Civil Engineering
Sharif
Volume 41
Number 1
Quarterly
Spring
2025
1
ISSN 2676-4768

ARTICLES:

- Axial and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Composites Through the Corner Strip-Wrap Technique
  Alireza Saljoughian and Davood Mostofinejad
- Experimental Study of a New Metallic Damper Using Hourglass Fuse
  Mohammad Hosein Afridoon, Reza Aghayari, Mohammad. H Adibrad and Mehrzad Tahamouliroudsari
- Enhancing the Durability and Elastic Modulus of Oil-Contaminated Soils in Wet-Dry Cycles Through Stabilization with Traditional Materials
  Hadis Nasiri, Navid Khayat and Ahad Nazarpour
- Investigating the Ratio of $Pm_{2.5}$ to Pm_{10} Particle Concentration in Tehran City and Compiling an Index for the Occurrence of Dust
  Zohreh Zeynadini Mansorabadi and Yousef Rashidi
- Prioritizing the Construction of Bicycle Lanes in the Central Area of Tehran Based on Sustainable Transportation Principles
  Khashayar Mahmoudian and Amirhassan Kermanshah

RESEARCH NOTES:

- Evaluation of the Efficiency of Metaheuristic Algorithms in the Optimal Design of Pile Wall Retaining Systems
  Farshad Taiyari
- Investigating the Arrangement of Rebars on the Ductility of Concrete Shear Wall with FEM Simulation
  Ebrahim Koochaki and Arash Sayari
- Experimental Study of Seismic Behavior and Modification of the Failure Region of Mechanical Bar Splices
  Mohamad Reza Shokrzadeh and Fariborz Nateghi-Alahi
- Laboratory Investigation of the Behavior of Helical Piles under Monotonic Loading at Different Loading Speeds
  Seyed Sajad Hosseini, Mohsen Keramati and Reza Hoseinpour
- Economic, Environmental, and Social Assessment of Concrete Pavement Life Cycle: A Literature Review
  Mohammad Saleh Entezari, Rashid Tanzadeh and Fereidoon Moghaddas Nejad

Civil Engineering SHARIF
I
1

مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۴۱
شماره‌ی ۱
فصلنامه
بهار
۱۴۰۴
۱

پژوهشی:

- رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ
  علیرضا سلجوقیان و داود مستوفی‌نژاد
- بررسی آزمایشگاهی یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید با استفاده از فیوزهای ساعت شنی
  محمدحسین آفریدون، رضا آقایاری، محمدحسین ادیب راد و مهرزاد تحملی رودسری
- بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی
  حدیث نصیری، نوید خیاط و احد نظرپور
- بررسی نسبت غلظت ذرات $PM_{2.5}$ به PM_{10} در شهر تهران و تدوین شاخصی برای رخداد گردوغبار
  زهره زین‌الدینی منصورآبادی و یوسف رشیدی
- اولویت‌بندی مسیر احداث خط دوچرخه در مرکز شهر تهران براساس مبانی پایداری در حمل‌ونقل
  خشایار محمودیان و امیرحسن کرمانشاه

یادداشت فنی:

- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ترانشه‌های عمیق
  فرشاد طیاری
- بررسی چیدمان میلگرد در شکل‌پذیری دیوار برشی بتنی با شبیه‌سازی اجزاء محدود
  ابراهیم کوچکی و آرش سیاری
- مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها
  محمدرضا شکرزاده و فریبرز ناطقی الهی
- بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری
  سیدسجاد حسینی، محسن کرامتی و رضا حسین‌پور
- ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی: مرور ادبیات
  محمدصالح انتظاری، رشید تن‌زاده و فریدون مقدس‌نژاد

به نام خدا

مهندسی عمران

شریف

دوره‌ی ۴۱

شماره‌ی ۱

بهار

۱۴۰۴

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سردبیر: دکتر میرمصدق جمالی

سردبیر هیات تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار

صفحه‌آرایی و امور گرافیکی: غزل احمدی میرقائد و راضیه قربانی

امور اجرایی: شیما آل اسداله و مریم پورابراهیمی باوفا

مجله‌ی مهندسی عمران شریف در پایگاه های DOAJ، ISC و SID نمایه می شود.

نشانی: تهران/ صندوق پستی ۸۶۳۹–۱۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳–۶۶۰۰۵۴۱۹

نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی‌سایت: 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 محمدجواد کتابداری
دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

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 مصطفی آدرسی
دانشکده‌ی مهندسی عمران – دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

دکتر محمدحسین ادیب‌راد
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه رازی کرمانشاه

دکتر فردین اژدری
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحدشیراز

دکتر امیر اسدی‌وایقان
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه ارومیه

دکتر بیت اله بدرلو
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی قم

دکتر عباس پوردیلمی چوگانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه دامغان

دکتر میرمصدق جمالی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وحید خلیفه
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

دکتر حسین رحامی
دانشکده‌ی علوم مهندسی - دانشگاه تهران

دکتر فریدون رضایی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی سینا همدان

دکتر رضا رضوانی توچاهی
دانشکده‌ی فنی و مهندسی - دانشگاه گیلان

دکتر امیرعباس رصافی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دکتر نوید سیاه‌پلو
دانشکده‌ی مهندسی عمران - موسسه آموزشی جهاد دانشگاهی خوزستان

دکتر محمدحسین طالب پور
دانشکده‌ی فنی و مهندسی - دانشگاه دامغان

دکتر محمود عدالتی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه ایلام

دکتر سینا فراهانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران و معماری - دانشگاه شهید چمران اهواز

دکتر هوشنگ کاتبی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر مجتبی لزگی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه حکیم سبزواری

دکتر موسی محمودی صاحبی
دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

دکتر محمود ملکوتی علون‌آبادی
دانشکده‌ی مهندسی عمران – دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

دکتر بیژن یگانه
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۳ **رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ**
علیرضا سلجوقیان و داود مستوفی‌نژاد

۱۵ **بررسی آزمایشگاهی یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید با استفاده از فیوزهای ساعت شنی**
محمدحسین آفریدون، رضا آقایاری، محمدحسین ادیب راد و مهرزاد تحملی رودسری

۲۵ **بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی**
حدیث نصیری، نوید خیاط و احد نظرپور

۳۹ **بررسی نسبت غلظت ذرات $PM_{2/5}$ به PM_{10} در شهر تهران و تدوین شاخصی برای رخداد گردوغبار**
زهره زین‌الدینی منصورآبادی و یوسف رشیدی

۴۸ **اولویت‌بندی مسیر احداث خط دوچرخه در مرکز شهر تهران براساس مبانی پایداری در حمل‌ونقل**
خشایار محمودیان و امیرحسن کرمانشاه

یادداشت فنی:

۵۹ **ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ترانشه‌های عمیق**
فرشاد طیاری

۷۲ **بررسی چیدمان میلگرد در شکل‌پذیری دیوار برشی بتنی با شبیه‌سازی اجزاء محدود**
ابراهیم کوچکی و آرش سیاری

۸۴ **مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها**
محمدرضا شکرزاده و فریبرز ناطقی الهی

۹۸ **بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری**
سیدسجاد حسینی، محسن کرامتی و رضا حسین‌پور

۱۱۰ **ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی: مرور ادبیات**
محمدصالح انتظاری، رشید تن‌زاده و فریدون مقدس‌نژاد

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.3-14

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Axial and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Composites Through the Corner Strip-Wrap Technique

Alireza Saljoughian* and Davood Mostofinejad

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
* corresponding author: (a.saljoughian@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:19 November 2023

Revised:18 April 2024

Accepted:19 May 2024

Keywords:

Reinforced concrete column,
Strengthening,
FRP composites,
eccentric loading,
corner strip-wrap technique.

Abstract

Column strengthening is critically important as one of the fundamental elements in structures. The objective of this study is to investigate the behavior of reinforced concrete (RC) columns strengthened with fiber-reinforced polymer (FRP) composites using the novel corner strip-wrap technique when subjected to axial loading with varying levels of eccentricity. In order to compare the proposed method with the wrapping technique, ten square reinforced concrete (RC) columns, each with cross-sectional dimensions of 133×133 mm and a height of 500 mm, were subjected to zero, 30, 60, and 90 mm load eccentricities. Among these specimens, two columns were confined using the wrapping method, and four columns were confined using the corner strip-wrap technique, while the remaining columns were designated as control specimens. In other words, the test parameters consisted of the technique used for column confinement and the applied load eccentricity. The experimental results revealed that, in comparison to both unconfined and wrapped RC columns, improved performance in terms of increased ductility and load carrying capacity under eccentric loading was demonstrated by square RC columns when confined through the corner strip-batten technique. Moreover, it is evident that eccentric loads, in contrast to concentric ones, significantly reduce the load-carrying capacity and ductility of confined RC columns. However, in this experiment, confined columns exhibited a higher load-carrying capacity and greater ductility in comparison to their unconfined counterparts, both in concentric and eccentric testing conditions. For instance, the load carrying capacities of columns confined using the corner strip-wrap technique increased by 15% and 13% when compared to those confined through the conventional wrapping technique when subjected to eccentricities of zero and 90 mm, respectively. Additionally, columns confined with the corner strip-wrap technique demonstrated ductility enhancements of 607% and 330% in comparison to the unconfined columns when subjected to zero and 60 mm eccentricities, respectively. Finally, axial loading-bending moment (P-M) interaction diagrams were created for both the unconfined and confined columns. A comparison of the experimental results with the values derived from the expressions recommended in various codes showed that the code-based estimates were conservative compared to the experimental measurements.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Saljoughian, A.R. and Mostofinejad, D. 2025. Axial and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Composites Through the Corner Strip-Wrap Technique, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.3-14. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63475.3275

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ

علیرضا سلجوقیان* و داود مستوفی‌نژاد

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

*نویسنده مسئول (a.saljoughian@iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۰۸/۱۸

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

واژگان کلیدی:

ستون بتن‌آرمه،

مقاوم‌سازی،

کامپوزیت‌های FRP،

بار محوری با خروج از مرکزیت،

روش نوار گوشه-دورپیچ.

چکیده

مقاوم‌سازی ستون‌ها به‌عنوان یکی از اعضاء اصلی سازه، اهمیت بسیاری دارد. هدف پژوهش حاضر، بررسی رفتار ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش جدید نوار گوشه- دورپیچ تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف است. برای این منظور، ۱۰ ستون تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند؛ که ۲ ستون با استفاده از دورپیچ و ۴ ستون با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ محصورشده و بقیه به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داده است که استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش در محیط مقطع شده و به‌دنبال آن، عملکرد تقویت در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون بهبود یافته است. به‌عنوان مثال، در نمونه‌ی تقویت‌شده با روش نوار گوشه- دورپیچ تحت بار محوری خالص، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری به ترتیب به میزان ۱۵ و ۷۷ درصد نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ افزایش یافته است.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی مهندسی زلزله و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه انجام شده است، که منجر به پیشرفت‌های زیادی شده است؛ به گونه‌ای که امروزه با اطمینان بیشتری می‌توان سازه‌های بتن‌آرمه‌ی مقاوم در برابر زلزله را طراحی کرد. با وجود این، در برخی از سازه‌های بتن‌آرمه، به دلایل مختلف ممکن است سازه معیارهای ایمنی را از دست بدهد و از لحاظ مهندسی غیرقابل استفاده تلقی شود. از جمله‌ی این موارد می‌توان به ضعف آیین‌نامه‌های قدیمی، فرسوده‌شدن ساختمان، افزایش بارهای بهره‌برداری، ضعف در اجرای بتن، تغییر در کاربری سازه، خطاهای محاسباتی، و تأثیر عوامل مخرب محیطی اشاره کرد.[۱ و ۲] لذا استفاده از راهکارهای عملی و مؤثر برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتن‌آرمه اجتناب‌ناپذیر است. در سازه‌های مذکور، ستون‌های بتن‌آرمه به‌عنوان اعضاء قائم سازه، که تحت اثر نیروهای محوری و برشی، و لنگر خمشی به صورت هم‌زمان قرار می‌گیرند، از جمله آسیب‌پذیرترین اعضا محسوب می‌شوند. استفاده از ژاکت‌های بتنی و فولادی از جمله رایج‌ترین روش‌ها جهت تقویت ستون‌های بتن‌آرمه محسوب می‌شود. از جمله معایب استفاده از ژاکت‌های بتنی: مشکلات اجرایی، افزایش بُعد ستون، و ناهماهنگی با معماری سازه است. در ستون‌های تقویت‌شده با ژاکت‌های فولادی نیز ضمن وجود مشکلات اجرایی در نصب ورق‌های فولادی، ورق‌های فولادی به مرور زمان دچار خوردگی می‌شوند و اتصال آن‌ها با بتن از بین می‌رود. در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP[1] جهت تقویت سازه‌های بتن‌آرمه به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها، به‌طور چشم‌گیری مورد توجه قرار گرفته و جایگزین روش‌های قبلی شده است.[۳ و ۴]

در یک ستون بتن‌آرمه، در صورتی که آرماتورهای عرضی به‌طورکافی فراهم نشده باشد، سه مود شکست شامل: گسیختگی‌های: برشی، خمشی مفصل خمیری، و وصله‌ی اتصال مشاهده می‌شود. جهت جلوگیری از وقوع شکست‌های اخیر، می‌توان از روش محصورشدگی استفاده کرد. محصورکردن ستون با کامپوزیت‌های FRP، عمدتاً به نحوی انجام می‌شود که الیاف موجود در ورق FRP، در جهت عمود بر محور طولی ستون و یا به‌عبارتی در جهت عرضی قرار گیرند. در این صورت، با اتساع جانبی ستون در اثر فشار وارده، الیاف موجود در FRP تحت تنش‌های کششی حلقوی قرار می‌گیرند و با اعمال فشار جانبی محصورکننده، باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون می‌شوند؛ لذا، از جداشدن آرماتورها در محل وصله جلوگیری می‌کند و مانع از کمانش آرماتورهای طولی می‌شود.[۵]

[1] Fiber Reinforced Polymer

استناد به این مقاله:

سلجوقیان ، علیرضا و مستوفی نژاد، داود، ۱۴۰۴. رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص. ۳-۱۴. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63475.3275

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

براساس مطالعات پیشین، در نمونه‌های محصورشده با استفاده از دورپیچ FRP، کرنش پارگی حلقوی FRP کمتر از کرنش نهایی به‌دست‌آمده از آزمایش کششی نمونه‌های کوپن FRP است؛ بنابراین، در لحظه‌ی شکست، تنش در FRP به تنش نهایی نمی‌رسد و از تمام ظرفیت کششی آن استفاده نمی‌شود.[۶] برخی پژوهشگران، دلایل مختلفی را برای توجیه کمتربودن کرنش پارگی نوارهای FRP نصب‌شده روی ستون نسبت به کرنش نمونه‌های کوپن ارائه کرده‌اند؛ که از جمله‌ی آن‌ها، وجود تنش‌های محصورکننده روی سطح داخلی FRP و همچنین تنش‌های محوری است که از بتن به FRP منتقل می‌شود. به‌عبارت دیگر، وضعیت تنش در FRP نصب‌شده روی ستون برخلاف نمونه‌های کوپن، کششی نیست و کامپوزیت در وضعیت تنش‌های چندمحوره گسیخته می‌شود. از طرف دیگر، ترک‌خوردگی و خردشدگی بتن در زیر پوشش کامپوزیتی سبب ایجاد تمرکز تنش موضعی در کامپوزیت FRP می‌شود. به‌علاوه، انحنای نوارهای FRP پیچیده‌شده به دور بتن نیز می‌تواند علت کاهش ظرفیت آن باشد.[۶ و ۷]

پارامترهای مختلفی، از جمله: شکل مقطع ستون، مقاومت اولیه‌ی ستون، مشخصات مکانیکی الیاف، و زاویه‌ی دورپیچی در محصورشدگی با استفاده کامپوزیت‌های FRP تأثیرگذارند.[۸] شکل مقطع ستون، شامل مقاطع دایروی و چهارگوش است و یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در عملکرد FRP در محصورسازی ستون‌های بتن‌آرمه است. در ستون‌های چهارگوش محصورشده تحت بار محوری، به‌دلیل هندسه‌ی غیریکنواخت، فشار محصورکننده به‌صورت غیریکنواخت روی محیط مقطع ستون اعمال و به دنبال آن تنش غیریکنواخت در کامپوزیت‌های FRP ایجاد می‌شود؛ در نتیجه، اثر محصورشدگی کمتری نسبت به ستون‌های دایره‌ای مشاهده می‌شود.[۹] علاوه‌بر این، تمرکز تنش در گوشه‌های تیز مقاطع چهارگوش باعث شکست زودرس FRP در کرنش بسیار کوچک‌تر از ظرفیت کششی آن خواهد شد.[۱۰]

کامپوزیت‌های FRP سختی کششی درون‌صفحه‌ای زیادی دارند؛ در مقابل، به دلیل اینکه بسیار نازک هستند، سختی خمشی خارج از صفحه‌ی کمی دارند. فشار جانبی در گوشه‌های مقاطع چهارگوش ناشی از سختی محوری کامپوزیت FRP، و در میانه‌ی اضلاع ناشی از سختی خمشی آن‌هاست. به همین دلیل توزیع فشار محصورکننده روی محیط مقاطع چهارگوش غیریکنواخت و در گوشه‌ها بیشتر است؛ در حالی که در مقاطع دایره‌ای توزیع فشار محصورکننده روی محیط مقطع کاملاً یکنواخت است.[۱۰] در سال‌های اخیر، پژوهشگران برای بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصورشدگی در ستون‌های چهارگوش، روش‌های متفاوتی ارائه کرده‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌های موجود، گردکردن گوشه‌های مقطع ستون است؛ که علاوه‌بر افزایش سطح مقطع محصورشده، روشی مؤثر در کاهش اثر بُرندگی گوشه‌ها در کامپوزیت‌های FRP است.[۱۱ و ۱۲] روش دیگر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP با شیوه‌ی نوار گوشه- بست است؛ که. در آن، با ایده‌گرفتن از روش محصورسازی با استفاده از ژاکت‌های فولادی و همچنین به‌منظور جلوگیری از ایجاد انحنا در کامپوزیت‌های FRP از بست‌های افقی FRP جهت محصورسازی ستون استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر، بست‌های کاملاً تخت و بدون انحنا در هر یک از وجوه ستون بتنی به‌کار می‌رود و با اتصال به نوارهای گوشه در دو انتها، بتن را محصور می‌کنند. نتایج نشان داده‌اند که روش مذکور می‌تواند سبب افزایش کرنش مؤثر در کامپوزیت FRP در لحظه‌ی گسیختگی ستون شود.[۹ و ۱۳] راه‌حل دیگر، استفاده از روش جدید نوار گوشه- دورپیچ است؛ که در آن، ضخامت FRP در محل تمرکز تنش در کامپوزیت‌های FRP افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، با توجه به تمرکز تنش محصورشدگی در گوشه‌های مقطع چهارگوش، استفاده از FRP اضافه در ناحیه‌ی مذکور (نوار گوشه)، باعث کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصورشدگی ستون می‌شود.[۷ و ۱۴]

برخی از پژوهشگران، اثر محصورشدن غیرپیوسته‌ی ستون با استفاده از کامپوزیت‌های FRP را بررسی کرده و دریافته‌اند که محصورسازی غیرپیوسته‌ی ستون، روش مناسبی برای نصب آسان‌تر و دقیق‌تر دورپیچ‌های FRP روی سطح بتن است. علاوه‌بر این، براساس نتایج استفاده از نوارهایی با عرض کمتر در فواصل نزدیک‌تر، عملکرد کامپوزیت FRP در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون را بهبود می‌بخشد.[۱۵ و ۱۶] یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در محصورشدگی ستون‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، خروج از مرکز بار اعمال‌شده است. پژوهش‌های محدود انجام‌شده بر روی ستون‌های محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، نشان داده‌اند که بهبود عملکرد ستون در مقاومت و شکل‌پذیری با افزایش خروج از مرکزیت بار کاهش می‌یابد.[۱۷-۱۹]

با توجه به مطالب ذکرشده، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام‌شده در این زمینه، بر روی ستون‌های تحت بار محوری خالص (بدون خروج از مرکزیت) بوده‌اند.[۲۰-۲۵] این در حالی است که عملاً، اغلب ستون‌ها عملکرد تیر- ستونی دارند و علاوه‌بر بار محوری، تحت لنگر خمشی (ناشی از خروج از مرکزیت تصادفی بار یا لنگر خمشی انتهایی اعمال‌شده به ستون) نیز قرار دارند. از طرف دیگر، مطالعات انجام‌شده در رابطه با ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با استفاده از دورپیچ‌های FRP تحت بار محوری و لنگر خمشی محدود بوده و در بعضی از آن‌ها، اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی در ستون‌های بتن‌آرمه‌ی محصورشده بررسی شده است. علاوه‌بر این، در هیچ پژوهشی تأثیر تقویت ستون با استفاده از روش جدید نوار گوشه- دورپیچ تحت اثر بار محوری و لنگر خمشی بررسی نشده است. از طرف دیگر، با توجه به توزیع غیریکنواخت تنش محصورکننده در کامپوزیت‌های FRP در ستون‌های چهارگوش و گسیختگی موضعی آن‌ها، لازم است از روش‌هایی برای تقویت ستون‌های چهارگوش استفاده شود، که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش محصورکننده روی محیط مقطع شود و بازدهی کامپوزیت FRP را افزایش دهد. بنابراین، مطالعه‌ی حاضر برای اولین بار، به‌منظور ارزیابی تأثیر محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی مربعی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با روش جدید نوار گوشه- دورپیچ تحت اثر اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی انجام شده است. برای این منظور، ۱۰ ستون بتن‌آرمه، تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف قرار گرفته و نتایج مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با روش جدید نوار گوشه- دورپیچ با نمونه‌های شاهد و نمونه‌های تقویت‌شده با دورپیچ مقایسه شده‌اند. در پایان نیز نمودار اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصورشده و محصورنشده ترسیم و نتایج تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از آیین‌نامه‌ها مقایسه شده‌اند.

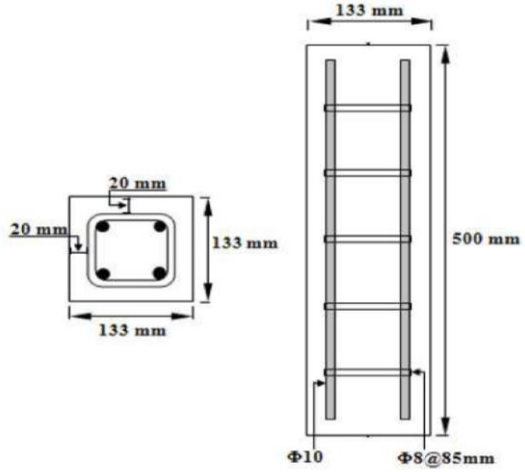
۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، ۱۰ ستون بتن‌آرمه‌ی مربعی به ابعاد مقطع ۱۳۳×۱۳۳ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر بررسی شده‌اند؛ که در آن‌ها از ۴ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان میلگرد طولی استفاده شده است. به این ترتیب، نسبت میلگرد طولی به‌کاررفته تقریباً برابر ۱/۸٪ سطح مقطع ناخالص نمونه

جدول ۱. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین مصرفی.[۲۷]

Ultimate tensile strain(%)	Modulis of Elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)	Thickness (mm)	Name	Materials
1.5	230	3900	0.17	SikaWrap-300C	Fibers
1.5	4.5	30	-	Sikadur-330	Resin



شکل ۱. جزئیات میلگردگذاری نمونه‌های ستون بتن‌آرمه.

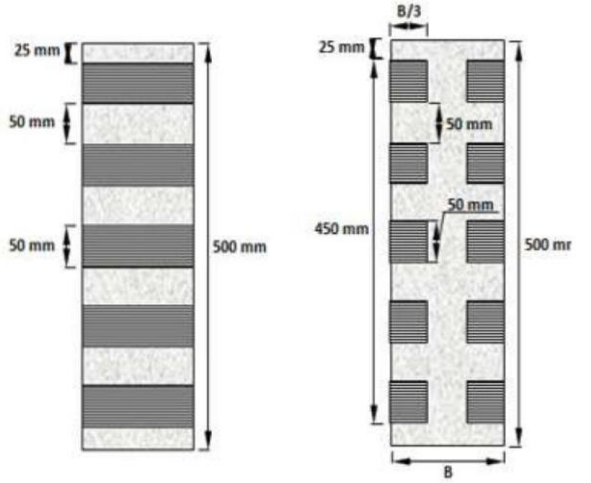
خواهد بود. علاوه‌بر این، از ۶ خاموت به قطر ۸ میلی‌متر در فواصل ۸۵ میلی‌متر به‌عنوان میلگرد عرضی استفاده شده است. فاصله‌ی خاموت‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که تأثیر محصورشدگی آن‌ها به میزان کمینه‌ی ممکن برسد. پوشش بتن در تمام قسمت‌ها برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و ابعاد میلگردهای طولی و خاموت‌ها با توجه به پوشش بتن قابل محاسبه است. جزئیات مربوط به میلگردگذاری نمونه‌های ستون بتن‌آرمه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۲.۲. مشخصات مصالح

در پژوهش حاضر، طرح اختلاط بتن برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ۳۰ مگاپاسکال، مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI ۲۱۱[۲۶] تعیین شده است. بیشینه‌ی بُعد دانه‌ی مصرفی با توجه به ابعاد قالب و فاصله‌ی میلگردها برابر با ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. با توجه به مقاومت فشاری موردنظر و نیز به‌منظور تأمین کارایی کافی با هدف رسیدن به اسلامپ ۷۵ میلی‌متر، نسبت‌های وزنی سیمان، شن، ماسه، و آب در ۱ مترمکعب بتن به ترتیب برابر با ۱، ۱/۷۴، ۲/۱۱، و ۰/۵۴ بوده است. همچنین، تنش تسلیم میلگردهای با قطرهای ۸ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۵۵۰ و ۴۰۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. علاوه‌بر این، از الیاف کربن یک‌طرفه با ضخامت خالص ۰/۱۷ میلی‌متر (SikaWrap-۳۰۰C) و نیز رزین اپوکسی Sikadur-۳۳۰ استفاده شده است. این تذکر لازم است که به‌منظور ساخت و نصب کامپوزیت‌های FRP از روش wet layup استفاده شده است. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین استفاده‌شده در پژوهش حاضر، براساس کاتالوگ تولیدکننده، در جدول ۱ ارائه شده است.[۲۷]

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت تقویت نمونه‌ها، ابتدا باید محل‌های موردنظر برای چسباندن الیاف FRP توسط خط‌کشی مشخص شود. در پژوهش حاضر، با توجه به نتایج آزمایش‌های



شکل ۲. نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون.

اولیه و مطالعات پیشین سلجوقیان و مستوفی‌نژاد (۲۰۱۶ و ۲۰۲۰)،[۷ و ۱۸] نمونه‌های ستون بتن‌آرمه به‌صورت غیرپیوسته و متقارن نسبت به مرکز ستون و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصورسازی شده‌اند. در ادامه، سطح بتن در محل‌های مشخص‌شده به لایه‌ی نازکی از چسب آغشته شده و الیاف روی آن قرار گرفته‌اند. در مرحله‌ی بعد، روی سطح الیاف نیز با لایه‌ای از چسب آغشته و آنقدر با کاردک روی سطح آن کشیده شده است، تا از اشباع کامل الیاف با چسب اطمینان حاصل شود.

در پژوهش حاضر، ۴ نمونه‌ی محصورنشده به‌عنوان نمونه‌های شاهد، ۲ نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ غیرپیوسته (W)[۱]، و ۴ نمونه‌ی محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ غیرپیوسته (CSW)[۲] تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در روش W، هر نمونه با استفاده از ۵ دورپیچ FRP به طول ۶۰۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر، و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصور شده‌اند. در روش CSW، هر نمونه با ۲۰ نوار گوشه به ابعاد ۹۰×۵۰ میلی‌متر در گوشه‌ها و همچنین ۵ دورپیچ به ابعاد ۶۰۰×۵۰ میلی‌متر به‌صورت غیرپیوسته و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصور شده است. به‌عبارت دیگر، هر دورپیچ روی چهار نوار گوشه نصب شده است. این تذکر لازم است که با توجه به برخی مطالعات پیشین،[۷ و ۱۴] طول بهینه برای نوار گوشه در روش نوار گوشه- دورپیچ برابر با یک سوم بُعد مقطع است. بنابراین اندازه‌ی نوارهای گوشه‌ی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر به صورتی در نظر گرفته شده است که طول آن روی هر ضلع برابر با یک سوم بُعد مقطع باشد. علاوه‌بر این، به‌منظور جلوگیری از شکست زودرس ناشی از تمرکز تنش، نمونه‌ها با استفاده از یک لایه‌ی دورپیچ اضافی به ابعاد ۶۰۰×۵۰ میلی‌متر در دو انتها محصور شده‌اند. نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

[1] Wrap

[2] Corner Strip-Wrap

جدول ۲. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.

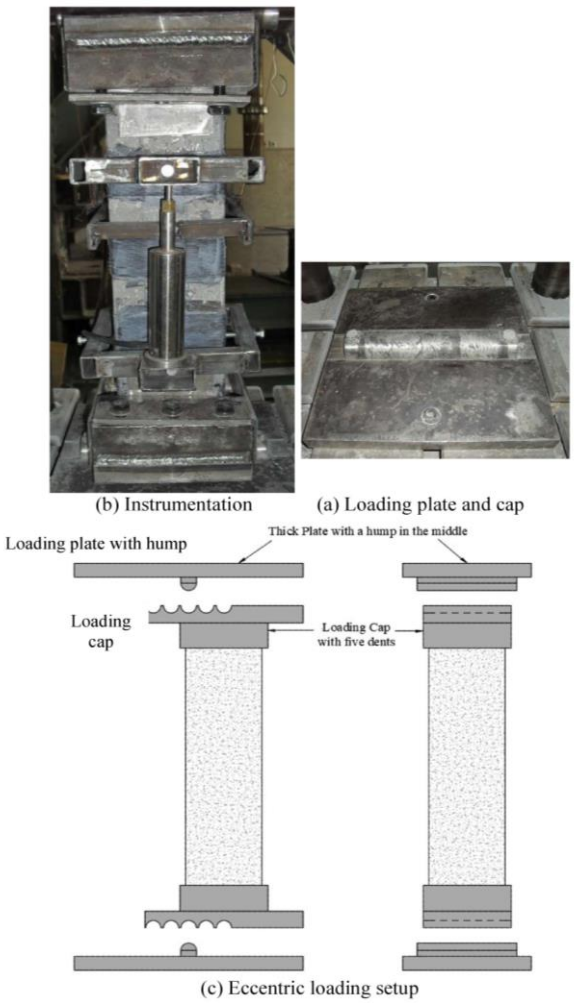
Group	Specimen	Confinement method	Eccentricity (mm)
1	R-0	-	0
	W-0	Wrap	0
	CSW-0	Corner strip-wrap	0
2	R-30	-	30
	CSW-30	Corner strip-wrap	30
3	R-60	-	60
	CSW-60	Corner strip-wrap	60
4	R-90	-	90
	W-90	Wrap	90
	CSW-90	Corner strip-wrap	90

نمونه‌های ستون بتن‌آرمه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر در ۴ گروه طبقه‌بندی شده‌اند، که به‌صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. نام‌گذاری نمونه‌ها در گروه‌های مختلف، شامل دو بخش اصلی است: در بخش اول، R نشانگری نمونه‌ی محصورنشده (نمونه‌ی شاهد)، W نشانگر نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ غیرپیوسته، و CSW نشانگری نمونه‌ی محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ غیرپیوسته است. بخش دوم، نیز با توجه به مقدار خروج از مرکزیت بار نام‌گذاری شده است و می‌تواند یکی از مقادیر صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی متر باشد.

۴.۲. شرح آزمایش و ابزارگذاری

در پژوهش حاضر، برای اعمال بار محوری با خروج از مرکزیت روی ستون‌های بتن‌آرمه از جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن، صفحه، و کلاهک مخصوص بارگذاری با خروج از مرکزیت و نیروسنج استفاده شده است (شکل ۳). بارگذاری نمونه‌ها به‌صورت کنترل تغییرمکان و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه‌ی نهایی شکست انجام شده است. بار اعمال‌شده از طریق فشار روغن و همچنین نیروسنج، اندازه‌گیری و به وسیله‌ی یک دیتالاگر ثبت شده است. علاوه‌بر این، به‌منظور اعمال بار محوری به‌صورت خارج از مرکز، دو عدد صفحه برای فک‌های بالا و پایین و همچنین دو عدد کلاهک برای دو انتهای ستون ساخته شده است (شکل ۳- الف). ورق‌های فولادی مذکور برای تبدیل بار گسترده به بار نواری (به‌وسیله‌ی نیم‌استوانه‌ای که بر روی آن‌ها قرار دارد) و کلاهک‌ها برای انتقال هم‌زمان بار محوری و لنگر خمشی به ستون استفاده می‌شوند. زیر هر کلاهک ۴ شیار وجود دارد، که مربوط به خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر است، که بر روی نیم‌استوانه‌ی وسط ورق‌های فولادی قرار می‌گیرد.

تغییرشکل محوری ستون توسط دو عدد جابجایی‌سنج (LVDT) با طول ۲۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۵ میلی‌متر که در دو طرف نمونه و روبروی هم قرار گرفته‌اند (یکی در وجه کششی و دیگری در وجه فشاری ستون)، تعیین و برای نصب جابجایی‌سنج‌ها بر روی نمونه از دو عدد قاب فولادی استفاده شده است. با توجه به ابعاد جابجایی‌سنج‌ها و قاب‌های مخصوص نصب آن‌ها، تغییرمکان اندازه‌گیری‌شده، مربوط به یک سوم میانی نمونه است (شکل ۳- ب). در شکل



شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت.

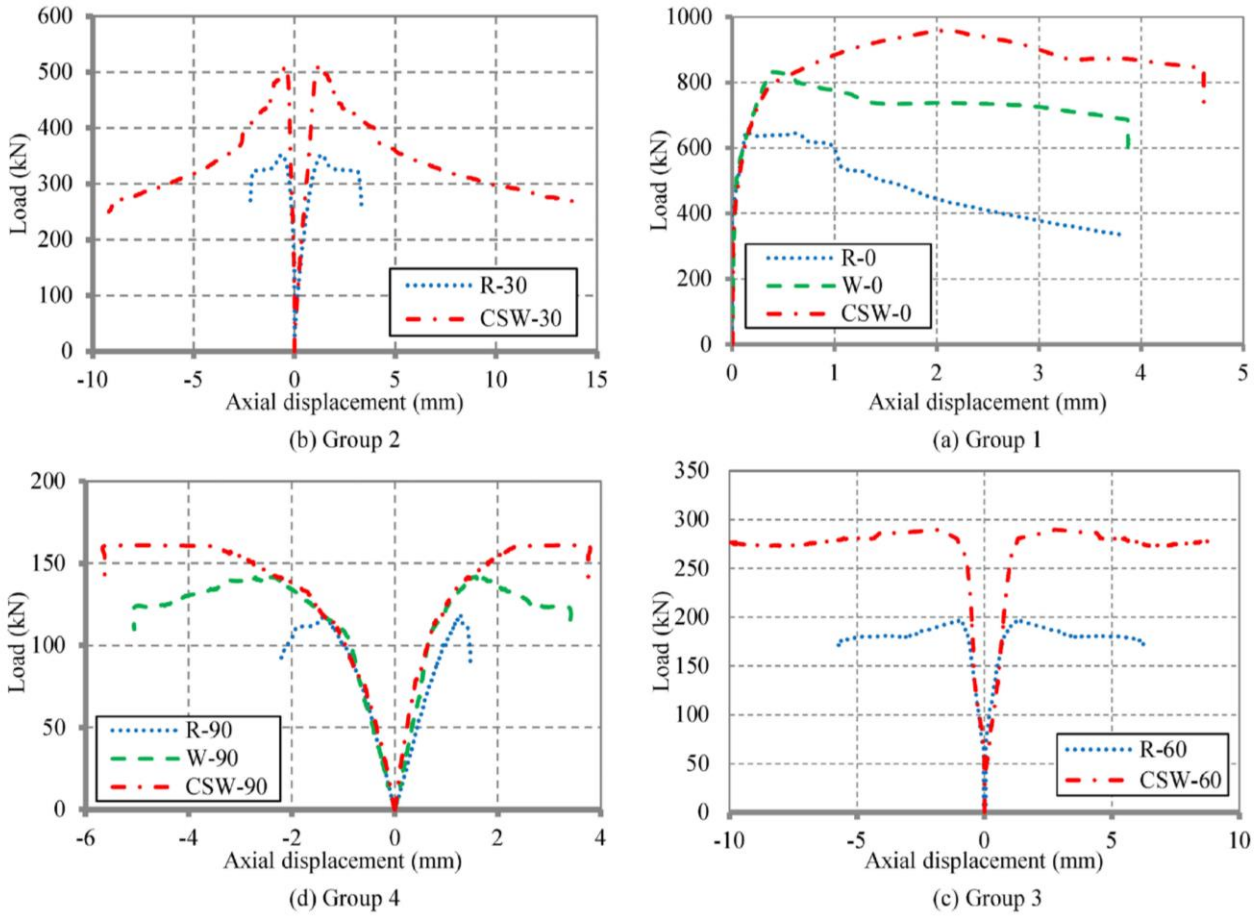
۳- ج، تصویری از ستون بتن‌آرمه تحت بارگذاری و ابزارگذاری آن مشاهده می‌شود.

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث

۱.۳. رفتار ستون‌های بتن‌آرمه

مقایسه‌ی رفتار ستون‌های تحت بارگذاری در خروج از مرکزیت‌های مختلف را می‌توان با منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری آن‌ها در شکل ۴ (الف - د) مشاهده کرد. این تذکر لازم است که در شکل‌های مذکور، مقادیر مثبت تغییرمکان مربوط به تغییرمکان محوری در وجه فشاری نمونه و مقادیر منفی مربوط به تغییرمکان محوری در وجه کششی نمونه هستند. در منحنی‌های ارائه‌شده در شکل ۴، شیب منحنی‌های هر گروه در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و تا رسیدن به بار بیشینه‌ی نمونه‌ی شاهد متناظر تقریباً یکسان بوده است، که نشان از سختی برابر نمونه‌های هر گروه در مراحل ابتدایی بارگذاری دارد. با نزدیک‌شدن به نقطه‌ی مربوط به بار بیشینه‌ی نمونه‌ی شاهد و فعال‌شدن محصورشدگی در نمونه‌های تقویت‌شده، با توجه به میزان سختی که هر روش تقویت می‌تواند برای نمونه ایجاد کند، شیب منحنی‌ها نیز تا رسیدن به نقطه‌ی بیشینه‌ی خود تغییر کرده است.

مطابق با شکل ۴، شاخه‌ی دوم منحنی بار- تغییرمکان در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (به جز نمونه‌ی CSW-۳۰) به‌صورت تقریباً افقی جلو رفته است، که بیانگر رفتار خمیری کامل و نیز محصورشدگی



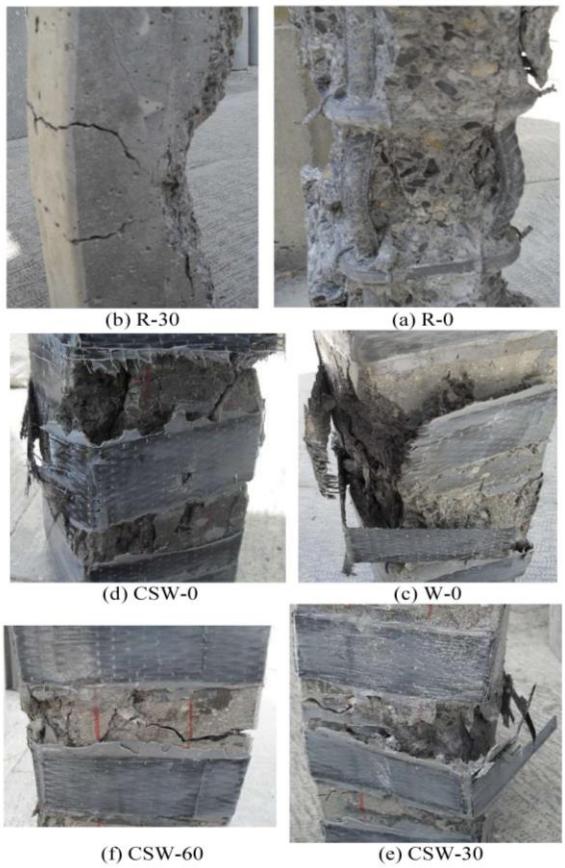
شکل ۴. منحنی‌های بار- تغییرمکان نمونه‌های مختلف.

