بر محاسبات نرم در بررسی میزان ضریب تخلیه دریچه کشویی در حالت جریان آزاد و آستانه متقارن به کمک مدل‌های KNN، ANN، GEP و SVM

حمیدرضا عباس‌زاده (دانشجوی دکتری)
یوسف حسن‌زاده * (استاد)
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
رسول دانشفراز (استاد)
رضا نوروزی (دکتری)
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

در پژوهش حاضر میزان ضریب‌دبی دریچه کشویی با استفاده از روش‌های داده کاوی مبتنی بر مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) برای نخستین رابطه تئوری ارائه شده برای دریچه‌های کشویی در حالت آستانه غیرهم‌عرض، مورد ارزیابی قرار گرفت، تا عملکرد آن با استفاده از روش‌های محاسبات نرم سنجیده شود. برای مدل SVM، کرنل تابع پایه شعاعی (RBF) نتایج بهتری در مقایسه با کرنل‌های چند جمله‌ای (Polynomial)، خطی (Linear) و سیگموئید (Sigmoid) دارد. شاخص‌های آماری R، KGE، RMSE و MRE% برای مدل SVM-RBF در مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۰، ۰/۰۱۸ و ۱/۹۲ است. در مدل KNN فاصله اندازه‌گیری Manhattan دقت بالاتری در پیش‌بینی ضریب‌دبی نسبت به معیارهای Euclidean، Euclidean Squared و Chebychev داشت. روش ANN در مقایسه با مدل‌های SVM، GEP و KNN دقت بیشتری دارد به‌طوری‌که برای این مدل MRE%=۱/۱۵ و RMSE=۰/۰۰۹۸ است.

واژگان کلیدی: اندازه‌گیری دبی، ضریب‌دبی، سازه کنترل، مدل‌های هوشمند، شاخص‌های آماری.

ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir
yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir
daneshfaraz@maragheh.ac.ir
norouzi@maragheh.ac.ir

۱. مقدمه

دریچه‌ها از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که در آن‌ها حرکت آب از زیر دریچه و گاهاً از روی دریچه صورت می‌پذیرد. از پرکاربردترین این دریچه‌ها، دریچه‌های کشویی هستند که به‌صورت صفحه‌ای عمودی در مسیر جریان به‌منظور تنظیم میزان بازشدگی، بالا و پائین حرکت می‌کنند. تعیین میزان دبی عبوری و تخمین ضریب‌دبی یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در مهندسی هیدرولیک بوده و کمک شایانی به مهندسان و کاربران به‌منظور طراحی سازه و آگاهی از وضعیت جریان می‌کند. کنترل میزان سطح آب بالادست دریچه، تنظیم دبی و همچنین میزان دقت عبوری جریان از زیر دریچه به‌ترتیب براساس میزان بازشدگی دریچه از کف کانال و تخمین ضریب‌دبی دریچه صورت می‌گیرد. در دهه‌های اخیر با توجه به کمبود منابع آب، لزوم استفاده بهینه از منابع آبی و بهره‌گیری مطلوب از آن بایستی مورد توجه قرار گیرد. جهت جلوگیری از هدر رفت آب بایستی در کنترل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری نهایت دقت به‌عمل آید و دریچه‌ها با توجه به شرایط هر منطقه به‌طور صحیح و اصولی انتخاب شوند. در مواقعی که ارتفاع دریچه از یک معیار خاص طراحی تجاوز نماید، از دریچه‌های دوتایی یا سه‌تایی استفاده می‌شود[۱و۲]. در حالی‌که استفاده از این نوع دریچه‌ها هزینه‌های زیادی در بردارد. یکی از راه‌حل‌های اساسی به‌منظور حل این مسئله، استفاده از ترکیب دریچه-آستانه می‌باشد[۲]. کاربرد آستانه باعث افزایش ضریب‌دبی دریچه می‌شود.

در زمینه وجود آستانه هم‌عرض کانال و ترکیب آن با دریچه کشویی مطالعات متعددی انجام شده است که می‌توان به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از آستانه‌های چند ضلعی و دایروی در زیر دریچه‌کشویی بر میزان ضریب‌دبی در شرایط جریان آزاد اشاره کرد[۳]. Alhamid[۳] افزایش میزان ضریب‌دبی در حالت استفاده از آستانه نسبت به حالت بدون آستانه در تمامی مدل‌های آزمایشگاهی را گزارش نمود. Negm et al.[۱] بررسی آزمایشگاهی دریچه

*نویسنده مسئول
تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳.

استناد به این مقاله:
عباس‌زاده، حمیدرضا، حسن‌زاده، یوسف، دانشفراز، رسول، و نوروزی، رضا، ۱۴۰۳. کاربرد مدل‌های هوش مبتنی بر محاسبات نرم در بررسی میزان ضریب تخلیه دریچه کشویی در حالت جریان آزاد و آستانه متقارن به کمک مدل‌های KNN، ANN، GEP و SVM. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص.۳-۱۲.
.DOI: 10.24200/J30.2023.62661.3237

کشویی با آستانه را در شرایط جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ضریب‌دبی را تابعی از نسبت اختلاف عمق بالادست و پائین‌دست دریچه به میزان بازشدگی دریچه، نسبت عمق بالادست به میزان بازشدگی، نسبت عمق پایاب به بازشدگی دریچه و پارامترهای هندسی آستانه عنوان کردند.[۴] Salmasi and Norouzi تأثیر شکل‌های مختلف هندسی آستانه هم‌عرض کانال بر ضریب‌دبی دریچه کشویی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که آستانه ضریب‌دبی را حداقل ۲۳٪ و حداکثر ۳۱٪ افزایش می‌دهد. آستانه دایره‌ای موثرترین شکل و آستانه مثلثی از جمله بهترین آستانه‌های چندوجهی می‌باشد.[۵] Karami et al. تأثیر پارامترهای آستانه همچون ارتفاع و شکل بر ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی در جریان آزاد را با استفاده از نرم‌افزار D۳FLOW- مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آستانه نیم‌دایره‌ای باعث افزایش ۲۰٪ ضریب‌دبی می‌شود.[۶] Salmasi and Abraham ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی با آستانه‌های چندوجهی و غیرچندوجهی را بررسی و نتیجه گرفتند که آستانه دایره‌ای بیشترین تأثیر و آستانه‌های ذوزنقه‌ای کم‌ترین تأثیر را بر ضریب‌دبی دارند.[۷] Ghorbani et al. با استفاده از روش O_2H و مدل‌های هوشمند از جمله DL، RF، GBM و GLM به تجزیه و تحلیل ضریب‌دبی دریچه‌های کشویی با آستانه هم‌عرض کانال پرداختند. نتایج نشان داد که روش یادگیری ماشین O_2H، عملکرد خوبی در تخمین ضریب‌دبی دریچه کشویی دارد.[۸] Daneshfaraz et al. به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر کاربرد آستانه هم‌عرض و غیرهم‌عرض بر ضریب‌دبی دریچه کشویی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ضریب‌دبی مربوط به آستانه در موقعیت مماس بر دریچه در بالادست آن بیشتر از موقعیت مماس در پائین‌دست و موقعیت قرارگیری آستانه در زیر دریچه است.[۲] Daneshfaraz et al. به‌بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله آستانه‌های هم‌عرض و غیرهم‌عرض در بالادست دریچه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله ضریب‌دبی کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر روابط مختلفی برای تخمین ضریب‌دبی دریچه کشویی در حالت بدون آستانه و برای آستانه هم‌عرض کانال ارائه شده است. بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که کاربرد آستانه‌های غیرهم‌عرض در دریچه‌های کشویی موضوع جدیدی بوده و به‌جز چند تحقیق انجام یافته در یک سال اخیر، هیچ پژوهشی در رابطه با آستانه‌های غیرهم‌عرض انجام نیافته است. لازم به‌ذکر است که در تحقیقات گذشته برای موضوع مذکور، رابطه تئوری برای تخمین میزان دبی عبوری از دریچه برای اولین بار ارائه شده است.[۲و۸] بنابراین با توجه به عدم قطعیت حاکم بر مسئله در این تحقیقات، انجام پژوهش‌های جدید در زمینه مدل‌سازی هوشمند ضریب‌دبی دریچه-آستانه غیرهم‌عرض کانال در موقعیت‌های مختلف آستانه نسبت به دریچه در عرض‌های مختلف ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین تاکنون مطالعه‌ای در خصوص استفاده از محاسبات نرم مورد توجه قرار نگرفته است. بدین‌منظور در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های هوشمند ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به پیش‌بینی ضریب‌دبی دریچه کشویی پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. انتخاب پارامترها

در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی Daneshfaraz et al.[۲و۸] استفاده شده است.[۲و۸] تمامی آزمایش‌ها در کانالی به‌طول ۵ متر، عرض ۰/۳۰ متر و ارتفاع ۰/۵۰ متر صورت پذیرفته است. آزمایش‌ها در بازه دبی ۰/۰۰۲۵ الی ۰/۰۱۴۲ مترمکعب برثانیه و عمق بالادست ۰/۰۵ الی ۰/۴۴ متر انجام یافته است. جریان ورودی به فلوم توسط دو پمپ هر یک با دبی اسمی ۰/۰۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه تأمین می‌شد. به‌منظور قرائت دبی ورودی از روتامترهای نصب شده روی فلوم با خطای نسبی ۲±٪ استفاده شده است. آستانه‌ها در عرض‌های مختلف ۰/۰۲۵ الی ۰/۳۰ متر (۸ عرض)، ضخامت ۰/۰۵ متر و ارتفاع ۰/۰۳ متر در موقعیت‌های مختلف نسبت به دریچه کشویی در زیر و مماس بر دریچه در بالادست و پائین‌دست آن در بازشدگی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته بودند (شکل ۱). در مجموع ۳۴۵ داده آزمایشگاهی به‌منظور بررسی عملکرد مدل‌های SVM، ANN، GEP و KNN در پیش‌بینی ضریب‌دبی دریچه کشویی در حالت با آستانه در موقعیت‌های مختلف نسبت به دریچه کشویی مورد بررسی قرار گرفت.

دبی عبوری از زیر دریچه در حالت آستانه هم‌عرض و آستانه غیرهم‌عرض کانال به‌ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد.

$$Q = C_d W G \sqrt{2g(H_0 - Z)} \qquad (۱)$$

$$Q = C_d \left(A_1 \sqrt{2gH_0} + A_2 \sqrt{2g\left(H_0 - Z\right)} + A_3 \sqrt{2gH_0} \right) \qquad (۲)$$

در روابط فوق Q دبی، C_d ضریب‌دبی، W عرض کانال، G میزان بازشدگی، g شتاب گرانش زمین، H. عمق بالادست دریچه، Z ارتفاع آستانه، A_1، A_3 و A_2 به‌ترتیب مساحت جریان عبوری از کناره‌های آستانه و بالای آستانه غیرهم‌عرض است.

مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب‌دبی دریچه در حالت با آستانه عبارتند از[۲]:

$$f_1\left(C_d, A_{total}, H_0, B, Z, \varepsilon, W, X, \rho, g, \mu, \sigma\right) \qquad (۳)$$

در معادله (۱)، A_{total} مساحت جریان عبوری، B عرض کانال، ε ضخامت آستانه، X فاصله محور دریچه تا محور آستانه، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت

شکل ۱. الف) شماتیک دریچه-آستانه ب) آستانه هم‌عرض کانال ج) آستانه غیرهم‌عرض کانال

دینامیکی و σ بیانگر کشش سطحی است. با استفاده از تئوری π باکینگهام می‌توان رابطه (۴) را رائه کرد.

$$f_2\left(C_d, \frac{A_{total}}{B^2}, \frac{H_0}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{\varepsilon}{B}, \frac{W}{B}, \frac{X}{B}, \mathrm{Re}, We\right) \qquad (٤)$$

که در آن Re و We بیانگر عدد رینولدز و عدد وبر است. زمانی که مایع یکسان و دما ثابت باشد، Re و We به‌یکدیگر وابسته هستند و با بازشدگی دریچه تغییر می‌کنند، بنابراین می‌توان از تأثیر عدد وبر و یا عدد رینولدز چشم‌پوشی نمود [۹،۲و۱۰]. همچنین با توجه به متلاطم بودن جریان از تأثیر عدد رینولدز چشم‌پوشی شد. پارامتر عرض کانال مقدار ثابتی به‌خود گرفته و از اهداف تحقیق [۲و۸] Daneshfaraz et al. نبوده است. پارامترهای مورد بررسی در رابطه (۵) آورده شده است.

$$C_d = f_3\left(, \frac{A_{total}}{B^2}, \frac{H_0}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{\varepsilon}{B}, \frac{X}{B}\right) \qquad (۵)$$

محدوده پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش، در جدول (۱) نشان داده شده است. پارامترهای ورودی به نرم‌افزار Statistica۱۲، در مدل‌های مختلف به SVM، KNN، GEP و ANN معرفی شدند (جدول ۱).

۲.۲. ماشین‌بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت، اولین بار توسط [۱۱] Vapnik برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کار آمد بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مقید است که از اصل استقرای کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌گردد. در مدل رگرسیون SVM تابعی مرتبط با متغیر وابسته Y که خود تابعی از چند متغیر مستقل X است، برآورد می‌شود. انتخاب کرنل برای SVM به حجم داده‌های آموزشی و ابعاد بردار ویژگی بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، باید با توجه به این پارامترها تابع کرنلی را انتخاب نمود که توانایی آموزش برای ورودی‌های مسئله را داشته باشد. در عمل چهار نوع کرنل خطی (Linear)، کرنل چندجمله‌ای (Polynomial)، کرنل سیگموئید (Sigmoid) و کرنل تابع پایه شعاعی (RBF) به کار گرفته می‌شوند[۱۲]

$$K\left(X_i, X_j\right) = \left(X_i, X_j\right) \qquad (٦)$$

$$K\left(X_i, X_j\right) = \left(1 + \left(X_i, X_j\right)\right)^d \qquad (۷)$$

$$K\left(X_i, X_j\right) = \tanh\left(-a\left(X_i, X_j\right) + C\right) \qquad (۸)$$

$$K\left(X_i, X_j\right) = \exp\left(-\left\|\left(X_i, X_j\right)\right\|^2 / \sigma^2\right) \qquad (۹)$$

در روابط بالا $K(X_i, X_j)$ تابع کواریانس یا کرنل بوده که در نقاط X_i و X_j محاسبه می‌گردد. a، C، d و σ بیانگر توابع کرنل هستند. d درجه چندجمله‌ای و C عددی صحیح و مثبت است که عامل تعیین جریمه در هنگام رخ دادن خطای آموزش مدل است.

۳.۲. الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه

الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه یا KNN یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین با ناظر است که برای حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این الگوریتم یک روش رایج برای طبقه‌بندی است و بر اساس سنجش فاصله می‌باشد. KNN همچنین به‌عنوان یک مدل مبتنی بر نمونه یا یک یادگیرنده‌ی تنبل شناخته می‌شود؛ زیرا یک مدل داخلی ایجاد نمی‌کند و از داده‌های آموزش عملکرد متمایز را یاد نمی‌گیرد؛ فقط نمونه‌های آموزشی را حفظ می‌کند که به‌عنوان دانش برای مرحله پیش‌بینی استفاده می‌شود. برای مسائل رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه را پیدا و با محاسبه‌ی میانگین مقدار نزدیک‌ترین همسایه‌ها، مقدار مدنظر را پیش‌بینی می‌کند. برای تعیین فاصله از توابع فاصله همچون اقلیدسی (Euclidean)، اقلیدسی مربع (Euclidean Squared)، منهتن (Manhattan) و چبیشو (Chebychev) استفاده می‌شود[۱۳].

۴.۲. شبکه عصبی مصنوعی

یک شبکه عصبی مصنوعی در حالت کلی از لایه‌های ورودی، لایه‌های پنهان و لایه‌های خروجی تشکیل می‌شود. نورون کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات است که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. یک شبکه عصبی مجموعه‌ای از نورون‌هاست که با قرار گرفتن در لایه‌های مختلف، معماری خاصی را بر مبنای ارتباطات بین نورون‌ها در لایه‌های مختلف تشکیل می‌دهد. نورون می‌تواند یک تابع ریاضی غیرخطی باشد، در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود، نیز می‌تواند یک سامانه کاملاً پیچیده و غیرخطی باشد. در شبکه عصبی هر نورون به‌طور مستقل عمل می‌کند و رفتار کلی شبکه، برآیند رفتار نورون‌های متعدد است. با استفاده از دانش برنامه‌نویسی رایانه می‌توان ساختار داده‌ای طراحی کرد که همانند یک نورون عمل نماید[۱۴]. سپس با ایجاد شبکه‌ای از این نورون‌های مصنوعی به هم پیوسته، ایجاد یک الگوریتم آموزشی برای شبکه و اعمال این الگوریتم به شبکه آن را آموزش داد. در پژوهش حاضر از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) استفاده شده است.

۵.۲. برنامه‌ریزی بیان ژن

این روش جز روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود که مبانی تمامی آن‌ها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارها و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار می‌گیرند و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می‌نمایند. برنامه‌ریزی بیان ژن جدیدترین شیوه از بین روش‌های الگوریتم گردشی است که به‌دلیل دارا بودن دقت کافی، به‌عنوان مرسوم‌ترین شیوه بوده و از کاربرد

جدول ۱. مدل‌های تعریف شده و محدوده تغییرات پارامترها.

محدوده تغییرات	پارامترها	پارامترهای ورودی	مدل
$۰.۰۳۳ \le \frac{A_{total}}{B^۲} \le ۱۸$	$\frac{A_{total}}{B^۲}$	$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}$	۱
$۰.۲۹۶ \le \frac{H_۰}{B} \le ۸.۶$	$\frac{H_۰}{B}$	$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}, \frac{X}{B}$	۲
$۰.۱ \le \frac{Z}{B} \le ۱.۲$	$\frac{Z}{B}$	$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}, \frac{Z}{B}$	۳
$۰.۱۶۷ \le \frac{\varepsilon}{B} \le ۲$	$\frac{\varepsilon}{B}$	$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}, \frac{\varepsilon}{B}$	۴
$-۰.۰۸۴ \le \frac{X}{B} \le ۰.۰۸۴$	$\frac{X}{B}$	$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{\varepsilon}{B}$	۵
		$\frac{A_{total}}{B^۲}, \frac{H_۰}{B}, \frac{Z}{B}, \frac{\varepsilon}{B}, \frac{X}{B}$	۶

بیشتری برخوردار است. زمینه اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن، همان الگوریتم ژنتیک است، با این تفاوت که در این روش از شاخه‌های مجزا به جای نوارهای بیت استفاده می‌شود. هر شاخه نیز از یک مجموعه پایانه‌ها (متغیرهای مسئله) و مجموع توابع (عملگرهای اصلی) تشکیل می‌شود[۱۵].

۶.۲. شاخص‌های آماری

در پژوهش حاضر برای ارزیابی کارآیی روش‌های به‌کاربرده شده برای پیش‌بینی ضریب‌دبی از شاخص‌های آماری میانگین درصد خطای نسبی (MRE%)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و شاخص کلینگ گوپتا (KGE) استفاده شده است.

$$MRE\% = \frac{1}{n}\left(\frac{C_{d\,obs} - C_{d\,cal}}{C_{d\,obs}} \times 100\right) \qquad (۱۰)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{d\,obs} - C_{d\,cal}\right)_i^2}{n}} \qquad (۱۱)$$

$$KGE = \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$$

$$\beta = \frac{\overline{C_{d\,cal}}}{\overline{C_{d\,obs}}}, \gamma = \frac{CV_{cal}}{CV_{obs}} = \frac{\frac{\sigma_{cal}}{\overline{C_{d\,cal}}}}{\frac{\sigma_{cal}}{\overline{C_{d\,obs}}}} \qquad (۱۲)$$

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(C_{d\,obsi} - \overline{C_{dobs}}\right)\times\left(C_{d\,cali} - \overline{C_{dcal}}\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{d\,obsi} - \overline{C_{dobs}}\right)\sum_{i=1}^{n}\left(C_{d\,cali} - \overline{C_{dcal}}\right)}$$

$$0.6 < KGE < 0.7\,(good)$$

$$0.5 < KGE \le 0.6\,(satisfactory)$$

$$0.4 < KGE \le 0.5\,(acceptable)$$

$$KGE \le 0.4\,(unsatisfactory)$$

در روابط بالا، Obs و Cal به‌ترتیب بیانگر نتایج مشاهداتی و محاسباتی و n تعداد کل داده‌ها می‌باشند. مقادیر روابط (۱۰) و (۱۱) هرچه به عدد صفر نزدیک باشد، بیانگر دقت بالای حل مدل مورد نظر خواهند بود. در رابطه (۱۲)، R ضریب همبستگی، β نسبت میانگین داده‌های محاسباتی به میانگین داده‌های مشاهداتی و γ بیانگر نسبت انحراف استاندارد مقادیر محاسباتی به انحراف استاندارد مقادیر مشاهداتی می‌باشند. شاخص آماری KGE بر اساس تقسیم‌بندی این شاخص به خیلی خوب، خوب، رضایت بخش، قابل قبول و غیررضایت بخش، می‌تواند بیانگر دقت حل باشد[۱۶].

۳. نتایج و بحث

۱.۳. کاربرد آستانه در دریچه کشویی

در مدل‌های آستانه در زیر و مماس بر دریچه در بالادست و پائین‌دست آن با افزایش عرض آستانه، ضریب‌دبی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که آستانه با کم‌ترین عرض، دارای حداقل مقدار ضریب‌دبی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت عمق جریان بالادست دریچه به عرض آستانه، ضریب‌دبی روند افزایشی دارد. با مقایسه ضریب‌دبی در موقعیت‌های مختلف، ضریب‌دبی در حالت مماس بر دریچه در بالادست آن، بیشتر از حالت زیر دریچه کشویی می‌باشد. علت این امر را می‌توان به قرارگیری آستانه اشاره نمود. به‌طوری‌که در حالت مماس، کل ضخامت آستانه در پشت دریچه قرار داشته و بعد از آن حجم بیشتری از آب از زیر دریچه با الگوی جریان یکنواخت، جریان می‌یابد. در مدل مربوط به حالت زیر آستانه، نصف آستانه در موقعیت بعد از دریچه قرار دارد که به‌صورت مانع عمل کرده و باعث افزایش ضریب اصطکاک جریان با آستانه و به‌تبع آن افزایش بیشتر عمق جریان در بالادست دریچه نسبت به حالت مماس می‌شود. برای مدل مماسی بعد دریچه در مقایسه با حالت آستانه زیر دریچه، ضریب‌دبی بیشتر و در مقایسه با مدل مماسی بالادست دریچه کم‌تر است. به‌طوری‌که در مدل مماسی بالادست، میزان عمق آب در بالادست دریچه در مقایسه با مدل زیر دریچه و پائین‌دست دریچه کم‌تر بوده و بیشترین میزان آن مربوط به حالت آستانه زیر دریچه است. بنابراین آستانه‌های غیرهم‌عرض مدل مماسی با توجه به عملکرد مطلوب آن از نظر افزایش میزان راندمان دبی عبوری و همچنین جلوگیری از تجمیع رسوبات در پشت دریچه، می‌تواند مورد توجه و استفاده قرار گیرد. وجود آستانه زیر دریچه و مماس بر دریچه کشویی نسبت به بالادست و پائین‌دست دریچه در مقایسه با حالت بدون آستانه، باعث افزایش ضریب‌دبی و عملکرد بهتر سیستم از نظر میزان آبگذری دارد و بیشترین مقدار آن مربوط به حالت آستانه مماس بر دریچه در بالادست (پشت دریچه) آن است. با توجه به اینکه موقعیت آستانه باعث تغییر شکل خطوط جریان می‌گردد، بنابراین تأثیر به‌سزایی بر ضریب‌دبی جریان می‌گذارد. به‌طوری‌که خطوط جریان در مدل مماسی پشت دریچه بلافاصله پس از طی مسیر روی آستانه با حالت ملایم‌تری بعد از آستانه به مسیر خود ادامه می‌دهد و لذا افت انرژی کم‌تری را باعث می‌شوند. در حالی‌که در مدل مماسی بعد از دریچه و مدل زیر دریچه، جریان به‌صورت جت آبی از روی آستانه رها گشته و جریان‌های گردابی منجر به افت بیشتر انرژی می‌شود. همچنین افزایش طول تماس جریان با آستانه باعث افزایش اصطکاک و مقاومت جریان خروجی از دریچه می‌گردد که منجر به افزایش عمق در پشت دریچه می‌شود. به ازای دبی ثابت، بار آبی بالادست دریچه کشویی در تمامی موقعیت‌های آستانه کم‌تر از حالت بدون آستانه است. وقتی عمق جریان بالادست دریچه افزایش می‌یابد، مقدار جریان عبوری از زیر دریچه دارای فشار بیشتری بوده و باعث ایجاد افت و جریان‌های ناهمگرا و چرخشی بعد از دریچه می‌شود که این امر منجر به کاهش ضریب‌دبی می‌گردد. همچنین وجود آستانه باعث می‌گردد تا فشار وارد بر دریچه به کم‌تر از γH. برسد. بنابراین کاهش فشار و مکش جریان منجر به افزایش ضریب‌دبی می‌گردد.

۲.۳. SVM

پارامترهای بی‌بعد مختلف به‌عنوان ورودی مدل‌های مختلف، و ضریب‌دبی دریچه کشویی با آستانه به‌عنوان خروجی و ویژگی هدف در نظر گرفته شد و سعی گردید امکان کاربرد روش‌های داده‌کاوی در تخمین ضریب‌دبی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای پیش‌بینی ضریب‌دبی توسط روش‌های داده‌کاوی در حالت کلی تعداد ۷۰٪ داده‌ها برای مرحله آموزش مدل و ۳۰٪ داده‌ها برای قسمت آزمون مدل انتخاب گردید. در پژوهش حاضر ضریب‌دبی به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. این پارامترها مطابق جدول (۱) در مدل‌های مختلفی بررسی شدند. نتایج شاخص‌های آماری ماشین‌بردار پشتیبان برای این مدل‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. نحوه انتخاب بهترین مدل بدین‌صورت بود که شاخص‌های آماری R، RMSE، MRE% و KGE مناسبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. مطابق جدول (۲)، مدل شماره ۶ در

مقایسه با سایر مدل‌ها نتایج مطلوبی دارد، به‌طوری که برای این مدل در مرحله آموزش R=۰/۹۶۰، RMSE=۰/۰۱۶۲، MRE%=۱/۶۸ و KGE=۰/۹۳۹ است. همچنین برای مرحله آزمون مقادیر این شاخص‌ها به‌ترتیب ۰/۹۵۵، ۰/۰۱۸۲، ۰/۰۱۹۲ و ۰/۹ است. مدل شماره ۶ بیانگر مدل برتر در بخش ماشین‌بردار پشتیبان است. در شکل (۲) نمودار داده‌ها مابین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده حاصل از مدل SVM برای مدل برتر نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که روند میزان تغییرات حاصل از نتایج آزمایشگاهی همانند نتایج پیش‌بینی شده است. با توجه به شکل (۲-پ، ت)، ملاحظه می‌گردد که برای مدل برتر، در مرحله آموزش و آزمون دامنه وسیعی از داده‌ها در باند خطای ۳±٪ قرار دارند به‌طوری که در مرحله آموزش و آزمون به‌ترتیب بیش از ۹۰ و ۸۱ درصد داده‌ها در باند خطای ۳±٪ قرار دارند که این موضوع بیانگر دقت بالای حل در زمان انتخاب تمامی پارامترهای موثر ورودی به مدل SVM است. بررسی نتایج نشان داد که ضریب تخلیه حساسیت بیشتری به پارامتر H_0/B دارد. کم‌ترین میزان حساسیت نیز مربوط به پارامتر X/B است.

مطابق جدول (۳)، از میان کرنل‌های Linear، Polynomial، RBF و Sigmoid، کرنل RBF با توجه به نتایج شاخص‌های آماری آن به‌عنوان کرنل برتر برای مدل ماشین‌بردار پشتیبان انتخاب گردید.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های مختلف در پژوهش حاضر، مقادیر ضریب‌دبی آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده به‌ازای تعداد داده‌های مربوط به مرحله آموزش و آزمون در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر ضریب‌دبی آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای کرنل‌های مختلف، در شکل (۳-الف) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد کرنل RBF دقت بالایی در مقایسه با سایر کرنل‌ها داشته و ضریب‌دبی را با دقت بالایی پیش‌بینی کرده است. با توجه به

جدول ۲. نتایج پیش‌بینی ضریب‌دبی در نمونه‌های مختلف.

نمونه	آموزش				آزمون			
	R (-)	RMSE (-)	KGE (-)	MRE (%)	R (-)	RMSE (-)	KGE (-)	MRE (%)
۱	۰/۸۷	۰/۰۲۹۵	۰/۷۴	۲/۶۸	۰/۸۵	۰/۰۳۲۶	۰/۶۹	۲/۹۵
۲	۰/۸۸	۰/۰۲۹۲	۰/۷۲	۲/۶۳	۰/۸۶	۰/۰۳۲۵	۰/۶۷	۲/۸۷
۳	۰/۹۵	۰/۰۱۸۲	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۰۲۰۷	۰/۸۴	۲/۰۲
۴	۰/۹۵	۰/۰۱۸۱	۰/۹۲	۱/۸۳	۰/۹۴	۰/۰۲۰۴	۰/۸۷	۲/۰۷
۵	۰/۹۶	۰/۰۱۷۳	۰/۹۴	۱/۷۶	۰/۹۵	۰/۰۱۸۸	۰/۹۰	۱/۹۹
۶	۰/۹۶	۰/۰۱۶۲	۰/۹۴	۱/۶۸	۰/۹۶	۰/۰۱۸۲	۰/۹۰	۱/۹۲

جدول ۳. نتایج شاخص‌های آماری کرنل‌های مختلف در مرحله آزمون برای مدل SVM.

شاخص آماری	کرنل			
	خطی	چندجمله‌ای	پایه تابع شعاعی	سیگموئید
R	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۹۶	۰/۳۴
KGE	۰/۷۰	۰/۵۶	۰/۹۰	-۲/۰۷
RMSE	۰/۰۳۶	۰/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۲۴
MRE%	۴/۰۶	۵/۴۷	۱/۹۲	۲۲/۱

شکل ۲. ضریب‌دبی آزمایشگاهی در برابر پیش‌بینی شده الف) مرحله آموزش ب) مرحله آزمون، پراکندگی درصد خطای نسبی داده‌ها پ) مرحله آموزش ت) مرحله آزمون.

شکل ۳. مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده ضریب‌دبی در مرحله آموزش و آزمون به‌ازای داده‌های مختلف.

شکل (۳)، در میان مدل‌ها که مدل شماره ۶ به‌عنوان مدل برتر معرفی گردید، مدل شماره ۵ نیز نتایج نزدیک به نتایج آزمایشگاهی دارد. نتایج شاخص‌های آماری برای این مدل در مرحله آموزش R=۰/۹۵۵، RMSE=۰/۰۱۷۳، KGE=۰/۹۴ و MRE%=۱/۷۶ است. نتایج این شاخص‌ها برای مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۹۵۱، ۰/۰۱۸۸، ۰/۹۰۱ و ۰/۰۱۹۹ است. در مدل‌های شماره ۱ و ۲ این اختلاف بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به عدم استفاده از سایر پارامترهای بی‌بعد همچون X/B، Z/B و ε/B دانست. هرچندکه پارامتر X نقش چندانی نداشته و نتایج مدل‌های ۵ و ۶ به‌یکدیگر نزدیک هستند. علت این مسئله می‌تواند به تأمین نقش این پارامتر توسط سایر پارامترها گردد. با اینکه موقعیت آستانه تأثیر م ثبتی در افزایش ضریب‌دبی دریچه کشویی دارد و بیشترین مقدار آن مربوط به حالت مماس بر دریچه در بالادست آن است.

۳.۳. ANN

در جدول (۴) نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف ورودی (جدول ۱) در روش ANN با استفاده از نوع شبکه MLP آورده شده است. در این روش نیز همانند مدل ماشین‌بردار پشتیبان، ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۳۰٪ داده‌ها برای آزمون به‌صورت تصادفی توسط نرم‌افزار انتخاب شدند. حداقل و

جدول ۴. نتایج شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف در روش ANN .

نمونه	آموزش				آزمون			
	R (-)	RMSE (-)	KGE (-)	MRE (%)	R (-)	RMSE (-)	KGE (-)	MRE (%)
۱	۰/۹۷	۰/۰۱۴۰	۰/۹۶	۱/۶۱	۰/۹۵	۰/۰۱۷۲	۰/۹۵	۱/۷۲
۲	۰/۹۷	۰/۰۱۳۸	۰/۹۶	۱/۴۶	۰/۹۶	۰/۰۱۵۱	۰/۹۶	۱/۴۴
۳	۰/۹۸	۰/۰۱۲۵	۰/۹۷	۱/۳۰	۰/۹۵	۰/۰۱۶۸	۰/۹۵	۱/۶۶
۴	۰/۹۸	۰/۰۱۳۳	۰/۹۷	۱/۴۹	۰/۹۵	۰/۰۱۶۸	۰/۹۵	۱/۶۳
۵	۰/۹۸	۰/۰۱۲۹	۰/۹۶	۱/۳۸	۰/۹۵	۰/۰۱۶۷	۰/۹۵	۱/۵۶
۶	۰/۹۹	۰/۰۰۷۵	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۸	۰/۰۰۹۸	۰/۹۸	۱/۱۵

حداکثر تعداد لایه‌های مخفی به‌ترتیب ۳ و ۲۱ انتخاب شد تا عملیات بیشتری به‌منظور پیدا کردن برترین مدل انجام گیرد. مطابق جدول (۴) زمانی که از تمام پارامترهای ابعادی استفاده می‌شود دقت حل در مقایسه با سایر مدل‌ها افزایش می‌یابد. هرچند که نتایج سایر مدل‌ها نیز به‌یکدیگر نزدیک هستند اما مورد شماره ۶ نتایج بهتری را تولید می‌کند. نتایج شاخص‌های R، RMSE، MRE% و KGE برای مورد شماره ۶ در مرحله آموزش به‌ترتیب ۰/۹۹۲، ۰/۰۰۷۵، ۰/۸۹ و ۰/۹۹۲ است این مقادیر برای مرحله آزمون نیز به‌ترتیب

شکل ۵. پراکندگی داده‌ها در موردهای مختلف در مدل GEP الف) مرحله آموزش ب) مرحله آزمون.

۰/۹۸۴، ۰/۰۰۹۸، ۱/۱۵ و ۰/۹۷۶ است. نمودار اسکاتر پلات برای مرحله آموزش و آزمون مدل شماره ۶ در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴.۳. GEP

در شکل (۵) نمودار پراکندگی در مرحله آموزش و آزمون برای تمامی موردهای مختلف در مدل GEP آورده شده است. نتایج شاخص‌های آماری R، RMSE، KGE و MRE% برای مرحله آموزش به‌ترتیب ۰/۹۶۶، ۰/۰۱۵۸، ۰/۹۴۲ و ۱/۶۹ است. برای مرحله آزمون نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۹۷۹، ۰/۰۱۸۶، ۰/۸۵ و ۲/۲۸ است.

۵.۳. KNN

در شکل (۶-الف)، میزان RMSE و MRE برای مرحله آزمون مدل ۶ در مقادیر مختلف K آورده شده است. میزان K ای درست است که بتواند مرزی را تعیین کند که با کم‌ترین خطا داده‌ها را پیش‌بینی نماید. بررسی ضریب همسایگی نزدیک نشان داد بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌گردد که از ضریب ۲ استفاده شود. در K برابر ۲ مقادیر شاخص‌های آماری RMSE و MRE کم‌ترین میزان را به خود اختصاص داده است. در شکل (۶-ب، پ، ت و ث) مقادیر ضریب‌دبی برای معیارهای مختلف فاصله اندازه‌گیری ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در فاصله منهتن نتایج نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده و مقادیر شاخص‌های آماری R، RMSE، MRE% و KGE به‌ترتیب ۰/۹۶۵، ۰/۰۱۶، ۱/۷۰ و ۰/۹۶ است. نتایج در فاصله اقلیدسی

شکل ۴. ضریب‌دبی آزمایشگاهی در برابر ضریب‌دبی پیش‌بینی شده الف) مرحله آموزش ب) مرحله آزمون.

و اقلیدسی مربع به‌یکدیگر نزدیک هستند. هر دو فاصله مذکور در بازه خطای ±۸/۳۹٪ قرار دارند. هرچند که شاخص‌های آماری ذکر شده بر روی هر نمودار تفاوت‌هایی بایکدیگر دارند. معیار اندازه‌گیری فاصله چبیشو در مقایسه با سایر نمودارها بدترین نتایج شاخص‌های آماری را دارد. زمانی‌که مجموعه داده‌ها دارای ویژگی‌های گسسته باشند، به نظر می‌رسد فاصله منهتن مناسب و مطلوب کار کند، زیرا مسیری که به طور واقعی می‌توان در مقادیر آن ویژگی‌ها طی کرد را در نظر می‌گیرد. در حالی‌که فاصله اقلیدسی یک خط مستقیم بین دو بردار به‌دست می‌آورد ولی ممکن است این امر امکان‌پذیر نباشد. فاصله چبیشو را تنها می‌توان در یک سری موارد استفاده نمود و نمی‌توان از این معیار به‌عنوان یک معیار فاصله همه‌منظوره استفاده کرد.

۶.۳. مدل برتر

به‌منظور انتخاب برترین مدل از میان مدل‌های SVM، KNN، ANN و GEP نتایج برترین‌های هر گروه در شکل (۷) نشان داده شده است. مطابق شکل (۷-الف) مشاهده می‌گردد که برای مدل SVM-RBF مقادیر در بازه خطای نسبی ±۹/۵۴٪ قرار دارند. مقدار RMSE و MRE% برای این مدل به‌ترتیب ۰/۰۱۸۲ و ۱/۹۲ است. برای مدل KNN-Manhattan داده‌ها در بازه خطای نسبی ±۷/۷۶٪ قرار دارند. این مدل در مقایسه با مدل SVM-RBF نتایج مطلوبی را ارائه داده است. به‌طوری که میزان RMSE و MRE% برای مدل مذکور به‌ترتیب ۰/۰۱۶۰ و ۱/۷۰ است. برای روش GEP حداکثر

شکل ۶. الف) مقادیر RMSE و MRE٪ به‌ازای K مختلف، ضریب‌دبی پیش‌بینی شده در برابر آزمایشگاهی در معیار اندازه‌گیری ب) فاصله اقلیدسی، پ) فاصله اقلیدسی مربع، ت) فاصله منهتن و ث) فاصله چبیشو.

مقدار درصد خطای نسبی ۶/۱۱-٪ است. نتایج روش ANN-MLP در مقایسه با سه مدل قبلی نتایج بهتری از نظر آماری دارد و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. برای روش ANN-MLP داده‌ها در بازه درصد خطای نسبی ۴/۸۰±٪ قرار گرفته‌اند. مقادیر شاخص‌های آماری فوق نیز برای این مدل به‌ترتیب ۰/۰۰۹۸ و ۱/۱۵٪ است. مقدار ضریب همبستگی برای مدل‌های فوق در مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۹۵۵، ۰/۹۶۵ و ۰/۹۸۴ است. مقایسه ضرایب‌دبی حاصل از مدل‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی حاکی از هم‌پوشانی بهتر داده‌ها در روش ANN با نتایج آزمایشگاهی است (شکل ۷-ب).

نمودار جعبه‌ای یک روش استاندارد برای نمایش توزیع داده‌ها است که براساس شاخص‌های آماری کوچک‌ترین مقدار، چارک اول، میانه، چارک سوم و بزرگ‌ترین مقدار ساخته شده است (شکل ۸). همچنین این نمودار می‌تواند در مورد وجود داده‌های دور افتاده یا پرت، اطلاعاتی را دهد و مقدار آن‌ها را تعیین کند. همچنین نشان دادن تقارن در داده‌ها از کارهایی این نمودار است.

خط عمودی که به موازات جعبه‌ها امتداد می‌یابد، تغییرپذیری خارج از چارک‌های بالا و پائین را نشان می‌دهد. نمودار جعبه‌ای که در شکل (۸) برای

شکل ۷ .الف) مقادیر ضریب‌دبی آزمایشگاهی در برابر پیش‌بینی شده ب) مقایسه مقادیر ضریب‌دبی به‌ازای داده‌های مختلف در مرحله آزمون.

شکل ۸. نمودار جعبه ای داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای مرحله آزمون.

مرحله آزمون نشان داده شده است، نشان می‌دهد که مدل ANN دارای عمق انتهای بالاتر و پائین جعبه‌ها تقریباً با مقادیر مشاهده شده، یکسان است.

جدول ۵. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با تحقیق[۲]. Daneshfaraz et al.

مورد	R	MRE (%)	RMSE
ANN-MLP	۰/۹۸۴	۱/۱۵	۰/۰۰۹۸
Daneshfaraz et al. [2]	۰/۹۸۰	۱/۴۸	۰/۰۱۱۲

در جدول (۵) مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با رابطه تجربی تحقیق Daneshfaraz et al. [۲] نشان داده شده است. مطابق جدول (۵) نتایج شاخص‌های آماری RMSE، MRE% و R در مدل ANN نتایج مطلوبی در مقایسه با رابطه تحقیق[۲] Daneshfaraz et al دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش‌های نوین داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان (SVM)، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (KNN) برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در پیش‌بینی ضریب‌دبی دریچه کشویی در حالت با آستانه استفاده شد. بدین‌منظور از ۳۴۵ داده آزمایشگاهی در قالب ۶ مدل مختلف ورودی براساس آنالیز ابعادی استفاده گردید. برای تمامی مدل‌های مذکور به‌صورت تصادفی ۷۰٪ داده‌ها برای مرحله آموزش و ۳۰٪ برای مرحله آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین درصد خطای نسبی (MRE%) و شاخص کلینگ گوپتا (KGE) نشان داد که در تمامی مدل‌های SVM، KNN، GEP و ANN، مدل با تمامی پارامترهای ورودی به‌عنوان مدل برتر شناخته شد. نتایج بررسی کرنل‌های مختلف نشان داد که کرنل تابع پایه شعاعی (RBF) در مقایسه با سایر کرنل‌های چند جمله‌ای (Polynomial)، خطی (Linear) و سیگوئید (Sigmoid) نتایج مطلوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدل KNN به‌ازای ضرایب همسایگی مختلف، در K برابر با ۲ نتایج شاخص‌های آماری RMSE و MRE کم‌ترین میزان را دارا است. همچنین برای این مدل بررسی معیارهای مختلف فاصله اندازه‌گیری نشان داد که معیار فاصله منهتن (Manhattan) در مقایسه با معیارهای اقلیدسی (Euclidean)، اقلیدسی مربع (Euclidean Squared) و چبیشو (Chebychev) نتایج بهتری را دارد و به‌عنوان معیار برتر در مدل KNN با نتایج شاخص‌های فوق، به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶۵، ۰/۰۱۶۰، ۰/۰۱۶۹ و ۰/۹۶۳ را به‌خود اختصاص داده است. بررسی نتایج مدل‌ها نشان داد که مدل‌های هوشمند مورد استفاده دقت بالایی در پیش‌بینی ضریب‌دبی دریچه با آستانه دارند که مبتنی بر پارامترهای مختلف ورودی که شامل مشخصات هندسی آستانه باشد، است. روش ANN در مقایسه با مدل‌های GEP، KNN و SVM نتایج بهتری دارد و به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

References - منابع

1. Negm, A.M., Alhamid, A.A. and El-Saiad, A.A., 1998. Submerged flow below sluice gate with a sill. *Proceedings of International Conference on Hydro-Science and Engineering Hydro-Science and Engineering ICHE98, Advan ces in Hydro-Science and Engineering,* Cottbus/Berlin, G.

2. Daneshfaraz, R. Norouzi, R. Abbaszadeh, H. and Azamathulla, H.M., 2022. Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. *Water Supply*, *22* (10), pp.7767–7781. DOI: https://doi.org/10.2166/ws.2022.354

3. Alhamid, A.A., 1999. Coefficient of discharge for free flow sluice gates. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *11* (1), pp.33-47. DOI: https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30989-9

4. Salmasi, F. and Norouzi Sarkarabad, R., 2018. Investigation of different geometric shapes of sills on discharge coefficient of vertical sluice gate. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *52* (1), 2-2 Doi: 10.22060/ceej.2018.14232.5596. DOI: https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14232.5596

5. Karami, S. Heidari, M.M. and Adib Rad, M.H., 2020. Investigation of free flow under the sluice gate with the sill using flow-3D model. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, *44*, pp.317–324. DOI: https://doi.org/10.1007/s40996-019-00310-x

6. Salmasi, F. and Abraham, J., 2020. Prediction of discharge coefficients for sluice gates equipped with different geometric sills under the gate using multiple non-linear regression (MNLR). *Journal of Hydrology*, *597*, 125728. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125728

7. Ghorbani, M.A. Salmasi, F. Saggi, M.K. Bhatia, A.S. Kahya, E. and Norouzi, R., 2020. Deep learning under H_2O framework: A novel approach for quantitative analysis of discharge coefficient in sluice gates. *Journal of Hydroinformatics*, *22* (6), pp.1603-1619. DOI: https://doi.org/10.2166/hydro.2020.003

8. Daneshfaraz, R. Norouzi, R. Abbaszadeh, H. Kuriqi, A. and Di Francesco, S., Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: An experimental and numerical analysis. *Fluids*, *7* (7), 244. DOI: https://doi.org/10.3390/fluids7070244

9. Lauria, A. Calomino, F. Alfonsi, G. and D'Ippolito, A., 2020. Discharge Coefficients for Sluice Gates Set in Weirs at Different Upstream Wall Inclinations. *Water*, *12* (1), 245. DOI: https://doi.org/10.3390/w12010245

10. Raju, R., 1984. Scale Effects in Analysis of Discharge Characteristics of Weir and Sluice Gates; Kobus: Esslingen am Neckar, Germany.

11. Vapnik. VN., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag, New York.

12. Jahed Armaghani, D. Asteris, P.G. Askarian, B. Hasanipanah, M. Tarinejad, R. and Huynh, V.V., 2020. Examining hybrid and single SVM models with different kernels to predict rock brittleness. *Sustainability*, *12* (6), 2229. DOI: https://doi.org/10.3390/su12062229

13. Su, M.Y., 2011. Real-Time anomaly detection systems for denial-of-service attacks by weighted K-nearest neighbor classifiers. *Expert Systems with Applications*, *38*, pp.3492–3498. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.137

14. Al-Bulushi, N.I. King, P.R. Blunt, M.J. and Kraaijveld, M., 2010. Artificial neural networks workflow and its application in the petroleum industry. *Neural Comput. Appl*, *21*, pp.409–421. DOI: https://doi.org/10.1007/s00521-010-0501-6

15. Mohammed, A.Y. and Sharifi, A., 2020. Gene Expression Programming (GEP) to predict coefficient of discharge for oblique side weir. *Appl Water Sci*, *10*, 145. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-020-01211-5

16. Gupta, H.V. Kling, H. Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol*, *377* (1-2), pp.80–91. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۱۳-۲۶ ، (پژوهشی)

Original Article

استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین

سامان باقری* (دانشیار)
حسین حیاتی‌راد (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

در مطالعه‌ی حاضر، پاسخ‌های کشسان و ناکشسان سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد تسلیم‌شونده با سخت‌شوندگی تحت پالس‌های ساده‌شده‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل، به‌صورت توابع پاسخ بسامدی برای جابجایی نسبی و شتاب کل سازه استخراج و ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین، از مدل ریاضی پالس ماورویدیس و پاپاجورجیو استفاده شده است. متغیرهای بررسی‌شده در تحلیل پارامتریک، شامل ۶ پارامتر بی‌بُعد بوده است، که دو مورد برای تحریک ورودی، دو مورد برای خواص سازه، و دو مورد آخر نیز برای نسبت بین تحریک و سازه بوده و عبارت‌اند از: تعداد پالس، فاز (شکل) پالس، نسبت میرایی سازه، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه، نسبت بسامد تحریک (پالس) به سازه، و نسبت دامنه‌ی تحریک (پالس) به مقاومت سازه. نتایج حاصل نشان داده است که علی‌رغم شباهت توابع پاسخ بسامدی جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی، خصوصیات دو پاسخ اخیر به هنگام رفتار خمیری کاملاً با هم متفاوت است. همچنین نحوه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف سازه و پالس ورودی در پاسخ‌ها به هنگام رفتار خطی و یا غیرخطی متفاوت است.

واژگان کلیدی: تحریک‌های پالسی‌شکل، زلزله‌های نزدیک گسل، تابع پاسخ بسامدی، جابجایی، شتاب.

s_bagheri@tabrizu.ac.ir
hossein.raad.hayati@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

طی سال‌های گذشته، ماهیت متمایز زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل از زلزله‌های دور از گسل شناخته شده است. بسیاری از زلزله‌های نزدیک گسل، محتوای بسامدی پایین (دوره‌ی تناوب بالا) و همچنین پالس‌های شدید سرعت دارند. توان آسیب‌زایی شدید زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل در سازه‌های مهندسی پس از چند زلزله‌ی قوی و مخرب، از جمله زلزله‌های: نورثریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، و چی‌چی (۱۹۹۹) بیش از پیش آشکار شده است.

به‌دلیل ماهیت ضربه‌یی (پالس‌گونه) بیشتر حرکت‌های زمین در حوزه‌های نزدیک گسل، پژوهشگران از مدل‌های ریاضی توابع پالسی‌شکل برای مدل‌سازی محتوای دوره‌ی تناوب بالای آن‌ها استفاده کرده‌اند. استفاده از پالس‌های ساده در ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌ها، فقط مربوط به بارگذاری لرزه‌یی نمی‌شود و سابقه‌یی طولانی دارد. به‌عنوان مثال، بیگز[۱] (۱۹۶۴)،[1] از پالس‌های یک‌طرفه در شکل‌های مستطیلی، مثلثی، و شیب‌دار برای ارزیابی پاسخ کشسان و غیرکشسان سیستم‌های تک درجه‌ی آزادی (SDOF)[۲] استفاده کرده است. استفاده از شکل‌های یک‌طرفه به‌دلیل شکل موج‌های غیرواقعی برای حرکت‌های زمین، کاستی‌هایی دارد و آن‌ها بیشتر برای شبیه‌سازی بار ناشی از ضربه و انفجار مناسب هستند.

در ادبیات فنی، چند مدل ریاضی از تحریک‌های پالس‌گونه را که برای نشان‌دادن ویژگی‌های برجسته‌ی حرکت‌های زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل است، می‌توان مشاهده کرد.[۲-۱۰] در ادامه، برخی از مدل‌های ذکرشده که کاربرد بیشتری یافته‌اند، به‌طور خلاصه توصیف شده‌اند. ماورویدیس و پاپاجورجیو[۳] (۲۰۰۳)،[۶] یک مدل تحلیلی برای بیان ریاضی خصوصیات زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل ارائه کرده‌اند؛ که از مزیت‌هایش این بوده است که پارامترهای ورودی، معنای فیزیکی دارند و با استفاده از تعداد زیادی رکورد

*نویسنده مسئول
تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ ، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳.

استناد به این مقاله:
باقری، سامان و حیاتی‌راد، حسین، ۱۴۰۳. استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص.۱۳-۲۶. DOI:10.24200/J30.2024.63654.3280.

[۱] Biggs
[۲] Single Degree Of Freedom
[۳] Mavroeidis & Papageorgiou

واقعی، زلزله‌ی نزدیک گسل واسنجی شده است. علوی و کراوینکلر[۱] (۲۰۰۴)،[۷] از سه نوع موج مربعی پالس شتاب، که می‌توانند به‌صورت خیلی ساده توسط دو پارامتر دوره‌ی تناوب پالس و شدت آن تعریف شوند، در مطالعات‌شان استفاده کرده‌اند. آن‌ها به وجود شباهت بین پاسخ سازه‌های قاب خمشی تحت تحریک‌های زلزله‌های واقعی نزدیک گسل و تحریک‌های پالس‌گونه اشاره کرده و نشان داده‌اند وقتی که نسبت دوره‌ی تناوب اصلی سازه به دوره‌ی تناوب پالس در محدوده‌ی ۰/۳۷۵ تا ۳ باشد، ویژگی‌های مهم پاسخ به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل را می‌توان با پالس‌های معادل ساده‌ی آن‌ها نشان داد. هی و آگراوال[۲] (۲۰۰۸)،[۸] از کاهندگی زمانی تابع نمایی با توان منفی در کنار تابع هارمونیک برای بیان تحلیلی پالس‌های سرعت مشاهده‌شده در حرکت‌های زمین حوزه‌ی نزدیک گسل استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی دیگری، مصطفی و تاکواکی[۳] (۲۰۱۰)،[۹] به توسعه‌ی مدل‌های ساده‌ی تعینی (قطعی) و احتمالاتی برای حرکت‌های پالس‌دار زمین در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل پرداخته‌اند. از مدل قطعی می‌توان برای شبیه‌سازی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین به‌عنوان ورودی برای تحلیل تاریخچه‌ی زمانی سازه‌های کشسان و غیرکشسان استفاده کرد. ترکیب مدل احتمالاتی با انواع روش‌های قابلیت اطمینان نیز می‌تواند برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های کشسان و غیرکشسان استفاده شود.

مطالعه‌ی پاسخ سیستم‌های کشسان و ناکشسان تحت حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین، از جمله موضوع‌های مهندسی زلزله است، که در سال‌های اخیر موردتوجه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است.[۳و۴، ۱۱-۲۰] استفاده از شکل‌های بسیار ساده برای پالس‌های تحلیلی و یا فرض نامیرا یا خطی‌بودن سیستم اصلی می‌تواند منجر به حصول فرم بسته‌ی پاسخ شود؛[۳، ۴، ۱۵، ۱۶، و ۲۰] ولی در هنگام استفاده از پالس‌های تحلیلی دقیق‌تر برای سیستم‌های ناکشسان و میرا، معمولاً انجام تحلیل‌های عددی برای حصول پاسخ الزامی است. در پژوهش حاضر از پالس تحلیلی ماورویدیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳)،[۶] که دقت و مقبولیت بالایی برای شبیه‌سازی زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه دارد، استفاده شده است؛ لذا در ادامه، به مطالعاتی که از مدل تحلیلی مذکور برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها استفاده کرده‌اند، اشاره شده است. همچنین از این به بعد، برای رعایت اختصار، پالس مذکور با عنوان پالس ماورویدیس خطاب شده است. ماورویدیس و همکاران (۲۰۰۴)،[۱۳] پاسخ کشسان سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد را تحت پالس ماورویدیس در حالت خاص نامیرا به صورت تحلیلی و به فرم طیف پاسخ کشسان ارائه کرده‌اند. ایشان همچنین برای همان سیستم تک‌درجه‌ی آزاد نامیرا با فرض رفتار کشسان- خمیری کامل[۴] (بدون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) پاسخ را به‌صورت طیف پاسخ ناکشسان تسلیم محاسبه کرده‌اند. الونسو- رودریگز و میراندا[۵] (۲۰۱۵)،[۱۶] یک حل تحلیلی بسته برای پاسخ سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی تحت پالس ماورویدیس ارائه و با استفاده از همان حل و براساس مفهوم برهم نهی مودال، پاسخ و رفتار مدل ساده‌یی از ساختمان‌های چندطبقه به‌صورت تیر طره‌ی خمشی- برشی را ارزیابی کرده‌اند. گو[۶] و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۷] به بررسی اثر مدت دوام[۷] حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین و شناسایی مناسب‌ترین معیار (شاخص) برای آن پرداخته‌اند. ارزیابی‌ها بر روی سازه‌های تک‌درجه‌ی آزاد کشسان و کشسان- خمیری تحت پالس ماورویدیس و همچنین زلزله‌های واقعی نزدیک گسل انجام و پاسخ‌های درنظر گرفته‌شده عبارت بودند از: بیشینه‌ی جابجایی نرمال‌شده و انرژی هیسترزیس نرمال‌شده. در مطالعه‌ی یانگ[۸] و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۸] از پالس‌های ساده‌ی هارمونیک و پالس ماورویدیس و همچنین رکوردهای زلزله‌ی نزدیک گسل واقعی برای تحلیل ابعادی سازه‌های تک‌درجه‌ی آزاد خطی و غیرخطی استفاده کرده‌اند. ایشان فقط پاسخ جابجایی بیشینه‌ی سازه را مد نظر قرار داده و به ارزیابی مقیاس طول مناسب برای نرمال‌کردن کمیت ذکرشده‌ی پاسخ پرداخته‌اند. در تحلیل ابعادی اخیر، فقط آثار تغییر دامنه و دوره‌ی تناوب پالس ورودی تحلیل و برای مشخصه‌های تعداد و زاویه‌ی فاز پالس ماورویدیس مقادیر ثابتی فرض شده است.

در نوشتار حاضر، توابع پاسخ بسامدی سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزاد خطی (کشسان) و غیرخطی (کشسان-خمیری دوخطی با سخت‌شوندگی پس از تسلیم) تحت پالس تحلیلی ماورویدیس به‌عنوان شبیه‌ساز محتوای دوره‌ی تناوب بالای زلزله‌های نزدیک گسل، استخراج و به‌صورت پارامتریک با تغییر تمام پارامترهای تحریک ورودی و سازه ارزیابی شده‌اند. مطالعه‌ی پارامتریک حاضر، باعث درک فیزیکی بهتر و جامع‌تر از رفتار سیستم‌های خطی و غیرخطی تحت حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین می‌شود. توابع بسامدی استخراج‌شده، حالت‌هایی که منجر به تشدید یا تضعیف پاسخ‌ها شده است، را نمایان می‌سازند و لذا برای طراحی‌ها بسیار سودمند خواهند بود. همچنین با استفاده از توابع بسامدی مذکور و براساس اهداف طراحی، می‌توان نسبت به انتخاب پارامترهای مناسب و تقریباً بهینه‌ی سیستم‌های کشسان و غیرکشسان تحت حرکت‌های پالس‌گونه اقدام کرد. خصوصیات بارز پژوهش حاضر در مقایسه با کارهای مشابه قبلی را می‌توان در این سه مورد خلاصه کرد:

الف) پاسخ‌ها به‌صورت توابع پاسخ بسامدی بی‌بُعدشده‌ی مناسب بر روی محدوده‌ی بسامدی وسیع ارائه و ارزیابی می‌شوند. لذا، امکان مقایسه‌ی نتایج با آثار دینامیکی انواع بارگذاری‌های دیگر فراهم می‌شود.
ب) اثر تمامی پارامترهای تحریک ورودی پالس‌گونه (شامل ۴ مورد: دامنه، بسامد یا دوره‌ی تناوب، زاویه‌ی فاز، و تعداد) و سازه‌ی ناکشسان دوخطی (شامل ۴ مورد: بسامد یا دوره‌ی تناوب، نسبت میرایی، مقاومت، و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) به صورت مجموعاً ۶ متغیر بی‌بُعد در تحلیل‌های پارامتریک ارزیابی می‌شود.
ج) علاوه‌بر پاسخ جابجایی سازه، پاسخ شتاب کل آن نیز استخراج و ارزیابی می‌شود. در حالی که جابجایی معمولاً معیاری برای خرابی اجزاء سازه‌یی است، شتاب کل نیز معیار خرابی برخی اجزاء غیرسازه‌یی، و همچنین معیار آسایش و ایمنی ساکنان است.

۲. مدل ریاضی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین

در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی پالس‌های سرعت مشاهده‌شده در زلزله‌های نزدیک گسل از مدل ریاضی پیشنهادی ماورویدیس و پاپاجورجیو

[۱] Alavi & Krawinkler
[۲] He & Agrawal
[۳] Moustafa & Takewaki
[۴] Elastic-perfectly plastic
[۵] Alonso-Rodriguez & Miranda
[۶] Guo
[۷] Duration effect
[۸] Yang

(۲۰۰۳)،[۶] استفاده شده است. آن‌ها برای بیان ریاضی تاریخچه‌ی زمانی پالس سرعت از موجک گابور[۱] اصلاح‌شده استفاده کرده‌اند؛ بدین ترتیب که منحنی پوش موجک گابور، که یک تابع نمایی (گوسی[۲]) است، را با یک تابع متقارن زنگوله‌یی‌شکل دیگر، که بیان تحلیلی ساده‌تری دارد (کسینوسی بالارفته)، جایگزین و تاریخچه‌ی زمانی پالس سرعت و شتاب زمین را به‌صورت روابط ۱ و ۲ ارائه کرده‌اند:

$$v_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{2}\left[1+\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right]\cos\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right], & t_0-\dfrac{\gamma}{2f_p}\le t\le t_0+\dfrac{\gamma}{2f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \quad (1)$$

$$a_g(t)=\begin{cases}-\dfrac{A\pi f_p}{\gamma}\left[\begin{array}{l}\sin\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\cos\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right]+\\ \gamma\sin\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right]\left[1+\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right]\end{array}\right], & t_0-\dfrac{\gamma}{2f_p}\le t\le t_0+\dfrac{\gamma}{2f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \quad (2)$$

که در آن‌ها، A نشان‌دهنده‌ی بزرگی پالس است، که دامنه‌ی پالس را کنترل می‌کند؛ f_p بسامد غالب پالس است (در نتیجه بسامد دورانی پالس $\omega_p=2\pi f_p$ و دوره‌ی تناوب پالس $T_p=1/f_p$ است)؛ υ زاویه‌ی فاز پالس است، که $\upsilon=0$ توصیف‌کننده‌ی پالس متقارن و $\upsilon=\pm\pi/2$ توصیف‌کننده‌ی پالس پادمتقارن خواهد بود؛ γ متغیری است که مشخصه‌ی نوسانی تحریک (تعداد پالس) را تعریف می‌کند ($\gamma>1$)، و t_0 زمان متناظر با اوج پالس است.

با توجه به اینکه در روابط ۱ و ۲، زمان کل تحریک پالسی‌شکل γ/f_p است، می‌توان مبدأ زمان را لحظه‌ی آغازین تحریک در نظر گرفت (یعنی $t_0=\gamma/2f_p$)، و به این ترتیب پارامتر t_0 را از رابطه‌ی پالس ورودی خارج کرد. در این‌صورت، سرعت و شتاب پالس ورودی به‌صورت روابط ۳ و ۴ ساده می‌شوند.[۱۳ و ۱۶]

$$v_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{2}\left[1-\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right]\cos\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right], & 0\le t\le\dfrac{\gamma}{f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \quad (3)$$

$$a_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A\pi f_p}{\gamma}\left[\begin{array}{l}\sin\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\cos\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right]-\\ \gamma\sin\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right]\left[1-\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right]\end{array}\right], & 0\le t\le\dfrac{\gamma}{f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \quad (4)$$

همچنین باید توجه داشت که اگرچه A نشان‌دهنده‌ی بزرگی پالس است، ولی در حالت کلی و به ازاء همه‌ی متغیرهای دیگر پالس (مخصوصاً زمانی که $\upsilon\neq 0$ باشد)، دقیقاً برابر دامنه‌ی سرعت نیست؛ در نتیجه، $\omega_p A\equiv 2\pi f_p A$ نیز برابر بیشینه‌ی مقدار شتاب پالس ورودی نیست. بیان بیشینه‌ی مقادیر سرعت و شتاب تحریک به‌صورت تحلیلی مشکل است و در هر مورد می‌توان به‌صورت عددی آن‌ها را محاسبه کرد. در این رابطه، باز قابل توجه است که بیشتر مطالعات استفاده‌کننده از پالس ماورویدیس همانند برخی منابع،[۱۳، ۱۷، و ۱۸] بدون درنظرگرفتن نکته‌ی اخیر، پاسخ‌های محاسباتی خود را بر حسب پارامتر کنترل‌کننده‌ی دامنه و نه مقدار دقیق دامنه‌ی تحریک بیان و بی‌بُعد کرده‌اند. اگرچه این‌کار به خودی خود ایراد ندارد؛ ولی در این‌صورت نتایج حاصل با نتایج به‌دست‌آمده از سایر بارگذاری‌های دینامیکی قابل مقایسه نخواهد بود.

در شکل ۱، تاریخچه‌ی زمانی سرعت و شتاب زمین برای پالس ماورویدیس در حالت متقارن ($\upsilon=0$) با پارامترهای $T_p=1\ \text{s}$، $A=100\ \text{cm/s}$ و سه γ مختلف مشاهده می‌شود (شتاب با تقسیم بر g بر حسب شتاب ثقل زمین محاسبه شده است).

۳. فرمول‌بندی ابعادی پاسخ‌های کشسان و ناکشسان سیستم تک‌درجه‌ی آزاد تحت تحریک‌های پایه

سیستم یک درجه‌ی آزاد در نظر گرفته‌شده مطابق شکل ۲، شامل جرم (m)، فنر دوخطی با سختی کشسانی (k)، جابجایی تسلیم (u_y)، مقاومت تسلیم ($F_y=ku_y$)، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم (α)، و ضریب میرایی (c) است. برای ارتعاش سیستم اخیر در حوزه‌ی کشسان خطی بسامد طبیعی دورانی و نسبت میرایی به ترتیب برابر: $\omega=\sqrt{k/m}$ و $\xi=c/2m\omega$ بوده است. با درنظرگرفتن شتاب حد مقاومت جاری‌شدن برابر با $a_y=F_y/m$، این حد شتاب را که به اختصار شتاب تسلیم سازه نیز نامیده می‌شود، می‌توان به شکل رابطه‌ی ۵ نیز بیان کرد:

$$a_y=\omega^2 u_y \quad (5)$$

معادله‌ی حرکت سیستم غیرخطی تحت تحریک پایه‌ی زمین به‌صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$\ddot{u}+2\xi\omega\dot{u}+\frac{f_s(u)}{m}=-\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

[۱] Gabor

[۲] Gaussian

شکل ۱. تاریخچه‌ی زمانی سرعت و شتاب پالس ماورویدیس با $T_p = ۱\ \mathrm{s}$ ، $A = ۱۰۰\ \mathrm{cm/s}$ ، $\upsilon = ۰$ و سه γ مختلف.

که در آن، $\ddot{u}_g(t)$ شتاب زمین است و در حالت کلی می‌تواند هر تابعی از زمان باشد. $f_s(u)$ نیز نیروی مقاوم ناشی از خاصیت کشسانی- خمیری سیستم است، که در سازه با رفتار کشسان خطی برابر ku ، و در سازه با رفتار کشسان- خمیری (دوخطی) یک تابع چند ضابطه‌یی مطابق شکل ۳ است.

چون در معادله‌ی حرکت (رابطه‌ی ۶)، تابع $f_s(u)$ با تقسیم بر جرم ظاهر می‌شود، بهتر است با تقسیم کمیت محور قائم در شکل ۳ بر جرم، رابطه‌ی نیروی جرم واحد در برابر جابجایی استخراج شود، که این‌کار در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن و معادله‌ی حرکت نتیجه می‌شود که برای هر تحریک پایه‌ی مفروض $\ddot{u}_g(t)$، پاسخ دینامیکی $u(t)$ سازه‌ی غیرخطی مدنظر ذکرشده فقط به ۴ پارامتر ξ، α، ω، و u_y بستگی دارد. با توجه به رابطه‌ی ۵، چهار پارامتر اخیر را می‌توان به‌صورت ξ، α، ω، و a_y نیز در نظر گرفت.

تحریک دینامیکی مفروض $\ddot{u}_g(t)$ در یکی از ساده‌ترین حالت‌های خود می‌تواند هارمونیک باشد، که فقط دو مشخصه‌ی $\ddot{u}_{g.}$ (دامنه) و $\bar{\omega}$ (بسامد تحریک) را خواهد داشت (یعنی $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{g.}\sin\bar{\omega}t$). می‌توان دو پارامتر دامنه و بسامد تحریک را در قیاس با مقاومت و بسامد طبیعی سازه به‌صورت پارامترهای بی‌بُعد به‌صورت رابطه‌های ۷ و ۸ تعریف کرد:

$$\bar{a} = \frac{\ddot{u}_{g.}}{a_y} = \frac{\ddot{u}_{g.}}{\omega^{۲} u_y} \qquad (۷)$$

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \qquad (۸)$$

که در آن‌ها، $\bar{a}$ نسبت دامنه‌ی (بیشینه) شتاب تحریک به شتاب تسلیم سازه یا به‌عبارتی نسبت اندازه‌ی نیروی معادل وارده به مقاومت تسلیم سازه و β نیز نسبت بسامد غالب تحریک به بسامد طبیعی سازه هستند. بنابراین پاسخ بی‌بُعدشده‌ی سازه‌ی غیرخطی تحت تحریک هارمونیک با دو مشخصه‌ی دامنه

شکل ۲. سیستم یک درجه‌ی آزاد تحت تحریک پایه.

شکل ۳. رابطه‌ی نیرو- جابجایی سیستم یک درجه‌ی آزاد غیرخطی.

شکل ۴. رابطه‌ی نیروی جرم واحد- جابجایی سیستم یک درجه‌ی آزاد غیرخطی.

و بسامد را می‌توان فقط براساس چهار پارامتر بی‌بُعد ξ، α، $\bar{a}$، و β بیان کرد.

در حالتی که تحریک مفروض $\ddot{u}_g(t)$، به‌صورت شتاب پالس تحلیلی ماورویدیس باشد، یعنی $a_g(t)$ در رابطه‌ی ۴، علاوه‌بر دو مشخصه‌ی دامنه و بسامد غالب، دو مشخصه‌ی γ و υ را هم خواهد داشت. در این حالت، $\bar{\omega}$ همان بسامد غالب پالس (ω_p) است و $\ddot{u}_{g.}$ نیز بیشینه‌ی مقدار رابطه‌ی ۴ است، که بر حسب A، ω_p، υ، و γ حاصل می‌شود. بنابراین پاسخ بی‌بُعدشده‌ی سازه با رفتار کشسان- خمیری دوخطی تحت پالس تحلیلی ماورویدیس تابعی از ۶ پارامتر بی‌بُعد خواهد بود: دو پارامتر خصوصیات سازه (ξ و α)، دو پارامتر نسبت تحریک به سازه (β و $\bar{a}$)، و دو پارامتر بیان‌کننده‌ی فرم تحریک پالسی (υ و γ). در حالتی که سازه با رفتار کشسان خطی فرض شود، α حذف می‌شود؛ همچنین $\bar{a}=0$ بوده و این پارامتر نیز از فهرست پارامترهای تعیین‌کننده‌ی پاسخ حذف می‌شود. این تذکر لازم است که برای هر نوع تحریک دینامیکی دیگر نیز اگر بتوان تابع زمانی تحریک را بر حسب بسامد غالب، بیشینه‌ی اندازه، و یک‌سری پارامترهای بی‌بُعد دیگر بیان کرد، می‌توان پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ بی‌بُعدشده‌ی سازه‌ی غیرخطی را مشابه تحلیل فوق نتیجه گرفت.

پاسخ‌های سازه‌یی مدنظر در پژوهش حاضر، شامل بیشینه‌ی جابجایی نسبی سازه نسبت به زمین ($u_{\max}$) و بیشینه‌ی شتاب کل سازه ($\ddot{u}^t_{\max}$) است. کمیت اول، معمولاً در ارزیابی خرابی اجزاء سازه‌یی و کمیت دوم، نیز در ارزیابی خرابی برخی اجزاء غیرسازه‌یی و همچنین تأمین آسایش ساکنان مهم هستند. کمیت دوم را به‌راحتی می‌توان بر حسب بیشینه‌ی اندازه‌ی (دامنه) شتاب تحریک ورودی یعنی $\ddot{u}_{g.}$ بی‌بُعد کرد. اگر لازم باشد کمیت اول نیز بر حسب پارامتری که در برگیرنده‌ی دامنه‌ی شتاب ورودی $\ddot{u}_{g.}$ باشد، بی‌بُعد شود، با توجه به اینکه جابجایی استاتیکی (δ_{st}) برابر با دامنه‌ی نیروی معادل وارده تقسیم بر سختی سازه است، در اینجا به شکل $\delta_{st}=\ddot{u}_{g.}/\omega^2$ در می‌آید، و می‌توان از δ_{st} برای این منظور استفاده کرد (رابطه‌های ۹ و ۱۰):

$$r_d=\frac{u_{\max}}{\delta_{st}}=\frac{u_{\max}}{\ddot{u}_{g.}/\omega^2} \qquad (۹)$$

$$r_a=\frac{\ddot{u}^t_{\max}}{\ddot{u}_{g.}} \qquad (۱۰)$$

که در آن‌ها، r_d و r_a به‌ترتیب پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل بی‌بُعدشده (نسبت پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل) هستند.

هر یک از پاسخ‌های بی‌بُعدشده را می‌توان به‌صورت تابعی از β به ازاء مقادیر مفروض سایر پارامترها بیان کرد، که آن را اصطلاحاً تابع پاسخ بسامدی (FRF)[۱] و منحنی حاصل را منحنی پاسخ بسامدی گویند. همچنین با توجه به نحوه‌ی بی‌بُعدکردن پاسخ‌ها، که بر حسب اندازه‌ی تحریک ورودی ($\ddot{u}_{g.}$) است، هر کدام از دو تابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب در این حالت در واقع اندازه‌ی تابع انتقال (TF)[۲] برای جابجایی و شتاب هم خواهند بود.

در بارگذاری هارمونیک، تابع پاسخ بسامدی جابجایی بی‌بُعدشده‌ی سازه در حالت مانا را ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی (DMF)[۳] نیز می‌نامند. برای سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی تحت بارگذاری هارمونیک، ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی و ضریب انتقال شتاب کل در مراجع دینامیک سازه‌ها،[۲۱ و ۲۲] طبق روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه و ارزیابی شده‌اند. ضرایب مذکور در سازه با رفتار کشسان- خمیری نیز می‌توانند با روش‌های تحلیلی تقریبی و یا روش‌های عددی ارزیابی شوند.[۲۳ و ۲۶] توابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل سازه تحت حرکت پالس‌گونه‌ی زمین، که در پژوهش حاضر با تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به‌دست آمده‌اند، در حالت رفتار خطی سازه قابل مقایسه با نتایج متناظر در بارگذاری هارمونیک مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ خواهند بود.

$$r_d^{steady}=\frac{1}{\sqrt{\left(1-\beta^2\right)^2+\left(2\xi\beta\right)^2}} \qquad (۱۱)$$

$$r_a^{steady}=\frac{\sqrt{1+\left(2\xi\beta\right)^2}}{\sqrt{\left(1-\beta^2\right)^2+\left(2\xi\beta\right)^2}} \qquad (۱۲)$$

همچنین لازم است که در مورد پارامتر بی‌بُعد $\bar{a}$، که مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف شده است، توضیح بیشتری ارائه شود. مشاهده شد که $\bar{a}$ به‌صورت نسبت بیشینه‌ی شتاب تحریک زمین به شتاب تسلیم سازه و یا به عبارتی، به‌صورت بیشینه‌ی اندازه‌ی نیروی مؤثر زلزله به مقاومت تسلیم سازه تعریف شده است ($\bar{a}=\ddot{u}_{g.}/a_y \equiv m\ddot{u}_{g.}/ma_y=P_{eff}/F_y$)؛ که در واقع سطح رفتار غیرخطی سازه را تعیین می‌کند. سازه با مقاومت تسلیم بی‌نهایت منجر به $\bar{a}=0$ و رفتار همواره خطی می‌شود. در حالی که با افزایش $\bar{a}$ از صفر به مقادیر بیشتر، تراز رفتار غیرخطی افزایش می‌یابد. در بارگذاری استاتیکی، مسلم است که $\bar{a}<1$ منجر به رفتار خطی سازه می‌شود و $\bar{a}=1$ مرز رفتار خطی و غیرخطی خواهد بود؛ ولی در بارگذاری دینامیکی در محدوده‌ی $0<\bar{a}<1$ نیز به خاطر آثار بزرگ‌نمایی دینامیکی ممکن است بروز رفتار غیرخطی در برخی بسامدهای تحریک نسبی (β) مشاهده شود. برای تشخیص اینکه آیا در یک بارگذاری با بسامد تحریک مشخص، ورود به ناحیه‌ی ناکشسان و رفتار غیرخطی اتفاق افتاده است، می‌توان از مقایسه‌ی بیشینه‌ی مقدار جابجایی با جابجایی تسلیم استفاده کرد. نسبت دو مورد اخیر، با عنوان معروف ضریب شکل‌پذیری نیاز (μ) طبق رابطه‌ی ۱۳ می‌تواند برای این موضوع استفاده شود:

$$\mu=\frac{u_{\max}}{u_y} \qquad (۱۳)$$

با توجه به تعریف اخیر و همچنین روابط ۷ و ۹، می‌توان μ را به شکل رابطه‌ی ۱۴ نیز نتیجه گرفت:

[۱] Frequency Response Function

[۲] Transfer Function

[۳] Dynamic Magnification Factor

$$\mu = r_d . \bar{a} \qquad (۱۴)$$

قابل توجه است که در بارگذاری استاتیکی و در سازه با رفتار کشسان- خمیری کامل، نیرو بیشتر از مقاومت تسلیم نمی‌تواند تحمل شود؛ یعنی حالت $\bar{a} > ۱$ منجر به پاسخ بی‌کران سازه می‌شود؛ ولی در سازه‌ی کشسان- خمیری با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم، حالت $\bar{a} > ۱$ می‌تواند با بروز جابجایی‌های بزرگ تحمل شود. به این موضوع نیز بعداً در ارزیابی پاسخ‌های عددی حاصل در پژوهش حاضر توجه شده است.