مؤثر و کافی برای نمونه‌های مذکور است. استفاده از نوارهای گوشه در آن‌ها باعث شده است که تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع که منجر به توزیع غیریکنواخت فشار محصورکننده روی محیط و پارگی زودهنگام کامپوزیت در گوشه‌ها می‌شود، کنترل شود و میزان کارایی کامپوزیت در محصورسازی افزایش یابد. این در حالی است که رفتار نمونه‌ی CSW-۳۰ بعد از باربری بیشینه به‌صورت نرم‌شدگی کرنش بوده است. این تذکر لازم است که اگرچه رفتار نمونه‌ی CSW-۳۰ به صورت نرم‌شدگی کرنش است، ولی با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری، تغییرمکان محوری، و سطح زیر منحنی در آن به صورت قابل‌توجهی بیشتر از نمونه‌ی R-۳۰ بوده است، که این مطلب نشانگر عملکرد مناسب روش نوار گوشه- دورپیچ است. از طرف دیگر، در ۲ نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از دورپیچ، شاخه‌ی دوم منحنی بار- تغییرمکان به‌صورت نزولی (شیب منفی) بوده است، که نشان می‌دهد رفتار آن به‌صورت نرم‌شدگی کرنش بوده و به نظر می‌رسد محصورشدگی به میزان مؤثر در نمونه‌ی مذکور تأمین نشده است؛ که دلیل آن می‌تواند وجود تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع باشد، که باعث می‌شود فشار محصورشدگی به‌صورت غیریکنواخت روی محیط نمونه توزیع شود و نوارهای محصورکننده نتوانند به‌صورت مؤثر عمل کنند. استدلال ذکرشده با توجه به مود گسیختگی نمونه‌ها تأیید شده است. براساس مقایسه‌ی انجام‌گرفته روی نمونه‌های تقویت‌شده می‌توان نتیجه گرفت که هر چه کامپوزیت بتواند از ظرفیت خود به صورت بیشتر و مؤثرتر برای محصورسازی استفاده کند، در این صورت نمونه به میزان کافی محصور می‌شود و رفتار آن نیز به سمت سخت‌شدگی کرنشی پیش خواهد رفت. علاوه‌بر این، منحنی بار- تغییرمکان مربوط به نمونه‌های شاهد نیز پس از نقطه‌ی اوج به‌صورت کاملاً نزولی و با شیب تند امتداد پیدا می‌کند و رفتار نرم‌شدگی کرنش برای آن‌ها کاملاً مشاهده می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که محصورشدگی ناشی از فولادهای عرضی داخلی نیز مؤثر نبوده است.

۲.۳. مود گسیختگی

جهت بررسی و مقایسه‌ی نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مختلف، تصاویر مربوط به شکست نمونه‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، شکست تمامی نمونه‌های تقویت‌شده با پارگی FRP همراه بوده و صرف‌نظر از نحوه‌ی تقویت، پارگی کامپوزیت در نواحی یک سوم میانی ارتفاع ستون رخ داده است.

با توجه به شکل ۵، شکست نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در میانه‌ی ارتفاع ستون اتفاق افتاده است. در حین بارگذاری نمونه‌ی شاهد، ابتدا ترک‌هایی به موازات بار محوری فشاری ایجاد شده و پس از آن با ریختن پوسته‌ی بتن و سپس کمانش آرماتورهای طولی، بعد از رسیدن به نقطه‌ی باربری بیشینه، نمونه‌ی مذکور با رفتاری کاملاً نرم دچار شکست شده است. در نمونه‌ی تقویت‌شده با روش دورپیچ، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع و وجود اثر بُرندگی گوشه‌ها روی FRP منجر به پارگی زودهنگام کامپوزیت در ناحیه‌ی گوشه شده است؛ که باعث می‌شود تمام ظرفیت کششی کامپوزیت مصرفی در محصورسازی نمونه استحصال نشود. این در حالی است که در نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ، پارگی کامپوزیت محصورکننده در ناحیه‌ی میانی یکی از اضلاع اتفاق افتاده است؛ که نشان می‌دهد تقویت موضعی در گوشه‌های مقطع با استفاده از نوارهای گوشه پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده‌ی افقی، تمرکز تنش در گوشه‌ها را روی لایه‌ی محصورکننده کاهش می‌دهد و از پارگی



شکل ۵. نحوه‌ی گسیختگی برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی.

زودهنگام کامپوزیت در نواحی گوشه‌ی مقطع جلوگیری می‌کند. این امر باعث می‌شود که بازدهی کامپوزیت در محصورسازی ستون افزایش یابد.

گسیختگی نهایی نمونه‌های تحت بار با خروج از مرکزیت نیز در یک سوم میانی ارتفاع ستون رخ داده است. در نمونه‌های شاهد، شکست نمونه به‌صورت ایجاد ترک‌های افقی در وجه کششی و خردشدن و ریختن پوسته‌ی بتن و کمانش آرماتورهای طولی در وجه فشاری است. در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش‌های دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ، گسیختگی نمونه به‌صورت ایجاد ترک‌های خمشی در وجه کششی و خردشدن بتن و پارگی FRP محصورکننده در وجه فشاری بوده است.

۳.۳. ظرفیت باربری

نتایج آزمایشگاهی، شامل: ظرفیت بابری، بار نهایی، تغییرمکان محوری نهایی در وجه‌های کششی و فشاری، و لنگر خمشی بیشینه در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی نمونه‌های گروه اول تحت بارگذاری محوری خالص قرار گرفته و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. براساس اطلاعات موجود در جدول مذکور، برای نمونه‌ی شاهد بدون تقویت (R-۰)، میزان بار بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۶۴۹ و ۵۵۲ کیلونیوتن ثبت شده است. این تذکر لازم است که نمونه‌های شاهد به‌علت وجود آرماتورهای داخلی و عدم تقویت خارجی، شکست کاملاً نرمی داشته و برخلاف نمونه‌های تقویت‌شده، نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی در لحظه‌ی نهایی نداشته‌اند. به همین جهت و با توجه به برخی مطالعات پیشین، برای گزارش مشخصات باربری نهایی نمونه‌های مذکور از نقطه‌ی معادل ۸۵٪ بار بیشینه، در شاخه‌ی نزولی نمودار بار- تغییرمکان استفاده شده است.[۲۸] بر این اساس، تغییرمکان محوری ثبت‌شده برای نمونه‌ی شاهد در نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برابر با ۱/۰۵ میلی‌متر بوده است. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ (W-۰)، بارهای بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۸۳۲ و ۶۸۳ کیلونیوتن بوده‌اند، که نشانگر افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۸/۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد است. همچنین تغییرمکان محوری در نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برای نمونه‌ی (W-۰)، برابر با ۳/۸۷ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۰) نیز بارهای بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۹۵۸ و ۸۴۴ کیلونیوتن مشاهده شده‌اند. به‌عبارت دیگر، ظرفیت باربری نمونه‌ی (CSW-۰) نسبت به نمونه‌های R-۰ و W-۰ به‌ترتیب به میزان ۴۷/۶ و ۱۵/۱ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار تغییرمکان محوری نمونه‌ی (CSW-۰) در لحظه‌ی نهایی به ۴/۶۱ میلی‌متر رسیده است.

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ستون‌های بتن‌آرمه.

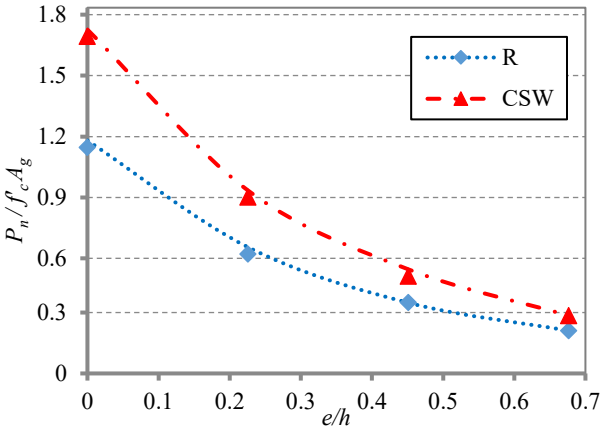
Increase in ductility compared to R-0 (%)	Increase in peak load compared to R-0 (%)	λ_E	λ_δ	Maximum bending moment (kN.m)	Tension axial displacement at ultimate (mm)	Compression axial displacement at ultimate (mm)	Ultimate load (kN)	Peak load (kN)	e* (mm)	Specimen
-	-	1.68	1.70	0	-	1.05	552	649	0	R-0
301	28.2	6.85	6.68	0	-	3.87	683	832	0	W-0
607	47.6	13.64	10.24	0	-	4.61	844	958	0	CSW-0
-	-	3.09	2.69	10.56	2.11	3.20	312	352	30	R-30
74	44.9	5.67	4.41	15.30	2.75	4.44	390	510	30	CSW-30
-	-	2.40	2.32	11.82	5.73	6.26	170	197	60	R-60
330	47.2	12.24	8.07	17.40	10.14	8.75	262	290	60	CSW-60
-	-	1.61	1.37	10.71	2.14	1.47	98	119	90	R-90
32	19.3	2.51	1.41	12.87	5.06	3.39	123	142	90	W-90
173	35.2	4.95	3.19	14.49	5.64	3.76	161	161	90	CSW-90

* خروج از مرکزیت بار.

نمونه‌های گروه دوم تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۳۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بارهای بیشینه و نهایی نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در گروه دوم (R-۳۰) به ترتیب برابر با ۳۵۲ و ۳۱۲ کیلونیوتن بوده‌اند. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در میزان خروج از مرکزیت که ۳۰ میلی‌متر است، مقدار لنگر بیشینه، که برابر با ۱۰/۵۶ کیلونیوتن. متر است، به‌دست می‌آید. لازم به توضیح است که در نمونه‌ی (R-۳۰)، نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی مشاهده و بار مربوط به شکست آزمایشگاهی به‌عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای نمونه‌ی (R-۳۰)، در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۲۰ و ۲/۱۱ میلی‌متر ثبت شده است. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۳۰)، میزان باربری بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۵۱۰ و ۳۹۰ کیلونیوتن، و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر ۱۵/۳۰ کیلونیوتن. متر بوده است. با توجه به مقادیر اخیر، ظرفیت باربری نمونه‌ی (CSW-۳۰)، به میزان ٪۴۴/۹ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. همچنین مقدار تغییرمکان محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی (CSW-۳۰)، به ترتیب برابر با ۴/۴۴ و ۲/۷۵ اندازه‌گیری شده است.

در نمونه‌های گروه سوم، که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۶۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، ظرفیت باربری و بار نهایی نمونه‌ی شاهد (R-۶۰) به ترتیب برابر با ۱۹۷ و ۱۷۰ کیلونیوتن بوده است. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در میزان خروج از مرکزیت، که ۶۰ میلی‌متر است، مقدار لنگر بیشینه برابر با ۱۱/۸۲ کیلونیوتن متر به‌دست آمده است. لازم به توضیح است که در نمونه‌ی (R-۶۰) نیز نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی به‌عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای آن در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۶/۲۶ و ۵/۷۳ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۶۰)، مقدار بار بیشینه و نهایی آن به ترتیب برابر ۲۹۰ و ۲۶۲ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر ۱۷/۴۰ کیلونیوتن متر بوده و تغییرمکان‌های محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی (CSW-۶۰)، به ترتیب برابر با ۸/۷۵ و ۱۰/۱۴ میلی‌متر بوده است. با توجه به نتایج ذکرشده، ظرفیت باربری نمونه‌ی CSW-۶۰ به میزان ٪۴۷/۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است.

از طرف دیگر، بارهای بیشینه و نهایی (نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی) نمونه‌ی شاهد در گروه چهارم (R-۹۰)، به ترتیب برابر با ۱۱۹ و ۹۸ کیلونیوتن بوده است. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در خروج از مرکزیت ۹۰ میلی‌متر، مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۰/۷۱ کیلونیوتن متر به‌دست آمده است. میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای نمونه‌ی R-۹۰ در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۱/۴۷ و ۲/۱۴ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ غیرپیوسته (W-۹۰)، مقدار بارهای بیشینه و نهایی نمونه به ترتیب برابر با ۱۴۲ و ۱۲۳ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۲/۷۸ کیلونیوتن متر بوده و تغییرمکان‌های محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی آن به ترتیب برابر با ۳/۳۹ و ۵/۰۶ میلی‌متر بوده است. با توجه به نتایج ذکرشده مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ به میزان ٪۱۹/۳ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است. برای نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۹۰)، میزان بارهای بیشینه و نهایی یکسان و برابر با ۱۶۱ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۴/۴۹ کیلونیوتن متر بوده است. همچنین



شکل ۶. تأثیر خروج از مرکزیت بار در ظرفیت باربری ستون (به‌صورت بی‌بُعد).

مقدار تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی در لحظه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۷۶ و ۵/۶۴ میلی‌متر ثبت شده است. به‌عبارت دیگر، ظرفیت باربری نمونه‌ی اخیر نسبت به نمونه‌های R-۹۰ و W-۹۰ به‌ترتیب به میزان ۳۵/۲ و ۱۳/۴ درصد افزایش داشته است.

با توجه به نتایج اخیر مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری در نمونه‌هایی که با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ محصور شده‌اند، بسیار بالاتر از ظرفیت باربری نمونه‌های محصورشده با دورپیچ بوده است. به‌عبارت دیگر، هنگامی که برای محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه، از نوارهای گوشه در زیر دورپیچ‌های FRP استفاده می‌شود، به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های محصورشدگی در محیط ستون، عملکرد کامپوزیت‌های FRP در افزایش ظرفیت باربری ستون بهبود پیدا می‌کند.

منحنی تغییرات ظرفیت باربری با توجه به تغییرات خروج از مرکزیت بار (به‌صورت بدون بُعد) در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ که در آن، به‌منظور بدون بُعدکردن محور قائم، ظرفیت باربری (P_n) بر مقاومت فشاری بتن (f'_c) و سطح مقطع ناخالص ستون (A_g) تقسیم شده است. همچنین، برای بدون بُعدکردن محور افقی، خروج از مرکزیت بار (e) بر بعد مقطع ستون (h) تقسیم شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که در خروج از مرکزیت‌های مختلف، ظرفیت باربری ستون‌های تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP در مقایسه با نمونه‌های شاهد متناظر افزایش یافته است. با این حال، با افزایش خروج از مرکزیت بار، نرخ رشد ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌ی شاهد (اختلاف دو منحنی موجود در شکل ۶) کاهش یافته است.

۴.۳. شکل‌پذیری

جهت مقایسه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف پژوهش حاضر، از دو شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان (رابطه‌ی ۱) و شاخص شکل‌پذیری انرژی (رابطه‌ی ۲) استفاده شده است:

$$\lambda_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (۱)$$

$$\lambda_E = \frac{A_u}{A_y} \quad (۲)$$

که در آن، λ_δ شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان، δ_u تغییرمکان محوری در

نقطه‌ی نهایی، و δ_y تغییرمکان محوری در نقطه‌ی تسلیم هستند. در شاخص شکل‌پذیری انرژی، از سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری، که بیانگر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به‌عبارتی مقدار کار انجام‌شده توسط نیروی خارجی روی سیستم است، استفاده شده است. در این روش، شکل‌پذیری با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود؛ که در آن، λ_E شاخص شکل‌پذیری انرژی، A_u سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری تا نقطه‌ی نهایی، و A_y سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری تا نقطه‌ی تسلیم است.[۲۹]

تعیین تغییرمکان تسلیم در سازه‌های بتن‌آرمه به‌دلیل نبود نقطه‌ی تسلیم مشخص در منحنی بار- تغییرمکان، همواره با پیچیدگی‌های زیادی روبرو است، که عمدتاً به‌دلیل رفتار غیرخطی مواد و یا وقوع تسلیم در نواحی مختلف سازه و در سطوح متفاوت بار است. در پژوهش حاضر، تغییرمکان تسلیم با دو خطی‌سازی منحنی پوش نمونه‌ها براساس شیوه‌ی سختی کاهش‌یافته انجام شده است؛ که در آن، تغییرمکان متناظر با کوچک‌ترین مقدار از دو مقدار تسلیم آرماتور و یا ۷۵٪ بار بیشینه بر روی منحنی رفتاری سازه و شیب ناحیه‌ی کشسان منحنی دوخطی به‌صورت سختی سکانت، نقطه‌ی تسلیم تعیین شده است. تغییرمکان متناظر با ۱۵٪ افت مقاومت نیز به‌عنوان تغییرمکان نهایی در نظر گرفته شده است.[۲۸ و ۲۹] در جدول ۳، مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌های شکل‌پذیری تغییرمکان و انرژی نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، شکل‌پذیری در ستون‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ در خروج از مرکزهای صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۶۰۷، ۷۴، ۳۳۰، و ۱۷۳ درصد نسبت به نمونه‌ی محصورنشده‌ی متناظر افزایش یافته است. براساس نتایج آزمایشگاهی، افزایش خروج از مرکزیت بار منجر به کاهش شکل‌پذیری در ستون‌های تقویت‌شده در مقایسه با ستون تحت بار محوری خالص شده است. با این حال، ستون‌های تقویت‌شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، شکل‌پذیری بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد از خود نشان داده‌اند. شایان ذکر است که افزایش‌های گزارش‌شده برای شکل‌پذیری، میانگین افزایش شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان و شاخص شکل‌پذیری انرژی است.

از طرف دیگر، در ستون‌های تحت بار محوری خالص، افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۳۰۱ و ۶۰۷ درصد بوده است. علاوه‌بر این، در ستون‌های تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۹۰ میلی‌متر، شکل‌پذیری در ستون‌های محصورشده با دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ به ترتیب به میزان ۳۲ و ۱۷۳ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ با بهبود عملکرد کامپوزیت در محصورسازی، موجب افزایش قابل‌توجه شکل‌پذیری ستون نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ غیرپیوسته می‌شود.

۴. منحنی اندر کنش بار محوری- لنگر خمشی

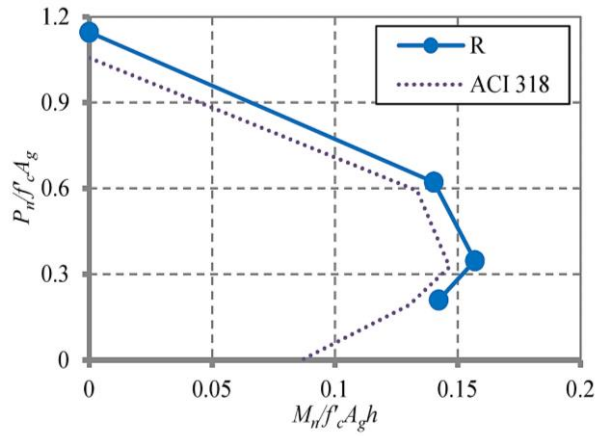
۱.۴. ستون‌های محصورنشده

به‌منظور ترسیم منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی آزمایشگاهی (P-M)، از مقادیر بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی که در طول آزمایش به‌دست آمده است، استفاده می‌شود. علاوه‌بر این، بیشینه‌ی مقادیر تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر را می‌توان از طریق معادله‌های تعادل نیرو و همسازی کرنش محاسبه کرد.[۳۰] این تذکر لازم است که در محاسبه‌ی مقادیر تئوری، ضریب کاهش مقاومت برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگری خمشی بیشینه در ستون‌های محصورنشده در جدول ۴ ارائه شده است. به‌منظور بررسی اختلاف مقادیر آزمایشگاهی و تئوری، در ستون آخر جدول ۴، نسبت ظرفیت باربری تئوری به آزمایشگاهی ارائه شده است.

در شکل ۷، منحنی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌های محصورنشده به صورت بدون بُعد مشاهده می‌شود. به‌منظور بدون بُعدکردن منحنی مذکور، بار محوری (P_n) بر f'_cA_g و لنگر خمشی (M_n) بر f'_cA_gh تقسیم شده است. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه از مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از روابط تئوری بیشتر بوده است؛ که نشانگر اعتماد به روابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸،[۳۰] است.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تئوری ستون‌های بتن‌آرمه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر.

Theoretical-to-experimental ratio	Theoretical predictions		Experimental results		e/h	Specimen
	Bending moment (kN.m)	Axial load (kN)	Bending moment (kN.m)	Axial load (kN)		
0.92	0	598	0	649	0	R-0
0.95	10.05	335	10.56	352	0.23	R-30
0.93	11.04	184	11.83	197	0.45	R-60
0.92	9.81	109	10.71	119	0.68	R-90
-	6.10	۰	-	-	Infinity	R-PB
0.71	0	681	0	958	0	CSW-0
0.84	12.78	426	15.30	510	0.23	CSW-30
0.82	14.22	237	17.40	290	0.45	CSW-60
0.76	10.98	122	14.49	161	0.68	CSW-90
-	6.60	۰	-	-	Infinity	CSW-PB



شکل ۷. منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی برای نمونه‌های شاهد.

۲.۴. ستون‌های محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ

در پژوهش حاضر، به‌منظور محاسبه‌ی نقاط مختلف منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ به صورت تئوری، از آیین‌نامه‌ی ACI ۴۴۰،[۱] استفاده شده است. در آیین‌نامه‌ی مذکور از مدل تنش- کرنش لام و تنگ برای پیش‌بینی رفتار بتن محصورشده تحت اثر نیروی محوری فشاری استفاده می‌شود. براساس مدل لام و تنگ، بیشینه‌ی تنش محصورکننده (f_l)، مقاومت فشاری بتن محصورشده (f'_{cc})، و کرنش نهایی بتن محصورشده (ε_{ccu}) با استفاده از روابط ۳ الی ۵ محاسبه می‌شود:

$$f_l = \frac{2nE_f t_f \varepsilon_{fe}}{\sqrt{b^2+h^2}} \quad (۳)$$

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3\kappa_a f_l \quad (۴)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002\left[1.5+12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c}\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{0.002}\right)^{0.45}\right] \quad (۵)$$

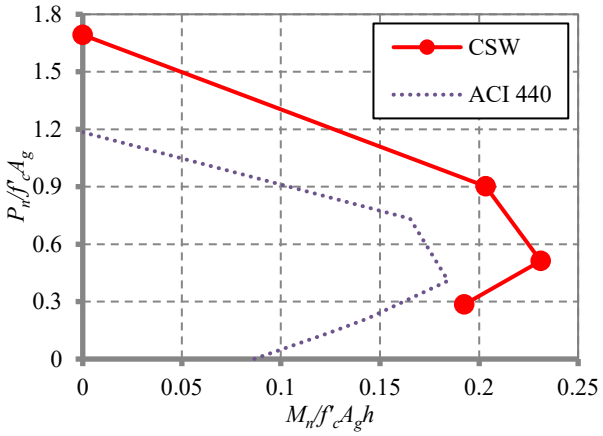
که در آن‌ها، n تعداد لایه‌های FRP، E_f مدول کشسانی کششی کامپوزیت FRP، t_f ضخامت اسمی لایه‌ی FRP استفاده‌شده، ε_{fe} کرنش مؤثر FRP در لحظه‌ی گسیختگی، و b بُعد کوچک‌تر مقطع ستون هستند. همچنین ضرایب شکل κ_a و κ_b با استفاده از روابط ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند:

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c}\left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (۶)$$

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c}\left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad (۷)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1-\frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)^2+\left(\frac{h}{b}\right)(b-2r_c)^2\right]}{3A_g}-\rho_g}{1-\rho_g} \quad (۸)$$

که در آن‌ها، A_e سطح مقطع بتن محصورشده به‌صورت مؤثر، A_c سطح مقطع بتن، r_c شعاع گوشه‌ی مقطع، A_g سطح مقطع ناخالص ستون، و ρ_g نسبت سطح مقطع میلگردهای طولی به سطح مقطع ناخالص ستون هستند.



شکل ۸. منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی برای نمونه‌های محصورشده.

نمودار آزمایشگاهی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی با استفاده از مقادیر بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌ی محصورشده ترسیم شده است. از طرف دیگر، با استفاده از روابط ارائه‌شده در بخش حاضر، مقادیر تئوری بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی برای خمش خالص و خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر محاسبه شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصورشده و همچنین نسبت مقادیر تئوری به آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است. به‌علاوه، منحنی اندرکنش آزمایشگاهی و تئوری برای نمونه‌های محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

همان طور که در جدول ۴ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، معادله‌های تئوری منجر به تخمین‌های محافظه‌کارانه می‌شود. این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که مقادیر تئوری به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگر خمشی اساساً به یک کرنش محوری فرضی در دورترین تار فشاری بتن وابسته است؛ این در حالی است که در نمونه‌های محصورشده با کامپوزیت‌های FRP تحت اثر بار محوری با خروج از مرکزیت، ممکن است کرنش در دورترین تار فشاری بتن از مقادیر در نظر گرفته‌شده در آیین‌نامه فراتر رود.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ، ۱۰ نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر آزمایش شده‌اند؛ که ۴ نمونه بدون تقویت خارجی و به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده‌اند. ۲ نمونه با استفاده از روش دورپیچ و ۴ نمونه‌ی دیگر نیز با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ محصور شده‌اند. در ادامه، برخی از نتایج به‌دست‌آمده ارائه شده است:

۱- شکست نمونه‌های محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP،که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، و ۶۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، با پارگی کامپوزیت در وجه فشاری ستون همراه بوده است. محل گسیختگی همه‌ی نمونه‌ها در ارتفاع، در یک سوم میانی ارتفاع ستون مشاهده شده است.

۲- استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ در محصورسازی ستون، توانسته است با ایجاد توزیع یکنواختی از فشار محصورکننده روی محیط و حذف آثار منفی ناشی از تمرکز تنش در گوشه‌ها، محل پارگی FRP را از نواحی گوشه به وسط

ضلع، که بیشترین تنش‌ها و کرنش‌های کششی در آن اتفاق می‌افتد، منتقل کند. به‌عبارت دیگر، در روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به روش متداول دورپیچ، ظرفیت بیشتری از کامپوزیت FRP استحصال می‌شود.

۳- استفاده از نوارهای گوشه به‌منظور مقاوم‌سازی موضعی گوشه‌های مقطع پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده در روش نوار گوشه- دورپیچ، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه به مقدار قابل توجه شده است. برای مثال، در خروج از مرکزیت صفر میلی‌متر، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ به ترتیب به میزان ۱۵/۱ و ۷۶/۵ درصد، نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ افزایش یافته است.

۴- به‌طورکلی، تا خروج از مرکزیت معادل وضعیت متوازن (۶۰ میلی‌متر)، با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌ی شاهد تقریباً ثابت باقی مانده و پس از آن کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، در خروج از مرکزیت‌های صفر، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر به ترتیب برابر با ۴۷/۶، ۴۷/۲، و ۳۵/۲ بوده است.

۵- براساس نتایج آزمایشگاهی، با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با روش CSW تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۶۰۷ و ۳۳۰ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است.

۶- مقادیر آزمایشگاهی به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگر خمشی در ستون‌های تقویت‌شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP و همچنین ستون‌های بدون تقویت خارجی، بیشتر از مقادیر تئوری و در جهت اطمینان بوده است؛ که به‌نظر می‌رسد علت آن، تفاوت در مقدار واقعی کرنش ایجادشده در دورترین تار فشاری بتن نسبت به مقدار محاسبه‌شده با استفاده از روابط تئوری باشد.

References - منابع

1. ACI 440.2R, 2017. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. https://doi.org/10.14359/51700867.

2. Piekarczyk, J., Piekarczyk, W. and Blazewicz, S., 2010. Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, *25*, pp.2365-2369. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.035.

3. Eid, R., Roy, N. and Paultre, P., 2009. Normal- and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites. *Journal of Composites for Construction*, *13*(2), pp.113-124. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2009)13:2(113).

4. Realfonzo, R. and Napoli, A., 2009. Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices. *Journal of Structural Engineering*, *135*(10), pp.1164-1176. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000048.

5. Saljoughian, A., Mostofinejad and D. and Hosseini, S.M., 2019. CFRP confinement in retrofitted RC columns via CSB technique under reversed lateral cyclic loading. *Materials and Structures*, *52*, pp.1-14. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1373-6.

6. Zignago, D. and Barnato, M., 2023. New analytical analysis-oriented stress-strain model for FRP-and-steel confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, *149*(1), pp.04022212. https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-11634.

7. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2020. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, *235*, pp.117786. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2019.117786.

8. Shayanfar, J., Barros, J.A. and Rezazadeh, M., 2022. Unified model for fully and partially FRP confined circular and square concrete columns subjected to axial compression. *Engineering Structures*, *251*, pp.113355. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113355.

9. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2017. Rectangular reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer sheets using corner strip-batten method. *ACI Structural Journal*, *114*(3), pp.659-671. https://doi.org/10.14359/51689566.

10. Fanaradeli, T., Rousakis, T. and Karabinis, A., 2019. Reinforced concrete columns of square and rectangular section, confined with FRP-Prediction of stress and strain at failure. *Composites Part B: Engineering*, *174*, pp.107046. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107046.

11. Xie, D., Hu, Z., Wang, B., Zhao, K. and Shi Y., 2023. Axial behaviour of basalt FRP-confined reinforced concrete columns with square sections of different corner radii. *Engineering Structures*, *274*, pp.115153. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115153.

12. Fan, L., Jin, L. and Du, X., 2023. Modeling of size effect on compressive behaviour of CFRP-confined rectangular RC columns: Influence of corner radius and aspect ratio. *Composite Structures*, *304*, pp.116400. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116400.

13. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2016. Corner strip-batten technique for FRP-confinement of square RC columns under eccentric loading. *Journal of Composites for Construction*, *20*(3), pp.04015077.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000644.

14. Mostofinejad, D. and Ilia, E., 2014. Confining of square RC columns with FRP sheets using corner strip-batten technique. *Construction and Building Materials*, *70*, pp.269-278. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.073.

15. Wang, W., Sheikh, M.N., Zeng, J.J. and Hadi, M.N., 2022. Ultimate strain prediction of partially FRP confined concrete considering strain localization. *Construction and Building Materials*, *346*, pp.128486. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2022.128486.

16. Djenad, S., Si-Salem, A. and Bouzidi, M.A., 2022. Performance and compressive axial behaviour of new design partially confined concrete columns with encased-FRP/Grids strips. *Asian Journal of Civil Engineering*, *23*(6), pp.801-815. https://doi.org/10.1007/s42107-022-00450-y.

17. Xing, L., Lin, G. and Chen, J.F., 2020. Behavior of FRP-confined circular RC columns under eccentric compression. *Journal of Composites for Construction*, *24*(4), pp.04020030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001036.

18. 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.

19. Saljoughian, A., Mostofinejad, D. and Raji, A., 2020. Retrofit of concrete columns with fiber strips using grooves and corner battens. *Structures and Buildings*, *176*(3), pp.203-217. https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00187.

20. Huynh-Xuan, T., Do-Dai, T., Ngo-Thanh, T., Pham, T.M. and Nguyen-Minh, L., 2021. Effect of sulfate attack on reinforced concrete columns confined with CFRP sheets under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, *25*(6), pp.04021049. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001151.

21. Lu, S., Wang, J., Yang, J., and Wang, L., 2022. Numerical analysis of preloaded FRP-strengthened concrete columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, *357*, pp.129297. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2022.129297.

22. Pham, T.M., Hadi, M.N. and Youssef, J., 2015. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, *19*(6), pp.04015015. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943 -5614.0000571.

23. Eid, R. and Paultre, P., 2017. Compressive behaviour of FRP-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, *132*, pp.518-530. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.052.

24. Wang, Y., Liu, P., Cao, Q., Chen, G., Wan, B., Wei, Z. and Bai, Y.L., 2021. Comparison of monotonic axial compressive behaviour of rectangular concrete confined by FRP with different rupture strain. *Construction and Building Materials*, *299*, pp.124241. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124241.

25. Wang, Y.C. and Hsu, K., 2008. Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity. *Composite Structures*, *82*(1), pp.132-139. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.04 .002.

26. ACI 211.1, 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (Reapproved 2009). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. https://doi.org/10.20935/AcadMatSci6138.

27. http://www.sika.com/.

28. Park, R., 1989. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, *22*(3), pp.155-166. https://doi.org/10.5459/bnzsee.22.3.155-166.

29. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2020. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, *235*, pp.117786. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2019.117786.

30. ACI 318, 2019. Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.15-24

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Experimental Study of a New Metallic Damper Using Hourglass Fuse

Mohammad Hosein Afridoon[1], Reza Aghayari *[1], Mohammad. H Adibrad[1] and Mehrzad Tahamouliroudsari[2]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
[2] Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.
* corresponding author:(reza_agh@razi.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:16 January 2024

Revised:28 March 2024

Accepted:21 April 2024

Keywords:

Metallic yield damper, hysteresis behavior, hourglass pin, experimental study, nonlinear behavior.

Abstract

Being one of the world's most earthquake-prone countries, Iran has suffered thousands of lives lost in earthquakes throughout the past decades. The metallic yielding damper is a specific kind of passive structural control device that has shown effective behavior in past earthquakes. In this paper, a new metallic yielding damper made of a number of hourglass shape pins (HSP) for enhancing the seismic behavior of building structures is proposed and has been experimentally evaluated under monotonic and quasi-static cyclic loading. The specimens were subjected to drift levels beyond the expected design ones to identify their complete behavior and all possible failure modes. The main feature of the proposed damper is replaceable hourglass shape pins (HSP) fuse. For this purpose, conventional reinforcing steel bars in construction practice have been shaped by a lathe machine in the form of hourglass pins. These hourglass pins dissipate energy mostly through flexural and tensile mechanisms when subjected to inelastic cyclic deformation and can be replaced easily in case of failure after severe earthquakes. Moreover, this damper is economical, easy to install, and built with no special fabrication technique. The hysteresis behavior and other important parameters of the damper, such as capacity of energy dissipation, effective stiffness, and equivalent damping, and the effect of how the HSP is connected to its supporting plates (welding or connection by utilizing nuts) on these behaviors have been studied through laboratory tests. A simplified analytical procedure using plastic analysis and simple rules of mechanics of solids was found to accurately predict the HSP behavior and was found to be consistent with experimental results. The experimental results indicate that the bars successfully performed their function as energy absorbers and fuses in all specimens, but the way HSP is connected to supporting plates can greatly affect its behavior. In the case of nut connection, a significant amount of pinching was observed in hysteresis loops which is the result of residual displacements between HSP and supporting plates and welding the bars to plates seems to solve this problem, resulting in fat and sustainable hysteresis loop without any significant strength and stiffness degradation and good energy dissipation capacity (with respect to HSP's low weight) of the purposed damper was reached. Although both types of connections have shown acceptable behavior throughout cyclic loading, total energy absorption capacity and equivalent viscous damping in welded connections in comparison with the nut connection have been improved by 91 and 53 percent, respectively.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

Afridoon, M.H., Aghayari, R., Adibrad, M.H. and Tahamouliroudsari, M. 2025. Experimental Study of a New Metallic Damper Using Hourglass Fuse, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.15-24.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.63829.3289

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید با استفاده از فیوزهای ساعت شنی

محمدحسین آفریدون [۱]، رضا آقایاری *[۱]، محمدحسین ادیب راد [۱] و مهرزاد تحملی رودسری [۲]

[۱] گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

[۲] گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه.

*نویسنده مسئول (reza_agh@razi.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۱/۰۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

واژگان کلیدی:

میراگر فولادی تسلیمی،

رفتار چرخه‌ای،

میلگرد ساعت شنی،

مطالعه‌ی آزمایشگاهی،

رفتار غیرخطی.

چکیده

میراگرهای فولادی تسلیمی، نوعی از روش‌های کنترل لرزه‌ای به‌شمار می‌آیند، که به عملکرد مثبت آن‌ها در زلزله‌های پیشین توجه شده است. در نوشتار حاضر، یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید پیشنهاد و مطالعه‌ی آزمایشگاهی شده است که مشخصه‌ی اصلی آن، استفاده از میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی است. پیکربندی میراگر به گونه‌ای است که میلگردها با سازوکار تسلیم خمشی- کششی انرژی را جذب می‌کنند و پس از زلزله‌ی شدید، قابل‌تعویض خواهند بود. برای اتصال میلگردها به اجزاء تکیه‌گاهی میراگر از دو روش متفاوت جوشکاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. اثر نوع اتصال و همچنین الگوی آرایش مهره‌ها در رفتار میراگر مطالعه شده است. نتایج نشان داده‌اند که نوع اتصال در مشخصات رفتاری تأثیر قابل توجهی داشته است، به‌گونه‌ای که ظرفیت جذب انرژی و میرایی معادل در نمونه‌ی اتصال به کمک جوش نسبت به مهره به ترتیب ۹۱ و ۵۳ درصد ارتقاء یافته است؛ گرچه میراگر ساخته‌شده با هر دو روش اتصال، رفتار چرخه‌ای پایدار و همچنین ظرفیت جذب انرژی مناسبی داشته است.

۱. مقدمه

براساس رویکرد آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، طراحی سازه‌های متعارف به‌گونه‌ای است که در صورت وقوع زلزله، طرح برخی از اعضاء سازه با ورود به ناحیه‌ی رفتار غیرخطی، تغییرشکل‌های بزرگ غیرارتجاعی را تجربه می‌کنند، که حاصل آن اتلاف و جذب انرژی به‌صورت چرخه‌ای در ناحیه‌ی غیرکشسان خواهد بود، در عین حال از فروریزش کلی سازه جلوگیری به‌عمل می‌آید. ایجاد مفاصل خمیری در تیرهای سیستم قاب خمشی و یا تسلیم تیر پیوند در سیستم مهاربند واگرا و همچنین رفتار غیرارتجاعی دیوارهای برشی نمونه‌هایی از رفتار مذکور هستند.

بازسازی ساختمان‌ها پس از زلزله به‌علت توزیع گسترده‌ی ذکرشده‌ی نواحی خمیری از لحاظ اقتصادی بسیار هزینه‌بر است؛ لذا، به روش کنترل خسارت، که بتوان رفتار خمیری را از سطح اعضاء سازه به قطعات و یا تجهیزات از پیش طراحی‌شده، که قابلیت تعویض و یا تعمیر داشته باشند، انتقال داد، توجه شده است.

روش‌های کنترل خسارت را می‌توان به سه دسته‌ی: فعال، نیمه‌فعال، و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های فعال و نیمه‌فعال به کمک سیستم‌های کنترل و پایش، پاسخ سازه متناسب با نیروی جانبی (زلزله و یا باد) وارد بر آن تغییر می‌کند و در اغلب موارد، شامل حس‌گرها و جک‌های هیدرولیکی هستند، که با منبع انرژی الکتریکی کار می‌کنند. اما در روش غیرفعال، پاسخ‌های لرزه‌ای از طریق افزایش میرایی در سیستم کنترل می‌شوند و کاهش می‌یابند.

میراگرهای فولادی تسلیمی[۱]، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای لزج، و ویسکوکشسان از جمله شناخته‌شده‌ترین تجهیزات کنترل خسارت غیرفعال به‌شمار می‌آیند، که در بین آن‌ها، میراگر فولادی تسلیمی به‌علت سهولت ساخت، هزینه‌ی تمام‌شده‌ی نسبی پایین، پایداربودن رفتار چرخه‌ای، و بی‌نیازی به نگهداری و بازرسی‌های دوره‌ای اقبال بیشتری دارد.

متداول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نوع میراگرهای تسلیمی، میراگرهای ADAS [۱-۴] و TADAS [۵-۷] هستند که متشکل از صفحات فولادی X شکل و یا V شکل هستند و انرژی زلزله از طریق رفتار تسلیم خمشی چرخه‌ای صفحات اخیر جذب می‌شود. علت اصلی انتخاب شکل صفحات میراگر به‌صورت غیرمنشوری، غیریکنواخت‌بودن مقادیر لنگر در طول اعضا مذکور است. به‌عبارت دیگر، قسمتی که متحمل کمترین مقدار لنگر خمشی است، کمترین سطح مقطع را خواهد داشت و به این ترتیب توقع می‌رود که کل حجم فولاد مصرفی به‌شکل یکنواختی به تسلیم برسد. با استفاده از همین ایده در سال‌های اخیر،

[1] metallic yield dampers

استناد به این مقاله:

آفریدون، محمدحسین، آقایاری، رضا، ادیب راد، محمدحسین، و تحملی رودسری، مهرزاد، ۱۴۰۴. بررسی آزمایشگاهی یک نوع میراگر فولادی تسلیمی جدید با استفاده از فیوزهای ساعت شنی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۱۵-۲۴. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63829.3289

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی با هندسه‌ی C شکل ارائه و مطالعه شده است؛[۸] که در آن، علاوه‌بر غیرمنشوری‌بودن مساحت ورق در طول آن، سطح مقطع عمود بر محور عضو نیز به‌صورت غیریکنواخت طراحی می‌شود. در اثر خمش خارج از صفحه‌ی ورق، تمامی قسمت‌های میراگر به‌صورت یکنواخت تسلیم خواهند شد و از مصالح به‌صورت بهینه استفاده می‌شود. اوستایی‌فر و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۱] ایده‌ی استفاده از عضو غیرمنشوری در ترکیب با صفحه‌های اصطکاکی را به‌عنوان یک میراگر با عملکرد دوگانه توسعه داده‌اند.

میراگر پیستونی، نوع دیگری از میراگرهای تسلیمی را شامل می‌شود،[۱۰ و ۱۱] که در آن، یک شفت فولادی توپُر به‌صورت هم‌محور با یک سیلندر قرار می‌گیرد و در فضای خالی بین آن‌ها، صفحات فولادی دایروی که در مرکز سوراخ دارند، قرار می‌گیرند. در جابجایی‌های کم و متوسط، انرژی زلزله از طریق تسلیم خمشی صفحات فولادی ذکرشده جذب می‌شود، در حالی که با افزایش مقادیر جابجایی، الگوی تسلیم به سمت کششی می‌رود و مقادیر سختی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابند.

نوع دیگر رایج میراگرهای تسلیمی، میراگرهای شکاف‌دار (SSD)،[۱۲-۱۴] هستند، که در آن‌ها از صفحات فولادی با شکاف‌های عمودی استفاده می‌شود. رفتار صفحه بعد از حذف شکاف‌ها به‌صورت برشی- خمشی است و ظرفیت جذب انرژی مطلوبی دارند. هر چند که به‌علت پدیده‌ی تمرکز تنش در اطراف شکاف‌ها بعضاً شکست برشی پیش از موعد در صفحات مشاهده می‌شود؛ اما این نقیصه را می‌توان با ارائه‌ی الگوهای متنوع برای شکل شکاف‌ها تا حدود زیادی بر طرف کرد.[۱۵]

میراگرهای متنوعی با ایده‌ی بهره‌گیری از میلگردهای فولادی به‌عنوان جزء تسلیم‌شونده پیشنهاد شده است،[۱۶-۱۸] لیکن نخستین‌بار واستراوالیس[1] و همکاران (۲۰۱۳)،[۱۹] به‌منظور استفاده در اتصال صلب پس‌تنیده‌ی فولادی و به‌عنوان قسمت جاذب انرژی اتصال، ایده‌ی استفاده از میراگرهای ساخته‌شده از میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی[2] را مطرح کرده‌اند. ایده‌ی اصلی میلگردهای غیرمنشوری به شکل ساعت شنی نیز همانند صفحات X شکل میراگرهای ADAS است، که سطح مقطع متناسب با لنگر وارده تغییر می‌کند تا تمامی نقاط میراگر هم‌زمان به تسلیم برسند. در اتصال پیشنهادی، نیروی موجود در کابل‌های پس‌تنیدگی عامل بازگرداندن زاویه بین تیر و ستون به حالت اولیه بوده است، در حالی که میلگردهای ساعت شنی، وظیفه‌ی استهلاک انرژی را به‌عهده داشته‌اند.

گرمه[3] و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۰] با استفاده از ایده‌ی میلگردهای ساعت شنی، یک نوع میراگر دورانی را بر روی بادبندهای شورون نصب کرده‌اند، که با توجه به حرکت دورانی نسبی بین تیر و بادبند، انرژی لرزه‌ای از طریق تسلیم پیچشی میلگردهای ساعت شنی جذب شده است. در ادبیات فنی مطالعات صورت‌گرفته بر روی میراگرهای تسلیمی، به‌درستی عبارت فیوز به‌جای میراگر استفاده شده است، چرا که این عضو با تسلیم‌شدن در حین بارگذاری از آسیب‌دیدن سایر نقاط سازه جلوگیری می‌کند و از طرف دیگر، تعویض آن اقتصادی‌تر و آسان‌تر از تعویض سایر المان‌های سازه‌ای است؛ به عبارت بهتر، شاخص اصلی یک فیوز سازه‌ای مطلوب، قیمت پایین، و سهولت تعویض آن خواهد بود.

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان، یک نوع میراگر ساعت شنی پیشنهاد و رفتار چرخه‌ای آن به‌صورت آزمایشگاهی و با درنظرگرفتن دو روش مختلف اتصال بررسی شده است. مهم‌ترین ویژگی میراگرهای ساعت شنی، مقطع غیر منشوری آن‌هاست، که سبب تغییر سطح مقطع میله متناسب با نیروهای داخلی در طول عضو می‌شود و یک عضو بهینه را ارائه می‌کند. در این حالت، تمامی نقاط میله در اثر بارگذاری به شکل یکنواختی تسلیم می‌شوند و در ظرفیت باربری نهایی مشارکت مؤثرتری دارند؛ به‌طوری که نسبت انرژی جذب‌شده به وزن در مقایسه با میله‌های منشوری در حالت بیشینه قرار دارد. همچنین نوع سازوکار رفتاری میلگردها به شکل خمشی است، که می‌توان گفت یک ویژگی منحصربه‌فرد در مقایسه با بیشتر میراگرهای تسلیمی است، که رفتار حاکم بر آن‌ها به‌صورت فقط خمشی است و باعث بهره‌گیری مناسب‌تر از ظرفیت مصالح خواهد بود.

قابلیت تعویض میلگردهای مذکور پس از زلزله، به‌ویژه در حالت اتصال به کمک پیچ و مهره، باعث سرعت بیشتر و همچنین کاهش هزینه‌های بازسازی و مرمت سازه‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در ساخت میراگر ساعت شنی از میلگردهای معمول در صنعت ساختمان استفاده می‌شود، که به نوبه‌ی خود موجب سهولت ساخت و نصب آن خواهد بود و همچنین هزینه‌های ساخت و تعویض آن را در مقایسه با سایر روش‌های موجود به‌شدت کاهش خواهد داد.

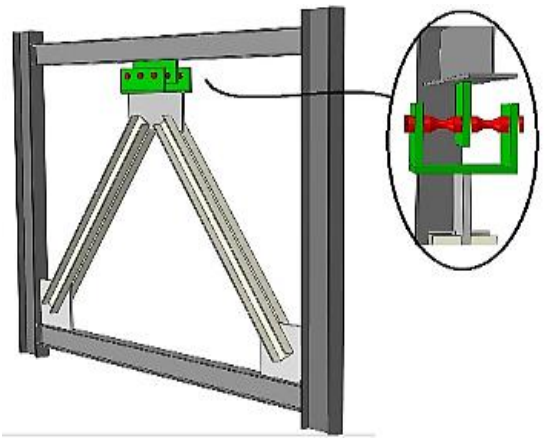
۲. معرفی میراگر با فیوز ساعت شنی

۱.۲. مشخصات هندسی و اجزاء تشکیل‌دهنده

در شکل ۱، نمای کلی هندسه‌ی میراگر پیشنهادی به همراه نحوه‌ی اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میراگر مذکور از سه جزء تشکیل شده است:

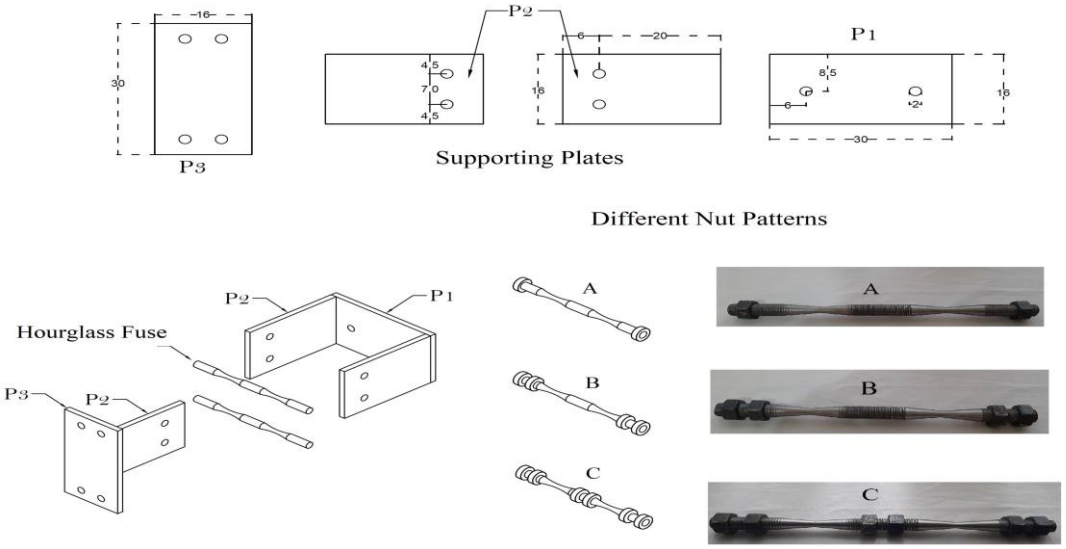
۱) تکیه‌گاه میانی: شامل یک ورق فولادی است، که به بال تحتانی تیر متصل می‌شود و همراه با تغییرمکان‌های جانبی تیر جابجا می‌شود.

۲) تکیه‌گاه‌های کناری: شامل سه ورق فولادی هستند، که به شکل U به یکدیگر جوش می‌شوند و تکیه‌گاه کناری میلگردهای ساعت شنی به‌حساب می‌آیند.



شکل ۱. میراگر ساعت شنی و نحوه‌ی اتصال آن در قاب فولادی به کمک بادبند شورون.

[1] Vasdravellis
[2] Hourglass Shape Pins
[3] Garmeh



شکل ۲. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی میراگر ساعت شنی و الگوهای متفاوت آرایش مهره‌های اتصال (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

۳) فیوزهای ساعت شنی: فیوزهای ساعت شنی شامل میلگردهای فولادی رایج در صنعت ساختمان هستند، که به‌کمک دستگاه تراشکاری [۴] به‌شکل ساعت شنی تراش داده می‌شوند.

به‌منظور اتصال میلگردهای ساعت شنی به صفحات فولادی تکیه‌گاهی میراگر از دو روش (الف) جوشکاری و (ب) اتصال به‌کمک مهره استفاده شده است.

در روش اتصال به کمک مهره، ابتدا میانه و انتهای میلگردها رزوه می‌شوند و با عبور از سوراخ‌های تعبیه‌شده در ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به‌کمک مهره و در سه آرایش متفاوت (A، B، و C) به‌ورق‌های تکیه‌گاهی اتصال می‌یابند؛ اما در روش اتصال جوشی، میلگردها به ورق‌های اتصال جوش داده می‌شوند. جزئیات اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی میراگر و همچنین الگوهای متفاوت آرایش مهره‌های اتصال و ابعاد و اندازه‌های قطعات در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۲. روابط حاکم بر رفتار میلگردهای ساعت شنی

در شکل ۳، مدل ساده‌شده‌ی میلگرد ساعت شنی به شکل یک تیر نشان داده شده است؛ که با توجه به شرایط تکیه‌گاهی و نحوه‌ی بارگذاری، می‌توان آن‌ها را به‌صورت یک تیر دو سر گیردار با بار متمرکز در وسط در نظر گرفت، که با توجه به شرایط تقارن، فقط نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی نیمی از آن نشان داده شده است.

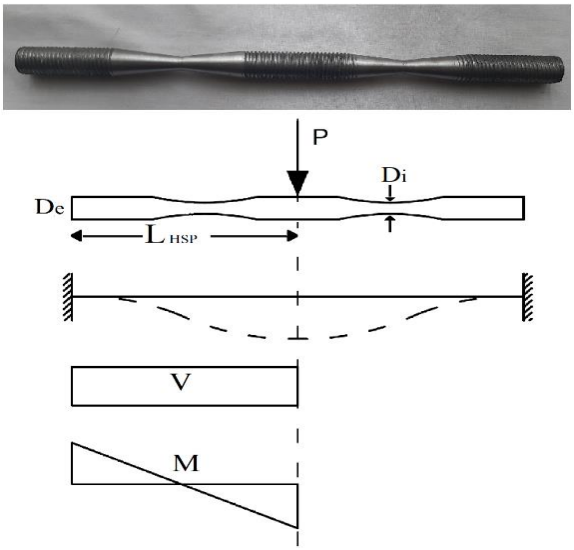
ظرفیت نهایی میلگرد ساعت شنی (P_{HSP}) را می‌توان به کمک تحلیل خمیری تعیین کرد. برای این منظور، ابتدا همان‌طور که گفته شد، براساس شرایط تقارن، ظرفیت خمیری نیمی از میلگرد ساعت شنی (V_{HSP}) براساس ظرفیت‌های خمیری خمشی و برشی مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$M_{pl} = \frac{D_e^3}{6} f_y \qquad (۱)$$

$$V_{pl} = 0.9 \frac{\pi D_i^2}{4} \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \qquad (۲)$$

که در آن‌ها،

f_y : تنش تسلیم مصالح فولادی میلگردها،



شکل ۳- مدلسازی میلگرد ساعت شنی به‌صورت تیر دو سر گیردار و نمودارهای برش و خمش.

D_e : قطر میلگرد،

D_i : کمینه‌ی قطر تراش داده‌شده‌ی میلگرد به شکل ساعت شنی.

ضریب ۰/۹ در رابطه‌ی ۲، برای لحاظ‌کردن نسبت بین تنش برشی بیشینه و میانگین در مقاطع دایروی است. در یک طراحی مناسب، ظرفیت خمیری برشی مقطع باید از ظرفیت خمشی آن بیشتر باشد؛ به عبارت دیگر، تسلیم خمشی باید قبل از تسلیم برشی اتفاق افتد.[۲۰]

براساس روابط تعادل استاتیک، رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت:

$$V_{HSP} = \frac{2M_{PL}}{L_{HSP}} < V_{PL} \qquad (۳)$$

که در آن، L_{HSP} طول میلگرد ساعت شنی است، که در شکل ۳ مشخص شده است. با توجه به اینکه V_{HSP} از تحلیل نیمی از میلگرد محاسبه شده است؛ بنابراین، ظرفیت کلی میلگرد ساعت شنی (P_{HSP}) مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه

[4] Lathe

می‌شود:

$$P_{HSP} = 2 \times V_{HSP} \quad (۴)$$

۳. بررسی آزمایشگاهی میراگر پیشنهادی

از آنجا که عامل اصلی تعیین‌کننده‌ی رفتار میراگر پیشنهادی، نحوه‌ی عملکرد میلگردهای ساعت شنی است؛ لذا در آزمایشگاه، میلگردهای مذکور تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند و نمودار رفتار چرخه‌ای و همچنین ظرفیت جذب انرژی آن‌ها بررسی شده است. علاوه‌بر این همان‌طور که گفته شد، روش اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی اعم از جوشکاری و یا با استفاده از مهره و همچنین الگوهای متفاوت نصب مهره‌ها در اتصال تأثیر آن در نحوه‌ی عملکرد میراگر به‌وسیله بارگذاری پوش مطالعه شده است.

۱.۳. مشخصات فنی و هندسی نمونه‌ها

در ابتدا به‌منظور انتخاب جنس مصالح فولادی میلگردهای ساعت شنی، از ۴ نمونه‌ی میلگرد فولادی رایج در بازار ایران (میله‌های ساخته‌شده از ST۳۷ و CK۴۵ و همچنین میلگردهای AII و AIII)، آزمایش کشش استاندارد میلگرد به‌عمل آمد و میانگین نتایج مصالح به‌عنوان مشخصات مکانیکی آن در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میله‌ی ساخته‌شده از فولاد CK۴۵ به‌علت مقاومت بالا و در عین حال شکل‌پذیری مناسب انتخاب شد، سپس میلگردهای ساخته‌شده از فولاد CK۴۵ به‌وسیله‌ی دستگاه تراش‌کاری به شکل ساعت شنی تراش داده شد. به‌منظور ساخت ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر از ورق فولاد نرمه‌ی ST ۳۷ استفاده شده است.

ورق‌های تکیه‌گاهی به کمک گیوتین برش خورده و سوراخ‌های موردنظر برای عبور میلگردهای ساعت شنی به‌وسیله‌ی پانچ در آن‌ها ایجاد شده است. این تذکر لازم است که قطر سوراخ‌های استاندارد ایجادشده براساس بند ۲.۳.۹.۲.۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، ۲ میلی‌متر نسبت به قطر میلگردهای ساعت شنی بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. برای اتصال ورق‌ها نیز از جوش گوشه استفاده شده است. ابعاد و اندازه‌ی فیوز ساعت شنی و ورق‌های اتصال در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

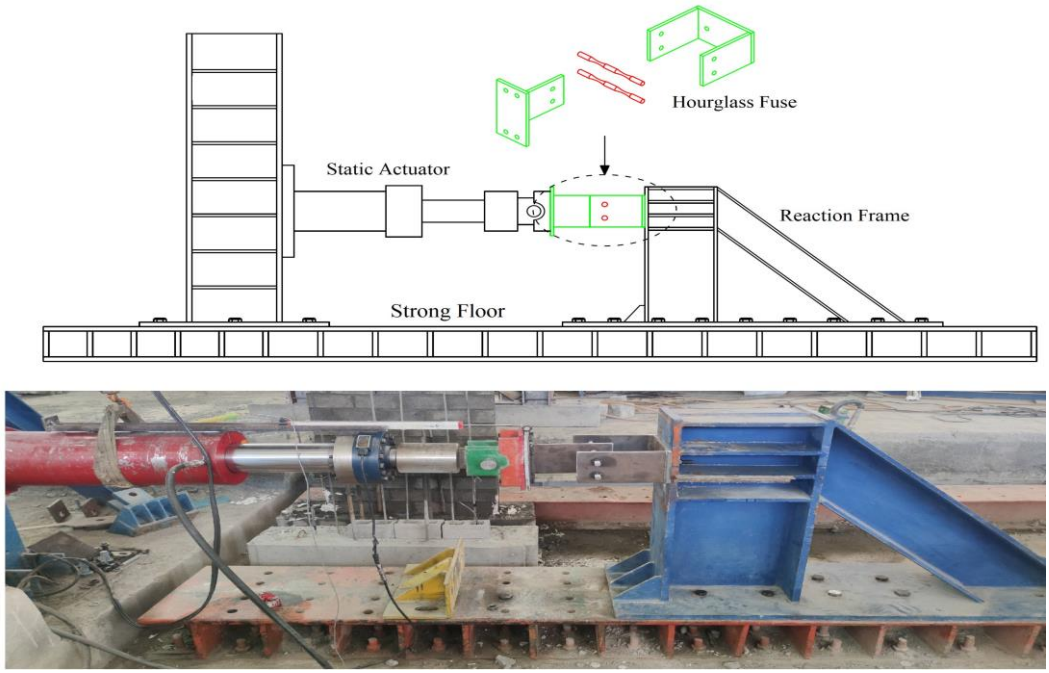
۲.۳. پیکربندی[5] آزمایشگاهی

همان‌طور که گفته شد، با توجه به نقش کلیدی رفتار میلگردهای ساعت شنی در نحوه‌ی عملکرد کلی میراگر پیشنهادی، فیوزهای ساعت شنی ساخته‌شده در یک ستاپ آزمایشگاهی (مطابق شکل ۴) توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن تحت بارگذاری جابجایی کنترل قرار گرفتند. جک هیدرولیکی روی قسمت ستون (قائم) قاب صلب قرار گرفته و برای برقراری شرایط تکیه‌گاه قوی نیز نمونه‌ی تحت آزمایش از سمت دیگر به قاب سخت دیگری تکیه داشته است. مجموعه‌ی قاب‌های صلب همگی بر روی کف قوی آزمایشگاه سوار بوده‌اند.

با توجه به اینکه کلاهک جک به‌صورت مفصلی به آن متصل شده است، به‌منظور جلوگیری از دوران کلاهک در حین آزمایش و خطای احتمالی ناشی از خروج از مرکزیت بار اعمال‌شده، دو میلگرد ساعت شنی به شکل متقارن در بالا و پایین نمونه تعبیه و بارگذاری شده‌اند.

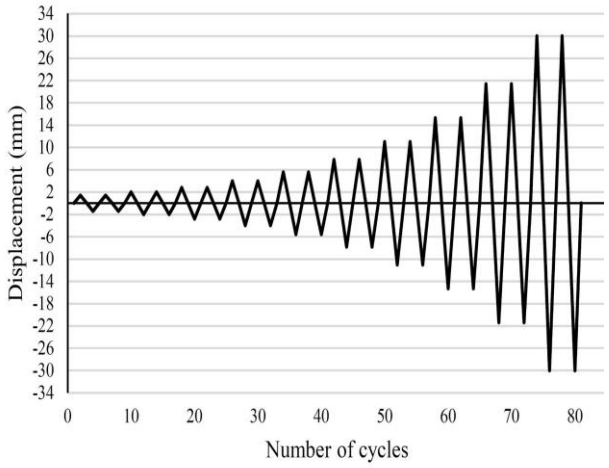
جدول ۱. نتایج آزمون کشش مصالح فولادی میلگردها.

مصالح	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ε_u (%)	E (GPa)
ST-37	240	450	23	200
CK-45	465	550	18	210
AII	305	520	19	210
AIII	400	600	12	205



شکل ۴. ستاپ آزمایشگاهی.

[5] Setup



شکل ۵. الگوی بارگذاری اعمالی مطابق با آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱.[۱۸]

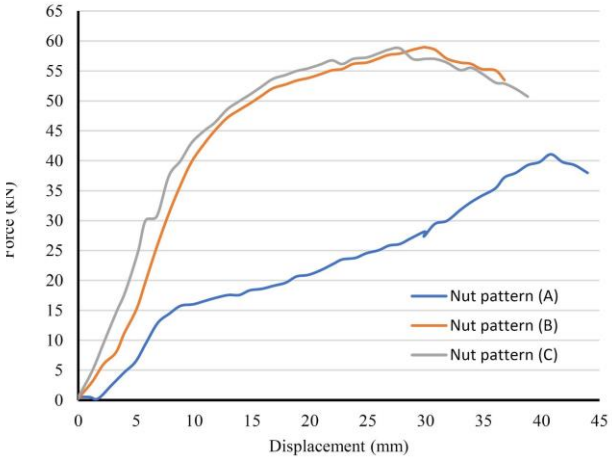
در پیکربندی مذکور، فیوزهای ساعت شنی تحت دو نوع بارگذاری متفاوت قرار گرفتند. در ابتدا، جهت تعیین چیدمان بهینه‌ی مهره‌ها در اتصال فیوزهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر به روش مهره، فیوزهای مذکور تحت بارگذاری پوش قرار گرفتند و پس از آن، الگوی بهینه‌ی حاصل به‌منظور بررسی رفتار چرخه‌ای تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است.

الگوی بارگذاری رفت و برگشتی اعمال‌شده منطبق بر دستورالعمل بارگذاری آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱،[۱۹] با مقدار جابجایی بیشینه‌ی ۳۰ میلی‌متر بوده است (شکل ۵). مقدار تغییرمکان در هر دو سیکل متوالی با هم برابر بوده و سپس برای گام بعدی مقدار آن ۴۰٪ افزایش یافته است. بر طبق الگوی مذکور، مقادیر جابجایی اعمالی به نمونه‌ها برابر با ۱/۴، ۲، ۲/۸، ۴، ۵/۶، ۷/۸، ۱۱، ۱۵/۳، ۲۱/۴، و ۳۰ میلی‌متر بوده است. این تذکر لازم است که میراگرهای تسلیمی، حساسیت چندانی به‌سرعت بارگذاری نداشته و در کلیه‌ی نمونه‌ها، بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شده است.[۲۰]

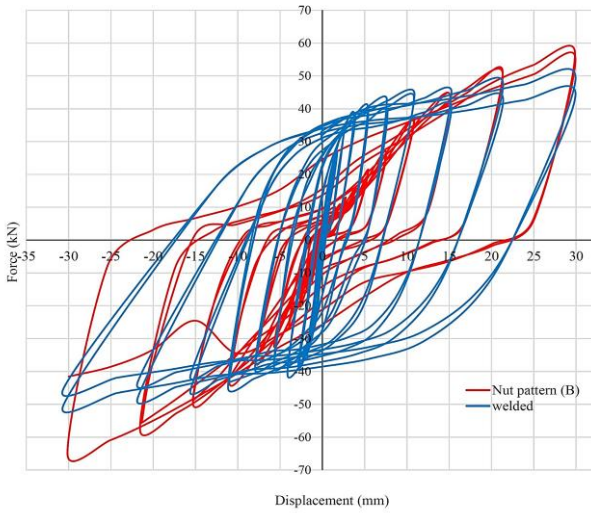
۳.۳. رفتار کلی نمونه‌ها

برای ارزیابی تأثیر نحوه‌ی اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی، رفتار منحنی نیرو- جابجایی میراگر با چیدمان‌های متفاوت مهره‌های متصل‌کننده، تحت اثر بارگذاری پوش بررسی و مطالعه شده است. بدین منظور، سه آرایش متفاوت مهره (A، B، و C) مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. نمودار متناظر نیرو- جابجایی هر یک از سه آرایش اخیر، تحت بارگذاری پوش در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌ی A در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر به شکل قابل‌ملاحظه‌ای، مقاومت و سختی کمتری دارد؛ به‌طوری‌که سختی اولیه و مقاومت نهایی آن به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه‌ی B کمتر بوده است. به‌علاوه، افت سختی قابل‌توجهی را در جابجایی حدود ۸ میلی‌متر تجربه کرده است؛ که علت اصلی آن، افزایش صلبیت شرایط تکیه‌گاهی در حالت استفاده از دو مهره به‌جای تک‌مهره بوده است. لذا، هر چند که ایده‌ی اولیه‌ی استفاده از تک‌مهره به‌علت سهولت در نصب و مونتاژ مفید فایده به نظر می‌رسید؛ اما همان‌طور که اشاره شد، اثر آن در کاهش سختی و مقاومت غیرقابل‌چشم‌پوشی است. از طرفی، چنانچه از تفاوت اندک در مقادیر سختی اولیه صرف‌نظر شود،



شکل ۶. نمودار پوش الگوهای متفاوت چیدمان مهره‌ها در اتصال به کمک مهره.

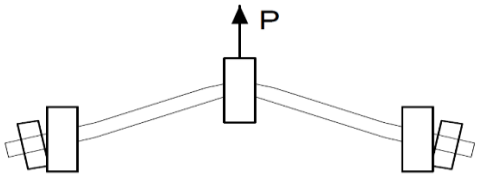


شکل ۷. نمودار چرخه‌ای آرایش مهره‌ی B در حالت مهره‌ی معمولی و اتصال جوشی.

می‌توان گفت نمونه‌های B و C، رفتاری تقریباً مشابهی داشته‌اند؛ که در این بین، نمونه‌ی B به‌علت سهولت در نصب، برای ادامه‌ی مطالعه و همچنین بارگذاری چرخه‌ای انتخاب شده است.

نمودار چرخه‌ای[۶] آرایش مهره‌ی B و همچنین نمونه‌ی جوش‌شده تحت بارگذاری رفت و برگشتی در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمونه‌ها سختی اولیه‌ی مناسبی داشته و زوال مقاومت و سختی محسوسی در آن‌ها مشاهده نشده است، ولی باریک‌شدگی[۷] قابل ملاحظه‌ای در رفتار چرخه‌ای نمونه‌ی پیچ و مهره‌ای مشاهده شده است. باریک‌شدگی، پدیده‌ای است که در برخی از سیستم‌های باربر جانبی مانند قاب‌های خمشی بتن‌آرمه و یا سیستم‌های اتصال پس‌تنیده و یا سیستم‌های میراگر انرژی، مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی[۸] بروز می‌کند. در اتصال به کمک پیچ‌ومهره در فاز بارگذاری، با افزایش مقدار نیروی اعمالی به میله‌ها، عملکرد هم‌زمان رفتار خمشی و برشی باعث افزایش طول میله می‌شود. از آنجا که برخلاف حالت جوش‌شده، هیچ‌گونه اتصالی بین مهره و صفحه‌های تکیه‌گاهی وجود ندارد، این افزایش طول باعث

[6] Hysteresis
[7] Pinching
[8] Shape memory alloy



شکل ۸. ایجاد فاصله و کرنش پس‌ماند مابین مهره و ورق‌های تکیه‌گاهی در حالت اتصال به کمک مهره.

به‌وجودآمدن فاصله و همچنین زاویه‌ی بین مهره و صفحه‌های اتصال می‌شود (شکل ۸).

در فاز باربرداری تا مرحله‌ی جبران فاصله و زاویه‌ی به‌وجودآمده و شکل‌گیری مجدد شرایط تکیه‌گاهی تماس کامل مابین مهره و صفحه‌ها، کاهش توأمان سختی و مقاومت باعث به‌وجودآمدن باریک‌شدگی در رفتار چرخه‌ای میراگر می شود. این در حالی است که در حالت جوش‌شده به‌علت تماس کامل و دائم بین میله‌ها و صفحه‌های تکیه‌گاهی، اثر باریک‌شدگی از بین می‌رود و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت جذب انرژی مشاهده می‌شود.

۴. تحلیل نتایج حاصل از آزمایش

۱.۴. پاسخ در بارگذاری مونوتونیک

بادقت در نمودار پوش بار- جابجایی نمونه‌ها (شکل ۶)، اثر نحوه‌ی آرایش مهره-های به‌کاررفته در اتصال میلگردهای ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی بر روی رفتار کلی میراگر قابل توجه و مشخص است. نمونه‌ی A در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر نقطه‌ی تسلیم نمونه‌های B و C حدوداً در نقطه‌ی متناظر با جابجایی ۱۲ میلی‌متر بوده است، در حالی که نمونه‌ی کم‌مقاومت A در جابجایی معادل نصف مقدار مذکور دچار تسلیم شده است.

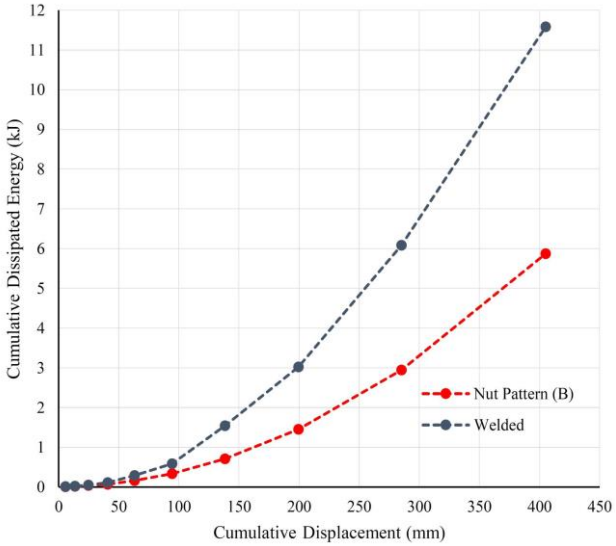
همان‌طوری که از وضعیت نمودارهای تغییرشکل‌یافته‌ی B و C پیداست، رفتار نمونه‌ها افزایش مقاومت خوبی را در نتیجه‌ی رفتار خمشی از خود بروز داده‌اند. در جدول ۲، پارامترهای مهم به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است؛ که در آن، سختی کشسان (K) از نسبت مقاومت تسلیم به تغییرمکان تسلیم به‌دست آمده است.

۲.۴. پاسخ در بارگذاری چرخه‌ای

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به اهمیت شناخت و تجزیه‌وتحلیل عملکرد میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای، نمونه‌ی مهره‌ای با آرایش نوع B و نمونه‌ی اتصال جوشی تحت بارگذاری چرخه‌ای با پروتکل آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱،[۲۱] قرار گرفتند. نمودار بار- تغییرمکان چرخه‌ای در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان گفت که در تمامی نمونه‌ها، نقطه‌ی تسلیم در محدوده‌ی تغییرمکان‌های کوچک بروز کرده است، که به‌نوعی بیانگر انتقال آرام وضعیت نمونه از محدوده‌ی کشسان به غیرکشسان است همچنین در تغییرمکان‌های کوچک، یعنی تا گام چهارم بارگذاری متناظر با تغییرمکان

جدول ۲. پارامترهای مهم حاصل از بارگذاری پوش.

نمونه	D_y (mm)	P_y (kN)	D_u (mm)	P_u (kN)	K_{el}
A	8.5	17	44	37	2.1
B	8	31	36	53	3.87
C	7.5	30	39	50	4



شکل ۹. نمودار انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی در برابر جابجایی تجمعی.

۵/۶ میلی‌متر، تفاوت قابل‌توجهی بین سختی مؤثر نمونه‌های جوشی و مهره‌ای مشاهده می‌شود. از طرفی، طبق آنچه در بخش ۳.۳ گفته شد، رفتار باریک‌شوندگی که در اتصال به کمک مهره بروز می‌کند، با تغییر روش اتصال به جوشی اصلاح شده است، که اثر آن در چاق‌شدن چرخه‌های پاسخ مشهود است و اثر مثبتی در ظرفیت جذب انرژی داشته است. هر دو نمونه تا آخرین گام بارگذاری، رفتاری فاقد افت قابل‌توجه در سختی و همچنین مقاومت بروز داده‌اند.

۳.۴. ظرفیت جذب انرژی

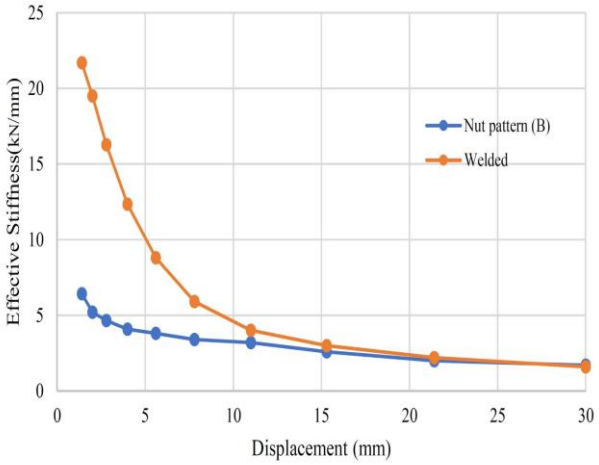
از مهم‌ترین شاخصه‌ها در ارزیابی عملکرد میراگر، توانایی جذب و استهلاک انرژی است. طبق تعریف، انرژی جذب‌شده عبارت از سطح محصور به حلقه‌ی چرخه‌ای در نمودار نیرو- جابه‌جایی است. چنانچه مقادیر مساحت‌های مذکور در جابجایی‌های متوالی با هم جمع شوند، مقدار حاصل، انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی خواهد بود. در شکل ۹، تغییرات کمیت انرژی جذب‌شده‌ی تجمعی در مقابل جابجایی تجمعی مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه در بخش ۳.۳ در رابطه با اصلاح مشکل باریک‌شدگی نمودار چرخه‌ای میراگر در صورت استفاده از فن جوش‌کاری برای اتصال میلگردهای ساعت شنی به جای اتصال به کمک مهره بیان شد، در اتصال جوشی، حلقه‌های چرخه‌ای به‌اصطلاح چاق‌تری مشاهده می‌شود؛ لذا دور از انتظار نخواهد بود که با افزایش سطح زیر نمودار، طبق تعریف، انرژی جذب‌شده توسط میراگر با اتصال جوشی نسبت به حالت اتصال مهره‌ای افزایش پیدا کند. مقادیر حاصل از انرژی جذبی تجمعی، به‌ویژه در نمونه‌ی جوش‌شده و با توجه به وزن کم میراگرها، نشان‌دهنده‌ی توانایی مطلوب میراگر در جذب انرژی است.

۴.۴. سختی مؤثر و میرایی لزج معادل

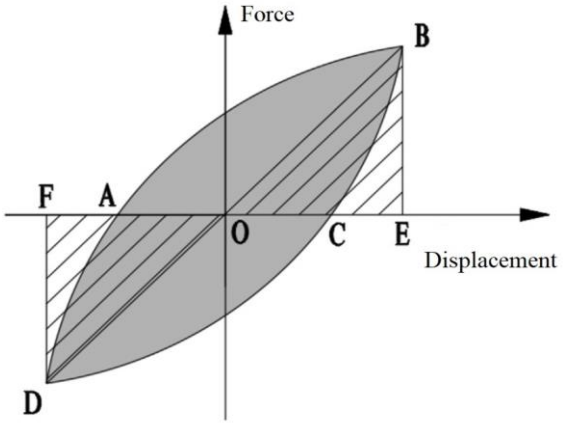
در اغلب موارد، رفتار میراگر را می‌توان به‌صورت رفتار یک سیستم تک‌درجه‌ی آزادی با میرایی لزج معادل بیان کرد. سختی سیستم مذکور، که به آن سختی مؤثر گفته می‌شود، با استفاده از رابطه‌ی ۵ مشخص می‌شود:

$$K_{eff} = \frac{|P_{max}| + |P_{min}|}{|\delta_{max}| + |\delta_{min}|} \qquad (۵)$$

که در آن، P_{max} و P_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین نیروی تحمل‌شده



شکل ۱۰. تغییرات سختی مؤثر به ازاء جابجایی‌های مختلف.



شکل ۱۱. مساحت‌های استفاده‌شده در محاسبه‌ی میرایی معادل.

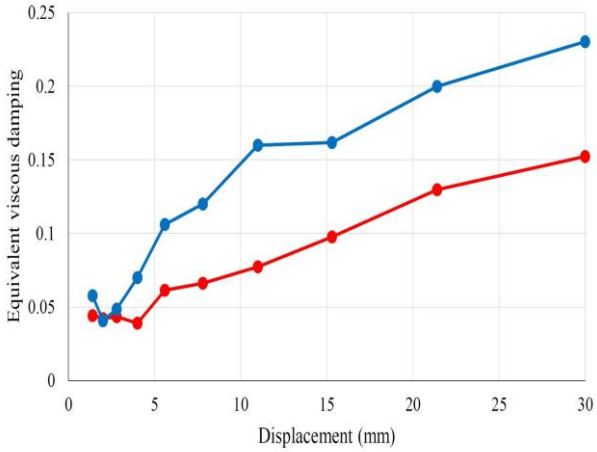
توسط نمونه در هر چرخه‌ی بارگذاری بر حسب KN هستند. همچنین δ_{max} و δ_{min}، مقادیر جابجایی متناظر با نیروهای مذکور بر حسب میلی‌متر (mm) هستند. در شکل ۱۰، مقدار سختی مؤثر در هر سیکل بارگذاری و به ازاء تغییرمکان اعمال‌شده مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که پیداست، با افزایش جابجایی و تعداد سیکل‌های بارگذاری، سختی نمونه با آهنگ نسبتاً ثابتی در حال کاهش است. البته با وجود اینکه سختی نمونه‌ی جوش‌شده بیشتر از نمونه‌ی مهره‌شده است؛ ولی تغییرات سختی هر دو مورد مشابه است و رفتار یکسانی دارند. همچنین در هر دو نمونه در سیکل اول با افزایش بار و جابجایی وارده، افت قابل‌توجهی در میزان سختی مؤثر به چشم می‌خورد؛ به‌طوری که در همان سیکل، سختی مؤثر به میزان ۵۰٪ کاهش یافته است.

میرایی معادل سیستم اشاره‌شده (β_{eq})، نیز مطابق رابطه‌ی ۶ از برابر قراردادن انرژی جذب‌شده توسط میراگر در هر سیکل با انرژی جذب‌شده توسط فنری با سختی مؤثر (K_{eff}) به‌دست می‌آید (شکل ۱۱).

$$\beta_{eff} = \frac{۱}{۲\pi} \times \frac{E_D}{S_{(\square OBE+\square ODF)}} \qquad (۶)$$

که در آن، E_D انرژی جذب‌شده توسط میراگر است، که عبارت از مساحت محصور به حلقه‌ی چرخه‌ای در هر سیکل بارگذاری و $S_{(\square OBE+\square ODF)}$ ، انرژی



شکل ۱۲. تغییرات میرایی معادل با افزایش تغییرمکان.

جذب‌شده توسط سیستم کشسان با سختی مؤثر است. مقادیر میرایی معادل در برابر جابجایی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

نمودار اخیر، تغییرات افزایشی میرایی لزج معادل نمونه‌ها در طول بارگذاری را نشان می‌دهد. هر چند چنین تغییراتی در آزمایش‌های تحت بارگذاری چرخه‌ای دور از انتظار نیست؛ ولی می‌توان چنین استنباط کرد که نمونه‌ی جوش‌شده در مقایسه با نمونه‌ی مهره‌شده، لزجت بالایی دارد و آهنگ افزایش بیشتری را نیز نشان می‌دهد؛ به‌طوری که با پیشروی سیکل‌های بارگذاری، میرایی لزج نمونه‌ی جوش‌شده، افزایش ۲۰۰ درصدی را تجربه کرده است. در حالی که همین تغییرات در نمونه‌ی مهره‌شده، حدود ۱۰۰٪ برآورد شده است. این نکته قابلیت نمونه‌ی ساعت شنی جوش‌شده در استهلاک انرژی قابل‌انتظار را بیشتر اثبات می‌کند.

۵. خلاصه و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک نوع میراگر فولادی تسلیم‌شونده با استفاده از میلگردهای غیرمنشوری به فرم ساعت شنی به‌منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد شده و مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای اتصال میلگردها به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر، از دو روش متفاوت جوش‌کاری و اتصال به کمک مهره استفاده شده است. نمونه‌ها به‌صورت جداگانه تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و مونوتونیک قرار گرفته‌اند. در بارگذاری چرخه‌ای، ضوابط دستورالعمل ۴۶۱ FEMA و در بارگذاری مونوتونیک نیز سرعت بارگذاری ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از تأثیر قابل‌ملاحظه‌ی نوع اتصال میلگردها در رفتار کلی میراگر است؛ که در اینجا به اهم آن‌ها اشاره شده است:

- با توجه به ساختار میراگر و شرایط تکیه‌گاهی و نیز بارگذاری میلگردها، که می‌توان آن را به‌صورت تیر گیردار- هدایت‌شونده با بار متمرکز در یک سمت در نظر گرفت، با استفاده از میلگردهای رایج در صنعت ساختمان، یک عضو غیرمنشوری با مقطع متغیر، متناسب با نیروهای داخلی و به شکل ساعت شنی به‌عنوان بخش تسلیم‌شونده‌ی (فیوز) میراگر انتخاب شد. نحوه‌ی اتصال این جزء به ورق‌های تکیه‌گاهی میراگر نقش مؤثری در رفتار کلی میراگر داشته است.
- در اتصال نوع ۱، که در آن به کمک مهره، میلگردهای رزوه‌شده‌ی ساعت شنی به ورق‌های تکیه‌گاهی متصل شده‌اند، به‌منظور تعیین اثر نحوه‌ی چینش مهره‌ها در اتصال و همچنین یافتن حالت بهینه، سه نمونه با تیپ‌های مختلف

آرایش مهره (A، B، و C) پیشنهاد شدند و تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر تأثیر قابل‌ملاحظه‌ی چیدمان مهره‌ها در رفتار میراگر است؛به طوری که سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌ی A به ترتیب ۸۴ و ۴۳ درصد از نمونه‌ی B کمتر بوده است. در مجموع تیپ A به‌علت ساختار ناپایدار خود علاوه‌بر پایین‌بودن سختی اولیه، دچار افت مقاومت قابل‌توجه بوده و عملکرد مطلوبی نداشته است. از بین تیپ های B و C نیز با توجه به تشابه رفتاری دو نمونه، تیپ B به‌علت سهولت نصب به‌عنوان الگوی بهینه جهت انجام بارگذاری چرخه‌ای انتخاب شده است.