در انتهای بخش کنونی، یک نمونه از نتایج عددی تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی سیستم تک درجه‌ی آزاد مد نظر تحت پالس ماورویدیس با پارامترهای بی‌بُعد انتخابی ارائه شده است. برای حل عددی معادله‌های حرکت، از روش بتای نیومارک در حالت شتاب خطی با کدنویسی در محیط متلب استفاده شده است. در بخش بعد، نیز با تغییر تمامی پارامترهای بی‌بُعد در محدوده‌های کاربردی، نتایج تحلیل‌های پارامتریک ارائه و ارزیابی شده است. در اینجا دو مشخصه‌ی بی‌بُعد سازه، شامل نسبت میرایی و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم به‌صورت $\xi = ۰/۰۵$ و $\alpha = ۰$ درنظر گرفته شده است. دو مشخصه‌ی بی‌بُعد فرم پالس ماورویدیس نیز شامل تعداد پالس و زاویه‌ی فاز آن به‌صورت $\gamma = ۲$ و $\upsilon = ۰$ (معادل با پالس سرعت متقارن) فرض شده است. برای پارامترهای نسبی تحریک به سازه نیز $\beta = ۰/۷$ و $\bar{a} = ۰/۸$ انتخاب شده‌اند.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی براساس پارامترهای بی‌بُعد به‌صورت ۴ نمودار در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. برای راستی‌آزمایی روش حل عددی، نتایج حاصل از نرم‌افزار OpenSees نیز در شکل ۵ ارائه شده است. در نمودار اول شکل مذکور، تاریخچه‌ی زمانی شتاب پالس ورودی که براساس بیشینه‌ی اندازه‌ی آن نرمال شده است، به‌صورت تابعی از زمان نرمال‌شده (t/T_p) مشاهده می‌شود. درنظرگرفتن مقادیر صفر در انتهای پالس به‌منظور اخذ خروجی در فاز بعد از اعمال پالس تحریک، به‌صورت ارتعاش آزاد میرا بوده است. در دو نمودار بعد، تاریخچه‌ی زمانی جابجایی نرمال‌شده و شتاب کل نرمال‌شده ارائه شده‌اند. بیشینه‌ی مقادیر (اوج زمانی) این دو نسبت پاسخ، همان r_d و r_a است، که به ترتیب ۲/۵۵ و ۱/۴۴ استخراج شده‌اند. ارتعاش آزاد میرا در فاز پاسخ بعد از تحریک پالسی‌شکل کاملاً قابل مشاهده است. همچنین به دلیل ورود به ناحیه‌ی رفتار ناکشسان (خمیری)، تغییرشکل ماندگار[۱] به اندازه‌ی ۰/۵۲ برابر δ_{st} در سازه اتفاق افتاده است، که در فاز ارتعاش آزاد، جابجایی سازه حول این مقدار نوسان کرده است. در نمودار آخر، نیز منحنی هیسترزیس نیرو- جابجایی نرمال‌شده‌ی سازه ارائه شده است، که وقوع دو بار تسلیم در جابجایی منفی و یکبار تسلیم در جابجایی مثبت و همچنین ایجاد تغییرشکل ماندگار در انتها قابل مشاهده است.

در انتها قابل ذکر است علی‌رغم اینکه در مثال کنونی، $\bar{a} = ۰/۸ < ۱$ است، یعنی بیشینه‌ی اندازه‌ی شتاب ورودی کمتر از شتاب تسلیم سازه بوده است، آثار دینامیکی بار وارده باعث بروز رفتار غیرخطی شده است. در همین مثال، با تغییر β به مقادیر خیلی کوچک‌تر یا بزرگ‌تر و با حفظ مقادیر سایر پارامترها، رفتار خطی کشسان سازه مشاهده شده است.

شکل ۵. نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد تحت پالس ماورویدیس با پارامترهای بی‌بُعد: $\xi = ۰/۰۵$، $\alpha = ۰$، $\gamma = ۲$، $\upsilon = ۰$، $\bar{a} = ۰/۸$، و $\beta = ۰/۷$.

۴. ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سیستم تک‌درجه‌ی آزاد تحت پالس ماورویدیس

۱.۴. ارزیابی کلی و بررسی اثر تراز دامنه‌ی نسبی پالس

در بخش حاضر، برای انجام ارزیابی کلی از پاسخ‌ها و همچنین بررسی تأثیر پارامتر نسبت دامنه‌ی پالس، مقادیر $\bar{a}$ برابر با ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸، ۱، و ۱/۰۵ در نظر گرفته شده است، که مقدار اول یعنی صفر به معنی و متناظر با رفتار کشسان خطی سیستم در کلیه‌ی بسامدهای تحریک است. همچنین برای پارامتر تعداد پالس (γ)، سه مقدار ۱، ۲، و ۳ فرض شده است. سایر پارامترهای پالس و سازه در این قسمت ثابت هستند، یعنی زاویه‌ی فاز پالس $\upsilon = ۰$ (به معنی شکل پالس متقارن)، نسبت میرایی سازه $\xi = ۰/۰۵$ و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه $\alpha = ۰$ (به معنی رفتار کشسان- خمیری کامل) فرض شده است.

نتایج عددی حاصل به‌صورت توابع پاسخ بسامدی برای نسبت جابجایی (r_d)

[۱] Permanent deformation

)، نسبت شتاب کل (r_a)، و شکل‌پذیری نیاز (μ) در شکل‌های ۶ الی ۸ مشاهده می‌شوند. $\mu \leq ۱$ حاکی از پاسخ سازه در محدوده‌ی رفتار خطی و $\mu > ۱$ نشان‌دهنده‌ی ورود به حوزه‌ی رفتار ناکشسان است. مشاهده می‌شود برای کلیه‌ی حالت‌های $\bar{a} \leq ۱$، نقطه‌ی آغازین پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل برابر با ۱ است؛ یعنی وقتی β به سمت صفر میل می‌کند، که به معنی بارگذاری استاتیکی و یا سازه‌ی صلب است، مسلماً بیشینه‌ی جابجایی سازه همان جابجایی استاتیکی و بیشینه‌ی شتاب کل سازه نیز برابر دامنه‌ی شتاب وارده خواهد بود. سپس روند کلی توابع بسامدی، صعودی است و بعد از قله‌یی در β های میانی، دوباره با افزایش β نزول می‌کند و حتی در β های بزرگ به کمتر از ۱ هم می‌رسند. در حالت $\bar{a} > ۱$ برای سیستم کشسان–خمیری کامل ($\alpha = ۰$) که در این قسمت فرض شده است، زمانی که نسبت بسامد تحریک β به صفر میل می‌کند، r_d به سمت بی‌کران‌شدن می‌رود. زیرا بر سازه‌ی کشسان- خمیری کامل با مقاومت تسلیم مشخص نمی‌توان بار استاتیکی بیش از مقاومت آن وارد کرد. در حالی که اگر سخت‌شوندگی بعد از تسلیم فرض شده باشد، بیکران‌شدن جابجایی اتفاق نمی‌افتد، هر چند مقادیر جابجایی بسیار بز رگ حاصل می‌شود. مشابه پدیده‌ی مذکور در ارزیابی پاسخ بسامدی حالت مانای سیستم کشسان- خمیری تحت بارگذاری هارمونیک نیز مشاهده شده است.[۲۴]

پدیده‌ی قابل توجه دیگر در منحنی‌های پاسخ بسامدی جابجایی، وجود اغتشاش‌ها، و قله‌های موضعی در قسمت آغازین منحنی‌هاست. قله‌های موضعی در نواحی مذکور با افزایش پارامتر $\bar{a}$ و در نتیجه افزایش تراز رفتار غیرخطی افزوده شده‌اند. قبلاً مشابه این پدیده در پاسخ بسامدی حالت مانای سازه‌ی تسلیم‌شونده تحت بارگذاری هارمونیک به‌صورت اثر تشدیدهای فوق‌هارمونیک[۱] گزارش و تحلیل شده است.[۲۴-۲۶] در اینجا به‌دلیل ماهیت متفاوت پاسخ بیشینه‌ی حاصل از بارگذاری پالسی گذرا با پاسخ حالت مانای حاصل از بارگذاری هارمونیک، نمی‌توان دقیقاً اثر فوق را نتیجه گرفت؛ ولی به هر حال تسلیم سازه می‌تواند با ایجاد بسامدهای مؤثر جدید برای سازه، باعث

شکل ۶. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای نسبت جابجایی سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha = ۰$) و میرایی $\xi = ۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن (ξ=۰/۰۵) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه‌ی پالس $\bar{a}$ مختلف.

شکل ۷. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای نسبت شتاب کل سازه تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha = ۰$) و میرایی $\xi = ۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon = ۰$) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه‌ی پالس $\bar{a}$ مختلف.

[۱] Ultra-harmonic resonances

شکل ۸. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای ضریب شکل‌پذیری نیاز سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha=۰$) و میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن (ξ=۰/۰۵) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه‌ی پالس $\bar{a}$ مختلف.

تشدیدهای موضعی شود. همچنین برخی اغتشاش‌های منحنی‌ها در همین نواحی علی‌رغم رفتار خطی سازه را می‌توان به این موضوع ارتباط داد، که تحریک زمین در پژوهش حاضر به‌دلیل ماهیت پالسی گذرای خود، به‌صورت تک‌بسامدی مانا نیست (هر چند بسامد غالب برای آن توصیف شده است). همچنین برخی شکستگی‌ها نیز که در نواحی مختلف پاسخ‌های بسامدی مشاهده می‌شوند، که با ارزیابی پاسخ‌های زمانی معلوم شد و عمدتاً مربوط به شیفت (انتقال) بیشینه‌ی اندازه‌ی پاسخ از مقادیر مثبت به منفی یا برعکس بوده‌اند.

در حالت سازه با رفتار کشسان خطی یعنی $\bar{a}=۰$، پاسخ‌های حالت مانای تحت بارگذاری هارمونیک نیز از روابط ۱۱ و ۱۲ به شکل‌های ۶ و ۷ اضافه شده است. در این حالت، پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل به ترتیب قله‌هایی به اندازه‌ی ۱۰/۰۱ و ۱۰/۰۶ دارند (که برای رؤیت بهتر نتایج تحریک‌های پالسی، از چارچوب تنظیم‌شده‌ی نمودارها بیرون هستند)؛ در حالی که در بارگذارهای پالسی به حدود ۳ الی ۴ کاهش یافته‌اند. زمان کوتاه بارگذاری پالسی در مقایسه با ماندگاری بارگذاری هارمونیک با دامنه‌ی ثابت باعث این کاهش شده است. البته باید توجه داشت که پاسخ حالت مانای بارگذاری هارمونیک به‌دلیل دربرنگرفتن قسمت گذرا، به‌صورت بیشینه‌ی پاسخ حاصل از بارگذاری هارمونیک نیست. تغییر از بارگذاری هارمونیک به پالسی، همچنین باعث شیفت موقعیت قله‌های پاسخ‌های بسامدی به سمت چپ (یعنی بسامدهای تحریک پایین) می‌شود.

با افزایش $\bar{a}$، امکان و شدت رفتار غیرخطی در سازه افزوده می‌شود. ارزیابی دقیق این موضوع از مشاهده‌ی پارامتر پاسخ μ در شکل ۸ حاصل می‌شود. مثلاً ملاحظه می‌شود که به ازاء $\bar{a}=۰/۲$، مقادیر شکل‌پذیری نیاز μ در کلیه‌ی بسامدهای تحریک نسبی β همچنان زیر ۱ است، که به معنی پاسخ کشسان خطی سازه در کلیه‌ی بارگذاری‌های مذکور است. در نتیجه، منحنی‌های r_d و r_a حاصل در شکل‌های ۶ و ۷ برای $\bar{a}=۰/۲$ عیناً تکرار منحنی‌های $\bar{a}=۰$ هستند. در حالی که برای $\bar{a}=۰/۵$، در محدوده‌ی میانی βها، μ بزرگ‌تر از ۱ و پاسخ خمیری حاصل شده است. در $\bar{a}=۰/۸$، این محدوده‌ی بسامدی میانی، گسترده‌تر شده و در $\bar{a}=۱$ و $\bar{a}=۱/۰۵$، به‌غیر از یک قسمت انتهایی، بروز پاسخ ناکشسان خمیری در بسامدهای تحریک مختلف مشاهده می‌شود.

اگرچه ارائه‌ی منحنی‌های μ و مقادیر عددی آن در حالت $\mu>۱$ می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد شدت رفتار غیرخطی و میزان جابجایی‌های ناکشسان در اختیار قرار دهد، ولی اگر هدف فقط تشخیص ورود یا عدم ورود به حوزه‌ی رفتار غیرخطی و پاسخ ناکشسان باشد (که با مقایسه‌ی مقدار μ با عدد ۱ انجام می‌شود)، می‌توان این تشخیص را از روی منحنی‌های r_d نیز انجام داد. به این ترتیب که با توجه به رابطه‌ی ۱۴، مقایسه‌ی μ با ۱، معادل مقایسه‌ی r_d با $۱/\bar{a}$ است؛ لذا در هر یک از نمودارهای شکل ۶، که برای $\bar{a}$ مشخص رسم شده است، اگر منحنی‌های پاسخ بسامدی در ناحیه‌ی خاکستری‌شده واقع می‌شوند، به معنی رفتار خطی سازه و در غیر این‌صورت، به معنی ورود به حوزه‌ی خمیری و بروز پاسخ غیرخطی سیستم است. در بخش‌های بعدی ارزیابی پارامتریک نیز از شیوه‌ی اخیر برای نشان‌دادن نوع پاسخ خطی یا غیرخطی سازه استفاده شده است.

با افزایش $\bar{a}$ و بروز رفتار غیرخطی شدیدتر، همواره کاهش r_a و در نتیجه، کاهش شتاب کل انتقالی به سازه مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که برای تعداد پالس $\gamma=۲$، قله‌ی r_a از ۳/۳۹ در رفتار خطی به مقادیر ۲/۲۲، ۱/۴۴، ۱/۱۸، و ۱/۱۳ با افزایش $\bar{a}$ تغییر می‌کند. این در حالی است که r_d و در نتیجه جابجایی سازه با افزایش رفتار غیرخطی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود. به‌طوریکه مشاهده می‌شود، برای تعداد پالس $\gamma=۲$، قله‌ی r_d از ۳/۳۷ در پاسخ خطی متناظر با $\bar{a}=۰$ (و نیز $\bar{a}=۰/۲$) به ۳/۵۶ در $\bar{a}=۰/۵$، به ۲/۶۲ در $\bar{a}=۰/۸$ و به ۳/۲۶ در $\bar{a}=۱$ تغییر یافته است.

۲.۴. بررسی اثر تعداد پالس

در شکل‌های ۶ الی ۸، پارامتر تعداد پالس γ نیز در محدوده‌ی متداول برای پالس ماورویدیس یعنی ۱ تا ۳ متغیر است. شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که در حالت سازه با رفتار خطی (یعنی $\bar{a}=۰$) با افزایش γ، مقادیر بیشینه‌ی (قله‌های) منحنی‌های بسامدی r_d و r_a بالاتر می‌روند، به‌طوری که بیشینه‌ی r_d از ۲/۹۷ به ۳/۹۷ و بیشینه‌ی r_a از ۲/۹۸ به ۳/۹۹ می‌رسد، که بیانگر رشد ۳۴٪ است. همچنین موقعیت قله‌ها نیز از چپ به راست منتقل می‌شود. با ملاحظه‌ی مجدد پاسخ حالت مانا تحت تحریک هارمونیک، توجیه چنین رفتاری به این‌صورت است که با افزایش پارامتر تعداد پالس، چرخه‌های بارگذاری و ماندگاری تحریک بیشتر می‌شود و در نتیجه پاسخ نیز شباهت

بیشتری به پاسخ حاصل از تحریک هارمونیک با ماندگاری کامل پیدا می‌کند. البته باید توجه داشت که حتی با افزایش γ به سمت بی‌نهایت، باز دقیقاً تحریک هارمونیک با دامنه‌ی ثابت حاصل نمی‌شود؛ زیرا در مدل ریاضی تحریک پالسی‌شکل ماورویدیس، پوش زنگوله‌یی‌شکل برای پالس‌های متوالی درنظر گرفته شده است.

از طرف دیگر، وقتی رفتار غیرخطی در $\bar{a}$های بزرگ‌تر از صفر اتفاق می‌افتد، همچنان انتقال بسامد تشدید (موقعیت قله) از چپ به راست با افزایش پارامتر γ از ۱ تا ۳ در هر دو پاسخ r_d و r_a مشاهده می‌شود؛ در حالی که از نظر اندازه‌ی پاسخ تشدید (قله)، روند مشاهده‌شده در مورد r_d و r_a با هم و همچنین با حالت رفتار خطی متفاوت بوده است. به این ترتیب که در ترازهای رفتار غیرخطی مختلف، افزایش γ موجب تغییرات محسوس در بیشینه‌ی مقدار پاسخ بسامدی شتاب کل نمی‌شود، ولی بیشینه‌ی مقدار پاسخ بسامدی جابجایی به‌صورت‌های مختلف و نه یک‌سویه تغییر می‌کند.

در شکل‌های ۶ و ۷ همچنین مشاهده می‌شود که شیفت موقعیت قله‌های پاسخ‌های بسامدی از چپ به راست با افزایش γ (چه در رفتار خطی و چه غیرخطی) باعث می‌شود که در مقادیر بسامدی کمی کمتر از نواحی تشدید، معمولاً تعداد پالس کمتر ($\gamma \approx ۱$) موجب پاسخ بزرگ‌تر شود، در حالی که در مقادیر بسامدی بیشتر از مقادیر تشدید، تعداد پالس بیشتر ($\gamma = ۳$)، پاسخ بزرگ‌تر را رقم زند.

۳.۴. بررسی اثر زاویه‌ی فاز پالس

در بخش کنونی، برای بررسی آثار زاویه‌ی فاز پالس در پاسخ‌های بسامدی سازه، برای این پارامتر سه مقدار $\upsilon = ۰, \pi/۴, \pi/۲$ درنظر گرفته شده است. مقادیر ۰ و $\pi/۲$ به ترتیب متناظر با حالت پالس متقارن و پادمتقارن هستند. برای مشاهده‌ی رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف نیز $\bar{a} = ۰, ۰/۵, ۱$ فرض شده است. تعداد پالس $\gamma = ۲$ و خصوصیات سازه نیز مثل قسمت‌های قبل بوده است، یعنی سازه با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha = ۰$) و میرایی $\xi = ۰/۰۵$ فرض شده است.

نتایج حاصل برای پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در سازه با رفتار کشسان خطی ($\bar{a} = ۰$)، تغییر زاویه‌ی فاز پالس باعث تغییرات بسیار اندک در منحنی‌های r_d و r_a شده است، به‌طوری که از بین مقادیر اوج (قله‌های) r_d در υ های مختلف، بیشینه‌ی آن ۳/۳۷ در $\upsilon = ۰$ و کمینه‌ی آن نیز ۳/۱۲ در $\upsilon = \pi/۲$ بوده است. برای r_a نیز با همین روند بیشترین و کمترین قله به‌ترتیب ۳/۳۹ و ۳/۱۳ بوده است. با بروز رفتار غیرخطی در $\bar{a} = ۰/۵$ و $\bar{a} = ۱$، تأثیر υ در منحنی r_a همچنان چشمگیر نیست، ولی در مورد r_d در سطوح رفتار غیرخطی مختلف باعث بروز تغییرات متفاوت شده است؛ به‌طوری که در $\bar{a} = ۰/۵$، پالس متقارن بیشترین پاسخ را ایجاد کرده است؛ ولی در $\bar{a} = ۱$ پالس پادمتقارن منجر به بدترین اثر شده است.

۴.۴. بررسی اثر نسبت میرایی سازه

برای بررسی اثر نسبت میرایی سازه در توابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل، سه مقدار $\xi = ۰, ۰/۰۲, ۰/۰۵$ درنظر گرفته شده است. مقادیر میرایی کوچک متناظر با وضعیت سازه‌های معمول بوده و تأثیر مقادیر بزرگ میرایی در اینجا بررسی نشده است. مشخصات پالس ورودی $\upsilon = ۰$ و $\gamma = ۲$ و سازه همچنان با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha = ۰$) بوده است. باز هم سه حالت $\bar{a} = ۰, ۰/۵, ۱$ برای مشاهده‌ی رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل برای پاسخ‌های بسامدی r_d و r_a در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در دو منتهی‌الیه نمودارها (βهای کوچک و بزرگ)، منحنی‌های مربوط به میرایی‌های مختلف تا حد زیادی بر هم منطبق هستند، در حالی که در مقادیر میانی β، میرایی سازه در پاسخ‌های حاصل تأثیر مشهودی دارد. این نتایج عددی را می‌توان به این صورت توجیه کرد:

در β های خیلی بزرگ، زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه اندک بوده و خصوصیات بارگذاری ضربه‌یی حاکم شده است؛ که مشخص است در این حالت، میرایی تأثیر چندانی در پاسخ اوج سازه

شکل ۹. تأثیر مشخصه‌ی فاز پالس (υ) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha = ۰$) و میرایی $\xi = ۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با تعداد پالس $\gamma = ۲$.

ندارد.[۲۱ و ۲۲] همچنین در βهای خیلی کوچک، زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه بسیار زیاد و خصوصیات بارگذاری استاتیکی حاکم بوده است، که در این حالت نیز میرایی تأثیری در پاسخ سازه نداشته است.

در نواحی میانی بسامدی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف کاسته شده است. برای پاسخ شتاب کل نیز در حالت رفتار خطی این‌گونه بوده است، ولی در صورت بروز رفتار غیرخطی، تأثیر میرایی برعکس می‌شود؛ لذا در کلیه‌ی بسامدهای تحریک متناظر با پاسخ غیرخطی در حالت میرایی صفر برای سازه‌ی مفروض، که کشسان- خمیری کامل است، شتاب کل ثابت نتیجه می‌شود. با توجه به صورت معادله‌ی حرکت سیستم یعنی رابطه‌ی ۶، برای سازه‌ی نامیرا، شتاب کل برابر $f_s(u)/m$ بوده است، که در حالت رفتار کشسان- خمیری، بیشینه‌ی مقدار زمانی آن در صورت بروز تسلیم در سازه برابر با مقدار ثابت F_y/m خواهد بود. بنابراین، به ازاء بسامدهای تحریک مختلف، همواره برای r_a مقدار ثابت $F_y/(m\ddot{u}_{g.})=1/\bar{a}$ حاصل می‌شود.

نحوه تأثیر میرایی در تشدید جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی به این ترتیب است که بیشینه‌ی مقدار بسامدی r_d و r_a در حالت نامیرا به ترتیب از ۴/۶۰ و ۴/۶۰ به ۳/۳۷ و ۳/۳۹ در حالت میرایی ۰/۰۵ کاهش یافت است، که معادل کاهشی در حدود ۲۷٪ برای هر دو پاسخ بوده است.

۵.۴. بررسی اثر نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه

در بخش حاضر، اثر تغییرات نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه در محدوده‌های کم (۰/۱ ~ ۰)، که در سازه‌های متداول رایج است، بررسی شده است. برای این منظور، سه مقدار $\alpha=0,\ 0/05,\ 0/1$ درنظر گرفته شده و مقادیر عددی سایر پارامترهای پالس و سازه مثل بخش‌های پیشین بوده است. در اینجا چون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه، تأثیری در پاسخ‌های سازه‌یی که وارد ناحیه‌ی خمیری نمی‌شوند، ندارد، حالت $\bar{a}=0$ نیاز به ارائه و ارزیابی نداشته است.

نتایج عددی حاصل برای پاسخ‌های بسامدی r_d و r_a در شکل ۱۱ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، برای هر دو حالت $\bar{a}=0/5$ و $\bar{a}=1$ نیز در نواحی بسامدی که پاسخ خطی حاکم است، جواب‌ها کاملاً بر هم منطبق بوده‌اند. در سایر نواحی بسامدی، که پاسخ غیرخطی و ورود به حوزه‌ی رفتار خمیری اتفاق افتاده است، در $\bar{a}=0/5$ باز هم تغییرات α تأثیر مشهودی در پاسخ‌ها نداشته است، ولی در $\bar{a}=1$ اندک تغییر در قله‌ی منحنی‌های پاسخ بسامدی مشاهده می‌شود. در انتها باز تأکید می‌شود که آثار ناچیز ذکرشده‌ی نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم، در محدوده‌ی αهای کم حاصل شده است، وگرنه با افزایش α به مقادیر عددی بالاتر، مسلماً تغییرات قابل توجه مشاهده خواهد شد، چرا که $\alpha=1$ فارغ از هر مقدار مفروض $\bar{a}$، متناظر با رفتار همواره خطی سیستم خواهد بود، که تفاوت نتایج آن با حالت کشسان- خمیری کامل یا دوخطی با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم مشاهده شده است.

۵. ارزیابی توابع پاسخ در یک ساختمان چندطبقه تحت پالس ماورویدیس

در سازه‌ی چند درجه‌ی آزادی، بسیاری متغیرهای دیگر، مثل تعداد طبقات، نحوه‌ی توزیع جرم، نحوه‌ی توزیع سختی، نحوه‌ی توزیع میرایی، و نحوه‌ی توزیع مقاومت تسلیم نیز به متغیرهای مسئله افزوده می‌شود و عملاً امکان مطالعه‌ی پارامتری با درنظرگرفتن همه‌ی پارامترهای حاکم بر مسئله- همانند آنچه در مورد سیستم تک‌درجه‌ی آزاد صورت گرفته است— وجود نخواهد داشت. در بخش حاضر، صحیح بودن برخی نتایج به‌دست‌آمده برای سیستم تک‌درجه‌ی آزاد همانند تشابه توابع پاسخ جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی و یا تأثیر اندک زاویه‌ی فاز پالس ورودی در پاسخ‌های سازه‌ی کشسان خطی، در یک ساختمان چندطبقه آزموده شده است.

برای این منظور، از مدل جرم متمرکز و کشسان ساختمان ۱۰ طبقه، که در نوشتار سادک و همکاران (۱۹۹۷)،[۲۷] ارائه شده است، استفاده شده است. سازه‌ی ساختمانی ۱۰ طبقه‌ی مذکور، دارای زمان تناوب مود اول ۲/۰۲ ثانیه و نسبت میرایی ۲٪ در مود اول بوده است. جرم و سختی هر کدام از طبقات سازه به صورت جدولی در مرجع مذکور ارائه شده است. دوره‌ی تناوب پالس

شکل ۱۰. تأثیر نسبت میرایی (ξ) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان- خمیری کامل ($\alpha=0$) تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=0$) و تعداد پالس $\gamma=2$.

شکل ۱۱. تأثیر نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم (α) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزادی با میرایی $\xi = ۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon = ۰$) و تعداد پالس $\gamma = ۲$.

شکل ۱۲. توزیع ارتفاعی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت پالس ماورویدیس با دوره‌ی تناوب پالس $T_p = ۳$ s، تعداد پالس $\gamma = ۲$، و سه زاویه‌ی فاز (υ) مختلف.

ورودی، $T_p = ۳$ s و تعداد پالس $\gamma = ۲$ فرض شده است. برای زاویه‌ی فاز پالس ورودی نیز سه مقدار $\upsilon = ۰, \pi/۴, \pi/۲$ در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل به‌صورت بیشینه‌ی جابجایی طبقات و بیشینه‌ی شتاب کل طبقات در قالب نسبت‌های بی‌بُعد r_d و r_a در شکل۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن، N بیانگر شماره‌ی طبقه است. این تذکر لازم است که نسبت شتاب کل در هر طبقه همچنان مطابق رابطه‌ی ۱۰ بر حسب شتاب زمین نرمال شده است. همچنین، برای تعریف نسبت جابجایی هر طبقه نیز بسامد مود اول سازه (ω_1) به جای پارامتر بسامد در رابطه‌ی ۹ استفاده شده است. مطابق شکل اخیر، مقادیر به‌دست‌آمده برای توزیع ارتفاعی هر دو پاسخ در سازه‌ی کشسان چندطبقه‌ی مذکور نیز تا حد زیادی مشابه هم بوده و بیشترین مقادیر r_d و r_a در طبقه‌ی آخر و در حالت زاویه‌ی فاز صفر برای پالس ورودی حاصل شده است، که به ترتیب برابر با ۴/۸۵ و ۴/۷۳ بوده است.

همچنین ملاحظه می‌شود که همانند سازه‌های تک‌درجه‌ی آزاد، در حالی که تأثیر تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی در هر دو پاسخ چشمگیر نبوده؛ بیشترین پاسخ‌ها از زاویه‌ی فاز $\upsilon = ۰$ و کمترین پاسخ‌ها از $\upsilon = \pi/۲$ به‌دست آمده است. تغییر زاویه‌ی پالس از $\upsilon = ۰$ به $\upsilon = \pi/۴$ منجر به کاهش ۵ تا ۶ درصدی در پاسخ جابجایی طبقات شده است، که کمینه و بیشینه‌ی کاهش اخیر به ترتیب مربوط به طبقه‌های اول و آخر بوده است. در صورت تغییر زاویه‌ی پالس از $\upsilon = ۰$ به $\upsilon = \pi/۲$، مجدداً فقط کاهش ۶٪ (طبقه‌ی اول) الی ۸٪ (طبقه‌ی آخر) در پاسخ جابجایی طبقات مشاهده می‌شود. در مورد پاسخ شتاب کل نیز تغییرات مابین ۷٪ (طبقه‌ی پنجم) تا ۱۲٪ (طبقه‌ی دوم) بوده است.

۶. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، استخراج و ارزیابی پارامتریک پاسخ‌های بسامدی سازه‌های تک‌درجه‌ی آزادی کشسان خطی و ناکشسان دوخطی تحت تحریک‌های پالس‌گونه‌ی زمین بوده است. پاسخ‌های مدنظر، جابجایی نسبی و شتاب کل سازه بوده است، که به‌صورت نسبت‌های بی‌بُعدشده بر حسب دامنه‌ی تحریک ورودی (یعنی r_d و r_a) ارائه شده‌اند. ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی با پارامترهای بی‌بُعد تحت تحریک‌های پالس‌گونه‌ی زمین به فرم پالس ماورویدیس فرمول‌بندی شده است. نتایج تحلیل را کلاً ۶ متغیر بی‌بُعد کنترل کرده است، که دو مورد مربوط به فرم تحریک ورودی، دو مورد مربوط به خواص سازه، و دو مورد آخر نیز برای بیان نسبت تحریک به سازه بوده است؛ که به‌ترتیب عبارت‌اند از: تعداد پالس (γ)، زاویه‌ی فاز پالس (υ)، نسبت میرایی سازه (ξ)، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه (α)، نسبت بسامد تحریک (پالس) به بسامد طبیعی سازه (β)، و نسبت دامنه‌ی تحریک (پالس) به مقاومت سازه ($\bar{a}$). پاسخ‌های به‌دست‌آمده برای نسبت جابجایی و شتاب کل به‌صورت توابع بسامدی یعنی توابعی از β و با تغییر هر کدام از ۵ پارامتر بی‌بُعد دیگر در محدوده‌های کاربردی ارائه و ارزیابی شده‌اند. در انتها، یک نمونه‌ی ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ی چندطبقه نیز ارائه شده

است. بر روی نتایج حاصل به‌صورت مفصل در بخش‌های پیشین بحث شده است، که در بخش حاضر، خلاصه‌یی از اهم آن‌ها ارائه شده است:

- در حالی که در سازه با رفتار کشسان خطی، توابع پاسخ بسامدی شتاب‌کل و جابجایی شباهت بسیاری به هم دارند؛ در سازه با رفتار خمیری، خصوصیات دو پاسخ مذکور کاملاً باهم متفاوت هستند.
- در حالی که $\bar{a}=۰$ تضمین‌کننده‌ی رفتار کشسان خطی سازه است، $\bar{a}>۰$ می‌تواند باعث پاسخ ناکشسان در برخی بسامدهای تحریک نسبی و یا پاسخ کشسان خطی در برخی نواحی دیگر بسامدی شود. در بارگذاری دینامیکی، برای حصول رفتار ناکشسان، همانند بارگذاری استاتیکی معادل نیازی به $\bar{a}>۱$ نیست.
- در سازه با رفتار کشسان- خمیری کامل یا با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم اندک، با افزایش $\bar{a}$ و بروز رفتار غیرخطی شدیدتر، همواره شتاب کل سازه کاهش یافته است، ولی جابجایی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود.
- در سازه با رفتار کشسان خطی، بیشینه‌ی پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل با افزایش تعداد پالس در محدوده‌ی متداول آن $۱<\gamma\leq ۳$، همواره افزوده شده است (افزایشی در حدود ۳۴٪ برای هر دو پاسخ)، ولی در سازه با رفتار کشسان- خمیری به‌هنگام بروز پاسخ غیرخطی، بیشینه‌ی پاسخ بسامدی شتاب کل مستقل از تعداد پالس ورودی تقریباً ثابت مانده است. در مورد جابجایی هم در ترازهای مختلف رفتار غیرخطی تعداد پالس‌های مختلف می‌تواند باعث ایجاد بیشینه‌ی پاسخ شود.
- تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی باعث تغییرات چشمگیری در منحنی‌های پاسخ بسامدی شتاب کل و جابجایی سازه با رفتار کشسان خطی نمی‌شود (بیشینه‌ی تغییرات در حدود ۸٪). در صورت بروز رفتار غیرخطی، همچنان تأثیر υ در r_a اندک است؛ ولی در مورد r_d می‌تواند باعث تغییرات چشمگیری شود.
- در ابتدا و انتهای منحنی‌های پاسخ بسامدی، تغییر میرایی سازه تأثیری در پاسخ‌ها ندارد. در نواحی میانی بسامدی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف کاسته شده است. برای پاسخ شتاب کل نیز همین روند در حالت رفتار خطی مشاهده شده است، ولی درصورت بروز رفتار غیرخطی تأثیر میرایی می‌توانست برعکس باشد. با افزایش میرایی از صفر به ۰/۰۵، تشدیدهای جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی در حدود ۲۷٪ کاسته می‌شوند.
- ارزیابی پاسخ‌های یک سازه‌ی ۱۰ طبقه نشان داد که همانند نتایج حاصل از سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزاد، توابع پاسخ جابجایی و شتاب کل نرمال‌شده در سازه‌ی چند درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی مشابه هم هستند و تأثیر تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی در هر دو پاسخ کشسان سازه اندک است.

Reference - منابع

1. Biggs, J.M., 1964. *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, New York.
2. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J., 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, *11*(4), pp. 569-605. doi.org/10.1193/1.1585828.
3. Makris, N., and Chang, S.P., 2000. Response of damped oscillators to cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, *126*(2), pp. 123-131. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:2(123).
4. Mylonakis, G., and Reinhorn, A.M., 2001. Yielding oscillator under triangular ground acceleration pulse. *Journal of Earthquake Engineering*, *5*(2), pp. 225-251. doi.org/10.1080/13632460109350393.
5. Menun, C., and Fu, Q., 2002. An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems. *In Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Massachusetts, Boston.
6. Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *93*(3), pp. 1099-1131. doi.org/10.1785/0120020100.
7. Alavi, B., and Krawinkler, H., 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *33*(6), pp. 687-706. doi.org/10.1002/eqe.369.
8. He, W.L., and Agrawal, A.K., 2008. Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of seismic protective systems. *Journal of Structural Engineering, 134*(7), pp. 1177-1188. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1177).
9. Moustafa, A., and Takewaki, I., 2010. Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake*

Engineering, *30*(5), pp. 412-422. doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.12.013.

10. Waezi, Z., and Balzadeh, S., 2022. Simulation of near- field pulse-like ground motions using a correlated bimodal fractional stochastic model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *161*, pp. 107434. doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107434.

11. Cuesta, I., and Aschheim, M.A., 2004. The use of simple pulses to estimate inelastic response spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, *8*(6), pp. 865-893. doi.org/10.1080/13632460409350512.

12. Makris, N., and Black, C.J., 2004. Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations. *Journal of Engineering Mechanics*, *130*(9), pp. 1006-1018. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1006).

13. Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S., 2004. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *33*(9), pp. 1023-1049. doi.org/10.1002/eqe.391.

14. Makris, N., and Psychogios, T., 2006. Dimensional response analysis of yielding structures with first-mode dominated response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *35*(10), pp. 1203-1224. doi.org/10.1002/eqe.578.

15. Mylonakis, G., and Voyagaki, E., 2006. Yielding oscillator subjected to simple pulse waveforms: numerical analysis & closed-form solutions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *35*(15), pp. 1949-1974. doi.org/10.1002/eqe.615.

16. Alonso-Rodríguez, A., and Miranda, E., 2015. Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *79*, pp. 47-58. doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.08.009.

17. Guo, G., Yang, D., and Liu, Y., 2018. Duration effect of near-fault pulse-like ground motions and identification of most suitable duration measure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *16*, pp. 5095-5119. doi.org/10.1007/s10518-018-0386-9.

18. Yang, D., Guo, G., Liu, Y., and Zhang, J., 2019. Dimensional response analysis of bilinear SDOF systems under near-fault ground motions with intrinsic length scale. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *116*, pp. 397-408. doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.034.

19. Konstandakopoulou, F., and Hatzigeorgiou, G., 2020. Constant-ductility inelastic displacement, velocity and acceleration ratios for systems subjected to simple pulses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *131*, pp. 106027. doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106027.

20. Akehashi, H., and Takewaki, I., 2022. Closed-form critical response of undamped bilinear hysteretic MDOF system under pseudo-double impulse for estimating resonant response under one-cycle sine wave. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *157*, pp. 107254.doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107254.

21. Clough, R.W., and Penzien, J., 2003. *Dynamics of Structures*. 3rd Edition, Computer and structure, Inc., Berkeley.

22. Chopra, A.K., 2012. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 4th Edition, Prentice Hall, USA.

23. Caughey, T.K., 1960. Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis. *Journal of Applied Mechanics*, *27*(4), pp. 640–643. doi.org/10.1115/1.3644075.

24. Miller, G.R., and Butler, M.E., 1988. Periodic response of elastic-perfectly plastic SDOF oscillator. *Journal of Engineering Mechanics*, *114*(3), pp. 536-550. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:3(536).

25. Liu, C.S., and Huang, Z.M., 2004. The steady state responses of sdof viscous elasto-plastic oscillator under sinusoidal loadings. *Journal of Sound and Vibration, 273*(1-2), pp. 149-173. doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00423-1.

26. Kalmar-Nagy, T., and Shekhawat, A., 2009. Nonlinear dynamics of oscillators with bilinear hysteresis and sinusoidal excitation. *Physica D*, *238*(17), pp. 1768-1786. doi.org/10.1016/j.physd.2009.06.016.

27. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M., 1997. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *26*(6), pp. 617-35. doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199706)26:6%3C617::AID-EQE664%3E3.0.CO;2-Z.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۲۷-۳۶ ، (پژوهشی)

Original Article

تصفیه‌ی آب‌های زیرزمینی توسط تلفیق فرایند الکتروکینتیک با موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر حاوی کربن فعال دانه‌یی

مریم السادات رکن الدین (کارشناس ارشد)
نادر مختارانی* (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

هدف از انجام پژوهش حاضر، تلفیق فرایند الکتروکینتیک (EK) و موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر (PRB) حاوی کربن فعال اصلاح‌شده در حذف همزمان نیترات و سولفات از آب‌های زیرزمینی آلوده بوده است. تأثیر پارامترهای pH، غلظت اولیه‌ی نیترات، غلظت اولیه‌ی سولفات، نسبت کربن فعال به ماسه، و همچنین گرادیان الکتریکی در عملکرد سیستم بررسی و شرایط بهینه تعیین شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از آب حاوی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات و ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سولفات و با اعمال گرادیان الکتریکی ۱/۵ ولت بر سانتی‌متر در شرایط بهینه (دبی ورودی ۳/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه، pH=۷ و نسبت کربن فعال به ماسه برابر ۰/۵) ظرفیت جاذب ۸۳٪ برای نیترات، و ۸۶٪ برای سولفات افزایش یافت. همچنین تحت شرایط ذکرشده و با کنترل غلظت نیترات و سولفات خروجی به مقادیر پایین‌تر از حدود مجاز، مدت زمان عملکرد بستر برای نیترات از ۴۰ به ۱۰۰ ساعت و برای سولفات از ۴۵ به بیش از ۱۱۰ ساعت افزایش یافت. مطابق نتایج حاصل فرایند تلفیقی PRB-EK، روشی قابل اطمینان جهت حذف همزمان سولفات و نیترات از آب‌های آلوده است.

واژگان کلیدی: موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر، الکتروکینتیک، کربن فعال، نیترات، سولفات، منابع آب.

maryam.rokneddini@modares.ac.ir
mokhtarani@modares.ac.ir

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی با وجود اهمیتی که در زندگی انسان‌ها دارند، فقط درصد کوچکی از کل آب توزیع‌شده در کره‌ی زمین را تشکیل می‌دهند. اما براساس آمار موجود، امروزه بیش از ۲ میلیارد نفر از جمعیت جهان برای تأمین آب آشامیدنی به آبخوان‌ها وابسته هستند. همچنین بیش از ۴۰٪ از کل مواد غذایی تولیدشده در جهان از محصولات کشاورزی تأمین می‌شوند، که با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شوند. به‌دلیل افزایش تعداد و نوع بیماری‌ها در جوامع مختلف، توجه به آلودگی خاک و آب، به‌عنوان اصلی‌ترین منشأ مشکلات ذکرشده، اهمیت بسیاری دارد.[۱] از میان آلاینده‌های آب، نیترات(NO_3^-) که به‌صورت طبیعی در چرخه‌ی نیتروژن یافت می‌شود، به‌علت حلالیت بالا در آب، از مهم‌ترین آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی به‌شمار می‌رود.[۲] یون نیترات به سهولت به ذرات خاک متصل نمی‌شود و در نتیجه، بیشتر در معرض شسته‌شدن و نفوذ به لایه‌های زیرین قرار می‌گیرد.[۳] امروزه کودهای شیمیایی بیشترین سهم در مقدار نیتروژن ساخت بشر را در سطح جهان به خود اختصاص می‌دهند.[۴] بر این اساس، افزایش تولید و مصرف کودهای شیمیایی در مصارف کشاورزی و نفوذ آن‌ها به داخل خاک و آب از مهم‌ترین عوامل آلودگی منابع آب به ترکیب‌های نیتروژن‌دار است. از سویی دیگر، تخلیه‌ی فاضلاب‌های شهری و صنعتی به محیط‌زیست نیز از منابع دیگر آلودگی منابع آب به نیترات هستند.[۵ و ۶]

سولفات نیز به عنوان آنیون دوظرفیتی محلول، یکی دیگر از آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. منبع طبیعی سولفات در آب‌های سطحی و زیرزمینی، فرآیندهای هوازدگی شیمیایی و تجزیه‌ی کانی‌های حاوی سولفید و سولفات است. همچنین کاربرد فراوان مواد حاوی سولفات در زندگی بشر باعث شده است که فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عامل مهمی در تولید و انتشار سولفات در طبیعت شناخته شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی حاوی گوگرد، ضایعات خانگی مانند دورریز مواد شوینده، و پسماندهای صنعتی، از جمله: ضایعات کارخانجات دباغی، فولاد، خمیر کاغذ پایه سولفات، و نساجی از منابع اصلی انتشار سولفات ناشی از فعالیت‌های انسانی بشمار می‌روند.

روش‌های رفع آلودگی از آب زیرزمینی معمولاً بسیار مشکل و گران‌قیمت است، که این امر باعث بروز محدودیت‌هایی در پاکسازی سایت‌های آلوده می‌شود. در این راستا باید سعی شود تکنولوژی پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی به‌منظور از بین‌بردن

*نویسنده مسئول
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵.

استناد به این مقاله:
رکن الدین ، مریم السادات و مختارانی ، نادر ، ۱۴۰۳. تصفیه‌ی آب‌های زیرزمینی توسط تلفیق فرایند الکتروکینتیک با موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر حاوی کربن فعال دانه‌یی، ۴۰(۴)، صص ۲۷-۳۶. DOI: 10.24200/j30.2024.63708.3283.

آلاینده‌ها هر چه بیشتر توسعه یابد و روش‌های اقتصادی‌تری به کار گرفته شوند. تلاش‌های اولیه در پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی با مقیاس بزرگ در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ آغاز شد؛ که نتایج حاصل از آن‌ها، بندرت کاهش موردانتظار در مقادیر آلودگی را نشان می‌دهند.[۷]

طی چند دهه‌ی اخیر، تکنولوژی موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر (PRB) [۱] به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش‌های قدیمی تصفیه، مانند پمپاژ و تصفیه، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.[۸] دیواره‌ی فعال نفوذپذیر، یک روش خلاقانه و دوستدار محیط زیست برای پالایش درجای آب‌های زیرزمینی است، که در اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی برای اولین بار استفاده شده است. روش مذکور از طریق قراردادن یک بستر فعال عمودی مقابل مسیر آب زیرزمینی آلوده از حرکت آلاینده‌ها و ورود آن‌ها به پایین‌دست بستر جلوگیری می‌کند و مکانیسم آن بر پایه‌ی جریان‌یافتن آب زیرزمینی بر اثر گرادیان هیدرولیکی طبیعی حاکم بر منطقه و حرکت آن در بستر نفوذپذیر است. جریان آب در مسیر حرکت خود به دیواره‌ی فعال می‌رسد و در زمان عبور از آن، آلاینده‌ها یا با مصالح تشکیل‌دهنده‌ی دیواره واکنش می‌دهند یا درون آن به دام می‌افتند و در نتیجه،آب تصفیه‌شده از بستر خارج می‌شود. اگرچه در سه دهه‌ی گذشته، بسیاری از PRB ها عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده و به اهداف پاک‌سازی موردانتظار در مکان‌های آلوده دست یافته‌اند. با این حال، هنوز نیاز به ارزیابی کامل پیامدهای عملکرد سیستم PRB و مواد واکنش‌دهنده‌ی آن در سراسر جهان وجود دارد.[۹]

هر یک از مواد فعال قابل‌استفاده در PRB ها برای حذف آلاینده از مکانیسم مشخصی استفاده می‌کنند و هر یک از آلاینده‌ها نیز برای حذف به شرایط خاصی نیاز دارند. بنابراین، در انتخاب نوع ماده‌ی فعال باید تشابه بین ساز و کار بستر و مکانیسم حذف آلاینده مد نظر قرار گیرد. کربن فعال، خصوصاً به شکل گرانوله (GAC)، یکی از مواد رایجی است که در سیستم‌های PRB استفاده می‌شود.[۱۰] با توجه به کارایی مناسب کربن فعال گرانولی در حذف انواع آلاینده، در موارد متعددی از آن به‌عنوان بستر اصلی در سیستم موانع واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر استفاده شده است.[۱۱] اگرچه کربن فعال توانایی جذب بیشتر آلاینده‌ها را دارد، اما پس از مدتی اشباع می‌شود و کارایی خود را از دست می‌دهد. یکی از راهکارهای افزایش زمان عملکرد سیستم، تلفیق PRB با فرایند الکتروکینتیک است.

فرآیند الکتروکینتیک، یک روش پاک‌سازی درجا به‌شمار می‌رود، که طی آن با اعمال جریان مستقیم از طریق الکترودهای جاسازی‌شده در داخل سیستم، یک میدان الکتریکی در ماتریس خاک شکل می‌گیرد؛ که در اثر تشکیل آن، یون‌های آلاینده به حرکت در می‌آیند و با توجه به نوع بار الکتریکی به سمت الکترودها مهاجرت می‌کنند و بدین ترتیب از بافت خاک جدا می‌شوند.

تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه‌ی حذف آلاینده با استفاده از روش دیواره‌ی واکنش‌دهنده‌ی نفوذپذیر (PRB)،[۱۶-۱۲] و یا فرایند الکتروکینتیک،[۲۱-۱۷] به تنهایی انجام پذیرفته است، اما در زمینه‌ی تلفیق دو فرایند اخیر، نتایج محدودی منتشر شده است.

شی[۲] و همکاران (۲۰۲۱)، با تلفیق بستر حاوی کربن فعال و سیتریک‌اسید با فرایند الکتروکینتیک، راندمان حذف سرب را از خاک آلوده از ۴ به ۵۸ درصد افزایش داده‌اند.[۲۲] قائمیان و مختارانی (۲۰۱۸)، برای حذف نیترات از آب زیرزمینی، با ادغام PRB حاوی بستر کربن فعال با فرایند الکتروکینتیک در شرایط بهینه (غلظت اولیه‌ی نیترات ۱۳۵ میلی‌گرم در لیتر، pH=۶/۸، دبی ورودی ۲/۳ میلی‌لیتر در دقیقه، نسبت کربن به ماسه ۱:۱، و اعمال گرادیان الکتریکی ۱/۲۵ ولت بر سانتی‌متر)، افزایش ظرفیت جاذب به میزان ۹۰٪ را گزارش کرده‌اند.[۲۳] وانگ[۳] و همکاران (۲۰۲۱)، حذف قابل قبول کروم شش ظرفیتی از خاک آلوده را با تلفیق PRB حاوی نوعی غشاء نانوالیافی سنتزشده و فرایند الکتروکینتیک گزارش داده‌اند.[۲۴]

با توجه به مطالب ذکرشده، در پژوهش حاضر برای اولین بار امکان حذف همزمان دو آلاینده‌ی نیترات و سولفات توسط تلفیق روش PRB و فرایند الکتروکینتیک بررسی شده است. همچنین امکان احیای بستر کربن فعال در سیستم PRB با استفاده از فرایند الکتروکینتیک و به‌تبع آن کاهش تعداد دفعات تعویض بستر ارزیابی شده است. در این راستا، تأثیر پارامترهای مختلف شامل: pH آب، غلظت اولیه‌ی نیترات، غلظت اولیه‌ی سولفات، نسبت کربن فعال به ماسه، و میزان اختلاف پتانسیل اعمالی بر عملکرد سیستم بررسی و شرایط بهینه برای افزایش زمان عملکرد بستر تعیین شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. خصوصیات پایلوت آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار آب زیرزمینی و بررسی عملکرد PRB با بستر کربن فعال اصلاح‌شده برای حذف نیترات و سولفات از یک راکتور در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است. راکتور استفاده‌شده در پژوهش حاضر، که شماتیک آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از جنس شیشه و به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۱۵×۳۰×۱۰۰ سانتی‌متر بود، که فضای داخل آن با استفاده از فیلتر نایلونی با مش ۲۰۰ به چندین بخش تقسیم شده بود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بستر واکنش‌دهنده به طول ۴ سانتی‌متر در بخش میانی راکتور قرار گرفته است. دو فضای خالی نیز هر یک به طول ۱۰ سانتی‌متر قبل و بعد از بستر به‌منظور نمونه‌برداری و کنترل پارامترهای مختلف در طول آزمایش پیش‌بینی شده است؛ که در مجاورت آن‌ها نیز فضاهایی به طول ۱۸ سانتی‌متر با ماسه‌ی شسته‌شده با تخلخل مشخص و دانه‌بندی یکنواخت (میانگین قطر ذرات ۰/۲۵ میلی‌متر)، جهت شبیه‌سازی رفتار بستر خاک و عبور یکنواخت آب پُر شد. دو فضای خالی نیز در ابتدا و انتهای راکتور به‌ترتیب به‌عنوان مخزن اصلی آب نفوذی (حاوی غلظت مشخصی از نیترات و سولفات) و مخزن نمونه‌برداری پیش‌بینی شده است. همچنین لایه‌یی از ماسه به ضخامت ۵ سانتی‌متر بر روی بستر واکنش‌دهنده قرار داده شد و دو الکترود گرافیتی به ابعاد ۱×۴×۱۵ سانتی‌متر به‌منظور ایجاد جریان الکتریکی و تأمین شرایط مهاجرت، در بالای لایه‌ی خاک و زیر بستر واکنش‌دهنده قرار گرفت. به‌منظور تأمین جریان الکتریکی نیز از یک منبع تغذیه با امکان تغییر ولتاژ و شدت جریان الکتریکی استفاده و هر یک از الکترودهای آند و کاتد به ترتیب به قطب‌های مثبت و منفی دستگاه وصل شدند.

[1] Permeable Reactive Barrier
[۲] Xie
[۳] Wang

شکل ۱. شماتیک سیستم استفاده‌شده.

۲.۲ . روش کار

در پژوهش حاضر، پس از اصلاح کربن فعال استفاده‌شده و انجام آزمون‌های اولیه، آزمایش‌های اصلی در راکتور مرتبط انجام شد. برای انجام آزمایش‌های اصلی، ابتدا نمونه‌ی آب آلوده با استفاده از غلظت‌های مختلف پتاسیم نیترات و سدیم سولفات تهیه و سپس توسط پمپ پریستالتیک وارد سلول ابتدایی راکتور شد؛ تا پس از عبور از لایه‌های خاک و PRB، درنهایت در سلول انتهایی که محل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف، از جمله غلظت نیترات و سولفات خروجی است، جمع‌آوری شود.

اقدام‌های اصلی انجام‌شده در پژوهش حاضر در دو فاز کلی بررسی شد: در فاز اول، عملکرد کربن فعال اصلاح‌شده به‌عنوان بستر واکنش‌دهنده، بررسی و تأثیر پارامترهای غلظت اولیه‌ی نیترات (۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، غلظت اولیه‌ی سولفات (۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، pH جریان ورودی (۵، ۷، و ۸) و همچنین نسبت کربن فعال به ماسه (۱:۱، ۱:۲، ۱:۳، و ۱:۴) بر راندمان حذف دو آلاینده‌ی مذکور و همچنین مدت زمان عملکرد بستر به روش OFAT [1] بررسی شده است. در فاز دوم، نیز تأثیر تلفیق فرایند الکتروکینتیک (اعمال اختلاف پتانسیل‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، و ۴۰ ولت) با سیستم PRB در عملکرد سیستم ارزیابی شد. در پژوهش حاضر، نمونه‌برداری در فاصله‌های زمانی مشخص و از سلول تعبیه‌شده بعد از PRB انجام گرفت. لازم به توضیح است که در تمامی آزمایش‌ها، بعد از افزایش غلظت نیترات به بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت سولفات به بیش از ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در جریان خروجی، که به ترتیب حد مجاز غلظت نیترات و سولفات در آب آشامیدنی مطابق استاندارد کشور است، آزمایش‌ها متوقف شده است. همچنین در کلیه‌ی آزمایش‌ها، دبی سیال یکسان و برابر (mL/min) ۳/۳ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، کارایی سیستم و درصد حذف آلاینده از محیط آبی و همین‌طور تعیین ظرفیت جذب کربن فعال با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعیین شده است:

$$\text{درصد حذف} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100 \qquad (۱)$$

$$q = \frac{\sum (C_0 - (\frac{C_{t+1} + C_t}{2}))Q.t}{m_{GAC}} \qquad (۲)$$

که در آن‌ها، q ظرفیت جذب بر حسب میلی‌گرم آلاینده بر واحد وزن جاذب (یک گرم جاذب)، C_0 غلظت اولیه‌ی آلاینده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در ورودی بستر، C_t و C_{t+1} به ترتیب غلظت‌های آلاینده در دو بازه‌ی زمانی متوالی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در خروجی بستر، Q دبی آب ورودی به پایلوت بر حسب لیتر بر ثانیه، t فاصله‌ی زمانی نمونه‌برداری (ثانیه)، و m_{GAC} جرم جاذب بر حسب گرم هستند.

همچنین به‌منظور محاسبه‌ی میزان انرژی مخصوص (مصرف انرژی به ازاء هر کیلوگرم آلاینده‌ی حذف‌شده) در اختلاف پتانسیل‌های مختلف از رابطه‌ی ۳ استفاده شده است:

$$E = \frac{U.I.t}{V(C_0 - C_t)} \qquad (۳)$$

که در آن، E مقدار مصرف انرژی بر حسب کیلووات ساعت بر کیلوگرم آلاینده‌ی حذف‌شده، U اختلاف پتانسیل (ولت)، I شدت جریان (آمپر)، t زمان (ساعت)، V حجم آب آلوده (لیتر)، C_t غلظت ثانویه (گرم بر لیتر)، و C_0 غلظت اولیه (گرم بر لیتر) هستند.

۳.۲. آماده‌سازی کربن فعال

در پژوهش حاضر، از کربن فعال دانه‌یی با متوسط اندازه‌ی ذرات ۱/۵ میلی‌متر، که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است، استفاده شده است. در ابتدا، به‌منظور اصلاح ساختار کربن، کربن فعال به مدت ۱ ساعت در آب ۱۰۰ درجه هم زده شد، تا ناخالصی‌های سطحی آن پاک شوند. سپس به‌منظور حذف ترکیب‌های آلی از سطح ذرات کربن، نمونه به مدت ۱ ساعت در اتانول ۹۶٪ قرار گرفت. در ادامه، دانه‌های کربن فعال به مدت ۱ ساعت درون محلول ۰/۱ مولار HCl (۵۰ گرم از کربن فعال به ۲۵۰ میلی‌لیتر از محلول اسید اضافه شد) قرار گرفتند و به آرامی هم زده شدند. درنهایت، نیز نمونه با آب مقطر تا زمانی‌که pH آب خروجی از شستشو به pH طبیعی (pH=۶/۵) برسد،

[1] One-Factor-At-a Time

جدول ۱. مشخصات کربن فعال.

مشخصه	میزان
$D_{۵۰}$	۱/۰ ± ۵/۲ mm
M	۱۲/۰۱ g/mol
ρ	۱/۴ $\frac{g}{cm^3}$
Porosity	۰/۵ –
Chloride	<۵۰۰ ppm
As	<۵ ppm
Fe	<۵۰۰ ppm
pb	<۲۰ ppm
Zn	<۱۰۰ ppm

شستشو داده شد. لازم به توضیح است پس از هر یک از مراحل ذکرشده، کربن فعال به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس قرار گرفت و خشک شد.[۲۵]

۴.۲. آماده‌سازی ماسه

ماسه‌ی استفاده‌شده در پژوهش حاضر، ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار گرفت، تا توده‌های خاک احتمالی در آن حل شوند. سپس به‌وسیله‌ی آب شهری تحت فشار، به‌منظور حذف آلودگی و ذرات رس و سیلت کاملاً شسته شد. درنهایت، نیز نمونه‌ی شسته‌شده در آون قرار گرفت و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سیلیسیوس خشک شد.[۲۶] لازم به توضیح است که ماسه‌ی استفاده‌شده طبق استاندارد (ASTM D-۴۲۲) کاملاً دانه‌بندی شده و دارای چگالی توده‌یی و ذره‌یی به ترتیب ۱/۶ و ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، تخلخل متوسط ۰/۳۹، و ضریب هیدرولیکی ۰/۵۲ سانتی‌متر بر ثانیه بوده است.

۵.۲. مواد و تجهیزات استفاده‌شده

در پژوهش حاضر، از پمپ پریستالتیک مدل Hei-FLOW Value۰۱ شرکت Heidolph برای تأمین هد هیدرولیکی و از pH متر دیجیتالی Merohm برای اندازه‌گیری pH استفاده شده است. غلظت نیترات و سولفات نیر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر نوع UV-Visible مدل DR۴۰۰۰ ساخت شرکت Hach (روش‌های ۱۰۰۲۰ و ۸۰۵۱) اندازه‌گیری شده است. از دیگر تجهیزات استفاده‌شده می‌توان به آون ۵۵ لیتری دیجیتالی ساخت شرکت آرا طب فن، منبع تغذیه‌ی MP-۳۰۰۵D، Megatek، و همزن مغناطیسی مدل H۵-۸۶۰ ساخت شرکت طیف‌آزما اشاره کرد. کلیه‌ی مواد شیمیایی استفاده‌شده نیز از طریق شرکت‌های معتبر بین‌المللی تأمین شده است. برای تهیه‌ی محلول‌ها نیز در کلیه‌ی مراحل انجام کار از آب مقطر استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تأثیر غلظت اولیه‌ی نیترات و سولفات در عملکرد سیستم

برای بررسی اثر غلظت نیترات و سولفات موجود در جریان ورودی در عملکرد بستر، آزمایش‌هایی با غلظت‌های متفاوت نیترات و سولفات در آب انجام شده است. بدین منظور، برای تعیین اثر همزمان دو آنیون ذکرشده، ابتدا غلظت

شکل ۲. روند حذف نیترات در غلظت‌های مختلف.

$(GAC = ۳۷۵g,\ [SO_۴^{۲-}] = ۵۰\frac{mg}{L},\ pH = ۷,\ Ratio = \frac{۱g\ GAC}{۳g\ Sand},\ Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

شکل ۳. ظرفیت جاذب در غلظت‌های مختلف نیترات.

$(GAC = ۳۷۵g,\ [SO_۴^{۲-}] = ۵۰\frac{mg}{L},\ pH = ۷,\ Ratio = \frac{۱g\ GAC}{۳g\ Sand},\ Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

سولفات در ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ثابت نگه داشته شد و تأثیر غلظت‌های مختلف نیترات در عملکرد سیستم بررسی شد. سپس غلظت نیترات در ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ثابت نگه داشته شد و تأثیر غلظت‌های مختلف سولفات بررسی شد.

در شکل ۲، تأثیر غلظت‌های مختلف (۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) نیترات در جریان ورودی در راندمان سیستم مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در زمان‌های ابتدایی آزمایش‌ها، جاذب استفاده‌شده در بستر قادر به حذف کامل نیترات از محیط بوده و راندمان حذف ۱۰۰٪ حاصل شده است؛ اما با گذشت زمان به‌دلیل اشباع تدریجی بستر، راندمان حذف به مرور کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش غلظت نیترات در جریان ورودی تا میزان ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، عملکرد سیستم در حذف آلاینده، روندی تقریباً یکسان داشته است؛ ولی پس از آن با افزایش بیشتر غلظت نیترات راندمان حذف دچار افت شده است، به‌گونه‌یی که در ۵ ساعت چهارم نمونه‌گیری (ساعت بیستم)، راندمان حذف از ۸۴/۲٪ در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به حدود ۷۷٪ در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت نیترات در آب ورودی به سیستم، مدت زمان عملکرد بستر برای نگهداشتن غلظت آلاینده در زیر حد مجاز کاهش یافته است، که امری پیش‌بینی‌شده است. با توجه به شکل ۳، که ظرفیت جذب کربن فعال برای نیترات را نشان می‌دهد، در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر،

شکل ۴. روند حذف سولفات در غلظت‌های مختلف.

$(GAC = ۳۷۵g,\ [NO_۳^-] = ۵۰\frac{mg}{L},\ pH = ۷,\ Ratio = \frac{۱g\ GAC}{۳g\ Sand},\ Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

بیشترین میزان جذب به ازاء واحد وزن جاذب به‌دست آمده است، که این غلظت به‌عنوان مبنا جهت انجام آزمایش‌های بعدی انتخاب شده است.

در ادامه، برای تعیین غلظت بهینه‌ی سولفات نیز همین مراحل انجام شده است. در شکل ۴، تأثیر غلظت‌های مختلف (۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) سولفات در جریان ورودی در راندمان سیستم مشاهده

مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، درخصوص سولفات نیز در زمان‌های ابتدایی هر آزمایش، جاذب استفاده‌شده در بستر، قادر به حذف کامل آلاینده از محیط بوده و راندمان حذف ۱۰۰٪ حاصل شده است؛ که با گذشت زمان و به‌دلیل اشباع تدریجی بستر راندمان حذف به مرور کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت سولفات در جریان ورودی تا میزان ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، عملکرد سیستم در حذف آلاینده، روندی تقریباً یکسان داشته است، ولی پس از آن با افزایش بیشتر غلظت سولفات، راندمان حذف دچار افت شده است؛ به گونه‌یی که در ۵ ساعت هفتم نمونه‌گیری (ساعت سی و پنجم)، راندمان حذف از ۶۴٪ در غلظت ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۳۴٪ در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است.

همچنین با افزایش غلظت سولفات در آب ورودی به سیستم مدت زمان عملکرد بستر برای نگهداشتن غلظت آلاینده در زیر حد مجاز با کاهش همراه بوده است. با توجه به شکل ۵، که ظرفیت جذب کربن فعال برای سولفات در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد؛ در غلظت ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، بیشترین میزان جذب به ازاء واحد وزن جاذب به‌دست آمده است، که این میزان به عنوان مبنا جهت انجام آزمایش‌های بعدی انتخاب شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده (شکل‌های ۳ و ۵) مشاهده می‌شود که در ابتدا ظرفیت جذب با افزایش غلظت آلاینده افزایش یافته است. در این ناحیه (غلظت‌های پایین‌تر از ۲۰۰ میلی‌گرم برای نیترات و ۴۵۰ میلی‌گرم برای سولفات)، برخی از سایت‌های فعال روی سطح جاذب هنوز خالی هستند، که با افزایش غلظت آلاینده در جریان ورودی (به‌دلیل افزایش چگالی یون‌ها در اطراف ذرات جاذب، کاهش فاصله بین یون‌های محلول در آب، و جاذب و افزایش نیروی الکترواستاتیک بین آن‌ها) تکمیل می‌شود.[۲۳] به‌عبارت دیگر، در این مرحله، سایت‌های فعال موجود در باند مرکزی تکمیل می‌شوند، که این

شکل ۵. ظرفیت جاذب در غلظت‌های مختلف سولفات.

$(GAC = ۳۷۵g,\ [NO_۳^-] = ۵۰\frac{mg}{L},\ pH = ۷,\ Ratio = \frac{۱g\ GAC}{۳g\ Sand},\ Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

شکل ۶. تأثیر pH جریان ورودی در راندمان حذف نیترات.

$([SO_۴^{۲-}] = ۴۵۰\frac{mg}{L},\ [NO_۳^-] = ۲۰۰\frac{mg}{L},\ Ratio = \frac{۱g\ GAC}{۳g\ Sand},\ GAC = ۳۷۵g,\ Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

امر باعث ثابت‌ماندن تقریبی میزان جذب در ادامه‌ی فرایند می‌شود.[۲۷ و ۲۸] کاهش جزئی در ظرفیت جذب پس از این مرحله را می‌توان به افزایش بیش از حد چگالی یون‌های نیترات و سولفات آلاینده و کاهش شانس جذب آن‌ها بر روی کربن فعال مرتبط دانست.[۲۳]

بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، غلظت نیترات به میزان ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت سولفات به میزان ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان مبنا برای انجام آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته شده است.

۲.۳. بررسی تأثیر pH جریان ورودی در عملکرد سیستم

pH، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در جذب آنیون‌ها توسط کربن فعال است، که اثر قابل‌توجهی در راندمان فرایند حذف دارد. اثر pH در افزایش میزان جذب، ناشی از آثار متقابل میان یون‌ها در محلول و گروه‌های عاملی تشکیل‌شده بر روی سطح جاذب است. در شکل ۶، میزان حذف نیترات و در شکل ۷، میزان حذف سولفات در pH های ۵، ۷، و ۸ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، با کاهش pH مدت زمان عملکرد بستر افزایش یافته است، که این امر با بار موجود در سطح جاذب‌ها قابل توجیه است. نیترات و سولفات،

شکل ۷. تأثیر pH جریان ورودی در راندمان حذف سولفات.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{1g\,GAC}{3g\,Sand}, GAC = 375g, Q = 3/3\frac{ml}{min})$

یون‌هایی با بار منفی هستند و در صورت مواجهه با سطحی با بار هم‌نام دفع می‌شوند و قابلیت جذب در سطوح فعال با بار منفی برای آن‌ها وجود ندارد. در pH های پایین‌تر از نقطه‌ی بار صفر (pH_{pzc})، سطح جاذب پروتونیزه می‌شود و بار مثبت به خود می‌گیرد. آنیون‌های نیترات و سولفات در این شرایط تمایل به عبور از فاز سیال مرزی و ورود به خلل و فرج جاذب را خواهند داشت.[۲۹] این در حالی است که در pH های بالاتر از نقطه‌ی بار صفر، سطوح فعال جاذب با افزایش pH دیپروتونیزه[1] می‌شوند و بار منفی به خود می‌گیرند، که باعث دفع ذرات دارای بار منفی و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب می‌شود (این امر ناشی از رقابت آنیون‌های NO_3^-، SO_4^{2-}، و OH^- برای جذب روی سطح جاذب است، که در این میان OH^- غالب است).

روابط ۴ و ۵، مکانیزم جذب یون‌های نیترات و سولفات توسط GAC را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در اثر جذب هر یک از یون‌های سولفات و نیترات، یون H^+ نیز مصرف شده است، که در نتیجه، pH جریان خروجی از PRB افزایش می‌یابد. به مرور زمان در اثر کاهش واکنش‌های جذب به‌دلیل اشباع‌شدن کربن فعال، مجدداً میزان pH کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته (نتایج در نوشتار حاضر ارائه نشده است)، pH جریان خروجی از PRB در پژوهش حاضر نیز در تمام موارد، رفتاری مشابه داشته است.

$$GAC - OH + H^+ + NO_3^- \leftrightarrow GAC - OH_2NO_3 \quad (۴)$$

$$GAC - OH + H^+ + SO_4^{2-} \leftrightarrow GAC - OHSO_4 \quad (۵)$$

ظرفیت جاذب در pH های مختلف برای نیترات و سولفات در شکل ۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ که مطابق آن، بیشترین میزان جذب برای هر دو آلاینده در pH= ۵ حاصل شده است. در مطالعه‌ی مشابهی در حذف نیترات و Cr(VI) از محلول آبی با استفاده از کربن فعال اصلاح‌شده با پلیمر کاتیونی نیز بالاترین میزان جذب برای هر دو ترکیب در pH اسیدی گزارش شده است، که با نتایج پژوهش حاضر تشابه دارد.[۳۰]

شکل ۸. ظرفیت جاذب در pH های مختلف.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{1g\,GAC}{3g\,Sand}, GAC = 375g, Q = 3/3\frac{ml}{min})$

شکل ۹. روند حذف نیترات در نسبت‌های مختلف کربن فعال به ماسه.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Q = 3/3\frac{ml}{min}, pH = 7)$

اگرچه براساس نتایج حاصل، بهترین نتیجه در pH برابر با ۵ به‌دست آمده است، اما با توجه به مطالعات انجام‌شده، pH آب آبخوان‌ها بسته به بستری که در آن جریان دارند، متغیر است و تغییر آن نیز کار آسانی نیست. بنابراین از آنجایی که pH آب‌های مذکور، معمولاً در محدوده‌ی خنثی قرار دارد؛ در ادامه، کلیه‌ی آزمایش‌ها در pH =۷ انجام شده است.

۳.۳. تأثیر نسبت کربن فعال به ماسه در عملکرد سیستم

به‌منظور بررسی تأثیر پارامتر "نسبت کربن به ماسه" در عملکرد سیستم، آزمایش‌ها در ۴ نسبت مختلف تکرار شده‌اند، که نتایج مرتبط در شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب برای حذف نیترات و سولفات مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، با افزایش نسبت کربن به ماسه، مدت زمان عملکرد بستر افزایش یافته است، که امری طبیعی است.

با توجه به نتیجه‌ی آزمایش‌های انجام‌شده (نتایج در نوشتار حاضر ارائه نشده است)، افزایش نسبت کربن به ماسه، تأثیر معنی‌داری در ظرفیت جذب نداشته

[1] Deprotonation

شکل ۱۰. روند حذف سولفات در نسبت‌های مختلف کربن فعال به ماسه.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Q = 3/3\frac{ml}{min}, pH = 7)$

است. به‌عبارت دیگر، افزایش نسبت کربن به ماسه فقط باعث افزایش مدت زمان عملکرد PRB و صرفه‌جویی در هزینه‌های حفاری و جایگزینی بستر جدید می‌شود. در پژوهشس مشابه، عدم تأثیر نسبت کربن به ماسه در ظرفیت جذب کربن فعال گزارش شده است.[۲۳] بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در پژوهش حاضر نسبت ۱ به ۲ (یک واحد کربن فعال و دو واحد ماسه) به عنوان نسبت بهینه برای ادامه‌ی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است.

۴.۳. تأثیر تلفیق فرایند الکتروکینتیک با PRB

در پژوهش حاضر از GAC اصلاح‌شده به‌عنوان بستر جاذب در PRB برای حذف نیترات و سولفات از آب آلوده استفاده شده است. این تذکر لازم است که عملکرد GAC خصوصاً در شرایط اسیدی، مناسب است؛ ولی به مرور زمان اشباع می‌شود و کارایی خود را از دست می‌دهد. لذا یافتن روش‌هایی برای احیاء درجای بستر (بدون نیاز به جابجایی) تا حد زیادی می‌تواند هزینه‌های راهبری سیستم را کاهش دهد. لذا، برای پیشگیری از اشباع زودهنگام بستر از تلفیق فرایند الکتروکینتیک با PRB استفاده شده است. برای بررسی تأثیر شدت جریان الکتریکی اعمال‌شده بر احیاء کربن فعال در PRB، آزمایش‌ها با برقراری اختلاف پتانسیل‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، و ۴۰ ولت (معادل گرادیان الکتریکی به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۲ ولت بر سانتی‌متر) بین الکترودهای آند و کاتد تکرار شده است، که نتایج آن در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، با اضافه‌شدن فرآیند الکتروکینتیک، عملکرد زمانی بستر بهبود یافته و همچنین با افزایش اختلاف پتانسیل و به‌تبع آن افزایش شدت جریان، سرعت احیاء بستر افزایش و PRB مدت زمان بیشتری، توانایی کنترل غلظت نیترات و سولفات را در پایین‌تر از میزان استاندارد داشته است. اما با مقایسه‌ی میزان بهبود عملکرد سیستم نسبت به اختلاف پتانسیل‌های اعمالی ملاحظه می‌شود که افزایش گرادیان الکتریکی به بیش از ۳۰ ولت، تأثیر قابل‌توجهی در بهبود عملکرد سیستم ندارد، که دلیل آن افزایش دمای درون بستر و در نتیجه افزایش میزان تبخیر است.

۵لازم به توضیح است در شرایطی که دمای آب در مخزن ورودی برابر ۱۸ درجه‌ی سانتی‌گراد بود، به‌دلیل اعمال شدت جریان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، و ۸۰

شکل ۱۱. روند حذف نیترات در حضور فرایند الکتروکینتیک.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{1g\,GAC}{2g\,Sand}, GAC = 500g, Q = 3/3\frac{ml}{min})$

شکل ۱۲. روند حذف سولفات در حضور فرایند الکتروکینتیک.