- در اتصال نوع ۲، میلگرهای ساعت شنی مستقیماً به صفحات تکیه‌گاهی جوش شده‌اند. این نمونه به همراه تیپ B، که دارای الگوی بهینه‌ی اتصال به کمک مهره است، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. براساس نتایج، نمودار چرخه‌ای نمونه‌ی تیپ B، باریک‌شدگی در فاز باربرداری داشته است، که باعث کاهش ظرفیت جذب انرژی آن به میزان قابل توجه ۹۰ درصدی نسبت به نمونه‌ی جوشی شده است. لذا اگرچه هر دو نمونه، رفتار چرخه‌ای پایدار و بدون افت قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت را از خود نشان داده‌اند، اما نمونه‌ی جوشی به‌علت توانایی بالاتر در جذب و میراسازی انرژی، برتری دارد.

- میرایی لزج معادل نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری حالت صعودی (با آهنگ ثابت) داشته است. در نمونه‌ی تیپ جوش‌شده، میزان افزایش میرایی لزج معادل در مقایسه با نمونه‌ی مهره‌ای تیپ B بیشتر و قابل‌ملاحظه‌تر بوده است؛ به‌طوری که نمونه‌ی جوشی در سیکل آخر بارگذاری افزایش ۲۰۰ درصدی میرایی را تجربه کرده است.

- نمونه‌ی جوشی با توجه به ساختار صلب‌تر در مقایسه با نمونه‌ی تیپ B، سختی کشسان اولیه‌ی بالاتری در حدود ۳ برابر داشته است. هر چند که روند کاهش سختی در طول آزمایش برای هر دو نمونه تقریباً یکسان بوده و هر دو نمونه، سختی برابری در گام آخر بارگذاری داشته‌اند.

- نتایج ظرفیت جذب انرژی تجمعی، نشان‌دهنده‌ی توان مطلوب جذب انرژی میراگر در هر دو روش اتصال جوشی و مهره‌ای با توجه به وزن پایین مصالح مصرفی (میلگردها ساعت شنی) است

References- منابع

1. Whittaker, A., Bertero, . V. V., Thompson, C. L. & Alonso, L. J., 1991. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices. *Earthquake Spectra*, *7*(4), pp. 563-604. https://doi.org/ 10.1193/1.1585644
2. Chen, . Y., Yu, W., Zhang, M. & Li, Y., 2022. A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*, *192*, p. 107214. https://doi.org/ 10.1016/j.jcsr.2022.107214
3. Li, Z., Shu, G. & Huan, . Z., 2019. Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*, *158*, pp. 28-40. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.008
4. Houshmand-Sarvestani, A., Totonchi, A., Shahmohammadi, M. A. & Salehipour, H., 2023. Numerical assessment of the effects of ADAS yielding metallic dampers on the structural behavior of steel shear walls (SSWs). *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, *51*(3), pp. 1626-1644.https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1875328
5. Youssef, A. A., Esfahani, M. R. & Zareian, M. S., 2023. Experimental evaluation of post-tensioned hybrid coupled shear wall system with TADAS steel dampers at the beam-wall interface. *Structures*, *53*, pp. 1283-1299.http://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.122
6. Mohammadi, R. K., Nasri, A. & Ghaffary, A., 2017. TADAS dampers in very large deformations. International *Journal of Steel Structures*, *17*, pp. 515-524. https://doi.org/10.1007/s13296-017-6011-y
7. Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P. & Su, Y.-F., 1993. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, *9*(3), pp. 505-528. https://doi.org/10.1193/1.1585727
8. Garivani, S., Aghakouchak, A. & Shahbeyk, S., 2016. Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *International Journal of Steel Structures*, *16*, pp. 177-196. https://doi.org/10.1007/s13296-016-3014-z
9. Farsi, A., Amiri, H. R. & Dehghan Manshadi, S. H., 2021. An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures. Structures, 34(December), pp. 4254-4268. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.069
10. Avestaeifar, P. & Khezrzadeh, . H., 2021. Experimental and numerical assessment of Piston Hybrid Frictional Metallic Damper (PHFMD). *Engineering Structures*, *243*, p. 112669. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112669
11. Jarrah, M., Khezrzadeh, H., Mofid, M. & Jafar, . K., 2019. Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, *154*, pp. 99-109. DOI:http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.024
12. Heyrani Moghaddam, S. & Shooshtari, A., 2023. Numerical and experimental investigation on seismic performance of proposed steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research, 200*, pp. 107646,.https://doi.org/ 10.1016/j.jcsr.2022.107646
13. Chan, RW., Albermani, F., 2008. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, *30*(4), pp.1058–1066. http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005
14. Hedayat, A. A., 2015. Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *Journal of Constructional Steel Research*, *114*, pp. 30-50.https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.003
15. Aminzadeh, M., Kazemi, H. S. & Tavakkoli, S. M., 2020. A numerical study on optimum shape of steel slit

dampers. *Advances in Structural Engineering*, *23*, pp. 2967-2981.DOI:10.1177/1369433220927281

16. Aghlara, R. & Tahir, M., 2018. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering Structures*, *159*, pp. 185-197.https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.049
17. Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Javanmardi, A. & Rupakhety, R., 2021. Experimental Study of a New Bar Damper Device for Vibration Control of Structures Subjected to Earthquake Loads. *Journal of Earthquake Engineering*, *25*(2), pp. 300-318.https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1515796
18. Zlatkov, D. et al., 2022. Experimental and Numerical Study of Energy Dissipation Components of a New Metallic Damper Device. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, *10*, pp. 1809-1829.https://doi.org/10.1007/s42417-022-00485-0
19. Vasdravellis, G., Karavasilis, TL. and Uy, B., 2013. Large-scale experimental validation of steel post-tensioned connections with web hourglass pins. *Journal of Structural Engineering*,*139*(6), pp.1033–1042. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000069
20. Garmeh, V., Akbarpour, A., Adibramezani, M., Kashani, A. and Adibi, M., 2021. Introducing and numerical study of an innovative rotational damper with replaceable hourglass steel pins. *Structures*. *33*, pp.2019-2035. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.072
21. Applied Technology Council, Mid-America Earthquake Center, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (US), Pacific Earthquake Engineering Research Center and National Earthquake Hazards Reduction Program (US), 2007. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Federal Emergency Management Agency.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.25-38

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Original Article

Enhancing the Durability and Elastic Modulus of Oil-Contaminated Soils In Wet-Dry Cycles Through Stabilization with Traditional Materials

Hadis Nasiri [1], Navid Khayat*[1] and Ahad Nazarpour [2]
[1] Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
[2] Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
* corresponding author:(navid.khayat@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 January 2024

Revised: 15 March 2024

Accepted: 21 April 2024

Keywords:

Wet-dry cycles,
stabilization,
durability,
oil-contaminated soils,
oil spill.

Abstract

Considering that the infrastructures in different regions experience different weather cycles that can lead to the creation of minor surface cracks to be noticeable, it is necessary to understand the durability behavior of soils. Although previous studies have extensively investigated the strength behavior of oil-contaminated soil, there is still no accurate understanding of the durability of oil-contaminated soil against wet-dry cycles. To fill these gaps, this research is focused on the durability characteristics of oil-contaminated soils. For this purpose, a series of laboratory tests were conducted to evaluate compaction, durability and microstructural analyses. In that regard, the soil was contaminated with oil in concentrations of 4, 7 and 10% and then stabilized with lime and cement in concentrations of 0, 3, 6 and 9% separately. Initial laboratory experiments, including Atterberg limits and compaction tests, were conducted. Subsequently, durability tests were performed to examine wet-dry cycles in 1, 3, and 6 cycles on oil-contaminated soil samples, as well as those stabilized with cement and lime. The results demonstrated that the highest durability was observed in the samples containing 4% oil and 9% cement in the 6th cycle, showing a 42% increase in resistance compared to a similar sample with the same percentage of oil and cement in the 3rd cycle. Additionally, the elasticity modulus of the oil-contaminated soil sample with 4% oil and stabilized with 6% lime was 2 times that of the 1st cycle in the 3rd cycle and 2.8 times that of the 3rd cycle in the 6th cycle. Microscopic analysis using electron field emission microscopy unveiled that the incorporation of cement and lime as stabilizing agents resulted in a denser and more compact structure of oil-contaminated soil. This comprehensive research endeavor seeks not only to advance the management practices of contaminated soils but also to uphold the conservation of natural resources while offering an alternative solution for the construction of secondary access roads.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

Hadis Nasiri: Investigation, Methodology, Writing-Original draft, Experimentation, Data curation.
Navid Khayat: Supervision, Conceptualization, Methodology, Technical support, Reviewing, Final Editing.
Ahad Nazarpour: Reviewing.

To Cite this article:
Nasiri, H, Khayat, N. and Nazarpour, A. 2025. Enhancing the Durability and Elastic Modulus of Oil-Contaminated Soils in Wet-Dry Cycles Through Stabilization with Traditional Materials, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.25-38.
https://doi.org/10.24200/J30.2024.63902.3295

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی

حدیث نصیری [۱]، نوید خیاط [۱*] و احد نظرپور [۲]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

[۲] گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

[*] نویسنده مسئول (navid.khayat@iau.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

واژگان کلیدی:

چرخه‌های تر- خشک،

تثبیت،

دوام،

خاک‌های آلوده،

نشت نفت.

چکیده

اگرچه مطالعات پیشین به‌طورگسترده، رفتار مقاومتی خاک آلوده به نفت را بررسی کرده‌اند، اما هنوز درک دقیقی از دوام خاک آلوده به نفت در برابر چرخه‌های تر- خشک وجود ندارد. برای پُرکردن خلأ علمی مذکور، پژوهش حاضر بر روی ویژگی‌های دوام خاک‌های آلوده به نفت متمرکز شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی تراکم، دوام، و آنالیزهای ریزساختاری انجام شده است. برای این منظور، خاک در غلظت‌های ۴، ۷، و ۱۰ درصد به نفت آلوده شد. سپس در درصدهای ۰، ۳، ۶، و ۹ به‌طورجداگانه با آهک و سیمان تثبیت شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش یافته است. بیشترین دوام‌ها مربوط به نمونه‌ی حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان، و نمونه‌ی حاوی ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک پس از گذراندن ۶ چرخه‌ی تر- خشک بوده است. تصاویر میکروسکوپی نشان داده است که استفاده از سیمان و آهک به‌عنوان عوامل تثبیت‌کننده منجر به ساختار متراکم‌تر خاک آلوده به نفت شده است.

۱. مقدمه

فرسایش خاک، یک پدیده‌ی طبیعی است، که توسط عواملی همچون باد و آب ایجاد و باعث حذف لایه‌های بالایی خاک می‌شود. این فرآیند ممکن است به‌طورتدریجی در طول زمان یا به‌صورت سریع رخ دهد.[۱] زیرساخت‌های حمل-ونقل، به‌عنوان مثال جاده‌ها، به‌راحتی تحت تأثیر فرآیند فرسایش قرار می‌گیرند، که منجر به ایجاد شکاف‌های متعدد کوچک یا بزرگ در سطح آن‌ها می‌شود. زیرساخت‌ها نه فقط تحت تأثیر عوامل طبیعی، مانند فرآیند فرسایش قرار دارند، بلکه تداخل انسانی نیز در ساخت‌وساز آن‌ها نقش دارد.[۲] علاوه‌بر این، شرایط و چرخه‌های مختلف مرتبط با موقعیت جغرافیایی آن‌ها در مناطق اقلیمی متفاوت، به‌عنوان یک عامل مهم، تأثیرگذار است. این مکانیسم‌ها می‌توانند فرآیند تخریب زیرساخت‌ها را سرعت بخشند و چالش‌های حفاظتی را برای پژوهشگران ایجاد کنند. پژوهشگران در سراسر جهان نتایج پژوهشی در زمینه‌ی خصوصیات مکانیکی و ویژگی‌های فرسایشی مواد ژئوتکنیکی ارائه داده‌اند.[۳]

از سوی دیگر، گسترش صنایع شیمیایی پس از ظهور دوره‌ی صنعتی، به افزایش چشمگیر آلاینده‌ها در محیط طبیعی و انسانی منجر شده‌است.[۴] در میان صنایع شیمیایی مختلف، صنعت پتروشیمی به رغم سرمایه‌گذاری و توجه زیاد به انرژی‌های جایگزین، همچنان یکی از اصلی‌ترین بازیگران در چشم‌انداز انرژی جهان باقی مانده است. امروزه، نفت همچنان یکی از نیازهای اساسی انرژی در جوامع مدرن است. با وجود تمامی تدابیر ایمنی و احتیاطی در صنعت نفت، حوادث نشت نفت در فرایند تولید، حمل و نقل، پالایش، و مصرف نفت یک اتفاق ناگزیر است.[۵] تعداد قابل توجهی از مناطق جهان تحت تأثیر آلودگی نفت قرار گرفته‌اند و نیاز به اجرای تدابیر ترمیمی و مدیریت مناسب دارند.[۶] آثار واردشده توسط نفت در خاک‌ها و مشکلات جدی محیطی، نشان‌دهنده‌ی مسائل پیچیده‌ای است که نیازمند درک بهتر آن‌هاست. به‌طورکلی، نشت نفت یک مسئله‌ی حیاتی در مناطق غنی از نفت در سراسر جهان محسوب می‌شود. در شکل ۱، نمایی از آثار نشت نفت در کانزاس، امریکا، بر روی زمین مشاهده می‌شود.

یک راه‌حل ممکن برای کاهش آثار نامطلوب خاک‌های آلوده در محیط‌زیست، استفاده‌ی مؤثر از خاک‌های آلوده به‌عنوان مصالح ساختمانی است.[۷] ادغام آن‌ها در زیرساخت‌ها، به‌عنوان مثال در جاده‌های روستایی یا جاده‌های دسترسی، که در نزدیکی سایت‌های نفت واقع شده‌اند، مزایای محیطی و اقتصادی قابل توجهی، از جمله کاهش هزینه‌های پروژه مرتبط با دسترسی به مواد دارد.[۸] شرکت‌های حمل خاک، هزینه‌های قابل‌توجهی برای دفع حجم زیادی از خاک‌ها با ویژگی‌های ژئوتکنیکی ناخوشایند از محل‌های ساخت و نیز هزینه‌های معنی‌داری برای حمل خاک مناسب از فواصل بلند به‌عنوان مصالح تحمیل می‌کنند.[۹] بنابراین، به استفاده از خاک آلوده‌ی نفتی و تثبیت‌شده با مواد افزودنی، به دو دلیل می‌توان توجه کرد. اولاً، روش اخیر می‌تواند هزینه و

استناد به این مقاله:

نصیری، حدیث، خیاط، نوید، و نظرپور، احد، ۱۴۰۴. بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص. ۲۵-۳۸. https://doi.org/10.24200/J30.2024.63902.3295

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۳۳

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

زمان مرتبط با حمل و دفع خاک آلوده را به شدت کاهش دهد. به جای انتقال خاک آلوده به محل دفع، می‌توان آن را در محل موردنیاز توسط فرآیندهایی مانند مخلوط‌کردن با مواد افزودنی تثبیت کرد. ثانیاً، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده می‌تواند منجر به بازیابی و استفاده‌ی مجدد از ارزش خاک آلوده شود. با بهره‌گیری از فرآیندهای بهینه‌سازی، خاک می‌تولند به یک وضعیت مناسب برای استفاده‌ی مجدد در پروژه‌های ساختمانی یا عمرانی تبدیل شود.[۱۰] این دیدگاه به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و مزایای اقتصادی ایجاد می‌کند. از این منظر، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده به‌عنوان یک رویکرد پایدار، فرصتی برای مدیریت و استفاده‌ی مؤثر از خاک آلوده به نفت در مکان‌های تحت تأثیر نشت نفت ارائه می‌دهد. همچنین، با توجه به طبیعت آب‌گریز نفت،[۱۱] استفاده از ماده‌ی مذکور در ساخت جاده‌های درجه دوم می‌تولند به جلوگیری از نفوذ آب کمک کند و فرآیند تخریب سایت خاکی را در چرخه‌های خشک و تر به تأخیر بیندازد.

تعداد زیادی از مطالعات به مشخصات خاک‌های آلوده به نفت و کاربردهای آن در مهندسی متمرکز شده‌اند. کاراباش[1] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۲] اثر آلودگی نفت در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک را بررسی کردند و دریافتند که دامنه‌ی خمیری خاک در اثر آلودگی تقریباً دو سوم کاهش یافته است. نتایج پژوهش خوشند[2] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۳] نشان داده است که مقدار مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)[3] با افزایش نفت تا ۵٪ بهبود یافته و سپس با افزایش درصد نفت، در همه‌ی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. در مطالعه‌ی سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۱] مشخص شد که زیست‌پالایی، آلودگی خاک را حدود ۵۰٪ کاهش داده است. همچنین در مقایسه با خاک آلوده، زیست‌پالایی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش نشست شده است. مطالعه‌ی نوکنده و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۴] نشان داده است که براساس آزمایش برش مستقیم، با افزایش آلودگی تا ۱۰٪ نفت، چسبندگی خاک به ترتیب از ۱۴/۵ کیلوپاسکال به ۷/۳ کیلوپاسکال کاهش یافته است، که به‌دلیل کاهش شکل‌پذیری خاک بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ویژگی‌های خاک آلوده به نفت اهمیت بسیار بالایی دارند. مطالعات اخیر، پایه‌ی نظری قوی را برای مهندسی و اهداف رفع آلودگی و نیز امکان بهینه‌سازی استفاده از خاک‌های آلوده به نفت را فراهم می‌آورند.

با توجه به تولید روزافزون نفت و همچنین وجود پالایشگاه‌های نفتی متعدد در اهواز، مسئله‌ی جلوگیری از نشت آلودگی‌های نفتی به زیرساخت‌ها، اهمیت



شکل ۱. نمایی از نشت نفت در کانزاس.

بسزایی دارد. به‌دنبال آلودگی‌های اطراف تأسیسات پالایشگاه‌ها ممکن است در زمان بهره‌برداری از چاه‌ها و تأسیسات نفتی، نیاز به خاک‌برداری و تعویض خاک باشد. این موضوع ممکن است باعث آسیب به محیط‌زیست شود و همچنین از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نباشد. بنابراین، انتخاب روش مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت برای استفاده‌ی مجدد از آن‌ها، نیازمند بررسی بیشتری است.

مرور ادبیات پژوهش در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تعدادی پژوهش بر روی خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت آن‌ها با استفاده از مواد مختلف صورت پذیرفته است، اما در پژوهش حاضر به بررسی خصوصیات دوام و ریزساختاری خاک‌های آلوده در اهواز، که مخازن و تأسیسات نفتی متعددی دارد، از طریق افزودن آهک و سیمان در درصدهای مختلف به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده پرداخته شده است. همچنین پژوهش حاضر می‌تواند به بهبود مدیریت مسائل زیست‌محیطی و زیرساخت‌ها در منطقه‌ی اهواز کمک کند و راهکارهای مؤثری برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت ارائه دهد.

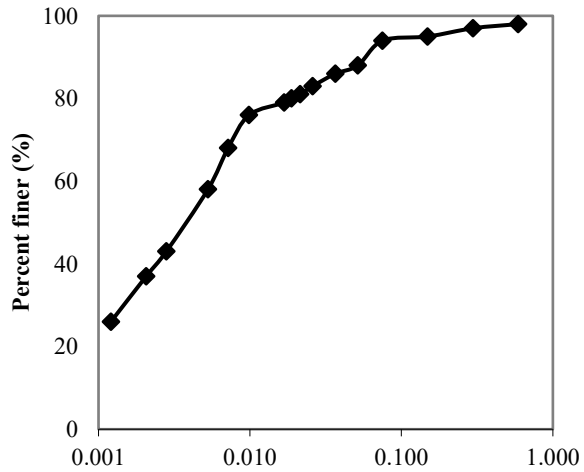
۲. مواد

۱.۲. خاک

نمونه‌ی خاک رسی از اهواز، خوزستان، ایران تهیه شده است. دامنه‌ی خمیری و حد روانی خاک به ترتیب ۲۷ و ۵۴ درصد تعیین شده است. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک جمع‌آوری‌شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود.. خاک براساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید خاک، به‌عنوان خاک رس با خمیرایی بالا (CH) طبقه‌بندی می‌شود. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب‌های غالب خاک، Si و Al هستند.

۲.۲. نفت

نفت استفاده‌شده در پژوهش حاضر، نفت خام نمک‌زدایی‌شده است، که از میدان نفت و گاز کارون ۱ در اهواز، ایران به‌دست آمده است. فرآیند نمک‌زدایی، گازهای سمی و آب را از نفت حذف می‌کند. برای تعیین میزان نفت در پژوهش حاضر، چند نمونه خاک از سایت‌های نفتی خوزستان جمع‌آوری و با استفاده از



شکل ۲. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک.

[1] Karabash
[2] Khoshand
[3] Unconfined Compressive Strength

دستگاه استخراج سوکسله[1] تجزیه و تحلیل شده‌اند. براساس غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده، بیشترین میزان نفت ثبت‌شده در نمونه‌های خاک آلوده به نفت، ۱۰٪ بوده است. بنابراین، درصد اخیر برای بررسی رفتار خاک آلوده و همچنین درصدهای کمتر شامل ۴ و ۷ درصد انتخاب شده‌اند. پس از به‌دست‌آوردن نفت خام و انتقال آن به آزمایشگاه، با استفاده از ترکیب دستی به‌عنوان یک روش مصنوعی با خاک مخلوط شد.

۳.۲. سیمان

به‌منظور تثبیت خاک بررسی‌شده از سیمان پرتلند نوع II استفاده شده است، که از کارخانه‌ی سیمان خوزستان واقع در خوزستان، ایران خریداری شده است. درصدهای سیمان در پژوهش حاضر براساس نوشتارهای اخیر در زمینه‌ی تثبیت خاک ۰، ۳، ۶، و ۹ درصد در نظر گرفته شده‌اند.[۱۵ و ۱۶] در جدول ۲، ترکیب‌های شیمیایی سیمان ارائه شده است. CaO و SiO_2 مواد اصلی تشکیل‌دهنده‌ی سیمان هستند. قبل از استفاده از سیمان، سیمان از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شده است.

۴.۲. آهک

آهک هیدراته با درجه‌ی خلوص بالای ۷۲٪ مطابق با الزام‌های تعیین‌شده توسط ASTM C۹۷۷ از شرکت خوزستان آهک در خوزستان ایران خریداری شده است. در جدول ۲، ترکیب‌های شیمیایی آهک که توسط آنالیز فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF)[2] تعیین شده است، ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، آهک در درجه‌ی اول از CaO تشکیل شده است. میزان آهک استفاده‌شده در پژوهش حاضر، ۰، ۳، ۶، و ۹ درصد بوده است، که قبل از استفاده در مخلوط خاک از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شد. درصدهای انتخابی آهک در سایر مطالعات صورت‌گرفته در تثبیت با آهک نیز به‌کار رفته‌اند.[۱۷-۱۹] در شکل ۳، نمایش بصری آهک، سیمان، نفت، و خاک مشاهده می‌شود.

۳. تهیه‌ی نمونه

۱.۳. آماده‌سازی نمونه‌های خاک آلوده به نفت

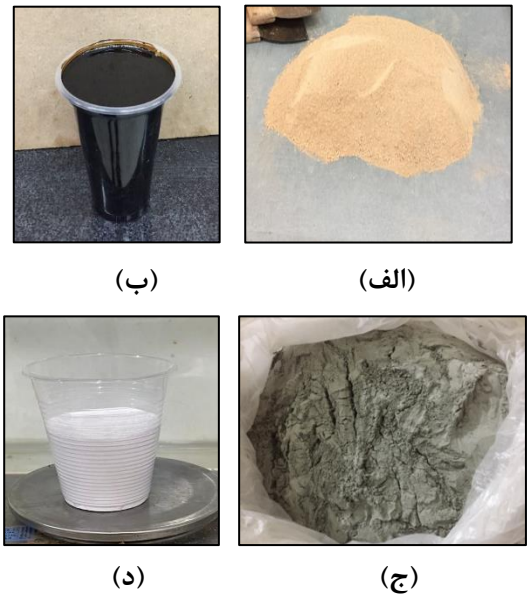
خاک در ابتدا تحت خشک‌کردن با هوا قرار گرفت و سپس با استفاده از الک شماره‌ی ۸ (فیلتر ۳ ۲/۶ میلی‌متری) الک شد.[۲۰ و ۲۱] پس از آن، مخلوط نفت و خاک کاملا ترکیب و به‌طور یکنواخت هم‌زده شدند. سپس مخلوط حاصل در

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مطالعه‌شده.

خصوصیات فیزیکی	مقدار
شن (٪)	0
ماسه (٪)	6
ریزدانه (٪)	94
حد روانی (٪)	54
حد خمیری (٪)	28
نشانه‌ی خمیری (٪)	26
طبقه‌بندی خاک (یونیفاید)	CH

جدول ۲. ترکیب‌های شیمیایی آهک و سیمان.

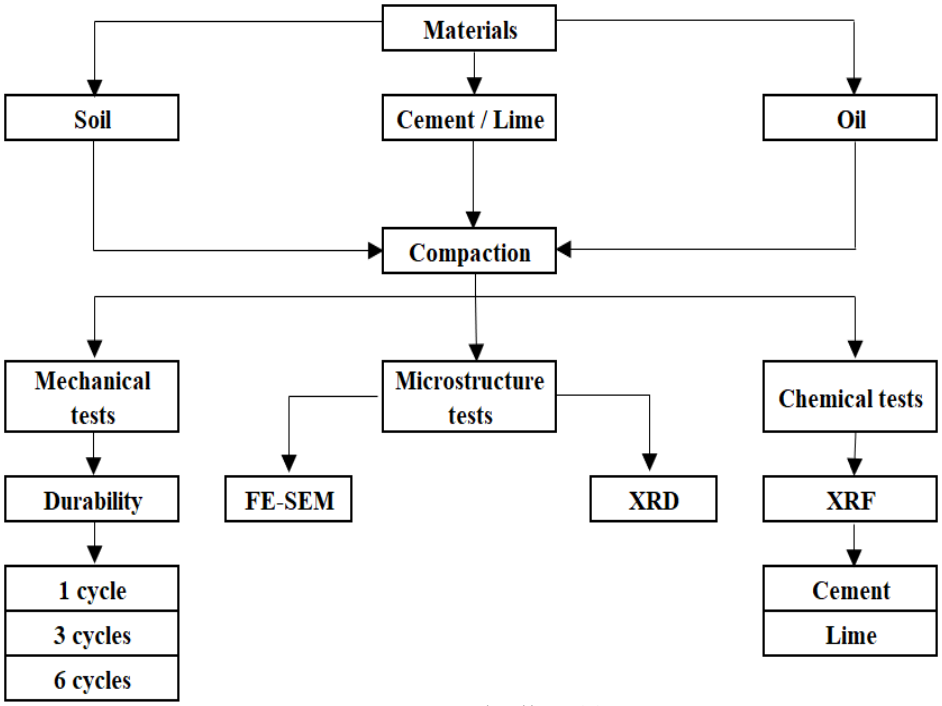
ترکیب‌های شیمیایی	آهک	سیمان
	مقدار (%)	مقدار (%)
SiO_2	0.95	20.7
Al_2O_3	0.30	5.20
Fe_2O_3	0.24	4.65
CaO	72.04	65.50
MgO	0.64	1.80
Na_2O	0.13	0.15
K_2O	0.11	0.50
C_3S	--	59.47
C_2S	--	14.48
C_3A	--	6.00
C_4AF	--	14.00
SrO	0.31	--
P_2O_5	0.04	--
Loss of ignition	25.24	1.50



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۳. نمایی از مواد استفاده‌شده در پژوهش حاضر: (الف) خاک، (ب) نفت، (ج) سیمان، (د) آهک.

[1] Soxhlet extractor
[2] X-ray Fluorescence



شکل ۴. فلوچارت پژوهش.

یک کیسه‌ی نایلونی به مدت یک هفته قرار داده شد. برای دست‌یابی به آلودگی مناسب خاک، معمولاً گزارش شده است که خاک باید به درصد موردنیاز از آلاینده آلوده شود و سپس به مدت یک هفته در هوا خشک شود، تا از جذب کامل آلاینده توسط خاک اطمینان حاصل شود.[۲۲ و ۲۳]

۲.۳. افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده‌ی نفتی

ابتدا خاک آلوده به نفت با نسبت‌های مختلف آهک و یا سیمان به‌طورجداگانه مخلوط شد تا به‌خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهد. سپس آب مقطر (به اندازه‌ی درصد رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم) به آن اضافه شد، تا جایی که ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود. این مخلوط با دقت میکس شد تا زمانی که یک مخلوط یکنواخت به‌دست آمد. سپس مخلوط حاصل به کیسه‌های نایلونی منتقل و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد.

۴. برنامه‌ی آزمایشگاهی

فلوچارت پژوهش در شکل ۴ مشاهده می‌شود. جهت تهیه‌ی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر، از مخلوط‌های تهیه‌شده در بخش ۳.۲ استفاده شده است. با استفاده از قالب تراکم استاندارد با قطر ۴ اینچ، مخلوط خاک و نفت و تثبیت‌کننده در سه لایه به درون قالب تراکم ریخته شد. هر لایه با استفاده از ۲۵ ضربه‌ی چکش متراکم شد. آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM D۶۷۲ انجام شد. پس از انجام آزمایش تراکم، اقدام به نمونه‌گیری با استفاده از مغزه‌گیر شد؛ که با استفاده از آن، در هر بار آزمایش تراکم، ۳ نمونه با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر تهیه شدند. قالب تراکم استاندارد و مغزه‌گیر در شکل ۵ مشاهده می‌شود. از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر (شکل ۴- ج)، جهت انجام آزمایش‌های دوام استفاده شده است.

۱.۴. آزمایش تراکم پروکتور استاندارد

آزمایش تراکم در قالبی به حجم ۹۴۴ سانتی‌مترمکعب و توسط وزنه‌ی ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها می‌شود، انجام شده است. در



شکل ۵. نمایی از نحوه‌ی تراکم و مغزه‌گیری:
(الف) قالب تراکم استاندارد، (ب) مغزه‌گیر، (ج) نمونه‌ی خاک با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر.

آزمایش مذکور، سه لایه‌ی خاک، هر کدام با ۲۵ ضربه، مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸ متراکم شده‌اند؛ که مطابق با آن، درصد رطوبت بهینه و بیشینه‌ی چگالی خشک خاک به‌دست آمد.

۲.۴. آزمایش دوام

به‌منظور انجام آزمایش دوام مطابق با استاندارد ASTM D۵۵۹، نمونه‌های تهیه‌شده، به مدت ۵ ساعت درون آب قرار گرفتند و متعاقباً به مدت ۴۰ ساعت در آون نگهداری شدند. روش اخیر برای ۱، ۳، و ۶ سیکل تکرار شد. طبق نوشتارهای منتشرشده در زمینه‌ی دوام، تعداد چرخه‌های تر و خشک ممکن

است به نوع جاده و نوع خاک وابسته باشد، اما معمولاً ۱ تا ۴ چرخه برای خاک‌های سیلتی یا خاک‌های رس مناسب تلقی می‌شود.[۲۴] با این حال، به‌منظور اطمینان بیشتر، در پژوهش حاضر، تعداد ۶ چرخه‌ی تر- خشک در نظر گرفته شده است. پس از طی چرخه‌های تر- خشک، آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. پس از گذراندن سیکل ۱ برای انجام آزمایش از دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری با ظرفیت ۷۰۰ کیلوگرم و با ساعت اندیکاتور جابجایی‌سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. پس از گذراندن سیکل‌های ۳ و ۶، به‌دلیل بالابودن اعداد قرائت‌شده بیش از ظرفیت دستگاه تک‌محوری خاک برای انجام آزمایش از دستگاه جک بتن‌شکن با ظرفیت ۴ تن استفاده شد. این تذکر لازم است که پس از ۳ بار تکرار هر نمونه‌ی آزمایشی، بر روی نتایج به‌دست‌آمده میانگین‌گیری انجام شد.

۳.۴. آزمایش‌های ریزساختاری

آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)[1]، برای تجزیه‌وتحلیل فازهای موجود در خاک استفاده شده است. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)[2] به‌منظور تجزیه‌وتحلیل ریزساختار خاک انجام شد. نمونه‌ها پس از پوشاندن با طلا، اسکن شدند و تعدادی تصویر دیجیتال با بزرگ‌نمایی‌های مختلف ثبت شد. به‌منظور درک بهتر فرآیندهای ریزساختار آهک و سیمان در خاک آلوده به نفت، آنالیز FESEM بر روی نمونه‌های منتخب انجام شده است.

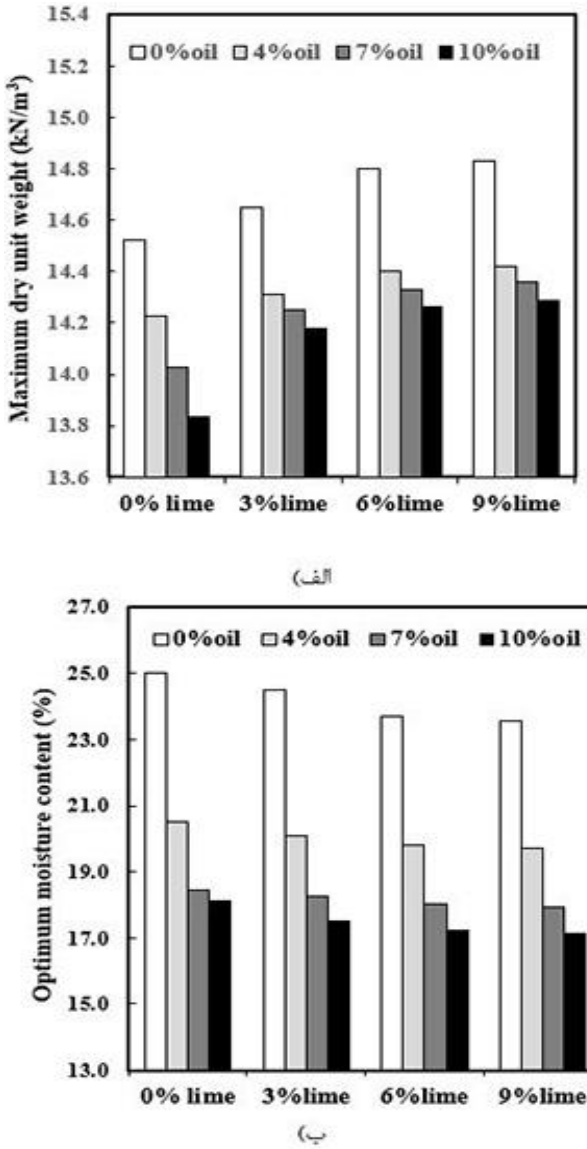
۵. نتایج و بحث

۱.۵. نتایج آزمایش‌های تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

در شکل ۶، نتایج آزمایش‌های تراکم به‌صورت بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه در مقابل درصدهای مختلف آهک برای نمونه‌های غیرآلوده و آلوده به نفت مشاهده می‌شود. به‌طورکلی، برای نمونه‌های خاک آلوده به نفت، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد نفت کاهش یافته است. وجود نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال‌شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود.[۱۱] با افزایش درصد نفت به ۱۰٪، مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک به ۱۳/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب در مقایسه با مقدار ۱۴/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب برای خاک غیرآلوده کاهش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش تقریباً ۴/۸ درصدی است. نفت در مقایسه با آب، ویسکوزیته‌ی بالاتری از خود نشان می‌دهد، که منجر به اتلاف انرژی در طول فرآیند تراکم می‌شود.[۲۵] از طرفی دیگر، نفت چگالی کمتری نسبت به آب دارد. بنابراین، هنگامی که نفت به جای آب، بخشی از فضای منافذ را اشغال می‌کند، چگالی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد؛ در نتیجه مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک را در نمونه‌های آلوده به نفت کاهش می‌دهد. ضمناً باید توجه داشت که در صورت وجود نفت، آب به تمام ذرات خاک دسترسی ندارد و فقط سطح خارجی توده‌ی خاک را مرطوب می‌کند. بنابراین، آب نمی‌تواند به‌طورمؤثر در تراکم تأثیر بگذارد.[۲۶]

علاوه‌بر این، مشاهده شده است که افزودن آهک به خاک آلوده و تثبیت‌شده به نفت منجر به کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک غیرآلوده می‌شود. به‌عنوان مثال، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت آهک به‌دست آمد، که در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون آهک، افزایش ۲/۵٪ را نشان داده است. به‌طور مشابه، نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت آهک ۶ و ۹ درصد به ترتیب افزایش ۳/۱ و ۳/۳ درصدی را نشان داده‌اند. این پدیده را می‌توان به وزن مخصوص بالاتر آهک نسبت داد، که منجر به افزایش وزن مخصوص خاک با افزایش درصد آهک می‌شود.[۲۷] یکی دیگر از عوامل مهم در ایجاد تغییرات ذکرشده، اثر روانکاری نفت در ذرات رس است.[۲۸]

با افزایش درصد آهک، رطوبت بهینه برای تثبیت خاک با آهک افزوده کاهش یافت. در مورد نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت آهک، درصد رطوبت بهینه، ۱۷/۵٪ به‌دست آمد، که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۳/۳٪ در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون آهک است. به همین ترتیب، نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد آهک به ترتیب کاهش ۴/۹ و ۵/۳ درصدی را تجربه



شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تراکم با درصدهای مختلف آلودگی نفتی و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک.
الف) وزن مخصوص حداکثر، ب) رطوبت بهینه

[1] X-Ray Diffraction
[2] Field Emission Scanning Electron Microscopy

کرده‌اند. افزودن آهک به مخلوط خاک باعث شروع فعل و انفعال‌های شیمیایی بین آهک و آب می‌شود، که منجر به تثبیت و مقاومت مخلوط می‌شود. با افزایش درصد آهک، درصد رطوبت بهینه‌ی لازم برای فعل و انفعال‌های شیمیایی بهینه بین آهک و آب کاهش یافته است. علاوه‌بر این، نتایج نشان می‌دهند که مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه، تفاوت معنی‌داری را در نمونه‌های خاک آلوده به آهک ۶ و ۹ درصد نشان نمی‌دهند.

۲.۵. نتایج آزمایش‌های تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

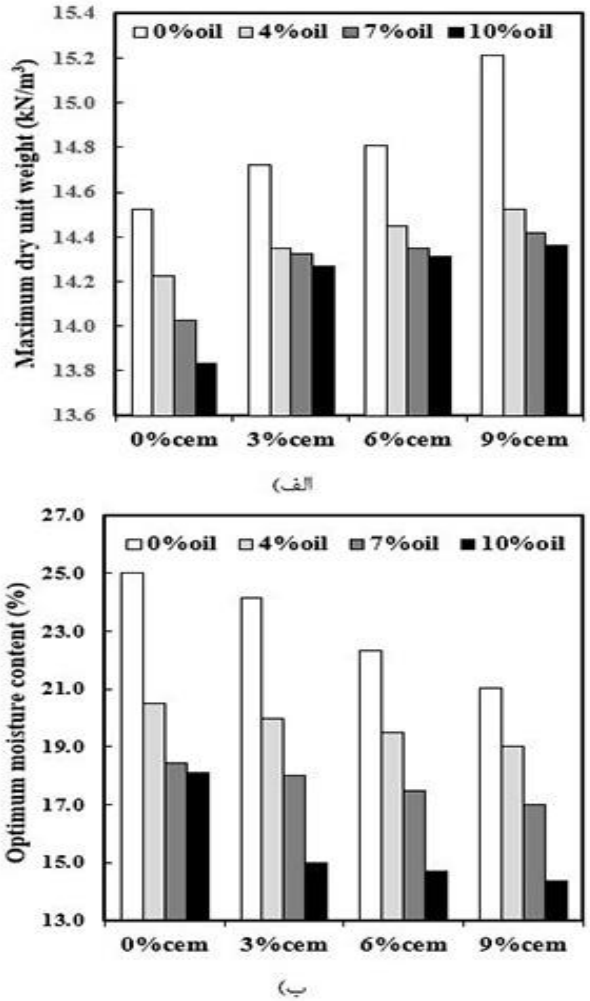
در شکل ۷، نتایج آزمایش‌های تراکم خاک‌های غیرآلوده و آلوده به نفت مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی وزن واحد خشک خاک غیرآلوده، ۱۴/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب بوده است، اما وقتی ۴٪ نفت به خاک اضافه شده است، این مقدار به ۱۴/۲ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش یافته است (کاهش ۲/۱٪). به‌طور مشابه، رطوبت بهینه از ۲۵٪ به ۲۰/۵٪ (کاهش ۱۸٪) کاهش یافته است. هنگامی که درصد نفت از ۴٪ به ۷٪ افزایش یافته است، بیشینه‌ی وزن واحد خشک تقریباً ۱/۳٪ بدون تغییرات قابل‌توجه کاهش یافته است، در حالی که رطوبت بهینه به ۱۰٪ کاهش یافته است. با این حال، با افزایش بیشتر در درصد نفت از ۷٪ به ۱۰٪، بیشینه‌ی وزن واحد خشک به ۱۳/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش و رطوبت بهینه ۱/۹٪ کاهش یافته است. این روند را می‌توان به تشکیل یک پوشش نفتی ضخیم در اطراف ذرات خاک نسبت داد، که به عنوان یک بالشتک عمل می‌کند و از تماس در هم تنیده‌ی بین ذرات جلوگیری می‌کند، که در نتیجه باعث افزایش لغزش با افزایش مقدار نفت و ویسکوزیته می‌شود و درنهایت، تراکم‌پذیری خاک آلوده را کاهش می‌دهد. مشاهدات مشابهی در برخی پژوهش‌ها،[۲۹ و ۳۰] انجام شده است. همچنین کاهش بیشینه‌ی وزن واحد خشک به‌دلیل افزایش درصد نفت ممکن است به اثر وزن مخصوص نفت در خاک نسبت داده شود.[۳۱]

علاوه‌بر این، مشاهده شده است که افزودن سیمان به خاک آلوده و تثبیت‌شده با نفت، بیشینه‌ی وزن واحد خشک و درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک غیرآلوده کاهش یافته است. نتایج نشان داده است که بیشینه‌ی وزن واحد خشک با افزایش درصد سیمان افزایش یافته است، در حالی که درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان در مقایسه با خاک آلوده کاهش پیدا کرده است. کمترین مقدار بیشینه‌ی وزن واحد خشک در نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت سیمان به‌دست آمده است، که نسبت به نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون سیمان، ۳/۲٪ افزایش نشان داده است. نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت سیمان ۶ و ۹ درصد به ترتیب افزایش ۳/۵ و ۳/۸ درصدی را نشان داده‌اند. بیشینه‌ی وزن واحد خشک خاک، اساساً تحت تأثیر دو عامل است: (الف) توزیع اندازه‌ی ذرات، و (ب) وزن مخصوص خاک.[۳۲] بنابراین، این امر به‌دلیل وزن مخصوص بیشتر سیمان است، که با افزایش درصد سیمان منجر به افزایش وزن مخصوص خاک می‌شود. این افزایش وزن مخصوص نیز مقاومت و پایداری خاک را افزایش می‌دهد.[۳۲]

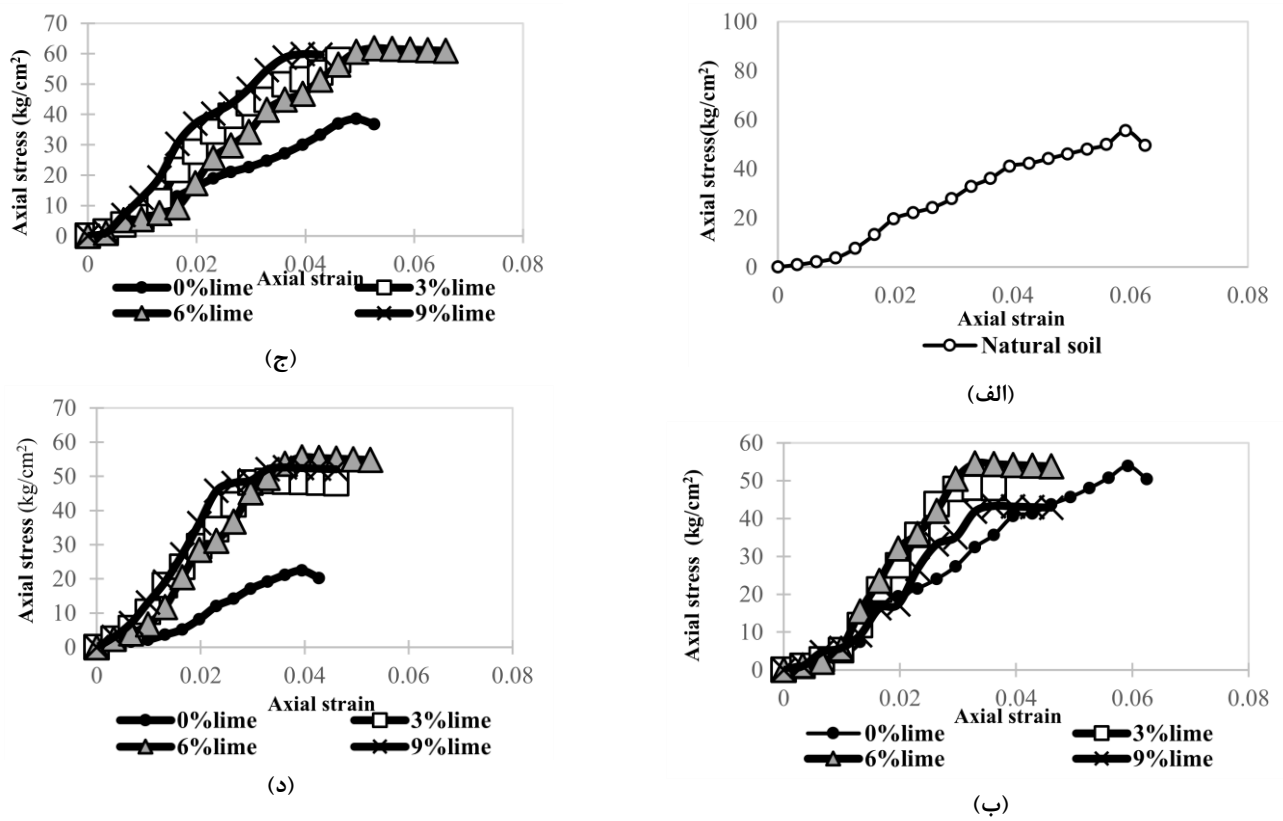
علاوه‌بر این، درصد رطوبت بهینه برای تثبیت خاک با سیمان اضافه‌شده با افزایش درصد سیمان کاهش یافته است. برای نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت سیمان، درصد رطوبت بهینه، ۱۵٪ بوده است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۱۷/۱٪ در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون سیمان بوده است. نمونه‌هایی با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد سیمان به ترتیب افزایش ۱۸/۸ و ۲۰/۷ درصد را تجربه کرده‌اند. این امر ناشی از آن است که سیمان رطوبت را از خاک جذب می‌کند و با درصد رطوبت در تعامل است و فرآیند تثبیت را آغاز می‌کند. در نتیجه با افزایش درصد سیمان، رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.[۳۳]

۳.۵. نتایج آزمایش‌های دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

در شکل ۸، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه‌ی تر-خشک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان اظهار داشت که تمامی نمونه‌های خاک آلوده به نفت، تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت-شده با آهک و همچنین نمونه‌ی خاک طبیعی (شکل ۸ - الف)، مقاومت تک‌محوری را در برابر یک چرخه‌ی مرطوب- خشک نشان داده‌اند. در نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۸- ب)، بیشترین مقاومت تک‌محوری در نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک مشاهده شده است. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های آلوده با درصد متغیر نفت نشان می‌دهد که با افزایش درصد نفت از ۷ به ۱۰، دوام نمونه‌ها کاهش یافته است. چنین رفتاری را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که واکنش ماده‌ی افزودنی با خاک در حضور درصدهای بیشتر نفت آهسته‌تر شده و در رشد مقاومت، تأثیر کمتری گذاشته است.[۳۴] مقاومت نمونه‌های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۸ - ج) و حاوی ۳، ۶، و ۹ درصد آهک پس از ۱ چرخه‌ی تر- خشک به



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های تراکم با درصدهای مختلف آلودگی نفتی و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان.
الف) وزن مخصوص حداکثر، ب) رطوبت بهینه

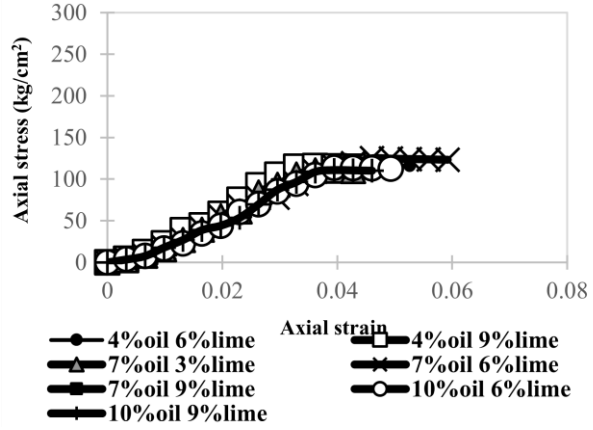


شکل ۸. منحنی های تنش- کرنش نمونه‌های خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک طی یک چرخه‌ی تر- خشک: (الف) نمونه‌ی خاک طبیعی بدون آلودگی، (ب) ۴٪ نفت، (ج) ۷٪ نفت، (د) ۱۰٪ نفت.

ترتیب ۵/۷، ۶/۱، و ۵/۹ مگاپاسکال بوده است. روند مشابه در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۸ - د) مشاهده شد، به‌طوری که مقاومت نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت به ترتیب ۲/۲، ۲/۵، و ۲/۳ برابر بیشتر از نمونه‌های حاوی درصد مشابه نفت، اما بدون آهک بوده است.

در شکل ۹، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی ۳ چرخه‌ی تر- خشک مشاهده می‌شوند. در چرخه‌ی ۳، کلیه‌ی نمونه‌های بدون آهک پس از طی ۳ چرخه‌ی تر- خشک در آب متلاشی شده‌اند. هنگامی که ۳٪ آهک به نمونه‌های آلوده به نفت اضافه شده است، فقط نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت در برابر چرخه‌های تر- خشک از خود دوام نشان داده و نمونه‌های آلوده به ۴ و ۱۰ درصد نفت در آب متلاشی شده‌اند. هنگامی که درصد آهک به ۶٪ افزایش یافته است، نمونه‌های آلوده با درصدهای ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه در سیکل ۱، به‌ترتیب مقاومت‌های ۲/۲، ۲/۰، و ۲/۰ برابری نشان داده‌اند. همچنین نمونه‌های آلوده به ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ آهک در چرخه‌ی ۳، در مقایسه با چرخه‌ی ۱، به ترتیب ۱۶۶/۷، ۱۰۲/۳، و ۱۱۰/۷ درصد نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه اما تثبیت‌نشده، افزایش داشته‌اند.

در شکل ۱۰، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از ۶ چرخه‌ی تر- خشک مشاهده می‌شوند. در چرخه‌ی ۶، بیشتر نمونه‌ها در آب متلاشی شده‌اند. در بین نمونه‌های آلوده به ۴ و ۱۰ درصد نفت، نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب ۲۸۵/۱ و ۳۴۰/۶ درصد نسبت به همان نمونه در چرخه‌ی ۳ افزایش مقاومت داشته‌اند. در بین نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت،



شکل ۹. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک طی ۳ چرخه‌ی تر- خشک.

نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب مقاومت ۲۵/۰ مگاپاسکال را نشان داده‌اند، که نسبت به نمونه با درصد مشابه نفت و حاوی ۳٪ آهک، ۱۹/۶٪ افزایش یافته است. از مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها می‌توان اذعان داشت که با افزایش درصد نفت، مقاومت نمونه‌ها پس از گذراندن چرخه‌های تر- خشک کاهش یافته و ۶٪ آهک، درصد بهینه‌ی آهک برای چرخه‌های ۱، ۳، و ۶ بوده است. لی و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۵] نتایج مطالعات خود را بر روی خاک‌های آلوده به نفت در چین بیان داشته‌اند، که افزایش مقاومت با آهک می‌تواند به این دلیل باشد که واکنش آهک با خاک آلوده به نفت باعث ایجاد ژل کلسیم آلومینات سیلیکات هیدراته (C-A-S-H) می‌شود و ساختار خاک آلوده به نفت را تغییر می‌دهد.

۴.۵. مدول کشسانی خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

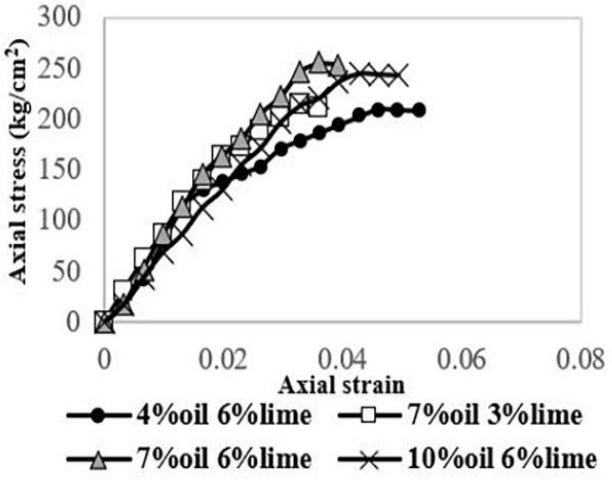
در شکل ۱۱، میزان مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف و تثبیت‌شده با آهک مشاهده می‌شود. میزان مدول کشسانی ارائه‌شده، مدول سکانت در ۵۰٪ مقاومت نهایی است.

از مقایسه‌ی مدول کشسانی در چرخه‌های مختلف می‌توان بیان داشت که مدول کشسانی نمونه‌های مختلف با افزایش سیکل‌های تر- خشک افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، مدول کشسانی نمونه‌ی خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک در چرخه‌ی ۳، ۲/۰ برابر چرخه‌ی ۱ و در چرخه‌ی ۶، ۲/۸ برابر چرخه‌ی ۳ بوده است. مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان در چرخه‌ی ۳، ۲/۵ برابر چرخه‌ی ۱ و در چرخه‌ی ۶، ۳ برابر چرخه‌ی ۳ بوده است. مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک در چرخه‌های ۱، ۳، و ۶ به‌ترتیب مقادیر ۱۴۲/۹، ۲۵۴/۵، و ۶۶۷/۹ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. درخصوص افزایش میزان پارامترهای مهندسی با استفاده از آهک در خاک، تجربه نشان داده است که خاک رس با آهک ترکیبی تولید می‌کند که خواص آن‌ها مانند خواص سیمانی است. اصول ترکیب‌های شیمیایی براساس ترکیب رس و آهک در مجاورت آب اتفاق می‌افتد؛ به این ترتیب که یون مثبت تغییر می‌کند و ذرات خاک به‌صورت توده‌ای به هم پیوسته در می‌آید و پس از آن واکنش پوزولانی یا سیمانتاسیون صورت می‌پذیرد یا کربناسیون رخ می‌دهد.[۳۶]

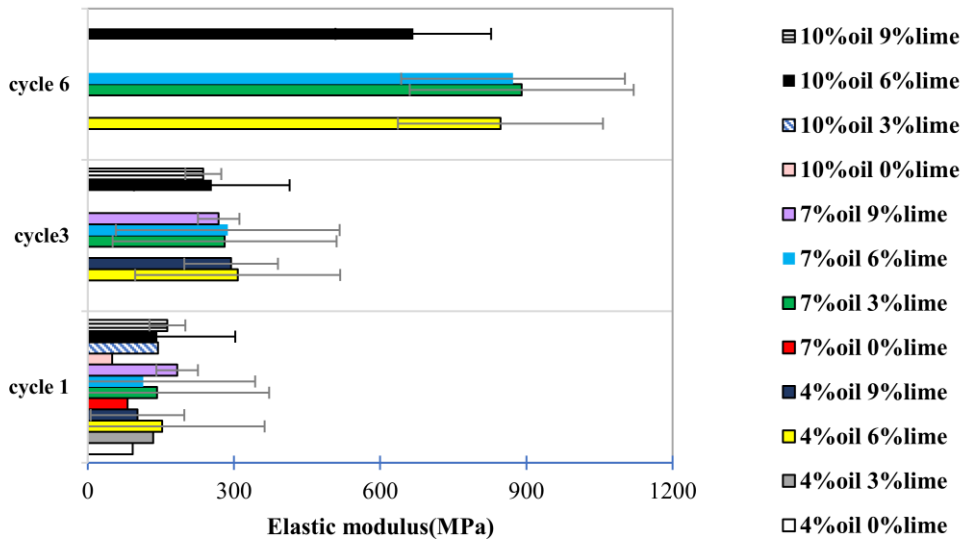
۵.۵. نتایج آزمایش‌های دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

در شکل ۱۲، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه‌ی تر-خشک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان بیان کرد که تمام نمونه‌های آلوده به نفت، تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با سیمان، در برابر یک چرخه‌ی تر- خشک مقاومت نشان داده‌اند. به‌طورکلی با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های آلوده با درصدهای مختلف نفت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد نفت، مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

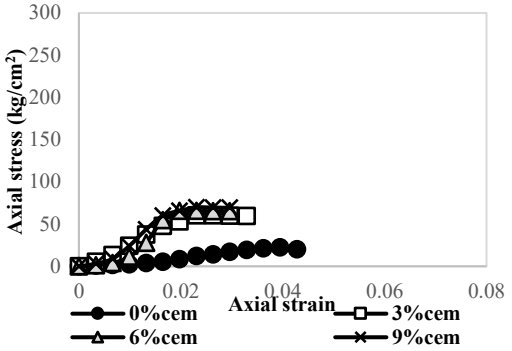
در سیکل ۱، در میان نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۱۲- الف)، بیشترین دوام مربوط به نمونه‌های حاوی ۹٪ سیمان مشاهده می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۱۲- ب)، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان افزایش یافته است. نمونه‌های حاوی سیمان ۳، ۶، و ۹ درصد سیمان به ترتیب مقاومت ۷/۵، ۷/۹، و ۱۰/۲ مگاپاسکال داشته‌اند، که در مقایسه با نمونه‌های آلوده به نفت بدون سیمان و پس از یک چرخه‌ی تر- خشک، به ترتیب ۲/۰، ۲/۱، و ۲/۷ برابر بیشتر بوده است. همین روند در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۱۲- ج) مشاهده شده است، که افزایش درصد سیمان منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری نسبت به نمونه‌های بدون سیمان شده است.



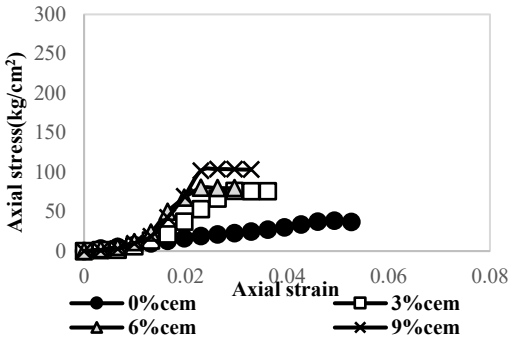
شکل ۱۰. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک طی ۶ چرخه‌ی تر- خشک.



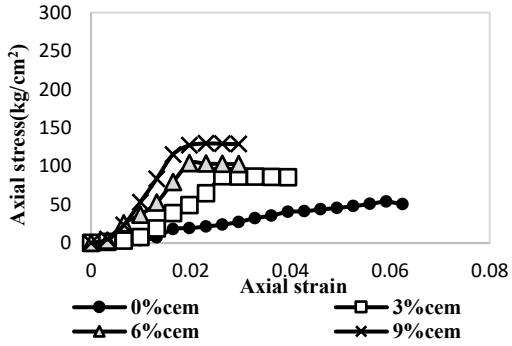
شکل ۱۱. مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک پس از طی چرخه‌های تر- خشک.



(الف)



(ب)

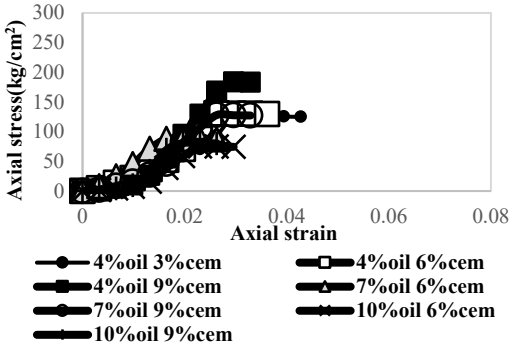


(ج)

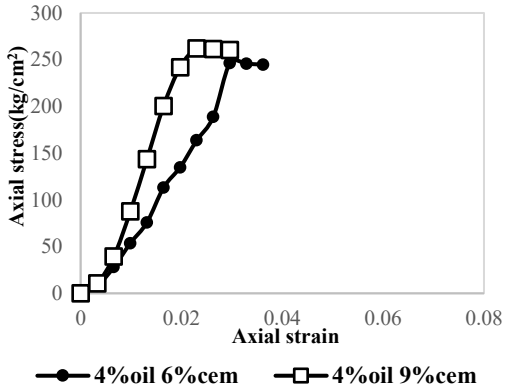
شکل ۱۲. منحنی های تنش- کرنش نمونه های خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان طی یک چرخه‌ی تر- خشک: (الف) ۴٪ نفت، (ب) ۷٪ نفت، (ج) ۱۰٪ نفت.

در چرخه‌ی ۳ (شکل ۱۳)، کلیه‌ی نمونه‌های آلوده به نفت بدون سیمان از بین رفته‌اند. نمونه‌های آلوده به ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان به ترتیب مقاومت ۱۸/۰، ۱۲/۶، و ۷/۹ مگاپاسکال داشته‌اند، که نسبت به نمونه‌های مشابه از لحاظ میزان درصد نفت و سیمان، اما در سیکل ۱، ۴۱/۹، ۲۳/۳، و ۱۵/۸ درصد افزایش مقاومت داشته‌اند.

در چرخه‌ی ۶ (شکل ۱۴)، همه‌ی نمونه‌های حاوی ۷ و ۱۰ درصد نفت در آب متلاشی شده‌اند. علاوه‌بر این، نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت، تثبیت‌نشده با سیمان و تثبیت‌شده با ۳٪ سیمان، در آب متلاشی شده‌اند. با این حال، زمانی که درصد سیمان به ۶ و ۹ درصد افزایش یافته است، نمونه‌ها از خود دوام نشان داده‌اند.



شکل ۱۳. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان طی ۳ چرخه‌ی تر- خشک.



شکل ۱۴. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان طی ۶ چرخه‌ی تر- خشک.

مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به ترتیب ۲۴/۲ و ۲۵/۷ مگاپاسکال بوده است. شایان ذکر است بیشترین دوام مشاهده‌شده مربوط به نمونه‌ی حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان بوده است، که در مقایسه با نمونه‌ی مشابه همین درصد نفت و سیمان در سیکل ۳، ۴۲/۶٪ افزایش مقاومت داشته است. رباه[1] و همکاران (۲۰۲۳)،[۳۷] بیان کرده‌اند که سیمان برخی خواص پوزولانی دارد، که می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری خاک شود. همچنین اولواتویی[2] و همکاران (۲۰۲۰)،[۳۸] با مطالعه بر روی خاک‌های آلوده بیان کرده‌اند که تشکیل محصولات سیمانی در خاک با استفاده از سیمان می‌تواند به توسعه‌ی مقاومت خاک کمک کند.

۵.۶. مدول کشسانی خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

مدول کشسانی، نشان‌دهنده‌ی سختی متوسط خاک است؛ که به‌عنوان نسبت تنش انحرافی به کرنش محوری مرتبط در یک نقطه‌ی خاص در منحنی تنش- کرنش تعریف می‌شود.[۳۸ و ۳۹] مدول کشسانی را می‌توان برای سطح خاصی از کرنش یا تنش تعیین کرد. در مطالعه‌ی حاضر، مدول کشسانی برای هر نمونه در نقطه‌ی مربوط به نیمی از UCS نمونه محاسبه شده است.[۹]

مقادیر مدول کشسانی برای نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف و تثبیت‌شده با آهک در شکل ۱۵ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، مدول کشسانی با افز ایش تعداد چرخه‌های تر- خشک افزایش یافته است.

[1] Rabab'ah

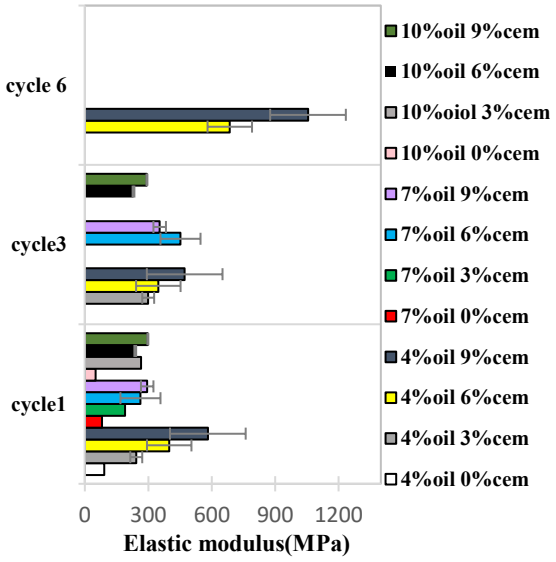
[2] Oluwatuyi

مدول کشسانی نمونه‌ی خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان در چرخه‌ی ۶، ۲/۲ برابر مقدار در چرخه‌ی ۳ است. همچنین، مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان در چرخه‌ی ۳، ۱/۲ برابر مقدار در چرخه‌ی ۱ بوده است. بیشترین مقادیر مدول کشسانی در نمونه‌های خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد سیمان بوده‌اند، که به‌ترتیب مقادیر ۶۸۵/۶ و ۱۰۵۵/۵ مگاپاسکال داشته‌اند. این مقادیر نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳، ۹۷/۳ و ۱۲۳/۵ درصد افزایش یافته‌اند.

۷.۵. آنالیز ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

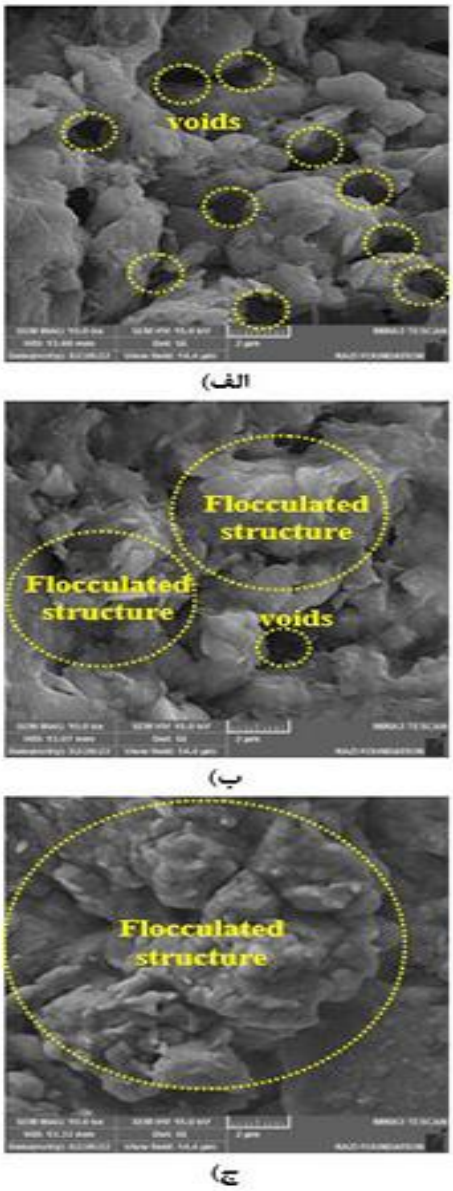
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی خاک رسی تثبیت‌نشده و خاک تثبیت‌شده با سیمان و آهک در شکل ۱۶ مشاهده می‌شوند. میکروگراف‌های FESEM با وضوح بالا (با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر) برای مقایسه‌ی بهتر برای همه‌ی نمونه‌ها ارائه شده‌اند. بررسی رفتار ریزساختاری خاک از آن جهت نقش مهمی در درک رفتار خاک دارد که مقاومت برشی خاک از تماس ذرات آن انتقال پیدا می‌کند. در حقیقت، ضعیف‌ترین ناحیه در عوامل محدودکننده‌ی مقاومت خاک، ناحیه‌ی انتقال (فضاهای خالی بین ذرات) است. حجم و اندازه‌ی فضاهای خالی نواحی انتقال، مقاومت آن را مشخص می‌کنند. با توجه به نوع افزودنی استفاده‌شده در تثبیت خاک، مقاومت نواحی انتقال ممکن است از توده‌ی خاک پایه بیشتر شود.

در شکل ۱۶- الف، تصویر FESEM خاک آلوده به نفت ۱۰٪ و تثبیت‌نشده، ساختار ناپیوسته‌ای را نشان می‌دهد؛ که در آن، حفره‌های برجسته‌ی درون مجموعه در ریزپارچه‌ی خاک تثبیت‌نشده به‌دلیل عدم وجود محصولات هیدراتاسیون مشاهده می‌شوند. شکل ۱۶- ب، تصویر نمونه‌ی خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان را نشان می‌دهد؛ که در آن، تعداد کمتری از فضاهای خالی مشاهده می‌شود و به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که ساختار



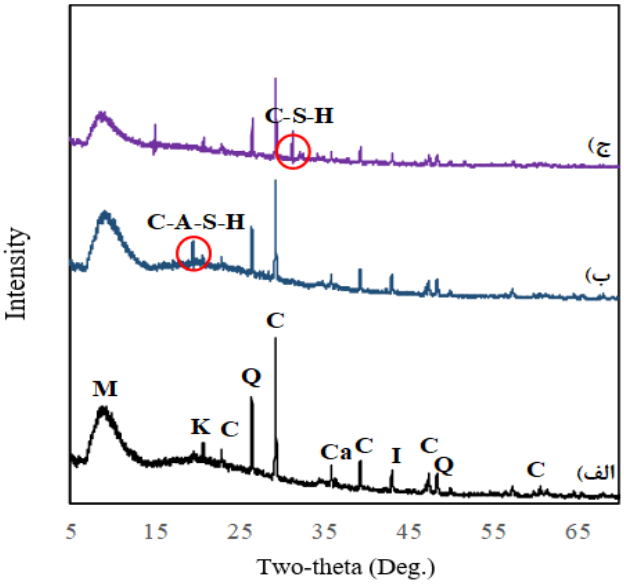
شکل ۱۵. مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان پس از طی چرخه‌های تر- خشک.

ناپیوسته (شکل ۱۶- الف)، به ساختار فولکوله سوق پیدا کرده است. ملاعباسی و همکاران (۲۰۲۲)،[۴۰] بیان کرده‌اند که کریستاله‌شدن محصولات جدید در نواحی انتقال ممکن است از واکنش بین سیمان و ذرات خاک باشد، که تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را منجر می‌شود. ژل مذکور از پیدایش مقدار بیشتر هیدروکلسیم در نواحی انتقال جلوگیری می‌کند و مقاومت را افزایش می‌دهد. نتایج مطالعه‌ی هی[1] و همکاران (۲۰۲۳)،[۴۱] نشان می‌دهد که سیمان ممکن است با هوا و آب واکنش نشان دهد تا کریستال‌های فیبری ایجاد کند، که هم‌پوشانی آن‌ها ساختار شبکه‌ای را ایجاد می‌کند و ارتباط متقابل بین ذرات را به‌طورمؤثری بهبود می بخشد. شکل ۱۶- ج، نمونه‌ی خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک را نشان می‌دهد، که در مقایسه با نمونه‌ی‌تثبیت‌نشده، ساختاری فولکوله را نشان می‌دهد. سلطانی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۸)،[۴۲] نشان داده‌اند که واکنش پوزولانی خاک با آهک موجب تشکیل



شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها: (الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌نشده، (ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان، (ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک.

[1] He



شکل ۱۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها: (الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌نشده، (ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک، (ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان.

[C:کلسیت؛ Q: کوارتز؛ I: ایلیت؛ M: مونت موریلونیت؛ Ca: سیلیکات کلسیم؛ K: کائولینیت،
C-S-H: هیدرات سیلیکات کلسیم؛ C-A-S-H: هیدرات آلومینیوم سیلیکات کلسیم].

ترکیب‌های سمنتاسیون شده است، که مواد چسباننده‌ی مذکور، ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و سبب کاهش خلل و فرج خاک خواهند شد و حفره‌های موجود در خاک کمتر مشاهده می‌شوند

۸.۵. آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) برای خاک آلوده‌ی تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با مواد افزودنی در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. ترکیب‌های کانی‌شناسی خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده تقریباً یکسان است و کائولینیت، کوارتز، کلسیت، ایلایت، سیلیکات کلسیم، و مونت موریلونایت، کانی‌های اصلی را تشکیل می‌دهند. اما علاوه‌بر کانی‌های مذکور، ژل C-A-S-H، به‌عنوان یک فاز کانی‌شناسی جدید، در خاک تثبیت‌شده با آهک شناسایی شده است (شکل ۱۷- ب). این نتایج با گزارش‌های قبلی،[۴۳] مطابقت دارد و نشان می‌دهد که محصولات هیدراتاسیون در حال توسعه و شکل‌گیری بوده‌اند.

در نتیجه، هیدراتاسیون آهک در خاک رسی، یون‌های آزاد OH^- و Ca^{2+} آزاد می‌شوند و یک محیط قلیایی در خاک ایجاد می‌کنند، که منجر به حل‌شدن آلومینا و سیلیس مواد افزودنی و خاک رسی می‌شود. آلومینا و سیلیس محلول با یون‌های Ca^{2+} ترکیب می‌شوند و هیدرات‌های آلومینیوم سیلیکات کلسیم (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهند. افزایش گزارش‌شده در مقاومت رس عمدتاً به حضور ژل C-A-S-H نسبت داده می‌شود، که ماتریس خاک را متصل و ساختار فولکوله ایجاد می‌کند.[۴۴] بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آهک خواص پوزولانی دارد و فرآیند هیدراتاسیون را تسریع می‌بخشد.

در خاک تثبیت‌شده با سیمان، فاز جدید C-S-H نیز شناسایی شده است (شکل ۱۷- ج). ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)،[۴۵] بیان کرده‌اند که اضافه‌کردن سیمان به خاک آلوده، موجب شروع واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده است، که به‌دنبال آن افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان رخ داده است. علاوه‌بر این، با مقایسه‌ی نتایج بین نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده، شدت پیک کمتری در کلسیت مشاهده شده است. این امر نشان‌دهنده‌ی انحلال تعدادی از فازهای معدنی و به‌طوربالقوه ایجاد ژل‌های سیمانی است.[۴۶]

۶. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی دوام و ریزساختار خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت‌شده با استفاده از سیمان و آهک بوده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده به نفت، تأثیر قابل‌توجهی در مقاومت تک‌محوری و مدول کشسانی دارد. این نتایج کلیدی از نتایج پژوهش حاضر به‌دست آمده است:

- با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال‌شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود. افزودن آهک و سیمان به خاک آلوده به نفت نیز باعث کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه می‌شود، زیرا مواد افزودنی ذکرشده باعث شروع فعل و انفعال‌های شیمیایی می‌شوند که به تثبیت و استحکام مخلوط کمک می‌کند.

- استفاده از آهک به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده در خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در دوام و مقاومت خاک‌های آلوده به نفت در برابر چرخه‌های تر- خشک ایجاد کند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد آهک در نمونه‌های آلوده به نفت، منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری و مدول کشسانی می‌شود؛ و در نتیجه، افزایش پایداری و استحکام خاک را ایجاد می‌کند. این پدیده به واکنش آهک با خاک بر می‌گردد، که خواص مکانیکی بهبودیافته‌ای ارائه می‌دهد.

- با توجه به نتایج آزمایش‌ها، افزودن سیمان به خاک‌های آلوده به نفت، بهبود قابل توجهی در دوام و مقاومت آن‌ها در برابر چرخه‌های تر- خشک ایجاد می‌کند؛ که ناشی از تغییراتی است که سیمان در خواص مکانیکی و میکروساختاری خاک‌ها ایجاد می‌کند. با افزایش درصد سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها بهبود یافته و مقادیر مدول کشسانی آن‌ها نیز افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهند که سیمان می‌تواند به‌عنوان یک ماده‌ی تثبیت‌کننده‌ی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و پایداری خاک‌های آلوده به نفت استفاده شود.

- با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شود که افزودن سیمان و آهک به خاک‌های آلوده به نفت باعث ایجاد ساختاری فولکوله و جامدتر در خاک می‌شود. این تغییرات ناشی از تشکیل محصول‌های هیدراتاسیون و پوزولانی سیمان و آهک با ذرات خاک است، که منجر به ایجاد ارتباط متقابل بین ذرات و افزایش مقاومت آن‌ها می‌شود.

تقدیر و تشکر

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی اهواز- ایران انجام شده است.