$([SO_4^{2-}] = 450\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = 200\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{1g\,GAC}{2g\,Sand}, GAC = 500g, Q = 3/3\frac{ml}{min})$

میلی‌آمپر (ناشی از اختلاف پتانسیل‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، و ۴۰ ولت)، دمای بستر به ترتیب تا ۲۲، ۲۵، ۳۰، و ۳۶ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است.

با توجه به شرایط بستر (درشت‌دانه‌بودن) مکانیزم غالب برای انتقال نیترات و سولفات درون آن، پدیده‌ی الکترومیگریشن (مهاجرت یونی) است. میزان مهاجرت یون‌ها در یک بستر متخلخل توسط رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:[۳۱]

$$\vartheta = \frac{I.\vartheta_i}{A}.\frac{P_W}{\tau.\theta} \qquad (۶)$$

که در آن، I بیانگر شدت جریان، A سطح مقطع، ϑ_i تحرک یونی[۱]، P_W مقاومت آب منفذی[۲]، τ شدت پیچ و خم موجود در بستر[۳]، و θ میزان رطوبت حجمی[۴] بستر هستند.

با توجه به رابطه‌ی اخیر مشخص است که با افزایش شدت جریان، سرعت حرکت یون‌ها نیز افزایش می‌یابد (آزمایش‌های انجام‌شده نیز این امر را تصدیق می‌کنند). در مطالعه‌یی مشابه (۲۰۰۰)، امکان انتقال نیترات موجود در خاک

1 Ion Velocity
2 Pore Water Resistivity
3 Tortuosity
4 Volumetric Moisture Content

شکل ۱۳. مقایسه‌ی ظرفیت جاذب در اختلاف پتانسیل‌های مختلف.

$([SO_4^{2-}] = ۴۵۰\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = ۲۰۰\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{۱g\,GAC}{۲g\,Sand}, GAC = ۵۰۰g, Q = ۳/۳\frac{ml}{min})$

اشباع توسط فرایند الکتروکینتیک در ستونی به طول ۲۵ سانتی‌متر فراهم شد. سپس، بعد از ۲۴ ساعت با اعمال شدت جریانی در حدود ۵ میلی‌آمپر، تقریباً ۸۰٪ نیترات حذف شده است. همچنین با افزایش شدت جریان اعمالی به ستون خاک، سرعت انتقال نیترات در اثر فرایند الکترومیگریشن افزایش یافته است.[۳۲]

در شکل ۱۳، مقایسه‌ی میزان ظرفیت جاذب در حذف نیترات و سولفات از خاک در فرایندهای فقط PRB و PRB-EK با اعمال اختلاف پتانسیل‌های مختلف با یکدیگر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، ظرفیت جاذب برای نیترات در فرایند PRB-EK با اعمال گرادیان الکتریکی ۰/۵، ۱، ۱/۵، و ۲ ولت بر سانتی‌متر، نسبت به فرایند فقط PRB (گرادیان الکتریکی صفر) به ترتیب در حدود ۱۱، ۴۹، ۸۳، و ۱۰۶ درصد و برای سولفات به ترتیب در حدود ۳۵، ۵۳، ۸۶، و ۱۱۱ درصد افزایش یافته است.

جهت تعیین اختلاف پتانسیل بهینه با توجه به اهمیت مصرف انرژی در سیستم‌های الکتروشیمیایی، میزان انرژی مخصوص با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد، که نتایج آن در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان انرژی مخصوص با اختلاف پتانسیل اعمالی، نسبت مستقیم دارد؛ اما میزان افزایش آن در اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت نسبت به سایر موارد قابل توجه است. همچنین مدت زمان عملکرد بستر در هنگام اعمال اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت برای فقط نیترات به میزان ۱۰٪ (از ۱۰۰ به ۱۱۰ ساعت) و برای سولفات در حدود ۱۸٪ (از ۱۱۰ به ۱۳۰ ساعت)، نسبت به اختلاف پتانسیل ۳۰ ولت افزایش یافته است. بنابراین از آنجایی که

شکل ۱۴. تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب اختلاف پتانسیل.

$([SO_4^{2-}] = ۴۵۰\frac{mg}{L}, [NO_3^-] = ۲۰۰\frac{mg}{L}, Ratio = \frac{۱g\,GAC}{۲g\,Sand}, GAC = ۵۰۰g, Q = ۳/۳\frac{ml}{min}, pH = ۷)$

افزایش دمای درون بستر و در نتیجه افزایش میزان تبخیر، عامل اصلی کاهش بهبود عملکرد سیستم در اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت است، اختلاف پتانسیل ۳۰ ولت به عنوان مقدار بهینه برای فرایند مذکور انتخاب شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تلفیق فرایند الکتروکینتیک و PRB در حذف همزمان نیترات و سولفات از آب‌های زیرزمینی آلوده در دو فاز بررسی شده است: در فاز اول (استفاده از PRB به‌صورت مجزا)، بهترین زمان عملکرد بستر برای حذف نیترات برابر با ۴۰ ساعت و ظرفیت جذب کربن فعال برابر با ۳/۶۷ میلی‌گرم نیترات بر گرم کربن فعال و برای حذف سولفات بهترین زمان عملکرد بستر برابر با ۴۵ ساعت و ظرفیت جذب کربن فعال برابر با ۸/۰۵ میلی‌گرم سولفات بر گرم کربن فعال به‌دست آمده است. مقادیر مذکور در pH=۷ ، غلظت اولیه‌ی نیترات ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت اولیه‌ی سولفات ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، و نسبت کربن فعال به ماسه ۱:۲ (۵۰۰ گرم کربن فعال و ۱۰۰۰ گرم ماسه) به‌دست آمده است. در فاز دوم، با اضافه‌شدن فرایند الکتروکینتیک به سیستم در شرایط بهینه‌ی فاز اول، با اعمال اختلاف پتانسیل ۳۰ ولت، مدت زمان عملکرد بستر برای نیترات از ۴۰ به ۱۰۰ ساعت و برای سولفات از ۴۵ به ۱۱۰ ساعت و همچنین، ظرفیت جاذب برای نیترات در حدود ۸۳٪ و برای سولفات بیش از ۸۶٪ افزایش یافته است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده، تلفیق فرایند الکتروکینتیک و PRB سبب افزایش مدت زمان عملکرد بستر و همچنین افزایش ظرفیت جاذب می‌شود و به‌عنوان یک فرایند قابل اطمینان در حذف دو نوع آلاینده‌ی مذکور از آب‌های آلوده قابل استفاده است.

منابع (References)

1. UNEP, 2003. Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management, early warning and assessment report series. UNEP/DEWA/RS, 03-3, joint publication from United Nations Environment Program, Department for International Development and the Natural Environment Research Council (NERC).

2. Bhatnagar, A. and Sillanpää, M., 2011. A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. *Chemical Engineering Journal*, *168*, pp. 493-504.

https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.103

3. Burow, K. R., Nolan, B. T., Rupert, M. G. and Dubrovsky, N. M., 2010. Nitrate in groundwater of the United States. 1991-2003, *Environmental Science & Technology, 44*, pp. 4988-4997. https://doi.org/10.1021/es100546y

4. Yang, G. C. C., Hung, C. H, and Tu, H. C., 2008. Electrokinetically enhanced removal and degradation of nitrate in the subsurface using nanosized Pd/Fe slurry. *J. of Environmental Science and Health, Part A 43* (8), pp. 945–51. https://doi: 10.1080/10934520801974517

5. Moghadasi, M. S., Alavi Moghadam S.M. R., Maknoun R., and Moghadasi A. R., 2007. A survey on people awareness regarding nitrate pollution of drinking water in Arak city. *Environmental Sciences, 4*(2), pp. 13–20. [In Persian].

6. Tirado, R., 2007. Nitrates in drinking water in the Philippines and Thailand. *Greenpeace Research Laboratories Technical Note*, pp. 1–20. https://www.researchgate.net/publication/253389305

7. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1998. *Permeable reactive barrier technology for contaminant remediation*, Washington, DC.

8. Baciocchi, R., Boni, M.R. and D'Aprile, L. 2003. Characterization and performance of granular iron as reactive media for TCE degradation by permeable reactive barriers. *Water, Air, & Soil Pollution 149*, pp.211–226. https://doi.org/10.1023/A:1025675805073

9. Singh, R., Chakma, S., and Birke, V., 2023. Performance of field-scale permeable reactive barriers: An overview on potentials and possible implications for in-situ groundwater remediation applications. *Science of the Total Environment, 858*, Part 1, 158838. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158838

10. Bone, B.D., 2012. Review of UK guidance on permeable Reactive barriers. Taipei, Taiwan.

11. Hashim, M.A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J.N. and Sengupta, B., 2011. Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of Environmental Management, 92*(10), pp.2355–2388. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009

12. Ale Ebrahim, M. and Ebadi, T., 2018. Zinc and nickel removal from aqueous solution by activated carbon in batch and permeable reactive barrier (PRB) systems. *Desalination and water treatment, 118*, pp.181-194. https://doi: 10.5004/dwt.2018.22393

13. Bilardi, S., Calabrò, P.S., Moraci, N., Madaffari, M.G. and Ranjbar, E., 2020. A comparison between Fe^0/pumice and Fe^0/lapillus mixtures in permeable reactive barriers. *Environmental Geotechnics, 7*(8), pp. 524-539. https://doi.org/10.1680/jenge.17.00095

14. Di, J., Zhu, Z., Dai, N. and Jiang, F., 2016. PRB system of iron coupling with biological medical stone for repairing groundwater containing chromium and nitrate. *Chinese Journal of Environmental Engineering 10* (1), pp. 145–49. http://www.cjee.ac.cn/teepc_en/ch/index.aspx

15. Zhang, Y., Wang, F., Cao, B., Yin, H. and Al-Tabbaa, A., 2022. Simultaneous removal of Pb and MTBE by mixed zeolites in fixed-bed column tests. *Journal of Environmental Sciences, 122,* pp.41-49. https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.10.009

16. Dayanthi, W. K. C. N., Nagasinghe, I. U., Shanthapriya, H. R. D. G. and Danushka, W. G. G. 2022. Low-cost sequential permeable reactive barrier (PRB) to treat groundwater contaminated by landfill-leachate. *The Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 55*(2), pp. 31-40. https://doi.org/10.4038/engineer.v55i2.7506

17. Lee, Y.J., Choi, J.H., Lee, H.G., Ha, T.H. and Bae, J.H., 2011. Pilot-scale study on in situ electrokinetic removal of nitrate from greenhouse soil. *Separation and Purification Technology, 79*(2), pp. 254-263. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.02.011

18. Xu, H., Zhang, C., Zhang, H., Qiao, H., Zhang, L. and Zhao, Y., 2022. Enhanced electrokinetic remediation of heterogeneous aquifer co-contaminated with Cr(VI) and nitrate by rhamnolipids. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*(5), 108531. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108531

19. Wang, Y., Li, A. and Cui, C., 2021. Remediation of heavy metal-contaminated soils by electrokinetic technology: mechanisms and applicability. *Chemosphere, 265,* 129071.

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129071

20. Fdez-Sanromán, A., Pazos, M., Rosales, E. and Sanromán, M.Á., 2021. Prospects on integrated electrokinetic systems for decontamination of soil polluted with organic contaminants, *Current Opinion in Electrochemistry, 27*, 100692. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100692

21. Rahman, Z., Mohan, A. and Priya, S., 2021. Electrokinetic remediation: an innovation for heavy metal contamination in the soil environment, *Materials Today: Proceedings, 37*(2), pp.2730-2734. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.541

22. Xie, N., Chen, Z., Wang, H. and You, C., 2021. Activated carbon coupled with citric acid in enhancing the remediation of Pb-Contaminated soil by electrokinetic method. *Journal of Cleaner Production, 308,* 127433. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127433

23. Ghaeminia, M. and Mokhtarani, N., 2018. Remediation of nitrate-contaminated groundwater by PRB-electrokinetic integrated process. *Journal of environmental management, 222,* pp. 234-241. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.078

24. Wang, J., Hou, L.a., Yao, Z., Jiang, Y., Xi, B., Ni, S. and Zhang, L., 2021. Aminated electrospun nanofiber membrane as permeable reactive barrier material for effective in-situ Cr(VI) contaminated soil remediation. *Chemical Engineering Journal, 406*, 126882. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126822

25. Daoud, W., Ebadi, T. and Fahimifar, A., 2015. Regeneration of acid-modified activated carbon used for removal of toxic metal hexavalent chromium from aqueous solution by electro kinetic process. *Desalination and Water Treatment, 57*(15), pp.7009-7020. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1022801

26. Behzadian, A. and Olyaei, M., 2016. The effect of overhead pressure on the resistance to pulling out the finite element method. *Civil Engineering. Architecture and Urban Development*, [In Persian].

27. Kannan, N. and Sundaram, M.M., 2001. Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. *Dyes and pigments, 51*(1), pp.25-40. https://doi.org/10.1016/S0143-7208(01)00056-0

28. Mondal, M.K. and Garg, R., 2017. A comprehensive review on removal of arsenic using activated carbon prepared from easily available waste materials. *Environmental Science and Pollution Research, 24*, pp.13295–13306. https://doi: 10.1007/s11356-017-8842-7

29. Givens, B.E., Xu, Z., Fiegel, J. and Grassian, V.H., 2017. Bovine serum albumin adsorption on SiO_2 and TiO_2 nanoparticle surfaces at circumneutral and acidic pH: A tale of two nano-bio surface interactions. *Journal of colloid and interface science, 493,* pp. 334-341. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.01.011

30. Cho, D.W., Chon, C.M., Kim, Y., Jeon, B.H., Schwartz, F.W., Lee, E.S. and Song, H., 2011. Adsorption of nitrate and Cr (VI) by cationic polymer-modified granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal, 175*, pp. 298-30. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.108

31. Sharma, H. D. and Reddy, K. R. 2004. Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies. Wiley, Hoboken, N.J.

32. Eid, N., Elshorbagy, W., Larson, D. and Slack. D., 2000. Electro-migration of nitrate in sandy soil. *Journal of Hazardous Materials 79* (1–2), pp. 133–49. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00238-7

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص.۳۷-۴۹. (پژوهشی)

Original Article

بررسی تأثیر حرکت شتابدار جرم متحرک در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق

محمدعلی فیوضات (استادیار)
هاتف عبدوس(دانشجوی دکتری)
علیرضا خالو* (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی تأثیر حرکت شتابدار فزاینده/ کاهنده‌ی ناشی از تحریک جرم متحرک در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده پرداخته شده است. براساس روش جداسازی متغیرها و با اتکا به توابع سینوسی متناظر با شرایط مرزی تیرهای خمیده، فرم ماتریسی معادله‌های تعادل دینامیکی تعیین شد و طیف پاسخ تیرهای خمیده تحت تحریک ناشی از جرم متحرک به‌دست آمد. راستی‌آزمایی مدل تحلیلی- عددی پیشنهادی با استناد به مطالعه‌های موجود در ادبیات فنی صورت گرفت، که نشانگر دقت بالای روش پیشنهادی است. در قالب مطالعه‌های پارامتری، اثر پارامترهای کلیدی، شامل: زاویه‌ی مرکزی و طول تیر خمیده، و نیز جرم، سرعت اولیه، و شتاب فزاینده/ کاهنده‌ی جرم متحرک در جابجایی و لنگر خمشی خارج از صفحه ارزیابی شده‌اند. با افزایش اندازه‌ی شتاب در حالت فزاینده، مقادیر جابجایی و لنگر خمشی بیشینه‌ی خارج از صفحه به ترتیب تا ۱۸٫۱۱ و ۲۷٫۵۳ درصد نسبت به حالت حرکت یکنواخت افزایش یافته است. در حالت شتاب کاهنده، با کاهش اندازه‌ی شتاب، مقدار دو طیف پاسخ اخیر به‌ترتیب تا ۴۱٫۵۹ و ۴۲٫۰۵ درصد نسبت به حالت متناظر در سرعت تقلیل یافته‌اند.

واژگان کلیدی: تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق، جرم متحرک، رفتار دینامیکی خارج از صفحه، حرکت شتابدار فزاینده/ کاهنده، طیف پاسخ دینامیکی.

m.foyouzat@sharif.edu
hatef.abdoos2015@sharif.edu
khaloo@sharif.edu

۱. مقدمه

المان‌های خمیده در صفحه‌ی افق علاوه‌بر زیبایی‌های بصری و معماری،[۱] کاربردهای گسترده‌یی در مهندسی عمران و راه‌آهن دارند، که برای نمونه می‌توان به: خطوط حمل‌ونقل ریلی، جاده‌ها، پل‌ها، قطارهای گرانشی، و سازه‌ی ترن‌های هوایی در شهربازی‌ها اشاره کرد. یکی از موضوع‌های موردتوجه پژوهشگران در سال‌های اخیر، ارزیابی دقیق پاسخ دینامیکی المان‌های سازه‌یی مذکور تحت بارهای متحرک بوده است، که از دیدگاه دستیابی به یک طرح ایمن بسیار حائز اهمیت است.

تاکنون بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی اثر بار و جرم متحرک در رفتار دینامیکی تیرهای مستقیم، صفحه‌ها، و کابل‌ها بوده‌اند، که در برخی نوشتارها،[۲ و ۳] برجسته‌ترین مطالعه‌های مذکور اشاره و مرور شده‌اند. با این وجود، مطالعات انجام‌شده بر روی المان‌های خمیده در صفحه‌ی افق به مراتب محدودتر بوده است، که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است. این تذکر لازم است که در بیشتر منابع اشاره‌شده، تحریک‌های ناشی از جسم متحرک به‌صورت یک نیروی متحرک مدل‌سازی شده و اثر اینرسی مربوط به جرم جسم و شتاب‌های انتقالی آن در پاسخ دینامیکی تیرهای خمیده در نظر گرفته نشده است.[۴ و ۵]

کریستیانو و کالور[۱] (۱۹۶۹)،[۶] یک حل تحلیلی بسته‌یی را برای محاسبه‌ی پاسخ دینامیکی پل‌های تک‌دهانه‌ی خمیده در افق با تکیه‌گاه‌های ساده تحت نیروی متحرک ارائه کرده‌اند. با استفاده از روش شتاب خطی، چاودیوری و شور[۲] (۱۹۷۷)،[۷] با درنظرگرفتن اثر تابیدگی[۳] مقطع، رفتار دینامیکی تیرهای خمیده در افق را به تحریک‌های یک بار متحرک به‌صورت عددی مطالعه کرده‌اند. تحلیل پایداری یک ریل راه‌آهن خمیده در افق تحت تحریک ناشی از یک بار متحرک توسط نایر[۴] و همکاران (۱۹۸۵)،[۸] ارزیابی شده است.

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰.

استناد به این مقاله:
فیوضات، محمدعلی، عبدوس، هاتف، و خالو، علیرضا، ۱۴۰۳. بررسی تأثیر حرکت شتابدار جرم متحرک در پاسخ دینامیک خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق، ۴۰(۴)، صص.۳۷-۴۹ . DOI: 10.24200/j30.2024.63894.3293

[1] Christiano & Culver
[۲] Chaudhuri & Shore
[۳] Warping
[۴] Nair

گالدوس[۱] و همکاران (۱۹۱۷)،[۹] روشی را برای محاسبه‌ی ضریب ضربه‌ی دینامیکی پل‌های جعبه‌یی خمیده در افق تحت تأثیر یک جفت نیروی متحرک با فاصله‌ی ثابت از یکدیگر، که با سرعت یکنواخت روی سطح فوقانی تیر حرکت می‌کردند، ارائه کرده‌اند.

هولنگ[۲] و همکاران (۱۹۹۸)،[۱۰] رفتار پل‌های جعبه‌یی خمیده در افق را با منظورکردن اثر تغییرشکل‌های تابیدگی در روابط تعادل دینامیکی حاکم بر آن بررسی کرده‌اند. با استفاده از روش سختی دینامیکی، هوسان و جما[۳] (۱۹۹۹)،[۱۱] بسامدهای ارتعاش آزاد تیرهای تیموشکنوی خمیده در صفحه‌ی افق را محاسبه کرده‌اند. یَنگ[۴] و همکاران (۲۰۰۱)،[۱۲] با منظورکردن فقط یک مود دینامیکی، موفق شدند یک رابطه‌ی تقریبی برای تعیین جابجایی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق در اثر تحریک ناشی از نیروی متحرک پیشنهاد کنند. لی[۵] و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۳] پاسخ ارتعاش آزاد یک تیر دایروی متکی بر بستر کشسان را با منظورکردن آثار تغییرشکل‌های برشی به‌دست آوردند. زبوینسکی و دوزا[۶] (۲۰۱۰)،[۱۴] پایداری غیرخطی واگن‌های قطار را بر روی مسیر خمیده در افق به‌صورت کیفی مطالعه و امکان رویداد دوشاخگی هاپف[۷] را بررسی کرده‌اند.

دای و انگ[۸] (۲۰۱۵)،[۱۵] با ارائه‌ی یک راه‌حل تحلیلی، عملکرد دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده روی بستر وینلکر[۹] را تحت اثر نیروهای متمرکز متحدالفاصله و مبتنی بر توابع مثلثاتی ارزیابی کردند. عبدوس و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۶] با درنظرگرفتن مؤلفه‌های شتاب انتقالی جرم متحرک، موفق شدند پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق را محاسبه و با برازش غیرخطی داده‌های مطالعه‌ی پارامتری، روابط کاربردی ساده‌شده‌یی برای تخمین ضرایب ضربه‌ی دینامیکی جابجایی و لنگر خمشی ارائه کنند. همچنین، ایشان (۲۰۲۳)،[۱۷] در پژوهش دیگری تأثیر مؤلفه‌ی لنگر پیچشی را در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق را تحت تحریک ناشی از جرم متحرک ارزیابی کردند.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که در مطالعات مربوط به اثر بارهای متحرک در المان‌های خمیده در افق، سرعت بار در تمام مراجع به عنوان یک مقدار ثابت نظر گرفته شده است. این در حالی است که یک سیستم روسازی راه، مسیر راه‌آهن یا باند فرودگاه، اغلب در معرض بارهای متحرک با سرعت فزاینده یا کاهنده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، هنگامی که یک قطار سریع‌السیر راه‌آهن به ایستگاه وارد یا از آن خارج می‌شود، یک هواپیما از باند فرودگاه بلند می‌شود یا در آن فرود می‌آید، یا اتومبیلی که سرعت خود را قبل از توقف کاهش می‌دهد یا از حالت توقف شروع به حرکت می‌کند، بستر محل اثر بار متحرک در موقعیت‌های فوق تحت سرعت فزاینده یا کاهنده‌ی جسم قرار می‌گیرد. در واقع، نه فقط وسیله‌ی نقلیه یا هواپیما هنگام توقف یا شروع حرکت با سرعت متغیر حرکت می‌کند، بلکه سرعت وسیله‌ی نقلیه در هنگام حرکت روی یک مسیر نیز عموماً در حال تغییر است.

طبق مطالعات لین و نیمیر[۱۰] (۲۰۰۲)،[۱۸] و هو[۱۱] و همکاران (۲۰۱۴)،[۱۹] در شرایط رانندگی وسائط نقلیه‌ی سبک در جاده‌های شهری، نسبت زمان رانندگی، و طی مسیر با سرعت متغیر بسیار بیشتر از رانندگی با سرعت ثابت است. نوشتار کخمانیوک و فیلیپوف[۱۲] (۱۹۶۷)،[۲۰] به عنوان یکی از اولین مراجع در بررسی اثر سرعت متغیر نیروی متحرک در رفتار دینامیکی تیرهای مستقیم شناخته می‌شود. کریلف[۱۳] (۱۹۹۶)،[۲۱] ارتعاش‌های ایجادشده در زمین ناشی از حرکت با سرعت فزاینده و کاهنده‌ی وسائط نقلیه را بررسی کرده است. زیبده و رکویچ[۱۴] (۱۹۹۶)،[۲۲] ارتعاش تیرهای مستقیم را تحت بارهای متحرک تصادفی با سرعت متغیر و ابوهلال[۱۵] و محسن (۲۰۰۰)،[۲۳] نیز رفتار دینامیکی تیرهای مستقیم با شرایط مرزی کلی را در اثر حرکت شتابدار یک نیروی هارمونیک مطالعه کرده‌اند. دوگوش و آیزنبرگر[۱۶] (۲۰۰۲)،[۲۴] پاسخ دینامیکی تیرهای چنددهانه‌ی پیوسته با صلبیت خمشی متفاوت در دهانه‌های مختلف را تحت حرکت شتابدار نیروهای متحرک بررسی کرده‌اند.

میچالتسوس[۱۷] (۲۰۰۳)،[۲۵] عملکرد دینامیکی تیرهای مستقیم با شرایط مرزی مفصلی نسبت به بار متحرک با سرعت متغیر را با منظورکردن اثر اینرسی دورانی جرم متحرک و تیر ارزیابی کرده است. زیبده و ابوهلال[۱۸] (۲۰۰۳)،[۲۶] تأثیر بارهای متحرک شتابدار در پاسخ دینامیکی تیرهای مستقیم با طول متناهی و پنگ[۱۹] و همکاران (۲۰۰۹)،[۲۷] تغییرشکل تیرهای مستقیم با تکیه‌گاه‌های ساده را تحت تحریک‌های یک جرم متحرک با سرعت متغیر با منظورکردن اثر اینرسی جرم مطالعه کرده‌اند. لی[۲۰] و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۸] پاسخ دینامیکی صفحه‌های مستطیلی به نیروهای متحرک با سرعت متغیر و پاول و پالاسین[۲۱] (۲۰۱۵)،[۲۹] پایداری سرنشینان قطار را تحت حرکت شتابدار بررسی کرده‌اند. بسکو و موهو[۲۲] (۲۰۱۸)،[۳۰] پاسخ تیرهای متکی بر بستر کشسان را به نیروی متحرک با سرعت متغیر ارزیابی کرده‌اند. لیو[۲۳] و همکاران (۲۰۲۲)،[۳۱] رفتار دینامیکی روسازی‌های متکی بر

[۱] Galdos
[۲] Huang
[۳] Howsan & Jemah
[۴] Yang
[۵] Lee
[۶] Zboinski & Dusza
[۷] Hopf bifurcation
[۸] Dai & Ang
[۹] Winkler foundation
[۱۰] Lin & Niemeier
[۱۱] Ho
[۱۲] Kokhmanyuk & Filippov
[۱۳] Krylov
[۱۴] Zibdeh & Rackwitz
[۱۵] Abu-Hilal
[۱۶] Dugush & Eisenberger
[۱۷] Michaltsos
[۱۸] Abu-Hilal
[۱۹] Peng
[۲۰] Li
[۲۱] Powel & Palacin
[۲۲] Beskou & Muho
[۲۳] Liu

بستر ویسکوکشسان دو پارامتری را به بارهای متحرک با سرعت متغیر به‌دست آورده‌اند.

با توجه به اینکه در هیچ‌یک از مطالعات موجود در ادبیات فنی، تأثیر سرعت متغیر در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق تحت اثر جرم متحرک مطالعه نشده است، در پژوهش حاضر مد نظر بوده است که تأثیر حرکت شتابدار جرم متحرک در رفتار دینامیکی المان‌های سازه‌یی مذکور براساس مقادیر جابجایی خارج از صفحه و نیز لنگر خمشی ارزیابی شود.

۲. فرمول‌بندی مسئله

۱.۲. تعریف مسئله

مطابق شکل ۱، یک تیر خمیده در صفحه‌ی افق با زاویه‌ی مرکزی φ و شعاع و طول R و L در نظر گرفته شده است. تیر به‌صورت دو سر ساده و با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی بوده است، که امکان دوران پیچشی در دو انتهای آن وجود ندارد.[۱۲ و ۳۲] با تعریف یک سیستم مختصات کارتزین راستگرد، محورهای x، y، و z به ترتیب مارّ بر محور عبوری از مرکز سطح مقطع و محورهای قائم و افقی تیر هستند؛ که بر اساس آن، درجه‌های آزادی دورانی $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ و جابجایی (w_x, w_y, w_z) معرفی می‌شوند. کل طول تیر به‌صورت یکپارچه مبتنی بر یک بستر ویسکو- کشسان بوده است، که در آن، k_y و k_r به ترتیب سختی راستای قائم و سختی پیچشی بستر کشسان هستند. c_y و c_r به ترتیب به عنوان میرایی بستر در راستای قائم و میرایی پیچشی هستند. همچنین، تیر خمیده تحت تحریک دینامیکی ناشی از جرم متمرکز M بوده است، که سطح فوقانی تیر را که فاقد اصطکاک است، با معادله‌ی حرکت دلخواه $x_M(t)$ طی می‌کند.

۲.۲. فرضیه‌ها

پیش از فرمول‌بندی مسئله، ابتدا فرضیات حاکم بر مسئله معرفی و سپس در معادله‌های تعادل دینامیکی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق تحت اثر ارتعاش ناشی از جرم متمرکز متحرک در نظر گرفته می‌شوند:

الف) مشخصات مقطع تیر خمیده در سرتاسر طول آن ثابت است؛

ب) از تأثیر تغییرشکل‌های برشی صرف‌نظر می‌شود و فرض اویلر- برنولی برای تیرهای خمیده موضوعیت دارد؛ چرا که طول ریل‌ها در عمل از ابعاد مقطع ریل بسیار بیشتر است.

ج) تأثیر اعوجاج پیچشی صرف‌نظر می‌شود؛

شکل ۱. سیستم دینامیکی تیر خمیده در صفحه‌ی افق مبتنی بر بستر ویسکو- کشسان و تحت تحریک ناشی از جرم متحرک.

د) امکان وقوع جداشدگی جرم متحرک از روی تیر خمیده وجود ندارد و تماس کامل در تمام مدت حرکت برقرار است؛

ه) حرکت جرم به صورت شتابدار با شتاب ثابت کاهنده/ فزاینده است؛

و) در حرکت شتابدار کاهنده، جرم پیش از ترک تیر خمیده، شرایط سکون را تجربه نمی‌کند.

۳.۲. فرمول‌بندی مسئله

در تعیین پاسخ دینامیکی و معادله‌های تعادل تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق، روابط حاکم بر رفتار خارج صفحه و درون صفحه به‌صورت غیرهمبسته است، و لذا بررسی عملکرد خارج از صفحه‌ی تیرهای مذکور تحت تحریک ناشی از جرم متحرک مستقل از عملکرد درون صفحه انجام می‌شود.[۴ و ۱۶] همچنین، به‌منظور تعیین معادله‌های تعادل دینامیکی سیستم سازه‌یی تحت بررسی، از معادله‌های تعادل استاتیکی حاکم بر تیرهای خمیده استفاده می‌شود، که جزئیات دقیق مربوط به اثبات روابط حاصل به‌طورکامل در نوشتار ینگ و همکاران (۱۹۸۷)،[۳۳] ارائه شده است. حال، کافی است براساس هندسه‌ی تعریف‌شده در زیربخش ۱.۲ و نیز با اعمال مفروضات مطرح‌شده در زیربخش ۲.۲، معادله‌های تعادل دینامیکی سیستم تیر خمیده در صفحه‌ی افق و جرم متحرک را براساس روابط ۱ و ۲ تعیین کرد:[۱۵، ۱۶، و ۳۳]

$$-\mu\frac{\partial^2 w_y}{\partial t^2}-EI_z\left(\frac{\partial^4 w_y}{\partial x^4}-\frac{1}{R}\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2}\right)+\frac{GJ}{R}\left(\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}\right)= M\left(g+\frac{d^2 w_y}{dt^2}\right)\delta[x-x_M(t)]+k_y w_y+c_y\frac{\partial w_y}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\rho I_o\frac{\partial^2\theta_x}{\partial t^2}+\frac{EI_z}{R}\left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}-\frac{\theta_x}{R}\right)+GJ\left(\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2}+\frac{1}{R}\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}\right)= -\frac{MV^2}{R}y_s\delta[x-x_M(t)]-k_r\theta_x-c_r\frac{\partial\theta_x}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن‌ها، w_y جابجایی خارج از صفحه و θ_x دوران پیچشی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق هستند. در روابط اخیر، μ و ρ به‌ترتیب جرم واحد طول و چگالی تیر خمیده، و نیز E مدول کشسانی، و G مدول برشی مقطع، V سرعت لحظه‌یی جرم متحرک، و نیز g شتاب جاذبه هستند. همچنین، y_s فاصله‌ی مرکز برش مقطع از سطح فوقانی تیر خمیده، I_z ممان اینرسی مقطع حول محور z، و J ثابت پیچشی، و نیز I_o به‌عنوان ممان اینرسی قطبی مقطع تیر خمیده هستند. همچنین، δ تابع دلتای دیراک و d^2w_y/dt^2 بیانگر مشتق کامل مرتبه‌ی دوم نسبت به زمان هستند، که مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:[۱۶]

$$\frac{d^2 w_y}{dt^2}=\frac{\partial^2 w_y}{\partial t^2}+\dot{x}_M^2(t)\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}+2\dot{x}_M(t)\frac{\partial^2 w_y}{\partial x\partial t}+\ddot{x}_M(t)\frac{\partial w_y}{\partial x} \quad (3)$$

در مطالعه‌ی حاضر، بررسی تأثیر نوع حرکت در رفتار خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده تحت تحریک ناشی از جرم متمرکز متحرک مد نظر بوده است. در این راستا، حرکت شتابدار با شتاب ثابت (فزاینده/ کاهنده) که براساس رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود، به عنوان مبنای مطالعات بوده است.

$$x_M(t)=\frac{1}{2}at^2+V_0 t+x_0 \quad (4)$$

که در آن، a شتاب ثابت حرکت جرم، V_0 سرعت لحظه‌ی ورود جرم بر روی

تیر خمیده، و x_0 مختصات لحظه‌ی شروع حرکت هستند. با جایگذاری مشتق‌های مرتبه‌های اول و دوم رابطه‌ی ۴ در رابطه‌ی ۳، می‌توان رابطه‌ی ۵ را نوشت:

$$\frac{d^2 w_y}{dt^2} = \frac{\partial^2 w_y}{\partial t^2} + (at+V_0)^2 \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + 2(at+V_0)\frac{\partial^2 w_y}{\partial x \partial t} + a\frac{\partial w_y}{\partial x} \qquad (۵)$$

حال، با جایگذاری رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۱ می‌توان شرایط حرکت شتابدار با شتاب ثابت را در مسئله پیاده‌سازی کرد.

۳. روش حل مسئله

یکی از روش‌های متداول برای تعیین پاسخ تیرهای خمیده به تحریک‌های جرم متحرک، روش تفکیک متغیرهاست؛ که در آن، با معرفی توابع مناسب مبتنی بر شرایط انتهایی تیر خمیده، پاسخ سیستم تعیین می‌شود. با توجه به معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر حرکت خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق و نیز متکی‌بودن هر دو انتهای تیر بر تکیه‌گاه‌های مفصلی، می‌توان از توابع سینوسی برای نشان‌دادن شکل پاسخ دینامیکی تیر مطابق روابط ۶ و ۷ استفاده کرد:[۴، ۱۵، ۳۴، و ۳۵]

$$w_y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} W_{yi}(t)\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \qquad (۶)$$

$$\theta_x(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Theta_{xi}(t)\sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \qquad (۷)$$

که در آن‌ها، $W_{yi}(t)$ و $\Theta_{xi}(t)$ به ترتیب توابع مجهول متناظر با جابجایی در راستای محور y و دوران پیچشی متناظر با مود i اُم تیر خمیده هستند. با قراردادن معادله‌های ۶ و ۷ در معادله‌های ۱ و ۲، معادله‌های حاصل شامل توابع مجهول $W_{yi}(t)$ و $\Theta_{xi}(t)$ خواهند بود. حال با انتگرال‌گیری در طول تیر خمیده و با کمک خاصیت تعامد توابع $\sin(i\pi x/L)$، می‌توان معادله‌های به‌دست‌آمده را به فرم ماتریسی معادله‌ی ۸، که به شکل دستگاه $2N$ معادله‌ی دیفرانسیل معمولی و $2N$ تابع مجهول $W_{yi}(t)$ و $\Theta_{xi}(t)$ است، گسسته‌سازی کرد. ضرایب دستگاه معادله‌های اخیر، تابع زمان هستند و با استفاده از روش‌های عددی شناخته‌شده می‌توان آن‌ها را حل کرد.

$$\bar{\mathbf{M}}(t)\begin{Bmatrix}\ddot{\mathbf{W}}(t)\\ \ddot{\Theta}(t)\end{Bmatrix} + \bar{\mathbf{C}}(t)\begin{Bmatrix}\dot{\mathbf{W}}(t)\\ \dot{\Theta}(t)\end{Bmatrix} + \bar{\mathbf{K}}(t)\begin{Bmatrix}\mathbf{W}(t)\\ \Theta(t)\end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{P}}(t) \qquad (۸)$$

که در آن، ضرایب $\bar{\mathbf{M}}(t)$، $\bar{\mathbf{C}}(t)$، و $\bar{\mathbf{K}}(t)$ به‌ترتیب ماتریس‌های معادل متناظر با جرم، میرایی، و سختی سیستم گسسته و نیز $\bar{\mathbf{P}}(t)$ بیانگر بردار معادل نیروهای وارده به آن است. در نوشتار آبدوس و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۶] جزئیات مربوط به نحوه‌ی محاسبه و مقادیر درایه‌های ماتریس‌های ضرایب مذکور ارائه شده است. یک روش متعارف برای تسهیل در روند حل عددی معادله‌های حاکم بر سیستم‌های دینامیکی در برنامه‌های رایانه‌یی، استفاده از نمایش فضای حالت[۱] است؛ که شکل کلی نحوه‌ی نمایش آن (معادله‌ی ۹) برای معادله‌ی نشان داده‌شده در رابطه‌ی ۷ عبارت است از:[۳۶-۴۲]

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{U}(t)\mathbf{Y}(t) + \mathbf{R}(t) \qquad (۹)$$

که در آن، $\mathbf{Y}(t)$، $\mathbf{U}(t)$، و $\mathbf{R}(t)$ مطابق روابط ۱۰ الی ۱۲ هستند:

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix}\mathbf{W}(t)\\ \Theta(t)\\ \dot{\mathbf{W}}(t)\\ \dot{\Theta}(t)\end{bmatrix}_{4N\times 1} \qquad (۱۰)$$

$$\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{I}\\ -\bar{\mathbf{M}}^{-1}(t)\bar{\mathbf{K}}(t) & -\bar{\mathbf{M}}^{-1}(t)\bar{\mathbf{C}}(t)\end{bmatrix}_{4N\times 4N} \qquad (۱۱)$$

$$\mathbf{R}(t) = \begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \bar{\mathbf{M}}^{-1}(t)\bar{\mathbf{P}}(t)\end{bmatrix}_{4N\times 1} \qquad (۱۲)$$

که در آن‌ها، I بیانگر ماتریس یکه از مرتبه‌ی $2N$ است. برای حل عددی دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی اول نشان داده‌شده در رابطه‌ی ۹، می‌توان از روش ماتریس انتقال استفاده کرد، که در این روش، بردار $\mathbf{Y}(t)$ به فرم رابطه‌ی ۱۳ بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{Y}(t) = \xi(t,t_0)\mathbf{Y}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \xi(t,\tau)\mathbf{R}(\tau)\,d\tau \qquad (۱۳)$$

که در آن، ماتریس $\xi(t,t_0)$ به عنوان ماتریس انتقال با بُعد مناسب انتخاب شده است و شرایط اولیه‌ی مسئله در زمان t_0 مشخص می‌شود. سپس با طی یک روند گام‌به‌گام می‌توان شرایط اولیه‌ی گام‌های زمانی بعدی (t_{k+1}) را براساس وضعیت نهایی گام زمانی پیش از آن (t_k) و با تعیین گام‌های به اندازه‌ی کافی کوچک برای افزایش دقت روش عددی به‌دست آورد. برای این کار می‌توان رابطه‌ی ۱۳ را به شکل یک معادله‌ی تفاضلی در دامنه‌ی زمانی بر حسب بردار حالت $Y(t)$ به‌صورت رابطه‌ی ۱۴ نوشت:

$$\mathbf{Y}(t_{k+1}) = \xi(t_{k+1},t_k)\mathbf{Y}(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \xi(t_{k+1},\tau)\mathbf{R}(\tau)\,d\tau \qquad (۱۴)$$

همچنین، می‌توان ماتریس انتقال ξ را به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ در زمان تقریب زد:[۴۱]

$$\xi(t_{k+1},t_k) = \exp\left[(t_{k+1}-t_k)\mathbf{U}(t_k)\right] \qquad (۱۵)$$

با ادامه‌ی حل گام‌به‌گام، معادله‌ی ۱۳ به فرم کلی رابطه‌ی ۱۶ نمایش داده می‌شود:[۴۱]

$$\mathbf{Y}(t_{k+1}) = \xi(t_{k+1},t_k)\mathbf{Y}(t_k) + \left[\xi(t_{k+1},t_k) - \mathbf{I}\right]\mathbf{U}^{-1}(t_k)\mathbf{R}(t_k) \qquad (۱۶)$$

۴. راستی‌آزمایی حل نیمه‌تحلیلی پیشنهادی

به‌منظور حصول اطمینان از درستی حل نیمه‌تحلیلی پیشنهادی، باید نتایج حاصل از آن را با مطالعات موجود در ادبیات فنی مقایسه کرد. یکی از مطالعات برجسته‌یی که در زمینه‌ی تأثیر تحریک ناشی از بار متحرک در پاسخ دینامیکی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق مطرح است، مربوط به مدل تحلیلی پیشنهادی ینگ[۲] و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۴)،[۱۲ و ۳۴] است. در مطالعه‌ی حاضر، یک تیر بتنی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۵ و ارتفاع ۱/۸ متر و با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی در دو انتها تحت تحریک ناشی از بار متمرکزی به جرم ۲۹/۹ تن قرار گرفته است، که با سرعت ثابت ۴۰ کیلومتر بر ساعت روی سطح فوقانی تیر در حال حرکت است. مشخصات هندسی و مکانیکی تیر خمیده در مطالعات راستی‌آزمایی مطابق جدول ۱ است.

[۱] State-space

[۲] Yang

جدول ۱. مشخصات هندسی و مکانیکی تیر خمیده در مطالعات راستی‌آزمایی.[۱۲ و ۳۴]

متغیر	نماد	کمیت	واحد
طول	L	۲۴٫۰	m
شعاع انحنا	R	۴۵٫۸۴	m
زاویه‌ی مرکزی	θ	۳۰	درجه
سطح مقطع	A	۹٫۰۰	m^2
چگالی	ρ	۲۴۰۰	kg/m^3
مدول کشسانی	E	۳۲٫۲	GPa
مدول برشی	G	۱۳٫۸۳	GPa
ممان اینرسی حول محور y	I_y	۱۸٫۷۵	m^4
ممان اینرسی حول محور z	I_z	۲٫۴۳	m^4
ممان اینرسی قطبی	I_o	۲۱٫۱۸	m^4

شکل ۲. راستی‌آزمایی مدل نیمه‌تحلیلی ارائه‌شده براساس مدل تحلیلی ینگ و همکاران،[۱۲ و ۳۴] بر مبنای مقایسه‌ی مقادیر جابجایی خارج از صفحه در وسط دهانه‌ی تیر خمیده.

مقادیر جدول اخیر، در حل نیمه‌تحلیلی پیشنهادی در نظر گرفته شده و سپس پاسخ دینامیکی سیستم بر مبنای فرضیات مطالعه‌ی ادبیات فنی، با درنظرگرفتن اولین مود ارتعاشی در قالب جابجایی خارج از صفحه در وسط دهانه‌ی تیر خمیده محاسبه شده است. مقایسه‌ی جابجایی خارج از صفحه‌ی مدل پیشنهادی ینگ و مدل نیمه‌تحلیلی مطالعه‌ی حاضر در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

مقایسه‌ی نمودارهای ترسیمی در شکل اخیر، نشانگر دقت بالای مدل پیشنهادی در برآورد پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق و تحت تحریک ناشی از بار متحرک است؛ چرا که نه فقط مقادیر جابجایی بیشینه با اختلاف کمتر از ۳٪ قابل محاسبه است، بلکه سایر پاسخ‌های دینامیکی سیستم شامل دامنه و فاز ورودی و خروجی تحریک نیز با دقت مطلوبی حاصل شده است. لذا، مدل نیمه‌تحلیلی پیشنهادی قادر است تا برآورد مطلوبی از رفتار دینامیکی حاکم بر تیرهای خمیده و تحت تحریک ناشی از جرم متحرک به همراه داشته باشد.

۵. مطالعات پارامتری

در بخش کنونی، تأثیر متغیرهای کلیدی حاکم بر مسئله، شامل: ۱) طول تیر خمیده، ۲) زاویه‌ی مرکزی تیر خمیده، ۳) جرم جسم متحرک، ۴) سرعت

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و هندسی مقطع تیرخمیده.[۴۷]

متغیر (واحد)	نماد	کمیت
طول (m)	L	۵۰-۷۵--۱۰۰
زاویه‌ی مرکزی (rad)	ϕ	$\frac{\pi}{۶} - \frac{\pi}{۳}$
سطح مقطع (cm^2)	A	۷۶٫۷۰
جرم واحد طول (kg/m)	μ	۶۰٫۲۱
مدول کشسانی (GPa)	E	۲۱۰
ضریب پواسون	υ	۰٫۳۰
مدول برشی (GPa)	G	۸۰٫۷۷
فاصله‌ی مرکز برش از سطح فوقانی تیر (cm)	y_s	۱۲٫۴۹
ممان اینرسی حول محور y (cm^4)	I_y	۵۱۲٫۳۰
ممان اینرسی حول محور z (cm^4)	I_z	۳۰۳۸٫۳۰
ممان اینرسی قطبی (cm^4)	I_o	۳۵۵۰٫۶۰

جدول ۳. مؤلفه‌های دینامیکی جسم متحرک.[۴۷-۴۹]

متغیر (واحد)	نماد	کمیت
جرم جسم (kg)	M	۸۰۰۰، ۱۲۰۰۰، ۱۶۰۰۰
سرعت اولیه‌ی حرکت شتابدار فزاینده (m/sec)	V_0	۰ — ۳۰
سرعت اولیه حرکت شتابدار کاهنده (m/sec)		۴۵ — ۷۵
شتاب افزاینده (m/sec^2)	a	۳+، ۶+، ۹+
شتاب کاهنده (m/sec^2)		۳-، ۶-، ۹-

جدول ۴. مؤلفه‌های مکانیکی بستر ویسکوکشسان.[۱۵، ۱۶، ۴۳، ۴۴، و ۵۰]

متغیر (واحد)	نماد	کمیت
سختی بستر ارتجاعی (kN/m^2)	k_y	۳۴۲۶
سختی پیچشی (kN/rad)	k_r	۱۱۸٫۳
میرایی بستر ارتجاعی ($kNsec/m^2$)	c_y	۲٫۴۵
میرایی پیچشی (Nrad/sec)	c_r	۸٫۰۶۷

اولیه‌ی ورود جسم به تیر خمیده، و ۵) شتاب کاهنده/ فزاینده‌ی جسم ارزیابی شده است. سایر پارامترهای مسئله، مانند: مشخصات مکانیکی بستر ویسکو-کشسان،[۱۵، ۱۶، ۴۳، و ۴۴] مشخصات هندسی تیر خمیده،[۴، ۱۶، ۴۵، و ۴۶] با استناد به مقادیر کاربردی در ادبیات فنی استفاده شده‌اند. مقادیر اخیر در جدول‌های ۲ الی ۴ خلاصه شده‌اند، که به ترتیب مربوط به مشخصات مکانیکی و هندسی تیر خمیده، مؤلفه‌های دینامیکی جرم متحرک، و نیز مشخصات مکانیکی خاک بستر هستند.

همان‌طور که در زیربخش ۲.۲ (فرضیات) اشاره شده است، سرعت اولیه‌ی ورود جرم و نیز شتاب‌های کاهنده به‌گونه‌یی در نظر گرفته شده‌اند که انواع حالت

همان‌طور که در زیربخش ۲.۲ (فرضیات) اشاره شده است، سرعت اولیه‌ی ورود جرم و نیز شتاب‌های کاهنده به‌گونه‌یی در نظر گرفته شده‌اند که انواع حالت‌های محتمل شامل: ۱) جرم پیش از رسیدن به انتهای تیر بایستد، ۲) جرم دقیقاً در انتهای تیر متوقف شود، و ۳) جرم با سرعت $V = \sqrt{V_0^2 \pm 2|a|L}$ از انتهای تیر عبور کند، در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده ارزیابی شود. همچنین، به‌منظور مقایسه‌ی تأثیر شتاب کاهنده/ افزاینده، حالتی که جسم با سرعت ثابت (شتاب صفر) از تیر عبور می‌کند، نیز در محاسبات منظور شده است.

۶. تحلیل و تفسیر نتایج

در شکل‌های ۳ الی ۶، طیف‌های پاسخ جابجایی و لنگر خمشی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده به ازاء تغییرات پارامترهای مختلف بر حسب سرعت اولیه‌ی ورود به تیر (V_0) ارائه شده‌اند. منظور از طیف، نمودار بیشینه‌ی پاسخ سیستم بر حسب سرعت اولیه‌ی جرم متحرک است. به‌منظور سهولت، بیشینه‌ی جابجایی خارج از صفحه با u_y نشان داده شده است، تا تمایز آن با تاریخچه‌ی پاسخ جابجایی (w_y) مشخص شود.

(الف) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/6$ rad ، L=۵۰ m

(ب) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/3$ rad ، L=۵۰ m

(ج) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/6$ rad ، L=۷۵ m

(د) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/3$ rad ، L=۷۵ m

(ه) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/6$ rad ، L=۱۰۰ m

(و) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/3$ rad ، L=۱۰۰ m

شکل ۳ . نمودار طیف پاسخ جابه‌جایی خارج از صفحه در حالت شتاب فزاینده.

(الف) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۵۰ m

(ب) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۵۰ m

(ج) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۷۵ m

(د) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۷۵ m

(ه) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۱۰۰ m

(و) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۱۰۰ m

شکل ۴. نمودار طیف پاسخ لنگر خمشی در حالت شتاب فزاینده.

در شکل‌های ۳ و ۴، اثر حرکت تندشونده (شتاب فزاینده) و در شکل‌های ۵ و ۶، حرکت کُندشونده (شتاب کاهنده) بررسی شده‌اند. این تذکر لازم است که لنگر خمشی خارج از صفحه (m_z)، مطابق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه شده است:[۱۶]

$$m_z = EI_z \left(\frac{\partial^۲ w_y}{\partial x^۲} - \frac{\theta_x}{R} \right) \qquad (۱۷)$$

برای سهولت، بیشینه‌ی مقادیر لنگر خمشی در شکل‌های مربوط به طیف لنگر خمشی خارج از صفحه با M_z نشان داده شده است، تا تمایز آن با تاریخچه‌ی پاسخ مقادیر لنگر خمشی خارج از صفحه (m_z)، مشخص شود. مطابق طیف‌های مربوط به شتاب فزاینده، اگر سرعت اولیه‌ی ورود جرم متحرک به تیر خمیده کمتر از ۵ (m/sec) باشد، اثر سرعت اولیه در پاسخ دینامیکی سیستم، شامل جابجایی و لنگر خمشی خارج از صفحه نامحسوس است. مطابق شکل‌های ۳ و ۴، پس از سرعت مذکور، آثار مؤلفه‌های دینامیکی در پاسخ سیستم تشدید شده است، به‌طوری که بیشینه‌ی میزان افزایش طیف پاسخ جابجایی نسبت به حالت سرعت ثابت، به ازاء شتاب‌های فزاینده ۳، ۶، و ۹ ($m/sec^۲$)، به ترتیب ۱۵٫۷۶، ۱۴٫۴۵، و ۱۸٫۱۱ درصد بوده است. مقادیر نظیر

(الف) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۵۰ m

(ب) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۵۰ m

(ج) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۷۵ m

(د) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۷۵ m

(ه) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۱۰۰ m

(و) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۱۰۰ m

شکل ۵. نمودار طیف پاسخ جابجایی خارج از صفحه در حالت شتاب کاهنده.

برای طیف لنگر نیز به ترتیب ۲۷٫۰۳، ۲۷٫۵۳، و ۱۸٫۳۹ درصد بوده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، تأثیر اندازه‌ی شتاب فزاینده در طیف پاسخ لنگر خمشی نسبت به جابجایی بیشتر بوده است.

در حرکت کُندشونده، مطابق شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی مقدار کاهش بیشینه‌ی طیف جابجایی نسبت به حالت سرعت ثابت، به ازاء شتاب‌های کاهنده ۳، ۶، و ۹ ($m/sec^۲$)، به ترتیب ۲۱٫۳۳، ۲۹٫۷۸، و ۴۱٫۵۹ درصد است. در طیف لنگر خمشی، مقادیر اخیر به ترتیب ۲۱٫۶۴، ۳۰٫۱۹، و ۴۲٫۰۵ درصد بوده‌اند.

براساس شکل‌های ۳ الی ۶، به دلیل قرارگرفتن سرعت‌های کمتر از ۳۰ متر بر ثانیه، که در حرکت تندشونده منظور شده‌اند؛ در ناحیه‌ی انتقالی که ماهیت نوسانی تیر تحت تحریک خارجی از فرم هارمونیک به دور است (به نوشتار آبدوس و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۶] مراجعه شود)، تغییرات بیشینه‌ی طیف در شتاب‌های فزاینده از روند مشخصی پیروی نمی‌کند. اما، در حرکت کُندشونده، با توجه به سرعت‌های منظورشده در نتایج عددی، که خارج از ناحیه‌ی انتقالی قرار گرفته و ماهیت پاسخ‌ها فرم هارمونیک داشته‌اند، روند تغییرات آن نسبت به حالت تندشونده و به ازاء مقادیر بررسی‌شده معنی‌دارتر بوده است.

همچنین، جمع‌بندی درصدهای افزایش و کاهش بیشینه‌ی پاسخ طیف جابجایی و لنگر خمشی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده‌ی بررسی‌شده تحت سرعت اولیه، جرم، و شتاب‌های مختلف جسم متحرک در جدول‌های ۵ و ۶ خلاصه شده است.

(الف) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۵۰ m

(ب) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۵۰ m

(ج) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۷۵ m

(د) M=۱۲۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۷۵ m

(ه) M=۱۶۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۶$ rad ، L=۱۰۰ m

(و) M=۸۰۰۰kg ، $\varphi = \pi/۳$ rad ، L=۱۰۰ m

شکل ۶. نمودار طیف پاسخ لنگر خمشی در حالت شتاب کاهنده.

جدول ۵. درصد افزایش بیشینه‌ی پاسخ طیف نسبت حالت سرعت ثابت (a=۰).

	شماره‌ی شکل	a=۳ m/s²	a=۶ m/s²	a=۹ m/s²	شماره‌ی شکل	a=۳ m/s²	a=۶ m/s²	a=۹ m/s²
حرکت تندشونده (شتاب فزاینده)	۴ – الف	۱٫۶۴	۱۱٫۱۹	۱۸٫۱۱	۵ – الف	۲٫۴۷	۶٫۶۸	۱۲٫۵۵
	۴ – ب	۵٫۳۴	۰٫۸۹	۴٫۷۱	۵ – ب	۸٫۸۸	۴٫۹۲	۱٫۵۹
	۴ – ج	۰٫۱۰	۰٫۳۸	۰٫۸۲	۵ – ج	۰٫۴۱	۵٫۹۴	۱۰٫۴۵
	۴ – د	۰٫۳۰	۸٫۷۸	۲٫۹۳	۵ – د	۱۲٫۹۱	۲۷٫۵۳	۱۸٫۳۹
	۴ – ه	۰٫۰۰	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۵ – ه	۰٫۷۹	۵٫۶۵	۰٫۴۰
	۴ - و	۱۵٫۷۶	۱۴٫۴۵	۵٫۰۰	۵ - و	۲۷٫۰۳	۲۵٫۱۴	۱۵٫۹۸

جدول ۶. درصد کاهش بیشینه‌ی پاسخ طیف نسبت حالت سرعت ثابت (a=۰).

	شماره‌ی شکل	a=۳ m/s^2	a=۶ m/s^2	a=۹ m/s^2	شماره‌ی شکل	a=۳ m/s^2	a=۶ m/s^2	a=۹ m/s^2
حرکت کندشونده (شتاب کاهنده)	۶ – الف	۵٫۵۶	۸٫۱۸	۱۰٫۷۲	۷ – الف	۵٫۵۴	۸٫۶۶	۱۱٫۱۵
	۶ – ب	۳٫۰۷	۴٫۳۴	۸٫۷۲	۷ – ب	۳٫۴۳	۴٫۶۲	۹٫۳۸
	۶ – ج	۲۱٫۳۳	۲۱٫۹۱	۲۳٫۳۰	۷ – ج	۲۱٫۶۴	۲۲٫۲۴	۲۳٫۶۳
	۶ – د	۷٫۳۶	۲۹٫۷۸	۴۱٫۵۹	۷ – د	۷٫۶۴	۳۰٫۱۹	۴۲٫۰۵
	۶ – ه	۵٫۴۹	۱۰٫۷۷	۱۵٫۸۲	۷ – ه	۵٫۵۳	۱۰٫۸۵	۱۵٫۹۴
	۶ - و	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۷ - و	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۴

شایان ذکر است که نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک انجام‌شده در بازه‌ی در نظرگرفته‌شده برای مقادیر متغیرهای ورودی، شامل: طول و زاویه‌ی مرکزی تیر خمیده و نیز جرم، سرعت اولیه‌ی ورود به تیر، و شتاب‌های کاهنده و افزاینده‌ی جرم متحرک معتبر هستند.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به آثار ناشی از حرکت شتابدار جرم متحرک در پاسخ دینامیکی خارج از صفحه‌ی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق پرداخته شده است. در ابتدا، معادله‌های تعادل دینامیکی تیرهای خمیده در صفحه‌ی افق تحت تحریک ناشی از حرکت شتابدار با شتاب ثابت فزاینده/ کاهنده یک جرم نوشته شده و با انتخاب توابع سینوسی، با درنظرگرفتن شرایط تکیه‌گاهی ساده، برای تیرهای خمیده، فرم کلی آن تعیین شده است. سپس، طیف پاسخ دینامیکی سیستم مذکور براساس بیشینه‌ی مقادیر جابجایی خارج و لنگر خمشی از صفحه ارائه شده است.

براساس روابط نیمه‌تحلیلی به‌دست‌آمده، مطالعات پارامتریک برای درنظرگرفتن اثر هندسه‌های مختلف از تیرهای خمیده، شامل: طول و زاویه‌ی مرکزی و نیز پارامترهای دینامیکی تحریک خارجی، شامل: سرعت اولیه، جرم، و اندازه‌ی شتاب فزاینده/ کاهنده‌ی جسم متحرک انجام شده است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که بجز در سرعت‌های اولیه‌ی کمتر از حدود ۵ متر بر ثانیه، آثار شتاب فزاینده در طیف پاسخ دینامیکی سیستم حائز اهمیت است. همچنین، با توجه به اینکه در شتاب‌های تندشونده، بازه‌ی سرعت اولیه‌ی بررسی‌شده به‌گونه‌یی است که شرایط سیستم در ناحیه‌ی انتقالی سرعت قرار می‌گیرد، لذا روند تغییرات مشخصی را از پاسخ سیستم نمی‌توان انتظار داشت. این در حالی است که در حالت شتاب کُندشونده، با توجه به بازه‌ی سرعت‌های اولیه‌ی ورود جرم متحرک به تیر خمیده، ماهیت نوسانی آن برجسته‌تر بوده و روند مشخص‌تری داشته است.

با توجه به کاربری‌بودن بازه‌ی تغییرهای متغیرهای در نظر گرفته‌شده در مطالعات پارامتریک، آثار حرکت شتابدار جسم متحرک می‌تواند قابل‌ملاحظه باشد، به‌گونه‌یی که برای پاسخ جابجایی و لنگر خمشی خارج از صفحه در حالت شتاب تندشونده به ترتیب ۱۸٫۱۱ و ۲۷٫۵۳ درصد افزایش، و برای حالت شتاب کُندشونده، به ترتیب ۴۱٫۵۹ و ۴۲٫۰۵ درصد کاهش نسبت به وضعیت سرعت ثابت در پاسخ دینامیکی سیستم مشاهده می‌شود.

References- منابع

1. Abdoos, H. and Khaloo, A.R., 2024. Failure mechanism of a curved RC shear wall subjected to cyclic loading: Experimental findings. Engineering Structures, 304, p. 117703. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117703.

2. Beskou, N.D. and Theodorakopoulos, D.D., 2011. Dynamic effects of moving loads on road pavements: A review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (4), pp. 547–567. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.11.002.

3. Frýba, L., 2013. Vibration of solids and structures under moving loads, Springer Science & Business Media.

4. Foyouzat, M.A., Abdoos, H. and Khaloo, A.R., Mofid, M., 2022. In-plane vibration analysis of horizontally curved beams resting on visco-elastic foundation subjected to a moving mass. Mechanical Systems and Signal Processing, 172, p. 109013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109013.

5. Khaloo, A.R., Foyouzat, M.A., Abdoos, H. and Mofid, M., 2023. Axial force contribution to the out-of-plane response of horizontally curved beams under a moving mass excitation. Applied Mathematical Modelling, 115, pp. 148–172. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.047.

6. Christiano, P.P. and Culver, C.G., 1969. Horizontally curved bridges subject to moving load. Journal of Structural Division, 95 (8), pp.1615-1643. DOI: https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002331.

7. Chaudhuri, S.K. and Shore, S., 1977. Dynamic analysis of horizontally curved I-girder bridges. Journal of Structural Division, 103 (8), pp.1589-1604. DOI: https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004696.

8. Nair, S., Garg, V.K. and Lai, Y.S., 1985. Dynamic stability of a curved rail under a moving load. Applied Mathematical Modelling, 9 (3), pp. 220–224. DOI: https://doi.org/10.1016/0307-904X(85)90011-3

9. Galdos, N.H., Schelling, D.R. and Sahin, M.A., 1993. Methodology for impact factor of horizontally curved box bridges. Journal of Structural Engineering, 119 (6), pp. 1917–1934. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:6(1917)

10. Huang, D., Wang, T.-L. and Shahawy, M., 1998. Vibration of horizontally curved box girder bridges due to vehicles. Computers & Structures, 68 (5), pp. 513–528. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00065-0

11. Howson, W.P. and Jemah, A.K., 1999. Exact out-of-plane natural frequencies of curved Timoshenko beams. Journal of Engineering Mechanics, 125 (1), pp. 19–25. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(19)

12. Yang, Y.-B., Wu, C.-M. and Yau, J.-D., 2001. Dynamic response of a horizontally curved beam subjected to vertical and horizontal moving loads. Journal of Sound and Vibration, 242 (3), pp. 519–537. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3355

13. Lee, B.K., Oh, S.J. and Park, K.K., 2002. Free vibrations of shear deformable circular curved beams resting on elastic foundations. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2 (01), pp. 77–97. DOI: https://doi.org/10.1142/S0219455402000440.

14. Zboinski, K. and Dusza, M., 2010. Self-exciting vibrations and Hopf's bifurcation in non-linear stability analysis of rail vehicles in a curved track. European Journal of Mechanics-A/Solids, 29 (2), pp. 190–203. DOI: https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2009.10.001.

15. Dai, J. and Ang, K.K., 2015. Steady-state response of a curved beam on a viscously damped foundation subjected to a sequence of moving loads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 229 (4), pp. 375–394. DOI: https://doi.org/10.1177/0954409714563366.

16. Abdoos, H., Khaloo, A.R. and Foyouzat, M.A., 2020. On the out-of-plane dynamic response of horizontally curved beams resting on elastic foundation traversed by a moving mass. Journal of Sound and Vibration, 479, p. 115397. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115397.

17. Abdoos, H., Foyouzat and M.A., Khaloo, A.R., 2023. Parametric study on the dynamics of horizontally curved beams due to a moving inertial load considering the induced torsional moment. Journal of Structural and Construction Engineering, 10 (8), pp. 141-160. DOI: https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368612.2964.

18. Lin, J. and Niemeier, D.A., 2002. An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California's regulatory cycle. Atmospheric Environment, 36 (38), pp. 5759–5770. DOI: https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00695-7.

19. Ho, S.-H., Wong, Y.-D. and Chang, V.W.-C., 2014. Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions. Atmospheric Environment, 97, pp. 353–362. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.042

20. Kokhmanyuk, S.S. and Filippov, A.P., 1967. Dynamic effects on a beam of a load moving at variable speed. Stroitelnaya Mekhanika i Raschet so-Oruzhenii, 9 (2), pp. 36–39.

21. Krylov, V.V., 1996. Generation of ground vibrations by accelerating and braking road vehicles. Acta Acustica United with Acustica, 82 (4), pp. 642–649.

22. Zibdeh, H.S. and Rackwitz, R., 1996. Moving loads on beams with general boundary conditions. Journal of Sound and Vibration, 195 (1), pp. 85–102. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0405.

23. Abu-Hilal, M., Mohsen, M., 2000. Vibration of beams with general boundary conditions due to a moving harmonic load. Journal of Sound and Vibration, 232 (4), pp. 703–717. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2771.

24. Dugush, Y.A. and Eisenberger, M., 2002. Vibrations of non-uniform continuous beams under moving loads. Journal of Sound and Vibration, 254 (5), pp. 911–926. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4135.

25. Michaltsos, G.T., 2002. Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to loads moving with variable speeds. Journal of Sound and Vibration, 258 (2), pp. 359–372. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5141.

26. Zibdeh, H.S., and Abu-Hilal, M., 2003. Stochastic vibration of laminated composite coated beam traversed by a random moving load. Engineering

Structures, 25 (3), pp. 397–404. DOI: https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00181-5.

27. Peng, X., Liu, Z.J. and Hong, J.W., 2006. Vibration analysis of a simply supported beam under moving mass with uniformly variable speeds. Engineering mechanics, 23 (6), pp. 25-29.

28. Li, M., Qian, T., Zhong, Y. and Zhong, H., 2014. Dynamic response of the rectangular plate subjected to moving loads with variable velocity. Journal of Engineering Mechanics, 140 (4). DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000687.

29. Powell, J.P. and Palacín, R., 2015. Passenger stability within moving railway vehicles: Limits on maximum longitudinal acceleration. Urban Rail Transit, 1, pp. 95–103. DOI: https://doi.org/10.1007/s40864-015-0012-y.

30. Beskou, N.D., and Muho, E.V., 2018. Dynamic response of a finite beam resting on a Winkler foundation to a load moving on its surface with variable speed. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109, pp. 222–226. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.033.

31. Liu, Y., Fang, H., Zheng, J.J. and Wang, Y.N., 2021. Dynamic behaviour of pavement on a two-parameter viscoelastic foundation subjected to loads moving with variable speeds. International Journal of Pavement Engineering, 23 (10), pp. 3425-3443. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1899178.

32. Piovan, M.T., Cortinez, V.H. and Rossi, R.E., 2000. Out-of-plane vibrations of shear deformable continuous horizontally curved thin-walled beams. Journal of Sound and Vibration, 237 (1), pp. 101–118. DOI: https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3055.

33. Yang, Y.-B. and Kuo, S.-R., 1987. Effect of curvature on stability of curved beams. Journal of Structural Engineering, 113 (6), pp. 1185–1202. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:6(1185)

34. Yang, Y.-B., Yau, J.D., Yao, Z. and Wu, Y.S., 2004. Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways. World Scientific.

35. Foyouzat, M.A., Mofid, M. and Akin, J.E., 2016. On the dynamic response of beams on elastic foundations with variable modulus. Acta Mechanica, 227 (2), pp. 549-564. DOI: https://doi.org/10.1007/s00707-015-1485-1.

36. Foyouzat, M.A., Estekanchi, H.E. and Mofid, M., 2018. An analytical-numerical solution to assess the dynamic response of viscoelastic plates to a moving mass. Applied Mathematical Modelling, 54, pp. 670–696. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.07.037.

37. Alile, M.R., Foyouzat, M.A. and Mofid, M., 2024. Parametric investigation of the dynamic response of a circular plate excited by a two-degree-of-freedom moving oscillator with inclusion of surface roughness. Archive of Applied Mechanics, 94 (2), pp. 347-364. DOI: https://doi.org/10.1007/s00419-023-02524-y.

38. Moradi, S., Azam, S.E. and Mofid, M., 2021. On Bayesian active vibration control of structures subjected to moving inertial loads. Engineering Structures, 239, p. 112313. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112313.

39. Azam, S.E., Didyk, M.M., Linzell, D. and Rageh, A., 2022. Experimental validation and numerical investigation of virtual strain sensing methods for steel railway bridges. Journal of Sound and Vibration, 537, p. 117207. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117207.

40. Alile, M.R., Foyouzat, M.A. and Mofid, M., 2022. Vibration of a circular plate on Pasternak foundation with variable modulus due to moving mass. Structural Engineering and Mechanics, 83 (6), pp. 757–770. DOI: https://doi.org/10.12989/sem.2022.83.6.757.

41. Brogan, W.L., 1991. Modern control theory, Pearson Education India.

42. Foyouzat, M.A., 2023. Separation/recontact investigation of a travelling oscillator over a plate with inclusion of surface roughness. Thin-Walled Structures, 183, p. 110373. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110373.

43. Foyouzat, M.A., Mofid, M. and Akin, J.E., 2016. Free vibration of thin circular plates resting on an elastic foundation with a variable modulus. Journal of Engineering Mechanics, 142(4), p.04016007. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001050.

44. Foyouzat, M.A. and Mofid, M., 2019. An analytical solution for bending of axisymmetric circular/annular plates resting on a variable elastic foundation. European Journal of Mechanics-A/Solids, 74, pp.462-470. DOI: https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.01.006.

45. Chin, W.W., 1998. The partial least squares approach to structural equation modeling. Modern Methods for Business Research, 295, pp. 295–336.

46. Division, T.P., 2009. MOD UK Railways Permanent Way Design and Maintenance Policy and Standards Issue 4.

47. Vitez, I., Krumes, D. and Vitez, B., 2005. UIC-recommendations for the use of rail steel grades. Metalurgija, 44 (2), pp. 137–140.

48. Abdel-Rohman, M. and Al-Duaij, J., 1996. Dynamic response of hinged-hinged single span bridges with uneven deck. Computers and Structures, 59 (2), pp. 291–299. DOI: https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00262-6.

49. He, W., 2018. Vertical dynamics of a single-span beam subjected to moving mass-suspended payload system with variable speeds. Journal of Sound and Vibration, 418, pp. 36–54. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.12.030

50. Foyouzat, M.A. and Estekanchi, H.E., 2017. Dynamic response of thin plates on time-varying elastic point supports. Structural Engineering and Mechanics, 62 (4), pp. 431–441. DOI: https://doi.org/10.12989/sem.2017.62.4.431.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۵۰-۶۳، (پژوهشی)

Original Article

ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران

رامین فضلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمد شامخی امیری* (استادیار)
حسین پهلوان (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی یک سازه، که هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله را در بر می‌گیرد، در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود، اهمیت زیادی دارد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی دقیق آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های ایران با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن است. برای این منظور، یک سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرکشسان تحت مجموعه‌یی از رکوردهای زلزله‌های ایران برای محاسبه‌ی آسیب طیفی استفاده شده است. سپس با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن، مدل ریاضی صریح با تعریف یک تابع برازندگی برای آن استخراج و همچنین، شاخص آسیب پارک- انگ برای تعیین کمیت طیف آسیب استفاده شده است. هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله در پیش‌بینی مدل طیف آسیب لرزه‌یی نقش خواهند داشت. در انتها، یک معادله‌ی ساده‌شده برای اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی سازه‌ها، برای حرکت‌های زمین در ایران، که هر دو ویژگی را در بر می‌گیرد، پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: طیف آسیب لرزه‌یی، شاخص آسیب پارک- انگ، برنامه‌نویسی بیان ژن، سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرکشسان **(SDOF)**، زلزله‌ی نزدیک گسل.

Ramin.Fazli@shahroodut.ac.ir
Shamekhi@shahroodut.ac.ir
Pahlavan@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه، پیش‌بینی آسیب ناشی از زلزله، هم در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود، اهمیت حیاتی دارد. آسیب وارده‌ی ناشی از زلزله به سازه‌ها می‌تواند با استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته، شامل مدل‌سازی عددی و تحلیل دینامیکی، به‌صورت کمّی و با دقت بالا ارزیابی و برآورد شود. روش‌های مذکور با درنظرگرفتن پارامترهای اصلی سازه و ویژگی‌های خاص زلزله، امکان تجزیه و تحلیل دقیق آثار زلزله بر روی سازه‌ها را فراهم می‌آورند. اما از مشکلات روش‌های اخیر می‌توان به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن آن‌ها اشاره کرد.

تقاضاهای بیشینه، مانند شکل‌پذیری بیشینه و شتاب بیشینه‌ی زمین، که معمولاً توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی استفاده می‌شوند، به‌طور مناسب منعکس‌کننده‌ی آسیب لرزه‌یی یک سازه نیستند. تقاضاهای تغییرشکل تحمیل‌شده به یک المان سازه‌یی توسط زمین‌لرزه ماهیت چرخه‌یی دارند، و نتایج مرتبط با آسیب تجمعی، تأثیر قابل توجهی در مقاومت لرزه‌یی یک سازه خواهند داشت؛ که در واقع، شامل یک محدودیت مفهومی به دلیل این واقعیت است که آن‌ها صراحتاً خسارت تجمعی ناشی از تعداد چرخه‌های پاسخ و اتلاف انرژی را در نظر نمی‌گیرند.[۱] علاوه‌بر این، آن‌ها مدت زمان و محتوای بسامدی یک زمین‌لرزه را در محاسبه‌های خود لحاظ نمی‌کنند.

اگرچه خواسته‌های اخیر ضروری هستند، اما فقط تکیه بر چنین خواسته‌هایی ناکافی است، به ویژه برای سازه‌هایی که انتظار می‌رود تغییرشکل خمیری و اتلاف انرژی تحت زلزله‌های طراحی داشته باشند. طیف طراحی موجود در بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی، آثار بحرانی مذکور را در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه، ضریب زلزله‌یی که در محاسبه‌ی برش طراحی در تراز پایه به‌کار می‌رود، ممکن است برای کنترل آسیب لرزه‌یی در سازه‌های شکل‌پذیری، که در معرض حرکت‌های زمینی با محتوای انرژی بالا قرار دارند، ناکافی باشد.[۲و۳] طیف طراحی لرزه‌یی به‌دست‌آمده با استفاده از شتاب طیفی (شناخته‌شده به‌عنوان طیف طراحی کشسان) و ضریب رفتار سازه (برای درنظرگرفتن آثار رفتار غیرکشسان و شکل‌پذیری در کاهش برش پایه‌ی طراحی)، نقش عوامل اصلی که در بالا توضیح داده شد، را نادیده می‌گیرند. بنابراین، نیاز به روش برآورد آسیب بالقوه‌یی است که پارامترهای اصلی سازه و زلزله را در نظر بگیرد. یک راه‌حل، استفاده از یک

*نویسنده مسئول
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷.

استناد به این مقاله:

فضلی، رامین، شامخی امیری، محمد، و پهلوان، حسین، ۱۴۰۳. ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران، ۴۰(۴)، صص. ۵۰-۶۳. DOI: 10.24200/j30.2024.63776.3287.

طیف غیرکشسان است، که آسیب تجمعی را ثبت می‌کند. در این راستا، طیف آسیب به‌عنوان یک ابزار مفهومی، نموداری است که ارتباط میان میزان آسیب لرزه‌یی با دوره‌ی تناوب سازه را نشان می‌دهد. طیف اخیر ارزیابی آسیب‌پذیری، توانایی ثبت کمّی آسیب‌های لرزه‌یی بالقوه را در مجموعه‌ی وسیعی از ساختمان‌ها با درنظرگرفتن هم خواص سازه‌یی و هم ویژگی‌های زمین‌لرزه ارائه می‌دهد.