References - منابع

1. Chen, C. and Zhang, L., 2023. Hydro-mechanical behaviour of soil experiencing seepage erosion under cyclic hydraulic gradient. *Géotechnique*, *73*(2), pp.115-127. https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.340
2. Mahmood, Y., Afrin, T., Huang, Y. and Yodo, N., 2023. Sustainable development for oil and gas infrastructure from risk, reliability, and resilience perspectives. *Sustainability*, *15*(6), p.4953. https://doi.org/10.3390/su15064953
3. Chen, L., Li, K., Song, G., Zhang, D. and Liu, C., 2021. Effect of freeze–thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone. *Scientific Reports*, *11*(1), p.12315. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91842-8
4. Joukar, A.R., Hajiani Boushehrian, A. 2020. Studying the bahavior of strip foundation rested on the kerosene oil and gasoil contaminated sand slopes, *Shairf Journal of Civil Engineering*, *36*(2.2), pp. 151-158 [In Persian] https://doi.org/10.24200/j30.2019.52129.2456
5. Little, D.I., Sheppard, S.R. and Hulme, D., 2021. A perspective on oil spills: what we should have learned about global warming. *Ocean & Coastal Management*, *202*, p.105509. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105509
6. Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S.K. and Khatri, M., 2020. Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, *14*, p.100305. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100305
7. Dermatas, D. and Meng, X., 2003. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering geology*, *70*(3-4), pp.377-394.https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00105-4
8. Nasr, A.M., 2014. Utilisation of oil-contaminated sand stabilised with cement kiln dust in the construction of rural roads. *International Journal of Pavement Engineering*, *15*(10), pp.889-905. https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893321
9. Khayat, N. and Nasiri, H., 2023. Study of Strength Characteristics and micro-structure analysis of soil stabilized with wastewater and polymer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp.1-12. https://doi.org/10.1007/s42947-023-00296-w
10. Nasiri, H., Khayat, N. and Mirzababaei, M. 2021. Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product. *Transportation Geotechnics*, *28*, p.100531. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100531
11. 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
12. Karabash, Z., Al-Obaydi, M.A., Awad, M.A. and Al-Khashab, M.N., 2023. Geotechnical properties of clay soil contaminated with different types of oil. *Geotechnical and Geological Engineering*, *41*(4), pp.2677-2689. https://doi.org/10.1007/s10706-023-02420-w
13. Khoshand, A., Alishirinpourfarkhad, A., Solhianari, M. and Tabiatnejad, B., 2022. Characterization and mechanism analysis of stabilized/solidified oil-contaminated soils. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(15), p.1353. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10613-5
14. Nokande, S., Khodabandeh, M.A., Besharatinezhad, A., Nagy, G. and Török, Á., 2022. Effect of oil contamination on the behavior of collapsible soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *66*(3), pp.775-784. https://doi.org/10.3311/PPci.19636
15. Amir, H. and Abdoos, S., 2020. Application of lime and portland cement for improvement of clay contaminated with anthracene and glycerol. *Civil Infrastructure Researches*, *5*(2), pp.111-122.
16. Hajimohammadi, M. and Amir, H., 2021. Investigating the effects of portland cement and lime on improving glycerol-contaminated clay. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(12), pp.3045-3057.
17. Alrubaye, A.J., Hasan, M. and Fattah, M.Y., 2016. Engineering properties of clayey soil stabilized with lime. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *11*(4), pp.2434-2441.
18. Sorsa, A. and Agon, E., 2022. Lime stabilization of expansive clay soil of Jimma town, Ethiopia. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, *55*(2), pp.211-222.
19. Zaini, M.S.I. and Hasan, M., 2023. Effect of optimum utilization of silica fume and lime on the stabilization of problematic soils. *International Journal of Integrated Engineering*, *15*(1), pp.352-366.
20. Renjith, R., Robert, D.J., Gunasekara, C., Setunge, S. and O'Donnell, B., 2020. Optimization of enzyme-based soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(5), p.04020091.
21. Kennedy, C. and Theophilus, A.A., 2023. Highway pavement stabilization of soil with costus bracteatus rowlee and cement. *South Asian Res J Eng Tech*, *5*(2), pp.6-14.
22. Ahmad, S., Al-Amoudi, O.S.B., Mustafa, Y.M., Maslehuddin, M. and Al-Malack, M.H., 2020. Stabilization and solidification of oil-contaminated sandy soil using portland cement and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(8), p.04020220.
23. Amadi, A. A., and A. O. Eberemu. 2012. Performance of cement kiln dust in stabilizing lateritic soil contaminated with organic chemicals. *Adv. Mater. Res*. *367*: 41–47.
24. Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N. and Chinkulkijniwat, A., 2014. Influence of wet-dry

cycles on compressive strength of calcium carbide residue–fly ash stabilized clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *26*(4), pp.633-643. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0000853

25. Puri VK. 2000. Geotechnical aspects of oil-contaminated sands. *Soil and Sediment Contamination*. *9*(4):359-74.
26. Soltani-Jigheh, H., Molamahmood, H.V., Ebadi, T. and Soorki, A.A., 2018. Effect of oil-degrading bacteria on geotechnical properties of crude oil–contaminated sand. *Environmental & Engineering Geoscience, 24*(3), pp.333-341.
27. Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B.B. and Nahazanan, H., 2015. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. Measurement, 59, pp.372-381.
28. Haghsheno H, and Arabani M., 2022. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. *29*(22):32670-701.
29. Shah, S.J., Shroff, A.V., Patel, J.V., Tiwari K.C. and Ramakrishnan, D., 2003. Stabilization of fuel oil contamination soil-a case study. *Geotech. Geol. Eng*., *21*: 415-427. DOI:10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.1a
30. Oluremi, J.R. and Osuolale, O.M., 2014. Oil contaminated soil as potential applicable material in civil engineering construction. *Journal of Environment and Earth Science*, *4*(10), pp.87-99.
31. Abdulhamid, S.N., Hasan, A.M. and Aziz, S.Q., 2021. Solidification/stabilization of contaminated soil in a south station of the Khurmala oil field in Kurdistan region, Iraq. *Applied Sciences*, *11*(16), p.7474.
32. Mohamed, A.A.M.S., Yuan, J., Al-Ajamee, M., Dong, Y., Ren, Y. and Hakuzweyezu, T., 2023. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, p.e01894.
33. Shooshpasha, I. and Shirvani, R.A., 2015. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. *Geomech Eng*, *8*(1), pp.17-31.
34. Akinwumi, I. I., C. Booth, D. Diwa, and P. Mills. 2016. Cement stabilization of crude-oil-contaminated soil. *Proc. CE Geotech. Eng*. *169* (4):336–345.
35. Li, M., Yu, H., Zheng, D., Klemeš, J.J. and Wang, J., 2021. Effects of salt and solidification treatment on the oil-contaminated soil: a case study in the coastal region of Tianjin, China. *Journal of Cleaner Production*, *312*, p.127619.
36. Behroozi, F., Ahadian, J. 2014. Effect of adding lime to the consolidation properties of clay – gypsum soils, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, *37*(2), pp. 61-70. [In Persian]
37. Rabab'ah, S.R., Sharo, A.A., Alqudah, M.M., Ashteyat, A.M. and Saleh, H.O., 2023. Effect of using oil shale ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, p.e02508.
38. Oluwatuyi, O.E., Ojuri, O.O. and Khoshghalb, A., 2020. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *12*(1), pp.160-167.
39. Wang, Y., Guo, P., Li, X., Lin, H., Liu, Y. and Yuan, H., 2019. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests. *Applied Sciences*, *9*(5), p.900.
40. MolaAbasi, H., Ahmadi Chenarboni, H., Lajevardi, S., Shirkavand, A. 2022. The effect of cement and zeolite on undrained shear strength of the expansive clay, Sharif *Journal of Civil Engineering*, *38.2*(3.2), pp. 11-20. doi:10.24200/j30.2022.59536.3059 [In Persian]
41. He, X., Yang, J., Niu, M., Zhang, G. and Li, G., 2023. Study on expansion effect and hydration characteristics of ultra-high strength cement-based grouting materials based on humidity compensation. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, p.e01941.
42. Soltaninejad, S., Hamidi, S., Marandi, S. M. 2018. The influence of different curing conditions on durability of lime-stabilized clay soils (micro- and macro- structure study), *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *4*(3), pp. 83-98. doi: 10.22075/jtie.2018.12815.1249
43. Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J.S., Rico, A. and Rodríguez, J., 2011. A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society, 31*(12), pp.2043-2056.
44. Stefanini, L., Ansari, D., Walkley, B. and Provis, J.L., 2024. Characterisation of calcined waste clays from kaolinite extraction in alkali-activated GGBFS blends. *Materials Today Communications*, *38*, p.107777. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107777
45. 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*, pp.333-345.
46. Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A., 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, *164*(2), pp.73-82.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.39-47

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Investigating the Ratio of $Pm_{2.5}$ to Pm_{10} Particle Concentration in Tehran City and Compiling an Index for the Occurrence of Dust

Zohreh Zeynadini Mansorabadi and Yousef Rashidi*

Environmental Research Sciences Institute, Shahid Beheshti University, Iran
* corresponding author:(z.zeynadini@mail.sbu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 3 February 2024

Revised: 26 April 2024

Accepted:14 May 2024

Keywords:

Air pollution,
suspended particles,
$PM_{2.5}$. PM_{10},
dust

Abstract

Suspended particles are known as one of the most important and common pollutants worldwide. Since dust storms are related to suspended particles, the current research examines the ratio of average concentrations of PM2.5 and PM10 suspended particles and determines an index for dust occurrence. In this study, PM2.5 and PM10 particle concentration data at 3 monitoring stations of the Tehran Municipality Air Quality Control Organization (Tarbiat Modares, Piroozi and Sharif stations) in 1396-1402 (2018-2023) were used, and by extracting AOD data from the Giovanni site and determining dust days, and finally comparing it with data from the Barcelona Regional Dust Center, the accuracy of dust days was ensured. The results show that the average concentrations of PM2.5 and PM10 and the PM2.5/PM10 ratio on dusty days are higher than this value on dust-free days. The daily changes in the average concentration of particulate matter at the selected stations show that in most cases, the changes in the concentration of particulate matter are similar and both increase and decrease together, but the rate of change is not the same. Depending on the origin of particulate matter production, their ratio can be used to determine the dust index. On most days, the average PM10 concentration of the station is higher than the dust level obtained from the data of the Barcelona Regional Dust Center, because the air quality measurement stations measure the amount of particulate matter emitted from natural and artificial sources together, but the data of the Barcelona Regional Dust Center shows the amount of dust. From the PM2.5/PM10 ratio, it can be concluded that dust is present if this ratio is less than 0.4. According to the results of the research and the days with dust in 1396 (2018) in the month of Ordibehesht, 1397 (2019) in the months of Ordibehesht and Mehr, 1398 (2020) in the month of Mehr, 1399 (2021) in the months of Esfand and Farvardin, 1400 (2022) in the months of Ordibehesht, Mordad and Azar, and 1401 (2023) in the month of Tir; therefore, it can be concluded that dust often occurs in spring and autumn, then in summer, and finally in winter.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:
Zeynadini Mansorabadi, Z. and Rashid, Y. 2025. Investigating the Ratio of $Pm_{2.5}$ to Pm_{10} Particle Concentration in Tehran City and Compiling an Index for the Occurrence of Dust, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.39-47.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.63380.3288

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بررسی نسبت غلظت ذرات $PM_{2/5}$ به PM_{10} در شهر تهران و تدوین شاخصی برای رخداد گردوغبار

زهره زین‌الدینی منصورآبادی* و یوسف رشیدی

پژوهشکده‌ی علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (z.zeynadini@mail.sbu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

واژگان کلیدی:

آلودگی هوا،

ذرات معلق،

$PM_{2/5}$،

PM_{10}،

گردوغبار.

چکیده

ذرات معلق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین آلاینده‌ها در سراسر جهان شناخته شده‌اند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی نسبت میانگین غلظت ذرات معلق $PM_{2/5}/PM_{10}$ و تعیین شاخصی برای گردوغبار است. لذا از داده‌های غلظت ذرات معلق $PM_{2/5}$ و PM_{10} در ۳ ایستگاه پایش شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران (ایستگاه‌های تربیت مدرس، پیروزی، و شریف) در سال‌های ۱۳۹۶-۱۴۰۲ (۲۰۱۸-۲۰۲۳) استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، برای تعیین روزهای دارای گردوغبار، داده‌های عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها از سایت Giovanni استخراج شده‌اند. درنهایت، روزهای دارای گردوغبار با داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا مقایسه شدند، تا میزان عمق نوری آئروسل‌ها، که پس از آن گردوغبار وجود دارد، تعیین شود. نتایج نشان داد که میانگین غلظت $PM_{2/5}$ و PM_{10} و نسبت $PM_{2/5}/PM_{10}$ در روزهای دارای گردوغبار بیشتر از این مقدار در روزهای بدون گردوغبار بوده است. با توجه به منشأ تولید ذرات معلق می‌توان از نسبت آن‌ها برای تعیین شاخص گردوغبار استفاده کرد. از نسبت $PM_{2/5}/PM_{10}$ می‌توان نتیجه گرفت در صورتی‌که نسبت مذکور کمتر از ۰/۴ باشد، گردوغبار وجود دارد. با توجه به نتایج پژوهش و روزهای دارای گردوغبار در سال‌های: ۱۳۹۶ (۲۰۱۸) در ماه اردیبهشت، ۱۳۹۷ (۲۰۱۹) در ماه اردیبهشت و مهر، ۱۳۹۸ (۲۰۲۰) در ماه مهر، ۱۳۹۹ (۲۰۲۱) در ماه‌های اسفند و فروردین، ۱۴۰۰ (۲۰۲۲) در ماه‌های اردیبهشت، مرداد، و آذر و در ۱۴۰۱ (۲۰۲۳) در ماه تیر رخ داده‌اند؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که گردوغبار اغلب در بهار و پاییز و بعد در تابستان و درنهایت در زمستان رخ می‌دهد.

۱. مقدمه

۱.۱. بیان مسئله

گسترش روزافزون و بی‌رویه‌ی شهرها، به‌همراه توسعه‌ی سریع اقتصادی و در نتیجه، افزایش مصرف انرژی باعث ایجاد مشکلات متعدد زیست‌محیطی برای ساکنین شده است. آلودگی هوای شهرها، یکی از مهم‌ترین معضلات مذکور بوده است، که تهدیدی دائم و جدی برای سلامت و بهداشت جامعه و همچنین محیط‌زیست است.[۱]

داده‌های بین‌المللی حاکی از آن است که منشأ ذرات معلق کاهنده‌ی کیفیت هوای تنفس، هم می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی باشند و هم سرچشمه‌ی طبیعی داشته باشند. حمل‌ونقل، نیروگاه‌های سوختی، کشاورزی، سوزاندن پسماندها، و فعالیت‌های صنعتی دیگر، از یک سو و شن‌های صحرایی از سوی دیگر، عامل‌های اصلی وجود ذرات معلق در هوا به‌شمار می‌روند. هند و چین به ترتیب بیشترین میزان آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2/5}$ در جهان را دارند.[۲]

کشور ایران از جمله مناطقی است که به‌دلیل نزدیکی به بیابان‌های بزرگ دنیا، مانند صحرای عربستان و عراق، تحت تأثیر ورود طوفان‌های گردوغبار قرار دارد. مناطق غرب و جنوب غرب ایران، بیشترین نفوذپذیری را از طوفان‌های گردوغبار دارند، که دلیل آن قرارگرفتن در پهنه‌ی کمربند گردوغبار، که شروع آن از کرانه‌ی غربی آفریقای شمالی است و با عبور از خاورمیانه و آسیای مرکزی و جنوبی تا چین ادامه دارد.[۳ و ۴]

شهر تهران، پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران، و مرکز استان تهران است. براساس برآورد سال ۲۰۱۸ سازمان ملل متحد، سی و چهارمین شهر پرجمعیت جهان و پرجمعیت‌ترین شهر غرب آسیاست.[۵] کلان‌شهر تهران نیز دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است. این شهر با مختصات جغرافیایی ′۴۱ °۳۵ شمالی و ′۲۳ °۵۱ شرقی با مساحت ۲۲۳۵ کیلومتر و ارتفاع بین ۹۰۰ تا ۱۷۰۰ متر در دامنه‌ی جنوبی البرز واقع شده است. تهران اقلیم نیمه‌خشک دارد.[۶] شمال شهر به‌دلیل ارتفاع بیشتر، خنک‌تر از دیگر مناطق شهر است. همچنین بافت نامتراکم، وجود باغ‌های کهن، بوستان‌ها، فضای سبز حاشیه‌ی بزرگراه‌ها و کم‌بودن فعالیت‌های صنعتی در شمال شهر کمک کرده‌اند تا هوای مناطق شمالی به‌طور متوسط ۲ تا ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد خنک‌تر از مناطق جنوبی شهر

استناد به این مقاله:

زین‌الدینی منصورآبادی، زهره و رشیدی، یوسف، ۱۴۰۴. بررسی نسبت غلظت ذرات $PM_{2/5}$ به PM_{10} در شهر تهران و تدوین شاخصی برای رخداد گردوغبار. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۳۹-۴۷. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63380.3288

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

باشد. جهت باد غالب، شمال‌غرب به جنوب‌شرق است، که باعث می‌شود سمت غرب شهر تهران همواره در معرض هوای تازه قرار گیرد؛ با وجود اینکه باد مذکور دود و آلودگی نواحی صنعتی غرب را به‌همراه می‌آورد، وزش شدید آن می‌تواند هوای آلوده را از شهر تهران بیرون ببرد.[۷] از آنجا که ذرات معلق[1]، یکی از عوامل آلودگی هوای کلان‌شهر تهران هستند، بنابراین مطالعه‌ی آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد.

۲.۱. ذرات معلق و گردوغبار

ذرات معلق به تمامی اجزاء ریزمایع یا جامدی (به جز آب خالص) اطلاق می‌شود که در جو زمین پراکنده هستند و اندازه‌ی میکروسکوپی یا ریزمیکروسکوپی، اما بزرگ‌تر از ابعاد مولکولی دارند.[۸]

گردوغبار[2] یا ریزگرد، توده‌ای از ذرات جامد ریز غبار و گاه دود و غیره است، که در جو پخش می‌شود و دید افقی را بین ۱ تا ۲ کیلومتر محدود می‌کند و برای بیماران تنفسی بسیار زیان‌آور است و حیات روی کره‌ی زمین را از جهت‌های مختلفی متأثر می‌سازد. چرخه‌ی گردوغبار، بخش مهمی از سیستم کره‌ی زمین است. سالانه ۲۰۰۰ تن گردوغبار گسیل می‌شود، که ۷۵٪ آن روی خاک و ۲۵٪ آن روی اقیانوس ته‌نشین می‌شود و فرایند اخیر در چرخه‌ی انرژی، آب، و کربن اثر می‌گذارد.[۹]

۲. تاریخچه‌ی پژوهش

فن[3] و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی نسبت ذرات معلق $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف در سرزمین چین بررسی کرده‌اند؛ که در آن میانگین غلظت جرمی سالانه‌ی $PM_{۲/۵}$ در سال‌های: ۲۰۱۵ برابر با ۴۸/۶۳، ۲۰۱۶ برابر با ۴۵، ۲۰۱۷ برابر با ۴۲/۹۱، و ۲۰۱۸ برابر با ۳۸/۰۸ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. همچنین، میانگین غلظت جرمی برای $PM_{۱۰}$ به‌ترتیب در سال‌های: ۲۰۱۵ برابر با ۸۵/۱۳، ۲۰۱۶ برابر با ۸۰/۷۷، ۲۰۱۷ برابر با ۷۸/۷۶، و ۲۰۱۸ برابر با ۷۴/۳۷ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. با توجه به استانداردهای کیفیت هوای محیط چین، حد متوسط سالانه‌ی غلظت $PM_{۲/۵}$ برابر با ۳۵ $\mu g\ m^{-۳}$ و $PM_{۱۰}$ برابر با ۷۰ $\mu g\ m^{-۳}$ بوده است. بدین ترتیب میانگین سالانه‌ی غلظت $PM_{۲/۵}$ در سال‌های: ۲۰۱۵ برابر با ۳۸/۹٪ و در ۲۰۱۸ برابر با ۸/۸٪ و میانگین سالانه‌ی غلظت $PM_{۱۰}$ در سال‌های ۲۰۱۵ برابر با ۲۱٪/۶ و در ۲۰۱۸ برابر با ۶/۲٪، از استاندارد فراتر رفته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهند که نسبت ذرات معلق در فصول مختلف متغیر بوده است. $PM_{۲/۵}$ در زمستان زیاد و در تابستان کاهش یافته است، در حالی‌که $PM_{۱۰}$ در زمستان و بهار زیاد و در پاییز و تابستان کم شده است؛ به بیان دیگر نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در زمستان بالاترین و در بهار کمترین میزان بوده است. نسبت بالاتر $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در زمستان عمدتاً ناشی از انتشار بیشتر توسط وسایل گرمایشی و شرایط آب و هوایی راکدتر و در مقابل، نسبت کمتر در تابستان به‌دلیل بارش‌های بیشتر و طوفان‌های شن بوده است. نکته‌ی مهم دیگر بررسی اخیر در ارتباط با نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ است، که هر ساله کاهش یافته و مستقل از غلظت PM تغییر کرده و اطلاعاتی در مورد گردوغبار ارائه داده است. بنا به تفاسیر اخیر، نوع گردوغبار طبیعی عمدتاً در غرب استان Hu Lin، نوع مخلوط در نزدیکی Hu Line، و نوع انسانی در دشت‌های شمال چین و شهرهای جنوبی غالب بوده است.[۱۰]

مونیر[4] و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی نسبت‌های $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$، تنوع زمانی و مکانی قابل‌توجهی را در انگلستان نشان داده‌اند، میانگین ۵ ساله از ۰/۴ تا ۰/۸ متغیر بوده است، که منجر به میانگین کلی ۰/۶۵ شده است. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در چند سایت نظارتی در بریتانیا افزایش یافته است، علی‌رغم این واقعیت که هر دو سطح $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ عمدتاً کاهش یافته‌اند. با این حال، روند در نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ به‌طورمتوسط در ۴۶ سایت نظارت ناچیز بوده است. روند نسبت‌های $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در فصول مختلف متفاوت بوده است: بهار روند مثبت و معنی‌دار و زمستان روند منفی معنی‌دار را نشان داده است، در حالی که روند مذکور در پاییز و تابستان ناچیز بوده است.[۱۱]

وانگ[5] و همکاران (۲۰۰۸)، برای پایش و نظارت بر نسبت غلظت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در چین، داده‌های یک سایت پس‌زمینه در تابستان و زمستان را در یک دوره‌ی ۶ ساله (۲۰۰۱-۲۰۰۶) جمع‌آوری کرده و دریافته‌اند که سطوح $PM_{۲/۵}$ در پکن در سال‌های مذکور نسبتاً بالا بوده است، و به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از میانگین استاندارد روزانه‌ی آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده‌ی آمریکا (USEPA) بوده است.[۱۲]

داوطلب و همکاران (۲۰۲۳)، برای ارزیابی مکانی- زمانی غلظت جرم ذرات $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ و نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ در ۱۶ ایستگاه پایش آلودگی هوای EPA در لیتوانی طی ۱۷ سال (۲۰۰۵-۲۰۲۲)، تجزیه‌وتحلیل انجام داده‌اند. پژوهش مذکور، مقیاس‌های زمانی مختلف و پس‌زمینه‌های مختلفی از جمله: شهری، صنعتی، حمل‌ونقل، و روستایی را برای کشف روندهای مکانی- زمانی در نظر گرفته است. میزان انتشار $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ در سال ۲۰۲۰ به ترتیب ۱/۲۶ و ۱/۰۶ درصد نسبت به سال اولیه (۲۰۰۵) کاهش داشته است. بیشترین میزان انتشار مربوط به ذرات معلق $PM_{۱۰}$ برابر با ۱۹/۴۹ (Gg) و ذرات معلق $PM_{۲/۵}$ برابر با ۸/۵۳ (Gg) در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۶ بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که در سال ۲۰۱۳، $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ و نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ کاهش قابل توجهی داشته است و همچنین ذرات معلق $PM_{۱۰}$ در مناطق روستایی به‌دلیل افزایش انتشارات کشاورزی، روند افزایشی قابل توجهی داشته است؛ کمترین کاهش ذرات معلق $PM_{۱۰}$، ۰/۰۶ میکروگرم بر مترمکعب در سال برای پس‌زمینه‌ی شهری و بیشترین کاهش در سال ۲۰۰۵ به میزان ۰/۵۸ میکروگرم بر مترمکعب در سال (۵۷٪) در پایتخت مشاهده شده است. کمترین کاهش ذرات معلق $PM_{۲/۵}$، ۰/۰۸ میکروگرم بر مترمکعب در سال در شهر کلاپیدا[6] بوده است.[۱۳]

اسپاندانا[7] و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای تخمین نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ را از ۸ مکان شهری هند با سطوح مختلف شهرنشینی مشخص کرداند. اندازه‌گیری‌های $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ در پنج سال (۲۰۱۵-۲۰۱۹) و داده‌های هواشناسی (دمای محیط، رطوبت نسبی، و سرعت باد) برای درک تغییرپذیری مکانی و زمانی در نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ استفاده شده است. در مناطق مطالعه‌شده، میانگین فصلی نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ بین ۰/۰۸±۰/۳۱ (میانگین

[1] Particulates
[2] Dust
[3] Fan
[4] Munir
[5] Wang
[6] Klaipeda Šilutės pl
[7] Spandana

± انحراف استاندارد) و ۰/۶۵±۰/۳۱ متغیر بوده است. از نظر فصلی، بیشترین نسبت $PM_{2/5}/PM_{10}$ در فصل زمستان مشاهده شده است.[۱۴]

ژانگ[1] و همکاران (۲۰۱۸) برای بررسی ذرات معلق $PM_{2/5}$ و PM_{10} در دوره‌ی طوفان چین (ماه می- ۲۰۱۷)، داده‌های غلظت ساعتی ذرات معلق $PM_{2/5}$ و PM_{10} را در دوره‌ی زمانی دوم تا پانزدهم ماه می از ۳۶۷ ایستگاه نظارت بر محیط‌زیست، که توسط وزارت حفاظت محیط‌زیست نگهداری می‌شوند، جمع‌آوری کرده و با دستگاه تضعیف بتا، که برای جمع‌آوری مداوم ذرات معلق و نظارت بر کیفیت هوا طراحی شده است، اندزه‌گیری انجام داده‌اند. سپس توزیع فضایی ذرات در پژوهش مذکور با استفاده از عمق نوری آئروسل‌ها (AOD) و داده‌های ماهواره‌ی ترا سنجنده‌ی مودیس با وضوح متوسط با طول موج ۵۵۰ نانومتر بررسی شده و نتایج نشان داده است که آلودگی گردوغبار از شمال چین به جنوب و از غرب به شرق کاهش یافته و براساس الگوهای میدان باد، صحرای آلکسا در غرب مغولستان داخلی و صحرای گوبی مغولستان، منابع اصلی گردوغبار در طول رویداد طوفان گردوغبار ماه می در سال ۲۰۱۷ بوده‌اند. همچنین مقایسه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها از سنجنده‌ی مودیس با شبیه‌سازی مدل WRF-Chem تغییرات مکانی- زمانی گردوغبار را در سراسر آسیا تأیید کرده‌اند.[۱۵]

۳. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از اطلاعات ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مربوط به سازمان کنترل کیفیت هوای تهران، پارامتر عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌های ماهواره، و داده‌های مدل‌سازی مرکز منطقه‌ای گردوغبار در خاورمیانه بارسلونا استفاده شده است.

۱.۳. اطلاعات ایستگاه‌ها و دستگاه سنجش

ایستگاه‌های استفاده‌شده برای سنجش میزان ذرات معلق، شامل ایستگاه‌های: تربیت مدرس، پیروزی، و شریف بوده‌اند، که زیر نظر شرکت کنترل کیفیت هوا هستند و دلیل انتخاب آن‌ها وجود داده‌های منطقی‌تر و نزدیک به واقعیت بوده است. موقعیت ایستگاه‌های مذکور به ترتیب در مناطق ۶،۱۳، و ۲ تهران هستند.[۱۵] در ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، غلظت آلاینده‌های اصلی هوا، شامل: مونوکسیدکربن (CO)، ازن (O_3)، ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2/5}$، گوگرد دی‌اکسید (SO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NO، NO_2، و NO_X)، به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری شده‌اند.

در هر سه ایستگاه مذکور از دستگاه نمونه‌گیر غلظت جرمی تضعیف بتای Met One Instruments BAM ۱۰۲۰ استفاده شده است. این دستگاه به‌طورخودکار، سطوح غلظت جرم ذرات محیط را با استفاده از اصل تضعیف اشعه‌ی بتا اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. نمایشگر مذکور از سه بخش اصلی تشکیل شده است: واحد مرکزی، پمپ نمونه‌برداری، و سخت‌افزار ورودی نمونه‌برداری. روش ذکرشده، غلظت ذرات معلق در محیط را بر حسب mg/m^3 یا $\mu g/m^3$ فراهم می‌کند. یک عنصر کربن ۱۴ در داخل BAM ۱۰۲۰ منبع ثابتی از پرتوهای بتا را فراهم می‌کند. پرتوهای بتا، مسیری را طی می‌کنند که از طریق آن نوار فیلتر فیبر شیشه‌ای قبل از شناسایی با یک آشکارساز سوسوزن عبور داده می‌شود. در ابتدای چرخه‌ی اندازه‌گیری، تعداد پرتوهای بتا (I_0) در نوار فیلتر تمیز ثبت می‌شود. سپس، یک پمپ خارجی حجم مشخصی از هوای مملو از PM را از طریق نوار فیلتر به داخل می‌کشد و در نتیجه PM را روی نوار فیلتر به دام می‌اندازد. در پایان چرخه‌ی اندازه‌گیری، تعداد پرتوهای بتا (I_1) دوباره در نوار فیلتر دارای PM اندازه‌گیری و نسبت I_0 به I_1 برای تعیین چگالی جرمی PM جمع‌آوری‌شده بر روی نوار فیلتر استفاده شده است.

۲.۳. اطلاعات ماهواره- سنجنده‌ی MODIS

سنجنده‌ی MODIS[2]، ۳۶ باند طیفی با قدرت تفکیک رادیومتریک ۱۲ بیت بین طول موج‌های ۰/۴-۱۴/۴ میکرون دارد. سنجنده‌ی مودیس در ۲ باند دارای تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، در ۵ باند دارای تفکیک مکانی ۵۰۰ متر، و در ۲۹ باند دارای تفکیک ۱۰۰۰ متر است. مودیس برنامه‌ی گسترده‌ای است که با استفاده از حسگرهای روی دو ماهواره‌ی Aqua و Terra پوشش کاملی از زمین ارائه می‌کند. از آنجایی که سنجنده‌ی مودیس در هر دو ماهواره نصب است، به‌طورکلی به‌دست‌آوردن تصاویر در صبح از ماهواره‌ی ترا و در عصر از ماهواره‌ی آکوا برای هر مکانی امکان‌پذیر است.[۱۵] سنجنده‌ی مودیس، یکی از بهترین داده‌های ماهواره‌ای برای بررسی مشخصات و مسیر حرکت و طوفان‌های گردوغبار است.[۱۶]

۳.۳. اطلاعات عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها (AOD)

عمق نوری آئروسل، یکی از پارامترهای مهم در مطالعه‌ی گردوغبار است؛ که در واقع، به توزیع آئروسل‌های گردوغبار موجود در جو اشاره دارد. عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها، معیاری برای انهدام پرتو خورشیدی توسط گردوغبار و مه است. به‌عبارت دیگر، ذرات موجود در اتمسفر (گردوغبار، دود، و آلودگی) می‌توانند نور خورشید را با جذب یا پراکندگی مسدود سازند. عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها مشخص می‌کند که ذرات آئروسل چقدر از رسیدن نور مستقیم خورشید به زمین جلوگیری می‌کنند. عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها، یک عدد بدون بُعد است، که به مقدار آئروسل در ستون عمودی جو روی مکان مشاهده مربوط می‌شود (NOAA.GOV). فاصله‌ی عمودی از سطح زمین در قسمت فوقانی جو است. مقدار عمق نوری می‌تواند با تراکم تعداد آئروسل‌ها و ویژگی‌های ذرات متفاوت باشد. دامنه‌ی تغییرات عمق نوری ۰/۱ تا ۰/۲ برای شرایط هوای قاره‌ای صاف و ۰/۱ تا ۰/۵ برای هوای اقیانوسی صاف در نظر گرفته می‌شود. بیشتربودن مقادیر عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها از مقدار اخیر، نشان‌دهنده‌ی تراکم آئروسل‌ها در امتداد ستون عمودی هواست و به‌عبارتی، دید در امتداد آن ستون کم است. میانگین عمق نوری جهانی در شرایط عادی به‌علت وجود غبارهای نمک و ذرات ناشی از کانی‌ها حدود ۰/۳۲ برآورد شده است. در صورتی که گردوغبارهای عمده‌ی دنیا، عمق نوری در محدوده‌ی بین ۰/۳ تا ۲/۵ دارند، که بیانگر نقش مهم گردوغبارها در کاهش نور است. عمق نوری آئروسل‌ها معمولاً با افزایش طول موج کاهش می‌یابد و بنابراین، مقدار آن در تابش‌های طول موج بلند بسیار کمتر از تابش‌های طول موج کوتاه است.[۱۶] داده‌های عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها، هر سال بعد از مرتب‌سازی از بیشترین به کمترین مقدار، به‌صورت نمودار رسم شده‌اند تا قابل مقایسه با سال قبل و بعد باشند.

۴.۳. داده‌های سامانه‌ی Giovanni

سامانه‌ی Giovanni، در مرکز هوایی ناسا، یک محیط آنلاین (وب) برای نمایش و تجزیه‌وتحلیل پارامترهای ژئوفیزیکی است، که در آن منشأ (اصل داده‌ها) به‌راحتی قابل‌دسترس است. این مجموعه داده‌های هیدرولوژیکی با

[1] Zhang

[2] Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

قدرت تفکیک زمانی> ۰/۵ ساعته، ۱ ساعته، ۳ ساعته، روزانه، و ماهانه است، که از سال ۲۰۰۰ تا کنون، از طریق اندازه‌گیری‌های صحرایی، ماهواره‌ای، و یک سری متغیرهای شبیه‌سازی‌شده به‌دست آمده‌اند.

نمودار سری زمانی استاندارد Giovanni با محاسبه‌ی میانگین‌های مکانی در ناحیه‌ی انتخاب‌شده توسط کاربر یک متغیر معین برای هر مرحله‌ی زمانی در محدوده‌ی مشخص‌شده توسط کاربر تولید و سپس مقدار میانگین بر حسب زمان رسم می‌شود تا خروجی سری زمانی ایجاد شود.

۵.۳. مدل‌سازی گردوغبار در خاورمیانه با استفاده از داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا

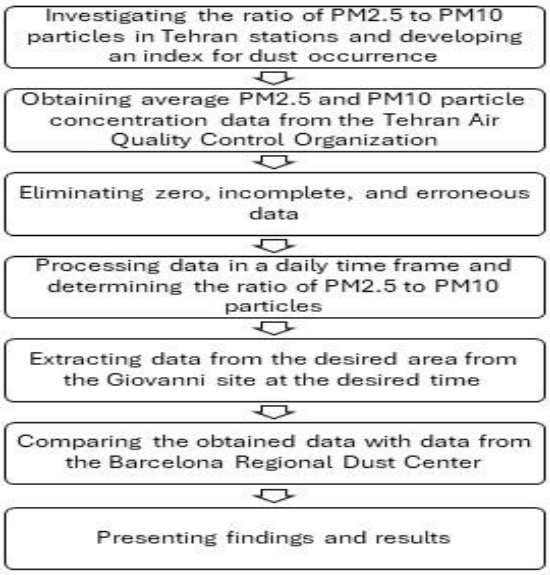
فعالیت‌های عملیاتی توسط مرکز منطقه‌ای پیش‌بینی گردوغبار بارسلونا (BDFC)، که در فوریه ۲۰۱۴ توسط آژانس هواشناسی دولتی اسپانیا (AEMET) و مرکز ابرمحاسبات بارسلونا (BSC) ایجاد شده است، برای انجام تعهد منعقدشده با سازمان جهانی هواشناسی (WMO) درخصوص میزبانی اولین مرکز هواشناسی تخصصی منطقه‌ای با تمرکز فعالیت در زمینه‌ی پیش‌بینی گردوغبار جوی (RSMC– ASDF)، انجام می‌شود. این مرکز به‌طور عملیاتی پیش‌بینی گردوغبار را برای شمال آفریقا (شمال خط استوا)، خاورمیانه، و اروپا تولید و توزیع می‌کند. مدل مرجع برای ارائه‌ی پیش‌بینی‌های عملیاتی گردوغبار به مرکز، مدل MONARCH است، که توسط مرکز ابرمحاسباتی بارسلونا توسعه یافته است. این مدل روزانه در رزولوشن افقی ۰/۱ درجه‌ی طول جغرافیایی در هر ۰/۱ درجه‌ی عرض جغرافیایی با ۴۰٪ لایه‌های عمودی بر روی حوزه‌ی موردنظر در زیرساخت‌های HPC اجرا می‌شود. اجرای اولیه در ابرکامپیوتر BSC MareNostrum IV با استفاده از منابع اختصاصی و ادغام پشتیبان به‌صورت روزانه با پیکربندی یکسان در مرکز ابر محاسباتی بارسلونا انجام می‌شود.

۴. بحث و تحلیل

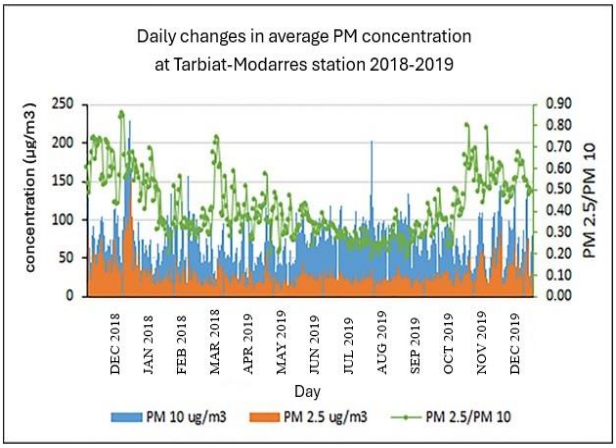
در پژوهش حاضر، جهت بررسی غلظت ذرات معلق و تعیین شاخص گردوغبار، ابتدا داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مناطق موردنظر از سایت شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران گرفته شد و بعد از حذف داده‌های پرت (داده‌های صفر، ناقص، و یا اشتباه) به‌صورت دستی، نسبت $PM_{2.5}/PM_{10}$ محاسبه شد. در مرحله‌ی بعد، داده‌های سایت Giovanni با توجه به منطقه‌ی مطالعه‌شده (ایستگاه‌های: تربیت مدرس، پیروزی، و شریف) و زمان موردنظر (از سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲) استخراج و درنهایت با داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا مقایسه شدند. میانگین غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} از سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ (۲۰۲۳-۲۰۱۸) به‌صورت روزانه از سایت شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران استخراج و نسبت ذرات $PM_{2.5}/PM_{10}$ محاسبه شده است. مراحل مختلف پژوهش در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۵. نتایج

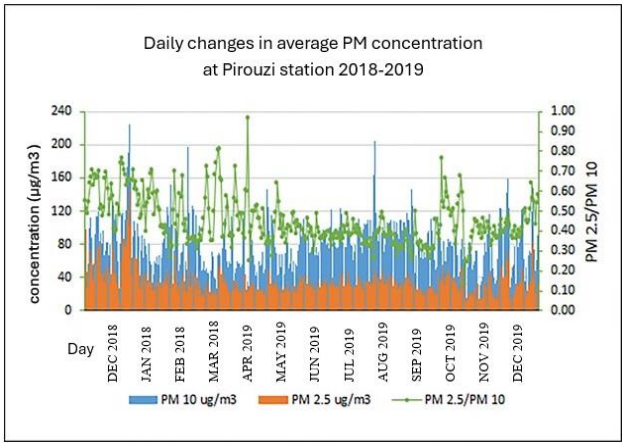
در شکل‌های ۲ الی ۴، تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در سه ایستگاه سنجش کیفیت هوا در سال ۹۷-۹۶ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، مقدار میانگین غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه تربیت مدرس بین مقدار کمینه و بیشینه‌ی $\mu g/m^3$ ۹-۱۵۳، در ایستگاه پیروزی $\mu g/m^3$ ۱۰-۱۴۸، و در ایستگاه شریف $\mu g/m^3$ ۹-۱۴۶ متغیر بوده است، میانگین غلظت برای PM_{10} در ایستگاه تربیت مدرس $\mu g/m^3$ ۲۴-۲۲۹، ایستگاه پیروزی $\mu g/m^3$ ۲۷-۲۲۴، و ایستگاه شریف $\mu g/m^3$ ۲۱-۲۳۲ بوده است. بنابراین نسبت $PM_{2.5}/PM_{10}$ برای ایستگاه تربیت مدرس بین ۰/۸۶-۰/۱۸، ایستگاه پیروزی ۰/۹۷-۰/۱۳، و ایستگاه شریف ۰/۹۲-۰/۲۰ متغیر بوده است. با توجه به مقایسه‌ی یک روز عادی و عاری از گردوغبار و یک روز دارای گردوغبار (شکل ۵) می‌توان نتیجه گرفت که نسبت میانگین غلظت روزانه‌ی ذرات درشت (PM_{10}) به ذرات ریز ($PM_{2.5}$) در روز گردوغباری کمتر بوده است، بنابراین گردوغبار بیشتر در



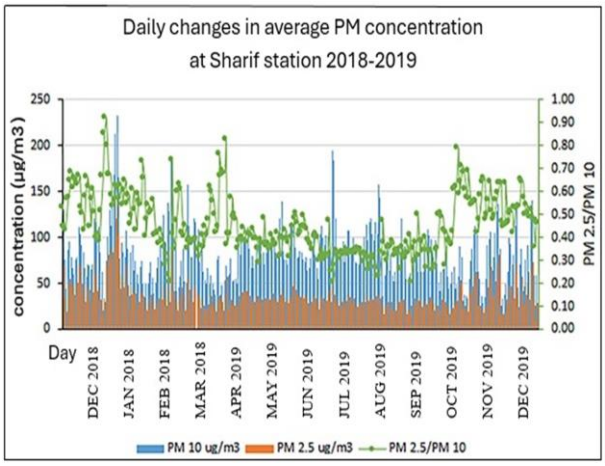
شکل ۱. فلوچارت مراحل پژوهش.



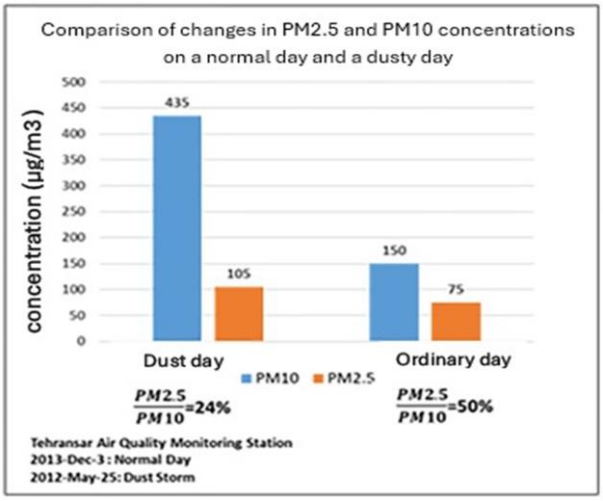
شکل ۲. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه تربیت مدرس ۹۷-۱۳۹۶.



شکل ۳. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه پیروزی ۹۷-۱۳۹۶.



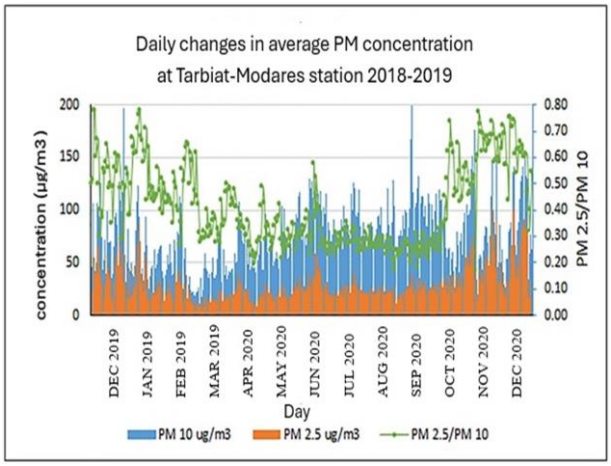
شکل ۴. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه شریف ۹۷-۱۳۹۶.



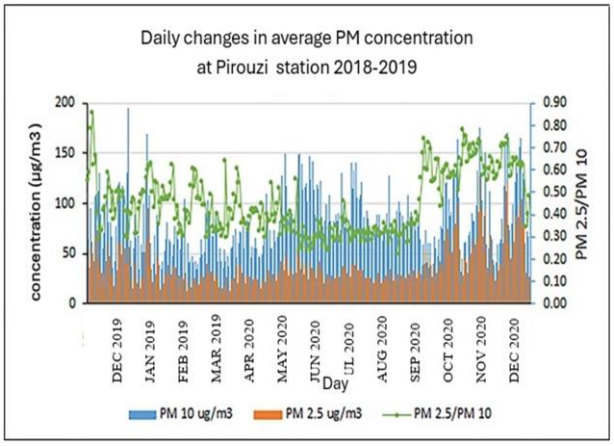
شکل ۵. مقایسه‌ی تغییرات غلظت‌های $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ در روزهای عادی و دارای گردوغبار (رشیدی، ۱۴۰۰).

ماه‌های فروردین، اردیبهشت، تیر، مرداد، شهریور، و مهر که نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ کمتر از ۰/۴ است، رخ داده است.