این رویکرد توسط برخی پژوهشگران بررسی و در ادامه، بعضی از کارهای مرتبط توضیح داده شده است.

بزرگ‌نیا و برترو (۲۰۰۳)،[۴] طیف آسیب را با ترکیب انرژی هیسترتیک نرمال‌شده و شکل‌پذیری تغییرشکل پیشنهاد کردند. طیف آسیب با درنظرگرفتن صدها رکورد حرکت زمین ثبت‌شده در طول زلزله‌های لاندز و نورثریج محاسبه شده است. کانت و چای[۱] (۲۰۰۴)،[۵] نیز یک روش ساده‌ی مبتنی بر ایجاد رابطه بین انرژی ورودی لرزه‌یی و انرژی هیسترتیک مستهلک‌شده را برای تعیین طیف تقاضای چرخه‌یی غیرارتجاعی مبتنی بر آسیب، که قادر به استفاده در تحلیل لرزه‌یی و طراحی سازه‌هاست، پیشنهاد کرده‌اند. کوزنزا[۲] و همکاران (۲۰۰۹)،[۶] یک روش ساده را پیشنهاد کرده‌اند، که اثر تجمعی آسیب را در بر می‌گیرد، و برای طراحی لرزه‌یی و ارزیابی سازه‌ها استفاده می‌شود. همچنین، یک ضریب خسارت معادل برای تعیین مقاومت اصلاح‌شده یا طیف جابجایی غیرکشسان را معرفی کردند، که قادر به محاسبه‌ی آسیب ناشی از زلزله است. ژای[۳] و همکاران (۲۰۱۳)،[۷] یک مدل ریاضی برای برآورد آسیب طیفی برای زمین‌لرزه‌هایی از نوع توالی پس‌لرزه‌های زلزله‌ی اصلی پیشنهاد و تأثیر آن را در دوره‌ی تناوب سازه، ضریب کاهش مقاومت، نسبت میرایی، نسبت سختی پس از تسلیم، و نیز وضعیت سایت را در مدل آسیب طیفی پیشنهادی بررسی کرده‌اند. گرکو[۴] و همکاران (۲۰۱۷)،[۸] با پیشنهاد یک رویکرد تصادفی برای تعیین طیف غیرکشسان مبتنی بر آسیب لرزه‌یی، آثار تجمعی آسیب را با استفاده از مدل آسیب پارک- آنگ[۵] (۱۹۸۵)،[۹] بررسی کرده‌اند.

ون[۶] و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۰] با پیشنهاد و بررسی طیف‌های آسیب برای نوع توالی پس‌لرزه‌های اصلی برای زمین‌های با خاک نرم دریافتند که تأثیر خاک نرم در طیف آسیب می‌تواند بیش از ٪۴۰ باشد. همچنین ایشان و برخی دیگر ازهمکارانشان (۲۰۱۸)،[۱۱] طیف آسیب‌های ناشی از پس‌لرزه‌های زلزله‌های اصلی را که معمولاً در اعماق کمتر از ۷۰ کیلومتری مناطق لرزه‌خیز سراسر جهان رخ می‌دهند، در پوسته‌ی جهانی مطالعه کرده‌اند. سپس یک مدل ریاضی برای برآورد طیف آسیب ارائه داده و نشان داده‌اند که پس‌لرزه‌هایی با شدت بیش از ٪۸۰ زلزله‌ی اصلی می‌توانند میزان آسیب را تا ٪۲۰ افزایش دهند.

قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)،[۱۲] نیز طیف آسیب لرزه‌یی با استفاده از روش‌های برنامه نویسی ژنتیک چند ژنی (MGGP)[7] و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)[8] را به‌دست آورده و یک مدل ریاضی صریح مبتنی بر MGGP برای تسهیل در اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی بالقوه‌ی سازه‌ها، برای حرکت‌های زمین که هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله را در بر می‌گیرد، پیشنهاد کرده‌اند.

بیگلری (۲۰۲۱)،[۲۱] طیف آسیب را برای دبیرستان تاریخی کرمانشاه برای حرکت‌های زمین محاسبه کرده است. تجزیه و تحلیل غیرخطی نشان داده است که طیف آسیب با افزایش شتاب زمین، افزایش یافته است. همچنین تحلیل انعطاف‌پذیری سازه‌های با کف چوبی به‌طور قابل‌توجهی مقاومت لرزه‌یی پیش‌بینی‌شده را کاهش داده است، که باعث افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ایی این بنایی تاریخی شده است.

پان[۹] و همکاران (۲۰۲۴)،[۲۲] در یک تجزیه و تحلیل جامع، یک طیف آسیب برای سیستم‌های تک درجه‌ی آزادی (SDOF)[10] تحت بارگذاری جانبی امواج سونامی ارائه و پاسخ دینامیکی سیستم‌های SDOF به بارگذاری سونامی را با درنظرگرفتن عوامل مختلفی، مانند: عمق، مدل‌های هیسترتیک، سختی پس از تسلیم، و میرایی بررسی کرده‌اند. یافته‌ها، تأثیر قابل‌توجه عوامل مذکور را در آسیب‌های سازه‌یی برجسته کرده و یک فرمول پیش‌بینی ساده‌شده برای تخمین آسیب‌های سازه‌یی ناشی از سونامی را معرفی کرده است.

همان‌طور که توضیح داده شد، پیش‌بینی آسیب احتمالی برای طیف وسیعی از سازه‌ها، که می‌تواند مستقیماً توسط طیف‌های آسیب ارائه شود، در طراحی سازه‌های جدید مقاوم و یا ارزیابی مقاومت لرزه‌یی سازه‌های موجود می‌تواند استفاده شود. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون برای تعیین آسیب به‌طور غیرمستقیم از اصلاح طیف مبتنی بر تغییرشکل غیرکشسان استفاده کرده‌اند. روش‌های ذکرشده کلاً براساس تغییرشکل سازه در پاسخ به بارگذاری‌های جانبی، آسیب را تخمین می‌زنند. اما پژوهش‌های اندکی، مستقیماً طیف آسیب را محاسبه کرده‌اند.

استفاده از روش‌های رگرسیون معمولی برای برآورد طیف آسیب در بسیاری از مطالعات انجام‌شده تاکنون رایج بوده است. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های تحلیلی، رابطه‌یی بین پارامترهای غیرمستقل و طیف آسیب را برآورد می‌کنند و می‌توانند به عنوان ابزاری مفید برای تخمین آسیب بالقوه‌ی سازه‌ها استفاده شوند.

روش‌های یادگیری ماشین[۱۱] در بهبود دقت مدل‌ها برای تخمین طیف آسیب در مقایسه با روش‌های رگرسیون معمولی، مزایای ویژه‌یی دارند و قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، امکان برازش دقیق‌تر داده‌ها، و افزایش معنادار دقت در تخمین آسیب را فراهم می‌آورند. روش‌های یادگیری ماشین، با توانایی برجسته‌ی خود در استفاده از داده‌های بزرگ و پیچیده و شناسایی الگوهای غیرخطی و تعامل‌های میان ویژگی‌ها،

[۱] Kunnath & Chai
[۲] Cosenza
[۳] Zhai
[۴] Greco
[۵] Park & Ang
[۶] Wen
[۷] Multi-Gene Genetic Programming
[۸] Artificial Neural Networks
[۹] Pan
[۱۰] Single-Degree-Of-Freedom
[۱۱] Machine Learning Methods

یک گام رو به جلو نسبت به رگرسیون معمولی در بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و درک عمیق‌تر از پدیده‌های موردمطالعه ارائه می‌دهند. با توجه به رفتار غیرخطی سیستم‌های سازه‌یی و لرزه‌یی در هنگام تغییرشکل‌های غیرکشسان و بارگذاری چرخه‌یی ناشی از زلزله، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، که قادر به یادگیری این روابط غیرخطی از داده‌ها هستند و نیازی به فرم‌های مدل از پیش تعریف‌شده ندارند، می‌تواند مدل‌هایی با دقت بالاتر را نسبت به تجزیه و تحلیل رگرسیونی سنتی، که بر فرضیات خطی استوار است، ارائه دهد.

در حالی که پیشرفت‌های اخیر در هوش محاسباتی، روش‌های مذکور را برای حل مسائل چالش‌برانگیز در علم و مهندسی مناسب ساخته است، روش‌های مرسوم مانند تحلیل رگرسیون به دلیل محدودیت‌های خود در مدل‌سازی دقیق پدیده‌های پیچیده و غیرخطی، اغلب نتوانسته‌اند در مواجهه با مسائل دنیای واقعی که پر از داده‌های غیرخطی و تعاملات پیچیده بین متغیرها هستند، عملکرد قابل قبولی ارائه دهند.[۱۳]

همان‌طور که هوش محاسباتی به‌طور فزاینده‌یی در زندگی روزمره‌ی ما رایج می‌شود، الگوریتم‌ها و روش‌های جدید به‌طور مداوم در حال توسعه برای بهبود بهره‌وری و دقت در یادگیری ماشین هستند. برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)[1]، یک روش یادگیری ماشینی و بهینه‌سازی براساس اصول ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی است.[۱۵]

GEP با ترکیب اصول برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های ژنتیک توسط کاندا فریرا[۲] (۲۰۰۱)، یک سیستم انعطاف‌پذیر و قوی را توسعه داده است، که بتواند طیف گسترده‌یی از مسائل را در زمینه‌های مختلف حل کند.[۱۶]

در پژوهش حاضر، روش هوش محاسباتی به نام برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی و درنظرگرفتن هر دو ویژگی اصلی سازه و زلزله استفاده شده است. برای رسیدن به هدف مذکور، چند سیستم تک درجه‌ی آزادی (SDOF) با ویژگی‌های سازه‌یی مختلف استفاده شده است، که عبارت‌اند از: دوره‌ی تناوب (T)، نسبت میرایی (ζ)، ضریب کاهش مقاومت (R_u)، ضریب شکل‌پذیری (μ_u)، ثابت شاخص آسیب پارک- انگ (β)، و نسبت سختی پس از تسلیم (α). علاوه‌بر این، برخی از ویژگی‌های زلزله، شامل انواع مختلف خاک براساس سرعت‌های موج برشی خاک متناظر با عمق ۳۰ متر ($V_{s,30}$) و بزرگای (M_w) بیش از ۴ ریشتر و فاصله‌ی سایت تا منبع زلزله (R_{JB}) کمتر از ۱۵ کیلومتر به‌عنوان زلزله‌های نزدیک گسل در ایران در نظر گرفته شده است. سپس طیف آسیب با مدل‌سازی سیستم یک درجه‌ی آزادی (SDOF) محاسبه شده است. درنهایت، یک رابطه‌ی ریاضی ساده‌شده برای تسهیل در اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی سازه‌ها، برای حرکت‌های زمین در ایران، که هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله را در بر می‌گیرد، ارائه شده است. سپس اثربخشی مدل با استفاده از معیار عملکرد شناخته‌شده در مقایسه با مدل‌های دیگر موجود در ادبیات فنی ارزیابی شده است.

۲. طیف آسیب لرزه‌یی

محاسبه‌ی آسیب لرزه‌یی بالقوه در ارزیابی لرزه‌یی مبتنی بر آسیب و طراحی سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز، اهمیت زیادی دارد. درجه‌ی آسیب سازه را می‌توان برای ارزیابی عملکرد سازه و استحکام آن، که پارامترهای کلیدی در تاب‌آوری سازه هستند، استفاده کرد.[۱۷]

شاخص آسیب لرزه‌یی می‌تواند برای تعیین میزان آسیب یک سازه در طول زلزله استفاده شود. مدل‌های آسیب مختلفی در نوشتارها ارائه شده‌اند، که در میان آن‌ها، شاخص آسیب پارک- انگ به‌طور گسترده‌یی برای تعیین کمیت آسیب لرزه‌یی سازه‌ها استفاده شده است؛ که یک ترکیب خطی از بیشینه‌ی تغییرشکل و استهلاک انرژی هیسترتیک یک سازه است (رابطه‌ی ۱):[۱۲]

$$DI = \frac{u_m}{u_y \mu_u} + \beta \frac{E_H}{u_m \mu_u f_y} \qquad (۱)$$

که در آن، u_m بیشینه‌ی تغییرشکل در طول زلزله، u_y تغییرشکل تسلیم، μ_u ضریب شکل‌پذیری، و f_y مقاومت تسلیم هستند. همچنین، E_H انرژی هیسترتیک تجمعی در پایان یک زلزله و β یک ثابت تجربی مثبت است، که به ویژگی‌های سازه‌یی وابسته است و نشان می‌دهد که به چه اندازه، انرژی هیسترتیک در سازه جذب می‌شود و به نرخ آسیب از طریق انرژی هیسترتیک کمک می‌کند. پارامتر ثابت β معمولاً با مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۳در نظر گرفته می‌شود، که براساس تجربیات پژوهش‌های پیشین و آزمایش‌های میدانی تعیین شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ارائه شده است، پارک و همکارانش (۱۹۸۷)،[۱۸] شاخص آسیب کلی را برای حالت‌های مختلف آسیب مشاهده‌شده تنظیم کرده‌اند. آسیب لرزه‌یی می‌تواند برای طیف وسیعی از سازه‌ها با محاسبه‌ی طیف آسیب لرزه‌یی تخمین زده شود.

طیف آسیب را می‌توان به‌صورت تابعی از پارمترهای لرزه‌یی و به صورت رابطه‌ی ۲ نوشت:

$$S_{DI} = f\left(M_w, R_{JB}, V_{s,30}, \zeta, R_u, \mu_u, \beta, \alpha, T\right) \qquad (۲)$$

جدول ۱. طبقه‌بندی آسیب یا خرابی شاخص پارک- انگ.[۱۸]

مشاهده‌ها	شاخص آسیب (DI)	آسیب یا خرابی	نوع خرابی
وقوع پراکنده‌ی ترک‌خوردگی	۰ < DI < ۰/۱	خسارت پراکنده‌ی کم	Slight
ترک‌های جزئی؛ خردشدن جزئی از بتن در ستون	۰/۱ < DI < ۰/۲۵	خسارت جزئی	Minor
ترک‌های بزرگ گسترده؛ پوسته‌پوسته‌شدن بتن در عناصر ضعیف‌تر	۰/۲۵ < DI < ۰/۴	متوسط	Moderate
خردشدن بتن؛ نمایان‌شدن میلگردها؛ خسارت شدید	۰/۴ < DI < ۱	شدید	Severe
فروپاشی کامل	۱ ≤ DI	انهدام	Collapse

[۱] Gene Expression Programming

[۲] Candida Ferreira

جدول ۲. متغیرهای طیف آسیب.

توصیف پارامتر	پارامتر
بزرگای زلزله	M_w
فاصله‌ی سایت تا منبع زلزله، فاصله‌ی رومرکزی	R_{JB}
سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر	$V_{s,30}$
نسبت میرایی	ζ
ضریب کاهش مقاومت	R_u
ضریب شکل‌پذیری	μ_u
ثابت شاخص آسیب پارک- انگ	β
نسبت سختی پس از تسلیم	α
زمان تناوب	T
طیف آسیب لرزه‌یی	S_{DI}

معادله‌ی اخیر نشان می‌دهد که آسیب طیفی (S_{DI}) به متغیرهای بررسی‌شده در جدول ۲ وابسته است، متغیرهای بیان‌شده در جدول ۲ از مطالعات پیشین، که در این زمینه انجام شده‌اند، تعیین شده‌اند.[۷، ۹، و ۱۲] پارامترهای مذکور به عنوان ورودی‌هایی در مدل‌های محاسباتی، که در پژوهش حاضر توسعه یافته‌اند، استفاده شده‌اند. هدف از انتخاب آن‌ها برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی، درنظرگرفتن مهم‌ترین ویژگی‌های مربوط به سازه و زلزله است، که در آسیب‌های لرزه‌یی وارد بر سازه‌ها تأثیرگذار هستند.

در جدول ۲، ضریب اصلاح پاسخ (معروف به R-factor) با استفاده از رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود:[۱۴]

$$R_u = \frac{mS_a}{f_y} \qquad (۳)$$

که در آن، m جرم لرزه‌یی سازه‌ی موردنظر و S_a شتاب طیفی کشسان است.

۳. روش‌های هوش محاسباتی

هوش محاسباتی، یک رشته از علوم کامپیوتر است، که به بررسی و تحلیل روش‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که به ماشین‌ها و سیستم‌های کامپیوتری امکان فهمیدن، یادگیری، تصمیم‌گیری، و ارتباط با محیط را می‌دهد. هدف اصلی هوش محاسباتی، تقویت قابلیت‌های هوش مصنوعی و سیستم‌های طبیعی است، تا بتوانند با مسائل پیچیده و متنوع، که در دنیای واقعی وجود دارند، بهبود یابند و پاسخگو باشند. این زمینه اغلب برای توسعه‌ی الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که می‌توانند مسائل پیچیده را یاد بگیرند، حل کنند، و فرآیندهای تصمیم‌گیری انسانی را تقلید کنند. الگوریتم‌های ژنتیکی، یکی از روش‌های هوش محاسباتی است که از فرآیند انتخاب طبیعی الهام می‌گیرند و بهینه‌سازی‌هایی هستند که از اصول تکاملی برای یافتن بهترین راه‌حل برای یک مسئله استفاده می‌کنند.[۲۴] پیشرفت‌های اخیر در روش‌های هوش محاسباتی، آن‌ها را برای حل مشکلات چالش‌برانگیز در علم مهندسی مناسب ساخته است. در مطالعه‌ی حاضر، روش برنامه‌نویسی بیان ژن(GEP) برای مطالعه‌ی موردی در زمینه‌ی مهندسی سازه و زلزله استفاده و نتایج آن ارائه، ارزیابی، و مقایسه شده است.

GEP یکی از روش‌های پیش‌بینی و الگوریتم یادگیری است، که در ادامه و بهبود برنامه‌نویسی ژنتیک(GP)[1] ارائه شده است. برنامه‌نویسی ژنتیک (GP)به‌عنوان یک روش استاندارد و توسعه‌یافته شناخته شده است، که شامل زیرمجموعه‌هایی مانند برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و برنامه‌نویسی ژنتیکی چندژنی (MGGP) است. GEP در دسته‌ی الگوریتم‌های محاسباتی تکاملی قرار دارد، و روشی است که معمولاً برای توسعه‌ی مدل‌های ریاضی غیرخطی برای حل مسائل پیچیده به‌کار می‌رود.[۱۵]

بهینه‌سازی یک راه‌حل مبتنی بر GEP معمولاً شامل یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است، که در آن کروموزوم‌های چندگانه به‌صورت موازی در طول چند نسل تکامل یافته‌اند. بهترین کروموزوم‌ها برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند و عملگرهای ژنتیکی برای تولید فرزند جدید به‌کار می‌روند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که یک راه‌حل رضایت‌بخش یافت شود، که معمولاً برای ارزیابی تناسب یک ژن، GEP از یک تابع برازندگی استفاده می‌کند تا میزان عملکرد ژن را به‌خوبی اندازه‌گیری کند.[۱۶] تابع برازندگی می‌تواند توسط کاربر تعریف یا به‌طور خودکار توسط سیستم انتخاب شود.

الگوریتم GEP-RNC[2]، که توسط کاندا فریرا توسعه یافته است، یک نسخه‌ی طراحی‌شده پیشرفته از GEP برای مدیریت مؤثرتر ثابت‌های عددی است، که با ادغام یک دامنه‌ی خاص در رمزگذاری ژنتیکی به‌منظور تکامل ثابت‌های عددی مناسب‌تر، کارایی در مدل‌سازی و دقت حل مسائل پیچیده را افزایش می‌دهد.[۲۳] در پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم GEP-RNC به‌منظور بهبود دقت و کارایی مدل‌های ریاضی استخراج‌شده از طیف‌های آسیب، توانایی پیش‌بینی آسیب‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است. در شکل ۱، فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP مشاهده می‌شود.

۴. پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی

۱.۴. پایگاه داده‌ی دقیق

خواص سازه‌یی و جنبش نیرومند زمین می‌تواند تا حد زیادی در واکنش‌های غیرارتجاعی یک سیستم یک درجه‌ی آزادی (SDOF) تأثیر بگذارد. در پژوهش حاضر، خواص مذکور، که اغلب برای ارزیابی خسارت لرزه‌یی سازه‌ها استفاده می‌شوند، به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل‌های پیش‌بینی استفاده و مفصلاً در زیربخش‌های بعدی توصیف شده‌اند.

۲.۴. سیستم‌های غیرارتجاعی (SDOF)

در سیستم‌های غیرارتجاعی SDOF از پارامترهای در نظر گرفته‌شده در جدول ۳ برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی (S_{DI}) در سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزادی غیرارتجاعی (SDOF) براساس ترکیبی از دیدگاه‌های نظری، داده‌های تجربی، و الزام‌های مهندسی کاربردی و بر پایه‌ی مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند. انتخاب هر پارامتر و دامنه‌ی مقادیر آن، نقش کلیدی

[۱] Genetic Programming

[۲] GEP with Random Numerical Constants

شکل ۱. فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP.[۱۶]

جدول ۳. متغیرهای استفاده‌شده در تحلیل سیستم یک درجه‌ی آزادی.

پارامتر	مقادیر مورد استفاده		
M_w	بزرگای زلزله		
R_{JB}	فاصله سایت ثبت زلزله تا منبع زلزله		
$V_{s,30}$	سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر در خاک		
ζ	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۱
R_u	۲	۴	۶
μ_u	۶	۸	۱۰
β	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۳
α	۰	۰.۰۵	۰.۱
T	۰.۱،۰.۲،۰.۳، ...،۴		

در مدل‌سازی رفتار سازه‌ها تحت تأثیر بارهای زلزله در ارزیابی آسیب‌پذیری احتمالی آن‌ها دارد. محدوده‌ی زمانی مطالعه‌شده‌ی دوره‌ی تناوب برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی بین ۰/۱ تا ۴ ثانیه با گام ۰/۱ثانیه بوده است.

۳.۴. زمین‌لرزه

سه عامل بزرگا، فاصله‌ی سایت ثبت زلزله تا منبع زمین‌لرزه، و سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر در خاک، سه متغیر استفاده‌شده برای رکوردهای زلزله هستند. براساس سرعت‌های موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر ($V_{s,30}$) بیش از ۷۵۰، ۷۵۰ - ۳۷۵، ۳۷۵ - ۱۷۵، و کمتر از ۱۷۵ به ترتیب چهار نوع خاک (S_1، S_2، S_3، و S_4) برای رکوردهای استفاده‌شده در نظر گرفته شده است. انواع خاک (S_1، S_2، S_3، و S_4) به ترتیب با لایه‌بندی زمین، سنگ و شبه‌سنگ، خاک خیلی متراکم یا سنگ سُست، خاک متراکم تا متوسط، و خاک متوسط تا نرم براساس استاندارد ۲۸۰۰ مطابقت دارند. در پژوهش حاضر، به‌دلیل عدم دسترسی به رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل در خاک S_4، خاک S_4 در ارزیابی طیف آسیب در نظر گرفته نشده است.

برای درنظرگرفتن فاصله‌ی سایت تا منبع، از رکوردهای دارای فاصله‌ی رومرکزی در محدوده‌ی کمتر از ۱۵ کیلومتر استفاده شده است (به‌عنوان رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل شناخته می‌شوند). همه‌ی رکوردها با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴ متناظر هستند. برای انتخاب رکوردها از پایگاه داده‌ی مرکز تحقیقات راه، مسکن، و شهرسازی و شبکه‌ی شتاب‌نگاری آن مطابق جدول ۴ استفاده شده است.[۲۰] درنهایت، آسیب ناشی از زلزله برای یک مؤلفه‌ی مشخص حرکت زمین، از طریق به‌کارگیری یک روند معلوم، شامل مدل‌سازی سیستم‌های خطی و غیرخطی SDOF (یک درجه‌ی آزادی) برای تحلیل حرکت‌های لرزه‌یی با ویژگی‌های خاص محاسبه شده است. پس از مدل‌سازی، پاسخ سیستم‌ها به حرکت‌های زلزله با استفاده از روش تحلیل گام به گام زمانی نیومارک، در دوره‌های تناوب مشخص و میزان میرایی خاص معین شده است. در مرحله‌ی بعدی، انرژی تلف‌شده به همراه پارامترهای مدنظر با استفاده از فرمول‌های فصل ۷ کتاب دینامیک سازه‌های چوپرا به‌دست آمده است.[۱۴] سپس آسیب ناشی از زلزله با استفاده از شاخص آسیب پارک- انگ برای سیستم‌های SDOF با ویژگی‌های تعیین‌شده محاسبه شده است. به‌منظور ارزیابی کامل تحلیل اخیر، یک پایگاه داده‌ی دقیق از طیف آسیب با درنظرگرفتن ویژگی‌های سازه‌یی و زلزله، تهیه و یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای سهولت در اندازه‌گیری طیف آسیب بالقوه‌ی لرزه‌یی (S_{DI}) سازه‌ها استخراج شده است.

۴.۴. نتایج و ارزیابی طیف آسیب

در بخش حاضر، نتایج دقیق شاخص آسیب پارک- انگ (DI)، که در محاسبه‌ی آسیب طیفی (S_{DI}) در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند، ارائه شده است. آسیب طیفی (S_{DI})، در واقع میزان شاخص آسیب پارک- انگ (DI) در سازه‌های یک درجه‌ی آزادی را بر حسب دوره‌ی تناوب نشان می‌دهد. همچنین آثار متغیرهای R_u، μ_u، ζ، α، و β و نوع خاک بر روی آسیب طیفی (S_{DI}) (که مقادیر $S_{DI} \geq 1$ مربوط به فروریختن کامل ساختمان است)، آسیب لرزه‌یی سازه‌ها را با ترکیب پارامترهای مربوط به ویژگی‌های سازه‌یی و زلزله بررسی می‌کند. در شکل ۲، طیف آسیب بر حسب تمامی متغیرهای ذکرشده مشاهده می‌شود. متغیرهای استفاده‌شده در طیف آسیب ارائه‌شده، میانگین

جدول ۴. رکوردهای استفاده‌شده در تحلیل سیستم یک درجه‌ی آزادی.

ردیف	شماره‌ی رکورد	استان	نام ایستگاه	سال وقوع زمین لرزه (میلادی)	مختصات ایستگاه ثبت زمین‌لرزه	مختصات مرکز زمین لرزه	بیشینه‌ی شتاب زمین (cm/s^2)	M_w	R_{JB}	$V_{s,30}$	نوع خاک
۱	۲۴۱۴/۰۴	خوزستان	آغاجاری	۲۰۰۰/۱۰/۱۳	۳۰/۷N۴۹/۸۳E	۳۰/۶۷N۴۹/۹E	۷۲۷	۴/۷	۸	۸۵۷	S_1
۲	۱۸۱۴	فارس	میمند	۱۹۹۷/۰۸/۲۴	۲۸/۸N۵۲/۷۵E	۲۸/۷۹N۵۲/۷۶E	۷۰۴	۵	۹	۸۸۱	S_1
۳	۵۸۰۱/۶۹	بوشهر	شنبه	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۲۸/۴N۵۱/۷۶E	۲۸/۳۵N۵۱/۷۴E	۵۶۶	۵/۵	۶	۱۳۹۶	S_1
۴	۴۵۵۲/۰۳	خراسان جنوبی	سده	۲۰۰۸/۰۳/۰۹	۳۳/۳۳N۵۹/۲۴E	۳۳/۳۶N۵۹/۳۵E	۵۵۶	۵/۱	۱۱	۸۵۴	S_1
۵	۵۰۱۶/۰۲	فارس	اشکنان	۲۰۱۰/۰۷/۲۴	۲۷/۲۲N۵۳/۶۱E	۲۷/۱۱N۵۳/۶۵E	۳۹۴	۵/۱	۱۳	۱۰۶۶	S_1
۶	۲۲۲۵/۰۲	خراسان رضوی	صالح‌آباد	۱۹۹۹/۱۱/۰۹	۳۵/۶۹N۶۱/۰۹E	۳۵/۶۸N۶۱/۲۴E	۳۷۳	۸۴	۱۳	۱۴۷۲	S_1
۷	۶۳۰۲/۰۱	ایلام	مورموری	۲۰۱۴/۰۸/۲۰	۳۲/۷۳N۴۷/۶۷E	۳۲/۷N۴۷/۸۲E	۳۴۵	۵/۸	۱۴	۸۹۸	S_1
۸	۳۱۶۸/۰۲	کرمان	بم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۲۹/۰۹N۵۸/۳۵E	۲۹/۰۴N۵۸/۳۳E	۷۷۸	۶/۵	۶	۴۹۹	S_2
۹	۱۸۳۳/۰۲	اردبیل	کریق	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۳۷/۹۲N۴۸/۰۶E	۳۷/۹۹N۴۸/۱۵E	۵۳۶	۶	۱۱	۵۸۹	S_2
۱۰	۵۵۷۹/۰۴	آذربایجان شرقی	ورزقان	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۳۸/۵۱N۴۶/۶۴E	۳۸/۴۵N۴۶/۷۵E	۵۲۰	۶/۲	۱۱	۴۷۵	S_2
۱۱	۷۱۵۰	کرمان	سیرچ	۲۰۱۷/۰۷/۲۳	۳۰/۲N۵۷/۵۶E	۳۰/۰۹N۵۷/۶۲ E	۴۶۱	۵/۳	۱۱	۳۹۸	S_2
۱۲	۷۸۲۹	کرمانشاه	سر پل ذهاب	۲۰۱۸/۰۴/۰۱	۳۴/۴۶N۴۵/۸۷E	۳۴/۳۹N۴۵/۷۵ E	۴۳۵	۵/۲	۱۳	۶۱۹	S_2
۱۳	۴۰۲۷/۰۸	لرستان	چالان چولان	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۳۳/۶۶N۴۸/۹۱E	۳۳/۶۹N۷۵ E	۴۳۱	۵/۹	۹	۴۲۸	S_2
۱۴	۳۲۳۹/۰۱	بوشهر	آباد	۲۰۰۴/۰۳/۰۲	۲۹/۰۲N۵۱/۲۶E	۲۹/۰۱N۵۱/۳۲ E	۴۰۸	۵/۴	۶	۴۸۲	S_2
۱۵	۳۵۵۵/۰۱	کرمان	محمدآباد مسکون	۲۰۰۴/۱۰/۰۶	۲۸/۹۱N۵۷/۸۹E	۲۸/۸۱N۵۷/۹۸ E	۱۱۵	۵/۱	۱۴	۵۰۷	S_2
۱۶	۸۰۴۵	کرمانشاه	تازه آباد ۱	۲۰۱۸/۰۸/۲۵	۳۴/۷۴N۴۶/۱۵E	۳۴/۶۱N۴۶/۱۳ E	۷۷۶	۶	۱۴	۲۸۱	S_3
۱۷	۵۰۰۶	خراسان رضوی	تربت حیدریه	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۳۵/۲۷N۵۹/۲۲E	۳۵/۲۸N۵۹/۲۶ E	۴۲۵	۵/۹	۴	۳۰۶	S_3
۱۸	۲۰۴۹/۰۱	فارس	خنج	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	۲۷/۸۹N۵۳/۴۳ E	۲۷/۸۱N۵۳/۵۳ E	۳۹۶	۵/۲	۱۳	۳۰۸	S_3
۱۹	۹۹۳۳/۱۹	آذربایجان غربی	خوی۱	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	۳۸/۵۵N۴۴/۹۶ E	۳۸/۵۲N۴۴/۹۱ E	۲۸۵	۵/۷	۵	۳۳۳	S_3
۲۰	۱۱۷۶/۰۵	کرمان	گلباف	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	۲۹/۸۸ N۵۷/۷۲ E	۲۹/۹۹ N۵۷/۷۷ E	۲۶۸	۶/۷	۱۳	۳۲۰	S_3

شکل ۲. طیف آسیب برای متغیرهای R_u، μ_u، ζ، α، β و نوع خاک.

شکل ۳. طیف پاسخ شتاب (ζ = ۰/۰۵) برای حرکت‌های زمین‌لرزه.

طیف آسیب همه‌ی متغیرهای دیگر بوده و برای نشان‌دادن تغییرات به‌طور واضح، محور عمودی در یک مقیاس لگاریتمی مرتب شده است.

تغییرات S_{DI} برای سه مقدار R_u برابر با ۲، ۴، و ۶ در شکل ۲- الف مشاهده می‌شود، که مطابق آن طیف آسیب با افزایش R_u برای همه‌ی سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش یافته است. می‌توان گفت که به‌دلیل کاهش f_y، درجه‌های غیرخطی بالاتری در همان سطح شدت زلزله تجربه می‌شود، و خسارت ناشی از آن با افزایش R_u افزایش می‌یابد. تغییرات S_{DI} سازه‌های با R_u، ۲ به ۴ بیشتر از سازه‌های با R_u، ۴ به ۶ است .

در شکل ۲-ب، نیز تغییرات سه مقدار μ_u برابر با ۶، ۸، و ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، هنگامی که ضریب شکل‌پذیری افزایش یافته است، ظرفیت مدل برای تغییرشکل‌های غیرارتجاعی نسبت به بیشینه‌ی تغییرشکل تحت حرکت زمین، افزایش و در نتیجه آسیب طیفی کاهش یافته است؛ زیرا سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییرشکل و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود.

در شکل ۲- پ، نیز اثر نسبت میرایی (R_u) سیستم‌ها SDOF در S_{DI} بحث شده است. سه مقدار ۰/۰۲، ۰/۰۵، و ۰/۱ برای نسبت میرایی در نظر گرفته شده است، که مقادیر رایج استفاده‌شده در تحلیل سازه‌های مهندسی هستند. یک رابطه‌ی واضح بین آن‌ها این است که S_{DI} با افزایش نسبت میرایی (ζ) افزایش یافته است. این اثر دقیقاً مطابق با نتایج ژای و همکاران (۲۰۱۳)،[۷] تأیید شده است؛ که در آن، افزایش نسبت میرایی سبب کاهش شتاب طیفی (S_a) و در یک R_u مشخص، مطابق با معادله‌ی ۳ شده و f_y سیستم SDOF کاهش یافته است، که منجر به افزایش آسیب شده است. مطابق شکل ۲- پ، نیز تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی در S_{DI} با افزایش دوره‌ی تناوب سازه کاهش یافته است. علاوه‌بر این، با افزایش نسبت میرایی، طیف بیشتری از سازه‌های با دوره‌ی تناوب کوچک، وضعیت فروپاشی را تجربه می‌کنند.

در پژوهش حاضر، آثار نسبت سختی پس از تسلیم رفتار هیسترتیک دو خطی α سیستم‌های SDOF در S_{DI} مطالعه شده است، که برابر با سختی پس از تسلیم مدل دو خطی به مدل اولیه است. سه مقدار ۰، ۰/۰۵، و ۰/۱ برای α در نظر گرفته شده‌اند. طیف آسیب برای مقادیر مختلف α در شکل ۲- ت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نسبت سخت‌شوندگی بیشتر منجر به این شده است که سازه آسیب کمتری از خود نشان دهد. با درنظرگرفتن ۰/۰۵ به‌عنوان نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به‌طور قابل‌توجهی کاهش و با افزایش α از ۰/۰۵ به ۰/۱، آسیب طیفی تا حدودی کاهش یافته است.

β، یک ثابت مثبت برای ترکیب دو عبارت شاخص آسیب پارک- انگ استفاده است، که در آن بخشی از انرژی هیسترتیک مشارکت دارد.

مقادیر متعددی برای β پیشنهاد شده‌اند، که در محدوده‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۳ رایج هستند. در شکل۲- ث، تغییر S_{DI} نسبت به β مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، S_{DI} با افزایش β افزایش یافته است.

آثار نوع خاک (S_1، S_2، و S_3) نیز در شکل۲ - ج مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تأثیر نوع خاک در S_{DI} به اندازه‌ی دیگر پارامترهای ذکرشده قابل توجه نیست. به‌طورکلی، طیف آسیب S_{DI} برای خاک S_3، بیشتر از خاک S_2، و طیف آسیب برای خاک S_2 بیشتر از خاک S_1 بوده است. قابل ذکر است به دلیل نبود رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل در خاک S_4، خاک موردنظر در ارزیابی طیف آسیب در پژوهش حاضر در نظر گرفته نشده است.

۵.۴. توسعه‌ی مدل با استفاده از الگوریتم بیان ژن (GEP)

فرآیند کلی توسعه‌ی یک مدل با استفاده از GEP شامل این مراحل است:[۱۶]

جدول ۵. توابع استفاده‌شده در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP).

تعریف	Arity	وزن	نماد	توابع
(x+y)	۲	۴	+	Addition
(x-y)	۲	۴	-	Subtraction
(x*y)	۲	۴	*	Multiplication
(x/y)	۲	۴	/	Division
exp(x)	۱	۱	Exp	Exponential
ln(x)	۱	۱	Ln	Natural logarithm
tanh(x)	۱	۲	Tanh	Hyperbolic tangent
(۱-x)	۱	۱	NOT	Complement
۱/x	۱	۱	Inv	Inverse
pow(x,y)	۲	۳	Pow	Power
sqrt(x)	۱	۱	Sqrt	Square root
log(x)	۱	۱	Log	Logarithm of base ۱۰
-x	۱	۱	Neg	Negation
x	۱	۱	Nop	No operation
x^۲	۱	۱	X۲	x to the power of ۲
x^۳	۱	۱	X۳	x to the power of ۳
x^۴	۱	۱	X۴	x to the power of ۴

۱. تعریف مسئله: اولین گام در توسعه‌ی یک مدل با استفاده از GEP، تعریف دقیق مسئله‌ی طیف آسیب و تعیین نوع داده‌هایی است که در محاسبه‌ی طیف آسیب برای تجزیه و تحلیل در دسترس هستند؛ که در پژوهش حاضر، شامل داده‌های سازه‌یی و لرزه‌یی یعنی متغیرهای اشاره‌شده در جدول ۴ است.

۲. ایجاد خزانه‌یی از عملگرها و توابع: یک مجموعه از عملگرها و توابع مرتبط با مهندسی سازه و زلزله تعریف می‌شود، که می‌توانند در فرآیند توسعه‌ی مدل استفاده شوند. این مجموعه می‌تواند شامل توابع در نظر گرفته‌شده در جدول ۵ و سایر توابع و یا عملگرهای دیگر باشد، که جدول مذکور، نشانگر توابع استفاده‌شده در نوشتار حاضر است.

۳. تولید مجموعه‌ی مدل‌ها: با استفاده از مجموعه‌ی تعریف‌شده از عملگرها و توابع، یک مجموعه مدل اولیه از مدل‌های ممکن تولید می‌شود. این مدل‌ها با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی و براساس یک تابع برازندگی که عملکرد آن‌ها را در مدل‌سازی آسیب‌های سازه‌یی ارزیابی می‌کند، ایجاد می‌شوند. تابع برازندگی استفاده‌شده در نوشتار حاضر مطابق معادله‌ی ۴ است.

۴. تکامل مجموعه‌ی مدل‌ها: مجموعه‌ی مدل‌ها از طریق استفاده از اپراتورهای ژنتیکی تقاطع، جهش، و انتخاب، در طول چندین نسل تکامل می‌یابد. این فرآیند به بهبود مداوم مدل‌ها و نزدیک‌شدن به یک راه‌حل بهینه برای مدل مدنظر کمک می‌کند. در نوشتار حاضر، از هر سه اپراتور ژنتیکی قطع، جهش، و انتخاب استفاده شده است.

۵. ارزیابی و انتخاب مدل‌ها: پس از تکامل مجموعه‌ی مدل‌ها، مدل مدنظر براساس تابع برازندگی و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی دقیق آسیب‌های سازه‌یی، ارزیابی و انتخاب می‌شوند.

۶. اعتبارسنجی مدل: مدل نهایی با استفاده از داده‌های مستقل اعتبارسنجی می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که به‌طور مؤثری آسیب‌پذیری سازه‌ها را در برابر زلزله پیش‌بینی می‌کند.

۶.۴. دقت مدل

شایان ذکر است که تمام مدل‌ها می‌توانند در محدوده‌ی داده‌های واقعی استفاده‌شده برای تولید مدل معتبر باشند. در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)، پارامترهای موردنظر با بیشترین برازندگی (Best Fitness) و ضریب تعیین (R^2) برای ارزیابی و کنترل دقت مدل ریاضی تولیدشده استفاده می‌شود. بهترین تناسب به بالاترین امتیاز کسب‌شده توسط مدل در یک نسل خاص از GEP اشاره دارد. این امتیاز براساس تابع برازندگی استفاده شده است، که میزان تناسب مدل با داده‌های آموزشی را اندازه‌گیری می‌کند. تابع برازندگی می‌تواند بسته به مسئله‌ی حل‌شده متفاوت باشد، اما معمولاً تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده را اندازه می‌گیرد. در پژوهش حاضر، ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE) به عنوان تابع برازندگی به صورت رابطه‌ی ۴ استفاده شده است:[۱۹]

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(e_i - p_i)^2}{n}} \qquad (۴)$$

که در آن، p_i و e_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده و خروجی دقیق برای iاُمین خروجی هستند و n تعداد نمونه‌هاست.

R^2 به‌عنوان ضریب تعیین شناخته می‌شود، که در واقع ضریب همبستگی R به توان ۲ است، و از یک شاخص بی‌بُعد تشکیل شده است که از ۰ تا ۱ متغیر است و میزان رابطه‌ی خطی بین دو متغیر را منعکس می‌کند، که مقادیر بالاتر، نشان‌دهنده‌ی تناسب بهتر است.

ضریب همبستگی توسط معادله‌ی ۵ ارزیابی می‌شود. برای یک بررسی دقیق‌تر، ضریب R^2 در پژوهش حاضر استفاده شده است:[۱۹]

$$R_i = \frac{n\sum_{j=1}^{n}(T_j P_{ij}) - \left[\sum_{j=1}^{n} T_j\right]\left[\sum_{j=1}^{n} P_{ij}\right]}{\sqrt{\left[n\sum_{j=1}^{n} T_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} T_j\right)^2\right]\left[n\sum_{j=1}^{n} P_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} P_{ij}\right)^2\right]}} \qquad (۵)$$

که در آن، P_{ij} مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل i برای نمونه‌ی j، T_j مقدار واقعی نمونه‌ی j و n تعداد نمونه‌هاست.

۵. نتایج پژوهش

۱.۵. مدل پیش‌بینی GEP

تنظیم‌های پارامتر استفاده‌شده برای برنامه‌نویسی بیان ژن به مسئله‌ی خاص بررسی‌شده و ویژگی‌های مجموعه‌ی داده‌ی استفاده‌شده بستگی دارد. مقادیر

مذکور براساس تجربه‌ی نویسندگان و پیشنهادهای موجود در برخی نوشتارها،[۱۹ و ۱۶] ارائه و در پژوهش حاضر استفاده شده است.

مجموعه‌یی از توابع در نظر گرفته‌شده، در پژوهش حاضر، در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) در جدول ۵ ارائه شد است.

مدل ریاضی به‌دست‌آمده با برنامه‌نویسی بیان ژن برای S_{DI} به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود، که برای به‌دست‌آوردن طیف آسیب براساس پارامترهای موردنظر استفاده می‌شود:

$$\mathrm{Log}\,(S_{DI}) = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 \qquad (۶)$$

که در آن، مقادیر G_1، G_2،G_3،G_4،G_5، و G_6 مطابق روابط ۷ الی ۱۲ محاسبه می‌شوند:

$$G_1 = \tanh\left[R_1 R_u T^{\left[(R_2)^{R_u} + \ln R_u\right]}\right] \qquad (۷)$$

$$G_2 = \left[\exp\left[\left(\tanh\left(R_3\beta\right) - \frac{\mu_u}{R_4 R_u}\right)\times\alpha\right]\right]^4 \qquad (۸)$$

$$G_3 = \tanh\left[\tanh\left[\left(\frac{T}{(R_5-\alpha)R_{JB} - \frac{V_{s,30}}{R_6}}\right)^4\right]\right] \qquad (۹)$$

$$G_4 = \frac{\left[R_7 + \left(\zeta\times R_{JB}\right)\right]\times\alpha^3\times R_8}{M_w} \qquad (۱۰)$$

$$G_5 = \left[\frac{R_{JB}\beta}{R_9}\right]\times\left[\alpha^{R_{10}}\times\frac{M_w}{R_{11}}\right]^{(R_u+M_w)} \qquad (۱۱)$$

$$G_6 = \left[\tanh\left[\tanh\left[\tanh\left(\alpha\times\left(R_u-\alpha\right)\times\left(\ln\zeta + R_{12}\right)\right)\right]\right]\right]^4 \qquad (۱۲)$$

همچنین ضرایب R_1 الی R_{12} مطابق جدول ۶ محاسبه شده‌اند:

در پژوهش حاضر، با هدف استخراج مدل ریاضی، از روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. برای این منظور، ۸۰٪ از داده‌ها به شکل تصادفی جهت آموزش مدل انتخاب شده‌اند، در حالی که ۲۰٪ باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمایشی برای سنجش دقت مدل در نظر گرفته شده‌اند.

در شکل‌های ۴ الی ۶، نمودارهای رگرسیونی برای داده‌های آموزشی و آزمایشی و کل داده‌ها مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، داده‌های پیش‌بینی‌شده به

جدول ۶. ضرایب استفاده‌شده در معادله‌ی طیف آسیب.

نماد	ضرایب	نماد	ضرایب	نماد	ضرایب
R_1	-۳/۶۹۱	R_5	۷/۸۸۳	R_9	۲۲۱/۴۴۴
R_2	۰/۵۵۳	R_6	۳/۳۷۸	R_{10}	۵/۶۶e-۳۱
R_3	۵/۷۴۲	R_7	۷/۱۱۴	R_{11}	۵/۲۱۸
R_4	۰/۷۴۲۵	R_8	۱۱۱/۲۱۵	R_{12}	۸/۳۰۲

شکل ۴. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم S_{DI} در مقابل مدل پیش‌بینی‌شده با استفاده از الگوریتم GEP برای داده‌های آموزشی.

شکل ۵. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم S_{DI} در مقابل مدل پیش‌بینی‌شده با استفاده از الگوریتم GEP برای داده‌های آزمایشی.

شکل ۶. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتمS_{DI} در مقابل مدل پیش‌بینی‌شده با استفاده از الگوریتم GEP برای کل داده‌ها.

خوبی در خط با زاویه‌ی ۴۵ درجه متمرکز شده‌اند. علاوه‌بر این، نتایج R^2 بر روی شکل به ترتیب برابر با ۰/۹۱۷، ۰/۸۹۵ و ۰/۹۰۵ برای مجموعه‌ی داده‌های آموزشی، آزمایشی، و کل داده‌هاست، که نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوب آن‌ها با داده‌های هدف است.

۲.۵. مقایسه‌ی طیف آسیب

مقایسه‌ی طیف آسیب محاسبه‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۶ با نتایج تحلیلی در پژوهش حاضر برای حرکت‌های زمین در شکل‌های ۷ الی ۱۱ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، به‌طورکلی، معادله‌ی ساده‌شده‌ی پیشنهادی، تخمین‌های خوبی از طیف آسیب ارائه می‌دهد.

۳.۵. مقایسه با مدل‌های مختلف طیف آسیب

در بخش‌های قبلی، دقت مدل ریاضی پیش‌بینی‌شده توسط برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و مقایسه‌ی طیف آسیب محاسبه‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۶ با نتایج تحلیلی بررسی شده است. در اینجا، به‌منظور مقایسه‌ی مدل‌های

شکل ۷. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر R_u.

شکل ۸. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر ζ.

شکل ۹. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر μ_u.

شکل ۱۰. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر β.

شکل ۱۱. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر α.

جدول ۷. ضرایب استفاده‌شده در مدل پیشنهادی ژای و همکاران (۲۰۱۳)[۷].

نوع خاک	ضرایب		
	b_1	b_2	b_3
S_1	۰/۰۸	۰/۰۲	۱/۲۵
S_2	۰/۰۹	۰/۰۴	۱/۲
S_3	۰/۰۹	۰/۰۵	۱/۱
S_4	۰/۰۸	۰/۱	۱/۱۸

جدول ۸. ضرایب استفاده‌شده در مدل پیشنهادی قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)[۱۲].

نوع خاک	ضرایب				
	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
S_1	۰/۱۳۰۲۷۵	۵/۸۳۲۱۲۳	۰/۰۰۰۴۹۲	۰/۰۰۲۹۷۸	۰/۰۳۵۶۲۲
S_2	۰/۱۱۱۰۱۱	۶/۲۱۶۵۸۷	۰/۰۰۰۳۶۶	۰/۰۰۲۰۴۶	۰/۰۲۶۳۵۵
S_3	۰/۰۹۵۵۲۱	۶/۳۶۶۱۱۲	۰/۰۰۰۳۲۹	۰/۰۰۱۶۳۴	۰/۰۲۴۲۲۲
S_4	۰/۰۹۰۱۶۸	۶/۸۷۵۴۳۷	۰/۰۰۰۸۷۶	۰/۰۰۶۶۱۱	۰/۰۵۶۸۷۶

توسعه‌یافته توسط برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) با دو مدل ارائه‌شده در نوشتارها، که مدل اول مرتبط توسط ژای و همکاران (۲۰۱۳)،[۷] و مدل دوم توسط قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)،[۱۲]، که مدل‌های توسعه‌یافته با استفاده از روش برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی (MGGP) را به‌دست آورده‌اند، پیشنهاد شده است؛ که در آن‌ها، ضرایب بسته به نوع خاک بوده و سایر پارامترها با توجه به نوع ویژگی‌های سازه و زلزله تعریف شده‌اند. مقادیر پیشنهادی برای ضرایب متناظر با هر نوع خاک در جدول‌های ۷ و ۸ فهرست شده‌اند.

۵.۳.۱. مدل پیشنهادی ژای و همکاران (رابطه‌ی ۱۳).[۷]

$$S_{DI.Zhai\ et\ al} = \frac{1}{\mu_u} + \left(b_1 + \frac{b_2}{T^{1.5}}\right)\left(R_u - 1\right)^{b_3} \frac{10}{\mu_u} \qquad (۱۳)$$

که در آن، ضرایب b_1 الی b_3، براساس نوع خاک در جدول ۷ ارائه شده‌اند:

۵.۳.۲. مدل پیشنهادی قره باغی و گندمی (رابطه‌ی ۱۴).[۱۲]

$$S_{DI.Gh.G} = c_0 + c_1 G_1 + c_2 G_2 + c_3 G_3 + c_4 G_4 \qquad (۱۴)$$

که در آن، ضرایب G_1 الی G_4 مطابق روابط ۱۵ الی ۱۸ محاسبه می‌شوند و ضرایب C_0 الی C_4 براساس نوع خاک در جدول ۸ ارائه شده‌اند:

$$G_1 = \frac{\beta + \sqrt{\zeta}}{\mu_u + 2\alpha}\left(\ln R_u\right)^2 \qquad (۱۴)$$

$$G_2 = \frac{R_u^2}{\left(\mu_u + \zeta + 6.398\right)T^4} \qquad (۱۵)$$

$$G_3 = -\frac{R_u^2 \tanh\left(\alpha\right)}{T^3} \qquad (۱۶)$$

$$G_4 = \frac{\beta R_u^3}{\mu_u T^2} \qquad (۱۷)$$

برای درک بهتر، یک مقایسه‌ی گرافیکی برای نشان‌دادن روند تغییر مدل‌های پیش‌بینی‌شده با استفاده از GEP با مدل‌های پیشنهادی ژای و همکاران (۲۰۱۳) و پیشنهادی قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)، و نتایج دقیق انجام شده است. برای این منظور، متغیرهای ورودی برابر با $\zeta = 0.02$، $R_u = 6$، $\mu_u = 8$، $\beta = 0.05$ و $\alpha = 0.1$ انتخاب شده‌اند، و S_{DI} با توجه به نوع خاک (S_1، S_2، و S_3) در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن، نمودارهای

شکل ۱۲. نمودارهای S_{DI} مربوط به مدل‌های GEP، ژای و همکاران، و قره‌باغی و گندمی، و نتایج دقیق است (S_1، S_2، و S_3).

جدول ۹. نتایج معیار عملکرد R^2 برای مدل‌ها براساس نوع خاک.

نوع خاک	معیار عملکرد	GEP	مدل قره‌باغی و گندمی	مدل ژای و همکاران
S_1	R^2	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۶۷
S_2	R^2	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۷۲
S_3	R^2	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۹

دقیق و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های GEP، ژای و همکاران (۲۰۱۳)، و قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های مذکور، منحنی‌های طیف آسیب در تمام نمودارها، روند نزولی را نشان می‌دهد. با توجه به متغیرهای در نظر گرفته‌شده برای حوزه‌ی نزدیک به گسل، مدل ژای و همکاران، مقادیر بیشتری از آسیب را به نمایش گذاشته است، و در این حالت با توجه به شکل ۱۲ و جدول ۹، مدل GEP نزدیک به مدل قره‌باغی و گندمی است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مدل GEP برای زمان‌های تناوب بزرگ‌تر مقادیری بیشتر از مدل قره‌باغی و گندمی نسبت به زمان تناوب‌های کوتاه‌تر به نمایش گذاشته است.

۶. نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های ایران بوده است. از طریق مطالعه و بررسی طیف آسیب لرزه‌یی، تلاش شده است تا درک عمیق‌تری از آسیب سازه‌یی در زلزله‌های نزدیک به گسل به‌دست آورده شود. در بخش کنونی، نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مطالعات صورت‌گرفته ارائه و تأثیر آن‌ها در ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی بحث شده است.

- نتایج نشان داده‌اند که پارامترهای سازه‌یی و زلزله در طیف آسیب لرزه‌یی تأثیرگذار هستند و ضریب کاهش مقاومت و ضریب شکل‌پذیری، بیشترین تأثیر را در طیف آسیب سازه‌ها دارند.

- تغییرات طیف آسیب (S_{DI}) با افزایش R_u برای همه‌ی سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش یافته است. می‌توان گفت که به‌دلیل کاهش f_y ، درجه‌های غیرخطی بالاتری در همان سطح شدت زلزله تجربه می‌شود، و خسارت ناشی از آن با افزایش R_u افزایش می‌یابد. تغییرات طیف آسیب (S_{DI}) نشان داده‌اند زمانی که ضریب شکل‌پذیری (μ_u) افزایش یافته است، ظرفیت مدل برای تغییرشکل‌های غیرارتجاعی نسبت به بیشینه‌ی تغییرشکل تحت حرکت زمین افزایش و در نتیجه آسیب طیفی کاهش یافته است. زیرا سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییرشکل، و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود.

- اثر نسبت میرایی (ζ) در سیستم‌های SDOF در طیف آسیب (S_{DI}) نشان می‌دهد که S_{DI} با افزایش نسبت میرایی (ζ) افزایش یافته است. افزایش نسبت میرایی منجر به کاهش شتاب طیفی (S_a) و در یک R_u مشخص، f_y سیستم SDOF کاهش یافته است، که منجر به افزایش آسیب شده است. تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی در (S_{DI}) با افزایش دوره‌ی تناوب سازه کاهش یافته است.

- آثار نسبت سختی پس از تسلیم (α) سیستم‌هایSDOF برای طیف آسیب مطالعه شده است، که نسبت سخت‌شوندگی بیشتر منجر آسیب کمتر سازه شده است. با درنظرگرفتن نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به‌طور قابل‌توجهی کاهش و با افزایش α ، آسیب طیفی تا حدودی کاهش یافته است.

- β یک ثابت مثبت است که برای ترکیب دو عبارت شاخص آسیب پارک- انگ استفاده می‌شود، و در آن بخشی از انرژی هیسترتیک مشارکت دارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، طیف آسیب (S_{DI}) با افزایش β افزایش یافته است.

- تأثیر نوع خاک (S_1، S_2، و S_3) در S_{DI} به اندازه‌ی دیگر پارامترهای ذکرشده قابل توجه نبوده است. به‌طورکلی، طیف آسیب S_{DI} برای خاک S_3، بیشتر از خاک S_2 و طیف آسیب برای خاک S_2 بیشتر از خاک S_1 بوده است.

- مدل ریاضی استخراج‌شده مبتنی بر GEP، اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی سازه‌ها را عملی‌تر ساخته است. مدل ریاضی پیش‌بینی‌شده دارای برازندگی برابر ۹۲۸/۳۲ و R^2 برابر ۰/۹۱۷ برای داده‌های آموزشی؛ برازندگی ۹۱۹/۴۵، R^2 برابر ۰/۸۹۵ برای داده‌های آزمایشی؛ و برای کل داده‌ها مقدار برازندگی ۹۲۲/۶۵ و R^2 برابر ۰/۹۰۵ بوده است، که برای این تعداد از داده‌های طبیعی و به‌دست‌آمده از زلزله‌های رخداده قابل قبول است.

- مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه‌یی از سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزادی (SDOF) طراحی و توسعه یافته است. این محدودیت، که ناشی از درنظرگرفتن فقط مجموعه‌ی معینی از مقادیر برای پارامترهای سازه‌یی و زلزله‌یی بوده است، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در گستره‌ی کاربردی مدل و دقت نتایج حاصل از آن داشته باشد. علاوه‌بر این، مدل فعلی بر پایه‌ی تحلیل‌های عددی سیستم‌های SDOF بنا شده است.

- به‌منظور توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی، از یک روش هوش محاسباتی، یعنی برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. بررسی و کاربرد سایر روش‌های پیشرفته‌ی هوش محاسباتی می‌تواند به بهبود قابلیت‌های پیش‌بینی مدل کمک کند.

- به‌علت کمبود رکوردهای نزدیک گسل در ایران، فقط از ۲۰ رکورد استفاده شده است. این رکوردهای زمین‌لرزه، باعث تنوع کم پارامترهای لرزه‌یی، از قبیل: بزرگا، فاصله از گسل، و شرایط ساخت‌گاهی شده‌اند. این محدودیت ممکن است بر دقت مدل در پیش‌بینی پاسخ سازه‌ها به زلزله‌هایی که خارج از معیارهای ذکرشده‌ی از پیش‌تعیین‌شده هستند، تأثیر بگذارد.

- علاوه‌بر این، بررسی نتایج مدل اولیه‌ی شاخص آسیب پارک- انگ نشان داد که در برخی موارد، مقادیر طیف آسیب بزرگ‌تر از ۱ بوده‌اند، که از نظر منطقی قابل قبول نیست. در صورت استفاده از نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی پارک- انگ، مقادیر آسیب، به ۱ محدود خواهد شد، که تفسیرپذیری منطقی‌تری خواهد داشت.

- نتایج حاکی از اثربخشی رویکرد استفاده‌شده در دست‌یابی به طیف‌های آسیب دقیق و کارآمد برای سیستم‌های سازه‌یی است، که ارزیابی جامع آسیب را تسهیل می‌بخشد.

پژوهش حاضر در اهمیت حیاتی پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی در ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها در مقابل زلزله تأکید می‌ورزد. با پیش‌بینی دقیق آسیب‌های احتمالی که سازه‌ها ممکن است در طول رویدادهای لرزه‌یی تجربه کنند، می‌توان خطرهای مرتبط با زلزله‌ها را به‌طور مؤثرتری درک کرد و کاهش داد.

References- منابع

1. Gharehbaghi, S., 2018. Damage Controlled Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Framed Structures. *Structural Engineering and Mechanics*, *65* (1), pp.53-68. https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.1.053
2. Samanta, A., Megawati, K. and Pan, T.C., 2012. Duration-Dependent Inelastic Response Spectra and Effect of Ground Motion Duration. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, pp. 24-28.
3. Teran-Gilmore, A., Sanchez-Badillo, A. and Espinosa-Johnson, M., 2010. Performance-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Ductile Buildings Subjected to Large Energy Demands. *Earthquakes and Structures*, *1* (1), pp.69-92. https://doi.org/10.12989/eas.2010.1.1.069
4. Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., 2003. Damage Spectra: Characteristics and Applications to Seismic Risk Reduction. *Journal of Structural Engineering*, *129* (10), pp.1330-1340. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1330)
5. Kunnath, S.K. and Chai, Y.H., 2004. Cumulative Damage-Based Inelastic Cyclic Demand Spectrum. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *33* (4), pp.499-520. https://doi.org/10.1002/eqe.363
6. Cosenza, E., Manfredi, G. and Polese, M., 2009. Simplified Method to Include Cumulative Damage in the Seismic Response of Single-Degree-of-Freedom Systems. *Journal of Engineering Mechanics*, *135* (10), pp.1081-1088. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:10(1081)
7. Zhai, C.H., Wen, W.P., Chen, Z., Li, S. and Xie, L.L., 2013. Damage Spectra for the Mainshock–Aftershock Sequence-Type Ground Motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *45*, pp.1-12. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.10.001.
8. Greco, R., Marano, G.C. and Fiore, A., 2017. Damage-Based Inelastic Seismic Spectra. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *17* (10), p.1750115. https://doi.org/10.1142/S0219455417501152
9. Park, Y.J. and Ang, A.H.S., 1985. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*, *111* (4), pp.722-739. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722)
10. Wen, W., Ji, D., Zhai, C., Li, X. and Sun, P., 2018. Damage Spectra of the Mainshock-Aftershock Ground Motions at Soft Soil Sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *115*, pp.815-825. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.016
11. Wen, W., Zhai, C. and Ji, D., 2018. Damage Spectra of Global Crustal Seismic Sequences Considering Scaling Issues of Aftershock Ground Motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *47* (10), pp.2076-2093. https://doi.org/10.1002/eqe.3056
12. Gharehbaghi, S., Gandomi, M., Plevris, V. and Gandomi, A.H., 2021. Prediction of Seismic Damage Spectra Using Computational Intelligence Methods. *Computers & Structures*, *253*, p.106584. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106584
13. Gandomi, A.H. and Roke, D.A., 2015. Assessment of Artificial Neural Network and Genetic Programming as Predictive Tools. *Advances in Engineering Software*, *88*, pp.63-72. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.05.007
14. Anil, K., 2020. Chopra Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Fifth Edition in SI Units, pp.276-319
15. Ferreira, C., 2001. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. arXiv preprint cs/0102027. https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027
16. Ferreira, C., 2006. Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence, Vol. 21, Springer.
17. Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A. and Von Winterfeldt, D.,

2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, *19*(4), pp. 733-752. https://doi.org/10.1193/1.1623497

18. Park, Y.J., Ang, A.H. and Wen, Y.K., 1987. Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings. *Earthquake Spectra*, *3*(1), pp. 1-26. https://doi.org/10.1193/1.1585416.
19. Gepsoft, 2014. Fitness Functions for Regression. [online] Available at: http://www.gepsoft.com
20. Road, Housing & Urban Development Research Center and Iran Strong Motion Network, n.d. [online] Available at: https://smd.bhrc.ac.ir/Portal
21. Biglari, M., Hadzima-Nyarko, M. and Formisano, A., 2022. Seismic Damage Index Spectra Considering Site Acceleration Records: The Case Study of a Historical School in Kermanshah. *Buildings*, *12*(10), p. 1736. https://doi.org/10.3390/buildings12101736.
22. Pan, X., Lin, Z., Zhang, L. and Zheng, Z., 2024. Damage Spectra of SDOF Structures Under Tsunami Actions Considering the Nonlinear Dynamic Analysis Method. *Journal of Earthquake and Tsunami*, p. 2350034. https://doi.org/10.1142/S1793431123500343
23. Ferreira, C. and Ferreira, C., 2006. Numerical Constants and the GEP-RNC Algorithm. *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*, pp. 181-232. https://doi.org/10.1007/3-540-32849-1_5
24. Engelbrecht, A.P., 2007. Computational Intelligence: An Introduction. *John Wiley and Sons*, pp. 36-46.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۶۴-۸۴، (پژوهشی)

Original Article

تأثیر بافت اُرتوتروپ ناهمگنی مدفون در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین

سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی (پژوهشگر پسادکتری)
مهدی پنجی* (دانشیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران.
محسن کمالیان (استاد)
پژوهشکده‌ی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

در نوشتار حاضر، به تعیین پاسخ لرزه‌یی سطح زمین در حضور ناهمگنی مدور مدفون اُرتوتروپ در برابر امواج مهاجم قائم SH پرداخته شده است. در تعریف مدل مسئله، از روش اجزاء مرزی نیم‌فضا در حوزه‌ی زمان استفاده شده است، که مش‌بندی با تمرکز بر وجه میانی توسعه یافته است. میرایی تشعشعی و مصالح کاملاً در فرمول‌بندی روش پیشنهادی، به ترتیب به کمک رویکردهای تحلیلی و غیرمستقیم نهادینه شده است. ابتدا روش مذکور به اختصار معرفی و راستی‌آزمایی نتایج حاصل با تحلیل چند مثال کاربردی اعتبارسنجی شده است. سپس در قالب یک مطالعه‌ی عددی، تأثیر برخی پارامترهای اساسی از قبیل نسبت‌شکل ناهمگنی و محتوای بسامدی با تکیه‌ی ویژه بر عامل ایزوتروپی و تأثیر بافت اُرتوتروپی مصالح، حساسیت‌سنجی شده است. درنهایت، پاسخ لرزه‌یی سطح زمین و پیرامون ناهمگنی مدفون به صور مختلف و در حوزه‌ی زمان و بسامد نمایش داده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که بافت اُرتوتروپی ناهمگنی مدفون در سوگیری امواج منتشرشده و متعاقباً برآورد الگوهای بزرگ‌نمایی بسیار مؤثر است.

واژگان کلیدی: روش اجزاء مرزی، نیم‌فضا، حوزه‌ی زمان، اُرتوتروپی مصالح، ناهمگنی مدفون، موج SH.

mojtabazadeh@iauz.ac.ir
m.panji@iauz.ac.ir
kamalian@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

پژوهشگران متعدد از دیرباز به بررسی رفتار لرزه‌یی عوارض توپوگرافی موجود در طبیعت و تأثیر بافت تشکیل‌دهنده‌ی مصالح آن در تغییر الگوی پاسخ پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که الگوی تقویت امواج می‌تواند تا حد زیادی به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و شرایط ناهمسانی و غیرایزوتروپی مصالح تشکیل دهنده‌ی آن وابسته باشد. تاکنون مطالعات قابل‌توجهی،[۱-۵] جهت بررسی اثر ساختگاه در حالت همسان خطی صورت گرفته است. طیف غالب از پژوهش‌های پیشین به مدل‌سازی محیط‌های ایزوتروپ همسان محدود شده است. اما رفتارسنجی واقعی پهنه‌بندی سطوح موجود در طبیعت بیان می‌کند که به دلایل مختلف، چون: اثر ناشی از رسوب‌گذاری، هوازدگی، لایه‌بندی، ناهمگنی زیرسطحی، تورق، و غیره، عوارض توپوگرافی رفتار غیرایزوتروپ از خود نشان می‌دهند.[۶ و ۷] بر این اساس، بشر همواره در تلاش بوده است تا با استفاده از رویکردهای مختلف، درک وسیع و جامعی از رفتار واقعی عوارض زمین کسب کند و آن را در راستای گسترش آئین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌یی موجود در حوزه‌های مختلف مهندسی به کار بندد.[۸] اگرچه برخی مطالعات در ادبیات موضوع توانسته‌اند دیدگاه مناسبی از رفتار لرزه‌یی زمین ارائه کنند، اما همچنان تفاوت قابل ملاحظه‌یی میان رفتار حقیقی ناهمسانی سطحی/ زیرسطحی در برابر امواج مهاجم لرزه‌یی در مقایسه با پاسخ‌های حاصل از مدل‌های عددی وجود دارد. به‌منظور ارائه‌ی یک طرح قابل قبول و به دور از هرگونه تقریب ناشی از مدل‌سازی، شناخت و شبیه‌سازی مطلوب مسئله‌ی پراکنش موج با درنظرگرفتن ناهمسانگردی محیط بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب رویکردهای مدل‌سازی و تحلیل دو/ سه بُعدی مسائل انتشار امواج و به‌طورکاربردی در تحلیل لرزه‌یی عوارض توپوگرافی را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی[۲] و عددی[۳] تفکیک کرد.[۱]

در روش‌های تحلیلی، با درنظرگرفتن معادله‌ی حاکم بر سیستم و لحاظ‌کردن

*نویسنده مسئول

تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸.

استناد به این مقاله:
مجتبی‌زاده حسنلوئی، سعید، پنجی، مهدی، و کمالیان، محسن، ۱۴۰۳. تأثیر بافت اُرتوتروپ ناهمگنی مدفون در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص.۶۴-۸۴. DOI: 10.24200/J30.2024.63886.3294.

[۱] Analytical Methods
[۲] Semi-Analytical Methods
[۳] Numerical Methods

شرایط مرزی و پیوستگی، که البته به‌صورت ویژه به نوع عوارض وابسته است، پاسخ ریاضیات به‌عنوان خروجی و بر حسب حد مجموع حاصل می‌شود. از جمله مطالعات مهم تحلیلی اخیر پیرامون پراکنش امواج در محیط اُرتوتروپ می‌توان به پژوهش کی[۱] (۲۰۱۲)،[۹] اشاره کرد، که یک راه‌حل جدید مبتنی بر تعمیم قانون هوک و اصل برهم نهی برای محیط با خواص اُرتوتروپ ارائه کرده است.[۱۰] گوپتا[۲] و همکاران (۲۰۱۷)، پراکنش امواج رایلی را در یک نیم‌فضای کشسان اُرتوتروپ در تماس با لایه‌ی مشابه به‌صورت تحلیلی مطالعه کردند،[۱۱] و همچنین، راجاک و کوندو[۳] (۲۰۱۹)، توانستند پراکنش امواج SH را در یک لایه‌ی اُرتوتروپ ساندویچی واقع در میان دو لایه‌ی متمایز ماسه‌یی خشک مستقر در یک نیم‌فضا تحلیل کنند.[۱۲] برخی دیگر از پژوهشگران،[۱۳-۱۵] نیز پراکنش امواج لاو[۴] در یک لایه‌ی ماسه‌یی واقع در یک نیم‌فضای پیش‌تحکیم‌یافته‌ی اُرتوتروپ را به صورت تحلیلی با استفاده از روش تفکیک متغیر بررسی کردند. از جمله روش‌های نیمه‌تحلیلی نام‌آشنا می‌توان به روش‌های عدد موج آکی-لارنر[۵]، ماتریس T[۶]، یا میدان صفر[۷]، و بوچان-کَمپیلو[۸] اشاره کرد. در روش‌های مذکور، پاسخ مسئله به‌صورت مجموعه‌یی از موج ورودی و معادله‌های انتگرال کوپل با اقناع شرایط پیوستگی حاکم به‌دست می‌آید. از جمله مطالعات صورت‌گرفته به کمک رویکردهای مذکور می‌توان به مطالعه‌ی چن[۹] و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۶] اشاره کرد که پاسخ گذرای یک ترک درونی در لایه‌ی ناهمگن اُرتوتروپ را محاسبه کرده است. پراکنش امواج در نیم‌صفحه‌ی اُرتوتروپ غیرهمگن توسط رنجیلو[۱۰] و همکاران (۲۰۱۰)،[۱۷] و نیز یک نیم‌فضای غیرایزوتروپ تحت تأثیر ناهمگنی مصالح توسط باگالت[۱۱] و همکاران (۲۰۱۲)،[۱۸] بررسی و مطالعه شده است. امروزه، پیشرفت قطعات الکترونیکی و افزایش قدرت رایانه‌ها زمینه‌ساز رشد قابل‌توجه روش‌های عددی برای تحلیل مسائل گوناگون مهندسی شده است؛ که در روش‌های اخیر به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا، امکان مدل‌سازی و تحلیل مسائل پیچیده و دشوار انتشار موج به سهولت فراهم شده است.[۱] براساس ادبیات فنی، روش‌های عددی را می‌توان در سه دسته‌ی اصلی، شامل روش‌های: حجمی[۱۲]، مرزی[۱۳]، و تلفیقی[۱۴] تقسیم‌بندی کرد.[۱۹] از جمله نام‌آشناترین روش‌های حجمی می‌توان به روش اجزاء محدود (FEM)[۱۵] و تفاضل محدود (FDM)[۱۶] اشاره کرد. در هنگام استفاده از روش‌های حجمی، لازم است کل دامنه‌ی موردنظر گسسته‌سازی و مرزهای جاذب انرژی امواج در پیرامون مدل در نظر گرفته شوند. بدین ترتیب، مسائل با محیط‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی‌نهایت قابلیت تحلیل می‌یابند. اما از سوی دیگر، اعمال شرایط مرزی ذکرشده موجب پیچیدگی به مراتب بیشتر مسئله می‌شود و زمان تحلیل به‌طورچشمگیری افزایش می‌یابد. در کاربرد روش‌های حجمی برای تحلیل محیط اُرتوتروپ می‌توان به مطالعات ایدل و گروتمن[۱۷] (۲۰۰۳)،[۲۰] اشاره کرد، که توانسته‌اند فرمولاسیون کشسان‌خمیری محیط‌های اُرتوتروپ را با کرنش محدود تعیین و از یک رویکرد حجمی در تحلیل صفحات اُرتوتروپ استفاده کرده‌اند.[۲۱] پترولیتو[۱۸] (۲۰۱۴)،[۲۲] نیز با استفاده از روش المان محدود، به تحلیل ارتعاش و پایداری صفحات ضخیم اُرتوتروپ پرداخته است.[۲۳] همچنین، گولر[۱۹] و همکاران (۲۰۱۷)، یک رویکرد جدید برای تحلیل عددی محیط‌های اُرتوتروپ بر مبنای روش اجزاء محدود پیشنهاد کرده‌اند.[۲۴] در مطالعه‌ی دیگری از گوپتا و همکاران (۲۰۱۷)، نیز پاسخ تحلیلی و المان محدود مسائل تماس صفحه‌یی در محیط‌های اُرتوتروپ مدرّج ارائه و با استفاده از روش تفاضل محدود، به بررسی مسئله‌ی انتشار و پراکنش امواج SH در پوسته‌ی اُرتوتروپ چندلایه در معرض تنش اولیه پرداخته شده است.[۲۵] اخیراً، کومز[۲۰] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۶] از روش اجزاء محدود برای تحلیل یک لایه‌ی اُرتوتروپ همگن تحت اثر بارگذاری استوانه‌یی استفاده کرده‌اند. این تذکر لازم است که برخی پژوهشگران،[۲۷ و ۲۸] از رویکردی موسوم به روش معادله‌ی انتگرال حجمی موازی (PVIEM)[۲۱] برای تحلیل پراکنش موج SH در حضور ناهمگنی چندگانه‌ی اُرتوتروپ استفاده کرده‌اند.

روش‌های مرزی، از جمله ایده‌آل‌ترین روش‌ها جهت تحلیل مسائل انتشار و پراکنش امواج در حضور عوارض توپوگرافی ناهمسان هستند؛ اگرچه که آن‌ها محدودیت‌هایی مانند فرمول‌بندی پیچیده و عدم توسعه‌ی مکفی برای محیط‌های غیرخطی و چندفازه دارند، اما سهولت در مدل‌سازی، دقت بالا، کاهش قابل‌توجه در حجم محاسبات، و مدت زمان تحلیل از جمله مزایای بارز آن‌ها به‌شمار می‌آید.[۲۹] با توجه به اینکه در تحلیل لرزه‌یی عوارض توپوگرافی، نحوه‌ی انتشار امواج لرزه‌یی در سطح زمین و بزرگ‌نمایی ناشی از آن حائز اهمیت است، محیط مسئله به‌صورت یک نیم‌فضاست و مطلوب آن است که از اجزاء مرزی نیم‌فضا در این نوع از مسائل استفاده شود. در مدل‌سازی با استفاده از اجزاء مرزی نیم‌فضا، امکان تمرکز مش‌ها فقط بر روی مرز ناهموار بوده و شرایط مرزی سطح آزاد زمین با اقناع دقیق در معادله‌ها اعمال شده است.[۱] هر چند شرایط مرزی ذکرشده منجر به افزایش پیچیدگی معادله‌ها خواهد شد، اما بی‌نیازی به مش‌بندی سطح زمین و سهولت در مدل‌سازی را به ارمغان می‌آورد. در این رابطه می‌توان به برخی پژوهش‌ها،[۳۰-۳۵] در تحلیل لرزه‌یی عوارض توپوگرافی منفرد، مرکب سطحی و زیرسطحی ایزوتروپ در برابر امواج مهاجم SH اشاره کرد. اما توسعه‌ی روش اجزاء مرزی برای محیط‌های اُرتوتروپ در مقایسه با حالت ایزوتروپ بسیار اندک بوده است. در برخی مطالعات،[۳۶ و ۳۷] به توسعه‌ی توابع گرین و پراکنش امواج لرزه‌یی در یک نیم‌فضای چندلایه‌ی اُرتوتروپ پرداخته شده است. چندی بعد رجاپاکسه و

[۱] Ke
[۲] Gupta
[۳] Rajak & Kundu
[۴] Love-Waves
[۵] Aki-Larner Discrete Wavenumber Method
[۶] T-Matrix Method
[۷] Null-Field Method
[۸] Bouchon-Campillo Method
[۹] Chen
[۱۰] Rangelov
[۱۱] Bagault
[۱۲] Volumetric Methods
[۱۳] Boundary Methods
[۱۴] Hybrid Methods
[۱۵] Finite Element Method
[۱۶] Finite Difference Method
[۱۷] Eidel & Gruttmann
[۱۸] Petrolito
[۱۹] Guler
[۲۰] Comez
[۲۱] Parallel Volume Integral Equation Method

گراس[۱] (۱۹۹۵)،[۳۸] پاسخ گذرای نیم‌صفحه‌ی کشسان اُرتوتروپ را در حضور حفره با مقطع دلخواه مطالعه کرده‌اند. با استفاده از رویکرد اجزاء مرزی غیرمستقیم نیم‌فضا در حوزه‌ی بسامد، بزرگ‌نمایی امواج SH در حضور یک دره‌ی آبرفتی اُرتوتروپ در سال ۱۹۹۸ توسط ژنگ[۲] و همکارش،[۳۹] بررسی شده است. در ادامه، ایشان (۱۹۹۹)،[۴۰] از روش مذکور برای پراکنش امواج کشسان درون صفحه و تغییرمکان حاصل در حضور یک دره‌ی آبرفتی اُرتوتروپ با مقطع دلخواه استفاده کرده‌اند. احمد[۳] و همکاران (۲۰۰۱)،[۴۱] نیز به کمک روش اجزاء مرزی مستقیم نیم‌فضا، مسائل کشسان‌دینامیک را در محیط ناهمسان دوبُعدی تحلیل کرده‌اند.[۴۲] همچنین، دینوا[۴] و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از یک تابع گرین تقریبی نیم‌فضا، به تحلیل مسائل ناهمسان به کمک روش اجزاء مرزی پرداخته‌اند.[۴۳] مجتبی‌زاده حسنلویی و همکاران (۲۰۲۲)،[۴۴] نیز پراکنش امواج SH در یک نیم‌فضای اُرتوتروپ در حضور حفره‌های زیرسطحی را با استفاده از روش معادله‌ی انتگرال مرزی مطالعه کرده و اخیراً فرمولاسیون و اَلگوریتم کامل روش اجزاء مرزی نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ در حوزه‌ی زمان و کاربرد آن را در پراکنش امواج لرزه‌یی در حضور انواع عوارض توپوگرافی ارائه داده‌اند.

ادبیات فنی نشان داده است که تأثیر بافت اُرتوتروپی ناهمگنی نرم زیرزمینی در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین در برابر امواج مهاجم SH هنوز مطالعه نشده و از چالش‌های موجود در پیشینه‌ی پژوهش است. بنابراین، در پژوهش حاضر به کمک روش اجزاء مرزی نیم‌فضا در حوزه‌ی زمان به تحلیل لرزه‌یی سطح زمین در حضور عارضه‌ی مذکور پرداخته شده است. در این میان، ضمن توسعه‌ی فرمول‌بندی روش و تحلیل چند مثال اعتبارسنجی، حساسیت بزرگ‌نمایی لرزه‌یی سطح در مقابل برخی پارامترهای اساسی مدل از قبیل نسبت شکل، عامل ایزوتروپی، و محتوای بسامدی ارزیابی شده‌اند. تهیه‌ی مدل ساده‌ی ناهمگنی اُرتوتروپ زیرزمینی به کمک روش پیشنهادی و ارائه‌ی برخی نتایج جدید مهندسی پیرامون تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌های لرزه‌یی موجود، بر لزوم انجام و نوآوری پژوهش حاضر صحه می‌گذارد.

۲. فرمول‌بندی

در شکل ۱، یک ناهمگنی زیرزمینی با هندسه‌ی دلخواه مستقر در یک نیم‌فضای کشسان خطی همگن اُرتوتروپ میرا در برابر امواج مهاجم قائم SH مشاهده می‌شود. معادله‌ی حرکت موج خارج از صفحه‌ی SH مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:[۴۵]

(۱)

$$c_{66}\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial x^2}+c_{44}\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial z^2}+b(x,z,t)=\rho\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial t^2}$$

که در آن، $u(x,z,t)$ و $b(x,z,t)$ به‌ترتیب تغییرمکان و نیروی حجمی خارج از صفحه در نقطه‌ی (x,z) و زمان حاضر t هستند. عامل ρ بیانگر چگالی محیط است و ثابت‌های کشسان ماتریس استحکام[۵] برای محیط

شکل ۱. ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با مقطع دلخواه مستقر در یک نیم‌فضای میرا شده‌ی اُرتوتروپ در برابر امواج مهاجم قائم SH.

اُرتوتروپ، که مبین مدول برشی محیط در امتداد مختصات X و Z است، به ترتیب با c_{66} و c_{44} نشان داده شده است. با حل سینگولار (منفرد) رابطه‌ی ۱ و بدون درنظرگرفتن شرایط مرزی، توابع گرین فضای کامل اُرتوتروپ حاصل خواهد شد. با وجود این، شرایط مرزی ترکشن آزاد[۶] بر روی سطح زمین در حالت اُرتوتروپ به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$c_{44}\frac{\partial u}{\partial z}=0 \qquad (۲)$$

از حل هم‌زمان معادله‌های ۱ و ۲، توابع گرین نیم‌فضای اُرتوتروپ در حوزه‌ی زمان حاصل خواهند شد.[۴۴]

۲.۱. میرایی مصالح[۷]

رفتار واقعی خاک/ سنگ تشکیل‌دهنده‌ی محیط نیمه‌نامحدود پیرامون عوارض توپوگرافی، به محیطی نزدیک است که علاوه‌بر میرایی تشعشعی[۸]، میرایی مصالح را نیز شامل می‌شود. لذا، در نظرگرفتن میرایی مصالح در محاسبات حوزه‌ی زمان به‌ویژه در محیط اُرتوتروپ می‌تواند همگرایی سریع‌تر پاسخ و سهولت در تعیین نتایج حوزه‌ی بسامد را به ارمغان آورد. عامل اخیر در اجزاء مرزی حوزه‌ی زمان نیز توسط مؤلفان مختلف، از جمله: جین[۹] و همکاران (۲۰۰۱)،[۴۶] استفاده شده است. در پژوهش حاضر، از روش بارکان[۱۰]،[۴۷] برای اعمال میرایی مصالح استفاده شده است. این روش مبتنی بر یک کاهش ثابت لگاریتمی دامنه‌ی پاسخ در هر گام زمانی است، که توسط گالوین[۱۱] و همکارش (۲۰۰۷)،[۴۸] در حوزه‌ی زمان استفاده شده است. بر این اساس، معادله‌ی انتگرال مرزی به‌صورت رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

(۳)

$$c(\xi)u(\xi,t)=\int_\Gamma\left\{\int_0^t\begin{bmatrix} u^*(x,t;\xi,\tau)\cdot q(x,\tau)\cdot e^{-2\pi\zeta(t-\tau)} - \\ q^*(x,t;\xi,\tau)\cdot u(x,\tau)\cdot e^{-2\pi\zeta(t-\tau)}\end{bmatrix}d\tau\right\}d\Gamma(x)+u^{ff}(\xi,t)$$

که در آن، Γ بیانگر مرز عارضه‌ی موردنظر، $c(\xi)$ ضریب هندسه، u^{ff} تغییرمکان میدان آزاد، و ζ مبین ضریب کاهندگی یا میرایی مصالح محیط

---

۱ Rajapakse & Gross
۲ Zheng
۳ Ahmad
۴ Dineva
۵ Rigidity Matrix
۶ Traction-Free
۷ Material Attenuation
۸ Radiation Damping
۹ Jin۲۲
۱۰ Barkan Method
۱۱ Galvin

نیم‌فضاست. u^* و q^* به ترتیب توابع گذرای گرین برای مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن در یک نیم‌فضای اُرتوتروپ، u و q به ترتیب مقادیر تغییرمکان و ترکشن مرزی، و ξ و x به ترتیب بردار موقعیت منبع موج و گیرنده هستند. انتگرال‌های کانولوشن ریمان[۱] نیز به‌صورت $u^* \cdot q$ و $q^* \cdot u$ نشان داده شده‌اند. از حل گام‌به‌گام معادله‌ی انتگرال مرزی ۳، تغییرمکان و ترکشن برای کلیه‌ی گره‌های مرزی مسئله نتیجه می‌شود. همچنین، با اعمال تساوی $c(\xi) = ۱/۰$، تغییرمکان برای کلیه‌ی نقاط درونی قابل محاسبه است.[۴۴]

۲.۲. عددی‌سازی

تعیین مقادیر مرزی تغییرمکان و ترکشن معادله‌ی ۳، مستلزم حل انتگرال‌های زمانی[۲] و مکانی[۳] موجود است. پیش از حل معادله‌ی اخیر، برای تعیین متغیرهای میدانی لازم است به ترتیب محور زمان و مرز هندسی عارضه گسسته‌سازی شود. برای حل انتگرال‌های زمان و مکان به‌ترتیب از یک فرآیند تحلیلی و عددی استفاده شده است. بدین ترتیب، با گسسته‌سازی محور زمان از ۰ تا t، به N گام مساوی با حد فاصل Δt و استفاده از توابع شکل[۴] خطی زمان در هر گام با درنظرگرفتن المان درجه‌ی دوم ایزوپارامتریک سه‌گره‌یی[۵] برای گسسته‌سازی مرز عارضه،[۴۹] انتگرال‌های زمان معادله‌ی ۳ به‌صورت معادله‌ی ۴ تعیین می‌شوند:

(۴)

$$c(\xi)u^N(\xi) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} \begin{bmatrix} \left\{\int_{\Gamma_m}\left[U_1^{N-n+1}(x(\kappa),\xi)+U_2^{N-n}(x(\kappa),\xi)\right]N_\alpha(\kappa)|J|d\kappa\right\}q_\alpha^n - \\ \left\{\int_{\Gamma_m}\left[Q_1^{N-n+1}(x(\kappa),\xi)+Q_2^{N-n}(x(\kappa),\xi)\right]N_\alpha(\kappa)|J|d\kappa\right\}u_\alpha^n \end{bmatrix} + u^{ff.N}(\xi)$$

که در آن، N شمارنده‌ی گام‌های زمانی، M تعداد کل المان‌های مرزی، و Γ_m بیانگر بخشی از مرز است، که المان 'm' بدان تعلق دارد. همچنین، N_α توابع شکل المان درجه‌ی دو با $\alpha = ۱,۲,۳$، κ مبین سیستم مختصات محلی المان‌ها و $|J|$ دترمینان ژاکوبین برای تبدیل از سیستم مختصات کارتزین به محلی است.

۳.۲. حل‌پذیری

پس از گسسته‌سازی مرز هندسی عارضه‌ی موردنظر، کلیه‌ی عناصر ماتریس حاصل از انتگرال‌گیری مکانی تعیین می‌شود، که فرم ماتریسی آن به صورت معادله‌ی ۵ خواهد بود:[۳۴ و ۴۴]

$$\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{H}^{N-n+1}\{\boldsymbol{u}^n\} = \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{G}^{N-n+1}\{\boldsymbol{q}^n\} + \{\boldsymbol{u}^{ff.N}\} \qquad (۵)$$

که در آن، $\boldsymbol{H}^{N-n+1}$ و $\boldsymbol{G}^{N-n+1}$ به ترتیب مبین ماتریس‌های حاصل از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های دینامیکی اسکالر اُرتوتروپ برای مؤلفه‌های ترکشن و تغییرمکان هستند. $\{\boldsymbol{u}^n\}$ و $\{\boldsymbol{q}^n\}$ نیز بردارهای کمیت‌های گره‌یی مرزی در گام زمانی n را نشان می‌دهند. پس از اعمال شرایط مرزی بر مرزهای هندسی مدل، فرم قابل حل معادله‌ی ۵ مطابق معادله‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$\left[\boldsymbol{A}_1^1\right]\{\boldsymbol{X}^N\} = \left[\boldsymbol{B}_1^1\right]\{\boldsymbol{Y}^N\} + \{\boldsymbol{R}^N\} + \{\boldsymbol{u}^{ff.N}\} \qquad (۶)$$

که در آن، $\left[\boldsymbol{A}_1^1\right]$ و $\left[\boldsymbol{B}_1^1\right]$ به ترتیب مبین ماتریس‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی هستند و $\{\boldsymbol{X}^N\}$ و $\{\boldsymbol{Y}^N\}$ به‌ترتیب بردار مقادیر مجهول و معلوم مرزی را نشان می‌دهند. $\{\boldsymbol{R}^N\}$ نیز دربرگیرنده‌ی اثر تاریخچه‌ی دینامیکی گذشته در گام زمانی N است و مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$\{\boldsymbol{R}^N\} = \sum_{n=1}^{N-1}\left(\boldsymbol{G}^{N-n+1}\{\boldsymbol{q}^n\} - \boldsymbol{H}^{N-n+1}\{\boldsymbol{u}^n\}\right) \qquad (۷)$$

از حل معادله‌ی ۶ در هر گام زمانی، کلیه‌ی مقادیر مجهول مرزی، اعم از مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن برای هر گره‌ی مرزی موردنظر به‌دست می‌آید. از بازنویسی رابطه‌ی ۵ برای هر نقطه‌ی درونی دلخواه، تغییرمکان‌های مجهول در هر نقطه‌ی درونی دلخواه نیز به‌سادگی تعیین می‌شود.

۴.۲. موج مهاجم

مطابق رابطه‌ی ۳، برای تحلیل لرزه‌یی مسائل انتشار موج با استفاده از روش پیشنهادی، لازم است تغییرمکان میدان آزاد (u^{ff}) به‌عنوان ورودی مسئله تعریف شود. در این خصوص، از موجک ریکر[۶،۵۰] به عنوان موج محرک ورودی استفاده شده است، که تابع آن مطابق رابطه‌ی ۸ است:

(۸)

$$u^{ff}(x,z,t) = a_{max} \cdot \left(\begin{array}{l} \left[1-2\left(\frac{\pi f_p}{c}\alpha^{inc.}\right)^2\right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c}\alpha^{inc.}\right)^2} H\left(t-\frac{r^{inc.}}{c}\right) + \\ \left[1-2\left(\frac{\pi f_p}{c}\alpha^{ref.}\right)^2\right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c}\alpha^{ref.}\right)^2} H\left(t-\frac{r^{ref.}}{c}\right) \end{array} \right)$$

که در آن، $u^{ff}(x,y,t)$ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین در مختصات (x,y) و زمان t است. a_{max} دامنه‌ی بیشینه‌ی موج محرک ورودی، $\alpha^{inc.}$ و $\alpha^{ref.}$ به ترتیب فاز امواج مستقیم و انعکاسی را در موقعیت‌های $r^{inc.}$ و $r^{ref.}$ نشان می‌دهند. θ زاویه‌ی موج مهاجم نسبت به امتداد قائم و c نیز مبین سرعت موج برشی محیط است. در شکل ۲، ن موجک ریکر در یک نقطه از سطح صاف زمین در فضای زمان و بسامد مشاهده می‌شود.

۵.۲. ناهمگنی اُرتوتروپ

برای تحلیل لرزه‌یی ناهمگنی اُرتوتروپ با استفاده از روش پیشنهادی لازم است برخی تمهیدهای ویژه در فرمول‌بندی لحاظ شود. بنابراین، باید به کمک فرآیند زیرسازه‌سازی، مسئله به چند ناحیه‌ی همگن تقسیم و شرایط پیوستگی در وجه میانی اقناع شود. اگرچه به‌دلیل ماهیت متفاوت مدول برشی در رفتار اُرتوتروپ و وابستگی آن به محل استقرار گره‌های وجه‌میانی، لازم است برخی تغییرات در فرمول‌بندی در نظر گرفته شود، اما درنهایت مسئله در حالت معادله‌های کوپل در هر گام زمانی تحلیل می‌شود. بنابراین، با توجه به رابطه‌ی ۵، برای محیط نیم‌فضای اُرتوتروپ پیرامون عارضه می‌توان رابطه‌ی ۹ را نوشت:

---

[۱] Riemann Convolution Integrals
[۲] Temporal Integrals
[۳] Spatial Integrals
[۴] Shape Functions
[۵] Three-Node Isoparametric Quadratic Elements
[۶] Ricker Wavelet

شکل ۲. نمودار موجک ریکر برای یک نقطه از سطح صاف زمین در حوزه‌ی: (الف) زمان و (ب) فرکانس.

$$H_{12}^{1} u_{12}^{N} = G_{12}^{1} q_{12}^{N} + R_{12}^{N} + u_{12}^{ff.N} \qquad (۹)$$

که در آن، زیرنویس ۱۲ معرف گره‌های وجه میانی محیط نیم‌فضا در تماس با ناهمگنی زیرزمینی است. همچنین، u_{12}^{N} و q_{12}^{N} به‌ترتیب تغییرمکان و ترکشن وجه میانی Γ_{12} است. $u_{12}^{ff.N}$ بیانگر حرکت میدان آزاد گره‌های وجه میانی است و R_{12}^{N} اثر تاریخچه‌ی دینامیکی گام‌های زمانی گذشته را در گام زمانی N مطابق رابطه‌ی ۱۰ نشان می‌دهد:

$$R_{12}^{N} = \sum_{n=1}^{N-1} \left(G_{12}^{N-n+1} q_{12}^{n} - H_{12}^{N-n+1} u_{12}^{n} \right) \qquad (۱۰)$$

به‌طور مشابه با برقراری روابط ۹ و ۱۰ برای محیط عارضه می‌توان رابطه‌ی ۱۱ را نوشت:

$$H_{21}^{1} u_{21}^{N} = G_{21}^{1} q_{21}^{N} + R_{21}^{N} \qquad (۱۱)$$

که در آن، R_{21}^{N} از رابطه‌ی ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$R_{21}^{N} = \sum_{n=1}^{N-1} \left(G_{21}^{N-n+1} q_{21}^{n} - H_{21}^{N-n+1} u_{21}^{n} \right) \qquad (۱۲)$$

که در آن، زیرنویس ۲۱ معرف گره‌های وجه میانی عارضه‌ی متصل‌شده به نیم‌فضا، u_{21}^{N} و q_{21}^{N} به ترتیب مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن وجه میانی هستند، و Γ_{21} و R_{21}^{N} نیز تاریخچه‌ی دینامیکی گذشته در گام زمانی N را برای گره‌های محیط عارضه نشان می‌دهند.

۶.۲. سرهم‌سازی

با سرهم‌سازی معادله‌های ۹ الی ۱۲، به کمک شرایط پیوستگی تغییرمکان و ترکشن در وجوه میانی، فرآیند تحلیل در یک سیستم کوپل در هر گام زمانی انجام می‌شود. چنانچه محیط به‌صورت ایزوتروپ فرض شود، با توجه به خاصیت انحصاری مدول برشی، این شرایط به‌سادگی قابل اعمال است. لیکن در حالت اُرتوتروپ، شرایط پیوستگی وجه‌میانی Γ_{ij} مطابق رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ تعریف می‌شود:

$$u_{12}^{N} = u_{21}^{N} \qquad (۱۳)$$

$$\mu^{(1)} \cdot q_{12}^{N} = -\mu^{(2)} \cdot q_{21}^{N} \qquad (۱۴)$$

که در آن‌ها، $\mu^{(1)}$ و $\mu^{(2)}$ به ترتیب معرف مدول‌های برشی معادل[1] برای محیط نیم‌فضا و عارضه است. با توجه به ماهیت اُرتوتروپی مصالح، بردار ترکشن در وجه میانی Γ_{ij} به صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود:

$$q_{ij} = c_{66} \frac{\partial u}{\partial x} n_x + c_{44} \frac{\partial u}{\partial z} n_z \ , \quad i = \overline{1,2}; \quad j = \overline{1,2}; \quad i \neq j \qquad (۱۵)$$

که در آن، q_{ij} بردار ترکشن در وجه میانی عارضه و n_x و n_z به ترتیب مؤلفه‌های بردار نرمال وجه میانی هستند. از رابطه‌ی ۱۵ می‌توان دریافت که در هر گره از وجه میانی، نه فقط بردار ترکشن، بلکه مدول برشی معادل نیز بسته به موقعیت استقرار گره، سهمی از مدول‌های برشی در امتدادهای مختلف را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین، برای مدول برشی معادل در هر گره‌ی وجه میانی می‌توان رابطه‌ی ۱۶ را نوشت:

$$\mu^{(j)} = c_{66} \cdot n_x + c_{44} \cdot n_z \qquad (۱۶)$$

که در آن، $\mu^{(j)}$ معرف مدول برشی معادل محیط j اُم است. همچنین، برای n_x و n_z نیز می‌توان به ترتیب رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ را نوشت:

$$n_x = \frac{dx_2(\kappa)/d\kappa}{|J|} \qquad (۱۷)$$

$$n_z = \frac{-dx_1(\kappa)/d\kappa}{|J|} \ , \qquad (۱۸)$$

که در آن‌ها، $|J|$ مطابق رابطه‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$|J| = \sqrt{\left(\frac{dx_i(\kappa)}{d(\kappa)} \right)^2} \ , \qquad i = 1,2 \qquad (۱۹)$$

که در آن، $x_i(\kappa)$ از رابطه‌ی ۲۰ به‌دست می‌آید:

$$x_i(\kappa) = N_\alpha(\kappa) \cdot x_{i\alpha} \ , \qquad i = 1,2; \qquad \alpha = 1,2,3 \qquad (۲۰)$$

همچنین در آن‌ها، $|J|$ دترمینان ژاکوبین و $x_i(\kappa)$ مختصات هر المان درجه‌ی دوم در سیستم مختصات محلی را نشان می‌دهند. بنابراین، با اقناع شرایط پیوستگی روابط ۱۳ و ۱۴، فرم نهایی ماتریس‌گونه‌ی معادله‌های کوپل‌شده‌ی اُرتوتروپ اصلاح‌شده برای تحلیل در هر گام زمانی به صورت

[1] Equivalent Shear Modulus

رابطه‌ی ۲۱ به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^{1} & \frac{-1}{\mu^{(1)}}G_{12}^{1} \\ H_{21}^{1} & \frac{1}{\mu^{(2)}}G_{21}^{1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{12}^{N} \\ q_{12}^{N} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{12}^{N} \\ R_{21}^{N} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{12}^{ff\,.N} \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (21)$$

از حل معادله‌ی اخیر، کلیه‌ی مقادیر مجهول وجوه میانی اعم از تغییرمکان و ترکشن به‌دست می‌آیند. همچنین با تساوی $c(\xi) = 1/0$ در معادله‌ی ۳، تغییرمکان سطح زمین طی فرآیندی مشابه فوق، محاسبه می‌شود.

۳. روش‌شناسی

در پژوهش حاضر، G.S. بیانگر سطح زمین[1] و x/b بیانگر محدوده‌ی سطح زمین است، که نسبت به نصف عرض عارضه‌ی موردنظر (b) بی‌بُعد شده است. DR و SR به‌ترتیب معرف نسبت عمق[2] و نسبت شکل[3] عارضه هستند. دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایزشده (NDA)[4] عبارت است از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییرمکان سطح زمین حاصل از روش اجزاء مرزی در یک بسامد معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی امواج مهاجم در بسامد مذکور. عامل ایزوتروپی (IF)[5] نیز نسبت مؤلفه‌ی سرعت موج برشی افقی به قائم (c_x / c_z) است، که به‌صورت رابطه‌ی ($IF = \sqrt{\mu_x / \mu_z}$) در یک محیط اُرتوتروپ لحاظ می‌شود. در رابطه‌ی اخیر، μ_x و μ_z به ترتیب مدول‌های برشی محیط در امتداد محور x و z هستند.[39] در صورتی که محیط به صورت ایزوتروپ فرض شود (عامل ایزوتروپی برابر واحد)، μ_x در تساوی با μ_z خواهد بود. اما برای محیط‌های اُرتوتروپ، نسبت‌های $\mu_x = \mu_z$ ۲، $\mu_x = \mu_z$ ۱/۵، $\mu_z = \mu_x$ ۱/۵، و $\mu_z = \mu_x$ ۲ در نظر گرفته شده‌اند. لذا عوامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴، ۱/۲۲۵، ۰/۸۱۶، و ۰/۷۰۷ به ترتیب شکل گرفته‌اند. نسبت اِمپدانس[6] بیانگر اختلاف سختی مصالح است و از طریق رابطه‌ی ($I = \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$) محاسبه می‌شود، که در آن، ρ_2 و c_2 مبین چگالی و سرعت موج برشی عارضه و ρ_1 و c_1 معرف پارامترهای ذکرشده برای دامنه هستند. بسامد بی‌بُعد (η) به صورت رابطه‌ی ($\eta = \omega b / \pi c$) تعریف می‌شود، که ω بیانگر بسامد زاویه‌یی موج، b نصف عرض عارضه، و c معرف سرعت موج برشی معادل محیط هستند. دوره‌ی تناوب بی‌بُعد[7] (P) عکس بسامد بی‌بُعد است و به‌صورت ($P = 1/\eta$) تعریف می‌شود. دامنه[8] نیز نسبت تغییرمکان سطح زمین بر شتاب بیشینه‌ی موج ورودی است. این تذکر لازم است که برای تسهیل فرآیند همگرایی نتایج، در کلیه‌ی مثال‌های ارائه‌شده، میرایی مصالح (ζ) برابر با ۵٪ اعمال شده است. تمامی مدل‌ها در معرض امواج مهاجم برون‌صفحه‌ی SH از نوع ریکر،[50] با بسامد غالب ۳/۰ هرتز (Hz)، و دامنه‌ی بیشینه‌ی ۰/۰۰۱ متر قرار گرفته‌اند؛ که به‌صورت قائم، افقی، و مورب به سمت عوارض موردنظر تابانده شده‌اند. شایان ذکر است که دلیل فقدان مطالعات اُرتوتروپ در مقایسه با پژوهش‌های ایزوتروپ، به‌ویژه در رابطه با سنجش رفتار لرزه‌یی عوارض توپوگرافی، اثر اُرتوتروپی در برخی مثال‌ها با همگرایی تدریجی خواص مصالح اُرتوتروپ به حالت ایزوتروپ و همخوانی پاسخ‌ها ارزیابی شده است.

۳.۱. راستی‌آزمایی

در شکل ۳، پاسخ اُرتوتروپ یک ناهمگنی دایره‌یی زیرزمینی با نسبت عمق برابر با ۲/۰ در معرض امواج مهاجم قائم و افقی SH با نتایج دراوینسکی و یو[9] (۲۰۱۱)،[51] مقایسه شده است؛ که در آن، از روش اجزاء مرزی مستقیم فضای‌کامل در حوزه‌ی بسامد به‌منظور محاسبه‌ی تغییرمکان‌های سطح زمین استفاده شده است. نتایج در محدوده‌ی $-10b$ تا $10b$ از سطح زمین و برای بسامدهای بی‌بُعد ۰/۵ و ۱/۰ ارائه شده‌اند. نسبت اِمپدانس برای مدل ایزوتروپ برابر با ۰/۳ لحاظ شده است. مسئله در ۱۰۰۰ گام زمانی با حد فاصل Δt برابر با ۰/۰۰۶ ثانیه و پارامتر شیفت زمان‌های ۱/۶ و ۳/۷ ثانیه به ترتیب برای تابش موج‌های قائم و افقی تحلیل شده است. تعداد المان‌های مرزی منظورشده بر مرز ناهمگنی برابر با ۹۴ المان یا ۱۸۸ گره بوده است. چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتایج

شکل ۳. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین برای ناهمگنی دایره‌یی اُرتوتروپ واقع در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪ = ζ) برای نسبت عمق ۲/۰ و بسامد بی‌بُعد ۰/۵ در برابر امواج مهاجم: (الف) قائم و (ب) افقی SH.

[1] Ground Surface
[2] Depth Ratio
[3] Shape Ratio
[4] Normalized Displacement Amplitude
[5] Isotropy Factor
[6] Impedance Ratio
[7] Dimensionless Period
[8] Amplitude
[9] Dravinski & Yu

به‌دست‌آمده، هماهنگی و انطباق مناسبی با نتایج عددی دراوینسکی و یو (۲۰۱۱)،[۵۱] دارد. شایان ذکر است که به سبب شهود اختلاف خواص اُرتوتروپی مصالح در قیاس با حالت همسان، عامل ایزوتروپی مصالح متشکل ناهمگنی و بستر پیرامون به‌صورت یکسان فرض شده است.

۴. کاربردها

حضور محیط‌های ناهمگن بسته‌ی زیرزمینی، که غالباً به‌صورت لنزها، عدسی‌ها، و کارست‌های انباشته از مواد رسوبی در چینه‌بندی زمین وجود دارند، به لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌یی برای شناخت بهتر عوارض مذکور تأکید کرده است. بنابراین در بخش حاضر، به تحلیل گذرای سطح زمین در حضور عوارض اخیر تحت امواج زمین‌لرزه پرداخته شده است. در تهیه‌ی مدل ذکرشده، از روش پیشنهادی در پژوهش حاضر مبتنی بر روش زیرسازه‌سازی استفاده شده است. مطابق جدول ۱، ناهمگنی از جنس ماسه‌سنگ به ترتیب با سرعت موج برشی و چگالی برابر $m.s^{-1}$ ۸۰۰ و $kg.m^{-3}$ ۲۰۰۰ و سنگ بستر از جنس شیل با متوسط سرعت موج برشی، و چگالی $m.s^{-1}$ ۱۸۰۰ و $kg.m^{-3}$ ۲۷۰۰ در حالت ایزوتروپ فرض شده است. نسبت اِمپدانس مدل در حالت ایزوتروپ برابر ۰/۳۳ منظور شده است، که مبین نرمی ۶۷ درصدی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی ناهمگنی نسبت به سنگ بستر است. در انجام مطالعه‌ی عددی، از پنج مقطع دایروی با نسبت‌های شکل ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰، ۱/۳۳، و ۲/۰ استفاده شده است. شایان ذکر است که نسبت شکل ناهمگنی به‌صورت نسبت شعاع قائم به افقی تعریف شده است. ناهمگنی در نسبت عمق (DR) برابر با ۱/۵ استقرار یافته و عامل ایزوتروپی مصالح عارضه‌ی مزبور و محیط

جدول ۱. مشخصات خاک/ سنگ‌های رسوبی ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف.

نوع سنگ	سرعت موج برشی (m/sec)	چگالی (kg/m^3)
رس‌سنگ و ماسه‌سنگ	۷۰۰ ~ ۹۵۰ [۵۲] ۹۰۰ [۵۳] ۹۰۰ ~ ۱۳۰۰ [۵۴] ۳۵۰ ~ ۲۳۵۰ [۵۵]	۲۰۰۰ ~ ۲۷۰۰ [۶۴]
لای‌سنگ	۲۰۰ ~ ۹۰۰ [۵۶]	۲۴۰۰ ~ ۲۸۰۰ [۶۵]
سنگ آهک	۱۶۰۰ ~ ۲۴۰۰ [۵۷] ۸۰۰ ~ ۱۰۰۰ [۵۸] ۳۵۰ ~ ۷۰۰ [۵۹]	۲۳۰۰ ~ ۲۷۰۰ [۶۴]
سنگ شیل	۱۹۰۰ ~ ۲۳۰۰ [۶۰] ۲۴۰۰ ~ ۲۷۰۰ [۶۱] ۱۱۰۰ ~ ۲۳۰۰ [۶۲] ۵۵۰ ~ ۶۱۰ [۶۳]	۲۰۰۰ ~ ۲۷۵۰ [۶۴]

پیرامون آن برابر فرض شده است. همچنین، میرایی مصالح نیز در هر دو محیط برابر ۵٪ اعمال شده است.

۱.۴. تصویر لحظه‌یی[۱]

در شکل‌های ۴ الی ۶، تصویر لحظه‌یی ناهمگنی و محیط پیرامون در برخی لحظات کلیدی مشاهده می‌شوند. در تهیه‌ی نتایج به‌دست‌آمده، به ترتیب از نسبت شکل‌های ۱/۰، ۰/۵، و ۲/۰ بر حسب عوامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴، ۱/۰، و ۰/۷۰۷ استفاده شده است. حد فاصل $5b$- تا $5b$ و ۰ تا $5b$- به ترتیب برای سطح زمین و عمق در نظر گرفته شده است. تعداد ۶۱۷۷۶ و ۱۹۸۸۱ نقطه‌ی درونی به‌ترتیب در نیم‌فضا و ناهمگنی دایره‌یی تعریف شده است. هنگامی که امواج مهاجم لرزه‌یی قائم به مرز تحتانی ناهمگنی دایروی برخورد می‌کند، بخشی از آن به‌دلیل اِمپدانس مصالح دچار انعکاس می‌شود و با گذر زمان از محیط بیرون می‌رود. اما بخش قابل‌توجه از امواج مذکور، وارد مصالح عارضه شده‌اند، که حجم تداخل امواج با انعکاس جبهه‌ی موج از سطح زمین ازدیاد می‌یابد. در این حالت، رفتار متقابل مرز عارضه مانع از خروج آسان امواج از درون عارضه می‌شود. بنابراین، انعکاس‌های متناوب از ثانیه ۲/۴ در ناهمگنی مشاهده می‌شود. با هر بار برخورد امواج محصور به مرز پیرامون، بخشی از آن انکسار یافته و وارد محیط شده و بخش دیگر در فرآیند احتباس باقی مانده است. در IF =۱/۴۱۴ ، تمایل بیشتر امواج به پراکنش و تفرق در راستای افق و کاهش اثر فازهای انعکاسی، خزشی، و احتباسی همواره مشاهده می‌شود. مطابق نتایج شکل‌های ۴ الی ۶، در ثانیه‌ی ۰/۷ و در کمینه و بیشینه‌ی IF به ترتیب بیشترین و کمترین حجم امواج گذرا وارد مصالح ناهمگنی شده است. از سوی دیگر، IF برابر ۰/۷۰۷ موجب برخورد شدید امواج به مرز پیرامون ناهمگنی شده است، که این پدیده در ثانیه‌ی ۲/۴ به خوبی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در این میان، هندسه‌ی دوار عارضه موجب تسهیل در تشکیل فاز خزشی موج می‌شود.

۲.۴. نتایج حوزه‌ی زمان

در شکل‌های ۷ الی ۹، الگوی پراکنش و تفرق امواج لرزه‌یی قائم در برخورد با ناهمگنی زیرزمینی در نسبت شکل‌های ۱/۰، ۰/۵، و ۲/۰ مشاهده می‌شوند. مطابق بخش پیشین، نتایج در عوامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴، ۱/۰، و ۰/۷۰۷ ارائه و حد فاصل سطح زمین در بازه‌ی 5b- تا 5b تعریف شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در برخورد امواج به عارضه، بخشی از آن به‌صورت مستقیم از مرز عارضه منعکس شده و بخشی دیگر، بر روی مرز ناهمگنی خزش یافته و پس از انحراف از مسیر اولیه به سطح زمین برخورد کرده است. بخش سوم، نیز با دخول به مصالح ناهمگنی سبب تکرر انعکاسی و متعاقباً آشفتگی پاسخ سطح زمین شده است. جهت تفسیر نتایج، مشابه قبل، ایستگاه‌هایی با علائم اختصاری D، R، C، و T تعریف شده است. با اعمال جبهه‌ی موج قائم، متعاقباً پاسخ به‌دست‌آمده به‌صورت متقارن حاصل می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود، در مقطع دایروی عارضه (شکل ۷)، دامنه‌ی امواج خزشی افزایش یافته است. هر چه مقطع ناهمگنی دوارتر باشد، خزیدن امواج بر روی مرز آن با سهولت بیشتر صورت می‌گیرد و دامنه‌ی قوی‌تری حاصل می‌شود. با توجه به نسبت اِمپدانس، مصالح ناهمگنی، ۶۶/۷٪ نرم‌تر از مصالح محیط پیرامون فرض شده‌اند. بنابراین مرز عارضه در احتباس امواج نقش بسزایی دارد. از سوی دیگر،

[۱] Snapshot

شکل ۴. تصویر لحظه‌یی پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) با عامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴.

شکل ۵. تصویر لحظه‌یی پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) با عامل ایزوتروپی واحد.

شکل ۶. تصویر لحظه‌یی پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) با عامل ایزوتروپی ۰/۷۰۷.

شکل ۷. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

هر چه محیط احاطه‌شده توسط ناهمگنی وسیع‌تر باشد، حجم بیشتری از امواج را به درون خود جذب می‌کند و ارتعاش قوی‌تری در پاسخ سطح مشاهده می‌شود. در نسبت شکل ۰/۵ (شکل ۸) با کاهش محیط ناهمگنی، انعکاس امواج از بخش زیرین عارضه ازدیاد یافته است. هر چه محیط ناهمگنی کوچک‌تر باشد، تکرر انعکاس موج افزایش و تضاداً مدت زمان تعویق در انعکاس‌ها کاهش می‌یابد. چنانچه در بیشینه‌ی IF مشاهده می‌شود، چینه‌بندی افقی مصالح رسوبی تشکیل‌دهنده‌ی عارضه و محیط پیرامون آن از یک سو و هندسه‌ی منحصر به‌فرد عارضه از سوی دیگر، در ممانعت بیشتر خروج امواج از محیط مسئله سهیم هستند. در نسبت شکل ۲/۰ (شکل ۹)، میزان خزش امواج بر روی مرز عارضه افزایش یافته و دامنه‌ی خزشی قوی‌تری

شکل ۸. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵ مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۹. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰ مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

بر روی سطح زمین ایجاد شده است. در IF =۱/۴۱۴، به دلیل تمایل امواج به پراکنش در راستای افق و درگیری اندک با عارضه، کاهش ارتعاش پاسخ و زمان همگرایی حاصل شده است.

۳.۴. اُلگوی بزرگ‌نمایی

در بخش حاضر، الگوی بزرگ‌نمایی سه‌بُعدی سطح زمین در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، هنگامی که ناهمگنی به‌صورت دایره‌یی است (شکل ۱۰)، به‌دلیل اشغال فضای بزرگ‌تر، جذب حجم بیشتر امواج به درون آن میسر می‌شود. با توجه به اینکه در IF =۰/۷۰۷ (چینه‌بندی قائم در مصالح رسوبی) تا حد زیادی از تفرق امواج در امتداد افق ممانعت می‌شود، سهم چشم‌گیر امواج در راستای قائم پراکنش می‌یابد. بنابراین، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی به مقدار ۲/۰۸ در IF =۰/۷۰۷ به وقوع می‌پیوندد. از مقایسه‌ی الگوهای پاسخ به‌خوبی اثر ایزولاسیون عارضه بر سطح و همچنین نواحی تمرکز بزرگ‌نمایی ناشی از عامل ایزوتروپی مشاهده می‌شود. هنگامی که نسبت شکل ناهمگنی برابر با ۰/۵ است (شکل ۱۱)، حجم کمتری از امواج لرزه‌یی به ناحیه‌ی ناهمگنی ورود کرده و در آن محصور شده است. بنابراین، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی به مقدار ۱/۸۶ در IF =۱/۴۱۴ حاصل شده است. از مقایسه‌ی الگوهای پاسخ در عوامل ایزوتروپی مختلف ملاحظه می‌شود، اگرچه در IF =۰/۷۰۷ مسیر بزرگ‌نمایی بر خط مرکزی ناهمگنی متمرکز شده است، اما به‌علت عرض کم ناهمگنی، تأثیر حضور آن در پاسخ سطح زمین کم‌رنگ شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در نسبت شکل ۲/۰ (شکل ۱۲)، کمترین میزان بزرگ‌نمایی نسبت به حالت‌های پیشین به‌دست آمده است. آنچه مسلم

شکل ۱۰. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۱۱. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

است، ناهمگنی با نسبت شکل مذکور، تأثیر اندک در امواج لرزه‌یی دارد. در این حالت، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی در IF =۱/۴۱۴ به میزان ۱/۶۸ به‌وقوع پیوسته است.

در شکل‌های ۱۳ الی ۱۷، تغییرمکان سطح زمین در حضور ناهمگنی زیرزمینی با نسبت شکل‌های مختلف برای بسامدهای بی‌بُعد ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، و ۲/۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، با افزایش بسامد، میزان ارتعاش پاسخ همواره افزایش یافته است. تغییرمکان بیشینه در خط مرکزی ناهمگنی دایره‌ی ی برابر ۳/۶۴ در بسامد ۲/۰ و برای IF =۰/۷۰۷ به‌دست آمده است. مشابه نتایج قبل، کمینه‌ی عامل ایزوتروپی موجب تمرکز فازهای موج در امتداد قائم و

شکل ۱۲. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی ارتوتروپ (ζ =۵٪) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

پیرامون عارضه شده است. در ناهمگنی‌های بیضوی‌شکل، عملکرد ایزولاسیون قوی‌تری نسبت به ناهمگنی دایره‌یی در کاهش پاسخ به چشم می‌خورد. در نسبت شکل‌های ۰/۷۵ (شکل ۱۴) و ۰/۵ (شکل ۱۵)، هندسه‌ی عارضه موجب انعکاس معکوس موج از مرز تحتانی، تفرق امواج به سوی نوا حی پیرامونی، و ممانعت از تشکیل فاز خزشی موج شده است. از سوی دیگر، کوچک‌بودن ابعاد ناهمگنی موجب کاهش حجم امواج محصور درونی شده است. عوامل مذکور، موجب کاهش چشمگیر تغییرمکان نسبت به حالت دایره‌یی شده است. همچنین، به خوبی تأثیر ناهمگنی در ایجاد شکاف در جبهه‌ی موج برای نسبت شکل‌های ۱/۳۳ (شکل ۱۶) و ۲/۰ (شکل ۱۷) مشاهده می‌شود. در حالت‌های ذکر شده، محدوده‌ی ایزولاسیون ناشی از حضور عارضه با افزایش عامل

شکل ۱۳. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =۵٪) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۱۴. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۷۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۱۵. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۱۶. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۱/۳۳، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

ایزوتروپی گسترش یافته و فضای ایمن در موقعیت استقرار ناهمگنی پدید آمده است.

در شکل‌های ۱۸ الی ۲۲، تغییرمکان پیرامون ناهمگنی اُرتوتروپ واقع در نیم‌فضای اُرتوتروپ برای نسبت شکل‌های مختلف به نمایش گذاشته شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، شرایط بحرانی در بیشینه‌ی تغییرمکان ناحیه‌ی فوقانی ناهمگنی دایره‌یی به میزان ۴/۴ در IF=۰/۸۱۶ به‌دست آمده است. چنانچه در نسبت شکل ۰/۵ مشاهده می‌شود (شکل ۲۰)، بیشینه‌ی تغییرمکان

شکل ۱۷. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

در کمینه‌ی عامل ایزوتروپی و در نواحی جانبی نزدیک به خط مرکزی ایجاد شده است. در این حالت، با توجه به دخول حجم بیشتر امواج لرزه‌یی به درون ناهمگنی، همواره انعکاس‌های متناوب در درون عارضه فزونی می‌یابد. اما هندسه‌ی بیضوی ناهمگنی، موجب تمرکز امواج در پیرامون خط مرکزی و بروز تغییرمکان‌های بیشینه به میزان ۳/۸ شده است. در نسبت شکل‌های ۱/۳۳ (شکل ۲۱) و ۲/۰ (شکل ۲۲) نیز بیشینه‌ی تغییرمکان در عامل ایزوتروپی کمینه و در مرز زیرین ناهمگنی به میزان ۳/۲۵ حاصل شده است.

شکل ۱۸. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۱۹. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۷۵، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (۵٪= ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۲۰. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد پیرامون یک ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

۴.۴. عوارض گوشه‌دار

به‌منظور نمایش قابلیت رویکرد پیشنهادی در تهیه و تحلیل عوارض توپر دارای گوشه، یک ناهمگنی مربعی‌شکل با نسبت شکل واحد و عامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴ در نسبت عمق‌های ۱/۵، ۳/۰، ۴/۵، و ۶/۰ در نظر گرفته شده است. چنانچه

شکل ۲۱. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۱/۳۳، واقع در یک نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت عمق ناهمگنی از ۱/۵، دامنه‌ی نتایج به‌صورت قابل‌توجهی کاهش یافته است، به طوری که در نسبت عمق برابر با ۱/۵، دامنه‌ی بیشینه‌ی ۳/۲ در موقعیت عارضه ثبت شده است، در حالی که برای سایر حالت‌ها، این مقدار از ۲/۲۵ فراتر نرفته است. از سوی

شکل ۲۲. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میراشده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل ۲۳. دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بُعد سطح زمین در حضوریک ناهمگنی مربعی زیرزمینی اُرتوتروپ با نسبت عمق‌های مختلف، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی اُرتوتروپ (ζ =٪۵) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

دیگر، هر چه نسبت عمق عارضه افزایش یافته است، بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین از موقعیت استقرار عارضه به سوی نواحی پیرامونی‌انتقال یافته و مقدار بیشینه‌ی ۲/۹ برای نسبت عمق ۱/۵ را رقم زده است. همچنین، در نسبت عمق ۶/۰، اثر حضور عارضه در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین، تا حد زیادی از بین رفته است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک مطالعه‌ی عددی توسعه‌یافته با استفاده از روش اجزاء مرزی نیم‌فضای میراشده در حوزه‌ی زمان برای تحلیل لرزه‌یی سطح زمین در حضور ناهمگنی نرم اُرتوتروپ انجام شده است. نحوه‌ی پراکنش امواج مهاجم لرزه‌یی SH در حضور عارضه‌ی مذکور توسط نتایج حوزه‌ی زمان و در قالب تصاویر لحظه‌یی در اهم لحظات ارائه شده است. در ادامه، کالبد بزرگ‌نمایی سطح زمین با محوریت پارامترهای کلیدی، مانند: عامل ایزوتروپی، محتوای بسامدی، و نسبت شکل عارضه ارائه شده است. در انتها، پیرامون تکمیل نتایج، برخی منحنی‌های دوبُعدی تغییرمکان برای نقاط مختلف از سطح زمین و عارضه، حساسیت‌سنجی شده است. برخی دستاوردهای پژوهش حاضر به این شرح جمع‌بندی شده است:

۱- در کمینه (۰/۷۰۷) و بیشینه‌ی (۱/۴۱۴) عامل ایزوتروپی مفروض، به ترتیب بیشینه و کمینه‌ی احتباس موج در ناهمگنی مدفون مشاهده شده است.

۲- هر چه هندسه‌ی ناهمگنی دوارتر شده است، سهولت در تشکیل فاز خزشی موج و متعاقباً، ارتعاش بیشتر پاسخ در حصول دامنه‌ی قوی‌تر مشاهده شده است.

۳- با کاهش نسبت شکل ناهمگنی، نه فقط تعویق در تکرر انعکاس، بلکه حجم تداخل امواج درونی نیز کاهش یافته است.

۴- هر چند افزایش نسبت شکل ناهمگنی در تقویت پاسخ مؤثر بوده است؛ لیکن افزایش عامل ایزوتروپی در تضاد با آن، سبب کاهش ارتعاش و زمان همگرایی جبهه‌ی موج قائم شده است.

۵- بیشینه‌ی مقدار بزرگ‌نمایی در کمینه‌ی عامل ایزوتروپی (۰/۷۰۷) به میزان ۲/۰۸ بر روی سطح زمین به‌دست آمده است.

۶- بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییرمکان پیرامون عارضه به میزان ۴/۴ در عامل ایزوتروپی ۰/۸۱۶ تعیین شده است.

۷- عملکرد ایزولاسیون حضور ناهمگنی بیضوی در کاهش پاسخ سطح زمین در قیاس با عارضه‌ی دایروی برتر بوده است.

۸- در ناهمگنی مربعی‌شکل، افزایش نسبت عمق عارضه از ۱/۵ به ۳/۰، موجب کاهش ۱/۰ واحدی بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین در موقعیت استقرار عارضه و انتقال نقاط بحرانی به نواحی پیرامونی شده است.

تعارض منافع

پژوهش حاضر، با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان (www.bmn.ir) با شناسه‌ی اعطای ۵۰۱۱۰۰۰۰۳۹۶۷ و شناسه‌ی استاندارد بین‌المللی (ISNI) ۰۰۰۰-۰۰۰۴-۵۹۰۷-۰۰۸۹، برای دریافت درجه‌ی پسادکتری از دانشگاه آزاد اسلامی زنجان (www.iauz.ac.ir) صورت گرفته است.

تقدیر و تشکر

با تشکر فراوان از بنیاد ملی نخبگان (www.bmn.ir)، که با حمایت مالی خود، زمینه‌ی پیشرفت هر چه بهتر و بیشتر طرح پژوهشی حاضر را برای نویسندگان فراهم کرده‌اند. امید است در پرتو عنایت‌های الهی، در حمایت از محققان و پژوهشگران کشور عزیزمان، برای اعتلای علمی و فرهنگی ایران قوی، همواره موفق و ثابت‌قدم باشند. ان‌شاءا...

References - منابع

1. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and Jafari, M.K., 2013. Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys J Int*, *194*(3), 1849-1865. https://doi.org/10.1093/gji/ggt200

2. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and Jafari, M.K., 2014. Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophys J Int*, *197*(1), 591-607. https://doi.org/10.1093/gji/ggu012

3. Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S. and Yasemi, F., 2020. A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion. *Comp. Geosci.*, *134*,104342. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104342.

4. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2018. Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-waves. *Earthq Sci*, *31*, 1-17. http://dx.doi.org/10.29382/eqs-2018-0137-3

5. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2020. Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J Earthq Tsu*, *14*(1), 2050005. https://doi.org/10.1142/S1793431120500050

6. Li, Y.G., 1988. *Seismic wave propagation in anisotropic media with applications to denning fractures in the Earth* [Ph.D. dissertation]. University of Southern California.

7. Babuska, V. and Cara, M. 1991. *Seismic anisotropy in the Earth*. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, MA, 1991. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3600-6

8. Aki, K., 1993. Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophys*, *218*(1-3), 93-111. https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90262-I

9. Ke, J., 2012. A new model of orthotropic bodies. *Appl Mech Mater*, *204*, 4418-4421. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4418

10. Vinh, P.C., Anh, V.T.N. and Linh, N.T.K., 2016. Exact secular equations of Rayleigh waves in an orthotropic elastic half-space overlaid by an orthotropic elastic layer. *Int J Sol Struct*, *83*, 65-72. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.12.032

11. Gupta, S., Smita, S. and Pramanik, S., 2017. Refelction and refraction of *SH*-waves in an orthotropic layer sandwiched between two distinct dry sandy half-space. *Procedia Eng*, *173*, 1146-1153. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.084

12. Rajak, B.P. and Kundu, S., 2019. Love wave propagation in a sandy layer under initial stress lying over a pre-stressed heterogeneous orthotropic half-space. *AIP Conference Proceedings*, *2061*(1), 020015. https://doi.org/10.1063/1.5086637

13. Aki, K. and Larner, K.L., 1970. Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane *SH*-waves, *J Geophys Res*, *75*(5), 933-954. https://doi.org/10.1029/JB075i005p00933

14. Varadan, V.K., Varadan, V.V. and Pao Y.H., 1978. Multiple scattering of elastic waves by cylinders of arbitrary cross section, I, *SH*-waves, *J Acoust Soc Am*, *63*(5), 1310-1319. https://doi.org/10.1121/1.381883

15. Campillo, M. and Bouchon, M., 1985. Synthetic *SH*-seismograms in a laterally varying medium by the discrete wavenumber method. *Geophys J Int*, *83*, 307-317. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1985.tb05168.x

16. Chen, J., Liu, Z.X. and Zou, Z.Z., 2002. Transient internal crack problem for a nonhomogeneous orthotropic strip (mode I). *Int J Eng Sci*, *40*, 1761-1774. https://doi.org/10.1016/S0020-7225(02)00038-1

17. Rangelov, T.V., Manolis, G.D. and Dineva, P.S., 2010. Wave propagation in a restricted class of orthotropic inhomogeneous half-planes. *Acta Mechanica*, *210*, 169-182. https://doi.org/10.1007/s00707-009-0199-7

18. Bagault, C., Nélias, D. and Baietto, M., 2012. Contact analyses for anisotropic half space: effect of the anisotropy on the pressure distribution and contact area. *Int J Sol Struct*, *134*(3), 031401-031409. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.11.002

19. Sanchez-Sesma, F.J., Palencia, V.J. and Luzon, F., 2002. Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *ISET J Earthq Technol*, *39*(3), 167-193.

20. Eidel, B. and Gruttmann, F., 2003. Elastoplastic orthotropy at finite strains: multiplicative formulation and numerical implementation. *Comput Mater Sci*, *28*, 732-742. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.08.027

21. Sladek, J., Sladek, V., Zhang, C., Krivacek, J. and Wen, P., 2006. Analysis of orthotropic thick plates by meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) method. *Int J Numer Methods Eng*, *67*, 1830-1850. https://doi.org/10.1002/nme.1683

22. Petrolito, J., 2014. Vibration and stability analysis of thick orthotropic plates using hybrid-Trefftz elements. *Appl Math Model*, *38*, 5858-5869. https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.04.026

23. Nguyen, M., Nha, N., Bui, T.Q. and Tich, T.T., 2017. A novel numerical approach for fracture analysis in orthotropic media. *Sci Tech Dev J*, *20*, 5-13.

24. Guler, M.A., Kucuksucu, A., Yilmaz, K. and Yildirim, B., 2017. On the analytical and finite element solution of plane contact problem of a rigid cylindrical punch sliding over a functionally graded orthotropic medium. *Int J Mech Sci*, *120*(C), 12-29. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.004

25. Gupta, S., Smita, S. and Pramanik, S., 2017. *SH*-wave in a multilayered orthotropic crust under initial stress: A finite difference approach. *Cogent Math*, *4*(1), https://doi.org/10.1080/23311835.2017.1284294

26. Comez, I., Yilmaz, K., Guler, M. and Yildirim, B., 2019. On the plane frictional contact problem of a homogeneous orthotropic layer loaded by a rigid cylindrical stamp. *Arch Appl Mech*, *89*, 1403-1419. https://doi.org/10.1007/s00419-019-01511-6

27. Lee, J.K., Han Y.B. and Ahn, Y.J., 2015. *SH*-wave scattering problems for multiple orthotropic elliptical inclusions. *Adv Mech Eng*, *5*, 1-14. https://doi.org/10.1155/2013/370893

28. Lee, J.K., Lee, H. and Jeong, H., 2016. Numerical analysis of *SH*-wave field calculations for various types of a multilayered anisotropic inclusion. *Eng Analy BE*, *64*, 38-67. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.11.015

29. Dominguez, J., 1993. *Boundary elements in dynamics*, Comp Mech Pub, Southampton, Boston.

30. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2019. Seismic amplification pattern of the ground surface in presence of twin unlined circular tunnels subjected to *SH*-waves. *J Transp Infrast Eng*, 2019. https://doi.org/10.22075/jtie.2019.16056.1342 [In Persian]

31. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2021. Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane *SH*-wave propagation. *J Earthq Eng*. https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1927886

32. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2021. On Subsurface Box-Shaped Lined Tunnel under Incident *SH*-wave Propagation. *Front Struct Civ Eng*. https://doi.org/10.1007/s11709-021-0740-x

33. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., 2021. Seismic antiplane response of gaussian-shaped alluvial valley. *Sharif J Civ Eng*. https://doi.org/10.24200/j30.2020.56151.2801 [In Persian]

34. Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M. and Kamalian, M., 2020. On subsurface multiple inclusions model under transient *SH*-wave propagation. *Wave Rand Compl Med*. https://doi.org/10.1080/17455030.2020.1842553

35. Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M. and Kamalian, M., 2021. A review on *SH*-wave propagation for orthotropic topographic features. *Bull Earthq Sci Eng*, *8*(1), 1-15. https://doi.org/10.48303/bese.2021.244240 [In Persian]

36. Leung, K.L., Vardoulakis, I.G., Beskos, D.E. and Tasoulas, J.L., 1991. Vibration isolations by trenches in continuously nonhomogeneous soil by the BEM. *Soil Dyn Earthq Eng*, *10*, 172-179. https://doi.org/10.1016/0267-7261(91)90030-4

37. Hisada, J., 1992. The BEM based on the Green's function of the layered half-space and the normal mode solution. *In Proceedings of Conference on Effects of Surface Geology*, Odawara.

38. Rajapakse, R.K.N.D. and Gross, D., 1995. Transient response of an orthotropic elastic meduim with a cavity. *Wave Motion*, *21*, 231-252. https://doi.org/10.1016/0165-2125(94)00050-F

39. Zheng, T. and Dravinski, M., 1998. Amplification of *SH*-waves by an orthotropic basin. *Earthq Eng Struct Dyn*, *27*, 243-257. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199803)27:3<243::AID-EQE727>3.0.CO;2-J

40. Zheng, T. and Dravinski, M., 1999. Amplification of waves by an orthotropic basin: Sagittal plane motion. *Earthq Eng Struct Dyn*, *28*, 565-584. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199906)28:6<565::AID-EQE825>3.0.CO;2-Q

41. Ahmad, S., Leyte, F. and Rajapakse, R.K.N.D., 2001. BEM analysis of two-dimensional elastodynamic problems of anisotropic solids. *J Eng Mech, ASCE*, *27*(2), 149-156. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:2(149)

42. Ge, Z., 2010. Simulation of the seismic response of sedimentary basins with constant-gradient velocity along arbitrary direction using boundary element method: *SH*-case. *Earthq Sci*, *23*, 149-155. https://doi.org/10.1007/s11589-009-0060-z

43. Dineva, P., Manolis, G., Rangelov, T. and Wuttke, F., 2014. *SH*-wave scattering in the orthotropic half-plane weakened by cavities using BIEM. *Acta Acustica united Acustica*, *100*, 266-276. https://doi.org/10.3813/AAA.918706

44. Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M. and Kamalian, M., 2022. Attenuated orthotropic time-domain half-space BEM for *SH*-wave scattering problems. *Geophys J Int*. https://doi.org/10.1093/gji/ggac032

45. Kausel, E., 2006. *Fundamental solutions in elastodynamics*. Cambridge University Press, 9780511546112. Massachusetts Institute of Technology. https://doi.org/10.1017/CBO9780511546112

46. Jin, F., Pekau, O.A. and Zhang, C.H., 2001. A 2-D time-domain boundary element method with damping. *Int J Numer Meth Eng*, *51*(6), 647-661. https://doi.org/10.1002/nme.172

47. Barkan, D.D., 1962. *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill Series In Soils Engineering and Foundations.

48. Galvin, P. and Domínguez, J., 2007. Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains, *Eng. Analy. B.E.*, *31*(11), 931-941. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2007.03.003

49. Israil, A.S.M. and Banerjee, P.K., 1990. Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics. *Int J Numer Methods Eng*, *29*(7), 1421-1440. https://doi.org/10.1002/nme.1620290704

50. Ricker, N., 1953. The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophys*, *18*(1), 10-40. https://doi.org/10.1190/1.1437843

51. Dravinski, M. and Yu, M.C., 2011. Scattering of plane harmonic *SH*-waves by multiple inclusions. *Geophys J Int*, *186*, 1331-1346. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05111.x

52. Ahmed, H., 1989. Applications of mode-converted shear waves to rock-property estimation from vertical seismic profiling data. *Geophysics*, *54*(4), 478-485. https://doi.org/10.1190/1.1442674

53. Niehoff, J.W., 2010. The Use of Geophysical Methods to Detect Abandoned Mine Workings. *GeoTrends 2010*, ASCE. https://doi.org/10.1061/41144(391)11

54. Roy, S. and Stewart, R.R., 2012. Near-surface seismic investigation of barringer (meteor) crater, Arizona. *J Env Eng Geophys*, *17*(3), 117-127. https://doi.org/10.2113/JEEG17.3.117

55. Ellefsen, K.J., Burton, W.C. and Lacombe, P.J., 2012. Integrated characterization of the geologic framework of a contaminated site in west trenton, New Jersey. *J Appl Geophys*, *79*, 71-81. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.008

56. Rucker, M.L., Crum, G., Meyers. R. and Lommler, J.C., 2005. Geophysical identification of evaporite dissolution structures beneath a highway alignment. *Sinkholes and the Eng Env Impacts Karst,* ASCE. https://doi.org/10.1061/40796(177)70

57. Robinson, J.L. and Anderson, N.L., 2008. Geophysical Investigation of the Delaware Avenue Sinkhole Nixa, Missouri. *Sinkholes Eng Env Imp Karst*, ASCE. https://doi.org/10.1061/41003(327)7

58. Nettles, S., Jarret, B. and Cross, E.C., 2010. Application of surface geophysics for providing a detailed geotechnical assessment of a large resort development site in anguilla, BWI. *GeoFlorida 2010*, GSP 199, ASCE. https://doi.org/10.1061/41095(365)46

59. Parker, E.H. and Hawman, R.B., 2012. Multichannel analysis of surface waves (MASW) in karst terrain, southwest Georgia: implications for detecting anomalous features and fracture zones. *J Eng Env Geophys*, *17*(3), 129-150. https://doi.org/10.2113/JEEG17.3.129

60. Lingle, R. and Jones, A.H., 1977. Comparison of log and laboratory measured *P*-wave and *S*-wave

velocities. *Soc Prof Well Log Analysts*, 18th Annual Logging Symposium.

61. Eastwood, R.L. and Castagna, J.P., 1983. Basis for the Interpretation of Vp/Vs Ratiosd in Complex Lithologies. *Soc Prof Well Log Analysts*, 24th Annual Logging Symposium.

62. Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., 1984. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, *50*(4), 571-581. https://doi.org/10.1190/1.1441933

63. Hiltunen, D.R., 2005. Practical applications of engineering geophysics to help solve tough problems and lead to improved technologies. *Soil Dyn Symp Honor Prof Richard D Woods*, GSP 134, ASCE. https://doi.org/10.1061/40780(159)3

64. Schön, J.H., 2015. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics, Chapter 4. *Dev Petrol Sci*, *65*, 109-118.

65. Zhang, X., Tsang, L., Wang, Y. and Zhao, B., 2009. Petrologic composition model of the upper crust in Bohai Bay basin, China, based on Lame impedances. *Applied Geophysics*, *6*, 327-336. https://doi.org/10.1007/s11770-009-0039-5

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص.۸۵-۹۵ ، (یادداشت فنی)

Research Note

توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی

بهناز یادگاری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان
امیرمسعود رحیمی* (دانشیار)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان
محسن ابوطالبی اصفهانی (دانشیار)
دانشکده‌ی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

حمل و نقل کارآمد کالا برای کاهش هزینه‌ها، تسریع زمان تحویل، و بهبود کیفیت خدمات ضروری است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی (VRPTW)، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی NP-hard در لجستیک است. در نوشتار حاضر، یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مؤثر مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی ارائه شده است. تابع هدف روی کمینه‌سازی کل مسافت طی‌شده و تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده تمرکز دارد. برای ارزیابی اثربخشی، الگوریتم با مجموعه‌ی داده‌های شبیه‌سازی‌شده از نمونه‌های سالامون آزمایش شده است. تجزیه و تحلیل مقایسه‌یی با سایر الگوریتم‌های موجود برتری آن را از نظر کیفیت راه‌حل و کارایی محاسباتی برجسته می‌کند. برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۵۰ مشتری تا ۵۹/۴۸٪ بهبود در پاسخ‌های پیشین و برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۱۰۰ مشتری در تعدادی از نمونه‌ها پاسخ‌های بهینه سراسری به‌دست‌آمده از نوشتارهای پیشین به‌دست‌آمده است. الگوریتم پیشنهادی برای سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک با مشتری محدود مناسب است و منجر به کاهش هزینه‌ها، بهبود زمان تحویل، و افزایش کیفیت خدمات می‌شود.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی ترکیبی انتخاب مسیر- وسیله‌ی نقلیه، مسئله‌ی مسیریابی وسیله ی نقلیه، پنجره‌ی زمانی، بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها، الگوریتم ژنتیک.

behnazyadegari@gmail.com
amrahimi@znu.ac.ir
m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

۱. مقدمه

حمل و نقل، یکی از بخش‌های عمده و مهم از اقتصاد هر کشوری به‌شمار می‌رود و همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی محصول‌های نهایی است. توسعه‌ی روزافزون شهرنشینی، صنایع، و بخصوص صنایع پشتیبانی، جابجایی انسان و کالا را به‌صورت مسئله‌یی درآورده است که پیچیدگی آن دائماً در حال افزایش است. رشد شهری و شهرنشینی باعث افزایش فزاینده‌ی تقاضا در صنعت حمل و نقل شده است، که به‌تبع آن شهرها و صنایع بزرگ را دست به گریبان مشکلات زیادی در زمینه‌های تراکم ترافیک، آلودگی هوا، اتلاف وقت طولانی در مسیر سفرهای روزانه‌ی افراد، افزایش مصرف سوخت، و استهلاک وسائط نقلیه، و غیره کرده است. برای حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، صنایع تولیدی و بخش خدمات نیاز به یک سیستم مجهز و کارآمد حمل و نقل دارند. همچنین لازم است که سیستم مذکور، صرفه جویی در هزینه‌ها را با درنظرگرفتن سرویس بیشینه و استفاده‌ی بهینه از سرمایه و تجهیزات حاصل کند. توزیع بهینه‌ی مواد غذایی، روزنامه، محموله‌های پستی، نظافت خیابان‌ها، حمل‌ونقل داخل سازمانی، مسیر حرکت اتوبوس‌ها، سرویس مدارس، سیستم‌های توزیع و نگهداری پخش پول، و سرویس‌های بانکی و جمع‌آوری زباله‌های صنعتی و تجاری، و غیره از جمله مسائلی است که می‌توان در این زمینه به آن‌ها اشاره کرد.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی (VRPTW)[1] اهمیت قابل توجهی در سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک دارد؛ که شامل طراحی مسیرهای کارآمد برای ناوگان وسائط نقلیه برای خدمت به مجموعه‌یی از مشتریان است. هر مسیر از انبار شروع و با انبار پایان می‌یابد و هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله‌ی نقلیه و فقط یک بار بازدید می‌شود. علاوه‌بر این، مسیرها باید به محدودیت‌های ظرفیت وسیله‌ی نقلیه و محدودیت‌های زمانی اعمال‌شده توسط مشتریان پایبند باشند.

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲.

استناد به این مقاله:
یادگاری، بهناز، رحیمی، امیرمسعود، و ابوطالبی اصفهانی، محسن، ۱۴۰۳. توسعه‌ی الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی ، ۴۰(۴)، صص. ۸۵-۹۵. DOI: 10.24200/j30.2024.63335.3268 .

[1] Vehicle Routing Problem with Time Window

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی دو هدف کلیدی را در بر می‌گیرد. هدف اصلی، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه‌ی موردنیاز برای خدمات‌رسانی مؤثر به همه‌ی مشتریان است. با بهینه‌سازی تخصیص وسیله‌ی نقلیه، هزینه‌های حمل و نقل را می‌توان کاهش داد و راندمان عملیاتی را افزایش داد. هدف ثانویه در کمینه‌سازی کل مسافت طی‌شده توسط وسائط نقلیه متمرکز است. هدف بخش حاضر، بهینه‌سازی مسیریابی برای اطمینان از بهره‌وری سوخت، کاهش انتشار کربن، و زمان تحویل کوتاه‌تر است. پرداختن به مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی برای بهبود کارایی حمل و نقل و لجستیک بسیار مهم است. با حل مسئله‌ی اخیر، شرکت‌ها می‌توانند از طریق کاهش استفاده از خودرو، افزایش رضایت مشتری به‌دلیل تحویل به موقع و بهبود استفاده از منابع به صرفه‌جویی در هزینه‌ها دست یابند. الگوریتم‌ها و رویکردهای بهینه‌سازی مختلف برای یافتن راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه، برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی در حال توسعه هستند. این پیشرفت‌ها در روش‌های بهینه‌سازی مسیریابی به اثربخشی و عملکرد کلی سیستم‌های حمل و نقل و لجستیک کمک می‌کند.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی یک مسئله‌ی شناخته‌شده‌ی Np-Hard[۱] [1] است، که در زمینه‌ی لجستیک و تجارت الکترونیک امروزی به ابزاری حیاتی تبدیل شده است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، یکی از مهم‌ترین انواع مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی نقلیه در زمینه‌ی پژوهش عملیاتی است. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، کاربردهای گسترده‌یی دارد. به‌عنوان مثال، در خدمات تحویل آنلاین مواد غذایی (AHD) [۲] کاربرد دارد. محبوبیت تحویل مواد غذایی در طول همه‌گیری اخیر کوید ۱۹ افزایش یافته است.

مشخصه‌ی اصلی مسائل AHD این است که مشتریانی که مواد غذایی را به‌صورت آنلاین سفارش داده‌اند، باید در محل باشند تا سفارش‌های خود را دریافت کنند؛ زیرا کالاهای فاسدشدنی را نمی‌توان بدون مراقبت مانند بسته‌های معمولی تحویل داد. تحویل متعهدانه‌ی سفارش‌ها، مستلزم تنظیم پنجره‌های زمانی است، که در طی آن مشتریان در محل حاضر هستند تا سفارش خود را دریافت کنند. برای این منظور، شرکت‌هایی که مواد غذایی را به‌صورت آنلاین می‌فروشند باید با VRPTW سروکار داشته باشند، تا خدماتی را تضمین کنند که برای مشتریان‌شان رضایت‌بخش باشد و در عین حال برای شرکت مقرون به‌صرفه باشد. نمونه‌های بیشتر برای مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه با محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی عبارت‌اند از:

برنامه‌ریزی نصب کنتورهای هوشمند،[۲] که به برنامه‌ریزی شیفت‌های اپراتورهای خدمات کنتور هوشمند در مناطق روستایی اتریش می‌پردازد. برنامه‌ریزی نصب کنتورهای هوشمند، نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های انرژی، و افزایش کارایی انرژی دارد. علاوه‌بر این، نصب صحیح و به موقع کنتورهای هوشمند از مسائل فنی، مالی، و امنیتی حائز اهمیت است.

مسائل مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی مراقبت‌های بهداشتی در منزل (HHCRSP)[۳]، [۳] به جایگاه مراقبت‌های بهداشتی در منزل (شامل یک طیف گسترده از خدمات بهداشتی که در منزل بیماران در صورت بیماری یا آسیب ارائه می‌شود)، می‌پردازد. در سطح عملیاتی، دو مسئله‌ی اصلی وجود دارد: مسئله‌ی اختصاص اپراتور و مسئله‌ی مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی مراقبت‌های بهداشتی در منزل، که راه‌حل‌های مسیریابی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی از مدل‌های موجود متمایز می‌شوند.

وانگ و واسیل[۴] (۲۰۲۱)، [۴]، کاملاً ادبیات موضوع اخیر را بررسی کرده‌اند. هر دو رویکرد دقیق و احتمالی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی پیشنهاد شده‌اند. محدودیت پنجره‌ی زمانی توسط سالامون[۵] (۱۹۸۷)، به VRP کلاسیک اضافه شد و مجموعه‌یی از مسائل معیار را معرفی کرد، که به‌عنوان "مسائل سالامون" شناخته می‌شود. سالامون، مسئله‌ی برنامه‌ریزی و مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره‌ی زمانی را به‌عنوان یک مسئله‌ی عدد صحیح مختلط فرموله کرد و روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای ابتکاری‌های خوشه- مسیر ارائه‌شده توسط فیشر و جایکومارف را برای حل آن توسعه داد. دسرووچرس[۶] و همکاران (۱۹۸۴)، یک رویکرد دقیق را با استفاده از روش تولید ستونی برای VRPTW توسعه داده‌اند.[۵] روش‌های ابتکاری برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی توسط سالامون (۱۹۸۵) ارائه شد، که وی از چهار الگوریتم ابتکاری: روش درج، روش نزدیک‌ترین همسایگی زمین‌گرا، روش صرفه‌جویی کلارک، و روش جاروکردن برای حل مسئله‌ی اخیر استفاده کرده است.[۶]

مطالعات بسیاری در زمینه‌ی توسعه‌ی الگوریتم‌های دقیق برای حل مسئله مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی ارائه شده است، که یک مرور کلی بر روی آن‌ها در نوشتار کالیهوگ[۷] و همکاران (۲۰۰۷)، [۷] بررسی شده است. با این حال، برای نمونه‌های مسائل بزرگ، همان‌طور که در عمل اتفاق می‌افتند، باید از روش‌های ابتکاری (فرا ابتکاری) برای استخراج راه‌حل‌های تقریبی در زمان قابل قبول استفاده کرد.

در نوشتار حاضر، یک روش نوین برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی ارائه شده است، که از ترکیب الگوریتم ازدحام گربه‌ها (CSO)[۸] و عملگرهای الگوریتم ژنتیکی بهره می‌برد. در روش مذکور، ابتدا با استفاده از الگوریتم ازدحام گربه‌ها، جمعیتی از گربه‌ها به عنوان حلقه‌های مسیر ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیکی، جهت بهبود جمعیت و به دست‌آوردن حل بهینه، عملیات تکاملی انجام می‌شود. علاوه‌بر این، از روش تولید تصادفی (PFIH)[۹] برای ایجاد حل اولیه استفاده می‌شود، تا به یک جمعیت اولیه‌ی کارآمد برای الگوریتم ژنتیکی منجر شود.

ترکیب اخیر الگوریتم‌ها امکان بهبود عملکرد و دقت الگوریتم را افزایش

[۱] Non-determinist ic Polynomial Time

[۲] Attended Home Delivery

[۳] The Home Health Care Routing and Scheduling Problem

[۴] Wang & Wasil

[۵] Solomon

[۶] Desrosiers

[۷] Kallehauge

[۸] Cat Swarm Optimization

[۹] Push-Forward Insertion Heuristic

می‌دهد، زیرا هر کدام از آن‌ها، ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند، که با ترکیب آن‌ها، عملکرد بهتری برای حل مسئله ارائه می‌دهند.

الگوریتم ازدحام گربه‌ها در ابتدا توسط چو[۱] و همکارانش (۲۰۰۸)،[۸] پیشنهاد شد و در سال‌های اخیر به شدت مطالعه و انواع مختلفی از آن ایجاد شد. ژی[۲] و همکاران (۲۰۲۰)،[۹] نیز از یک روش بهبودیافته‌ی الگوریتم CSO برای حل یک مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه استفاده کرده و کارایی الگوریتم را برای حل مسائل مذکور نشان داده‌اند. الوارنجا[۳] و همکاران (۲۰۰۷)،[۱۰] از الگوریتم CSO در شکل اصلی خود و بدون روش‌های بهبوددهنده برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی استفاده کردند، که بر روی یک مجموعه داده‌ی معیار به نام نمونه‌های سالامون آزمون شده و نتایج نشان داده است که الگوریتم CSO بدون روش‌های بهبوددهنده تا نمونه‌های با ۲۵ مشتری را پاسخگو است. در نوشتار مذکور با پیاده‌سازی و ترکیب عملگرهای ژنتیکی بر روی الگوریتم CSO، کارایی الگوریتم CSO برای نمونه‌های بزرگ‌تر برآورد شده است.