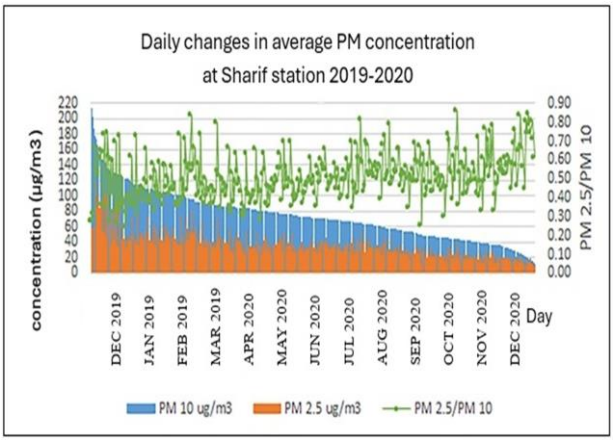
در شکل‌های ۶ الی ۸، تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در سه ایستگاه سنجش کیفیت هوا در سال ۹۸-۹۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، مقدار میانگین غلظت $PM_{۲/۵}$ در ایستگاه تربیت مدرس بین دو مقدار کمینه و بیشینه‌ی $\mu g/m^3$ ۵-۱۰۲، در ایستگاه پیروزی $\mu g/m^3$ ۱-۱۲۶، و در ایستگاه شریف $\mu g/m^3$ ۸-۱۱۹ متغیر بوده است، میانگین غلظت برای $PM_{۱۰}$ در ایستگاه تربیت مدرس بین $\mu g/m^3$ ۱۸-۱۹۹، ایستگاه پیروزی $\mu g/m^3$ ۳۱-۱۹، و ایستگاه شریف $\mu g/m^3$ ۱۳-۲۱۴ بوده است. بنابراین نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ برای ایستگاه تربیت مدرس بین ۰/۷۸-۰/۱۷، ایستگاه پیروزی ۲۳/۸۶-۰/۰ و ایستگاه شریف ۰/۸۶-۰/۲۵ متغیر بوده است. بنابر اطلاعات و نمودارهای موجود، گردوغبار بیشتر در ماه‌های اردیبهشت، تیر، شهریور، و مهر رخ داده است، که تقریباً مشابه سال قبل بوده است؛ ولی با این تفاوت که در ایستگاه تربیت مدرس نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ از ۰/۸۶-۰/۱۸ به مقدار ۱۷/۷۸-۰/۰ کاهش یافته و در ایستگاه پیروزی و شریف، مقدار کمینه‌ی نسبت $PM_{۲/۵}/PM_{۱۰}$ ، به ترتیب از ۰/۱۳ و ۰/۲۰ به ۰/۲۳ و ۰/۲۵ افزایش و مقدار بیشینه‌ی آن به ترتیب از ۰/۹۷ و ۰/۹۲ به مقدار ۰/۸۶ کاهش یافته است، که دلیل کاهش مقدار کمینه و بیشینه در ایستگاه تربیت‌مدرس، کاهش میزان



شکل ۶. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه تربیت مدرس ۹۸-۱۳۹۷.



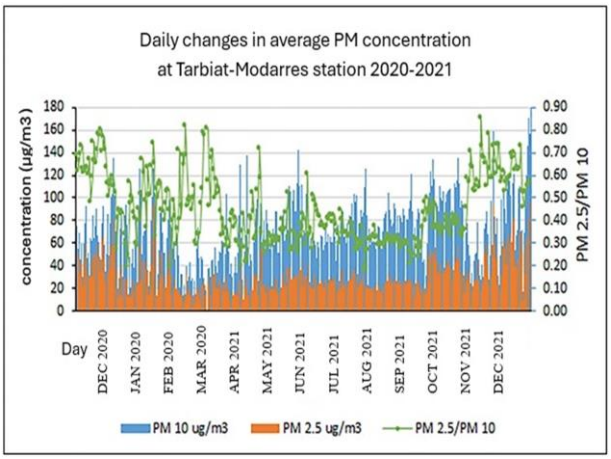
شکل ۷. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه پیروزی ۹۸-۱۳۹۷.



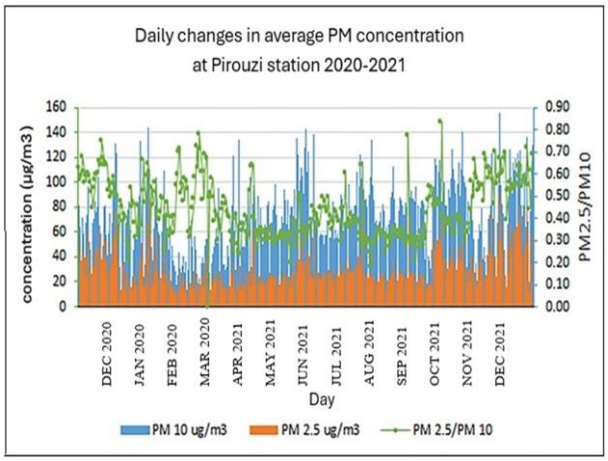
شکل ۸. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه شریف ۹۸-۱۳۹۷.

غلظت $PM_{۲/۵}$ و $PM_{۱۰}$ بوده است، که می‌تواند به‌دلیل کاهش آلودگی هوا بوده باشد.

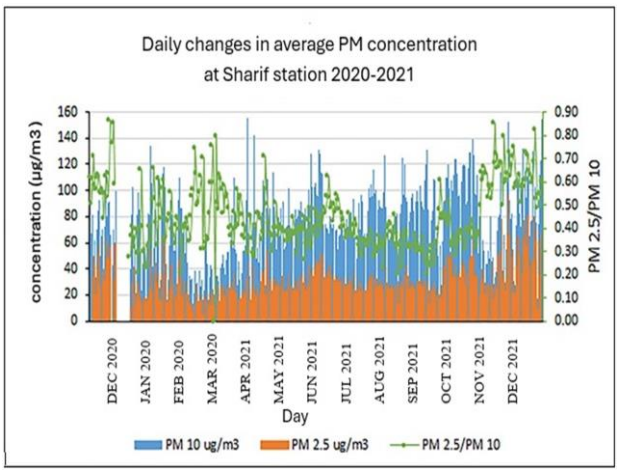
تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در سه ایستگاه سنجش کیفیت هوا در سال ۹۹-۹۸ در شکل‌های ۹ الی ۱۱ مشاهده می‌شود. در سال مذکور، مقدار میانگین غلظت $PM_{۲/۵}$ در ایستگاه تربیت مدرس، کمینه و بیشینه‌ی $\mu g/m^3$ ۶-۹۷، در ایستگاه پیروزی $\mu g/m^3$ ۸-۹۴، و در ایستگاه شریف $\mu g/m^3$ ۹۷-



شکل ۹. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه تربیت‌مدرس ۹۹-۱۳۹۸.

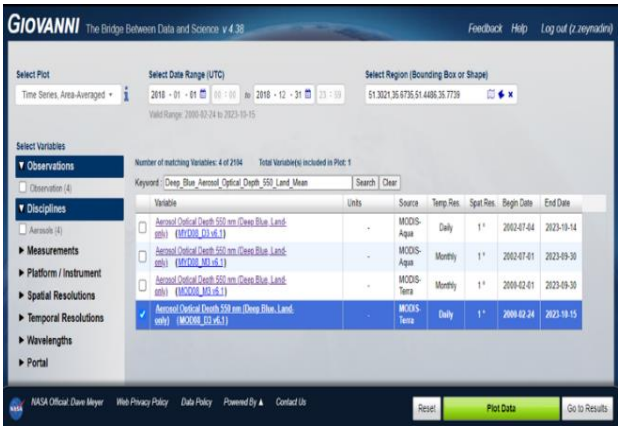


شکل ۱۰. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه پیروزی ۹۹-۱۳۹۸.

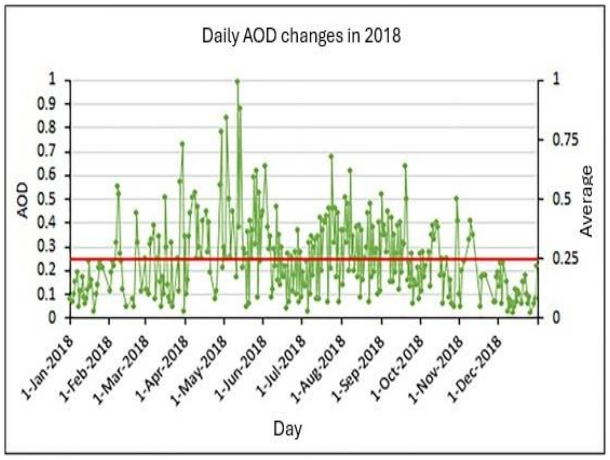


شکل ۱۱. نمودار تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت PM در ایستگاه شریف ۹۹-۱۳۹۸.

۵ تغییر داشته است. همچنین، میانگین غلظت برای PM_{10} در ایستگاه تربیت مدرس بین ۱۲-۱۷۱ $\mu g/m^3$، ایستگاه پیروزی ۱۴-۱۵۶ $\mu g/m^3$، و ایستگاه شریف ۱۳-۱۵۵ $\mu g/m^3$ بوده است. بنابراین نسبت $PM_{2/5}/PM_{10}$ برای ایستگاه تربیت مدرس بین ۱۷/۸۶-۰/۰، برای ایستگاه پیروزی ۰/۸۴-۰/۱۸، و ایستگاه شریف ۰/۸۶-۰/۲۱ متغیر بوده است. با توجه به اطلاعات و نمودارهای موجود، گردوغبار بیشتر در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، شهریور و اسفند رخ داده



شکل ۱۲. نمایی از داده‌های عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها از سایت Giovanni (giovanni.gsfc.nasa.gov).



شکل ۱۳. نمودار تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۸.

است، که تقریباً مشابه سال قبل بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که گردوغبار در ماه‌های خاصی از سال و با مقدار $PM_{2/5}/PM_{10}$ تقریباً مشابه رخ داده است.

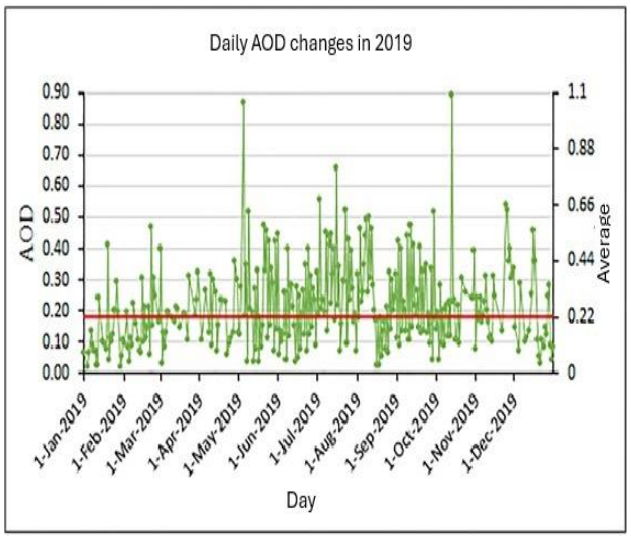
در مرحله‌ی بعد باید روزهای دارای گردوغبار مشخص شوند، که این موضوع با استفاده از داده‌های عمق نوری آئروسل‌ها (AOD) تعیین شده است. داده‌های عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها را می‌توان از سایت Giovanni استخراج کرد. نمای کلی از داده‌های استخراج‌شده از سایت Giovanni در شکل۱۲ مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۳، تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میزان عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در ماه‌های آپریل، می، و ژوئن بیشترین مقدار را داشته است، که معادل ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، و تیر است، که با داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مطابقت داشته است. مقدار متوسط سالانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۸، ۰/۲۵ بوده است. میزان بالای عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها، نشان‌دهنده‌ی ذرات معلق بیشتر در هواست و به عنوان شاخص گردوغبار استفاده می‌شود.

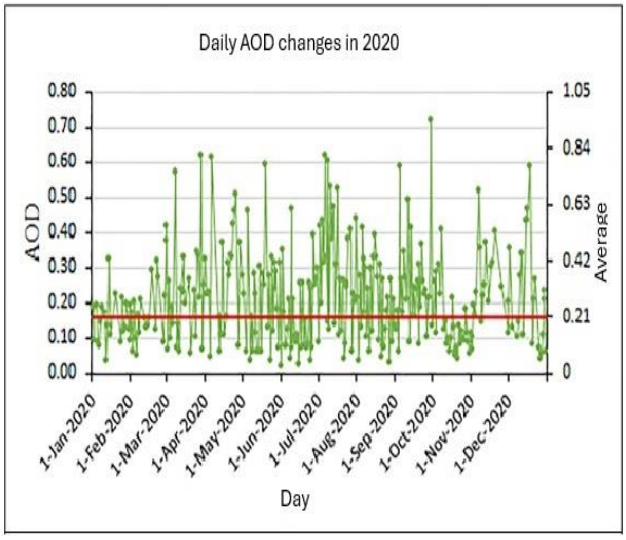
تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۹ در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میزان عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در ماه‌های می و اکتبر بیشترین مقدار را داشته است، که معادل ماه‌های اردیبهشت،

جدول ۱. میزان گردوغبار به‌دست‌آمده از مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا، Giovanni و ایستگاه‌های هواشناسی.

Date		Giovanni	Barcelona	Tarbiat-Modarres			Pirouzi			Sharif		
		عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها	Dust ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}/PM_{10}$
2018	12-May	0.99	109.06	41	109	0.38	27	107	0.25	-	-	-
	14-May	0.88	65.82	32	87	0.37	36	85	0.42	-	-	-
2019	13-Oct	0.89	85.37	30	115	0.26	30	109	0.28	26	47	0.55
	4-May	0.87	104.7	30	91	0.33	29	90	0.32	37	85	0.44
2020	29-Sep	0.72	140.5	22	88	0.25	22	81	0.27	23	85	0.27
2021	17-Mar	1.10	119.63	53	159	0.33	49	143	0.34	66	155	0.43
	9- Apr	0.98	119.09	36	114	0.32	38	108	0.35	43	98	0.44
2022	8-May	0.98	63.28	58	337	0.17	68	327	0.21	-	-	-
	9-Dec	0.91	-	76	101	0.75	94	137	0.69	-	-	-
	27-Jul	0.90	164.47	52	182	0.29	68	212	0.32	79	211	0.37
	7-May	0.88	104.56	56	175	0.32	51	166	0.31	-	-	-
2023	26-Jan	0.83	114.77	82	134	0.61	83	134	0.62	84	133	0.63



شکل ۱۴. نمودار تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۹.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۲۰.

خرداد، مهر، و آبان است؛ که می‌توان گفت تقریباً با داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مطابقت داشته است. مقدار متوسط سالانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۱۹، ۰/۲۲ بوده است.

تغییرات روزانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۲۰ در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میزان عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در ماه‌های آپریل، می، و اکتبر بیشترین مقدار را داشته است، که معادل ماه‌های فروردین، اردیبهشت،خرداد، مهر، و آبان است؛ که می‌توان گفت تقریباً مشابه داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا بوده‌اند. مقدار متوسط سالانه‌ی عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها در سال ۲۰۲۰، ۰/۲۱ بوده است.

پس از مشخص‌شدن روزهای دارای گردوغبار برای تعیین حدی از عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها، که پس از آن گردوغبار وجود دارد، از داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا استفاده شده است. در واقع، داده‌های مرکز ذکرشده برای راستی‌آزمایی روزهای دارای گردوغبار است. اطلاعات مربوط به داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا در جدول ۱ ارائه شده است.

در اغلب روزها، میانگین غلظت ذرات معلق PM_{10} ایستگاه بیشتر از مقدار گردوغبار (Dust) به‌دست‌آمده از داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا بوده است؛ به این دلیل که ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، مقدار ذرات معلق

منتشرشده از منابع طبیعی و انسان‌ساز را با هم اندازه‌گیری می‌کنند، ولی داده‌های مرکز منطقه‌ای گردوغبار بارسلونا مقدار گردوغبار را نشان می‌دهند.

با توجه به داده‌های جدول ۱ می‌توان گفت زمانی که عمق نوری (اپتیکی) آئروسل‌ها بیشتر از ۰/۷ و نسبت $PM_{2.5}/PM_{10}$ کمتر از ۰/۴ باشد، گردوغبار وجود دارد.

تغییرات روزانه‌ی میانگین غلظت ذرات معلق در ایستگاه‌های منتخب نشانگر این است که در بیشتر موارد، تغییرات غلظت ذرات معلق مشابه بوده و هر دو با هم افزایش و کاهش یافته‌اند؛ اما میزان تغییرات یکسان نبوده است. ذرات درشت معمولاً اغلب توسط فعالیت‌های طبیعی تولید می‌شوند و در مقابل ذرات ریز، منشأ انسانی دارند و همچنین اغلب از ذرات ثانویه ناشی می‌شوند. بنابراین، می‌توان از نسبت ذرات درشت به ریز به‌عنوان شاخص گردوغبار استفاده کرد. مقایسه‌ی یک روز عادی و عاری از گردوغبار و یک روز دارای گردوغبار بیانگر این است که نسبت میانگین غلظت روزانه‌ی ذرات درشت (PM_{10}) به ذرات ریز ($PM_{2.5}$) در روز گردوغباری کمتر است.

References- منابع

1. Haqbayan, S. and Tashayo, B., 2020. Integrating ground-based air quality monitoring stations with mobile sensor units to improve the accuracy of PM2.5 concentration modeling. *J. Sephr Geographical Information Research Quarterly,29* (116), pp.45-58 [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.242859
2. WHO ambient air quality database, 2022 update: status report, https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts
3. Anselin, L. and Syabri, I. & Kho, Y., 2005. GEODA: An introduction to spatial data analysis. *J. Geographical Analysis,38*(1), pp.5–22 https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x
4. Goudie, A. & Middleton, N. 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *J. Earth-Science Reviews,56*(1–4), pp.179–204. DOI:10.1016/s0012-8252(01)00067-8.
5. world Urbanization Prospects 2018. United Nations. New York. 2018
6. https://irantours24.com/climate-in-iran https://fa.wikipedia.org
7. .https://www.who.int/docs/default-source/gho documents/world-health-statistic-reports/world heatlth-statistics-2016.
8. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM
9. https://fa.wikipedia.org/wiki
10. Fan, H. and Zhao, C. and Yang, Y. & Yang, X., 2021. Spatio-Temporal variations of the PM2.5/PM10 ratios and its application to air pollution type classification in China.*J. Frontiers In Environmental Science, 9* DOI:10.3389/fenvs.2021.692440
11. Munir, Said., 2016. Analysing temporal trends in the ratios of $PM_{2.5}/PM_{10}$ in the UK. *J. Aerosol And Air Quality Research,17*(1), pp.34-48. DOI:10.4209/aaqr.2016.02.0081
12. Wang, H. and Zhuang, Y. & Wang, Y. & Sun, Y. & Yuan, H. & Zhuang, G. & Hao, Z., 2008. Long-term monitoring and source apportionment of PM2.5/PM10 in Beijing, China. *J. Environmental Sciences, 20*(11), pp.1323–1327. DOI:10.1016/s1001-0742(08)62228-7
13. Davtalab, M. and Byčenkienė, S. & Bimbaitė, V. 2023. Long-term spatial and temporal evaluation of the PM2.5 and PM10 mass concentrations in Lithuania. Atmospheric *J. Pollution Research, 14*(12), pp. 101951. https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101951
14. Baggam, S. & Rao, S. & Upadhya, A. & Kulkarni, P. & Sreekanth, V. 2021. PM2.5/PM10 ratio characteristics over urban sites of India. *J.Advances In Space Research. 67*(10), pp. 3134-3146.https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.008
15. Zhang, X. and Sharratt, B. & Liu, L. & Wang, Z. & Pan, X. & Lei, J. & Wu, S. & Huang, S. & Guo, Y. & Li, J. & Tang, X. & Yang, T. & Tian, Y. & Chen, X. & Hao, J. & Zheng, H. & Yang, Y. & Lyu, Y. 2018. East Asian dust storm in May 2017: observations, modelling, and its influence on the Asia-Pacific region.*J. Atmospheric Chemistry And Physics, 18*(11), pp. 8353–8371. https://doi.org/10.5194/acp-18-8353-2018.
16. Rashki, A. and Middleton, N. & Goudie, A. 2021. Dust storms in Iran – Distribution, causes, frequencies and impacts. *J. Aeolian Research, 48*, pp. 100655. DOI:10.1016/j.aeolia.2020.100655

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.48-58

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Prioritizing the Construction of Bicycle Lanes in the Central Area of Tehran Based on Sustainable Transportation Principles

Khashayar Mahmoudian* and Amirhassan Kermanshah

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
* corresponding author:(Khs.mahmoudian78@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 17 February 2024

Revised: 31 May 2024

Accepted:7 July 2024

Keywords:

Analytical Hierarchy Process,
Cycling,
Sustainable Solution,
Bike Lane

Abstract

One of the sustainable solutions to alleviate existing issues caused by personal vehicle usage is the promotion of cycling. The initial step to increase public interest in cycling involves establishing suitable bike lanes. These lanes should not only be safe but also provide a comfortable, attractive environment while ensuring convenient access to public transportation stations and facilitating interaction with other modes of public transit. This research investigates three routes in Tehran's central area, aiming to prioritize them for bicycle lane construction based on safety, attractiveness, and movement potential criteria. Under the safety criterion, important sub-criteria include the slope of the route, permissible speed of vehicles in the lane, traffic volume, the number of intersections, and the location of congestion charge zones. These factors play a pivotal role in creating a secure cycling infrastructure. The attractiveness criterion takes into account sub-criteria such as land use diversity and the incorporation of green spaces along the routes, enhancing the overall cycling experience. Simultaneously, the movement potential criterion evaluates sub-criteria, including the resident population, the availability of public transport stations, and the proximity to educational centers. This ensures that the selected routes are not only safe and attractive but also practical within the urban context. In this study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) is utilized to determine the importance of each parameter. The results indicate that sub-criteria such as the slope of the route, permissible speed of vehicles in the lane, and the number of intersections on the route are more important within the safety criterion. After prioritizing the routes for the construction of bicycle lanes based on the criteria and sub-criteria in this research, Shoosh Street is identified as having a higher priority compared to other streets. Following Shoosh Street, 17th Shahrivar Street, and Ferdowsi Street are the next in line for constructing bicycle lanes.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.
The Second author is an Editorial Board Member/Editor-in-Chief/Associate Editor/Guest Editor for Sharif Civil Engineering Journal and was not involved in the editorial review or the decision to publish this article.

To Cite this article:
Mahmoudian, Kh. and Kermanshah, A.H. 2025. Prioritizing the Construction of Bicycle Lanes in the Central Area of Tehran Based on Sustainable Transportation Principles, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.48-58.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.64061.3303

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

اولویت‌بندی مسیر احداث خط دوچرخه در مرکز شهر تهران براساس مبانی پایداری در حمل‌ونقل

خشایار محمودیان * و امیرحسن کرمانشاه

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (Khs.mahmoudian78@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

واژگان کلیدی:

اولویت‌بندی،

دوچرخه،

راه‌حل پایدار،

مسیر دوچرخه.

چکیده

یکی از راه‌حل‌های پایدار جهت بهبود معضلات موجود استفاده از خودروهای شخصی، استفاده از دوچرخه است. گام نخست به‌منظور افزایش رغبت عمومی نسبت به استفاده از دوچرخه، ایجاد مسیرهای مناسب دوچرخه‌سواری است؛ که باید ایمن، راحت، جذاب و با دسترسی مناسب باشند. به همین منظور، پژوهش حاضر به اولویت‌بندی سه مسیر در مرکز شهر تهران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای احداث مسیر دوچرخه با توجه به معیارهای ایمنی، جذابیت، و پتانسیل جابجایی پرداخته است. در نتایج پژوهش حاضر نشان داده شده است که زیرمعیارهای شیب مسیر، سرعت مجاز وسائط نقلیه در مسیر، و تعداد تقاطع در مسیر از معیار ایمنی از دیگر زیرمعیارها در تعیین مسیر برای احداث مسیر دوچرخه با اهمیت‌تر هستند. همچنین پس از اولویت‌بندی مسیرهای احداث دوچرخه با توجه به معیارها و زیرمعیارهای ارائه‌شده در پژوهش حاضر، خیابان شوش نسبت به دیگر خیابان‌ها، اولویت بالاتری برای احداث مسیر دوچرخه داشته است. پس از خیابان شوش، خیابان فردوسی و خیابان هفده شهریور به ترتیب در اولویت ساخت مسیر دوچرخه بوده‌اند.

۱. مقدمه

افزایش بی‌رویه‌ی استفاده از وسائط حمل‌ونقل شخصی و نداشتن توجه کافی به استفاده از حمل‌ونقل همگانی، شهرها را با مشکلات عدیده‌ای از جمله ترافیک و آلودگی‌های زیست‌محیطی درگیر کرده است؛ که از جمله‌ی مهم‌ترین آن‌ها، افزایش بی‌رویه‌ی گازهای گلخانه‌ای است. برای غلبه بر مشکلات کنونی ناشی از حمل‌ونقل، درنظرگرفتن هر سه پارامتر اقتصادی، اجتماعی، و محیط‌زیستی ضروری است.[۱] حمل‌ونقل پایدار[1] مفهوم و رویکرد جدیدی است که هر سه پارامتر اخیر را به عنوان سه بُعد اصلی خود در نظر گرفته است.[۲] حمل‌ونقل فعال[2]، یکی از شیوه‌های حمل‌ونقل پایدار است. استفاده از شیوه‌ی اخیر سفر باعث افزایش سلامت جامعه، افزایش رضایتمندی از سفر، کاهش وابستگی به خودروهای شخصی، کاهش ترافیک، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است.[۳] ترغیب افراد به استفاده از شیوه‌های فعال سفر، نیازمند فراهم‌بودن عواملی است؛ که در این راستا، وجود زیرساخت‌های مناسب شهری و مناسب‌بودن کیفیت شبکه‌ی معابر، جزء دو عامل اصلی هستند.[۴] یکی از دو شیوه‌ی اصلی حمل‌ونقل فعال، استفاده از دوچرخه است. از مهم‌ترین عواملی که در قابلیت دوچرخه‌سواری و میزان رضایتمندی از سفر با دوچرخه در محیط‌های مختلف اثرگذارند، ویژگی‌های خطوط دوچرخه هستند، که باید چند خصوصیت اصلی داشته باشند، که در طراحی زیرساخت‌های دوچرخه به آن‌ها توجه شود. ویژگی‌های مهم خطوط دوچرخه برای بالابردن کیفیت قابلیت دوچرخه‌سواری شامل دسترسی، ایمنی، امنیت، پیوستگی، سادگی و کوتاه‌بودن مسیر، راحتی، و زیبایی است.[۵] برای مثال، تأثیر عوامل مختلف در استفاده از دوچرخه توسط بانوان در گروه‌های جمعیتی مختلف در مطالعه‌ای در شهر ملبورن (استرالیا) بررسی شده است؛ که در آن، تأکید زیادی بر بهبود زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری در مسیرهای اختصاصی دوچرخه شده است. زیرا زیرساخت‌های مذکور اهمیت بالایی در تشویق بانوان به استفاده از دوچرخه داشته‌اند.[۶] این مسیرهای اختصاصی دوچرخه با ویژگی‌های خاص می‌توانند شرایط دوچرخه‌سواری ایمن‌تری فراهم کنند، تا افراد بیشتری از دوچرخه به‌عنوان وسیله‌ای برای حمل‌ونقل استفاده کنند.[۷]

ایمنی مسیرهای دوچرخه، اهمیت بسیاری در میزان رضایتمندی افراد در استفاده از دوچرخه دارد.[۸] در همین راستا، مطالعه‌ای در شهر تسالونیکی (یونان) با استفاده از نظرسنجی آنلاین دریافته است که دو پارامتر نبود ایمنی و نبود پیوستگی مسیر دوچرخه، نقش اساسی در میزان رضایتمندی افراد از سفر با دوچرخه را داشته‌اند.[۹]

[1] Sustainable Transportation

[2] Active Transport

استناد به این مقاله:

محمودیان، خشایار و کرمانشاه، امیرحسن، ۱۴۰۴. اولویت‌بندی مسیر احداث خط دوچرخه در مرکز شهر تهران براساس مبانی پایداری در حمل‌ونقل. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۴۸-۵۸. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64061.3303

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

در زمینه‌ی یافتن ویژگی‌های خاص مسیرهای دوچرخه، پژوهش دیگری در شهرهای خاراگپور و آسانسول (هند)، از طریق پرسش‌نامه از افراد عادی و استفاده از مدل‌سازی لوجیت- مبنا دریافته است که پارامتر حجم خودروهای شخصی در خیابان و تراکم خودروهای پارک‌شده کنار خیابان از گروه ایمنی، وضوح دیداری مسیر، عرض مسیر، و مدت زمان مسیر به‌عنوان ویژگی‌های خاص مسیرهای دوچرخه هستند.[۱۰] پژوهش دیگری نیز به مروری جامع بر مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی عوامل کلیدی تأثیرگذار در تقاضای دوچرخه پرداخته است؛ که در آن، عوامل اصلی تأثیرگذار به ۶ دسته، شامل: شرایط جوی نامساعد (دما، رطوبت و وزش باد)، ملاحظات محیط‌زیستی و مشخصات مسیر دوچرخه (نزدیکی فضاهای سبز، مناطق تفریحی، مراکز حمل‌ونقل همگانی، مدارس، دانشگاه‌ها، موزه‌ها، مراکز خرید، امکانات ورزشی، رستوران‌ها، و هتل‌ها)، پیوستگی بین مسیر حمل‌ونقل همگانی و مسیر دوچرخه، وجود ایستگاه‌های دوچرخه، خصوصیات فردی و ایمنی تقسیم‌بندی کرد.[۱۱] در ایران، نیز پژوهشی در شهر قزوین، با مصاحبه از اقشار گوناگون، مشکلات دوچرخه‌سواری را شناسایی کرده و پس از آن به اولویت‌بندی برای رفع آن‌ها پرداخته است؛ و در آن به عواملی چون نبود ایمنی کافی در مسیر دوچرخه، فرهنگ‌سازی نامناسب، پایین‌بودن شأن اجتماعی دوچرخه‌سوار، نقص در روشنایی مسیر، ناهمواری زمین و آلودگی هوا پرداخته و دو پارامتر نبود ایمنی کافی در مسیر دوچرخه و فرهنگ سازی نامناسب را به عنوان مهم‌ترین مشکلات دوچرخه‌سواران شناسایی کرده است.[۱۲]

مطالعات متعددی در جهان و ایران در زمینه‌ی استفاده از تحلیل چندمعیاری برای ارزیابی پارامترهای مؤثر در کیفیت زیرساخت‌های دوچرخه صورت گرفته است. برای مثال، مطالعه‌ای در شهر میلواکی (آمریکا) از تحلیل چندمعیاری برای ارزیابی کیفیت زیرساخت‌های دوچرخه براساس پارامترهای مبتنی بر عرضه و تقاضا استفاده کرده و عوامل وقوع جرم و تخلف، تراکم محل‌های کاری، وجود مدارس و مراکز تفریحی و همچنین جمعیت ساکن به‌عنوان پارامترهای مؤثر در کیفیت زیرساخت‌های دوچرخه در نظر گرفته شده است.[۱۳] در ایران نیز در پژوهشی به بررسی و تحلیل مسیرهای دوچرخه در شهر پرتراکم یزد، که پتانسیل مناسبی برای احداث مسیرهای دوچرخه دارد، پرداخته شده است. همچنین، پارامترهای ایمنی، شیب، سهولت دسترسی، پیوستگی مسیر، شرایط اقلیمی منطقه، جذابیت و وضوح مسیر با استفاده از فرآیند سلسله مراتبی ارزیابی و پارامترهای ایمنی مسیر، شیب، و پیوستگی مسیر به عنوان سه پارامتر اصلی اثرگذار در طراحی مسیرهای دوچرخه شناسایی شده است.[۱۴] مطالعه‌ی دیگری در شهر اسپارتا (ترکیه)، به بررسی عوامل مثبت و منفی تأثیرگذار در ایمنی و تصمیم‌گیری در ادغام دوچرخه با سامانه‌ی حمل و نقل همگانی (اتصال اتوبوس) با استفاده از یک نظرسنجی با مشارکت ۴۶۰ دوچرخه‌سوار با سابقه در شهر اسپارتا انجام شده است؛ و در آن گزارش‌های حوادث و سیستم اطلاع‌رسانی جغرافیایی برای شناسایی مکان‌های حادثه‌زا در شهر استفاده شده‌اند. علاوه‌بر این، روش تصمیم‌گیری چندمعیاری برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های نظرسنجی و تعیین پارامترهای مؤثر برای مسیرهای دوچرخه‌ی ایمن‌تر به‌کار رفته است.[۱۵]

بخش دیگری از مطالعات نیز از نتایج تحلیل چندمعیاری برای اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه‌سواری استفاده کرده‌اند. برای مثال، در شهر تهران (ایران)، در پژوهشی به بررسی عوامل تأثیرگذار در انتخاب مسیرهای دوچرخه، شامل: عوامل ایمنی، انسانی، زیست‌محیطی، ترافیکی، و سایر عوامل با هدف بهبود کیفیت ترافیک پرداخته شده و در آن، معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با کیفیت مسیر دوچرخه از طریق یک نظرسنجی که شامل ۲۰ نفر از افراد متخصص و ۲۸۰ نفر از شهروندان بوده است، به‌دست آمده است. همچنین، در آن از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش دلفی[1] و تحلیل شبکه (ANP)[2] استفاده و عوامل و خیابان‌های خاصی برای انتخاب مسیرهای دوچرخه سواری اولویت‌بندی شده‌اند.[۱۶] در همین راستا، در مطالعه‌ی دیگری برای ارزیابی کیفیت طراحی مسیرهای دوچرخه‌سواری، از سیستم اطلاع‌رسانی جغرافیایی (GIS)[3] و روش ارزیابی چندمعیاره استفاده و در آن، پارامترهای مختلفی، از جمله: حجم ترافیک، عرض لبه‌ی پیاده‌رو، عرض مسیر پیاده‌رو، محدودیت سرعت، کیفیت روسازی، و فعالیت‌های مزاحم برای دوچرخه‌سواران به‌عنوان پارامترهای مؤثر در تمایل به دوچرخه‌سواری بررسی شده‌اند. سپس برای تعیین اهمیت پارامترهای مذکور، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و با استفاده از پارامترهای اخیر، بهترین مسیر دوچرخه‌سواری برای هر مبدأ- مقصد تعیین و مسیر مذکور با کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد مذکور مقایسه شده است. مقایسه‌ی بین مسیر کوتاه‌تر و یک مسیر مناسب برای دوچرخه‌سواری کمک کرد تا اصلاحات لازم برای بهبود مسیرهای دوچرخه‌سواری شناسایی شوند.[۱۷] علاوه‌بر این، پژوهشی در ایران و در شهر شیراز با تأکید بر معیارهای ایمنی مسیر، جذابیت مسیر، و قابلیت جابجایی مسیر به اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه‌سواری پرداخته است؛ که در آن از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کرده و معیار اصلی ایمنی، با تأکید بر زیرمعیار شیب مسیر، به‌عنوان مؤثرترین عامل در انتخاب بهترین مسیر تعیین شده است.[۱۸] به‌طورکلی بررسی مطالعات نشان داده است که استفاده از سیستم اطلاع‌رسانی جغرافیایی و تحلیل چندمعیاری می‌تواند در ارتقاء کیفیت تسهیلات دوچرخه و افزایش ایمنی و راحتی مسیرهای دوچرخه‌سواری در شهرها مؤثر باشد. براساس مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه، پارامترهای امنیت مسیر، ایمنی مسیر، خصوصیات ترافیکی شبکه، و جذابیت مسیر در تشویق افراد به استفاده از دوچرخه اهمیت فراوانی داشته‌اند.

به‌طور مشخص سؤال‌های اصلی پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

۱) معیارهای مساعد و مناسب برای احداث مسیر خط دوچرخه چیست و هر کدام به چه میزان اهمیت دارند؟

۲) با توجه به معیارهای به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، کدام‌یک از مسیرهای پیشنهادی اولویت بالاتری برای ساخت مسیر خط دوچرخه دارند؟

۳) چه راهکارهای عملی به مسئولان محلی می‌توان پیشنهاد داد تا کیفیت و نرخ استفاده از دوچرخه‌سواری بهبود یابد؟

۲. روش مطالعه

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، یکی از معروف‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، که اولین بار توسط توماس ال. ساعتی[4]، در دهه‌ی ۱۹۷۰ پیشنهاد شده است.[۱۹] فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، منعکس‌کننده‌ی رفتار طبیعی و تفکر انسانی است و مسائل پیچیده را براساس آثار متقابل‌شان بررسی می‌کند. سپس آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل می‌کند و به حل آن‌ها

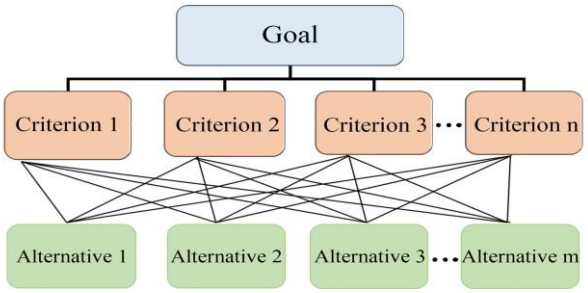
[1] Delphi Technique
[2] Analytic Network Process
[3] Geographic Information Systems
[4] Saaty, Thomas L.

جدول ۱. ساختار قضاوت و امتیازدهی در مقایسه‌های زوجی بین معیارها.

Significance level based on pairwise comparisons of factors					
In between	Absolutely better	Much better	Better	A little better	Same preference
2 – 4 – 6 – 8	9	7	5	3	1

جدول ۲. مقدار شاخص تصادفی با توجه به تعداد معیارها.

N Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R.I. Randomness index	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51



شکل ۱. شمای درخت سلسله مراتب تصمیم‌گیری.

می‌پردازد.[۲۰] از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و معیار تصمیم‌گیری روبرو است، استفاده می‌شود. معیارهای مطرح‌شده می‌توانند کمّی و کیفی یا ترکیبی از هر دو باشند. اساس روش تصمیم‌گیری مذکور بر مقایسه‌های زوجی[5] نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم‌ساختن درخت سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری (HDT)[6]، کار تحلیل را شروع می‌کند. هدف تصمیم‌گیری در سطح صفر قرار می‌گیرد، معیارها (شاخص‌ها) در سطح اول و گزینه‌ها نیز در سطح دوم جهت اولویت‌بندی قرار دارند، که ممکن است با توجه به نوع مسئله، تعداد سطوح معیارهای اصلی و فرعی بیشتر باشد و یا گزینه‌ای وجود نداشته باشد (شکل ۱).[۲۱]

در فرآیند ارزیابی توسط افراد متخصص، از مقایسه‌ی زوجی به‌عنوان ابزار اصلی برای قضاوت استفاده می‌شود؛ که هدف آن، تعیین شدت ترجیح معیار i نسبت به معیار j است. برای این منظور، از ضرایب a_{ij} استفاده شده است، که به‌ترتیب با امتیازهای ۱، ۳، ۵، ۷، و ۹ هماهنگ شده‌اند (جدول ۱).

این رویکرد، به سادگی امکان نمایان‌سازی شدت اولویت‌ها در ارتباط با دو معیار را فراهم می‌کند. با توجه به ضرایب a_{ij}، ماتریس مقایسه‌ی دودویی معیارها (A) تشکیل داده می‌شود. سپس میانگین هندسی هر یک از سطرهای ماتریس اخیر به‌دست می‌آید؛ که نرمال نیست و با تقسیم میانگین هندسی به‌دست‌آمده در هر سطر به مجموع عناصر ستون میانگین‌های هندسی، وزن‌های نرمال‌شده به‌دست می‌آیند؛ که یک بردار ستونی مطابق با رابطه‌ی ۱ است، که به آن بردار ویژه (W) نیز گفته می‌شود.

$$w = [w_i] = [w_2, w_2, ..., w_n]^T \quad (۱)$$

برای ماتریس مقایسه‌ی دودویی (A)، بردار W جواب معادله‌ی ۲ است:

$$AW = \lambda_{max} W \quad (۲)$$

که در آن، λ_{max} مقدار ویژه‌ی اصلی ماتریس A، متناظر با بردار ویژه‌ی اصلی W است،[۲۲] که از بزرگ‌ترین مقدار λ در معادله‌ی ۳ به‌دست می‌آید.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (۳)$$

که در آن، det نمایشگر مقدار مطلق ماتریس، A ماتریس مقایسه‌های زوجی، λ مقدار ویژه‌ی ماتریس، و I ماتریس همانی n×n هستند.

یکی از مزیت‌های فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام‌شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارهاست؛ که میزان تطابق و توازن در قضاوت‌ها را نمایان می‌سازد.