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی است، که یک گراف کامل است و هر راه‌حل، یک گراف زیرمجموعه‌ی گراف کامل است. پاسخ‌های اولیه با استفاده از روش PFIH تولید شده‌اند. محدودیت‌های مسئله در طی ایجاد راه‌حل برآورده می‌شوند. الگوریتم دو هدف مسئله را با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری ترکیب می‌کند. استفاده از یک تابع تانژانت وارون برای نرمال‌سازی فاصله‌ی کل پیموده‌شده توسط وسائط نقلیه در بازه‌ی [۱ ، ۰]، باعث می‌شود که کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه نسبت به فاصله‌ی پیموده‌شده اولویت داشته باشد. روش نرمال‌سازی ذکرشده برای اهداف مسئله، ساده و مفید است.

الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی مذکور بر روی ۵۶ نمونه‌ی سالامون آزمایش شده و نتایج آزمایش‌ها، کارایی الگوریتم پیشنهادی را برای نمونه‌های با مشتری کم نشان داده است. برای نمونه‌های با تعداد مشتری بیش از ۱۰۰ در دسته‌های C عملکرد خوبی نشان داده است. در ادامه‌ی نوشتار، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی در بخش دوم تعریف و سپس در بخش سوم، الگوریتم ترکیب‌شده‌ی CSO با عملگرهای ژنتیکی شرح داده شده است. در بخش چهارم، الگوریتم مذکور برای مسئله، نتایج عددی در بخش پنجم، و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه شده‌اند.

۲. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه

در مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه همراه با پنجره‌ی ناوگانی از وسائط نقلیه‌ی V وجود دارد، که باید به مجموعه‌یی از مشتریان با پنجره‌های زمانی خاص خدمات ارائه دهند. هدف، کمینه‌سازی کل مسافت طی‌شده یا تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده با رعایت محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی است.

هر مسیر از دپو شروع می‌شود و پس از ارائه‌ی خدمات به تعدادی از مشتریان با برگشت به دپو خاتمه پیدا می‌کند. تعداد مسیرها برابر با تعداد وسائط نقلیه یعنی K است. برای هر مسیر، هزینه C_{ij} و زمان t_{ij} فاصله‌ی اقلیدسی بین دو مشتری i و j را نشان می‌دهند. هر مشتری در شبکه فقط یک بار و q_k توسط یک وسیله‌ی نقلیه سرویس می‌گیرند.

ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه، m_i تقاضای هر مشتری، $\left[e_i, l_i\right]$ پنجره‌ی زمانی هر مشتری، t_i بیان‌کننده‌ی زمان شروع سرویس در گره‌ی i، s_i زمان سرویس‌دهی برای هر مشتری، w_i زمان انتظار برای شروع پنجره‌ی زمانی برای وسائط نقلیه‌یی که زودتر می‌رسند، r_k بیشینه‌ی زمان سفر هر وسیله‌ی نقلیه و متغیر x_{ijk} نشان‌دهنده‌ی وجود یا عدم وجود سفر، که در آن‌ها $i, j = ۰,۱,۲,...,N; i \neq j$ و $k = ۰,۱,۲,...K$ است.

هدف این تابع (رابطه‌ی ۱)، پیدایش مجموعه‌یی از مسیرهاست، که در آن‌ها تمامی مشتریان در حالی سرویس ببینند که تمام محدودیت‌های مسئله ارضاء شود.

$$Minimize\, Z_۱ = NV \;\; and \;\; Minimize \quad Z_۲ = \sum_{i=۰}^{N} \sum_{j=۰, j\neq i}^{N} \sum_{k=۱}^{K} c_{ij} x_{ijk} \qquad (۱)$$

که در آن، روابط ۲ الی ۱۰ برقرار است:

$$for \quad i = ۰ \quad \sum_{k=۱}^{K} \sum_{j=۱}^{N} x_{ijk} \leq K \qquad (۲)$$

$$for \quad i = ۰ \quad and \quad k \in ۱,..,k \quad \sum_{j=۱}^{N} x_{ijk} = \sum_{j=۱}^{N} x_{jik} \leq ۱ \qquad (۳)$$

$$for \quad i \in ۱,..N \quad \sum_{k=۱}^{K} \sum_{j=۰, j\neq i}^{N} x_{ijk} = ۱ \qquad (۴)$$

$$for \quad j \in ۱,..N \quad \sum_{k=۱}^{K} \sum_{i=۰, i\neq j}^{N} x_{ijk} = ۱ \qquad (۵)$$

$$for \quad k \in ۱,...,K \quad \sum_{i=۱}^{N} m_i \sum_{j=۰, j\neq i}^{N} x_{ijk} \leq q_k \qquad (۶)$$

$$for \quad k \in ۱,...,K \quad \sum_{i=۰}^{N} \sum_{j=۰, j\neq i}^{N} x_{ijk} \;\; t_{ijk} + s_i + w_i \;\; \leq r_k \qquad (۷)$$

$$t_۰ = w_۰ = f_۰ \qquad (۸)$$

$$for \quad j \in ۱,...,N \quad \sum \sum x_{ijk} \;\; t_i + t_{ij} + s_i + w_i \;\; \leq t_j \qquad (۹)$$

$$for \quad i \in ۱,...,N \quad e_i \leq \; t_i + w_i \; \leq l_i \qquad (۱۰)$$

رابطه‌ی ۱، نشان‌دهنده‌ی تابع هدف مسئله است. رابطه‌ی ۲ بیان می‌کند که بیشینه‌ی K مسیر از دپو خارج می‌شوند. رابطه‌ی ۳ تضمین می‌کند که شروع و پایان هر مسیر در دپو است. رابطه‌های ۴ و ۵ بیان می‌کنند که همه‌ی مشتری‌ها فقط یک بار و توسط یک وسیله‌ی نقلیه باید سرویس داده شوند. رابطه‌ی ۶، محدودیت ظرفیت را در بردارد. رابطه‌ی ۷، محدودیت بیشینه‌ی زمان سفر را بیان می‌کند. رابطه‌های ۸ الی ۱۰، محدودیت پنجره‌ی زمانی را اعمال می‌کنند. این فرمول‌سازی یک جواب موجه برای مسئله مشخص می‌کند.

[۱] CHU

[۲] Ji

[۳] Alvarenga

برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی، تابع‌های هدف‌های متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی دو هدف دارد. هدف اول، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه و هدف دوم، کمینه‌سازی مسافت طی‌شده است؛ که آن‌ها مطابق رابطه‌ی ۱۱ ترکیب می‌شوند:

$$fitness\ x_i = NV\ x_i + normalize\ TD\ x_i \qquad (۱۱)$$

که در آن، NV تعداد وسائط نقلیه‌ی استفاده‌شده و TD مسافت کل طی‌شده است و نرمال‌سازی فاصله‌ی کل طبق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود؛ که طبق آن، برازندگی هر گربه به تعداد وسائط نقلیه و فاصله‌ی کل طی‌شده بستگی دارد. با توجه به اینکه NV، یعنی هدف اولیه همیشه دارای یک مقدار صحیح است و برای دو راه‌حل مختلف همیشه: $\left|NV\ x_i - NV\ x_j\right| \geq ۱$ برقرار است، با نرمال‌سازی فاصله‌ی کل در بازه‌ی [۰، ۱]، کمینه‌سازی تعداد وسائط نقلیه در اولویت تابع هدف قرار می‌گیرد.

$$normalize(x) = \arctan(x) / \left(\frac{\pi}{۲}\right) \qquad (۱۲)$$

۳. الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها با عملگرهای ژنتیکی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها، یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت با الهام از الگوی رفتاری گربه‌هاست. گربه‌ها رفتار اجتماعی جذابی را نشان می‌دهند، که به‌مدت طولانی توجه انسان را جذب می‌کند. گربه‌ها بیشتر وقت خود را صرف استراحت می‌کنند، آن‌ها همیشه گوش به زنگ باقی می‌مانند، و می‌توانند یک مهارت شکار خوب را داشته باشند. الگوریتم گربه‌ها بدون روش‌های بهبوددهنده در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)،[۱۰] شرح داده شده است.

در ابتدا تعداد N گربه تولید و موقعیت، سرعت، و مقدار رجیستر پرچم برای هر گربه مقداردهی می‌شود. با توجه به تابع شایستگی، گربه‌ها ارزیابی می‌شوند و موقعیت گربه‌یی که بهترین مقدار شایستگی را دارد، ذخیره می‌شود. با توجه به مقدار رجیستر پرچم و اینکه گربه در چه حالتی قرار دارد، فرآیند مربوط به آن حالت اجرا می‌شود. یعنی اگر گربه در حالت جستجو است، فرآیند جستجو و اگر گربه در حالت ردیابی غذاست، فرآیند ردیابی اجرا می‌شود. با توجه به پارامتر MR، گربه‌ها به‌صورت تصادفی در دو حالت جستجو و ردیابی قرار می‌گیرند. اگر جواب مسئله، راضی‌کننده باشد، حل مسئله به پایان رسیده است؛ و در غیر این‌صورت، مراحل الگوریتم تکرار می‌شود.[۸]

پس از اعمال مراحل الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر جمعیت، عملگرهای الگوریتم ژنتیک (تقاطع و جهش) بر روی اعضاء منتخب اعمال می‌شود. در هر تکرار پس از حلقه‌ی به‌روزرسانی جمعیت براساس الگوریتم ازدحام گربه‌ها، در ابتدا عملگر تقاطع BCRC بر روی ۲ عضو از جمعیت، که با استفاده از روش انتخاب تورنمنت به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند، اعمال می‌شود و در صورت بهتربودن پاسخ‌های کشف‌شده، فرزندان تولیدشده با والدهای خود جایگزین می‌شوند و در غیر این‌صورت، والدها در جمعیت به‌صورت دست‌نخورده باقی می‌مانند. پس از آن عملگر جهش بر روی عضو انتخاب‌شده توسط روش انتخاب تورنمنت اعمال و در صورت بهبود پاسخ کشف‌شده با عضو منتخب جایگزین

شکل ۱. فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود.

می‌شود. هر کدام از عملگرهای تقاطع و جهش به تعداد تکرارهای تنظیم‌شده تکرار می‌شوند و در پایان اعمال عملگرهای بهبود، پاسخ بهینه‌ی سراسری به‌روز رسانی و ذخیره می‌شود. استفاده از روش‌های انتخاب باعث می‌شود که پاسخ‌هایی با کیفیت بهتر به‌عنوان والد انتخاب شوند. در روش انتخاب تورنمنت، K عضو از اعضا به‌صورت تصادفی انتخاب و از بین آن‌ها، بهترین عضو به‌عنوان والد انتخاب می‌شود. روش انتخاب تورنمنت باعث می‌شود که K-۱ عضو بدتر اعضاء هیچ‌گاه به‌عنوان والد انتخاب نشوند. در شکل ۱، فلوچارت مراحل اعمال عملگرهای بهبود مشاهده می‌شود.

۱.۳. الگوریتم‌های بهبود مسیر

بسیاری از الگوریتم‌های بهبود مسیر (دور یا تور) براساس فرآیند مقایسه‌ی هزینه‌ی مسیرهای همسایگی چند مشتری توسعه یافته‌اند. تمام عملگرهای همسایگی به‌کار گرفته‌شده، جزء عملگرهایی هستند که به تبادل و تعویض مشتری‌ها (گره‌ها) می‌پردازند. در واقع، عملگرها به تعداد دفعات از پیش تنظیم‌شده، در دورهای ساخته‌شده به جستجو می‌پردازند تا فواصل موجه، کوتاه‌تر، و با هزینه‌ی کمینه کشف شوند؛ و با مسیرهایی که هزینه‌ی بیشتری دارند، جایگزین شوند. از جمله مزایای الگوریتم‌های بهبود، افزایش تولید جواب‌های موجه‌تری که می‌توان ارزیابی کرد، کاهش زمان محاسبات، کاهش زمان دستیابی به جواب‌های با کیفیت‌تر، و در راستای آن، افزایش همگرایی الگوریتم به‌سوی بهینه‌ی سراسری است.

- **مرحله‌ی بازسازی**

یکی از جنبه‌های منحصر به فرد و مهم روش‌های الگوریتم ژنتیک، نقش مهمی است که بازسازی (به‌طور سنتی، به شکل عملگر تقاطع) ایفا می‌کند.

از میان عملگرهای تقاطع که برای VRPTW سخت وجود دارد، یک عملگر تقاطع خاص (تقاطع بهترین هزینه‌ی مسیر، BCRC [۱] است که هدف آن کاهش همزمان تعداد وسائط نقلیه و هزینه‌ها با برقراری تمام محدودیت‌های مسئله است، که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است.

در شکل ۲ (مثال ۱)، ایجاد دو فرزند C_1 و C_2 از دو والد P_1 و P_2 با استفاده از یک نمونه مسئله‌ی اختیاری با اندازه‌ی مشتری ۹ برای توضیح اهداف مشاهده می‌شود. RP_1 و RP_2 مجموعه‌ی مسیرهای مربوط به P_1 و P_2 را در نسل فعلی ارائه می‌دهند. برای مثال، P_1 دارای سه مسیر (R_1-R_3) با مشتری‌های مرتبط، یعنی: R_1: ۳ ۱ ۷؛ R_2: ۵ ۶، و R_3 : ۴ ۲ ۸ ۹ است. همان‌طور که در مثال ۱ (بخش a) نشان داده شده است، از هر والد، یک مسیر به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در این مورد، برای P_1، مسیر R_2 با مشتری‌های ۵ و ۶ و برای P_2 مسیر R_3 با مشتریان ۷ و ۳ انتخاب شده است. سپس، برای یک والد داده‌شده، مشتریان انتخاب‌شده از مسیر والد مخالف حذف می‌شوند. به‌عنوان مثال، در بخش a برای والد P_1 ، مشتریان ۷ و ۳ (که متعلق به انتخاب تصادفی انتخاب در P_2 است) از P_1 حذف و به دنبال آن فرزند ۱ ایجاد شده است. به همین ترتیب مشتریان ۵ و ۶ که متعلق به انتخاب تصادفی در P_1 هستند، از مسیر P_2 حذف و در نتیجه C_2 ایجاد شده است. همان‌طور که در مثال ۱ بخش b نشان داده شده است، الگوریتم نیاز به دوباره واردکردن مشتریان ۷ و ۳ به فرزند C_1 و مشتریان ۵ و ۶ به فرزند C_2 دارد. توجه داشته باشید که انتخاب مشتری اول برای واردکردن به‌صورت تصادفی انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، در ایجاد C_1، ترتیب درج ۷ و ۳ به‌صورت اختیاری انجام می‌شود.

در این مورد، مشتری ۳ ابتدا در بهترین مکان یافت‌شده در C_1 (همان‌طور که در بخش b مشاهده می‌شود) قبل از واردشدن ۷ وارد شده است در بخش c نیز اگر نقطه‌ی ورودی در مسیرها با محدودیت‌های ظرفیت وسیله‌ی نقلیه یا پنجره‌ی زمان مواجه شود، به آن موقعیت غیر قابل‌قبول محسوب می‌شود. بهترین محل قرارگیری محلی است که کمینه‌ی هزینه در کل مسیرها به دست می‌آید. در مثال ۱، مشتریان ۳ و ۷ هر دو در مسیر ۳ والد P_1 قرار گرفته‌اند (بخش c). گاهی اوقات هیچ نقطه‌ی امکان‌پذیری قابل‌مشاهده نیست و مسیر جدیدی آغاز می‌شود. برای مثال، در ایجاد C_2 ، مشتری ۶ نمی‌تواند در مسیرهای فعلی برای P_2 وارد شود و از این رو یک مسیر جدید ایجاد شده است.

- **فرآیند جهش**

جهش برای جادادن ویژگی‌های جدید در جمعیت فعلی ضروری است. عملگرهای بسیار تخصصی برای سرعت‌بخشیدن به تکامل جمعیت ایجاد شده‌اند. در پژوهش حاضر، در مجموع از ۴ عملگر مختلف استفاده شده است.

✓ **جهش شماره‌ی ۱:** (جابجایی تصادفی مشتری)؛ این عملگر یک وسیله‌ی نقلیه و یک مشتری مربوط به آن را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند. جابجایی مشتری موردنظر به سایر وسائط نقلیه امتحان می‌شود. اگر با جابجایی، یک مسیر امکان‌پذیر به‌دست آید، مستقل از تابع هزینه‌ی جدید پذیرفته می‌شود (شکل ۳).[۱۱]

✓ **جهش شماره‌ی ۲:** (مسیریابی مجدد با استفاده از PFIH تصادفی)؛ این عملگر یک مجموعه از مسیرها را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و روش

شکل ۲. مثال ۱: نمونه‌یی برای عملگر BCRC.

شکل ۳. جهش شماره‌ی ۱: جابجایی تصادفی مشتری.[۱۰]

[۱] Best Cost Route Crossover

شکل ۴ . جهش شماره‌ی ۲: مسیریابی مجدد با استفاده از PFIH تصادفی.[۱۱]

شکل ۵. جهش شماره‌ی ۳: ادغام دو مسیر.[۱۱]

شکل ۶. جهش شماره‌ی ۴: دوباره واردکردن مشتری.[۱۱]

PFIH تصادفی را بر آن‌ها اعمال می‌کند (شکل ۴).[۱۱]

✓ **جهش شماره‌ی ۳:** (ادغام دو مسیر)؛ این عملگر دو مسیر تصادفی را انتخاب و تلاش می‌کند تا آن‌ها را به‌صورت تصادفی ادغام کند (شکل ۵).[۱۱]

✓ **جهش شماره‌ی ۴:** (دوباره واردکردن مشتری)؛ این عملگر یک مشتری تصادفی را در موقعیت بهتر، یعنی موقعیت در همان مسیر با کمینه‌ی فاصله‌ی سفر قرار می‌دهد (شکل ۶).[۱۱]

۴. پیاده‌سازی الگوریتم برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی

الگوریتم ازدحام گربه‌ها، جزء الگوریتم‌های پیوسته و جمعیت‌محور محسوب می‌شود. الگوریتم اصلی در حالت کلی از این ۳ مرحله تشکیل می‌شود:

۱. تولید پاسخ‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها؛

۲. مرحله‌ی به‌روزرسانی جمعیت براساس پرچم آن‌ها (حالت جستجو و ردیابی) و ارزیابی پاسخ‌ها؛

۳. مرحله‌ی به‌روزرسانی بهترین موقعیت.

طبق مطالعات پژوهشگران، الگوریتم ازدحام گربه‌های اصلی برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته، پاسخ‌های مناسب دارد، ولی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی نیاز به اعمال تغییرات جهت ایجاد بهبودهای کارآمد در عملکرد الگوریتم برای دستیابی به اکتشاف و جستجویی باکیفیت بیشتر است. در نوشتار سالامون[۱] (۱۹۸۷)،[۶] بیان شده است، که الگوریتم بدون روش‌های بهبوددهنده برای مسئله با اندازه‌های کوچک نمونه مناسب است. برای بهبود الگوریتم تغییرات ابداعی استفاده‌شده از این قرار هستند:

۱. استفاده از جهش نرمال در بدنه‌ی الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها؛

۲. اعمال عملگر جهش برای هر گربه در هر تکرار بعد از بروزرسانی اصلی در بدنه‌ی الگوریتم اصلی ازدحام گربه‌ها؛

۳. استفاده از بهترین موقعیت هر گربه در بروزرسانی جمعیت در حالت ردیابی (مانند الگوریتم ازدحام ذرات)؛

۴. ترکیب الگوریتم با عملگرهای الگوریتم ژنتیک؛

۵. استفاده از عملگر تقاطع BCRC؛

۶. استفاده از عملگرهای جهش مناسب برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه.

۷. به‌کارگیری عملگر انتخاب تورنمنت برای انتخاب پاسخ‌های با کیفیت و اعمال مجدد الگوریتم‌ها.

برای تولید پاسخ‌های اولیه، هر گربه نشان‌دهنده‌ی یک دور همیلتونی است که نحوه‌ی قرارگرفتن مشتری‌ها را به نمایش می‌گذارد. برای حل هر پاسخ به صورت مسیریابی هر وسیله‌ی نقلیه با استفاده از روش کدینگ دوقسمتی پیوسته و یک روش رمزگشایی (Decode) که در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)،[۱۰] شرح داده شده است، مجموعه‌یی از مسیرها تشکیل می‌شود، که

[۱] Solomon

هر مسیر از دپو آغاز می‌شود و با ارائه‌ی خدمت به هر مشتری، درنهایت به دپو خاتمه می‌یابد.

۵. نتایج عددی

در بخش حاضر، نتایج عددی آزمایش بر روی نمونه‌های بنچ مارک سالامون در ۶ دسته‌ی ارائه‌شده مطرح شده است. نمونه‌های سالامون در سه نوع کلاس بر حسب توزیع مشتریان به این شرح قرار گرفته‌اند و در هر نوع کلاس، دو دسته قرار دارد.

- ✓ توزیع تصادفی (R۱ و R۲)؛
- ✓ توزیع خوشه‌بندی (C۱ و C۲)؛
- ✓ توزیع تصادفی و خوشه‌بندی (RC۱ و RC۲).

در کلاس‌های R۱ و R۲ مشتری‌ها به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند؛ در کلاس‌های C۱ و C۲ مشتری‌ها در گروه‌هایی خوشه‌بندی شده‌اند؛ و درنهایت در کلاس‌های RC۱ و RC۲ زیرمجموعه‌یی از مشتریان به صورتی تصادفی توزیع و مابقی خوشه‌بندی‌شده‌اند.

فاصله‌ی بین دو مشتری به‌صورت فاصله‌ی اقلیدسی ساده است. هر مشتری i، یک پنجره‌ی زمانی $[a_i, b_i]$ دارد، که بازه‌ی زمانی برای رسیدن به هر مشتری را نشان می‌دهد. ظرفیت وسائط نقلیه و تقاضای مشتریان در هر کلاس متفاوت در نظر گرفته شده است. در مجموع، دارای ۵۶ نمونه برای همه‌ی ابعاد طبقه‌بندی مسئله است، که شامل ۲۵، ۵۰، و ۱۰۰ مشتری است، که داده‌های منتخب از سایت http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm برداشت شده‌اند.

نتایج عددی به‌دست‌آمده با بهترین پاسخ‌های شناخته‌شده‌ی مسائل نمونه‌ی سالامون، که از الگوریتم‌های مختلف دقیق، ابتکاری، و فرا ابتکاری به‌دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند. نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم جمعیت‌محور تراکم ذرات گسسته‌ی ارائه‌شده توسط گونگ[۱] و همکاران (۲۰۱۲)،[۱۲] نیز مقایسه شده است. کارایی الگوریتم ازدحام گربه‌ها بر روی نمونه‌های کوچک تا ۲۵ مشتری در نوشتار یادگاری و همکاران (۱۴۰۱)،[۱۰] نشان داده شده است. با توجه به استفاده از بهبوددهنده‌ها برای کارایی بیشتر الگوریتم ازدحام گربه‌ها، آزمایش‌ها فقط بر روی نمونه‌هایی با اندازه‌های ۵۰ و ۱۰۰ مشتری انجام شده است. الگوریتم ارائه‌شده برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۵۰ مشتری در ۲۸ نمونه، پاسخ بهینه ارائه داده است، که بیشترین بهبود برای نمونه‌ی R۲۰۱ با ۵۹/۴۸٪ و کمترین بهبود برای نمونه‌ی R۱۰۹ با ۷/۳۳٪ بوده است. همچنین، بدترین پاسخ به‌دست‌آمده برای نمونه‌ی R۱۰۶ با ۶۰/۴۵٪ افزایش در پاسخ بوده است، که تعداد وسائط نقلیه بیش از تعداد وسائط نقلیه‌ی بهینه به‌دست آمده است؛ در نتیجه الگوریتم پیشنهادی برای ۵۵ نمونه از ۵۶ نمونه توانایی ارائه‌ی پاسخ بهینه را دارد. برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۱۰۰ مشتری برای دسته‌های C۱ و C۲، پاسخ بهینه‌ی سراسری به‌دست‌آمده از نوشتارهای پیشین به‌دست آمده و در ۳۳ نمونه از ۵۶ نمونه،توانایی ارائه‌ی پاسخ بهینه با تعداد وسائط نقلیه‌ی بهینه را داشته و بدترین پاسخ به‌دست‌آمده، نمونه‌ی R۲۰۴ با ۴۶/۵۴٪ افزایش پاسخ بوده است.

۶. نتایج و مقایسه‌ها

در جدول‌های ۱ و ۲، نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی نمونه‌های سالامون به صورت بهترین پاسخ‌ها و نیز میانگین پاسخ‌های به‌دست‌آمده ارائه شده است. NV، نشان‌دهنده‌ی تعداد وسائط نقلیه و TD مجموع مسافت پیموده‌شده است. تابع هزینه‌ی استفاده‌شده در الگوریتم بر حسب بهینه‌سازی مسافت و تعداد وسائط نقلیه است. علامت ** و مقادیر بولد، نمایانگر بهبود در پاسخ نمونه‌ی موردنظر و علامت * نمایانگر جواب نزدیک و قابل‌قبول برای پاسخ نمونه‌ی موردنظر است.

۱) **نمونه با ۵۰ مشتری:** مطابق جدول ۱، برای نمونه با ۵۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای ۳۱ نمونه از ۵۶ نمونه نسبت به بهترین نتایج پیشین، نتیجه‌ی بهتری نشان داده است؛ که شامل ۴ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع R۱، ۱۱ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع R۲، ۸ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع C۲، و ۸ مورد از مجموعه‌ی داده‌ی نوع RC۲ است. در بقیه‌ی موارد، هم نتایجی نزدیک و قابل‌قبول ارائه شده است. همچنین برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه با ۵۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه داده است.

۲) **نمونه با ۱۰۰ مشتری:** مطابق جدول ۲، برای نمونه‌های ۱۰۰ مشتری؛ الگوریتم پیشنهادی برای هیچ‌یک از نمونه‌ها نتایج بهتری ارائه نداده و برای ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه با ۱۰۰ مشتری پاسخ بهینه ارائه داده است.

همچنین در مقایسه با الگوریتم گسسته‌ی ازدحام ذرات،[۱۱] الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌های ۲۵ مشتری، ۷ نمونه از ۵۶ نمونه، و برای نمونه‌های ۵۰ مشتری، ۴ نمونه از ۵۶ نمونه، و برای نمونه‌های ۱۰۰ مشتری، ۱۸ نمونه از ۵۶ نمونه، پاسخ بهبود در جواب بهینه به‌دست آمده است. همچنین نمودار برازش که نشان‌دهنده‌ی فرآیند بهبود پاسخ‌ها و روند همگرایی مناسب و یکنواخت جواب‌های به‌دست‌آمده است، برای دو نمونه از بهترین پاسخ‌های نمونه‌ها (C۱۰۱ و C۲۰۱) در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود.

هر شکل در چهار قسمت ارائه شده است، که قسمت (الف)، شامل تصویر گرافیکی از بهترین پاسخ به‌دست‌آمده توسط الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌ی موردنظر است. تصاویر گرافیکی از بهترین پاسخ به‌دست‌آمده شامل موقعیت قرارگیری مشتری‌ها و همین‌طور دورهای ساخته‌شده و مسیرهای طی‌شده توسط وسائط نقلیه است. مشاهده می‌شود هر دور ساخته‌شده‌ی کامل از دپوی مرکزی شروع و با ملاقات مشتری‌ها توسط یک وسیله‌ی نقلیه مجدداً به دپو باز می‌گردد. در گراف‌های مذکور، محور افقی، مختصات X مشتری‌ها و محور عمودی، مختصات Y مشتری‌ها را نشان می‌دهند.

قسمت (ب)، نشان‌دهنده‌ی مقدار تابع هزینه بر حسب تکرار، قسمت (پ) تعداد وسائط نقلیه بر حسب تکرار، و قسمت (ت)، مسافت پیموده‌شده بر حسب تکرار است. در نمودارهای قسمت (ب) تا قسمت (ت)، محور افقی دربرگیرنده‌ی تعداد تکرار کلی چرخه‌ی اصلی الگوریتم برای دستیابی به

[۱] Gong

جدول ۱. ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۵۰ مشتری).

نمونه	الگوریتم مورداستفاده	بهترین پاسخ شناخته‌شده		الگوریتم پیشنهادی				الگوریتم تراکم ذرات گسسته			
				بهترین پاسخ		میانگین پاسخ‌ها		بهترین پاسخ		میانگین پاسخ‌ها	
		NV	TD	NV	TD	NV	TD	NV	TD	NV	TD
R101*	KDMSS	۱۲	۱۰۴۴/۰	۱۲	۱۰۵۵/۷۲	۱۲	۱۰۶۴/۴۴	۱۱	۱۱۰۰/۷۲	۱۱/۸	۱۰۶۰/۱۱
R102**	KDMSS	۱۱	۹۰۹	**۱۰**	۹۲۴/۱۸	۱۰	۹۲۸/۱۵	۱۰	۹۲۳/۷۱	۱۰	۹۲۷/۱۳
R103**	KDMSS	۹	۷۲۲/۹	**۸**	**۷۸۹/۹۴**	۸	۷۹۵/۴۱۶	۸	۷۹۰/۱۷	۸	۸۰۸/۹۹
R104*	KDMSS	۶	۶۲۵/۴	۶	۶۴۳/۸۲	۶	۶۴۸/۶۱	۶	۶۳۱/۵۸	۶	۶۳۸/۸۳
R105*	KDMSS	۹	۸۹۹/۳	۹	۹۱۷/۵۹	۹	۹۲۴/۲۷۴	۸	۹۸۳/۴۹	۹	۹۳۳/۶۷
R106	KDMSS	۵	۷۹۳	۸	۷۹۵/۲۵	۸	۸۲۰/۵۷۲	۷	۸۶۵/۹۳	۷/۵	۸۵۱/۱۷
R107**	KDMSS	۷	۷۱۱/۱	**۶**	**۷۶۴**	۶/۸	۷۳۹/۸۷	۶	۷۳۷/۱۰	۶/۱	۷۵۱/۷۷
R108*	CR+KLM	۶	۶۱۷/۷	۶	۶۲۷/۰۷	۶	۶۳۶/۶۹۸	۶	۶۲۴/۲۹	۶	۶۳۲/۷۳
R109**	KDMSS	۸	۷۸۶/۸	**۷**	**۸۳۳/۲۷**	۷	۸۴۶/۷۴	۷	۸۰۱/۹۷	۷	۸۱۵/۴۴
R110*	KDMSS	۷	۶۹۷/۰	۷	۷۱۴/۹۲	۷	۷۳۳/۰۶	۷	۷۲۰/۴۰	۷	۷۳۱/۷۹
R111*	CR+KLM	۷	۷۰۷/۲	۷	۷۱۵/۵۲	۷	۷۲۰/۳۱	۶	۷۵۶/۳۵	۶/۹	۷۲۲/۵۵
R112*	CR+KLM	۶	۶۳۰/۲	۶	۶۴۲/۰۶	۶	۶۵۳/۵۴	۶	۶۳۸/۴۹	۶	۶۴۵/۷۵
R201**	CR+KLM	۶	۷۹۱/۹	**۲**	**۹۶۲/۶۳**	۲	۹۷۶/۶۹	۲	۹۵۳/۲۹	۲/۶	۹۱۱/۸۶
R202**	CR+KLM	۵	۶۹۸/۵	**۲**	**۸۲۱/۸۳**	۲	۸۲۵/۴	۲	۸۱۵/۲۳	۲	۸۳۳/۹۰
R203**	IV+C	۵	۶۰۵/۳	**۲**	**۶۷۲/۸۷**	۲	۶۸۹/۲۶	۲	۶۶۸/۳۶	۲	۶۸۸/۸۴
R204*	IV	۲	۵۰۶/۴	۲	۵۱۸/۵۲	۲	۵۳۰/۵۷	۲	۵۱۸/۵۷	۲	۵۲۵/۷۸
R205**	IV+C	۴	۶۹۰/۱	**۲**	**۷۶۸/۵۳**	۲	۸۰۱/۵۷	۲	۷۵۶/۳۸	۲	۷۷۳/۲۴
R206**	IV+C	۴	۶۳۲/۴	**۲**	**۶۷۱/۱۷**	۲	۶۷۴/۲۱	۲	۶۶۱/۵۵	۲	۶۷۶/۲۵
R207**				**۲**	**۵۹۹/۷۶**	۲	۶۰۴/۷۱	۲	۵۹۳/۹۵	۲	۶۱۱/۰۴
R208**				**۲**	**۵۱۳/۱۳**	۲	۵۱۵/۳۲	۲	۵۰۸/۴۱	۲	۵۱۸/۸۳
R209**	IV+C	۴	۶۰۰/۶	**۲**	**۶۵۹/۱۹**	۲	۶۷۳/۲۵	۲	۶۵۸/۲۸	۲	۶۷۱/۵۴
R210**	IV+C	۴	۶۴۵/۶	**۲**	**۶۷۳/۰۷**	۲	۶۹۷/۲	۲	۶۷۰/۹۹	۲	۶۸۲/۷۰
R211**	IV+DLP	۳	۵۳۵/۵	**۲**	**۵۶۰/۲۸**	۲	۵۶۶/۲۴	۲	۵۶۲/۷۴	۲	۵۷۶/۰۳
C101*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵
C102*	KDMSS	۵	۳۶۱/۴	۵	۳۶۲/۱۷	۵	۳۶۲/۱۷	۵	۳۶۲/۱۷	۵	۳۷۳/۶۴
C103*	KDMSS	۵	۳۶۱/۴	۵	۳۶۲/۱۷	۵	۳۶۲/۴۹	۵	۳۶۲/۱۷	۵	۳۶۸/۸۵
C104*	KDMSS	۵	۳۵۸/۰	۵	۳۶۰/۲۴	۵	۳۶۲/۹۱	۵	۳۵۸/۸۸	۵	۳۶۲/۸۸
C105*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵
C106*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵
C107*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۷۴/۸۷
C108*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۶/۷۲
C109*	KDMSS	۵	۳۶۲/۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۴/۰۴	۵	۳۶۳/۲۵	۵	۳۶۵/۱۷
C201**	CR+L	۳	۳۶۰/۲	**۲**	**۴۴۴/۹۶**	۲	۴۴۴/۹۶	۲	۴۴۴/۹۶	۲	۴۴۴/۹۶
C202**	CR+KLM	۳	۳۶۰/۲	**۲**	**۴۰۳/۸۱**	۲	۴۰۳/۸۱	۲	۴۰۳/۸۱	۲	۴۰۷/۲۵
C203**	CR+KLM	۳	۳۵۹/۸	**۲**	**۴۰۳/۲۵**	۲	۴۰۳/۹۲	۲	۴۰۲/۵۲	۲	۴۰۶/۷۱
C204**	KLM	۲	۳۵۰/۱	**۲**	**۳۶۴/۷**	۲	۳۶۵/۰۷۵	۲	۳۵۶/۷۷	۲	۳۶۴/۰۲
C205**	CR+KLM	۳	۳۵۹/۸	**۲**	**۴۴۴/۰۸**	۲	۴۴۴/۰۸	۲	۴۲۹/۱۲	۲	۴۴۵/۴۵
C206**	CR+KLM	۳	۳۵۹/۸	**۲**	**۴۲۶/۴**	۲	۴۲۶/۴	۲	۴۱۲/۵۰	۲	۴۳۷/۶۶
C207**	CR+KLM	۳	۳۵۹/۶	**۲**	**۴۲۶/۲۳**	۲	۴۲۳/۳۷	۲	۴۲۶/۱۳	۲	۴۴۴/۶۲
C208*	CR+KLM	۲	۳۵۰/۵	۲	۳۵۲/۱۲	۲	۳۵۲/۱۲	۲	۳۵۲/۲۹	۲	۳۵۳/۵۶
RC101*	KDMSS	۸	۹۴۴	۸	۹۴۵/۵۸	۸	۹۴۷/۰۳	۸	۹۴۵/۵۸	۸	۹۴۶/۶۶
RC102*	KDMSS	۷	۸۲۲/۵	۷	۸۲۳/۹۷	۷	۸۲۵/۸۵	۷	۸۲۳/۹۷	۷	۸۲۷/۸۹
RC103*	KDMSS	۶	۷۱۰/۹	۶	۷۱۲/۵۶	۶	۷۱۳/۶۶	۶	۷۱۲/۹۱	۶	۷۱۴/۶۷
RC104*	KDMSS	۵	۵۴۵/۸	۵	۵۴۸/۱۴	۵	۵۴۹/۲۸	۵	۵۴۶/۵۱	۵	۵۴۷/۹۵
RC105*	KDMSS	۸	۸۵۵/۳	۸	۸۵۶/۹۷	۸	۸۶۳/۰۵	۸	۸۵۶/۹۷	۸	۸۸۶۰/۵۰
RC106*	KDMSS	۶	۷۲۳/۲	۶	۷۲۴/۶۵	۶	۷۲۶/۶۷	۶	۷۲۴/۶۵	۶	۷۲۹/۶۲
RC107*	KDMSS	۶	۶۴۲/۷	۶	۶۴۶/۱۷	۶	۶۴۶/۶۴	۶	۶۴۵/۷۰	۶	۶۵۳/۵۴
RC108*	KDMSS	۶	۵۹۸/۱	۶	۶۰۶/۴۷	۶	۶۰۶/۴۷	۶	۵۹۹/۱۷	۶	۶۱۳/۴۱
RC201**	L+KLM	۵	۶۴۸/۸	**۳**	**۸۳۸/۷۶**	۳	۸۴۴/۳۱	۳	۸۳۸/۷۶	۳	۸۵۵/۶۱
RC202**	IV+C	۵	۶۱۳/۶	**۲**	**۸۶۸/۶۷**	۲	۸۷۵/۸۶	۲	۸۶۷/۲۶	۲	۸۸۹/۵۰
RC203**	IV+C	۴	۵۵۵/۳	**۲**	**۶۸۸/۵۵**	۲	۶۸۹/۴۸	۲	۶۷۴/۴۴	۲	۶۸۰/۴۶
RC204**	DLP	۳	۴۴۴/۲	**۲**	**۴۸۰/۲۱**	۲	۴۸۵/۲۸	۲	۴۷۹/۲۲	۲	۴۸۵/۴۴
RC205**	IV+C	۵	۶۳۰/۲	**۳**	**۷۶۱/۹۱**	۳	۷۶۷/۷	۳	۷۶۵/۰۲	۳	۷۷۵/۹۹
RC206**	IV+C	۵	۶۱۰/۰	**۲**	**۷۵۵/۱۳**	۲	۷۶۳/۹۴	۲	۷۵۵/۱۳	۲	۷۶۴/۶۵
RC207**	C	۴	۵۵۸/۶	**۲**	**۶۵۵/۸۱**	۲	۶۵۸/۵۴	۲	۶۵۵/۸۱	۲	۶۷۷/۲۱
RC208**				**۲**	**۵۱۳/۶۱**	۲	۵۱۹/۶۸	۲	۴۹۸/۷۹	۲	۵۱۸/۸۰

جدول ۲ . ارزیابی پاسخ‌ها برای نمونه‌های سالامون (۱۰۰ مشتری).

نمونه	الگوریتم مورداستفاده	بهترین پاسخ شناخته‌شده		الگوریتم پیشنهادی				الگوریتم تراکم ذرات گسسته			
				بهترین پاسخ		میانگین پاسخ‌ها		بهترین پاسخ		میانگین پاسخ‌ها	
		NV	TD	NV	TD	NV	TD	NV	TD	NV	TD
R101*	H	۱۹	۱۶۴۵/۷۹	۱۹	۱۶۶۰/۹۷	۱۹/۸	۱۷۱۹/۹۶	۱۹	۱۶۵۲/۰۰۱	۱۹	۱۶۵۷/۸۹۰
R102	RT	۱۷	۱۴۸۶/۱۲	۱۸	۱۴۹۱/۸۵	۱۸	۱۲۴۶/۸۲	۱۷	۱۵۰۰/۸۰۹	۱۷/۸	۱۵۰۶/۶۲۶
R103	LLH	۱۳	۱۲۹۲/۶۸	۱۴	۱۲۵۰/۶۵	۱۴	۱۲۵۸/۱	۱۴	۱۲۴۲/۶۴۹	۱۴	۱۲۶۸/۵۹۱
R104	M	۹	۱۰۰۷/۲۴	۱۰	۱۰۵۱/۰۳	۱۰	۱۰۵۳/۰۸	۱۰	۱۰۴۲/۲۱۶	۱۰/۵	۱۰۹۷/۷۶۸
R105*	RT	۱۴	۱۳۷۷/۱۱	۱۴	۱۴۱۵/۴۲۷	۱۴/۸	۱۴۰۷/۵۱	۱۴	۱۳۵۸/۰۸۲	۱۴/۳	۱۴۰۵/۲۷۵
R106*	M	۱۲	۱۲۵۱/۹۸	۱۲	۱۲۹۵/۹۹۸	۱۲/۶	۱۲۹۳/۱۳	۱۲	۱۲۹۴/۸۶۹	۱۲/۹	۱۲۸۷/۰۲۶
R107	S97	۱۰	۱۱۰۴/۶۶	۱۱	۱۱۰۶/۶۶	۱۱	۱۱۲۹/۸۸	۱۱	۱۱۲۳/۹۸۱	۱۱	۱۱۶۰/۰۲۳
R108	BB	۹	۹۶۰/۸۸	۱۰	۹۸۱/۱۸	۱۰	۱۰۱۵/۴۹	۱۰	۱۰۱۱/۶۸۲	۱۰/۱	۱۰۶۶/۲۹۰
R109	HG	۱۱	۱۱۹۴/۷۳	۱۲	۱۱۹۹/۶	۱۲/۸	۱۲۱۱/۶۶	۱۲	۱۲۱۱/۶۳۰	۱۲/۴	۱۲۵۲/۷۸۷
R110	M	۱۰	۱۱۸/۵۹	۱۲	۱۱۶۰/۰۹	۱۲	۱۱۶۸/۵۳	۱۱	۱۱۹۰/۳۶۲	۱۲	۱۱۹۰/۳۸۰
R111	RGP	۱۰	۱۰۹۶/۷۲	۱۱	۱۱۱۳/۴۶	۱۱/۸	۱۱۶۰/۳۹	۱۱	۱۱۰۲/۹۸۷	۱۱/۳	۱۱۶۳/۲۷۱
R112	GTA	۹	۹۸۲/۱۴	۱۰	۱۰۲۷/۲	۱۰/۸	۱۰۴۱/۶۳	۱۰	۱۰۲۹/۱۲۴	۱۰/۸	۱۱۰۳/۰۶۸
R201*	HG	۴	۱۲۵۲/۳۷	۴	۱۳۱۳/۸۶	۴	۱۳۲۶/۱۶	۴	۱۲۷۴/۹۶۹	۴	۱۲۹۸/۲۷۶
R202	RGP	۳	۱۱۹۱/۷۰	۴	۱۱۳۱/۶۵	۴	۱۱۶۶/۰۵	۳	۱۲۴۷/۰۳۳	۳/۵	۱۲۵۹/۸۳۹
R203*	M	۳	۹۳۹/۵۴	۳	۹۹۵/۱۷	۳	۱۰۴۰/۲۹	۳	۱۰۵۲/۷۱۲	۳	۱۱۰۰/۷۹۹
R204	BVH	۲	۸۲۵/۵۲	۳	۸۰۶/۴۷	۳	۸۱۵/۷۴	۳	۸۴۴/۱۶۱	۳	۹۲۸/۰۴۰
R205*	RGP	۳	۹۹۴/۴۲	۳	۱۰۸۳/۱۲	۳	۱۰۸۸/۱۴	۳	۱۰۶۱/۶۴۰	۳	۱۱۳۵/۷۰۳
R206*	SSSD	۳	۹۰۶/۱۴	۳	۹۶۶/۸۷	۳	۹۸۶/۶۴	۳	۱۰۱۶/۳۴۶	۳	۱۰۶۵/۶۰۷
R207*	BVH	۲	۸۹۳/۳۳	۳	۸۶۵/۱۹	۳	۸۷۸/۶۴	۳	۹۴۶/۷۷۸	۳	۱۰۳۶/۸۶۴
R208*	M	۲	۷۲۶/۷۵	۲	۸۰۳/۴۹	۲	۸۰۴/۴۲	۲	۸۳۴/۷۲۱	۲/۶	۸۸۰/۳۱۳
R209*	H	۳	۹۰۹/۱۶	۳	۹۸۵/۰۲	۳	۹۸۹/۰۵	۳	۱۰۰۳/۱۸۸	۳	۱۰۷۶/۹۴۹
R210*	M	۳	۹۳۹/۳۴	۳	۹۸۴/۱۳	۳	۹۹۶/۱۴	۳	۱۰۴۰/۵۴۴	۳	۱۰۹۰/۳۵۶
R211	BVH	۲	۸۹۲/۷۱	۳	۸۱۷/۶۹	۳	۸۳۱/۹۹	۳	۸۶۱/۳۲۳	۳	۹۳۸/۱۵۰
C101*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴
C102*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۳۴/۸۵	۱۰	۸۲۹/۷۱۲	۱۰	۸۵۰/۸۳۷
C103*	RT	۱۰	۸۲۸/۰۶	۱۰	۸۳۴/۶۰۴	۱۰	۸۴۳/۶۲۴	۱۰	۸۵۱/۳۷۳	۱۰	۸۸۶/۳۳۷
C104*	RT	۱۰	۸۲۴/۷۸	۱۰	۸۵۴/۰۷	۱۰	۸۷۴/۴۹	۱۰	۸۶۵/۵۲۱	۱۰	۹۵۸/۴۹۱
C105*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۳۰/۴۳۵
C106*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴
C107*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۶۵/۳۰۱
C108*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۹/۳۱	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۹/۰۷۸
C109*	RT	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۹/۲۹	۱۰	۸۳۲/۷۱	۱۰	۸۲۸/۹۴	۱۰	۸۲۹/۵۷۹
C201*	RT	۳	۵۹۱/۵۶	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۶۲۱/۷۷۷
C202*	RT	۳	۵۹۱/۵۶	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۵۹۱/۵۵۷	۳	۶۱۶/۳۷۸
C203*	RT	۳	۵۹۱/۱۷	۳	۶۰۸/۲۰	۳	۶۱۸/۳۵	۳	۵۹۱/۱۷۳	۳	۶۰۵/۸۳۶
C204*	RT	۳	۵۹۰/۶۰	۳	۶۱۲/۶۶	۳	۶۲۳/۶۲۵	۳	۶۱۵/۴۳۰	۳/۲	۶۷۸/۰۸۴
C205*	RT	۳	۵۸۸/۸۸	۳	۵۸۸/۸۷۶	۳	۵۸۸/۸۷۶	۳	۵۸۸/۸۷۶	۳	۶۰۰/۳۰۸
C206*	RT	۳	۵۸۸/۴۹	۳	۵۸۸/۴۹	۳	۵۸۹/۵۱	۳	۵۸۸/۸۷۶	۳	۵۹۲/۹۴۹
C207*	RT	۳	۵۸۸/۲۹	۳	۵۸۸/۲۹	۳	۵۸۹/۱۲	۳	۵۹۱/۳۵۰	۳	۵۹۶/۵۳۹
C208*	RT	۳	۵۸۸/۳۲	۳	۵۸۸/۳۲	۳	۵۹۰/۳	۳	۵۸۸/۴۹۳	۳	۵۹۱/۵۹۳
RC101	TBGGP	۱۲	۱۶۹۶/۹۴	۱۵	۱۷۱۱/۲۷	۱۵/۶	۱۷۱۰/۲۸	۱۵	۱۶۴۱/۲۰۴	۱۵	۱۶۶۸/۸۷۸
RC102	TBGGP	۱۲	۱۵۵۴/۷۵	۱۳	۱۶۱۵/۱۲	۱۳/۸	۱۵۶۸/۰۱	۱۳	۱۵۱۰/۹۵۲	۱۳/۸	۱۵۰۶/۸۰۵
RC103	S98	۱۲	۱۲۶۱/۶۷	۱۲	۱۳۴۷/۳	۱۲	۱۳۶۳/۴۲	۱۱	۱۲۹۴/۷۳۹	۱۱/۷	۱۳۰۵/۹۲۱
RC104*	CLM	۱۰	۱۱۳۵/۴۸	۱۰	۱۲۳۲/۴۸	۱۰/۸	۱۲۳۴/۵۵	۱۰	۱۱۹۰/۵۴۵	۱۰/۸	۱۲۱۹/۳۲۴
RC105	BB	۱۳	۱۶۲۹/۴۴	۱۵	۱۵۷۶/۵۳	۱۵	۱۶۱۲/۸۲	۱۴	۱۶۰۳/۷۰۷	۱۴/۹	۱۵۸۱/۷۹۷
RC106	BB	۱۱	۱۴۲۴/۷۳	۱۳	۱۴۴۳/۲۹	۱۳	۱۴۸۶/۲	۱۲	۱۴۱۰/۹۳۱	۱۲/۸	۱۴۱۶/۱۶۲
RC107	S97	۱۱	۱۲۳۰/۴۸	۱۲	۱۲۶۴/۲۶	۱۲	۱۳۰۰/۴۱	۱۱	۱۲۴۹/۷۹۵	۱۱/۳	۱۲۷۷/۹۷۰
RC108	TBGGP	۱۰	۱۱۳۹/۸۲	۱۱	۱۲۱۷/۲۳	۱۱	۱۲۶۴/۹۴	۱۱	۱۱۸۱/۸۷۰	۱۱	۱۲۳۰/۹۲۴
RC201*	M	۴	۱۴۰۶/۹۱	۴	۱۴۸۱/۲۱	۴	۱۵۵۰/۸۳	۴	۱۴۲۳/۵۱۹	۴	۱۴۷۲/۷۱۱
RC202	CC	۳	۱۳۶۷/۰۹	۴	۱۲۳۲/۳۸	۴	۱۲۵۲/۲۷	۴	۱۱۹۳/۵۹۱	۴	۱۲۸۶/۵۲۲
RC203*	CC	۳	۱۰۴۹/۶۲	۳	۱۱۹۱/۵۸	۳	۱۲۲۸/۱۲	۳	۱۱۲۳/۴۱۹	۳	۱۲۲۲/۸۱۰
RC204*	M	۳	۷۹۸/۴۱	۳	۸۲۸/۹۱	۳	۸۵۸/۵۳	۳	۸۹۴/۱۱۷	۳	۹۶۴/۵۰۲
RC205*	M	۴	۱۲۹۷/۱۹	۴	۱۴۳۷/۲۸	۴	۱۴۸۵/۱۲	۴	۱۳۲۱/۴۲۹	۴	۱۳۸۲/۲۰۴
RC206	H	۳	۱۱۴۶/۳۲	۴	۱۱۱۸/۶	۴	۱۱۳۹/۴۲	۳	۱۳۰۷/۹۰۰	۴	۱۲۲۵/۴۰۰
RC207	BVH	۳	۱۰۶۱/۱۴	۴	۱۰۶۰/۴۱	۴	۱۰۹۰/۷۲	۳	۱۱۳۰/۳۶۸	۳/۷	۱۱۹۲/۵۳۳
RC208*	IKMUY	۳	۸۲۸/۱۴	۳	۹۴۵/۱۳	۳	۹۸۱/۸۱	۳	۹۵۸/۲۳۶	۳	۱۰۸۴/۹۲۵

شکل ۷. نمایش شماتیک برای حل نمونه‌ی C۱۰۱ .

شکل ۸ . نمایش شماتیک برای حل نمونه C201 .

پاسخ بهینه و محور عمودی نیز دربرگیرنده‌ی بهترین جواب مسئله است. همگرایی رفتار الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی VRPTW، توانایی جستجو و عملکرد مناسب و منطقی الگوریتم را نشان می‌دهد.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه‌ها برای حل مسئله (VRPTW) (مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره‌ی زمانی) توسعه داده شده است. در الگوریتم مذکور، هر گربه با ارائه‌ی یک مجموعه مسیر برای وسائط نقلیه، موقعیت خود را نمایش می‌دهد. برای ایجاد پاسخ‌های اولیه، الگوریتم PFIH نیز استفاده شده است. علاوه‌بر این، از یک روش تصمیم‌گیری VRPTW برای کنترل هدف‌های اولیه و ثانویه‌ی مسئله نیز استفاده شده است.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم بر روی ۵۶ نمونه‌ی استاندارد از مسائلی که توسط سالامون ارائه شده است؛ اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی پاسخ‌های بسیار مناسب و قابل‌قبولی در حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت پنجره‌ی زمانی ارائه داده است. به‌طور خاص، الگوریتم ارائه‌شده برای ۳۱ نمونه با ۵۰ مشتری، در ۳۱ مورد جواب بهینه‌یی نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده و برای ۵۵ مورد از ۵۶ نمونه نیز توانایی ارائه‌ی جواب بهینه را داشته است. همچنین در مورد نمونه‌هایی که ۱۰۰ مشتری دارند، در ۳۳ مورد از ۵۶ نمونه، توانایی ارائه‌ی جواب بهینه را داشته است. با توجه به عملکرد الگوریتم در افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد الگوریتم برای نمونه‌های با اندازه‌ی کوچک‌تر، مناسب‌تر است.

References - منابع

1. Lenstra, J.K. and Kan, A.R., 1981. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks, 11(2),* pp.221-227. DOI: https://doi.org/10.1002/net.3230110211.

2. Bucur, P.A., Hungerländer, P., Jellen, A., Maier, K., and Pachatz, V., 2021. Shift planning for smart meter service operators. *In: Data Science–Analytics and Applications: Proceedings of the 3rd International Data Science Conference–iDSC2020. Springer Fachmedien Wiesbaden,* pp.8-10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-32182-6_2.

3. Cissé, M., Yalçındağ, S., Kergosien, Y., Şahin, E., Lenté, C., and Matta, A., 2017. OR problems related to home health care: A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, *13*, pp.1-22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.06.001.

4. Wang, X. and Wasil, E., 2021. On the road to better routes: Five decades of published research on the vehicle routing problem. *Networks*, *77*(1), pp.66-87. DOI: https://doi.org/10.1002/net.21942.

5. Desrosiers, J., Soumis, F., and Desrochers, M., 1984. Routing with time windows by column generation. *Networks*, *14*(4), pp.545-565. DOI: https://doi.org/10.1002/net.3230140406.

6. Solomon, M.M., 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, *35*(2), pp.254-265. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254.

7. Kallehauge, B., Boland, N., and Madsen, O.B., 2007. Path inequalities for the vehicle routing problem with time windows. Networks: *An International Journal, 49*(4), pp.273-293. DOI: https://doi.org/10.1002/net.20178.

8. Chu, S.-C., Tsai, P.-w., and Pan, J.-S., 2006. Cat swarm optimization. *In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-36668-3_94.

9. Ji, X.F., Pan, J.S., Chu, S.C., Hu, P., Chai, Q.W., and Zhang, P., 2020. Adaptive cat swarm optimization algorithm and its applications in vehicle routing problems. *Mathematical Problems in Engineering*, *2020*, pp.1-14. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/1291526.

10. Yadegari, Y.B., Rahimi, A.M., and Aboutalebi Esfahani, M., 2020. Solving the vehicle routing problem with time windows using cat swarming optimization algorithm. *In: The 19th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran*. [In Persian].

11. Alvarenga, G.B., Mateus, G.R., and de Tomi, G., 2007. A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research, 34*(6), pp.1561-1584. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.07.025.

12. Gong, Y.J., Zhang, J., Chung, H.S.H., Chen, W.N., Huang, R.Z., and Wang, T., 2012. Optimizing the vehicle routing problem with time windows: A discrete particle swarm optimization approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 42*(2), pp.254-267. DOI: https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2148712.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۹۶-۱۰۷ (یادداشت فنی)

Research Note

آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده جهت ارزیابی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن

عرفان شبانی (دانشجوی دکتری)
داود مستوفی‌نژاد (استاد)
علیرضا سلجوقیان* (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

متداول‌ترین مود گسیختگی در اتصال کامپوزیت FRP به بتن، جداشدگی ورق تقویتی از سطح بتن است؛ که کارایی کامپوزیت‌های FRP را گاهاً تا ۱۰٪ ظرفیت کل کاهش می‌دهد. بنابراین، پژوهشگران به دنبال راهکاری در راستای استفاده‌ی بهینه از آن‌ها، به پیش‌تنیده‌کردن و تقویت با FRP پیش‌تنیده روی آورده‌اند. بنابر اهمیت موضوع بحث، پژوهش حاضر به مطالعه و آزمایش در زمینه‌ی ذکرشده اختصاص یافته است. بدین منظور، ۱۰ آزمایش بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۳۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر انجام شده است. جهت آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها از روش‌های نصب خارجی و نصب خارجی بر روی شیار استفاده شده است. همچنین نمونه‌ها در سطوح مختلف ۰، ۲۰، و ۳۰ درصد کرنش نهایی ورق FRP پیش‌تنیده شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که پیش‌تنیدگی کامپوزیت FRP و نصب با استفاده از روش نصب خارجی (EBR)، ظرفیت اتصال را تا ۷۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون پیش‌تنیدگی افزایش داده است. همچنین استفاده از روش نصب خارجی روی شیار (EBROG)، توانسته است به‌طور چشمگیری ظرفیت اتصال را تا ۱۲۳٪ نسبت به نمونه‌ی تقویت‌شده با روش EBR در حالت بدون پیش‌تنیدگی بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: آزمایش برش مستقیم، اتصال پیش‌تنیده، کامپوزیت پیش‌تنیده‌ی **FRP**، رفتار اتصال، روش نصب خارجی، روش نصب خارجی روی شیار.

erfan.shabani@cv.iut.ac.ir
dmostofi@iut.ac.ir
a.saljoughian@iut.ac.ir

۱. مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های FRP برای تقویت سازه‌های بتنی، که ضعیف یا آسیب‌دیده هستند، یک روش پذیرفته‌شده در سراسر جهان است. اگرچه استفاده از FRP ممکن است در ابتدا گران به‌نظر برسد، اما می‌تواند در درازمدت مقرون به صرفه باشد، زیرا به عملیات اجرایی و نگهداری کمتری نیاز دارد.[۱]

کامپوزیت FRP فواید زیادی دارد، اما استفاده از آن با چالش عمده‌ی جداشدگی زودهنگام کامپوزیت FRP از سطح بتن همراه است. جداشدن سیستم تقویت در مقدار کرنش به مراتب کمتر از کرنش پارگی FRP مانع از استفاده‌ی بیشینه از ویژگی‌های منحصر به فرد کامپوزیت FRP جهت بهبود عملکرد عضو تقویت‌شده می‌شود، که باعث اتلاف مصالح و افزایش هزینه‌های مقاوم‌سازی می‌شود.

برای غلبه بر مشکل اخیر، پژوهشگران روش‌های عملی و کارآمد مختلفی را برای به تأخیرانداختن جداشدگی ورق‌های FRP از سطح بتن پیشنهاد کرده‌اند؛ که یکی از آن‌ها، استفاده از ورق‌های FRP پیش‌تنیده است، که می‌تواند عملکرد کامپوزیت FRP را بهبود بخشد.[۲ و ۳]

به‌دلیل ضعف بتن در کشش، تیرهای بتنی تحت اثر لنگر خمشی در ناحیه‌ی کششی دچار ترک‌خوردگی می‌شوند. بتن فقط می‌تواند حدود ۸ الی ۱۴ درصد نیروی فشاری را در کشش تحمل کند. برای جلوگیری یا کاهش ترک‌های ایجادشده و کمبودهای ناشی از آن، می‌توان با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی حاصل از FRP پیش‌تنیده به سطح کششی تیر، کشش ناشی از بارگذاری خارجی را کاهش داد و یا کاملاً خنثی کرد.[۴]

تأثیر استفاده از کامپوزیت پیش‌تنیده‌ی FRP در مقاومت اتصال نمونه‌های تقویت‌شده در سال‌های اخیر بررسی شده است.[۵ و ۶] آزمایش رهاسازی نیروی پیش‌تنیدگی، از جمله آزمایش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی بررسی عملکرد مقاومت اتصال است،که در آن، نیروی پیش‌تنیدگی، مقداری بزرگ در نظر گرفته می‌شود؛ تا پس از رها سازی نیروی پیش‌تنیدگی از یک طرف، سطح اتصال گسیخته شود.[۷ و ۸]

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷.

استناد به این مقاله:
شبانی، عرفان، مستوفی نژاد، داود، و سلجوقیان، علیرضا، ۱۴۰۳. آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده جهت ارزیابی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن، ۴۰(۴)، صص. ۹۶-۱۰۷. DOI: 10.24200/j30.2024.63429.3273

گاردن[۱] و همکارش (۱۹۹۸)، در مطالعه‌یی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده را با استفاده از ورق‌های FRP پیش‌تنیده بررسی کرده‌اند؛ که در آن، تیرهای بررسی‌شده به سه دسته‌ی تیرهای دارای مهار مکانیکی انتهایی، تیرهای دارای مهار FRP انتهایی، و تیرهای بدون مهار انتهایی تقسیم شده بودند. نیروی پیش‌تنیدگی ورق‌های FRP در تیرهای مذکور از ۲۵ تا ۵۰ درصد مقاومت نهایی کامپوزیت تغییر یافته و حالت‌های مختلف شکست، مانند گسیختگی FRP و جداشدن آن از سطح بتن مشاهده شده است. نتایج نشان داده است که مهار انتهایی می‌تواند به استحصال کامل ظرفیت FRP کمک کند.[۹]

شانگ[۲] و همکاران (۲۰۰۵)، تأثیر ورق CFRP پیش‌تنیده در مقاوم‌سازی ۵ تیر بتن مسلح به ابعاد ۱۰۰×۱۵۰×۲۲۰۰ میلی‌متر را بررسی و مشاهده کردند که بار ترک‌خوردگی، سختی خمشی، و مقاومت تیر تقویت‌شده با FRP پیش‌تنیده افزایش یافته است. آن‌ها همچنین گزارش داده‌اند که کرنش و تنش در لحظه‌ی گسیختگی نهایی تیر کاهش یافته است.[۱۰]

نوردین[۳] و همکارش (۲۰۰۶)، مقاوم‌سازی ۱۵ تیر بتن مسلح به طول ۴ متر را با استفاده از میلگردهای FRP پیش‌تنیده به روش NSM بررسی کرده‌اند؛ که در آن، نوع FRP و درصد پیش‌تنیدگی متفاوت بوده است. یافته‌ها نشان داد که بار ترک‌خوردگی با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. علاوه‌بر این، همه‌ی نمونه‌ها، گسیختگی میلگرد FRP را نشان داده‌اند.[۱۱]

جعفر[۴] و همکارش (۲۰۰۷)، نیز با استفاده از روش NSM در تقویت تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP دریافته‌اند که نیروی پیش‌تنیدگی ایجادشده در میلگردهای FRP، بین ۲۰ تا ۶۰ درصد مقاومت نهایی FRP است. همچنین ایشان دریافته‌اند که استحکام نهایی تیر با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی افزایش و شکل‌پذیری تیر تقویت‌شده نیز با افزایش درصد پیش‌تنیدگی میلگردهای FRP کاهش می‌یابد.[۱۲]

کیم[۵] و همکاران (۲۰۰۸)، از مهارهای غیرفلزی به‌جای مهارهای فولادی برای ارزیابی توانایی FRP پیش‌تنیده برای تقویت تیرها استفاده و روشی را برای جایگزینی مهارهای فلزی پیشنهاد کرده‌اند. برای این منظور، ۹ تیر بتن مسلح را با انواع سیستم‌های مهار غیرفلزی آزمایش کرده و به پیش‌تنیدگی پایدار در ورق‌های CFRP با تلفات پیش‌تنیدگی ناچیز با استفاده از مهارهای غیرفلزی توسعه‌یافته دست یافته‌اند.[۱۳]

حاجی هاشمی و همکاران (۲۰۱۱)،[۱۴] از روش NSM برای تقویت تیرهای بتن‌آرمه توسط میلگرد FRP پیش‌تنیده استفاده کرده‌اند. ایشان سطوح مختلف پیش‌تنیدگی را از ۵ تا ۳۰ درصد مقاومت نهایی میلگرد FRP اعمال کرده و گزارش داده‌اند که استفاده از میلگرد FRP پیش‌تنیده، ظرفیت باربری نهایی تیرها را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داده است که در نمونه‌های پیش‌تنیده، عرض ترک بین ۲۲ تا ۵۲ درصد کاهش یافته است.

سادرسکی[۶] (۲۰۱۲)، آزمایش رهاسازی نیروی پیش‌تنیدگی را برای بررسی آثار پیش‌تنیدگی در سطح بتن انجام داده و دریافته است که با آزادشدن نیروی پیش‌تنیدگی، تغییرشکل‌های بزرگی در خارج از صفحه‌ی اتصال ایجاد می‌شود. همچنین، ترک‌های مورب عمیق را در عمق بتن مشاهده کرده است.[۱۵]

ابداع روش‌های شیارزنی توسط برخی از پژوهشگران دانشگاه صنعتی اصفهان، از جمله مطالعاتی بود که در زمینه‌ی تأخیر در پدیده‌ی جداسازی انجام شده است.[۱۸-۱۶] از جمله روش‌های شیارزنی، می‌توان به روش نصب روی شیار (EBROG)،[۷][۱۶] نصب داخل شیار (EBRIG)،[۸][۱۷] و نصب در داخل و روی شیار (EBRIOG)،[۹][۱۸] اشاره کرد.

روش نصب روی شیار، شامل ایجاد شیارهای طولی در سطح موردنظر، حذف گرد و غبار از سطح بتن، پُرکردن شیارها با استفاده از رزین اپوکسی، و چسباندن کامپوزیت‌های FRP روی سطح بتن است.[۱۶]

در مطالعات اخیر، تأثیر روش‌های شیارزنی در المان‌های سازه‌یی بتنی بررسی شده است.[۱۹] پژوهشگران دانشگاه صنعتی اصفهان نشان داده‌اند که استفاده از روش نصب خارجی بر روی شیار، تأثیر چشمگیری در عملکرد عضو تقویت‌شده دارد. مطالعات نشان داده‌اند که روش EBROG با انتقال تنش‌های برشی به لایه‌های زیرین سطوح بتن باعث افزایش مقاومت می‌شود.[۲۱-۱۹]

بنابر آنچه گفته شد، استفاده از FRP پیش‌تنیده در مقاوم‌سازی اجزاء سازه‌یی موجب استفاده‌ی مؤثرتر و کاراتر از مصالح FRP می‌شود. به‌کارگیری این مهم در عمل مستلزم شناخت کامل رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن است. با توجه به مطالعات انجام‌شده در این زمینه، نیاز به مطالعات بیشتر جهت نمایان‌شدن تمامی ابعاد مسئله‌ی مذکور احساس می‌شود. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا با ارائه‌ی آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده، زمینه‌ی شناخت هر چه بهتر رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن مهیا شود.

۲. برنامه‌های آزمایشگاهی

لازمه‌ی انجام یک پژوهش، شناخت کافی از مصالح مصرفی، جزئیات نمونه‌ها، دستگاه آزمایش، و همچنین برنامه‌ریزی دقیق برای انجام آزمایش‌هاست. بنابراین در بخش حاضر، کلیه‌ی اطلاعات مرتبط با انجام آزمایش‌ها توضیح داده شده است.

۱.۲. مشخصات نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده با بتن، منشورهای بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. در پژوهش حاضر، از آزمایش برش

[۱] Garden
[۲] Shang
[۳] Nordin
[۴] Gaafar
[۵] Kim
[۶] Czaderski
[۷] Externally Bonded Reinforcement On Grooves
[۸] Externally Bonded Reinforcement In Grooves
[۹] Externally Bonded Reinforcement In & On Grooves

مستقیم به عنوان آزمایشی متداول برای بررسی عملکرد اتصال ورق FRP به بتن استفاده شده است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D۵۸۶۸،[۲۶] انجام شده است. آزمایش بر روی سه طرف از منشور انجام شده است، در حالی که ضلع چهارم به‌دلیل سطح نامنظم آن کنار گذاشته شده است. همراه با هر منشور، نمونه‌های استوانه‌یی به ارتفاع ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر، طبق استاندارد ASTM C۳۹،[۲۷] به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن ساخته و به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند. همچنین، جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن، سه نمونه‌ی استوانه‌یی آزمایش شده‌اند. این در حالی است که مقاومت فشاری سه نمونه‌ی دیگر در روز انجام آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری شده است.

۲.۲. مشخصات مصالح مصرفی در ساخت و تقویت نمونه‌ها

طرح اختلاط بتن برای نمونه‌ها براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۲۲۱،[۲۳] برای دستیابی به مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال در ۲۸ روز تنظیم شده است. اندازه‌ی بیشینه‌ی سنگ‌دانه‌ی استفاده‌شده در بتن موردنظر، ۱۲/۵میلی‌متر بوده است. در پژوهش حاضر، از سیمان نوع II محصول کارخانه‌ی اردستان استفاده شده است. نسبت وزن هر ماده در هر مترمکعب بتن در جدول ۱ ارائه شده است. الیاف استفاده‌شده در پژوهش حاضر از نوع کربن با نام تجاری SikaWrap ۳۰۰C بوده است. همچنین به‌منظور اشباع‌کردن الیاف کربن از رزین اپوکسی شرکت کوانتوم ایران با نام تجاری Quantom-EPR ۳۳۰۱ استفاده شده است؛ که دو جزء سفید و خاکستری دارد، که باید به نسبت ۳ به ۱ با یکدیگر مخلوط شوند. طبق کاتالوگ سازنده، زمان عمل‌آوری رزین بین ۵ تا ۷ روز در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. مشخصات مکانیکی الیاف کربن و رزین استفاده‌شده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.[۲۳ و ۲۴]

جدول ۱. وزن مصالح مصرفی برای ساخت یک مترمکعب بتن.

نوع مصالح	وزن به ازاء ۱ مترمکعب بتن (kg/m^3)
سیمان	۳۱۰
شن (۵-۱۲/۵)	۸۸۰
ماسه (۰-۵)	۹۰۴
آب	۲۱۶

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین استفاده‌شده در پژوهش حاضر.[۲۳ و ۲۴]

نام تجاری	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (MPa)	کرنش نهایی ورق (٪)
SikaWrap ۳۰۰C	۰/۱۷۱	۳۸۰۰	۲۴۲۰۰۰	۱/۵۵
Quantom-۳۳۰۱ EPR	-	۳۰	۴۵۰۰	۱/۵۰

۳.۲. طبقه‌بندی و نام‌گذاری نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی رفتار اتصال ورق FRP پیش‌تنیده به بتن، ۱۰ آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های منشور بتنی انجام شده است؛ که در آن‌ها، نمونه‌ها بر حسب درصدهای مختلف پیش‌تنیدگی و روش نصب FRP روی سطح بتنی نام‌گذاری شده‌اند.

در تمامی نمونه‌ها از ورق FRP با عرض ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین طول اتصال در همه‌ی آن‌ها برابر ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب و نام‌گذاری و مشخصات تمامی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

۴.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها قبل از فرآیند تقویت به‌صورت سطحی آماده شده‌اند. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها با روش EBR، از دستگاه فرز مجهز به صفحه‌ی سایش بتن برای حذف لایه‌ی نازک از سطح بتن استفاده شده است. سپس سطح بتن توسط کمپرسور هوای فشرده از هرگونه گرد و غبار پاک‌سازی و در پایان FRP بر روی سطح بتنی چسبانده شده است.

در پژوهش حاضر، دو نمونه با استفاده از روش EBROG تقویت و پس از ایجاد شیارهایی با ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر روی نمونه، سطوح با استفاده از کمپرسور هوای فشرده، عاری از هر گونه گرد و غبار شده‌اند. سپس داخل شیار با رزین پُر و ورق FRP روی سطح اتصال و شیار چسبانده شده است.

به‌منظور تقویت نمونه‌های پیش‌تنیده، با توجه به دهانه‌ی آزاد دستگاه، الیاف کربن به طول ۲۶۰۰ میلی‌متر برش داده شده‌اند (شکل ۱). ورق‌های فلزی به

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های اتصال FRP به بتن.

ردیف	نام	روش نصب	درصد	شماره‌ی
۱	SC -۱	EBR	۰	۱
۲	SC -۲	EBR	۰	۲
۳	S۱-۲۰	EBR	۲۰	۱
۴	S۲-۲۰	EBR	۲۰	۲
۵	S۱-۳۰	EBR	۳۰	۱
۶	S۲-۳۰	EBR	۳۰	۲
۷	SG -۱	EBROG	۰	۱
۸	SG -۲	EBROG	۰	۲
۹	۱-	EBROG	۲۰	۱
۱۰	۲-	EBROG	۲۰	۲

شکل ۱. دستگاه پیش‌تنیدگی به همراه FRP بریده‌شده.

شکل ۲. چیدمان نمونه‌ها در دستگاه پیش‌تنیدگی.

ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر به انتهای الیاف کربن متصل شدند، تا در فک دستگاه پیش‌تنیده قرار بگیرند. ورق‌های فلزی پس از خشک‌شدن چسب، در فک قرار گرفتند و پیچ‌های فکی با آچار گشتاور سفت شدند. نمونه‌ها مطابق شکل ۲، با فاصله‌ی مشخصی مرتب شده‌اند.

در ادامه، یک لایه‌ی نازک چسب روی طول اتصال بتن قرار گرفت. سپس سرتاسر طول FRP به رزین آغشته و در همان زمان کامپوزیت FRP روی سطح بتن تنظیم شد. ۳۵ میلی‌متر اول از هر نمونه‌ی بتنی با پلاستیک مخصوص پوشانده شد، تا در طول بین FRP و سطح بتن، به‌منظور جلوگیری از تمرکز تنش در حین بارگذاری، هیچ‌گونه اتصالی نباشد. بعد از انجام تنظیمات اولیه، با استفاده از جک هیدرولیکی نیروی جک دستگاه به ورق FRP اعمال شد تا پیش‌تنیده شود. میزان نیروی اعمال‌شده توسط جک دستگاه به ورق FRP توسط نیروسنج کنترل شد. پس از رسیدن نیرو به میزان پیش‌تنیدگی موردنظر، انتهای میله‌ی متصل به فک توسط مهره ثابت شد، تا از اتلاف نیروی پیش‌تنیدگی جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند، تا گیرش چسب کامل شود. به‌منظور درک بهتر، قسمت‌های مختلف دستگاه در شکل ۲ مشاهده می‌شود. پس از ۷ روز از چسباندن ورق FRP به بتن، نیروی جک آزاد شد. ورق FRP در نقاط از پیش تعیین‌شده بریده شد (شکل ۳)، تا نمونه‌ها از یکدیگر جدا شوند. سپس انتهای آزاد کامپوزیت FRP به ورق‌های فلزی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر متصل شد، تا آن‌ها را در فک دستگاه برش مستقیم قرار دهد.

۵.۲. دستگاه آزمایش و تجهیزات

در بستر پیش‌تنیدگی، انتقال نیرو از طریق جک هیدرولیکی به فک سمت چپ (شکل ۲) و سپس از فک به ورق FRP انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری و اعمال نیروی پیش‌تنیدگی اولیه از نیروسنج با ظرفیت ۷۰ کیلونیوتن استفاده شده است. مطابق شکل ۲، نیروسنج مذکور به صورت سری بین تکیه‌گاه و فک دستگاه قرار گرفته است.

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و تقویت، برای آزمایش به دستگاه برش مستقیم منتقل شدند. ابتدا ورق‌های انتهایی نمونه داخل فک دستگاه و سپس نمونه‌ها کاملاً بین تکیه‌گاه‌ها قرار گرفتند. نمونه‌ها با سرعت ۲ میلی‌متر در دقیقه تا زمان شکست بارگذاری شدند. برای تعیین میدان جابجایی روی سطح باند با

(الف)

(ب)

شکل ۳. (الف) جداسازی نمونه‌های پیش‌تنیده در دستگاه پیش‌تنیده؛ (ب) آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش یک طرفه.

شکل ۴. شبکه‌بندی نمونه‌ی بتنی همراه با مشخص‌کردن سطح اتصال.

استفاده از روش PIV، عکس‌هایی از سطح نمونه در فواصل زمانی مشخص گرفته شد. در روش PIV، ابتدا سطح نمونه با سه لایه رنگ سفید پوشانده می‌شود. سپس رنگ‌های مشکی، آبی، سبز، و قرمز به‌صورت تصادفی روی سطح پاشیده می‌شوند. از یک دوربین دیجیتال برای گرفتن عکس از سطح اتصال از شروع آزمایش تا لحظه‌ی شکست نهایی نمونه استفاده می‌شود. عکس‌ها توسط نرم‌افزار متلب[1] برای عملیات PIV پردازش می‌شوند. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نرم‌افزار متلب هر عکس را به شبکه‌هایی با ابعاد ۱۲۸×۱۲۸ پیکسل با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۶۴ پیکسل تقسیم می‌کند. برای تبدیل واحد پیکسل به واحد میلی‌متر، تعداد پیکسل در هر ۱۰ میلی‌متر اندازه‌گیری و در بردار ضرب می‌شود. سپس لغزش، کرنش، و تنش

[1] MATLAB

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها.

ردیف	نام نمونه	میزان پیش‌تنیدگی (٪)	P_{Test} (kN)	P_{Avg} (kN)	افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی شاهد (٪)	حالت گسیختگی	عمق جداشدگی (mm)
۱	SC-۱	۰	۸/۳۳	۸/۲	-	DC	-
۲	SC-۲	۰	۸/۰۲			DC	-
۳	S۱-۲۰	۲۰	۱۳/۸۴	۱۳/۹	۷۰	DC/CC	۲
۴	S۲-۲۰	۲۰	۱۳/۹۳			DC/CC	۲
۵	S۱-۳۰	۳۰	۱۳/۲۸	۱۳/۷	۶۸	DC/CC	۵
۶	S۲-۳۰	۳۰	۱۴/۲			DC/CC	۳
۷	SG-۱	۰	۱۳/۷۶	۱۳/۵	۶۵	DC/CC	۱/۵
۸	SG-۲	۰	۱۳/۱۹			DC/CC	۱/۵
۹	SG۱-۲۰	۲۰	۱۸/۷۷	۱۸/۳	۱۲۳	DC/CC	۱/۵
۱۰	SG۲-۲۰	۲۰	۱۷/۸۱			DC/CC	۱/۵

در اتصال با استفاده از بردارهای تغییرمکان محاسبه می‌شوند. در بخش‌های بعد، نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای مذکور و ارائه‌ی نمودارهای مرتبط توضیح داده شده است.

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث روی آن‌ها

۱.۳. مقاومت اتصال و حالت گسیختگی

مقاومت اتصال نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری شده است. این تذکر لازم است که در آزمایش برش مستقیم، مقاومت اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن بررسی می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شده است، اگر سطح آماده‌سازی‌شده، قابلیت انتقال تنش از ورق FRP به بتن را نداشته باشد، کارایی ورق FRP می‌تواند به ۱۰٪ مقاومت کششی نهایی FRP محدود شود. بنابراین، انتخاب روش آماده‌سازی مناسب می‌تواند ظرفیت اتصال را تا چندین برابر افزایش دهد.

برای بررسی و مقایسه‌ی رفتار اتصال‌های پیش‌تنیده و غیرپیش‌تنیده‌ی FRP به بتن، ظرفیت بارگذاری و حالت شکست نمونه‌ها ارزیابی شده است. مود شکست در بین نمونه‌ها به‌صورت جداشدگی FRP به همراه لایه‌ی نازک بتن است. نتایج آزمایش برش مستقیم در جدول ۴ ارائه شده است. نمونه‌ی ۱-SC، به عنوان نمونه‌ی شاهد، دارای ظرفیت اتصال ۸/۳۳ کیلونیوتن است. نمونه‌ی ۲-SC به‌عنوان تکرار نمونه‌ی اول انجام شده است، تا نتایج را راستی‌آزمایی کند. ظرفیت اتصال تکرار دوم، ۸/۰۲ کیلونیوتن اندازه‌گیری شده است، که کمتر از ۵٪ با نمونه‌ی اول تفاوت داشت. بنابراین، میانگین ظرفیت اتصال نمونه‌های تقویت‌شده با روش EBR، برابر با ۸/۲ کیلونیوتن بوده است. حالت شکست دو نمونه‌ی ذکرشده، جداشدگی زودهنگام ورق FRP همراه با یک لایه‌ی نازک از بتن بوده است. شکست دو نمونه‌ی اخیر در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

(الف) (ب)

شکل ۵. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) ۱- CS؛ (ب) ۲- CS.

ظرفیت اتصال نمونه‌ی S۲۰-۱ با یک لایه‌ی FRP ۲۰٪ پیش‌تنیده، ۱۳/۸۴ کیلونیوتن ثبت شده است. در تکرار نمونه‌ی ۲۰٪ پیش‌تنیده با روش EBR، ظرفیت اتصال ۱۳/۹۳ کیلونیوتن مشاهده شد، که کمتر از ۱٪ با تکرار اول تفاوت داشت. میانگین ظرفیت اتصال دو نمونه‌ی اخیر، ۱۳/۹ کیلونیوتن بوده است؛ که بهبود قابل توجهی (۷۰٪) در مقایسه با نمونه‌ی شاهد داشته است؛ که دلیل آن استفاده از ورق FRP پیش‌تنیده برای مقاوم‌سازی نمونه‌ی بتنی بوده است. پیش‌تنیدگی باعث ایجاد تنش‌های فشاری بر روی سطح بتن برابر با نیروی پیش‌تنیدگی ناشی از کامپوزیت FRP شده است. این امر باعث افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی سطح بتن، به تأخیرانداختن پدیده‌ی جداشدگی، و درنهایت افزایش مقاومت اتصال شده است. حالت شکست هر دو نمونه به‌صورت جداشدگی ورق FRP از سطح بتن با عمق ۲ میلی‌متر بوده است. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مذکور در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

(الف) (ب)

شکل ۶. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) S۲۰-۱ ؛ (ب)) S۲۰-۲.

(الف) (ب)

شکل ۷. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) S۳۰-۱؛ (ب) S۳۰-۲.

نمونه‌ی S۳۰-۱ دارای ظرفیت اتصال ۱۳/۲۸ کیلونیوتن بوده است. نمونه‌ی S۲-۳۰، تکراری از نمونه‌ی۳۰٪ پیش‌تنیده با روش EBR با ظرفیت اتصال ۱۴/۲ کیلونیوتن بوده است. میانگین ظرفیت اتصال آن‌ها ۱۳/۷ کیلونیوتن محاسبه شده و نتایج نشان داده است که نمونه‌های EBR با پیش‌تنیدگی ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد ۶۸٪ افزایش ظرفیت داشته‌اند. با این حال، ظرفیت اتصال آن‌ها تقریباً مشابه نمونه‌های EBR با پیش‌تنیدگی ۲۰٪ بوده است. در واقع اتصال EBR قادر نبوده است که نیروی ناشی از پیش‌تنیدگی ۳۰٪ را منتقل کند. بنابراین، هر دو نمونه در ابتدا و انتهای اتصال، زمانی که نیروی پیش‌تنیدگی آزاد شده است، شکست‌های موضعی داشته‌اند (شکل ۷). درنهایت، سطح اتصال نتوانسته است در برابر نیروی موردانتظار مقاومت کند و در نیرویی مشابه نمونه‌های با پیش‌تنیدگی ۲۰٪ گسیخته شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مذکور، جداشدگی ورق تقویتی همراه با لایه‌یی از سطح بتن بوده و طبق نتایج به‌دست‌آمده، عمق گسیختگی آن‌ها تا ۶ میلی‌متر مشاهده شده است.

نمونه‌ی SG توانسته است باری معادل ۱۳/۵ کیلونیوتن را تحمل کند. مشاهده می‌شود که ظرفیت اتصال دو نمونه‌ی SG و S۲۰ تقریباً یکسان است. این

(ب) (الف)

شکل ۸. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) SG ۲۰-۱؛ (ب) SG۲۰-۲.

بدان معناست که افزایش ظرفیت با استفاده از روش شیارزنی معادل این است که در روش EBR، ورق FRP به میزان ۲۰٪ پیش‌تنیده شود. از آنجایی که هزینه‌های پیش‌تنیدگی بالاست، در این سطح از افزایش ظرفیت، استفاده از شیار به جای پیش‌تنیده‌کردن نمونه‌ی EBR مقرون به صرفه است.

مقاومت اتصال نمونه‌ی SG۲۰-۱، که با استفاده از یک لایه ورق FRP با پیش‌تنیدگی ۲۰٪، که با استفاده از روش EBROG تقویت شده بود، برابر با ۱۸/۷۷ کیلونیوتن اندازه‌گیری شد. این تذکر لازم است که شیارهای ایجادشده در نمونه‌ی اخیر، ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۲۰ میلی‌متر داشته است. همچنین نمونه‌ی SG۲۰-۲، که تکرار نمونه‌ی ۲۰٪ پیش‌تنیده است، نیروی ۱۷/۸۱ کیلونیوتن را تحمل کرده است. میانگین ظرفیت باربری نمونه‌های EBROG برابر با ۱۸/۳ کیلونیوتن شده است، که نسبت به نمونه‌ی شاهد، افزایش ۱۲۳ درصدی را تجربه کرده است. همچنین نمونه‌ی شیاردار نسبت به نمونه‌های بدون شیار با پیش‌تنیدگی ۲۰ و ۳۰ درصد حدود ۳۲٪ افزایش داشته است؛ که علت آن را می‌توان پیش‌تنیده‌شدن سطح بتن و به تعویق‌افتادن جداشدگی دانست. در واقع، بالابودن مقاومت اتصال در نمونه‌ی تقویت‌شده با روش شیارزنی را می‌توان دلیل این افزایش ظرفیت پنداشت. به‌عبارتی، روش‌های شیارزنی با انتقال تنش به اعماق بتن موجب افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی EBR متناظر شده‌اند؛ در نتیجه نیروی پیش‌تنیدگی ایجادشده در نمونه‌ها، تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت اتصال نمونه‌های مذکور داشته است. همچنین حالت گسیختگی نمونه‌های اخیر، جداشدگی ورق FRP از سطح بتن است. در شکل ۸، تصویر گسیختگی نمونه‌ها را می‌توان مشاهده کرد.

۲.۳. نمودارهای لغزش در عرض اتصال

مقدس و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۵] رابطه‌های ۱ و ۲ را جهت به‌دست‌آوردن لغزش در اتصال ارائه کرده‌اند:

$$S = \delta_{FRP} - \delta_{Concrete} \quad (۱)$$

$$\delta_{Concrete} = \delta_L + \frac{\delta_R - \delta_L}{L} \times R \quad (۲)$$

لغزش با تفاوت بین تغییرمکان مرکز ورق FRP و تغییرمکان بتن محاسبه می‌شود. تغییرمکان‌های بتن با استفاده از پارامترهای δ_L برای تغییرمکان لبه‌ی سمت چپ، δ_R برای تغییرمکان لبه‌ی سمت راست، L فاصله‌ی بین المان‌های

چپ و راست، و R فاصله‌ی مرکز ورق FRP تا المان چپ به‌دست می‌آیند (شکل ۴). سطوح بار انتخاب‌شده به‌صورت درصدی از بیشینه‌ی باری که اتصال می‌تواند در برابر آن مقاومت کند، بیان می‌شود. فقط نمودارهای اولین نمونه از هر گروه ارائه شده است، زیرا نتایج برای نمونه‌های تکراری مشابه بوده است. مطابق شکل ۹- الف، لغزش در نمونه‌ی کنترل از شروع بارگذاری به نسبت بار ۱۰۰٪ به حدود ۰/۱۱ میلی‌متر رسیده است. این بدان معناست که یک ترک بر روی سطح باند ایجاد و زمانی که بار به مقدار بیشینه نزدیک شده است، ورق FRP شروع به جداشدن از سطح بتن کرده است. همین وضعیت برای نمونه‌های ۲۰ و ۳۰ درصد پیش‌تنیده رخ داده است، اما با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی، شکاف کمتری بین پروفیل‌های لغزش در هنگام جداسازی وجود داشته است.

در شکل ۹- د، مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی شاهد شیاردار، بیشینه‌ی کرنش به ۰/۴۵ رسیده است. در نمونه‌ی پیش‌تنیده‌ی شیاردار، بیشینه‌ی لغزش نسبت به نمونه‌های دیگر کاهش یافته است. در واقع، وجود شیار باعث انتقال تنش‌های پیش‌تنیدگی به عمق‌های سخت‌تر بتن، و درنهایت کاهش لغزش در نمونه شده است.

شکل ۹. نمودارهای لغزش در عرض ورق تقویتی: (الف) CS؛ (ب) S۲۰؛ (ج) S۳۰؛ (د) SG؛ (ه) SG ۲۰.

۳.۳. نمودارهای کرنش در عرض اتصال

مقدار کرنش (رابطه‌ی ۳)، با استفاده از معادله‌ی لغزش به‌دست آمده است. این معادله اجازه می‌دهد تا منحنی کرنش برای سطوح مختلف بار ترسیم شود. برای این منظور، از روش PIV در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در رابطه‌ی اخیر، لغزش، شماره، و مکان المان به ترتیب با S، i، و x نشان داده شده‌اند:[۲۵]

$$\varepsilon_i = \frac{S_{i+1/2} - S_{i-1/2}}{X_{i+1/2} - X_{i-1/2}} \qquad (۳)$$

در شکل ۱۰، نمودارهای کرنش در عرض اتصال نمونه‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰- ب، بیشینه‌ی کرنش برای نمونه‌ی S۲۰ حدود ۱۱۰۰۰ میکرواسترین است. در حالی که بیشینه‌ی کرنش در نمونه‌ی شاهد (مطابق شکل ۱۰- الف)، حدود ۴۲۰۰ میکرواسترین بوده است. در واقع، تقویت نمونه با ورق FRP با ۲۰٪ پیش‌تنیدگی موجب افزایش حدود دو برابری بیشینه‌ی کرنش شده است. نمونه‌ی S۳۰، بیشینه‌ی کرنشی مشابه با نمونه‌ی S۲۰ داشته است، که علت آن را می‌توان گسیختگی موضعی آن در هنگام رهاسازی بار پیش‌تنیدگی ۳۰٪ کرنش نهایی ورق FRP دانست. در بررسی نمودار نمونه‌های تقویت‌شده با روش شیارزنی مشاهده می‌شود که کرنش در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در نمونه‌ی بدون پیش‌تنیدگی و پیش‌تنیده به ترتیب ۱۶۰ و ۵۵ درصد افزایش داشته است. با بررسی نتایج می‌توان دریافت در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش شیارزنی، علی‌رغم افزایش ظرفیت اتصال، شکل‌پذیری و قابلیت تغییرشکل در تنش‌های بالا کاهش یافته است؛ که به‌دلیل ایجاد شیار در سطح بتن منجر به افزایش سطح اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن شده و سختی اتصال افزایش پیدا کرده است. لذا، تحت تنش‌های یکسان در مقایسه با سایر نمونه‌ها، کرنش کمتری را متحمل شده است.

۴.۳. نمودارهای تنش در عرض اتصال

معادله‌ی تنش (رابطه‌ی ۴)، با ضرب مقدار کرنش به‌دست‌آمده از بخش ۳.۳ در سختی ورق FRP به‌دست می‌آید و امکان محاسبه‌ی منحنی تنش در

شکل ۱۰. نمودارهای کرنش در عرض ورق تقویتی: (الف) CS؛ (ب) S۲۰؛ (ج) S۳۰؛ (د) SG؛ (ه) SG۲۰.

امتداد طول ورق FRP را برای سطوح مختلف بار فراهم می‌کند. برای این منظور از روش PIV در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.[۲۵]

$$\tau_i = E_f t_f \frac{S_{i+1/2}-S_{i-1/2}}{X_{i+1/2}-X_{i-1/2}} \quad (۴)$$

که در آن، τ_i معرف تنش برشی در واحد طول، E_f مدول کشسانی ورق تقویتی، و t_f ضخامت ورق تقویتی هستند.

شکل ۱۱، تغییرات تنش در عرض اتصال در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متری از ابتدای اتصال را نشان می‌دهد. به عبارتی، نمودار تنش در عرض اتصال بیانگر میزان تنش ایجادشده در نقاط عرضی اتصال به ازاء بارهای مختلف اعمال‌شده است.

در شکل ۱۱، نمودارهای تنش در عرض اتصال نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۱- الف، با افزایش میزان بارگذاری، تنش در اتصال افزایش یافته است؛ به طوری که بیشترین سطح تنش مربوط به حالت بارگذاری ۹۰٪ است. به‌طور مشابه، در نمونه‌ی دارای پیش‌تنیدگی ۲۰٪ همین روند رخ داده است؛ با این تفاوت که بیشترین سطح تنش در میزان بار ۸۰٪ بار نهایی اتفاق افتاده است.

این تذکر لازم است که در نمونه‌ی S۳۰ بیشترین سطح تنش در نسبت بار ۵۰ ٪ رخ داده است، که به‌علت گسیختگی موضعی اتصال در هنگام رهاسازی نیروی پیش‌تنیدگی است. در روش EBROG، بیشینه‌ی تنش در حالت غیرپیش‌تنیده در سطح بار ۵۰٪ رخ داده است. این در حالی است که در نمونه‌ی با ۲۰٪ پیش‌تنیدگی، بیشینه‌ی تنش در سطح بار ۹۰٪ ایجاد شده است، که نشان از ظرفیت اتصال در پذیرش نیروی پیش تنیده‌ی اولیه است.

در نمودار تنش در عرض اتصال نمونه‌ی S۲۰ در شکل ۱۱- ب مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تنش در نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد بیش از ۲ برابر افزایش داشته است. این در حالی است که میزان تنش بیشینه در

شکل ۱۱. نمودار تنش در عرض ورق تقویتی: (الف) CS؛ (ب)S۲۰؛ (ج) S۳۰؛ (د) SG؛ (ه) SG۲۰.

نمونه‌ی S۳۰ نسبت به نمونه‌ی شاهد بیش از ۵۰٪ کاهش یافته است. همچنین نتایج حاکی از آن است که بیشترین تنش در نمونه‌ی SG۲۰ رخ داده است. این تذکر لازم است که به‌دلیل عدم ظرفیت اتصال EBR برای تحمل نیروی پیش‌تنیدگی ۳۰٪ و گسیختگی موضعی نمونه هنگام آزادسازی نیروی پیش‌تنیدگی، نمودارهای تنش در دو نمونه‌ی S۲۰ و S۳۰ متفاوت است.

در نمودار مرتبط با نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود که تنش در عرض ورق تقویتی با روندی تقریباً یکسان در عرض اتصال افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، تغییرات تنش از لبه‌ی اتصال به سمت داخل روند نسبتاً منظم دارد. این در حالی است که در نمونه‌های EBR پیش‌تنیده، تغییرات تنش در عرض اتصال بسیار نامنظم است؛ به‌طوری که تنش از وسط ورق به سمت لبه‌ها افزایش می‌یابد. این تذکر لازم است که در نمونه‌ی EBROG، این مسئله به چشم نمی‌آید. می‌توان گفت در اتصال EBR به‌دلیل صاف و صیقلی‌بودن سطح اتصال، در المان‌هایی از اتصال افت نیروی پیش‌تنیدگی اتفاق افتاده و موجب بالا و پایین شدن تنش در عرض اتصال شده است. از طرف دیگر، در اتصال EBROG با توجه سطح درگیری بیشتر ورق FRP با بتن به دلیل شیارهای موجود، این مسئله بسیار کم‌رنگ شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی اتصال پیش‌تنیده‌ی FRP به بتن از آزمایش برش مستقیم- اتصال پیش‌تنیده استفاده شده است. همچنین، نمونه‌ها با دو روش EBR و EBROG آماده‌سازی و نتایج آن‌ها از جمله ظرفیت اتصال و نمودارهای عرضی کرنش، تنش، و لغزش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده به این شرح است:

۱- استفاده از FRP پیش‌تنیده در اتصال منجر به ایجاد تنش‌های فشاری در سطح بتن و به دنبال آن افزایش مقاومت اتصال FRP به بتن شده است. به‌عنوان مثال، مقاومت اتصال نمونه‌های تقویت‌شده با ورق FRP با ۲۰٪ پیش‌تنیدگی به روش EBR به میزان ۷۰٪ نسبت به نمونه‌های بدون پیش‌تنیدگی افزایش یافته است.

۲- اتصال آماده‌سازی‌شده با روش EBR نتوانست نیروی حاصل از پیش‌تنیدگی ۳۰٪ را به بتن منتقل کند و دچار گسیختگی موضعی در انتهای اتصال شد. بنابراین، در نمونه‌ی مذکور افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی ۲۰٪ پیش‌تنیده مشاهده نشد. ولی به‌دلیل مکانیزم متفاوت گسیختگی در دو نمونه‌ی اخیر، نمودارهای رفتاری تنش و کرنش در عرض اتصال آن‌ها متفاوت شده است.

۳- مقاومت اتصال در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش EBROG برابر با ۱۸/۳ کیلونیوتن است، که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۲۳٪ افزایش تجربه کرده است. این افزایش چشمگیر مربوط به عملکرد مطلوب شیار در توزیع و انتقال تنش‌های پیش‌تنیدگی در اعماق بتن بوده است.

۴- با توجه به مراحل انجام‌شده در پژوهش حاضر، برای آزمایش نمونه‌ی تقویت‌شده با ورق FRP پیش‌تنیده و نتایج حاصل، می‌توان ادعا کرد که آزمایش انجام‌شده به‌منظور بررسی رفتار اتصال در نمونه‌های پیش‌تنیده، امکان تجزیه و تحلیل دقیق رفتار اتصال را فراهم می‌کند. این روش در مطالعات آتی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قابل اعتماد برای پژوهشگران در این حوزه استفاده شود.

۵- در پژوهش حاضر، اثر تقویت نمونه‌ها با کامپوزیت FRP پیش‌تنیده بر روی دو روش آماده‌سازی سطحی بررسی شده است. نتایج حاکی از عملکرد بهتر نمونه‌ی تقویت‌شده با روش EBROG نسبت به نمونه‌ی تقویت‌شده با روش متداول EBR بوده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده بر روی اتصال‌های پیش‌تنیده با استفاده از روش EBROG و در سطوح پیش‌تنیدگی بالاتر تمرکز بیشتری شود.

همچنین پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده استفاده از روش‌های پیش‌تنیدگی بر تیرهای واقعی با لایه‌های FRP بیشتر بررسی شود. علاوه‌بر این، از آنجایی که نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد اتصال مناسب نمونه‌های تهیه‌شده با استفاده از روش EBROG است، ارزیابی سطوح پیش‌تنیدگی قابل اعمال در این روش ارزشمند خواهد بود.

References- منابع

1. ACI Committee 440.2R-17., 2017. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, *American Concrete Institute (ACI)*, https://doi.org/10.14359/51700867.

2. Ueda, T. and Dai, J., 2005. Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *7*(1), pp.27-43. https://doi.org/10.1002/pse.187.

3. El-Hacha, R., Wight, R.G. and Green, M.F., 2001. Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *3*(2), pp.111-121. https://doi.org/10.1002/pse.76.

4. Lin, T. Y., and Burns, N. H., 1963. Design of prestressed concrete structures, *Book Design of prestressed concrete structures*, Series Design of prestressed concrete structures, ed., Editor eds., Wiley New York.

5. Michels, J., Zile, E., Czaderski, C. and Motavalli, M., 2014. Debonding failure mechanisms in prestressed CFRP/epoxy/concrete connections. *Engineering Fracture Mechanics*, *132*, pp.16-37. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.10.012.

6. Shabani, E., Mostofinejad, D. and Saljoughian, A., 2023. Bond behavior of prestressed FRP sheet-concrete joints: Comparison of EBROG and EBR

methods. *Construction and Building Materials*, *400*, p.132752. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132752.

7. Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D. and Motavalli, M., 2021. Bond resistance of prestressed CFRP strips attached to concrete by using EBR and EBROG strengthening methods. *Construction and Building Materials*, *266*, p.121209. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121209.

8. Moshiri, N., Martinelli, E., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A. and Motavalli, M., 2023. Bond behavior of prestressed CFRP strips-to-concrete joints using the EBROG method: experimental and analytical evaluation. *Journal of Composites for Construction*, *27*(1), p.04022104. https://doi.org/10.1061/jccof2.cceng-3851.

9. Garden, H.N. and Hollaway, L.C., 1998. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. *Composites Part B: Engineering*, *29*(4), pp.411-424. https://doi.org/10.1016/s1359-8368(97)00043-7.

10. Shang, S., Zou, P.X., Peng, H. and Wang, H., 2005, December. Avoiding de-bonding in FRP strengthened reinforced concrete beams using prestressing techniques. In *Proceedings of the international symposium on Bond behaviour of FRP in structures (BBFS). Hong Kong, China* (pp. 321-28).

11. Nordin, H. and Täljsten, B., 2006. Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP. *Journal of composites for construction*, *10*(1), pp.60-68. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2006)10:1(60).

12. Gaafar, M.A. and El-Hacha, R., 2007. Prestressing concrete beams using NSM FRP technique. In *Proceedings of International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement in Concrete Structures. FRPRCS-8, Partas, Greece* (pp. 8-11).

13. Kim, Y.J., Wight, R.G. and Green, M.F., 2008. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheets: Development of nonmetallic anchor systems. *Journal of Composites for Construction*, *12*(1), pp.35-43. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:1(35).

14. Hajihashemi, A., Mostofinejad, D. and Azhari, M., 2011. Investigation of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, *15*(6), pp.887-895. https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000225.

15. Czaderski-Forchmann, C., 2012. *Strengthening of reinforced concrete members by prestressed, externally bonded reinforcement with gradient anchorage* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

16. Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E., 2010. Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams. *Journal of composites for construction*, *14*(6), pp.804-811. https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000117.

17. Mostofinejad, D. and Shameli, S.M., 2013. Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction and Building Materials*, *38*, pp.751-758. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.030.

18. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2020. RC columns longitudinally strengthened via novel EBRIOG technique. *Structural Concrete*, *21*(2), pp.570-586. https://doi.org/10.1002/suco.201900151.

19. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2018. Grooving methods in square RC columns strengthened with longitudinal CFRP under cyclic axial compression. *Engineering Structures*, *174*, pp.724-735. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.007.

20. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2016. Axial-flexural interaction in square RC columns confined by intermittent CFRP wraps. *Composites Part B: Engineering*, *89*, pp.85-95. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.047.

21. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2018. Grooving methods in square RC columns strengthened with longitudinal CFRP under cyclic axial compression. *Engineering Structures*, *174*, pp.724-735. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.007.

22. ACI 211.1-91., 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (Reapproved 2009), *American Concrete Institute*, Farming Hills, MI, USA. https://doi.org/10.14359/10987.

23. http://www.sika.com

24. http://www.quantomEPR3301.co.uk

25. Moghaddas, A., Mostofinejad, D. and Ilia, E., 2019. Empirical FRP-concrete effective bond length model for externally bonded reinforcement on the grooves. *Composites Part B: Engineering*, *172*, pp.323-338. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.068.

26. ASTM D5868-01., 2014. Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding, *West Conshohocken, pa*. https://doi.org/10.1520/D5868-01R14.

27. ASTM C 39-05., 2009. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, *American Standard Test Method (ASTM)*.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۱۰۸-۱۱۵ ، (یادداشت فنی)

Research Note

بهسازی خاک ماسه‌ای رس‌دار با استفاده از نانوذره

سعید رحمتی سردشت (کارشناس ارشد)
علی‌اکبر حشمتی رفسنجانی* (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

استفاده از نانوذرات در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها، موضوعی مهم در مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک است. در پژوهش حاضر، اثر افزودن نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید در مقاومت فشاری در سه زمان مختلف عمل‌آوری ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه بررسی شده و نتایج نشان داده است که نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ نانو آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴/۹۲، ۴۶/۷۸، و ۴۳/۲۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مقاومت داشته و همچنین این افزایش مقاومت برای نمونه‌های دارای نانو کلسیم‌اکسید به ترتیب ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳، و ۳۶/۷۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد بوده است. با توجه به نتایج، افزایش زمان عمل‌آوری تأثیری در افزایش مقاومت نداشته و همچنین درصد بهینه برای هر دو نانوذره ۰/۱٪ انتخاب شده است. بررسی منحنی‌های تنش کرنش نشان داد که نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم‌اکسید، رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید داشته‌اند. در ادامه، نمونه‌ها تحت آنالیز FESEM قرار گرفته و نتایج نشان‌دهنده‌ی پُرشدگی بهتر در بین نمونه‌های بهسازی‌شده بوده است.

واژگان کلیدی: بهسازی خاک، نانو، کلسیم‌اکسید، آلومینیوم‌اکسید، مقاومت فشاری محدودنشده.

saeed_rahmati@civileng.iust.ac.ir
heshmati@iust.ac.ir

۱. مقدمه

با گسترش روزافزون جمعیت، نیاز به ساخت سازه‌های بلندمرتبه و همچنین وجود خاک‌های مسئله‌دار و نامناسب که مشکلاتی، نظیر: نشست، کاهش مقاومت برشی، و عدم ظرفیت باربری کافی جهت ساخت را به همراه دارند، بهسازی خاک‌های مذکور امری اجتناب‌ناپذیر است. بهسازی و تثبیت خاک‌ها می‌تواند با افزایش مقاومت برشی و کنترل خصوصیات انقباضی انبساطی خاک، موجب افزایش ظرفیت باربری بستر و کاهش مقادیر نشست شود.[۱]

در دهه‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از نانوذرات در مطالعات مهندسی، موردعلاقه‌ی پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته است. از مهم‌ترین ویژگی‌های نانوذرات می‌توان به حرکت آزادانه‌ی آن‌ها در محیط متخلخل به‌علت کوچک‌بودن قطرشان و داشتن نسبت زیاد سطح به حجم برای نانو ذرات که به‌تبع آن، ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر منجر به واکنش فعالانه با سایر ذرات و حلال‌ها شده است، اشاره کرد. مقادیر بسیار ناچیز از مواد اخیر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در رفتار فیزیکی و شیمیایی و همچنین خواص مهندسی خاک داشته باشند و امروزه جهت بهبود خواص مهندسی خاک به‌عنوان تثبیت‌کننده از فن‌آوری مذکور استفاده می‌شود.[۲-۴] در طول سال‌های اخیر، نانوذرات مختلف، ازجمله نانو رس، نانو سیلیکا، نانو لوله‌های‌کربنی، نانوذرات فلزی، و اکسید فلزی مانند نانو تیتانیوم و نانو آلومینیوم‌اکسید به‌منظور کاربردهای مهندسی و بهسازی خاک استفاده شده است.[۵-۱۱]

کول کارنی و ماندال[۱] (۲۰۲۲)، اثر افزودن نانو سیلیکا را در نسبت‌های وزنی ۲۰، ۳۰، و ۴۰ درصد وزنی در خصوصیات ماسه‌ی سیلتی، از جمله: نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری محدودنشده، و وزن مخصوص خشک بیشینه بررسی کردند و دریافتند که افزودن مقادیر ۲۰، ۳۰، و ۴۰ درصد وزنی نانو سیلیکا به خاک منجر به افزایش نسبت باربری کالیفرنیا به ترتیب ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد و کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خاک به ترتیب ۷، ۹

*نویسنده مسئول
تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱.

استناد به این مقاله:
رحمتی سردشت ، سعید و حشمتی رفسنجانی، علی‌اکبر، ۱۴۰۳. بهسازی خاک ماسه‌ای رس‌دار با استفاده از نانوذره. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص. ۱۰۸-۱۱۵. DOI: 10.24200/J30.2024.63620.3279.

[۱] Kulkarni & Mandal

و ۱۰ درصد شده است. همچنین برای مقاومت فشاری محدودنشده‌ی خاک در درصد وزنی ۲۰٪ افزایشی مشاهده نشده است، ولی در درصدهای ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۱۶۳ و ۲۰۵ درصد افزایش مقاومت مشاهده شده است.[۱۲] وصیف و همکاران[۱] (۲۰۲۲)، طیف وسیعی از درصدهای نانو سیلیس (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، و ۰/۸) را برای بهسازی خاک استفاده کرده‌اند. آزمایش آزمایشگاهی برای شناسایی حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک، و بررسی ریزساختاری استفاده شده است. براساس مطالعه‌ی حاضر، بهسازی خاک با ۰/۴ تا ۰/۶ درصد نانو سیلیس بهترین نتیجه را به همراه داشته و نتایج نشان داده است زمانی که درصد نانو سیلیس از ۰٪ به ۰/۸٪ افزایش یافته است، شاخص خمیری حدود ۳۳٪ کاهش و حد خمیری و حد روانی به ترتیب ۳۴ و ۷۸ درصد افزایش یافته است. همچنین وزن مخصوص بیشینه‌ی خاک بهسازی‌شده با نانو سیلیس کاهش یافته است، در حالی که درصد رطوبت بهینه از ۶/۳ تا ۱۴/۸ درصد در درصدهای ۰٪ تا ۰/۸٪ نانوسیلیس افزایش یافته است.[۱۳] نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی نمونه‌های بهسازی‌شده با نانو سیلیکا با ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ درصد وزنی بر دو نوع خاک رسی توسط کارومانچی و نرلا[۲] (۲۰۲۲) از طریق آزمایش‌های سه‌محوری و مقاومت فشاری محدودنشده نشان داده است که با افزودن نانو سیلیکا تا ۳٪ وزنی و زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری محصورنشده به میزان ۴۰۶ و ۴۹۶ درصد افزایش می‌یابد.[۱۴] حائری و ولیش‌زاده[۳] (۲۰۲۰)، مقاومت فشاری خاک رس لس[۴] بهسازی‌شده توسط نانو رس، نانو سیلیس و نانو کربنات‌کلسیم را ارزیابی کرده و دریافته‌اند که مقدار ناچیزی از نانو مواد (کمتر از ۱٪ از وزن خشک کل خاک) می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رفتار مکانیکی خاک را بهبود بخشد. مقادیر افزودنی‌هایی که بیشینه‌ی مقاومت فشاری محدودنشده را می‌دهند، به ترتیب برای نانو سیلیس، نانو کربنات‌کلسیم و نانو رس به ترتیب ۰/۱، ۰/۲، و ۰/۴ درصد از وزن خشک کل خاک تعیین شده است. کارآمدترین بهسازی نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۰/۲٪ نانو کربنات‌کلسیم بوده است، که منجر به بالاترین مقاومت فشاری محدودنشده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری شد.[۱۵] احمدی و شفیعی[۵] (۲۰۱۹)، با توجه به تفاوت‌های موجود در خواص نانو سیلیکا و میکروسیلیس به بررسی تأثیر افزودن مواد مذکور در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس پرداخته‌اند. درصد افزودنی هر یک از دو ماده‌ی اخیر به ۶٪ محدود و نمونه‌ها پس از ۲۸ روز آزمایش شدند و نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده نشان داد که افزودن نانو سیلیکا در مقادیر کمتر از ۲٪ در مقاومت فشاری و مدول کشسانی خاک تأثیر قابل‌توجهی داشته است. در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس، سرعت افزایش مقاومت در مقادیر کمتر از ۱٪ بیشتر بوده است، در حالی که میکروسیلیس روند نسبتاً پایداری را دنبال کرده است. نتایج حاصل از آزمایش پراش پرتوی ایکس (XRD) نشان داد که هیچ واکنش شیمیایی قابل‌توجهی در خاک توسط مواد افزودنی ایجاد نشده است.[۱۶] طبرسا[۶] و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی نمونه‌های مختلف خاک از منطقه‌ی شبکه‌ی سد بوستان گنبد و اینچه‌برون واقع در استان گلستان تحت تأثیر بهسازی با کمک نانو رس در نسبت‌های وزنی متفاوت ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی پرداخته و آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی، از جمله حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه‌محوری تحکیم‌نیافته‌ی زهکشی‌نشده و تحکیم مضاعف را انجام داده‌اند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانو رس بر خواص خمیری، مقاومتی، و تغییر شکل‌پذیری خاک بوده است. مشاهده‌ها نشان از افزایش شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، تنش چسبندگی کل، و مقاومت برشی و همچنین کاهش وزن مخصوص بیشینه، تنش اصطکاکی کل، رفتار پراکندگی و فروریزشی داشته‌اند. همچنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانو رس به خاک‌های بررسی‌شده، پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها به‌طور بسیار محسوس کاهش می‌یابد.[۱۷] طاها و طاها[۷] (۲۰۱۲)، با افزودن نانو رس، نانو آلومین، و نانو مس به خاک رسی، تأثیر آن‌ها را در رفتار تورمی و انقباضی خاک بررسی کردند و دریافتند که کاهش کرنش انقباضی و تورمی به‌دلیل افزودن نانو مواد بوده است.[۱۸] بارتون[۸] و همکاران (۲۰۰۹) و گالاگر و فینسترل[۹] (۲۰۰۴)، نیز در بررسی نانوذرات سیلیس بر روی خصوصیات خاک‌های رسی دریافتند که استفاده از درصدهای کم نانو سیلیس باعث افزایش چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود.[۱۹ و ۲۰]

با مرور پیشینه‌ی پژوهش مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایشگاهی در زمینه‌ی نانو مواد و آثار آن‌ها در رفتار ژئوتکنیکی خاک و توانایی آن‌ها در بهبود و تثبیت انواع خاک‌ها محدود بوده است، در حالی که ظرفیت پژوهش در این زمینه به مراتب بیشتر بوده است. از سوی دیگر، در زمینه‌ی بهسازی با استفاده از نانو مواد، تاکنون مطالعات اندکی بر روی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید از دیدگاه ژئوتکنیکی به‌عنوان تثبیت‌کننده انجام شده است. لذا در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوذرات کلسیم‌اکسید و نانو آلومینیوم اکسید در رفتار خاک ماسه‌ای رس‌دار پرداخته شده است. بدین منظور برای بررسی خصوصیات مقاومتی خاک ماسه‌ای رس‌دار، از نمونه‌های دارای دو نانوذره‌ی مذکور با ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزن کل خشک خاک طی عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده استفاده شده است. برای بررسی ریزساختار نمونه‌های خاک بهسازی‌شده، نمونه‌ها تحت آنالیز آزمایش FESEM[۱۰] قرار گرفتند.

۲. مصالح مصرفی و روش‌ها

۱.۲. خاک

خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر، ماسه‌ی فیروزکوه (شماره‌ی ۱۶۱) و همچنین رس کائولینیت بوده است. براساس سیستم طبقه‌بندی واحد خاک (USCS)، ماسه‌ی فیروزکوه (شماره‌ی ۱۶۱) به‌عنوان ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی می‌شود. در شکل ۱، نتایج آزمایش تراکم انجام‌شده مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸-۱ مشاهده می‌شود، که طبق آن درصد رطوبت بهینه برابر ۱۱ و وزن مخصوص خشک بیشینه برابر ۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱، نیز ترکیب‌های تشکیل

[۱] Wasif
[۲] Karumanchi & Nerella
[۳] Haeri & Valishzadeh
[۴] Loess
[۵] Ahmadi & Shafiee
[۶] Tabarsa
[۷] Taha & Taha
[۸] Butrón
[۹] Gallagher & Finsterle
[۱۰] Field emission scanning electron microscopy

دهنده‌ی خاک مذکور، که از آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) به‌دست آمده است، ارائه شده است.

۲.۲. نانوذرات

دو نوع نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید و کلسیم‌اکسید در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است، که به‌صورت تجاری در دسترس هستند و از پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شده است. در شکل ۲، تصاویر FESEM نانوذرات مشاهده می‌شود. همچنین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، که از آزمایش XRF به‌دست آمده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۲. ساخت نمونه

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ابتدا نانوذره (به مقدار ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ درصد وزن کل خشک خاک) به آب مقطر با توجه به درصد رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم اضافه و سپس به مدت ۳۰ دقیقه توسط یک همزن مغناطیسی هم زده شده است. سپس محلول همگن به نمونه‌ی خاک دارای ماسه و رس، که قبلاً به‌خوبی هم زده شده بودند، در ۵ مرحله اضافه و به‌خوبی مجدداً هم زده شد تا نمونه کاملاً همگن شود. پس از آن مخلوط همگن مطابق با استاندارد ASTM D۲۱۶۶ در ۵ لایه درون قالب متراکم شد.

شکل ۱. منحنی تراکم خاک ماسه‌ای رس‌دار.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی ماسه و رس.

ترکیب شیمیایی	ماسه	رس
SiO_2	۹۱/۳۳	۶۷/۸۷
Fe_2O_3	۲/۸۹	۰/۶۹
Al_2O_3	۲/۰۳	۲۵/۵۱
CaO	۲/۰۵	۳/۳۶
Na_2O	۱/۴۹	-
K_2O	۰/۲۱	۲/۵
Cu	-	۰/۰۷

این تذکر لازم است که قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری، قطر، و ارتفاع نمونه توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و مقادیر مقاومت‌های حاصل‌شده براساس ابعاد تغییریافته اصلاح شده است.

۴.۲. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

برای ارزیابی اثر نانوذرات در بهسازی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D۲۱۶۶ در شرایط کنترل کرنش با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از نمونه‌های استوانه‌یی با قطر

(الف)

(ب)

شکل ۲. تصاویر FESEM: (الف) آلومینیوم‌اکسید، (ب) کلسیم‌اکسید.

جدول ۲. ترکیب‌های تشکیل‌دهنده‌ی نانوذرات.

ساختار شیمیایی	کلسیم‌اکسید (٪)	آلومینیوم‌اکسید (٪)
CaO	۹۷/۲	-
MgO	۱/۷۳	-
Cl	۱/۰۷	-
Al_2O_3	-	۹۴/۲۷
Na_2O	-	۱/۵۷
SO_3	-	۴/۱۶

۳۷ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر انجام شده است. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی، هر آزمون سه بار تکرار شد. همچنین منحنی‌های تنش- کرنش برای مقایسه‌ی رفتار مقاومت نمونه‌ها ترسیم شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تغییرات مقاومت بیشینه‌ی نمونه‌های بهسازی‌شده

تغییرات بیشینه‌ی مقاومت نمونه‌های بررسی‌شده با درنظرگرفتن تغییرات غلظت و زمان عمل‌آوری در شکل‌های ۳ الی ۶ و جدول ۳ مشاهده می‌شود.

۱.۱.۳. تأثیر غلظت نانوذرات

در شکل‌های ۳ و ۴، نمودارهای مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ درصد وزنی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید، که به مدت ۷، ۱۴، و ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند، مشاهده می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای اخیر نشان می‌دهند که افزایش جایگزینی هر دو نانوذره تا ۰/۱٪ وزنی موجب بالارفتن میزان مقاومت تک‌محوری و پس از آن کاهش و یا افزایش نسبت جزئی مقاومت می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت از غلظت ۰/۱ تا غلظت ۰/۲، مقاومت آنچنانی مشاهده نمی‌شود و غلظت بهینه، ۰/۱٪ وزنی است. غلظت بهینه‌ی نانوذرات، فضاهای بین دانه‌های خاک را پر می‌کند و همچنین پیوند بین ذرات خاک را بهبود می‌بخشد و نمونه را متراکم‌تر می‌کند و این مسئله منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری شده است.[۲۱] همچنین افزودن نانوذره‌ی بیشتر از مقدار بهینه، سبب افزایش سطح تماس بین ذرات نانو می‌شود، که منجر به ایجاد توده‌یی از نانوذرات می‌شود و درنتیجه، فعالیت نانوذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد.[۲۲] در مطالعه‌ی مجید و طاها[۱۱] (۲۰۱۶)، نیز افزودن نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید بیش از ۰/۱٪ وزنی مقاومت فشاری را افزایش نداده است.[۲۳] نتایج مشابه در مطالعاتی که از دیگر نانوذرات استفاده شده است، نیز به‌دست‌آمده است.[۲۴ و ۳] در مقایسه‌ی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید، نمونه‌های دارای آلومینیوم‌اکسید، مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند.

۲.۱.۳. تأثیر زمان عمل‌آوری

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان استنباط کرد که نمونه‌های دارای هر دو نانوذره با ۰/۱٪ وزنی با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز تا ۱۴ روز، افزایش مقاومت داشته و پس از آن افزایش مقاومت خیلی جزئی بوده است. در صورتی که نمونه‌های دارای ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد وزنی نانوذره بعد از مدت زمان ۱۴ روز دیگر افزایش مقاومت نداشته و کاهش جزئی در کاهش مقاومت داشته‌اند، که علت آن واکنش سریع نانوذرات با ذرات خاک است. در مطالعات دیگر نیز عدم افزایش مقاومت پس از ۱۴ روز عمل‌آوری مشاهده شده است.[۲۵ و ۲۶] در جدول ۳، خلاصه‌ی کلیه‌ی نتایج ارائه شده است..

شکل ۳. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی نانو کلسیم‌اکسید در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱ ، و ۰/۲ درصد.

شکل ۴. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی نانو آلومینیوم‌اکسید در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱ ، و ۰/۲ درصد.

شکل ۵. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴، و ۲۸ روز.

شکل۶. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴، و ۲۸ روز.

[۱۱] Majeed & Taha

در شکل ۷، نمونه‌ی قبل و بعد از آزمایش تک‌محوری مشاهده می‌شود. مکانیزم شکست نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید در درصدهای مختلف مشابه شکل (۷-ب) بوده است. شکست نمونه‌ها از بالا تا پایین نمونه و با زاویه‌ی حدوداً ۶۰ درجه بوده است، که نشان‌دهنده‌ی چسبندگی خوب نمونه‌هاست.

۲.۳. بررسی منحنی‌های تنش- کرنش

در شکل‌های ۸ الی ۱۱، نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های بررسی‌شده با درصدهای مختلف نانوذرات و زمان عمل‌آوری مشاهده می‌شوند. منحنی‌های تنش- کرنش در نمونه‌های بهسازی‌شده با دو نانوذره‌ی متفاوت بوده است. در نمونه‌های بهسازی‌شده با نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید نسبت به نمونه‌ی شاهد، مقاومت بیشینه افزایش و کرنش متناظر با آن کاهش یافته است. این تغییرات

جدول ۳. مقایسه‌ی مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی آلومینیوم‌اکسید و کلسیم‌اکسید نسبت به نمونه‌ی شاهد.

نمونه	مدت‌زمان (روز)	غلظت	مقاومت نهایی (کیلوپاسکال)	افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد
شاهد	۷	-	۲۲۵/۷	-
	۱۴	-	۲۹۵	-
	۲۸	-	۳۲۳	-
آلومینیوم‌اکسید	۷	۰/۰۵	۴۰۵/۷	۷۹/۷۵
		۰/۱	۴۱۹/۸	۸۶
		۰/۲	۴۶۰/۴	۱۰۳/۹۸
	۱۴	۰/۰۵	۴۰۹/۴	۳۸/۷۸
		۰/۱	۴۶۶/۶	۵۸/۱۷
		۰/۲	۴۶۷/۲	۵۸/۳۷
	۲۸	۰/۰۵	۴۰۳/۵	۲۴/۹۲
		۰/۱	۴۷۴/۱	۴۶/۷۸
		۰/۲	۴۶۲/۸	۴۳/۲۸
کلسیم‌اکسید	۷	۰/۰۵	۳۸۰/۴	۶۸/۵۴
		۰/۱	۳۹۵/۳	۷۵/۱۴
		۰/۲	۴۰۰/۹	۷۷/۶۲
	۱۴	۰/۰۵	۳۸۷/۶	۳۱/۳۹
		۰/۱	۴۳۷/۳	۴۸/۲۳
		۰/۲	۴۴۱/۵	۴۹/۶۶
	۲۸	۰/۰۵	۳۸۳/۵	۱۸/۷۳
		۰/۱	۵۳/۶	۴۰/۴۳
		۰/۲	۴۴۱/۶	۳۶/۷۲

نشانگر رفتار شکننده‌تر نمونه‌های بهسازی‌شده در مقایسه با نمونه‌ی شاهد است. در مورد اثر زمان عمل‌آوری، هر چه زمان عمل‌آوری طولانی‌تر باشد، نمونه شکنندگی کمتری نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی میر و ردی[1] (۲۰۲۱)، نیز

شکل ۷. نمونه‌های تحت آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده: (الف) قبل از آزمایش، (ب) بعد از آزمایش.

شکل ۸. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده. با آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۷ روزه.

[1] Mir & Reddy

شکل ۹. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری ۷ روزه.

شکل ۱۰. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه.

شکل ۱۱. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه.

افزودن نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید باعث افزایش مقاومت و کاهش کرنش متناظر با آن شده است.[۲۷] برخلاف نمونه‌های بهسازی‌شده با آلومینیوم‌اکسید، که تمامی نمونه‌ها کرنش متناظر با مقاومت بیشینه‌ی کمتری نسبت به نمونه‌ی

(الف)

(ب)

شکل ۱۲. تصاویر FESEM سطح ماسه در حضور و عدم حضور نانوذره در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابری: (الف) در عدم حضور نانوذره، (ب) در حضور نانوذره.

شاهد داشته‌اند، در نمونه‌های دارای ۰/۱٪ کلسیم‌اکسید این کرنش نسبت به نمونه‌ی شاهد بیشتر بوده است. افزایش کرنش اخیر، نشان‌دهنده‌ی رفتار انعطاف پذیر نمونه‌ی مذکور است. همچنین در نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید بعد از رسیدن به نقطه‌ی اوج، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده می‌شود. در بیشتر مطالعات سخت‌شوندگی، کرنش با افزودن نانوذره مشاهده نمی‌شود؛ ولی در مطالعاتی همچون پژوهش چن[۱] و همکاران (۲۰۲۴)، با افزودن نانو سیلیس به خاک رس سیلتی، رفتار اخیر مشاهده شده است.[۲۸]

۳.۳. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان نشر (FESEM)

برای بررسی ریزساختاری نمونه‌های بهسازی‌شده با نانوذرات، پس از آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده از نمونه‌ها نمونه‌گیری شد، که نتایج آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل اخیر مشخص است در حالتی که نانوذرات به درون فضای متخلخل تزریق شده‌اند، میزان پل‌های تشکیل‌شده توسط ذرات ریز و پُرشدگی فضاهای خالی افزایش یافته است. پُرشدگی فضاهای خالی توسط نانوذرات، باعث افزایش ناحیه‌ی تماس بین‌سطحی و تراکم نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری شده است.[۲۹ و ۳۰]

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید در نسبت‌های وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ درصد در بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای رس‌دار بررسی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

[۱] Chen

- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ نانو آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب به مقاومت‌های ۴۰۳/۵، ۴۷۴/۱، و ۴۶۲/۸ کیلوپاسکال رسیده‌اند، که ۲۴/۹۲، ۴۶/۷۸، و ۴۳/۲۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند.
- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ نانو کلسیم‌اکسید بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب به مقاومت‌های ۳۸۳/۵، ۴۵۳/۶، و ۴۴۱/۶ کیلوپاسکال رسیده و افزایش مقاومت آن‌ها ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳، و ۳۶/۷۲ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بوده است.
- نمونه‌های بهسازی‌شده با درصدهای ۰/۱ و ۰/۲ از هر دو نانوذره، مقاومت‌های نزدیک به هم داشته‌اند، بنابراین درصد بهینه، ۰/۱ انتخاب شده است.
- نمونه‌های بهسازی‌شده با هر دو نانوذره حساسیتی نسبت به زمان نداشته و افزایش زمان، تأثیر چندانی در افزایش مقاومت آن‌ها نداشته است، که دلیل آن، واکنش سریع نانوذرات با ذرات خاک است.
- بررسی منحنی‌های تنش- کرنش نشان داد نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم‌اکسید رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید داشته و همچنین در منحنی‌های تنش- کرنش، نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده شده است.
- تصاویر FESEM نشان‌دهنده‌ی پُرشدگی فضاهای خالی نمونه‌ها توسط نانوذرات بوده است، که باعث افزایش ناحیه‌ی تماس بین سطحی و تراکم نمونه و درنتیجه، افزایش مقاومت فشاری شده است.

References - منابع

1. Onyelowe, K.C. and Duc, B.V., 2020. Durability of nanostructured biomasses ash (NBA) stabilized expansive soils for pavement foundation. *International Journal of Geotechnical Engineering, 14*(3), pp.254-263. doi.org/10.1080/19386362.2017.1422909
2. Celaya, M., Veisi, M., Nazarian, S. and Puppala, A., 2011. Accelerated design process of lime-stabilized clays. In Geo-Frontiers 2011: *Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 4468-4478). doi.org/10.1061/41165(397)457
3. Changizi, F. and Haddad, A., 2016. Effect of nano-SiO_2 on the geotechnical properties of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, *34*, pp.725-733.doi.org/10.1007/s10706-015-9962-9
4. Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Dalla Rosa, F., 2009. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes, 27*(3), pp.196-203. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.005
5. Ng, C.W.W. and Coo, J.L., 2015. Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials. *Canadian Geotechnical Journal, 52*(6), pp.808-811. doi.org/10.1139/cgj-2014-0313
6. Bahmani, S.H., Huat, B.B., Asadi, A. and Farzadnia, N., 2014. Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials, 64*, pp.350-359. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086
7. Zhang, S., Wang, W., Song, X., Chi, X. and Lu, T., 2014. Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with 28d age. *The Open Mechanical Engineering Journal, 8*(1). doi.org/10.2174/1874155X01408010509
8. Arif, M., Hasan, S.D. and Siddiqui, S., 2023. Effect of nano silica on strength and permeability of concrete. *Materials Today*: Proceedings. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.073
9. Wang, W., Fu, Y., Zhang, C., Li, N. and Zhou, A., 2020. Mathematical models for stress–strain behavior of Nano magnesia-cement-reinforced seashore soft soil. *Mathematics*, *8*(3), p.456. doi.org/10.3390/math8030456
10. Majeed, Z.H., Taha, M.R. and Jawad, I.T., 2014. Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 8*(4), pp.503-509. doi.org/10.19026/rjaset.8.999
11. Kim, S.S., Hooton, R.D., Cho, T.J. and Lee, J.B., 2014. Comparison of innovative nano fly ash with conventional fly ash and nano-silica. *Canadian Journal of Civil Engineering, 41*(5), pp.396-402. doi.org/10.1139/cjce-2012-0419
12. Kulkarni, P.P. and Mandal, J.N., 2022. Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. *Construction and Building Materials, 314*, p.125363. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125363
13. Jassim, N.W., Hassan, H.A., Mohammed, H.A. and Fattah, M.Y., 2023. Enhancement consistency and compaction characteristics of clayey soil using nano silica material. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 10*(6), pp.77-83. doi.org/10.21533/pen.v10i6.3367

14. Karumanchi, M. and Nerella, R., 2022. Shear strength parameters from digital tri-axial test and soils stabilization with extracted nanosilica. *Nanotechnology for Environmental Engineering, 7*(1), pp.307-318. doi.org/10.1007/s41204-022-00238-0
15. Haeri, S.M. and Valishzadeh, A., 2021. Evaluation of using different nanomaterials to stabilize the collapsible loessial soil. *International Journal of Civil Engineering, 19*, pp.583-594. doi.org/10.1007/s40999-020-00583-8
16. Ahmadi, H. and Shafiee, O., 2019. Experimental comparative study on the performance of nano-SiO2 and microsilica in stabilization of clay. *The European Physical Journal Plus, 134*(9), p.459. doi.org/10.1140/epjp/i2019-12918-1
17. Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C.L. and Manahiloh, K.N., 2018. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay–A sustainable material for construction. *Construction and Building Materials, 158*, pp.454-463. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096
18. Taha, M.R. and Taha, O.M.E., 2012. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of nanoparticle research, 14,* pp.1-13. doi.org/10.1007/s11051-012-1190-0
19. Butrón, C., Axelsson, M. and Gustafson, G., 2009. Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. *Tunnelling and underground space technology, 24*(6), pp.603-607. doi.org/10.1016/j.tust.2009.04.003
20. Gallagher, P.M. and Finsterle, S., 2004. Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization. *Vadose Zone Journal, 3*(3), pp.917-925. doi.org/10.2113/3.3.917
21. Hou, P., Wang, K., Qian, J., Kawashima, S., Kong, D. and Shah, S.P., 2012. Effects of colloidal nanoSiO2 on fly ash hydration. *Cement and Concrete Composites, 34*(10), pp.1095-1103. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.013
22. Luo, J., Zhou, A., Li, N., Wang, W. and Hu, J., 2022. Mechanical properties and microscopic characterization of cement stabilized calcareous sand modified by nano SiO2. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, p.e01636. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01636
23. Majeed, Z.H. and Taha, M.R., 2016. The effects of using nanomaterials to improvement soft soils. *Saudi J Eng Technol, 1*(3), pp.58-63. 10.21276/sjeat.2016.1.3.1
24. Valizadeh, M. and Janalizadeh Choobbasti, A., 2020. Evaluation of nano-graphene effect on mechanical behavior of clayey sand with microstructural and self-healing approach. *Journal of Adhesion Science and Technology, 34*(3), pp.299-318. doi.org/10.1080/01694243.2019.1676598
25. Samala, H.R. and Mir, B.A., 2020. Some studies on microstructural behaviour and unconfined compressive strength of soft soil treated with SiO 2 nanoparticles. *Innovative Infrastructure Solutions, 5,* pp.1-12. doi.org/10.1007/s41062-020-0283-3
26. Kong, R., Zhang, F., Wang, G. and Peng, J., 2018. Stabilization of loess using nano-SiO2. *Materials, 11*(6), p.1014. doi.org/10.3390/ma11061014
27. Mir, B.A. and Reddy, S.H., 2021. Mechanical behaviour of nano-material (Al2O3) stabilized soft soil. *International Journal of Engineering, 34*(3), pp.636-643. doi.org/10.5829/ije.2021.34.03c.07
28. Chen, Q., Xie, K., Tao, G., Nimbalkar, S. and Zhang, H., 2024. Laboratory assessment of impact of nano-SiO2 on different soil types in onshore and offshore environment. *Acta Geotechnica*, pp.1-23. doi.org/10.1007/s11440-023-02067-0
29. Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F., 2018. Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay. *AUT Journal of Civil Engineering, 2*(2), pp.135-142. doi.org/10.22060/ajce.2018.14203.5462
30. Gu, J., Cai, X., Wang, Y., Guo, D. and Zeng, W., 2022. Evaluating the Effect of Nano-SiO2 on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(24), p.16805. doi.org/10.3390/ijerph192416805

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره ی ۴۰، شماره ی ۴، صص. ۱۱۶-۱۳۱ (یادداشت فنی)

Research Note

تاثیر آلاینده های نفتی مختلف بر روی خواص نشست پذیری ماسه ی رس‌دار

مهیار عربانی*(استاد)
حامد حق شنو (دکتری)
دانشکده‌ی فنی، دانشگاه گیلان، رشت

تأثیر نوع آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های ژئوتکنیکی بخصوص نشست‌پذیری خاک، موضوع جالبی است که کمتر در مطالعات پیشین بررسی شده است. در پژوهش حاضر، خصوصیات نشست‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار آلوده به مقدار ۳، ۶، و ۹ درصد وزن خشک خاک و آلوده به ۴ نوع آلاینده‌ی نفتی ارزیابی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تأیید کرده‌اند که آلاینده‌های نفتی، ساختار خاک را به ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده تغییر می‌دهند. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، لخته‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که آلاینده‌های نفتی علاوه‌بر اینکه فضای منافذ بین ذرات را افزایش می‌دهند، با پوشاندن ذرات خاک، مساحت سطح ویژه‌ی (SSA) خاک را کاهش می‌دهند و در نتیجه، با کاهش جذب آب توسط ذرات خاک، امکان تخلیه‌ی سریع‌تر آب را فراهم می‌کنند. این امر باعث افزایش ضریب فشردگی (C_C)، نشست تحکیمی، ضریب تحکیم (C_V)، و ضریب نفوذپذیری می‌شود.

واژگان کلیدی: خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی، خواص نشست‌پذیری، ویسکوزیته، ماسه‌ی رس‌دار.

arabani@guilan.ac.ir
haghsheno@phd.guilan.ac.ir

۱. مقدمه

آلودگی خاک، عبارت است از وجود، پخش، یا آمیختن یک یا چند ماده‌ی خارجی در خاک به مقدار و مدتی است که کیفیت فیزیکی، شیمیایی، و بیولوژیکی آن را طوری که برای انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان یا آثار و ابنیه‌ی زیان‌آور باشند، تغییر دهد. به‌عبارت دیگر، هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی خاک، به نحوی که استفاده از آن را ناممکن گرداند، آلودگی خاک نامیده می‌شود. منابع مختلف آلودگی خاک، کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهند و منجر به مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند. نفت و مشتق‌های آن (بنزین، نفت سفید، گازوئیل، روغن موتور، سوخت جت، و ...) از مهم‌ترین انواع آلاینده‌های خاک هستند.[۱] نفت و محصولات تصفیه‌شده‌ی آن، عمده‌ی منابع جهانی هستند که در بخش‌های صنعتی و حمل و نقل برای نیازهای انرژی در سراسر جهان استفاده می‌شوند.[۲] به‌دلیل افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، اهمیت مواد مذکور افزایش یافته است.[۳] از مراحل اولیه‌ی اکتشاف تا مراحل نهایی مصرف، امکان آلودگی‌های نفتی پدیده‌یی اجتناب‌ناپذیر است.[۴ و ۵]

نشت نفت در خشکی، بیشترین آلودگی هیدروکربنی سیاره‌ی ما را تشکیل می‌دهد.[۶] طبق گزارش بریتیش پترولیوم[۱]،[۷] مصرف جهانی نفت در سال ۲۰۲۰، ۸۸/۳ میلیون بشکه در روز بوده و در سال ۲۰۲۱، میزان مصرف به میزان ۵/۳ میلیون بشکه در روز افزایش یافته است. بیشترین رشد مصرف در ایالات متحده‌ی امریکا و چین به ترتیب ۱/۵ و ۱/۴ میلیون بشکه در روز گزارش شده است. در دو دهه‌ی اخیر، استفاده از نفت خام تقریباً ۳۲٪ افزایش را نشان داده است.[۸] پس از نشت، آلودگی‌های نفتی تحت نیروی جاذبه به سمت پایین به سمت آب‌های زیرزمینی حرکت می‌کنند و علاوه‌بر اینکه خاک را در مسیر خود آلوده و اشباع می‌کنند، به صورت افقی توسط آب حمل می‌شوند و در نتیجه با کمک مویینگی، دوباره به خاک‌های دیگر می‌رسند و آلودگی بیشتری را منتشر می‌کنند.[۹] خاک و فرآورده‌های نفتی از نقطه‌نظر شیمیایی نسبتاً بی‌واکنش هستند؛ بنابراین، فرآورده‌های نفتی ذکرشده بیشتر در منافذ خاک به‌عنوان یک استخر کوچک مایع و به عنوان مایعات فاز غیرآبی (NAPL)[۲] باقی می‌مانند.[۱۰] NAPL به‌دلیل غلظت و شیمی متفاوت در آب حل نمی‌شود و یا به‌راحتی با آن مخلوط نمی‌شود.[۱۱] همچنین سبب تغییر در رفتارهای فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود.[۱۲ و ۱۳] میزان تأثیر آلاینده‌ی نفتی به نوع خاک، ترکیب خاص آلاینده‌ی نفتی، و مقدار آلاینده بستگی دارد.[۱۴]

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶.

استناد به این مقاله:
عربانی، مهیار و حق شنو، حامد، ۱۴۰۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی مختلف در خواص نشست‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار، ۴۰(۴)، صص. ۱۱۶-۱۳۱
DOI: 10.24200/j30.2024.63856.3291

[۱] British Petroleum
[۲] Non-Aqueous Phase Liquids

ایران، یکی از کشورهای دارای بیشترین ذخایر نفتی در جهان است. براساس گزارش ارائه‌شده توسط اداره‌ی اطلاعات انرژی آمریکا (EIA)، در سال ۲۰۲۱، ایران ۲۴٪ از ذخایر نفت خاورمیانه و ۱۲٪ در جهان را در اختیار داشته است؛ که بیشتر آن‌ها در جنوب ایران قرار دارد. نشت نفت از منابع مختلف، از جمله: تصادف‌های نفتکش‌ها، نشت در پایانه‌های نفتی، و نشت پساب‌های نفتی از انبارهای نفت خام و پالایشگاه‌های نفت، محیط زیست دریایی، و ساحلی مناطق جنوبی ایران را در چند دهه‌ی گذشته آلوده کرده است. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به نفت در منطقه‌ی مذکور از جمله ویژگی‌های نشست‌پذیری برای طراحان ژئوتکنیک حائز اهمیت است. پیش‌بینی نشست توده‌ی خاکی که ممکن است در آینده با آلاینده‌های نفتی آلوده شود، برای ساختمانی که بر روی آن ساخته خواهد شد، ضروری است. در صورت استفاده‌ی مجدد از خاک آلوده در ساخت و ساز، ارزیابی میزان نشست‌پذیری و ارائه‌ی راهکارهای عملی برای کنترل آن، از جمله دلایلی است که بررسی کیفیت نشست‌پذیری خاک آلوده به نفت را حیاتی می‌کند.

مطالعات متعددی در مورد تأثیر آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های تحکیم‌پذیری انواع خاک‌ها انجام شده است. الرحمن[۱] و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعه‌یی بر روی تأثیر نفت خام در نشست‌پذیری خاک رس با خاصیت خمیری بالا (CH) انجام داده و نتیجه گرفته‌اند که افزودن نفت خام سبب افزایش ۶۳/۳٪ ضریب فشردگی شده است؛ به‌طوری که ضریب فشردگی از ۰/۳۴۲ به ۰/۹۳۲ رسیده است. در مطالعه‌ی اخیر، محتمل‌ترین مکانیسم مسئول افزایش ضریب فشردگی، تغییر در ساختار خاک با حضور نفت خام بیان شده است.[۱۵] جیا[۲] و همکاران (۲۰۱۱)، نیز با بررسی تأثیر مقادیر مختلف نفت خام در ضریب فشردگی خاک لای نشان داده‌اند که با افزودن میزان نفت خام در خاک، ضریب فشردگی افزایش پیدا کرده است. همچنین، نفت خام اتصال بافتی بین دانه‌ها را کاهش و تعداد منافذ را افزایش داده و ساختار خاک را شل کرده است.[۱۶] کرمانی و عبادی (۲۰۱۲)، تأثیر نفت خام در ضریب فشردگی خاک رس با خاصیت خمیری پایین (CL) را ارزیابی کرده و نتیجه گرفته‌اند که نفت خام باعث افزایش ضریب فشردگی خاک شده است. این رفتار به آثار روان‌کنندگی روغن و کاهش اصطکاک بین ذرات خاک نسبت داده شده است.[۱۷] اوتا[۳] (۲۰۱۳)، نیز با بررسی تأثیر نفت خام در ضریب فشردگی خاک رس CL نشان داد که افزودن تا ۲۰٪ نفت خام سبب افزایش ۵۴٪/۸ ضریب فشردگی شده است. این موضوع علاوه‌بر تأثیر نفت خام در کاهش اصطکاک بین ذرات، به ساختار باز ایجادشده در خاک ناشی از وجود نفت خام نسبت داده شده است.[۱۸] الادهمی[۴] و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ی خود نشان داده‌اند که افزودن تا ۱۵٪ نفت خام به خاک رس CL، باعث کاهش ۹/۶٪ ضریب فشردگی شده است.[۱۹] سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱) نتیجه گرفته‌اند که افزودن تا ۱۲٪ نفت خام به خاک رس CH، سبب افزایش ۲۱/۶٪ ضریب فشردگی شده است.[۲۰] تالوکدار و سایکا[۵] (۲۰۱۳)، تأثیر نفت خام را در سه نوع خاک رس CH، خاک رس CL، و ماسه‌ی رس‌دار (SC) بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که وجود نفت خام در خاک‌ها سبب افزایش ضریب فشردگی همه‌ی خاک‌ها شده است.[۲۱] خسروی و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌یی بر روی تأثیر گازوئیل در رفتار نشست‌پذیری خاک رس CL انجام داده و نتیجه گرفته‌اند که اضافه‌شدن ۲۰٪ از آلاینده‌ی مذکور سبب کاهش ۳۴/۵ درصدی ضریب فشردگی شده است. همچنین توضیح داده شده است که کاهش ضریب فشردگی مربوط به انرژی سطحی موجود در فصل مشترک نفت و آب است؛ که کشش سطحی در سطح اتصال آب و آلاینده را ایجاد کرده و مانع از خروج و زهکشی کامل آب شده است.[۲۲] البته جداری و فراهانی (۲۰۱۸)، با مطالعه‌یی دیگر نتایج خسروی و همکاران (۲۰۱۳) را رد کردند و نشان دادند که افزودن تا ۹٪ گازوئیل به خاک رس CL، سبب افزایش ۳۷/۱ درصدی ضریب فشردگی می‌شود. این کاهش در ضریب نفوذپذیری، به خاصیت روان‌کاری نفت سفید نسبت داده شده است.[۲۳] صفاهیان و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داده‌اند که افزودن ۲۰٪ گازوئیل سبب افزایش ۳۴ درصدی ضریب فشردگی خاک رس CH شده است. افزایش ضریب فشردگی به ماهیت غیرقطبی مولکول‌های نفت خام نسبت داده شده است. همچنین، توضیح داده شده است که ذرات خاک رس باردار نمی‌توانند مولکول‌های نفت خام غیرقطبی را همانند مولکول‌های دوقطبی آب جذب کنند. این امر سهولت زهکشی نفت خام را موجب شده است.[۲۴] کارکوش و کریم[۶] (۲۰۱۷)، با بررسی تأثیر نفت کوره در ضریب فشردگی خاک رس CL نشان دادند که اضافه‌کردن نفت کوره به خاک رس، ضریب فشردگی آن را افزایش می‌دهد. افزودن ۲۰ ٪ از آلاینده‌ی نفت کوره به خاک CL موجب افزایش ۱۳/۴٪ ضریب فشردگی شده و آن را از ۰/۲۷۴ به ۰/۳۲۰ رسانیده است. دلیل افزایش ضریب فشردگی به بزرگ‌شدن فضاهای خالی ناشی از بزرگ‌شدن دانه‌های خاک در اثر آلوده‌شدن با نفت کوره و همچنین به نقش روان‌کننده‌ی نفت کوره ارتباط داده شده است.[۲۵] کارکوش و جیهاد[۷] (۲۰۲۰)، با بررسی اثر نفت سفید در خصوصیات نشست‌پذیری خاک رس CH نشان دادند که افزودن آلاینده‌ی نفت سفید سبب افزایش ضریب فشردگی خاک رسی شده و برای خاک مخلوط‌شده با ۵۰٪ نفت سفید، ضریب فشردگی ۴۴/۳٪ افزایش یافته است. توضیح داده شده است که کاهش پیوند بین ذرات خاک در نتیجه‌ی آلوده‌شدن با نفت سفید منجر به افزایش ضریب فشردگی شده است.[۲۶] مدهت[۸] و همکاران (۲۰۱۹)، با بررسی تأثیر روغن موتور در نشست‌پذیری خاک رس CL نشان دادند که افزودن تا ۲۰٪ روغن موتور، سبب کاهش ۹۳/۵ درصدی ضریب فشردگی شده است.[۲۷] اما در مطالعه‌یی دیگر، نظیر[۹] (۲۰۱۱) نشان داد که روغن موتور سبب افزایش ۵۱/۶ درصدی ضریب فشردگی شده است.[۲۸]

نشست‌پذیری خاک‌های حاوی ریزدانه به‌دلیل آلودگی‌های نفتی را می‌توان با دو مکانیسم مختلف توضیح داد: (الف) به‌دلیل تغییرات در اثر نیروهای فیزیکی (عوامل مکانیکی)؛ (ب) به‌دلیل تغییر در عوامل فیزیکوشیمیایی. عوامل مکانیکی، شامل: نوع خاک، خواص فیزیکی سیال منفذی، مانند: چگالی و ویسکوزیته هستند. میزان برهمکنش فیزیکوشیمیایی در خاک‌ها به‌صورت کیفی توسط نظریه‌ی لایه‌ی دوگانه‌شده توسط گوی (۱۹۱۰)،[۲۹] و چاپمن (۱۹۱۳)، [۳۰] ارائه شده است؛ که بر طبق آن، یکی از پارامترهایی که در

[۱] Ur-Rehman
[۲] Jia
[۳] Ota
[۴] Al-Adhamii
[۵] Talukdar & Saikia
[۶] Karkush & Kareem
[۷] Karkush & Jihad
[۸] Medhat
[۹] Nazir

ضخامت لایه‌ی دوگانه و در نتیجه ساختار خاک مؤثر است، ثابت دی الکتریک سیال حفره‌یی است. بنابراین، دو ویژگی مهم آلاینده‌های نفتی، به‌عنوان سیال‌های منفذی، که تا حد زیادی سبب ایجاد تغییر در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها می‌شوند، ثابت دی الکتریک پایین‌تر و ویسکوزیته‌ی بالاتر آن‌ها در مقایسه با آب است. درحالت کلی، مایعات با ثابت دی الکتریک پایین، لایه‌های دوگانه‌ی بسیار نازکی را در مقایسه با مایعات با ثابت دی الکتریک بالاتر ایجاد می‌کنند و این به نوبه‌ی خود، نیروهای دافعه‌ی بین ذرات و در نتیجه، لخته‌شدن ذرات را کاهش می‌دهد.[۳۱] ویسکوزیته‌ی بالا و خاصیت روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی دو رفتار متضاد را در خاک‌های آلوده به نفت ایجاد می‌کنند. ویسکوزیته‌ی بالای آلاینده‌های نفتی، ذرات خاک را به یکدیگر می‌چسباند و برهمکنش بین آن‌ها را افزایش می‌دهد. در حالی که خاصیت روان‌کنندگی آن‌ها، این برهمکنش را کاهش می‌دهد. از آنجایی که ثابت دی الکتریک آلاینده‌های نفتی تقریباً یکسان است (بین ۲/۱ و ۲/۴)،[۳۲] تأثیر آن در تغییر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، برای همه‌ی آلاینده های نفتی یکسان است (به ازاء ۱٪ معین از همه‌ی آلاینده‌های نفتی). به‌طورکلی نوع آلاینده‌ی نفتی و ویسکوزیته‌ی آن، عاملی غیرقابل‌انکار در تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی است؛[۳۳ و ۳۴] لذا ضروری است که نقش مکانیکی آلاینده‌های نفتی به‌ویژه ویسکوزیته، با دقت بیشتری بر روی خصوصیات نشست‌پذیری خاک‌ها ارزیابی شود. به این موضوع در مطالعات پیشین توجه زیادی نشده و کمتر به بررسی آن پرداخته شده است. در یکی از یگانه مطالعات انجام‌شده در این زمینه ، جداری و فراهانی (۲۰۱۸)، به این نتیجه رسیدند که وجود آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌ی بالاتر در خاک‌های ریزدانه‌ی CL و CH، سبب افزایش ضریب فشردگی و کاهش ضریب نفوذپذیری شده است.[۲۳]با توجه به بررسی پیشینه‌ی مطالعات، در مطالعات اخیر، فقط به بررسی اثر ویسکوزیته‌ی یک نوع آلاینده بر روی خصوصیات نشست‌پذیری خاک‌های ریزدانه پرداخته شده و هیچ‌گونه مطالعه‌ی جامع و مقایسه‌یی به‌منظور بررسی نشست‌پذیری خاک‌ها، تحت اثر انواع آلاینده‌های مختلف نفتی انجام نشده است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار، اندرکنش توأم بخش‌های ریزدانه و درشت‌دانه‌ی خاک ماسه‌ی رس‌دار با انواع آلاینده‌های نفتی مختلف با ویسکوزیته‌ی متفاوت به‌منظور بررسی خصوصیات نشست‌پذیری مطالعه شده است.

برای این منظور، آزمایش‌های تراکم و تحکیم یک‌بُعدی بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده انجام شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز برای ارزیابی ریزساختاری استفاده شده است. مطالعه‌ی ابتکاری حاضر، با توصیف میزان تغییرات در خواص نشست‌پذیری خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی مختلف، اطلاعات موردنیاز برای طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های ساخته‌شده بر روی چنین خاک‌ها و/ یا خاک‌هایی که احتمالاً آلوده به آلاینده‌های نفتی هستند و همچنین انتخاب بهترین روش اصلاح در صورت استفاده‌ی مجدد از خاک‌های مذکور را در پروژه‌های دیگر ارائه خواهد کرد.

۲. مصالح و روش‌ها

۱.۲. مواد و مصالح مصرفی

۱.۱.۲. خاک

از آنجا که بخش عمده‌یی از خاک مناطق جنوبی ایران (سواحل شمالی خلیج فارس)، ترکیبی از کائولینیت و ماسه است،[۱۸] در مطالعه‌ی حاضر از مخلوط ماسه-کائولینیت (SKM) استفاده شده است؛ که با مخلوط‌کردن ۶۰٪ ماسه با ۴۰٪ کائولینیت تهیه شده است.[۳۵] ماسه‌ی موردنظر از سواحل انزلی در شمال کشور ایران تهیه شده است، که عمده از ماسه‌های بسیار ریز و یکنواخت تشکیل شده است. جنس ماسه‌های اخیر عموماً سیلیسی بوده و با وجود ریزدانه‌بودن ماسه‌ها، غالباً از سنگ‌دانه‌های تیزگوشه تشکیل شده است. کائولینیت استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر از کارخانه‌ی خاک چینی ایران تهیه شده است. توزیع دانه‌بندی مخلوط ماسه و کائولینیت مطابق استاندارد ASTM D۴۲۲ در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

ترکیب‌های شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز اشعه‌ی ایکس فلورسانس (XRF) در جدول ۱ و مشخصات ژئوتکنیکی ماسه و کائولینیت و همچنین مخلوط ماسه- کائولینیت در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۲.۱.۲. آلاینده‌های نفتی

در مطالعه‌ی حاضر، از چهار نوع آلاینده‌ی نفتی، شامل: نفت خام، نفت سفید، گازوئیل، و روغن موتور سوخته استفاده شده است. نفت خام، نفت سفید، و گازوئیل از پالایشگاه تهران و روغن موتور مستعمل از یک کارگاه تعویض روغن تهیه و خواص اساسی آن‌ها در جدول۳ ارائه شده است.

شکل ۱. توزیع دانه‌بندی ماسه و کائولینیت.

جدول ۱. ترکیب‌های شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز XRF.

اکسید (wt ٪)	کائولینیت	ماسه
SiO_2	۶۳	۶۱/۷
Al_2O_3	۲۴	۱۱/۹
Fe_2O_3	۰/۵۵	۴/۳
TiO_2	۰/۰۴	۰/۸۵
CaO	۱/۲	۸/۵
MgO	۰/۴	۲/۱
Na_2O	۰/۳	۲
K_2O	۰/۴	۴

جدول ۲. خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه و کائولینیت و مخلوط ماسه-کائولینیت.

	کائولینیت	ماسه	مخلوط ماسه- کائولینیت	شماره‌ی استاندارد
حدروانی (٪)	۴۰/۶	N.P	۲۲/۵	ASTM D۴۳۱۸
حد خمیری (٪)	۲۹/۸	N.P	۱۵	
نشانه‌ی خمیری (٪)	۱۱/۱	N.P	۷/۵	
G_s	۲/۶۲	۲/۷۴	۲/۶۹	ASTM D۸۴۵
$D_{۶۰}$ (mm)	-	۰/۲۸	-	ASTM D۴۲۲
$D_{۳۰}$ (mm)	-	۰/۱۹	-	
$D_{۱۰}$ (mm)	-	۰/۱۶	-	
C_u	-	۱/۷۵	-	ASTM D۲۴۸۷
C_c	-	۱/۸۰۵	-	
طبقه‌بندی	CL	SP	SC	

جدول ۳. خصوصیات آلاینده‌های نفتی.

پارامتر	نوع آلاینده‌ی نفتی				واحد
	روغن موتور سوخته	نفت خام	گازوئیل	نفت سفید	
ویسکوزیته	۳۸۵/۲	۱۳/۸۷	۳/۴۹	۲/۵۷	cp
چگالی نسبی	۰/۸۷۲	۰/۸۴۱	۰/۸۲۱	۰/۸۱۴	-

۲.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک آلوده به‌طورطبیعی، در مقایسه با خاک آلوده‌شده به‌طور مصنوعی، برای استفاده ایده‌آل‌تر است، زیرا این احتمال وجود دارد که با آلودگی مصنوعی، تقسیم‌بندی بین مواد معدنی و فازهای مخلوط خاک و آلاینده‌ها مانند خاک آلوده به‌طورطبیعی نباشد.[۳۶] اما ناهمگنی آلودگی‌ها در خاک‌های طبیعی، تجزیه و تحلیل و مقایسه‌ی مخلوط‌های مختلف را پیچیده می‌کند. بنابراین، از آلودگی مصنوعی برای تولید مخلوطی همگن استفاده شد تا کار مقایسه‌ی نتایج آسان‌تر باشد.[۳۷] در مطالعه‌ی حاضر، خاک‌های ماسه و کائولینیت قبل از مخلوط‌شدن با یکدیگر به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۵± ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک شدند. برای تهیه‌ی نمونه‌های آلوده، مقدار آلاینده‌های نفتی (روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید) ۳، ۶، و ۹ درصد وزن خشک مخلوط انتخاب شده‌اند. این میزان آلودگی براساس مطالعه‌ی انجام‌شده توسط نظری هریس و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار آلوده با بنزین؛[۳۵] الادهمی و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی خاک ماسه‌ی لای‌دار آلوده با نفت خام؛[۳۸] و ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)، بر روی خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی آلوده با گازوئیل انتخاب شده است.[۳۹] این توضیح لازم است که برای افزودن آلاینده‌های نفتی بیشتر به نمونه‌های خاک محدودیت‌هایی وجود داشته است. آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک حاوی بیش از ۹٪ آلاینده‌ی نفتی (برای مثال: ۱۱ و ۱۲ درصد) منجر می‌شد که نمودار آزمایش تراکم به‌صورت زنگوله‌یی در نیاید. علاوه‌بر این، آلاینده‌ی نفتی مازاد، در هنگام اجرای آزمایش تراکم از نمونه‌ها خارج می‌شد. درصد تعیین‌شده از آلاینده‌های نفتی بر روی خاک اسپری و به‌صورت دستی هم زده شد، تا مخلوط یکنواختی به‌دست آید. مخلوط به‌دست‌آمده به مدت ۱ ماه در ظرف درب بسته‌یی برای توزیع یکنواخت آلودگی در خاک نگهداری شده است. این دوره‌ی زمانی نیز براساس مطالعات انجام‌شده توسط سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱) و خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در نظر گرفته شده است.[۲۰ و ۴۰] مخلوط‌های مذکور، برای بررسی تأثیر آلاینده‌های نفتی در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک استفاده شده است.

۳.۲. آزمایش‌ها

برای ارزیابی تأثیر آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های نشست‌پذیری و نفوذپذیری ماسه‌ی رس‌دار، مجموعه‌یی از آزمایش‌های آزمایشگاهی، شامل تراکم استاندارد و تحکیم یک‌بُعدی به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D۶۹۸ و ASTM D۲۴۳۵ انجام شده است. آزمایش تراکم براساس پروکتور استاندارد برای تعیین درصد رطوبت بهینه (OMC) و وزن مخصوص خشک بیشینه (MDD) انجام شده است. آزمایش‌های تحکیم یک‌بُعدی بر روی نمونه‌هایی با قطر ۵ و ضخامت ۲ سانتی‌متر انجام شده‌اند. تنش‌ها در فرآیند بارگذاری به ترتیب ۵/۱، ۱۰/۲، ۲۰/۴، ۴۰/۷، ۸۱/۵، ۱۶۳، و ۳۲۶ کیلوپاسکال و در مرحله‌ی باربرداری به ترتیب ۸۱/۵، ۲۰/۴، و ۵/۱ کیلوپاسکال انتخاب شده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها در MDD و OMC و خودشان آماده شده‌اند، زیرا بیشترین تعامل بین ذرات خاک در این حالت ایجاد خواهد شد.[۴۱] در مطالعات انجام‌شده توسط استوار و همکاران (۲۰۲۱)، بر روی خاک‌های ماسه‌یی آلوده با نفت خام،[۴۲] نظری هریس و همکاران (۲۰۲۱) بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار آلوده با بنزین،[۳۵] بجنوردی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار

آلوده با روغن موتور سوخته،[۴۳] و دسوزا کوریا[۱] و همکاران (۲۰۲۰) بر روی ماسه‌ی رس‌دار آلوده با گازوئیل،[۴۴] نیز ساخت نمونه‌ها در شرایط MDD و OMC انجام شده است.

روش تراکم استاتیک برای فشرده‌سازی نمونه ها برای دستیابی به تراکم یکنواخت انتخاب شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، خاک آلوده در قالب‌های تهیه‌شده از لوله‌ی پلیکا، با قطر ۵ و تا ارتفاع ۲ سانتی‌متر به‌طوریکنواخت متراکم شده است. سپس توسط دستگاه نمونه‌درآور خاک، نمونه از لوله‌ی پلیکا خارج و درون رینگ فلزی دستگاه تحکیم قرار گرفت و آزمایش شد. آزمایش تحکیم، سه بار تکرار و نتایج به‌صورت میانگین ارائه شده‌اند. به‌منظور بررسی ریزساختار اولیه‌ی نمونه‌های آلوده به درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی مختلف و مقایسه‌ی آن‌ها با خاک تمیز، مجموعه‌یی از تصاویر SEM توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل VEGA۳-TESCAN تهیه شده است. نتایج SEM در تفسیر داده‌های کمّی به‌دست‌آمده در مطالعه‌ی حاضر مفید است.

در مطالعه‌ی حاضر، نمونه‌ها پس از آلوده‌شدن با انواع آلاینده‌های نفتی مختلف (پس از مدت ۱ ماه) بررسی شده‌اند. در تهیه‌ی تصاویر SEM ، نمونه‌ها بر روی یک صفحه‌ی کوچک قرار گرفتند و با روکش طلا پوشانده شدند، تا وضوح لبه‌ی تصاویر و همچنین انتشار الکترون‌های ثانویه افزایش داده شود. تصاویر SEMیا ضریب بزرگ‌نمایی ۲۰۰ تهیه شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در خصوصیات تراکمی

محاسبه‌ی مقدار آب در آزمایش تراکم، اهمیت ویژه‌یی دارد. این توضیح لازم است که اگرچه همیشه برای تعیین درصد رطوبت از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود، اما معادله‌ی مذکور نمی‌تواند برای خاک‌های آلوده به مشتق‌های نفتی استفاده شود؛ زیرا مشتق‌های نفتی، ترکیب‌های پیچیده‌یی دارند، که ممکن است حتی در دمای اتاق بخار شوند. با توجه به اینکه آب و آلاینده‌های نفتی، درجه‌ی تبخیر متفاوتی دارند؛ در پژوهش حاضر از معادله‌ی پیشنهادی ۲، که توسط ژِنگ[۲] و همکاران (۲۰۱۴)،[۴۵] ارائه شده است، برای تعیین مقدار رطوبت نمونه‌های خاک آلوده به مشتق‌های نفتی استفاده شده است.

$$w_w = \frac{m_w}{m_d} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

$$w_w = \frac{m_w}{m_d} = \left[\frac{m_t}{m_r}\left(۱+n-n\right) - ۱ - n \right] \times \%۱۰۰ \qquad (۲)$$

که در آن، w_w مقدار رطوبت بر حسب درصد، m_t جرم نمونه قبل از خشک‌شدن (گرم)، m_r جرم نمونه پس از خشک‌شدن در کوره (گرم)، m_w جرم آب تبخیرشده (گرم)، m_d جرم خشک نمونه (گرم)، n مقدار آلاینده‌ی نفتی قبل از خشک‌شدن، و υ ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی است. تفاوت بین مقادیر m_t و m_r برابر با از دست‌دادن جرم آلاینده‌ی نفتی ناشی از خشک‌کردن (یعنی جرم آلاینده‌ی تبخیرشده) است. بنابراین، ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی از معادله‌ی ۳ به‌دست می‌آید.

$$\mathrm{u}(\%) = \frac{m_t - m_r}{\frac{m_t}{۱+n}} \times ۱۰۰ \qquad (۳)$$

با برازش یک خط بین داده‌های نرخ تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی در مقابل درصد آلاینده‌ی نفتی و محاسبه‌ی شیب خط برازش، ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی (υ) محاسبه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با توجه به شکل ۲، ضریب تلفات خشک‌شدن روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب ۰/۹۸۸۳، ۰/۸۵۱۶، ۰/۳۸۶۸، و ۰/۰۴۶۳ تعیین شده است. براساس نتایج اخیر می‌توان دریافت که افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی سبب افزایش کشش سطحی بین مولکول‌ها و درنتیجه، سبب کاهش نرخ تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی شده است.

نمودارهای آزمایش تراکم استاندارد و خلاصه‌ی نتایج آزمایش ذکرشده، برای خاک‌های تمیز و آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. بررسی نمودارهای آزمایش تراکم خاک‌های آلوده با آلاینده‌های نفتی مختلف نشان می‌دهد که به غیر از اختلاف‌های ناچیز در مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه (MDD) و درصد رطوبت بهینه (OMC)، در همه‌ی منحنی‌ها، روند تغییرات افزایش مقدار آلاینده‌ی نفتی مشابه هم هستند.

مطابق شکل ۳، افزودن ۳٪ از آلاینده‌های نفتی مختلف به خاک تمیز باعث کاهش MDD و OMC شده است. این روند تا افزودن ۹٪ آلاینده‌های نفتی به خاک تمیز ادامه پیدا کرده است.

براساس نتایج آزمایش تراکم، که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مشخص شد که MDD خاک تمیز با افزودن ۹٪ روغن موتور، روغن خام، گازوئیل، و نفت سفید از ۱۸/۸۳ کیلونیوتن بر مترمکعب به ترتیب به ۱۸/۲۵، ۱۸/۱۴، ۱۷/۹۵، و ۱۷/۷۶ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش پیدا کرده است. علاوه‌بر این، مشخص است که با افزودن ۹٪ روغن موتور، روغن خام، گازوئیل، و نفت سفید به خاک تمیز، OMC از ۱۱/۵٪ به ترتیب به ۳/۵، ۵/۵، ۵، و ۲/۶ کاهش پیدا کرده است. کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی

شکل ۲. محاسبه‌ی ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌های نفتی (υ).

[۱] De Souza Correia

[۲] Zheng

شکل ۳. نمودار آزمایش تراکم خاک تمیز و آلوده با درصدهای مختلف: (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید.

شکل ۴. تغییرات: (الف) درصد رطوبت بهینه، (ب) وزن مخصوص خشک بیشینه با افزایش مقدار آلاینده‌های نفتی.

را می‌توان به چگالی کمتر آلاینده‌های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به‌دلیل وجود آلاینده‌های نفتی در هنگام اجرای آزمایش تراکم نسبت داد. براساس نتایج، ویسکوزیته نقش کلیدی در تغییر وزن مخصوص خشک بیشینه دارد. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه کمتر است. کمترین کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه مربوط به نمونه‌های آلوده به روغن موتور سوخته و پس از آن نمونه‌های آلوده به نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید است. ویسکوزیته‌ی بالای آلاینده‌های نفتی با چسباندن ذرات خاک (به‌دلیل کمترشدن فرآیند روغن‌کاری) و لخته‌های بزرگ ایجادشده به یکدیگر، حجم منافذ خاک را کاهش داده و در نتیجه کاهش کمتری در وزن مخصوص خشک خاک ایجاد کرده است. کاهش درصد رطوبت بهینه، به اشغال فضاهای بین ذره‌یی توسط آلاینده‌های نفتی،[۴۶] جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به دلیل ویژگی‌های آب‌گریز آلاینده‌های نفتی،[۴۷] و کاهش سطح ویژه (SSA)، که جذب مولکول‌های آب توسط ذرات رس را کاهش می‌دهد، مرتبط است.[۲۶] نتایج پژوهش حاضر کاملاً با نتایج ارائه‌شده توسط بجنوردی و همکاران (۲۰۲۰)،[۴۳] مطابقت دارد. مقایسه‌ی اثر آلاینده‌های مختلف نفتی در درصد رطوبت بهینه نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین کاهش درصد رطوبت بهینه به ترتیب مربوط به خاک آلوده به ۹٪ نفت سفید و ۹٪ نفت خام است. با این حال مشخص است که هیچ رابطه‌ی منطقی بین ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی و درصد رطوبت بهینه‌ی خاک آلوده به آلاینده‌ی نفتی وجود ندارد.

۲.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در پارامترهای نشست‌پذیری

در مطالعه‌ی حاضر، با انجام مجموعه‌یی از آزمون‌های تحکیم یک‌بُعدی، رفتار تغییر حجم خاک آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌ی نفتی تعیین شده است. منحنی‌های تحکیم، در فضای $e - log\ \sigma'_v$ در شکل ۵ مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که همه‌ی نمونه‌ها در MDD و OMC خودشان ساخته شده‌اند. مطابق شکل مذکور، نشست‌پذیری با افزایش آلاینده‌های نفتی بیشتر شده است. همچنین مشخص است که با افزودن آلاینده‌ی نفتی به خاک تمیز، نسبت تخلخل اولیه افزایش یافته است، که می‌تواند ناشی از تغییر ساختار خاک در نتیجه‌ی آلوده‌شدن با آلاینده‌های نفتی باشد. علاوه‌بر این، مشخص است که وقتی درصد آلاینده‌ی نفتی افزایش پیدا کرده است، نسبت تخلخل اولیه بیشتر شده و منحنی‌های تحکیم به سمت بالا حرکت کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که برای مقدار معینی از آلاینده‌ی نفتی، بیشترین نسبت تخلخل اولیه مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است، که کمترین ویسکوزیته را در بین آلاینده‌های نفتی دارد. با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، نسبت تخلخل اولیه کاهش یافته است. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، ذرات خاک در ساختار لخته‌شده پراکنده (ایجادشده در نتیجه‌ی ثابت دی‌لکتریک پایین آلاینده‌های نفتی)، به یکدیگر می‌چسبند و منجر به کاهش حجم منافذ خاک می‌شود. در واقع، اثر ویسکوزیته، اثر ثابت دی‌الکتریک را تعدیل می‌کند.

در شکل ۶، تغییرات ضریب فشردگی (C_c)، ضریب تورم (C_S)، و نشست تحکیمی (ΔH) در برابر درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی مشاهده می‌شود.

شکل ۵. منحنی تراکم خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی مختلف:
(الف) ۳٪، (ب) ۶٪، و (ج) ۹٪.

شکل ۶. تغییرهای پارامترهای به‌دست‌آمده از آزمایش تحکیم براساس درصد و نوع آلاینده‌های نفتی مختلف: (الف) ضریب فشردگی، (ب) نشست کل، و (ج) ضریب تورم.

نتایج آزمایش تحکیم نشان می‌دهند که افزودن آلاینده‌ی نفتی، سبب افزایش ضریب فشردگی و افزایش نشست خاک شده است. براساس نتایج آزمایش اخیر (شکل ۶-الف) مشخص است که ضریب فشردگی خاک تمیز حدود ۰/۰۸۷ است، که با افزودن ۳٪ روغن موتور سوخته، نفت خام ، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به ۰/۰۹۲، ۰/۱۱۵، ۰/۱۲۷، و ۰/۱۴۱ افزایش پیدا کرده و روند افزایشی مذکور با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی همچنان ادامه یافته است؛ به‌طوری که در نمونه‌های حاوی ۹٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به مقادیر ۰/۱۵۸، ۰/۱۸۲، ۰/۲۲۴، و ۰/۲۳۴ رسیده است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۶- ب) نشان می‌دهند که میزان نشست خاک تمیز حدود ۱/۴۷ میلی‌متر بوده است، که با افزودن آلاینده‌های نفتی افزایش پیدا کرده است. به‌طوری که نشست کل در نمونه‌های آلوده با ۹٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به مقادیر ۲/۰۱، ۲/۶۲، ۲/۸۱، و ۳/۰۴ میلی‌متر رسیده است. افزایش ضریب فشردگی و به‌تبع آن مقدار نشست کل را می‌توان به تغییر ساختار خاک، کاهش پیوند بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، کاهش اصطکاک بین ذرات به‌دلیل اثر روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه مرتبط دانست. آلاینده‌های نفتی یک ساختار لخته‌شده، اما پراکنده در خاک ایجاد کرده‌اند.

این تغییر در ساختار خاک باعث افزایش تعداد منافذ و حفره‌های خاک شده است، که به نوبه‌ی خود باعث افزایش C_C شده است. کاهش سطح مخصوص ویژه‌ی خاک‌های آلوده به نفت، جذب آب توسط ذرات خاک را کاهش داده و تخلیه‌ی راحت‌تر آب را باعث شده است. از طرف دیگر مشخص است که با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، ضریب فشردگی و نشست کل به میزان کمتری افزایش یافته است؛[۲۰] که دلیل آن در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است. بنابراین مشخص است که تأثیر عواملی که ذکر شده است، یعنی روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی، کاهش سطح مخصوص ویژه‌ی خاک‌های آلوده به نفت، ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده‌ی خاک آلوده با آلاینده‌ی نفتی، که باعث افزایش C_C شده‌اند، بیشتر از تأثیر ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی در کاهش آن بوده و در نتیجه، C_C افزایش یافته است. با توجه شکل ۶- ج، روند تغییرات مشابهی برای ضریب تورم مشاهده می‌شود. مشخص است که با افزایش میزان آلاینده‌های نفتی ضریب تورم افزایش یافته و با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، افزایش آن‌ها بیشتر شده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات انجام‌شده توسط تالوکدار و سایکا[۱] (۲۰۱۳) در مورد ماسه‌ی رس‌دار آلوده با نفت خام،[۲۱] عسکر بیوکی و همکاران (۲۰۱۹) در مورد ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی آلوده با بنزین،[۴۸] و الحسن و فاگ[۲] (۲۰۱۳) بر روی ماسه‌ی لای‌دار آلوده با گازوئیل،[۴۹] مطابقت دارد. در مطالعات اخیر، تغییر ساختار خاک، کاهش ارتباط بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، اثر روان‌کنندگی، کاهش اصطکاک بین ذرات، و کاهش سطح ویژه دلیل افزایش ضریب فشردگی بیان شده است.

اثر غالب ثابت دی‌الکتریک یا ویسکوزیته در تغییرات ضریب فشردگی خاک شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، ضریب فشردگی افزایش یافته است. افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، سبب کاهش ثابت دی‌اکتریک و افزایش ویسکوزیته‌ی سیال منفذی می‌شود.

شکل ۷. تأثیر تغییرات آلاینده‌ی نفتی به آب در ضریب فشردگی.

به ازاء یک درصد مشخص از نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، برای مثال حدود ۰/۴، با توجه به نزدیک‌بودن ثابت دی‌الکتریک و اثر یکسان ثابت دی‌الکتریک، ویسکوزیته، یک عامل حاکم است. بدین صورت که هر چه ویسکوزیته بیشتر باشد، افزایش مقدار ضریب فشردگی کمتر است. با ملاحظه‌ی شکل ۷ مشخص است که همه‌ی نمودارها روند صعودی دارند. با افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، ضریب فشردگی خاک آلوده افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی کاهش و ویسکوزیته‌ی آن نیز افزایش پیدا کرده است، اما اثر کاهش ثابت دی‌اکتریک بیشتر از اثر افزایش ویسکوزیته در رفتار خاک مشهود است. زیرا اگر ویسکوزیته، یک عامل حاکم بود، به‌دلیل خاصیت چسبانندگی بین ذرات خاک، سبب می‌شد ذرات بیشتر به یکدیگر بچسبند، حجم منافذ خاک کمتر کاهش یابد، و در نتیجه ضریب فشردگی کاهش یابد.

تغییرات ضریب تحکیم (C_v) در مقابل میزان آلاینده‌های نفتی مختلف در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن انواع آلاینده‌های نفتی مختلف به خاک، باعث افزایش ضریب تحکیم شده است. این افزایش را می‌توان به افزایش نسبت فضای خالی در حضور آلاینده‌های نفتی نسبت داد، که باعث افزایش ضریب نفوذپذیری و کاهش زمان لازم برای تحکیم شده است. همچنین مشخص است که با افزایش درصد آلاینده‌های نفتی در خاک، ضریب تحکیم همه‌ی نمونه‌های آلوده به میزان بیشتری افزایش پیدا کرده است که با نتایج برخی مطالعات پیشین،[۴۶ و ۵۰] مطابقت دارد. از طرف دیگر، افزایش ضریب تحکیم در نمونه‌های با ویسکوزیته‌ی بالاتر کُندتر صورت گرفته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه میزان آلاینده‌ی نفتی بیشتر و ویسکوزیته‌ی آن کمتر باشد، سرعت خروج سیال منفذی (آب و آلودگی نفتی) بیشتر و در نتیجه، نشست بیشتری در زمان کوتاه‌تری ایجاد خواهد شد.

علاوه‌بر این، نتایج نشان می‌دهند که در سطوح بالای تنش اعمالی، تغییرات ضریب تحکیم در خاک آلوده به روغن موتور سوخته و نفت خام کم و ناچیز بوده است. این موضوع به‌دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آن‌ها در تنش‌های کم است. با این حال، در خاک‌های آلوده به گازوئیل و نفت سفید، مقدار ضریب تحکیم برای همه‌ی بارهای اعمال‌شده به‌دلیل تعداد زیاد فضاهای منافذ و گسترش آن‌ها در حضور آلاینده‌های ذکرشده قابل توجه است.

[۱] Talukdar & Saikia

[۲] Alhassan & Fagge

شکل ۸. تغییرات ضریب تحکیم در مقابل درصد های مختلف: (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید با تغییرات تنش.

در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودارهای تنش- کرنش برای نمونه‌ی تمیز و نمونه‌های آلوده با روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید براساس نتایج آزمایش تحکیم مشاهده می‌شوند. در جدول ۴، مقادیر کرنش خمیری (ε_p) ارائه شده است. با توجه به شکل ۹، مقدار کرنش خمیری در طی فرآیند بارگذاری و باربرداری برای نمونه‌ی خاک تمیز، ۳/۳۵٪ است و در آن، نحوه‌ی محاسبه‌ی کرنش خمیری مشاهده می‌شود.

همچنین مطابق شکل ۱۰، با افزایش آلاینده‌ی نفتی، کرنش خمیری در همه‌ی خاک‌های آلوده افزایش پیدا کرده است. همچنین مشهود است که برای نسبت معینی از آلاینده‌های نفتی، ε_p با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی افزایش پیدا کرده است. خاک آلوده به روغن موتور سوخته، کمترین افزایش ε_p را نشان می‌دهد، در حالی که بیشترین افزایش ε_p مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است.

کرنش خمیری مستقیماً به نشست خمیری بستگی دارد، و بیانگر تفاوت بین مقدار نشست در هنگام بارگذاری (از ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال) و مقدار تورم در هنگام باربرداری (از ۳۲۶ تا ۵/۱ کیلوپاسکال) است. در شکل ۱۱، میزان نشست و تورم و همچنین نشست خمیری در محدوده‌ی تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، اگرچه با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی و همچنین به ازاء یک مقدار مشخص آلاینده‌ی نفتی با کاهش

شکل ۹. تغییرات کرنش خمیری برای نمونه‌ی تمیز.

جدول ۴. مقادیر کرنش خمیری خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی.

مقدار آلاینده‌ی نفتی (٪)	نوع آلاینده‌ی نفتی			
	روغن موتور سوخته (٪)	نفت خام (٪)	گازوئیل (٪)	نفت سفید (٪)
۳	۳/۶۷	۵/۷۷	۶/۴۰	۷/۵۸
۶	۴/۰۲	۶/۲۰	۷/۱۳	۷/۷۵
۹	۵/۸۵	۷/۵۳	۸/۱۱	۸/۸۰

شکل ۱۰. تغییرات کرنش خمیری برای نمونه‌های آلوده با: (الف)روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، و (د) نفت سفید.

شکل ۱۱. تغییرات نشست، تورم، و نشست خمیری در فرآیند بارگذاری و محدوده‌ی تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال.

ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی مقدار نشست و تورم افزایش یافته است. اما میزان تورم در مقابل مقدار نشست ناچیز بوده است، که سبب وابستگی کرنش خمیری به میزان نشست شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کرنش خمیری خاک آلوده‌شده، با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی و همچنین به ازاء یک مقدار مشخص آلاینده‌ی نفتی با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. یعنی کرنش خمیری با ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی رابطه‌ی عکس دارد.

۳.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در نفوذپذیری

نفوذ آلاینده‌های نفتی به خاک تأثیر بسزایی در ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن‌ها دارد. در پژوهش حاضر، ضریب نفوذپذیری به‌طورغیرمستقیم از نتایج آزمون تحکیم یک‌بُعدی با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شده است.

$$K = C_v \ \gamma_w m_v \qquad (۴)$$

که در آن، m_v و γ_w به ترتیب ضریب تراکم‌پذیری حجمی و وزن مخصوص آب هستند.

مقادیر ضریب نفوذپذیری خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی در تنش‌های مختلف در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، روند تغییر ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم با افزایش تنش‌های اعمالی در آزمایش تحکیم یک‌بُعدی مشابه است. با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که با افزایش تنش اعمالی، ضریب نفوذپذیری خاک‌های آلوده با نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید کاهش پیدا کرده است؛ زیرا بیشتر فضاهای خالی خاک آلوده در سطوح پایین تنش‌های اعمالی از بین رفته است. برای نمونه‌های آلوده با درصدهای مختلف روغن موتور سوخته، تغییرات تنش اعمالی، تأثیر زیادی در تغییرات ضریب نفوذپذیری ندارد. این موضوع همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، به‌دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آن‌ها در تنش‌های اعمالی کم است.

نتایج تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده‌های نفتی مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. این توضیح لازم است که ضریب نفوذپذیری از میانگین‌گیری ضریب‌های نفوذپذیری تحت تنش‌های مختلف (شکل ۱۲) به‌دست آمده است. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهند که با افزودن

شکل ۱۲. تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف:
(الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید با تغییرات تنش.

شکل ۱۳. تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده‌های مختلف.

شکل ۱۴. نمایش شماتیک مسیرهای جریان در خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌های کم و زیاد.

آلاینده‌های نفتی ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا کرده است. نفوذ پذیری خاک تمیز $۱/۸۱\times۱۰^{-۷}$ سانتی‌متر بر ثانیه است، که با افزودن ۳٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به : $۴/۱۹\times۱۰^{-۷}$، $۱۳/۲\times۱۰^{-۷}$، $۲۲/۸\times۱۰^{-۷}$، و $۲۹/۲\times۱۰^{-۷}$ سانتی‌متر برثانیه رسیده است. با افزودن مقادیر بیشتر آلاینده‌های نفتی، نفوذپذیری به میزان بیشتری افزایش پیدا کرده است، تا اینکه در نمونه‌های آلوده با ۹٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به $۸/۰۳\times۱۰^{-۷}$، $۲۵/۵\times۱۰^{-۷}$، $۳۳/۳\times۱۰^{-۷}$، و $۴۷/۶\times۱۰^{-۷}$ سانتی‌متر برثانیه رسیده است.

افزایش ضریب نفوذپذیری را می‌توان به کاهش سطح مخصوص ویژه در نتیجه‌ی حضور آلاینده‌ها نسبت داد، که سبب می‌شود ذرات خاک، آب کمتری را جذب کنند و اجازه می‌دهد آب سریع‌تر حرکت کند.[۲۰] البته نقش روان‌کاری آلاینده‌های نفتی در تسهیل این حرکت نباید نادیده گرفته شود. علاوه‌بر این، در مطالعات پیشین، افزایش ضریب نفوذپذیری به ساختار با فضاهای خالی زیاد موجود در خاک‌های آلوده با آلاینده‌های نفتی نسبت داده شده است.[۲۸] همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای نسبت معینی از آلاینده‌ی نفتی، نفوذپذیری با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده افزایش یافته است. این بدان معناست که بیشترین مقدار ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های آلوده به نفت سفید و پس از آن گازوئیل، نفت خام، و روغن موتور سوخته است. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، علاوه‌بر اینکه فضاهای خالی کاهش پیدا می‌کنند، ذرات بیشتری به هم می‌چسبند و موانع بیشتری برای خروج آب ایجاد می‌شوند. در شکل ۱۴، به‌صورت شماتیک مسیر حرکت

شکل ۱۵. تصاویر SEM ماسه‌ی رس‌دار: (الف) تمیز، (ب) آلوده با ۹٪ روغن موتور سوخته، (ج) آلوده با ۹٪ نفت خام، (د) آلوده با ۹٪ گازوئیل، (و) آلوده با ۹٪ نفت سفید.

آب در خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌های بالا و پایین مشاهده می‌شود.

۴.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در ریزساختار خاک با استفاده از تصاویر SEM

در شکل ۱۵، عکس‌های SEM از نمونه‌های تمیز و آلوده با ۹٪ انواع مختلف آلاینده‌های نفتی مشاهده می‌شود. ترکیب‌های آلودگی نفتی، که سطوح ذرات رس را در بخش ریزدانه‌ی خاک پوشانده‌اند، ویژگی آب‌دوستی دانه‌های رسی تمیز را به حالت آب‌گریز تغییر داده است. از طرفی، آلاینده‌های نفتی، ثابت دی‌الکتریک پایینی دارند. طبق تئوری گوی[۱]- چاپمن[۲]،[۲۹ و ۳۰] مایعات با ثابت دی‌الکتریک کم، باعث ایجاد لایه‌ی دوگانه‌ی بسیار نازک در مقایسه با مایعات با ثابت دی‌الکتریک بالاتر می‌شوند و این به نوبه‌ی خود، باعث کاهش نیروهای دافعه بین ذره‌یی و در نتیجه، لخته‌شدن ذرات می‌شود.[۳۱] در نتیجه، ساختار خاکی که قبل از آلوده‌شدن، متشکل از ماسه و کائولینیتی بوده است و فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده بود، به ساختاری متشکل از دانه‌های ماسه و

[۱] Guoy
[۲] Chapman

شکل ۱۶. شماتیک تأثیر آلاینده‌ی نفتی در ریزساختار.

شکل ۱۷. شکل شماتیک ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده.

کائولینت و دانه‌های به‌هم چسبیده‌ی کائولینیت حتی بزرگ‌تر از دانه‌های ماسه تبدیل شده است (شکل ۱۶).

این موضوع باعث شده است که خاک آلوده، ساختاری سُست داشته باشد و در آن منافذ بیشتری بین ذرات مشاهده شود.[۵۱] یعنی آلاینده‌های نفتی سبب ایجاد یک ساختار لخته‌شده اما پراکنده[۳]در خاک ماسه‌ی رس‌دار شده‌اند. برای درک بهتر، ساختار لخته‌شده اما پراکنده، به صورت شماتیک در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۵ (ب الی د)، مشخص است که لخته‌های بزرگ‌تری در خاک آلوده به روغن موتور سوخته هستند که بالاترین ویسکوزیته را در بین آلاینده‌های نفتی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر دارند. پس از روغن موتور سوخته، خاک آلوده به نفت خام، بزرگ‌ترین ذرات لخته را تشکیل داده است. با این حال، زمانی که ساختار خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید با یکدیگر مقایسه می‌شوند (شکل‌های ۱۵: د الی هـ)، تفاوت معنی‌داری در اندازه‌ی لخته‌های تشکیل‌شده وجود ندارد. لخته‌های بزرگ‌تر ایجادشده با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی به‌دلیل خاصیت چسبندگی آلاینده با ویسکوزیته‌ی بالاتر است که می‌تواند ذرات بیشتری را به یکدیگر بچسباند. در ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده‌ی ناشی از وجود آلاینده‌های نفتی، ریزمنافذ کاهش و درشت‌منافذ افزایش یافته‌اند و بین ساختارهای خاک شکاف ایجاد شده است، که مشارکت بین ذرات را کاهش داده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر انواع آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های نشست‌پذیری خاک ماسه‌ی رسی پرداخته شده است. ویسکوزیته و ثابت دی‌الکتریک به عنوان دو ویژگی مهم آلاینده‌های نفتی، تأثیر زیادی در خصوصیات نشست‌پذیری خاک موردمطالعه داشته‌اند. اما با توجه به اینکه ثابت دی‌الکتریک تمام آلاینده‌های نفتی به یکدیگر نزدیک هستند، ثابت

[۳] flocculated but dispersed structure

دی‌الکتریک اثر یکسانی در خاک آلوده با یک درصد معین از آلاینده‌های مختلف نفتی دارد. بنابراین، نقش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌های نفتی بر روی خصوصیات نشست‌پذیری پُررنگ‌تر است. نتایج اصلی مطالعه‌ی حاضر به این شرح است:

۱- زمانی که ماسه‌ی رس‌دار در معرض آلاینده‌های نفتی قرار گیرد، آلاینده‌های نفتی ذرات خاک رس را خواهد پوشاند. به‌دلیل ثابت دی‌الکتریک پایین آلاینده‌های نفتی، نیروی دافعه بین ذرات رس کاهش پیدا کرده و باعث لخته‌شدن ذرات رس شده است. در نتیجه، ساختار خاکی که قبل از آلوده‌شدن متشکل از ماسه و کائولینیتی بوده و کائولینیت فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده است، به ساختاری متشکل از دانه‌های ماسه و دانه‌های به‌هم چسبیده‌ی رس حتی بزرگ‌تر از دانه‌های ماسه تبدیل خواهد شد. این موضوع باعث خواهد شد که خاک آلوده دارای ماتریس به‌طور قابل‌توجهی شُل باشد و در ساختار خاک، منافذ بین ذرات بیشتری مشاهده شود.

۲- آلاینده‌های نفتی در خاک ماسه‌ی رس‌دار، ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده ایجاد می‌کنند. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، به‌دلیل خاصیت چسبندگی، ذرات بیشتری را به یکدیگر می‌چسباند و سبب ایجاد لخته‌های بزرگ‌تری می‌شود.

۳- به‌دلیل چگالی کمتر آلاینده‌های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به‌دلیل وجود آلاینده‌های نفتی در آزمایش تراکم، هر چهار آلاینده‌ی نفتی باعث کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه شده‌اند. نقش ویسکوزیته در تغییر وزن مخصوص خشک بیشینه نیز مهم است. بیشترین کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه مربوط به خاک آلوده به آلاینده با ویسکوزیته‌ی پایین (نفت سفید) بوده است.

۴- هر چهار آلاینده‌ی نفتی سبب کاهش درصد رطوبت بهینه شده‌اند. کاهش درصد رطوبت بهینه به‌دلیل اشغال فضاهای بین ذره‌یی توسط آلاینده‌های نفتی، جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به‌دلیل ویژگی‌های آب‌گریز آلاینده‌های نفتی، و کاهش مساحت سطح ویژه است، که جذب مولکول‌های آب توسط ذرات رس را کاهش خواهد داد.

۵- به‌دلیل تغییر ساختار خاک، کاهش پیوند بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، کاهش اصطکاک بین ذرات به دلیل اثر روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه، آلاینده‌های نفتی سبب افزایش ضریب فشردگی و ضریب نفوذپذیری شده‌اند.

۶- نفت سفید باعث بیشترین افزایش ۱۶۹ درصدی در ضریب فشردگی شده است. بنابراین کنترل نشست در خاک‌های آلوده به نفت سفید بسیار مهم است. اگر سازه‌یی بر روی خاک‌های آلوده به نفت سفید ساخته شوند یا اگر چنین خاک‌هایی در پروژه‌های ساختمانی مجدداً استفاده شوند، به‌دلیل افزایش نشست‌پذیری لازم است توجه ویژه‌یی در طراحی‌های ژئوتکنیکی صورت پذیرد.

منابع (References)

1. Haghsheno, H., and Arabani, M., 2023. Stabilization and solidification of oil-polluted soils using secondary stabilizers and industrial wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology, 21*(2), pp 2129-2162. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05285-x.

2. Singh, S., Srivastava, R., and John, S., 2008. Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & Sediment Contamination, 17*(3), pp 290-300. https://doi.org/10.1080/15320380802007028

3. Abousnina, R. M., Manalo, A., Shiau, J., and Lokuge, W., 2015. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 24*(8), pp 833-845. https://doi.org/10.1080/15320383.2015.1058338

4. Haghsheno, H., and Arabani, M., 2023. The effect of primary stabilizers for stabilization/solidification of oil-polluted soils–a review. *Environmental Technology Reviews, 12*(1), pp 337-358. https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2215460

5. Arabani, M., and Haghsheno, H., 2023. The effect of various environmental conditions on stabilization/solidification (S/S) of oil-contaminated soil using alkaline activation of granulated blast furnace slag (GBFS). *Construction and Building Materials, 409*, p.134022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat .2023.134022

6. Al-Hamaiedh, H. D., and Maaitah, O. N., 2011. Treatment of oil polluted soil using electrochemical method. *Alexandria Engineering Journal, 50*(1), pp 105-110. https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.010.

7. Dudley, B., 2018. BP statistical review of world energy 2018. Energy economic, Centre for energy economics research and policy. British Petroleum, Available via https://www.bp.com/en/global/corporate/ energy-economics/statistical-review-of-world-ergy/electricity.

8. Kandiyoti, R., Herod, A., Bartle, K. D., and Morgan, T. J., 2016. Solid fuels and heavy hydrocarbon liquids: thermal characterization and analysis, Elsevier Science.

9. Van der Perk, M., 2013. Soil and water contamination. CRC Press.

10. Payatakes, A., 1982. Dynamics of oil ganglia during immiscible displacement in water-wet porous media.*Annual Review of Fluid Mechanics, 14*, pp.

365-393.
DOI: 10.1146/annurev.fl.14.010182.002053

11. Karimpour-Fard, M., and Alimohammadi-jelodar, R., 2018. Permeability of Two Clayey Soils Exposed to Petroleum Products and Organic Solvents. *Civil Engineering Infrastructures Journal, 51*(1)**,** pp 131-146. https://doi.org/10.7508/ CEIJ.2018.01.008

12. Mackenzie, J., 1970. Interaction between oil drops and mineral surfaces. *Society of Mining Engineers, AIME, Transaction, 247,* pp. 202-208. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124402

13. Arabani, M., and Haghsheno, H., 2024. The effect of temperature curing on total petroleum hydrocarbon (TPH) values of slag-based polluted sample leachate. *Materials Letters, 356*, p. 135542. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135542.

14. Haghsheno, H., and Arabani, M., 2022. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(22)**,** pp 32670-32701. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19418-1.

15. Ur-Rehman, H., Abduljauwad, S., and Akram, T. 2007. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, *12*, pp. 1-12.

16. Jia, Y., Wu, Q., Shang, H., Yang, Z. N., and Shan, H., 2011. The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River Delta, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70*(3)**,** pp 517-525.https://doi.org/10.1007/ s10064-011-0349-8

17. Kermani, M., and Ebadi, T., 2012. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 21*(5)**,** pp 655-671. .https://doi.org/10.1080/15320383.2012.672486.

18. Ota, J.O., 2013. The effect of light crude oil contamination on the geotechnical properties of kaolinite clay soil. Doctoral dissertation, Anglia Ruskin University.

19. Al-Adhamii, R. A., Fattah, M. Y., and Al-Hadidi, M. T., 2018. Crude oil effect on the clayey soil mechanical and physical properties. *International Journal of Engineering & Technology, 7*(4.20)**,** pp 453-458. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4 .20.26242.

20. Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H., and Soorki, A. A., 2021. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13*(3)**,** pp 653-670.https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011

21. Talukdar, D., and Saikia, B., 2013. Effect of crude oil on some consolidation properties of clayey soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, *3*(2)**,** pp 117-120.

22. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., and Yazdani, H., 2013. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, *166*, pp.11-16. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004

23. Jedari, C., and Farahani, M., 2018. Permeability and Compression Characteristics of Clay Contaminated with Kerosene and Gasoil. *Mapta Journal of Architecture, Urbanism and Civil Engineering (MJAUCE), 1*(3)**,** pp 1-10.

24. Safehian, H., Rajabi, A. M., and Ghasemzadeh, H., 2018. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, *241*, pp. 55-63. https://doi.org/10.1016/j.enggeo. 2018.04.020.

25. Karkush, M. O., and Kareem, Z. A., 2017. Investigation of the Impacts of fuel oil on the geotechnical properties of cohesive soil. *Engineering Journal, 21*, pp. 127-137. DOI: https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.4.127

26. Karkush, M. O., and Jihad, A. G., 2020. Studying the Geotechnical Properties of Clayey Soil Contaminated by Kerosene. in Key Engineering Materials. *Trans Tech Publ, 857,* pp. 383-393. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.85 7.383.

27. Medhat, F. K., Carpuzcu, M., Cabalar, A. F., and Al-Obaidi, A., 2019. Influence of Kawergosk Refinery Waste Oil on Geotechnical Properties of Contaminated Clayey Soil. *Polytechnic Journal, 9*(1)**,** pp 64-73. https://doi.org/10.25156/ptj.v9n1y 2019.pp64-73

28. Nazir, A.K., 2011. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Engineering Journal, 50*, pp. 331-335. https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.05.002

29. Guoy, G., 1910. Constitution of the electric charge at the surface of an electrolyte. *J Physique, 9*, pp. 457-67.

30. Chapman, D.L., 1913. LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 25*, pp. 475-481.

31. Quigley, R. M., and Fernandez, F., 1991. Hydrocarbon liquids and clay microstructure. *Microstructure of Fine-Grained Sediments. Frontiers in Sedimentary Geology*. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/ 978-1-4612-4428-8_50

32. Carey, A., and Hayzen, A., 2013. Machinery Lubrication—The Dielectric Constant and Oil Analysis. *Emerson Process Management*.

33. Al-Aghbari, M., Dutta, R., and Mohamedzeini, Y., 2011. Effect of diesel and gasoline on the properties of sands—a comparative study. *International Journal of Geotechnical Engineering, 5*(1)**,** pp 61-68.https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.61-68

34. Rojas, J., Salinas, L., and Garnica, I., 2003. Influence of the kinematic viscosity of oil contaminants in the compaction and hydraulic conductivity in certain type of soils. *Groundwater engineering: recent advances: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Problems Related to Geo-environment*, *Okayama, Japan. Taylor & Francis, 7*, pp.954-961. https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.954.961

35. Nazari Heris, M., Aghajani, S., Hajialilue-Bonab, M., and Vafaei Molamahmood, H., 2020. Effects of Lead and Gasoline Contamination on Geotechnical Properties of Clayey Soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 29*(3)**,** pp 340-354. https://doi.org/10.1080/ 15320383.2020.1719973

36. Kogbara, R. B., Yi, Y., and Al-Tabbaa, A., 2011. Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime–slag blend. *Environmental Science and Pollution Research,* 18(8)**,** pp 1286-1296. https://doi.org/10.1007/s11356-011-0480-x

37. Oluwatuyi, O. E., and Ojuri, O. O., 2017. Environmental performance of lime–rice husk ash stabilized lateritic soil contaminated with lead or naphthalene. *Geotechnical and Geological Engineering, 35*(6)**,** pp 2947-2964. https://doi.org/ 10.1007/s10706-017-0294-9

38. Al-Adhamii, R. A., Rahil, F. H., Kadhim, Y. M., and Atia, T. A., 2020. Geotechnical properties of gypseous soil contaminated with crude oil. *MS&E, 737*(1)**,** pp 012115.https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012115.

39. Nasehi, S. A., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., and Morsali, A., 2016. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering, 34*(1)**,** pp 333-345. https://doi.org/10.1007 /s10706-015-9948-7

40. Khamehchiyan, M., Charkhabi, A. H., and Tajik, M., 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology, 89*(3-4)**,** pp 220-229.https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106021

41. Kogbara, R. B., and Al-Tabbaa, A., 2011. Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil. *Science of the Total Environment, 409*(11)**,** pp 2325-2335. https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2011.02.037.

42. Ostovar, M., Ghiassi, R., Mehdizadeh, M. J., and Shariatmadari, N., 2021. Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 30*(1)**,** pp 58-73. https://doi.org/10. 1080/15320383.2020.1792410.

43. Bojnourdi, S., Narani, S. S., Abbaspour, M., Ebadi, T., and Hosseini, S. M. M., 2020. Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures. *Engineering Geology*, *279*, pp. 105886. https://doi.org/10.1016/j. enggeo.2020.105886.

44. De Souza Correia, N., Portelinha, F. H. M., Mendes, I. S., and da Silva, J. W. B., 2020. Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering, 11*(1)**,** pp 1-15. https://doi.org/10.1186/s40703-020-00115-2.

45. Zheng, X., Zhang, J., Zheng, T., Liang, C., and Wang, H., 2014. A developed technique for measuring water content in oil-contaminated porous media. *Environmental Earth Sciences, 71*(3)**,** pp 1349-1356. https://doi.org/10.1007/ s12665-013-2541-6

46. Hamidi, A., and Karimi, A. H., 2021. Effect of Phytoremediation on Compression Characteristics of Silty Clayey Sand Contaminated with Crude Oil. *International Journal of Civil Engineering*, *19*, pp. 973-995. https://doi.org/10.1007/ s40999-021-00609-9

47. Akinwumi, I., Diwa, D., and Obianigwe, N., 2014. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research, 3*(4)**,** pp 816-824. https://doi.org/ 10.6088/ijaser. 030400007.

48. Askarbioki, M., Kargaran Bafghi, F., Mokhtari, M., and Khaleghi, M., 2019. Impact of gasoline

50. Karkush, M., and AbdulKareem, M., 2018. Effects of residuse oil contamination on the geotechnical properties of clay soil. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences, 25*(5)**,** pp 243-255.

51. Izdebska-Mucha, D., Trzcińsk, J., Żbik, M. S., and Frost, R. L., 2011. Influence of hydrocarbon contamination on clay soil microstructure. *Clay Minerals, 46*(1)**,** pp 47-58.

contamination on mechanical behavior of sandy clay soil. *Journal of Mining and Environment, 10*(2)**,** pp 389-399. https://doi.org/10.22044/jme.2019.7660.1622.

49. Alhassan, H. M., and Fagge, S. A., 2013. Effects of crude oil, low point pour fuel oil and vacuum gas oil contamination on the geotechnical properties sand, clay and laterite soils. *Int J Eng Res Appl, 3*(1)**,** pp 1947-1954.

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

شریف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌یی مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی 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 تازه‌یی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته‌ی علمی و فنی باشند.

* **مشخصات مقالات ارسالی:**

مقاله به‌صورت دوستونی (طول سطر ۸٫۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاما 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 مسؤول 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 بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها، نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه ــ با احتساب شکل و نمودار ــ باشد.

* کلیه‌ی عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل‌ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون‌های ۸٫۵ سانتی‌متری آراسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی‌متر با ضخامت کادر ۸px و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 با پسوند JPG یا Tif امکان‌پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می‌باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه‌ی لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل‌های 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.

* کلیه‌ی منابع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [ ] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, **4**(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preforation 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).

and calcium oxide, in three different curing times of 7, 14 and 28 days was tested for unconfined compressive strength. The results indicate that samples containing 0.05%, 0.1%, and 0.2% aluminum oxide nanoparticles after 28 days of curing experienced a 24.92%, 46.78%, and 43.28% increase in strength, respectively, compared to the control sample. Similarly, the increase in strength for samples with calcium oxide nanoparticles was 18.73%, 40.43%, and 36.72%, respectively. According to the findings, the curing time did not significantly affect strength improvement, and the optimum percentage for both types of nanoparticles was determined to be 0.1%. Further analysis of stress-strain curves revealed that samples with aluminum oxide nanoparticles exhibited a more brittle behavior compared to those with calcium oxide nanoparticles. Subsequently, the samples were analyzed for microstructural investigations using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM). The microstructural examinations demonstrated better compactness among the treated samples, indicating improved microstructural characteristics in the nanoparticle-amended soils.

Key Words: Soil improvement, nanotechnology, calcium oxide, aluminum oxide, unconfined compressive strength.

THE EFFECT OF VARIOUS OIL POLLUTANTS ON THE COMPRESSIBILITY PROPERTIES OF CLAYEY SAND

M. Arabani(corresponding author)
arabani@guilan.ac.ir
H. Haghsheno
haghsheno@phd.guilan.ac.ir
Faculty of Engineering
University of Guilan, Rasht, Iran
DOI: 10.24200/j30.2024.63856.3291

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 116-131, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 3 January 2024; received in revised form 1 May 2024; accepted 5 May 2024.

Abstract

Soil pollution by oil and its derivatives is a highly controversial environmental problem that also causes geological and geotechnical harm. The effect of oil pollutant type on geotechnical characteristics, especially soil compressibility, is an interesting topic neglected in previous studies, which needs further investigation. The research results on this topic can be used in the compressibility analysis of structures built on soils likely to be contaminated with oil pollutants. Using a one-dimensional consolidation test, this study evaluated the compressibility properties of clayey sand contaminated with 3, 6, and 9% (dry weight of the soil) of four oil pollutants: used motor oil, crude oil, diesel, and kerosene. Scanning electron microscopy (SEM) was also employed to assess the microstructural interaction between the soil and the four oil pollutants. In addition to the low dielectric constant of oil pollutants, their high viscosity played a crucial role in altering the compressibility properties of clayey sand. The SEM micrographs confirmed that oil pollutants change the soil structure into a flocculated but dispersed one. The higher the viscosity of the oil pollutant, the larger the formed clots. Besides increasing the pore space between particles and facilitating water movement by covering the soil particles, oil pollutants reduced the soil's specific surface area (SSA) and water absorption by the soil particles. This caused the water to drain faster, ultimately increasing the compaction coefficient (C_C), consolidation settlement, consolidation coefficient (C_V), and permeability coefficient (k). The higher the viscosity of the oil contaminant, the higher the surface energy at the oil-water interface, which decreases water drainage. The highest compressibility belonged to the samples contaminated with kerosene, followed by those infected with diesel, crude oil, and used motor oil. Thus, special attention should be paid to settling clayey sand contaminated with kerosene in geotechnical plans.

Key Words: Oil-polluted soil, compressibility properties, viscosity, clayey sand.

Key Words: Hybrid optimization vehicle routing-scheduling, vehicle routing problem, time window, cat swarm optimization, genetic algorithm.

LAP SHEAR-PRESTRESSED BOND TEST TO EVALUATE PRESTRESSED FRP CONCRETE JOINT

E. Shabani
erfan.shabani@cv.iut.ac.ir
D. Mostofinejad
dmostofi@iut.ac.ir
A. Saljoughian(corresponding author)
a.saljoughian@iut.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Isfahan University of Technology
DOI: 10.24200/j30.2024.63429.3273

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 96-107, Research Note
© Sharif University of Technology

- Received 4 November 2023; received in revised form 10 February 2025; accepted 25 February 2025.

Abstract

The use of FRP composites as an effective method for strengthening reinforced concrete structures has been a subject of research due to its numerous benefits. A common failure mode in the application of these composites is the debonding of the FRP sheet from the concrete surface, which can sometimes reduce the capacity of these composites to as low as 10% of their total capacity. As a result, researchers have begun to prestress the FRP sheets and strengthen them with prestressed FRP to optimize the efficiency of these materials. A crucial aspect in the strengthening of a reinforced concrete member with an FRP sheet is the examination of the connection behavior between the FRP sheet and concrete. The significance of this issue has led to dedicated research and experimentation in this field. In this study, a prestress-lab shear test was employed for the first time to investigate the bond behavior of prestressed FRP composites-to-concrete joints. Additionally, the particle image velocimetry (PIV) method was used for result analysis. To verify the effectiveness of this method, eight tests were conducted on prism specimens measuring$150 \times 150 \times 350$ mm. The strengthening methods of the specimens involved the use of external bonded reinforcement (EBR) and external bonded reinforcement on grooves (EBROG) methods. Furthermore, the specimens were prestressed at different levels, including 0%, 20%, and 30% of the ultimate strain of FRP composites. This study examined the specimens in terms of bond strength capacity, failure mode, and stress and strain distribution on the joint surface. The results showed that prestressing increased the bond strength by 70% in the EBR method. Moreover, the bond strength of the EBROG specimen with 20% prestressing increased by 123% compared to the control specimen. These findings indicate that prestressing using the EBROG method is a viable technique for enhancing the performance of FRP-to-concrete joints.

Key Words: Lap shear test-prestressed bond, prestressed FRP composites, bond behavior, externally bonded reinforcement, externally bonded reinforcement on grooves.

SOIL IMPROVEMENT OF CLAYEY SAND USING NANOPARTICLE

S. Rahmati Sardasht
saeed_rahmati@civileng.iust.ac.ir
A.A. Heshmati R.(corresponding author)
heshmati@iust.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
Iran University of Science and Technology
DOI: 10.24200/J30.2024.63620.3279

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 108-115, Research Note
© Sharif University of Technology

- Received 30 December 2023; received in revised form 28 February 2024; accepted 11 March 2024.

Abstract

The field of nanotechnology encompasses all technologies that operate on a nanoscale, typically ranging from 1 to 100 nanometers. Nano-particles are the most commonly used materials in this technology. Given the provided definition of nanotechnology, there is a growing interest in exploring its applications in the field of geotechnical engineering. Recently, numerous researchers have directed their efforts toward discovering these applications. This intense interest stems from the unique properties of these particles and their potential to enhance the mechanical and structural characteristics of soil. This article explores the impact of different percentages of calcium oxide and aluminum oxide nanoparticles on the compressive strength of clayey sandy soil with a constant clay content. To achieve this, clayey sandy soil comprising 80% sand and 20% clay, after being treated with varying percentages (0.05%, 0.1%, and 0.2% by dry soil weight) of nanoparticles, including aluminum oxide

Abstract

This paper presents a formulation of the attenuated orthotropic time-domain half-space boundary element method for analyzing the orthotropic effect of underground inclusions subjected to transient SH-waves. The stress-free boundary condition at the ground surface is satisfied using wave source image theory. To account for material damping, the Barkan approach is employed to attenuate the half-space by introducing a constant logarithmic reduction into the modified boundary integral equation. This method is easily implemented in a time-domain computer code for analyzing seismic homogeneous orthotropic mediums. To model underground inclusions, a sub-structuring approach is introduced to ensure continuity conditions at interfaces based on node position and normal direction. Several practical examples involving SH-waves are solved and compared with existing literature to validate surface response, particularly focusing on isotropic convergence. A favorable agreement is found between responses, confirming the capability of the proposed method for simple modeling of orthotropic subsurface features. Finally, in the form of an advanced numerical study, the surface motions of orthotropic models, including an underground inclusion embedded in a linear elastic half-space were successfully obtained under transient SH-wave propagation. Utilizing the time-domain boundary element approach, a simple model was developed only by discretizing the boundaries/interfaces. To illustrate responses in the time/frequency-domain, a comprehensive sensitivity analysis is performed considering parameters such as frequency, shape ratio, and isotropy factor, visualized through snapshots, seismograms, and amplification patterns. Results demonstrate that orthotropic anisotropy significantly influences seismic patterns of ground surfaces, highlighting the impact of mentioned parameter variations.

Key Words: Computational seismology, earthquake ground motions, seismic anisotropy, underground orthotropic inclusion, wave scattering and diffraction.

m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 85-95, Research Note

- Received 4 November 2023; received in revised form 11 March 2024; accepted 12 March 2024.

INNOVATIVE HYBRID ALGORITHM FOR SOLVING VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOW

B. Yadegari
behnazyadegari@gmail.com

(corresponding author)
amrahimi@znu.ac.ir

compared with the spectral values corresponding to the constant-velocity mode. On the other hand, in the decelerating condition, the out-of-plane displacement and bending moment spectra are respectively alleviated up to 41.59 and 42.05 percent.

Key Words: Horizontally curved beam (HCB), moving mass, out -of-plane dynamic response, accelerating/decelerating motion, response spectra.

INTELLIGENT ASSESSMENT OF DAMAGE AND PREDICTION OF SEISMIC DAMAGE SPECTRUM UNDER THE EFFECT OF NEAR-FAULT EARTHQUAKES IN IRAN

R. Fazli
Ramin.Fazli@shahroodut.ac.ir
M. Shamekhi Amiri(corresponding author)
Shamekhi@shahroodut.ac.ir
H. Pahlavan
Pahlavan@shahroodut.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
Shahrood University of Technology
Shahroud, Iran
DOI:10.24200/j30.2024.63776.3287

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 50-63, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 8 January 2024; received in revised form 3 April 2024; accepted 15 April 2024

Abstract

Predicting seismic damage spectra and capturing both structural and earthquake features are crucial for the design of new buildings and also for the resilience evaluation of existing ones. The research objective of this article is to accurately assess and predict the seismic damage spectrum caused by earthquakes in Iran using gene expression programming. Gene expression programming is a method for learning and optimization rooted in genetic principles and molecular biology. For this purpose, a single-degree-of-freedom nonlinear system is considered, along with a collection of earthquake records from Iran, for the exact computation of the damage spectrum. Subsequently, a mathematical model is developed by applying gene expression programming and genetic programming algorithms. The Park-Ang damage index is used to compute the seismic damage or damage spectra level. Both the structural characteristics and seismic properties are significant factors in predicting the seismic damage spectrum model. Finally, a simplified equation has been suggested for assessing the potential seismic damage spectrum of the structures exposed to ground motions in Iran, capturing both structural and earthquake features. This study demonstrates the significant impact of structural and seismic parameters on the seismic damage spectrum, highlighting that an increase in the resistance reduction factor correlates with a rise in damage spectrum across structures of varying vibration periods. The changes in the damage spectrum indicate that as the ductility coefficient increases, the spectral damage decreases. The impact of the damping ratio on SDOF systems in the damage spectrum demonstrates that an increase in the damping ratio leads to an increase in the damage spectrum. The effects of the post-yield stiffness ratio in SDOF systems for the damage spectrum showed that a higher stiffness ratio results in the structure exhibiting less damage. The relationship between the Park-Ang index constant and the damage spectrum is such that an increase in the Park-Ang index constant leads to a corresponding rise in the damage spectrum. The influence of soil type on the damage spectrum is comparatively less significant than the impacts of the other parameters discussed.

Key Words: Seismic damage spectra, park-ang damage index, gene expression programming (GEP), inelastic one-degree-of-freedom system (SDOF), near field earthquake.

THE ORTHOTROPY EFFECT OF UNDERGROUND INCLUSION ON THE SEISMIC RESPONSE OF GROUND SURFACE

S. Mojtabazadeh-Hasanlouei
mojtabazadeh@iauz.ac.ir
M. Panji(corresponding author)
m.panji@iauz.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Zanjan Branch, Islamic Azad University
Zanjan, Iran
M. Kamalian
kamalian@iiees.ac.ir
Geotechnical Engineering Research Center
International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
DOI:10.24200/J30.2024.63886.3294

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 64-84, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 31 January 2024; received in revised form 29 March 2024; accepted 7 May 2024.

DOI: 10.24200/j30.2024.63708.3283

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 27-36, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 25 December 2023; received in revised form 1 April 2024; accepted 13 April 2024.

Abstract

Today, groundwater plays an undeniable role in supplying water for the communities. In recent years, the extensive use of chemical fertilizers and improper wastewater treatment from industrial sites has led to several environmental problems, such as an increase in the concentration of nitrate and sulfate in underground and surface water. Nitrate and sulfate in water sources cannot be easily separated due to their high solubility, so their separation methods are costly. Although permeable reactive barriers (PRB_s) are one of the new methods used for on-site treatment of water sources, the early saturation of the substrate used is one of its disadvantages. One of the methods used to solve this problem is the electrokinetic (EK) process. The purpose of this research, which was conducted on a laboratory scale, was to combine the electrokinetic process and permeable reactive barriers containing modified activated carbon to simultaneously remove nitrate and sulfate from contaminated water. This research used a glass reactor with dimensions of 15*30*100 cm, and the space inside was divided into several sections using a nylon filter. Also, a layer of sand was placed on the reactive substrate, and two graphite electrodes were placed on top of the soil layer and under the reactive substrate to create an electric current and ensure migration conditions. The effect of pH, nitrate, and sulfate initial concentration, activated carbon to sand ratio, and the electrical gradient on the performance of the process was investigated, and the optimal conditions for improving the system efficiency were determined using the OFAT classical method. Based on the results of experiments, using an electrical gradient of 1.5 V/cm in optimal conditions (initial nitrate concentration 200 mg/L, initial sulfate concentration 450 mg/L, inlet flow rate 3.3 ml/min, pH=7 and the ratio of active carbon to sand 1:2) the adsorption capacity increased by 83% for nitrate and 86% for sulfate. In addition, under these conditions and by controlling the concentration of nitrate and sulfate within standard permissible limits, the period of operation of the system for nitrate increased from 40 hours to 100 hours and for sulfate from 45 hours to 110 hours. According to the results, the PRB-EK integrated process is a reliable method for the simultaneous removal of sulfate and nitrate from groundwater.

Key Words: Permeable reactive barrier, electrokinetic, activated carbon, nitrate, sulfate, water resources.

INVESTIGATING THE EFFECT OF ACCELERATING/DECELERATING MOTION OF A MOVING MASS ON THE OUT-OF-PLANE DYNAMICS OF HORIZONTALLY CURVED BEAMS

M.A. Foyouzat
m.foyouzat@sharif.edu
H. Abdoos
hatef.abdoos2015@sharif.edu
A.R. Khaloo(corresponding author)
khaloo@sharif.edu
Faculty of Civil Engineering
Sharif University of Technology
DOI: 10.24200/j30.2024.63894.3293

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 37-49, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 8 January 2024; received in revised form 23 February 2024; accepted 10 March 2024.

Abstract

Horizontally curved beams (HCBs) are not only capable of meeting some architectural and aesthetic requirements but can also offer structural advantages in many engineering applications. Due to inherent complexities existing in the treatment of the problems dealing with dynamic actions on HCBs, the dynamic behavior of such salient elements is not essentially well understood. Therefore, to address the identified gap concerning the motion-type effects of a moving mass on the dynamics of HCBs, the current study deals with assessing how the accelerating/decelerating conditions do contribute to the out-of-plane response of HCBs under the excitation of a moving mass. In this regard, the governing dynamic equations are developed by taking care of the centripetal force, Coriolis acceleration, and inertial actions of the moving mass. Employing the method of separation of variables and exercising sinusoidal modal functions, the discretized system of differential equations in the matrix form are distilled and solved through the application of standard numerical procedures. Spectral responses in terms of the out-of-plane displacement and bending moment are then obtained for various influential parameters. The veracity of the results is also validated against the available data addressed in the technical literature. Through a comprehensive parametric study, the effect of the key parameters, including the central subtended angle and length of the HCB, as well as the mass, initial velocity, and increasing/decreasing acceleration of the moving mass, is evaluated on the out-of-plane displacement and bending moment of the supporting HCB. The results of this study suggest that in the accelerating mode, the out-of-plane displacement and bending moment spectra are magnified up to 18.11 and 27.53 percent

charge coefficient compared to the Polynomial, Linear, and Sigmoid kernels. The results of the correlation coefficient (R), Root Mean Square Error (RMSE), mean percentage Relative Error (MRE%), and Kling Gupta Efficiency (KGE) in the test stage for the SVM model were 0.96, 0.018, 0.90, and 1.92%, respectively. The neighbor coefficient (K) results showed that in the K equal 2, the RMSE and MRE had a lower value and were close to the experimental results. In addition, in the KNN model, among distance criteria measures (Manhattan, Euclidean, Euclidean Squared, and Chebychev), the Manhattan criteria have a higher accuracy in predicting the discharge coefficient than the others. In the testing phase, this model's results were 0.97, 0.016, 0.96, and 1.70%. In addition, the results for the GEP model were 0.98, 0.019, 0.85, and 2.28%, respectively. In the present research, the ANN method is more accurate compared to SVM, GEP, and KNN models, so, for the ANN model, the KGE was in the very good range.

Key Words: Discharge measurement, discharge coefficient, control structure, intelligent models, statistical indicators.

DERIVATION AND PARAMETRIC EVALUATION OF FREQUENCY RESPONSE FUNCTIONS OF ELASTIC AND INELASTIC STRUCTURES UNDER PULSE-TYPE GROUND EXCITATIONS

S. Bagheri(corresponding author)
s_bagheri@tabrizu.ac.ir
H. Hayati Raad
hossein.raad.hayati@tabrizu.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
University of Tabriz
DOI:10.24200/J30.2024.63654.3280

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 13-26, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 December 2023; received in revised form 7 March 2024; accepted 13 March 2024.

Abstract

In this paper, the elastic and inelastic responses of yielding single-degree-of-freedom (SDOF) systems with bilinear hysteretic behavior subjected to pulse-type near-fault ground motions are investigated. The evaluated responses are the relative displacement and total acceleration of the structure in the form of frequency response functions. The analytical pulse model proposed by Mavroeidis and Papageorgiou, whose input parameters have precise physical meanings, is used to represents near-fault ground motions. A parametric study with six dimensionless variables is performed to evaluate the frequency response functions of SDOF structures. Out of these six variables, two variables are related to the input pulse excitation, another two variables are related to the properties of the structure, and the last two involve the ratio between the excitation and the structure; they are the number of pulses, the pulse phase angle (shape), the damping ratio of the structure, the post-yield stiffness ratio of the structure, the excitation-(pulse-) to-structure frequency ratio, and the ratio of the excitation (pulse) amplitude to the yield strength of the structure. The results reveal a notable similarity in the frequency response functions of total acceleration and relative displacement for linear elastic SDOF structures. However, the characteristics of these two responses are completely different when yielding occurs in bilinear SDOF structures. Furthermore, the effect of various parameters of the structure and the input pulse on the structural responses differs depending on the linear or nonlinear behavior of the system. For example, in a linear elastic structure, the maximum frequency responses of displacement and total acceleration always increase with increasing the number of pulses; however, in an elastic-perfectly plastic structure or in a bilinear structure with a small post-yield stiffness ratio, the maximum frequency response of total acceleration remains almost constant regardless of the number of input pulses when yielding occurs. For the displacement response, the number of pulses that cause the maximum frequency response differs at different levels of nonlinear behavior.

Key Words: Pulse-type excitations, near-fault ground motions, frequency response function, displacement, acceleration.

GROUNDWATER TREATMENT BY COMBINING THE ELECTROKINETIC PROCESS WITH PERMEABLE REACTIVE BARRIERS CONTAINING GRANULAR ACTIVATED CARBON

M. Rokneddini
maryam.rokneddini@modares.ac.ir
N. Mokhtarani (corresponding author)
mokhtarani@modares.ac.ir
Faculty of Civil and Environmental Engineering
Tarbiat Modares University

Abstracts of Papers in English

APPLICATION OF INTELLIGENCE MODELS BASED ON SOFT COMPUTING IN INVESTIGATING THE DISCHARGE COEFFICIENT OF THE SLUICE GATE UNDER FREE-FLOW CONDITION AND SYMMETRICAL SILL WITH THE HELP OF KNN, ANN, GEP AND SVM MODELS

H. Abbaszadeh
ha.abbaszadeh@tabrizu.ac.ir
Y. Hassanzadeh(corresponding author)
yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Faculty of Civil Engineering
University of Tabriz
Tabriz, Iran
R. Daneshfaraz
daneshfaraz@maragheh.ac.ir
R. Norouzi
norouzi@maragheh.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Faculty of Engineering
University of Maragheh
Maragheh, Iran
DOI:10.24200/J30.2023.62661.3237

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 40, Issue 4, Page 3-12, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 16 July 2023; received in revised form 3 November 2023; accepted 14 November 2023.

Abstract

The use of sills with the gates leads to a reduction in the height of the gate. The sills affect the flow and change quantities, especially the discharge coefficient. In the present research, the discharge coefficient of the sluice gate is examined for the first presented theoretical relationship in a non-suppressed sill state to measure its performance using soft computing methods. For the models, 70% of the data were used for the training and the rest for the testing phases. The results of statistical indicators showed that in all SVM, KNN, GEP, and ANN models, the model with all input parameters was recognized as the superior model. In the SVM model, the results of various kernels showed that the Radial Basis Function kernel has better results in predicting the dis-

Civil Engineering

Sharif

4

Winter
2025

Editor-in-Chief: Mirmosadegh Jamali

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 theoretical7 analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, "Sharif" publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN
Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983
Web: http://journal.sharif.ir/ http:// www. globalsciencejournals.com
E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

3 **APPLICATION OF INTELLIGENCE MODELS BASED ON SOFT COMPUTING IN INVESTIGATING THE DISCHARGE COEFFICIENT OF THE SLUICE GATE UNDER FREE-FLOW CONDITION AND SYMMETRICAL SILL WITH THE HELP OF KNN, ANN, GEP AND SVM MODELS**
H. Abbaszadeh, Y. Hassanzadeh, R. Daneshfaraz and R. Norouzi

13 **DERIVATION AND PARAMETRIC EVALUATION OF FREQUENCY RESPONSE FUNCTIONS OF ELASTIC AND INELASTIC STRUCTURES UNDER PULSE-TYPE GROUND EXCITATIONS**
S. Bagheri, H and Hayati Raad

27 **GROUNDWATER TREATMENT BY COMBINING THE ELECTROKINETIC PROCESS WITH PERMEABLE REACTIVE BARRIERS CONTAINING GRANULAR ACTIVATED CARBON**
M. Rokneddini and N. Mokhtarani

37 **INVESTIGATING THE EFFECT OF ACCELERATING/DECELERATING MOTION OF A MOVING MASS ON THE OUT-OF-PLANE DYNAMICS OF HORIZONTALLY CURVED BEAMS**
M.A. Foyouzat, H. Abdoos and A.R. Khaloo

50 **INTELLIGENT ASSESSMENT OF DAMAGE AND PREDICTION OF SEISMIC DAMAGE SPECTRUM UNDER THE EFFECT OF NEAR-FAULT EARTHQUAKES IN IRAN**
R. Fazli, M. Shamekhi Amiri and H. Pahlavan

64 **THE ORTHOTROPY EFFECT OF UNDERGROUND INCLUSION ON THE SEISMIC RESPONSE OF GROUND SURFACE**
S. Mojtabazadeh-Hasanlouei, M. Panji and M. Kamalian

RESEARCH NOTES:

85 **INNOVATIVE HYBRID ALGORITHM FOR SOLVING VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOW**
B. Yadegari, A.M. Rahimi and M. Aboutalebi Esfahani

96 **LAP SHEAR-PRESTRESSED BOND TEST TO EVALUATE PRESTRESSED FRP CONCRETE JOINT**
E. Shabani, D. Mostofinejad and A. Saljoughian

108 **SOIL IMPROVEMENT OF CLAYEY SAND USING NANOPARTICLE**
S. Rahmati Sardasht and A.A. Heshmati R.

116 **THE EFFECT OF VARIOUS OIL POLLUTANTS ON THE COMPRESSIBILITY PROPERTIES OF CLAYEY SAND**
M. Arabani and H. Haghsheno

APPENDIX

139 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**