علاوه‌بر این، روشی که برای بررسی ناسازگاری در قضاوت‌ها در نظر گرفته شده است، محاسبه‌ی ضریبی به نام ضریب سازگاری (C.R.)[7] است، که مطابق با رابطه‌ی ۴ از تقسیم شاخص سازگاری (C.I.)[8] به شاخص تصادفی‌بودن (R.I.)[9] حاصل می‌شود. چنانچه ضریب سازگاری کوچک‌تر از کمینه‌ی سطح سازگاری (معمولاً ۰/۱) باشد، سازگاری و مقایسه‌های زوجی انجام‌گرفته در قضاوت‌ها موردقبول است و در غیر این‌صورت، باید در قضاوت‌ها تجدیدنظر شود و ماتریس مقایسه‌ی دودویی معیارها مجدداً تشکیل شود.[۲۳]

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (۴)$$

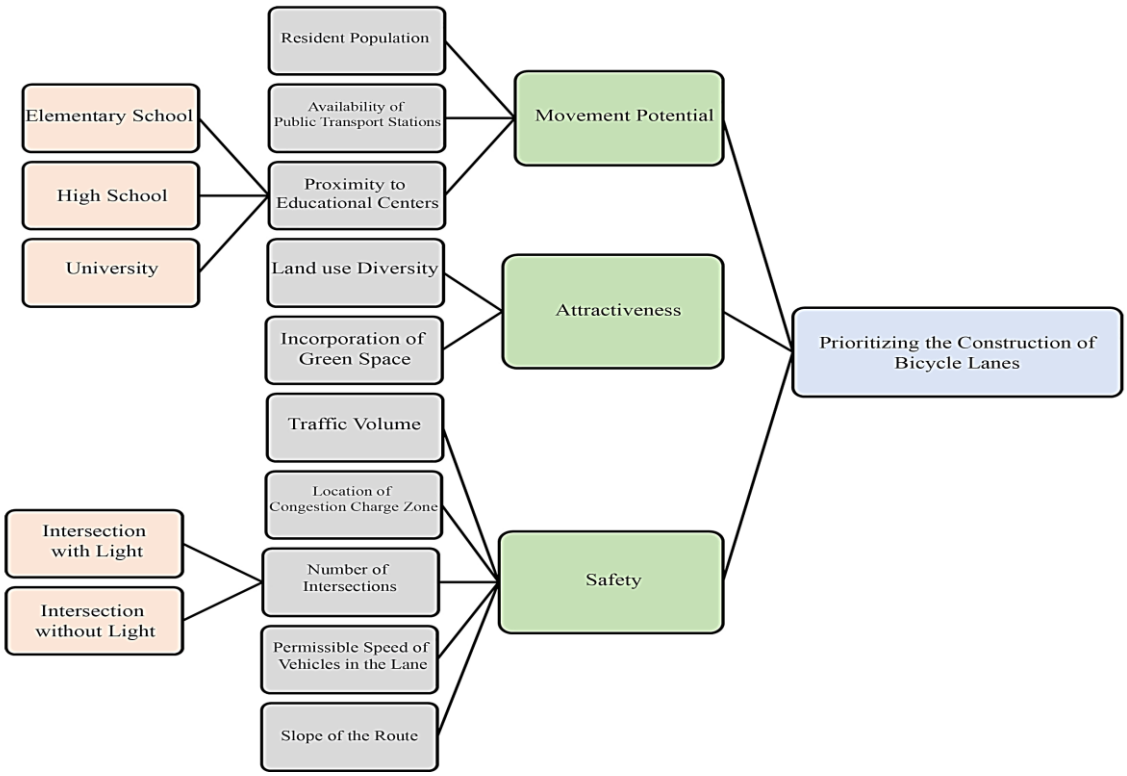
شاخص تصادفی‌بودن، با توجه به تعداد معیارها (n) مطابق جدول ۲ استخراج می‌شود:

۳. معیارها و زیرمعیارها

براساس مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی دوچرخه‌سواری و معیارهای مؤثر در استفاده از دوچرخه، در پژوهش حاضر از سه معیار ایمنی مسیر، جذابیت مسیر، و پتانسیل جابجایی استفاده شده است؛ که در راستای سه بُعد اصلی پایداری- اقتصادی، اجتماعی، و محیط‌زیستی – به‌عنوان معیارهای اصلی برای اولویت‌بندی و انتخاب مسیرهای دوچرخه‌سواری استفاده شده‌اند. در همین راستا، سه معیار اخیر به زیرمعیارهایی تقسیم شده‌اند:

۱) معیار ایمنی: شامل زیرمعیارهای: شیب مسیر؛ سرعت مجاز وسائط نقلیه در مسیر، حجم عبوری وسائط نقلیه، تعداد تقاطع در مسیر (شامل زیرمعیارهای فرعی: تقاطع چراغدار و تقاطع بی‌چراغ)، و قرارگیری در منطقه‌ی طرح ترافیک است. معیار ایمنی، مستقیماً به کاهش تصادف‌ها و هزینه‌های اقتصادی مرتبط با آن‌ها کمک می‌کند و منجر به تشویق اجتماع به استفاده از دوچرخه می‌شود.

[5] Pairwise Comparison
[6] Hierarchical Decision Tree
[7] Consistency Ratio
[8] Consistency Index
[9] Random Index



شکل ۲. درخت سلسله‌مراتب پژوهش.

۲) معیار جذابیت: شامل زیرمعیارهای: تنوع کاربری، فضای سبز پیرامون مسیر است. معیار مذکور به ترویج یک محیط زیبا و دلپذیر برای دوچرخه‌سواران کمک می‌کند، که این امر از لحاظ اجتماعی و محیط‌زیستی مطلوب است.

۳) معیار پتانسیل جابجایی: شامل زیرمعیارهای: جمعیت ساکن، تعداد ایستگاه حمل‌ونقل همگانی، تعداد مراکز آموزشی (شامل زیرمعیارهای فرعی: دبستان؛ دبیرستان (متوسطه‌ی ۱ و ۲)، و مراکز دانشگاهی) است. معیار مذکور به افزایش کارایی اقتصادی و تسهیل دسترسی‌های اجتماعی کمک می‌کند. درخت سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری پژوهش حاضر در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از معیارها در امتیاز مسیرهای پیشنهادی در پژوهش حاضر، هر یک از معیارها و زیرمعیارها باید کمّی‌سازی شوند؛ که نحوه‌ی آن در ادامه توضیح داده شده است.

۱.۳. معیار ایمنی

۱) شیب مسیر: میانگین شیب طولی مسیر از نقشه‌ی توپوگرافی منطقه با توجه به مسافت و میزان جابجایی در راستای عمودی برداشت شده است. شیب‌های تند (سربالایی و سرپایینی) در ایمنی دوچرخه‌سواران تأثیر می‌گذارد.[۲۴ و ۲۵] شیب‌های اخیر، در سرازیری‌ها می‌توانند باعث افزایش سرعت دوچرخه‌سواران شوند و خطر تصادف را به‌ویژه در مناطق با پیچ‌های تند یا تقاطع‌ها افزایش دهند.[۲۶] در سربالایی‌ها نیز در صورت عدم حفظ سرعت کافی، شیب‌های تند می‌توانند باعث از دست‌دادن کنترل دوچرخه‌سواران شوند.[۲۷] در شیب‌های ملایم، فاصله‌ی دید توقف بهتری برای دوچرخه‌سواران فراهم می‌شود و خطر تصادف کاهش پیدا می‌کند.[۲۸] به‌طورکلی، مسیرهای دوچرخه در شرایط عادی باید شیبی کمتر از ۲٪ داشته باشند. در شیب‌های ۲٪ و کمتر، استفاده از هر نوع دوچرخه‌ای (حتی دوچرخه‌های ساده) در مسیر ممکن است. همچنین باید توجه داشت در طراحی مسیرهای دوچرخه، از طرح مسیرهایی با شیب طولی کمتر از ۲٪ به‌دلیل عدم امکان تخلیه‌ی آب‌های سطحی اجتناب شود.[۲۹]

۲) سرعت مجاز: برای محاسبه‌ی سرعت مجاز، از تابلوهای راهنمایی و رانندگی موجود در مسیرها استفاده شده است. براساس آیین‌نامه‌ها، سرعت کمتر از ۲۰ و بیشتر از ۵۰ کیلومتر بر ساعت برای مسیر دوچرخه نامناسب است. سرعت بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت خیلی مناسب و سرعت بین ۴۰ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت مناسب ارزیابی شده است.[۳۰ و ۳۱]

۳) حجم عبوری وسائط نقلیه: حجم عبوری وسائط نقلیه به وسیله‌ی پیمایش میدانی و آمارگیری از مسیرها در یک روز مشخص در طول هفته با مشخصات آب‌وهوایی یکسان در دو نوبت صبح و بعدازظهر اندازه‌گیری شده است. در صورت اشباع‌نبودن جریان، مدت زمان آمارگیری ۱۵ دقیقه بوده و در صورت اشباع‌بودن تا یک ساعت تا تخلیه‌ی کامل جریان آمار گرفته شده است.[۳۲] حجم آمار گرفته‌شده در هر نوبت، برای جهت رفت و برگشت (درصورت وجود) بوده و مقدار بیشتر بین دو جهت، برای سنجش برداشت شده است. حجم مذکور شامل تعداد وسائط نقلیه و موتورسیکلت‌ها بوده است، که برای تبدیل به حجم هم‌سنگ سواری، از ضرایب ویژه‌ی آن، که در جدول ۳ ارائه شده است، استفاده شده است.[۳۳] سپس حجم عبوری به‌صورت میانگین دو مقدار مذکور گزارش شده است.

۴) تعداد تقاطع در مسیر: تعداد تقاطع در مسیر با شمارش تعداد تقاطع‌های

جدول ۳. ضریب هم‌سنگ سواری.

Equivalent Coefficient of motorcycle	Equivalent coefficient of heavy vehicles	Route type
0.4	1.3	Two lines in one direction
0.4	1.3	Three lanes in one direction

چراغدار و بی‌چراغ در طول مسیر مشخص شده است. هر چه تعداد تقاطع‌ها در مسیر بیشتر باشد، احتمال وقوع تصادف‌ها نیز بالاتر می‌رود.[۳۴]

۵) قرارگرفتن در منطقه‌ی طرح ترافیک: با توجه به نقشه‌ی مناطق طرح ترافیک، در صورت قرارگرفتن مسیر در منطقه‌ی طرح ترافیک، مقدار "۱" و در غیر این‌صورت، مقدار "۰" لحاظ شده است. از آنجا که وجود طرح ترافیک باعث کمترشدن حجم ترافیکی و بهبود نسبی کیفیت هوا می‌شود،[۳۵] اگر مسیری در منطقه‌ی طرح ترافیک قرار گیرد، وزن بالاتری به آن تخصیص داده می‌شود.

۲.۳. معیار جذابیت

۱) تنوع کاربری: تعداد کاربری‌های پیرامون بدنه‌ی مسیر شمارش شده است. نوع کاربری‌های در نظر گرفته‌شده در مطالعه‌ی حاضر، شامل: مراکز خدماتی، درمانی، و رفاهی بوده است. از آنجا که افزایش تعداد کاربری‌های پیرامون مسیر باعث افزایش جذابیت مسیر می‌شود،[۳۶] مسیری که کاربری‌های بیشتری داشته باشد، وزن بالاتری دارد.

۲) فضای سبز پیرامون مسیر: برای اندازه‌گیری فضای سبز پیرامون مسیر، طولی از فضای سبز که در پیرامون بدنه‌ی مسیر واقع شده است، بر کل طول مسیر تقسیم شده است. افزایش فضای سبز پیرامون مسیر، منجر به زیبایی مسیر و تمایل بیشتر افراد به استفاده از دوچرخه در آن‌ها می‌شود.[۳۷]

۳.۳. معیار پتانسیل جابجایی

۱) جمعیت ساکن: هر چه جمعیت ساکن تحت پوشش مسیر بیشتر باشد، پتانسیل جابجایی مسیر بالاتر و میزان استفاده از دوچرخه نیز در آن بیشتر است.[۳۸] جمعیت ساکن پیرامون هر مسیر با استفاده از نقشه‌ی سیستم اطلاعات جغرافیایی و بلوک‌های آماری موجود به‌دست آمده است. در محاسبات انجام‌شده، جمعیت بلوک‌های واقع در کوچه‌ها و معابر منشعب از مسیر اصلی نیز به دلیل فراهم‌شدن دسترسی به آن‌ها از مسیر اصلی در نظر گرفته شده است.[۱۸]

۲) تعداد ایستگاه حمل‌ونقل همگانی: تعداد ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی، شامل: ایستگاه‌های اتوبوس، مترو و سامانه‌ی اتوبوس تندرو (BRT)[۱۰] در هر مسیر شمارش شده است. در مطالعه‌ی حاضر، وزن هر کدام از انواع روش‌های حمل‌ونقل همگانی یکسان فرض شده است. وجود ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی منجر به تعامل بهتر دوچرخه با وسائط حمل‌ونقل همگانی در راستای بالابردن کیفیت سفرهای چند وسیله‌ای می‌شود. هر چه تعداد ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی بیشتر باشد، آن مسیر پتانسیل جابجایی بهتر،[۳۹] و وزن بالاتری در مطالعه‌ی حاضر داشته است.

۳) تعداد مراکز آموزشی: وجود مراکز آموزشی در مسیر، موجب بالاتررفتن پتانسیل جابجایی و افزایش تمایل به استفاده از دوچرخه می‌شود؛[۱۳] در این راستا، سفر به مراکز آموزشی، یکی از عوامل اصلی تقاضای حمل‌ونقل همگانی است و بسیاری از جوانان از دوچرخه برای این منظور استفاده می‌کنند.[۴۰ و ۴۱] مراکز آموزشی در پژوهش حاضر، در سه گروه دبستان، دبیرستان (متوسطه‌ی ۱ و ۲) و مراکز دانشگاهی تقسیم شده‌اند، که تعداد آن‌ها در پیرامون هر مسیر به کمک داده‌های OSM[۱۱] به‌دست آمده است.

در پژوهش حاضر، ۱۲ پرسش‌نامه به افراد متخصص داده شده است. اطلاعات

جدول ۴. مشخصات افراد متخصص.

Gender	Age	Education	Career	Work experience (years)
Woman	39	Doctor	Professor	10
Woman	29	Master	Municipal expert	7
Woman	38	Doctor	Consulting engineer	12
Man	51	Master	Professor	23
Man	37	Doctor	Professor	10
Man	72	Doctor	Professor	40
Man	38	Doctor	Professor	8
Man	40	Doctor	Professor	15
Man	37	Doctor	Professor	10
Man	42	Doctor	Professor	12
Man	35	Master	Municipal expert	10
Man	32	Master	Skate sharing employee	7

کلی افراد متخصص، در جدول ۴ ارائه شده است. انتخاب آن‌ها به‌دلیل تجربه و دانش بالای آن‌ها در زمینه‌ی آشنایی با شهر تهران و الگوی حمل‌ونقل آن به‌عنوان افراد صاحب‌نظر صورت گرفته است. یکی از مزایای روش تحلیل سلسله‌مراتبی، بی‌نیازی به تعیین حجم نمونه است.[۴۲ و ۴۳] با توجه به تعداد کم افراد متخصص، محدودیت دسترسی به آن‌ها، و محدودیت زمانی، این ویژگی به ما امکان می‌دهد که با انتخاب دقیق و مناسب متخصصان و طراحی دقیق مطالعه، نتایج معتبری به‌دست آید.

در مطالعه‌ی حاضر، ارزش تمامی پرسش‌نامه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. با واردکردن اطلاعات پرسش‌نامه‌ها در نرم‌افزار Expert Choice، وزن‌های موردنظر به‌دست آمده است. در وزن‌های به‌دست‌آمده، ضریب سازگاری برای تمامی معیارها و زیرمعیارها کمتر از ۰/۱ بوده است، که نشانگر دقت و اعتبار داده‌های گردآوری‌شده است. به همین دلیل، تمامی پرسش‌نامه‌ها موردقبول واقع شده است. با توجه به خروجی نرم‌افزار Expert Choice، ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش حاضر به همراه ضریب سازگاری آن‌ها در شکل ۳ مشاهده می‌شود. اعداد ماتریس‌های اخیر، نشانگر اولویت شاخص سطر به شاخص ستون مرتبط است. اعداد به رنگ قرمز وضعیت معکوس، یعنی اولویت ستون نسبت به سطر را نمایش می‌دهد؛ برای مثال، در شکل ۳- ب، ماتریس مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی پژوهش حاضر مشاهده می‌شود (ضریب سازگاری ۰/۰۹)؛ که در آن، معیار ایمنی مسیر نسبت به معیارهای جذابیت مسیر و پتانسیل جابجایی و نیز معیار پتانسیل جابجایی نسبت به معیار جذابیت مسیر اهمیت بالاتری داشته‌اند.

۴. مکان مطالعه‌شده

شهر تهران، با جمعیت بیش از ۸ میلیون نفر و به‌عنوان پایتخت ایران، یکی از پرجمعیت‌ترین و پرترددترین شهرها در جهان است.[۴۴] با توجه به جمعیت بالا و تراکم فعالیت‌های شهری آن، ترافیک و حمل‌ونقل شهری به یکی از چالش‌های مهم منطقه تبدیل شده است. در این شرایط، شهرداری تهران با ارائه‌ی سند

[10] Bus Rapid Transit

[11] Open Street Map

Congestion Zone	Number of Intersections	Traffic Volume	Permissible Speed	Slope of the Route	
5.35824	2.82394	3.47141	3.63465		Slope of the Route
3.8287	1.91358	3.18062			Permissible Speed
3.1881	1.15089				Traffic Volume
2.28406					Number of Intersections
				Consistency Ratio: 0.05	Congestion Zone

A) Pairwise comparison matrix of safety sub-criteria

Movement Potential	Attractiveness	Safety	
6.62905	8.10195		Safety
3.09358			Attractiveness
		Consistency Ratio: 0.09	Movement Potential

B) Pairwise comparison matrix of the main criteria

Educational Centers	Availability of Stations	Resident Population	
1.02237	2.15364		Resident Population
1.14523			Availability of Stations
		Consistency Ratio: 0.05	Educational Centers

C) Pairwise comparison matrix of movement potential sub-criteria

University	High School	Elementary School	
5.75239	4.63686		Elementary School
1.84908			High School
		Consistency Ratio: 0.02	University

D) Pairwise comparison matrix of educational centers sub-criteria

Green Space	Land use Diversity	
1.19405		Land use Diversity
	Consistency Ratio: 0.00	Green Space

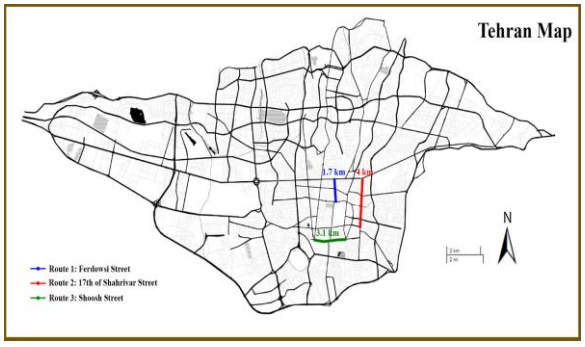
E) Pairwise comparison matrix of Attractiveness sub-criteria

Intersection without Light	Intersection with Light	
4.12121		Intersection with Light
	Consistency Ratio: 0.00	Intersection without Light

F) Pairwise comparison matrix of number of intersections sub-criteriat

شکل ۳. ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش.

راهبردی توسعه‌ی دوچرخه‌سواری، به‌دنبال ایجاد فضاهای پایدار حمل‌ونقل درون‌شهری و کاهش وابستگی به وسائط نقلیه‌ی سنتی، به‌ویژه در مسافت‌های کوتاه است. در این چارچوب، سه خیابان در مرکز شهر تهران به‌عنوان مسیرهای کلیدی انتخاب شده‌اند،[۴۵] که با توجه به تعدد کاربری‌های گوناگون، پتانسیل فعالیت‌های دوچرخه‌سواری و تردد عمومی، احداث مسیرهای دوچرخه‌سواری در آن‌ها لازم است. این اقدام به‌منظور بهره‌مندی از امکانات شهری، کاهش ترافیک، و افزایش استفاده از حمل‌ونقل پایدار انجام شده است. این مسیرهای دوچرخه‌سواری براساس نوع به مسیر اختصاصی دوچرخه[۱۲]، مسیر جداشده‌ی دوچرخه[۱۳]، و مسیر سواره با اولویت دوچرخه[۱۴] تقسیم‌بندی شده‌اند. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و بلوک‌های آماری سال ۱۳۹۵ شهر تهران، که شامل بلوک‌های جمعیتی تهران به تفکیک مناطق بوده است، جمعیت بلوک‌های شهری واقع پیرامون هر مسیر به‌دست آمده است. مشخصات مسیرهای پیشنهادی (با توجه به معیار و زیرمعیارها) در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین در شکل ۴، جانمایی مسیرهای مذکور بر روی نقشه‌ی هوایی مشاهده می‌شود. اولویت‌بندی مسیرهای اخیر جهت احداث مسیر دوچرخه با توجه به روش ارائه‌شده و معیارها و زیرمعیارهای بخش‌های گذشته در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. جانمایی مسیرهای پیشنهادی.

استفاده از پارامترهای مؤثر به‌منظور اولویت‌بندی مسیرهای پیشنهادی برای احداث مسیر دوچرخه بوده است. نتایج استفاده از تحلیل چندمعیاری نشان داد که مهم‌ترین معیار از بین معیارهای اصلی، معیار ایمنی با امتیاز ۰/۷۷۲ بوده است. پس از معیار ایمنی، معیارهای پتانسیل جابجایی با امتیاز ۰/۱۵۹ و جذابیت مسیر با امتیاز ۰/۰۷ به ترتیب اهمیت بیشتری داشته‌اند. در بین زیرمعیارهای موجود، زیرمعیار شیب مسیر از معیار ایمنی با اهمیت‌ترین زیرمعیار شناخته شده است. زیرمعیارهای مهم بعدی به ترتیب: سرعت مجاز وسائط نقلیه، تعداد تقاطع، حجم عبوری وسائط نقلیه، و قرارگرفتن در منطقه‌ی طرح ترافیک بوده‌اند، که همه‌ی آن‌ها در معیار ایمنی قرار داشته‌اند. در معیار پتانسیل جابجایی، جمعیت ساکن تحت پوشش مهم‌ترین زیرمعیار انتخاب شده

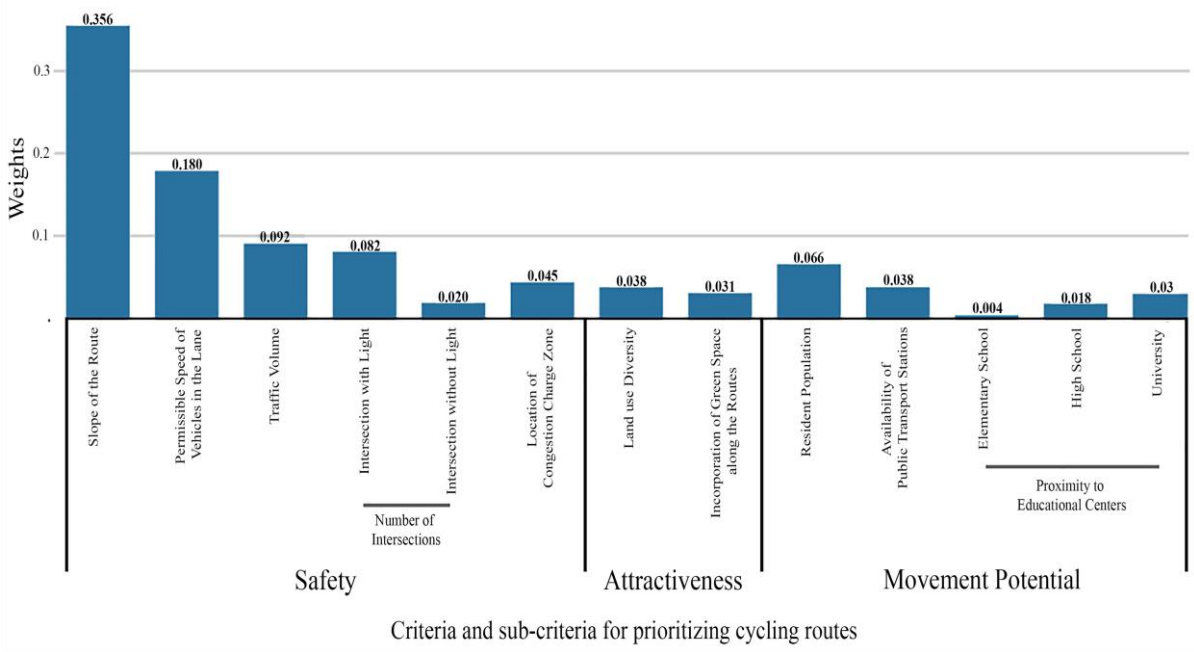
۵. تحلیل نتایج

هدف پژوهش حاضر، در ابتدا شناسایی پارامترهای مؤثر در اولویت‌دهی به انتخاب مسیر دوچرخه و ارزیابی آن‌ها با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی و سپس

[12] Bicycle Path
[13] Bicycle Lane
[14] Shared Lane

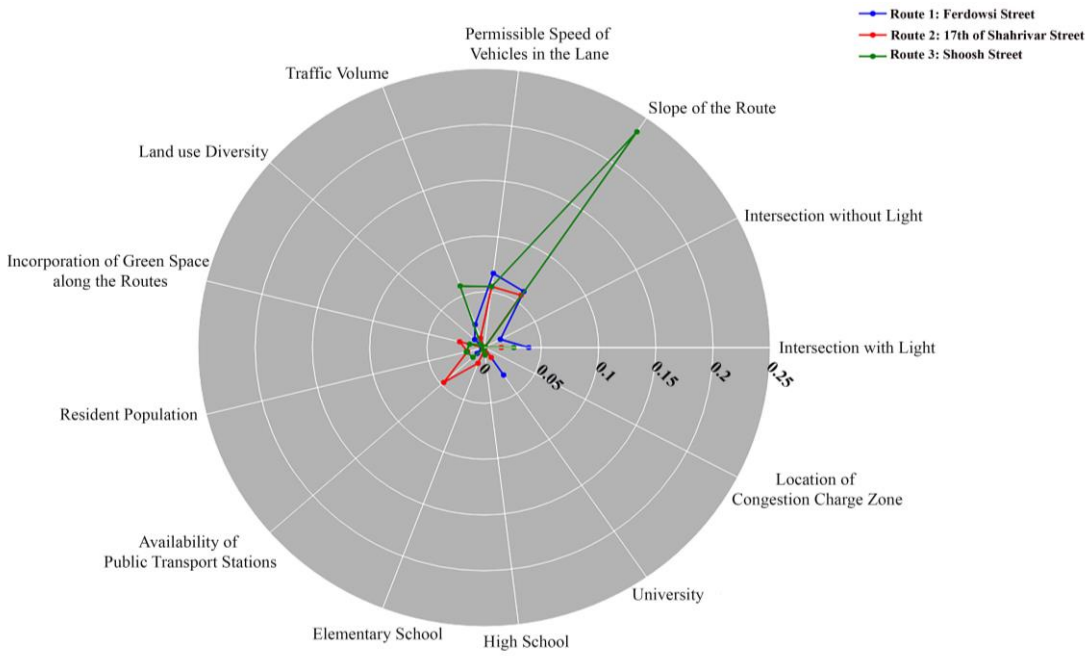
جدول ۵. مشخصات مسیر.

Route number and name				Route1: Ferdowsi street	Route2: 17th of Shahrivar street	Route3: Shoosh street
Route length (km)				1.7	4	3.1
Features of start and end points				Ferdowsi Metro Station-Imam Khomeini Metro Station	Imam Hossein Metro Station-17th of Shahrivar Metro Station	Railway Metro Station-Shush Square
The direction of the path				north-south	north-south	east-west
Criteria	Safety	Slope		1.52%	1.63%	0.4%
		Permitted speed (km/h)		50	60	60
		volume (veh/h) Traffic		1480	660	3972
		Number of intersection	Intersection without light	0	2	1
			Intersection with light	2	5	3
		Location of congestion charge zone		1	0	1
	Attractiveness	Land use diversity		28	56	10
		The percentage of green space		1.87%	16.6%	14.2%
	Movement potential	Resident population		7637	181683	61774
		Availability of public transportation station		9	17	15
		Proximity to educational centers	Elementary school	0	1	1
			High school	0	3	2
			University	4	0	0



شکل ۵. وزن‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Expert Choice.

است. تعداد مراکز آموزشی و تعداد ایستگاه حمل‌ونقل همگانی به ترتیب به‌عنوان زیرمعیارهای مهم بعدی شناخته شده‌اند. در انتها، در معیار جذابیت مسیر، تنوع کاربری‌های موجود در مسیر مهم‌ترین زیرمعیار جذابیت شناخته شده و زیرمعیار درصد فضای سبز پیرامون مسیر در اهمیت پایین‌تر قرار گرفته است. در شکل ۵، وزن‌های معیارها و زیرمعیارهای گفته‌شده در مطالعه‌ی حاضر مشاهده می‌شود؛ که براساس وزن‌های به‌دست‌آمده در این مرحله و مشخصات مسیرها در جدول ۴، امتیاز هر کدام از مسیرها به‌دست آمده است. براساس امتیازهای اخیر که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مسیر ۳ با امتیاز ۰/۴۵۷ بیشترین امتیاز را کسب کرده و در صورتی که هزینه‌های احداث مسیرهای دوچرخه تفاوت چندانی نداشته باشند، نسبت به احداث مسیر دوچرخه اولویت



شکل ۶. امتیاز مسیرهای پیشنهادی.

داشته است. همچنین پس از مسیر ۳، مسیر ۱ با امتیاز ۰/۲۸۲، و مسیر ۲ با امتیاز ۰/۲۵۴ اولویت احداث مسیر دوچرخه را داشته‌اند.

با توجه به شکل ۶، امتیاز گرفته‌شده توسط مسیر ۳ ناشی از کم‌بودن شیب در مسیر مذکور، علت اصلی بالاتربودن اولویت احداث مسیر دوچرخه در آن بوده است. همچنین مسیر ۱ در معیار سرعت مجاز وسائط نقلیه در مسیر، بیشترین امتیاز را کسب کرده است. دو زیرمعیار فضای سبز پیرامون مسیر و تنوع کاربری از معیار جذابیت مسیر و زیرمعیار تعداد ایستگاه حمل‌ونقل همگانی از معیار پتانسیل جابجایی، که کمترین وزن بین وزن‌ها را به‌دست آورده‌اند، در امتیاز نهایی مسیرها تأثیر معناداری نداشته‌اند.

۶. جمع‌بندی و پیشنهادها

دوچرخه به‌عنوان یک وسیله‌ی حمل‌ونقل پایدار و مناسب برای سفرهایی با زمان و مسافت کوتاه شناخته شده است؛ که با فراهم‌آوردن مسیرهای مناسب برای استفاده از آن، دوچرخه می‌تواند منجر به کاهش وابستگی به خودروهای شخصی شود و به‌دنبال آن، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش سلامت جامعه را به همراه آورد. مسیرهای دوچرخه باید معیارهای اصولی را رعایت کنند تا استفاده‌کنندگان از دوچرخه به‌آسانی و با آرامش از آن استفاده کنند. لذا در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی و اولویت‌بندی مسیرهای واقع در مرکز شهر تهران به‌منظور احداث مسیر دوچرخه با توجه به معیارهای مؤثر در اولویت‌بندی مسیرهای دوچرخه پرداخته شده است. معیارهای منتخب با توجه به مطالعات پیشین به‌دست آمده و به سه گروه اصلی: ایمنی مسیر، جذابیت مسیر، و پتانسیل جابه‌جایی تقسیم شده و هر کدام، زیرمعیارهای ویژه‌ی خود را داشته‌اند. در پژوهش حاضر، ۱۲ پرسش‌نامه‌ی سلسله‌مراتبی به افراد متخصص در زمینه‌ی مهندسی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل داده شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice، که یک نرم‌افزار تخصصی در زمینه‌ی تحلیل سلسله‌مراتبی است و دادن اطلاعات پرسش‌نامه‌ها به آن، وزن‌های سطوح مختلف معیارها به‌دست آمد. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده، معیار ایمنی، مهم‌ترین معیار اصلی به‌منظور اولویت‌دهی به احداث مسیر دوچرخه شناخته شده است.

همچنین زیرمعیارهای شیب و سرعت مجاز وسائط نقلیه در مسیر از معیار ایمنی، مهم‌ترین زیرمعیارهای مطالعه‌ی حاضر بوده‌اند. همچنین باید به این مسئله اشاره کرد که در پژوهش حاضر، اثر عواملی مانند کیفیت روسازی مسیر و تخلیه‌ی آب سطحی، عرض مسیر، وجود میدان‌ها، و آلودگی هوا در نظر گرفته نشده است، که درنظرگرفتن آن‌ها در پژوهش‌های آتی می‌تواند منجر به بالارفتن کیفیت نتایج شود. برای مثال، مسیر ۳ در مطالعه‌ی حاضر شیبی کمتر از ۰/۵٪ داشته است، که امکان پدیدآوردن مشکلاتی در تخلیه‌ی آب‌های سطحی را پدید می‌آورد. در صورت وجود معیار مذکور در تحلیل‌های پژوهش حاضر، امکان تغییر اولویت مسیرها جهت احداث مسیر دوچرخه وجود دارد. روش سلسله‌مراتبی به‌کار برده‌شده در مطالعه‌ی حاضر را می‌توان در دیگر نواحی شهر تهران نیز استفاده کرد. شایان ذکر است در صورت هر نوع تغییر در سیاست‌های حمل‌ونقلی سه مسیر معرفی‌شده، وزن‌های به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر باید مجدداً به‌روزرسانی شوند. همچنین استفاده از نظرهای دیگر افراد متخصص، مانند متخصصان برنامه‌ریزی شهری و شهرسازی می‌تواند در جامعیت‌بخشیدن و بالابردن کیفیت نتایج در وزن‌های به‌دست‌آمده کمک شایانی کند. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته و نتایج گرفته‌شده پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش آگاهی مردم از مزایای دوچرخه‌سواری، از رسانه‌های گروهی مانند تلویزیون، رادیو، و اینترنت برای تبلیغات و آموزش عمومی استفاده شود. تبلیغات می‌توانند به تغییر نگرش مردم نسبت به استفاده از دوچرخه، رعایت حقوق، و ایمنی در مسیرها کمک و از تصادف‌ها جلوگیری کنند. همچنین در این راستا، آموزش به موتورسواران درخصوص جلوگیری از تردد در مسیرهای دوچرخه و ایجاد فرهنگ احترام به دوچرخه‌سواران از قدام‌های مؤثر در بهبود ایمنی مسیرهاست. علاوه‌بر این، در راستای بهبود تجربه‌ی استفاده از مسیرهای دوچرخه‌سواری، استفاده از فضاهای سبز و درخت‌کاری در طول مسیرهای دوچرخه‌سواری به عنوان یک عنصر زیبایی و محیطی مطلوب پیشنهاد می‌شود. درنهایت، توجه به حمل‌ونقل همگانی و توسعه‌ی مسیرهای دوچرخه به نحوی که به وسائط نقلیه‌ی همگانی وصل شوند، می‌تواند امکان انتقال دوچرخه‌ها با وسائط نقلیه‌ی همگانی را تسهیل سازد و استفاده از دوچرخه را در مسافران افزایش دهد.

References- منابع

1. Boufous, S., Rome, L. D., Senserrick, T. and Ivers, R., 2011. Cycling crashes in children, adolescents, and adults-a comparative analysis. *Traffic Injury Prevention*, *12(3)*, pp. 244–250. DOI: 10.1080/15389588.2011.563333.
2. Sharma, S.K., Upadhyay, R.K., Kumar, V. and Valera, H., 2023. Introduction to sustainable transportation system. In *Transportation Energy and Dynamics*. Singapore: Springer Nature, pp. 3–6. DOI: 10.1007/978-981-99-2150-8_1.
3. Stroope, J., 2023. Active transportation, context, and community participation: engaged citizens and destination-based walking and biking. *LSU doctoral dissertations*. 6154. DOI: 10.31390/gradschool_dissertations.6154.
4. Karolemeas, C., Vassi, A., Tsigdinos, S. and Bakogiannis, E., 2022. Measure the ability of cities to be biked via weighted parameters, using GIS tools. The case study of Zografou in Greece. *Transportation Research Procedia*, *62*, pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.02.008.
5. Ministry of Roads and Urban Development. (2020) *Urban Highways and Streets Design Guide, Section 11: Bikeways*. [In Persian]
6. Garrard, J., Rose, G. and Lo, S.K., 2008. Promoting transportation cycling for women: the role of bicycle infrastructure. *Preventive medicine*, *46*(1), pp.55-59. DOI: 10.1016/j.ypmed.2007.07.010.
7. Haworth, N. and Fuller, J., 2018. Providing for bicyclists. In *Safe Mobility: Challenges, Methodology and Solutions* (pp. 229-253). Emerald Publishing Limited. DOI: 10.1108/S2044-994120180000011012.
8. Kazemeini, A. and Kermanshah, A., 2023. Promoting Sustainable Transport in Developing Countries: A Case Study of University Students in Tehran. *Future Transportation*, *3*(3), pp.858-877. DOI: 10.3390/futuretransp3030048.
9. Ketikidis, K., Papagiannakis, A. and Basbas, S., 2023. Identifying and Modeling the Factors That Affect Bicycle Users' Satisfaction. *Sustainability*, *15*(18), p.13666. DOI: 10.3390/su151813666.
10. Majumdar, B.B. and Mitra, S., 2017. Valuing factors influencing bicycle route choice using a stated-preference survey. *Journal of urban planning and development*, *143*(3), p.04017001. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000380.
11. Eren, E. and Uz, V.E., 2020. A review on bike-sharing: The factors affecting bike-sharing demand. *Sustainable cities and society*, *54*, p.101882. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101882.
12. Zarabadi Pour, S., Yousefi Moghdam, M. and Abdolrazaghi, A., 2021. Investigating the problems and obstacles of cycling in cities (Case Study: Qazvin). *Road*, *29*(108), pp.179-189. [In Persian]. DOI: 10.22034/ROAD.2021.264860.1932.
13. Rybarczyk, G. and Wu, C., 2010. Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. *Applied Geography*, *30*(2), pp.282-293. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.08.005.
14. Rezaei, R., Heidari, Y. and Nazari Mehr, A.H. 2014. Evaluation of the criteria of the proposed bike route by using AHP, model Case: Yazd. *In The 12th International Conference on Traffic and Transportation Engineering*. [In Persian]
15. Saplıoğlu, M. and Aydın, M.M., 2018. Choosing safe and suitable bicycle routes to integrate cycling and public transport systems. *Journal of Transport & Health*, *10*, pp.236-252. DOI: 10.1016/j.jth.2018.05.011.
16. Shirmohammadi, H., Rahimi, F. and Hadadi, F., 2023. Identifying and prioritization effective factors on the selection of bicycle route to improve urban traffic (Case study: district 10 of Tehran city). *Journal of Transportation Research*, *20*(3), pp.359-378. [In Persian]. DOI: 10.22034/tri.2021.260528.2842.
17. Hsu, T.P. and Lin, Y.T., 2011. A model for planning a bicycle network with multi-criteria suitability evaluation using GIS. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *148*, pp.243-252. DOI: 10.2495/RAV110231.
18. Habibian, M., Hamouni, P. and Haghshenas, P., 2017. Determining the best Path for bicycle lane construction using sustainable transportation approach (case study: District 1 of shiraz). *Amirkabir J. Civil Eng*, *49*(3), pp.593-602. [In Persian]. DOI: 10.22060/CEEJ.2016.683.
19. Izadbakhsh, H., Vazifeh, A., Jahangoshai, M. and Chitsaz, H., 2010. *Applied instruction of industrial engineering and management softwares*. Jahad Daneshgahi Publications of Amirkabir University. [In Persian]
20. Krenicky, T., Hrebenyk, L. and Chernobrovchenko, V., 2022. Application of concepts of the analytic hierarchy process in decision-making. *Management Systems in Production Engineering*, *4* (30). DOI: 10.2478/mspe-2022-0039.
21. Momeni, M. 2006. New topics in operations research. *Tehran: Management School Publications*, p. 360. [In Persian]
22. Nguyen, G. 2014. The analytic hierarchy process: a mathematical model for decision making problems. *Senior Independent Study Theses*.
23. Saaty, T.L. 2001. *Decision making for leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. RWS Publications.
24. Salihu, F., Demir, Y.K. and Demir, H.G., 2023. Effect of road slope on driving cycle parameters of urban roads. *Transportation research part D: transport and environment*, *118*, p.103676. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103676.
25. Das, S. and Das, S., 2022. An ultra-steep slope two-dimensional strain effect transistor. *Nano letters*, *22*(23), pp.9252-9259. DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c02194.
26. Sekiguchi, Y., Tanishita, M. and Sunaga, D., 2022. Characteristics of cyclist crashes using polytomous latent class analysis and bias-reduced logistic regression. *Sustainability*, *14*(9), p.5497. DOI: 10.3390/su14095497.
27. Moomen, M., Rezapour, M. and Ksaibati, K., 2022. An analysis of factors influencing driver action on downgrade crashes using the mixed logit analysis. *Journal of Transportation Safety &*

Security, *14*(12), pp.2111-2136. DOI: 10.1080/19439962.2021.2002991.
28. Mulvaney, C.A., Smith, S., Watson, M.C., Parkin, J., Coupland, C., Miller, P., Kendrick, D. and McClintock, H., 2015. Cycling infrastructure for reducing cycling injuries in cyclists. *Cochrane database of systematic reviews*, (12). DOI: 10.1002/14651858.CD010415.pub2.
29. Tehran Municipality, Transportation and Traffic Deputy. 2016. *Iranian National Standardization Organization, Urban Roads-Bicycle Paths*. [In Persian]
30. National Association of City Transportation Officials. 2014. *Urban Bikeway Design Guide*. Island Press.
31. AASHTO. 2012. Guide for development of bicycle facilities. 4th ed. *American Association of State Highway Transportation Officials: Washington, DC, USA*.
32. MANUAL, H.C., 2010. HCM2010. 5th Edition. *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC*, *1207*.
33. Putra, S., 2011. The correction value of passenger-car equivalents for motorcycle and its impact to road performance in developing countries. *Procedia-social and behavioral sciences*, *16*, pp.400-408. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.04.461.
34. Valenzuela, A.L.E.M., dos Santos Lopes, A.A., de Araujo, P.A.B., Della Justina, M.D., Arins, G.C.B. and Rech, C.R., 2022. Geospatial indicators of bikeability index as cyclefriendly city design: A systematic review. *Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde*, *27*, pp.1-12. DOI: 10.12820/rbafs.27e0255.
35. Salarvandian, F., Dijst, M. and Helbich, M., 2017. Impact of traffic zones on mobility behavior in Tehran, Iran. *Journal of transport and land use*, *10*(1), pp.965-982. DOI: 10.5198/jtlu.2017.1087.
36. Aumann, P. and Arnold, T., 2017. *Guide to road design part 6A: Paths for walking and cycling* (No. AGRD06A-17).
37. Malek hosseini, . 2016. Investigating the effective factors in the use of shared bicycles in urban transportation: a case study of Haft Hoz and Madaen neighborhoods in Region 8)'. *Quarterly Geography & Urban Planning Journal of Chashmandaz-E-Zagros*, *4*(11), pp. 159–178. [In Persian]
38. Pucher, J. and Buehler, R. (2006) 'Why Canadians Cycle More than Americans: A Comparative Analysis of Bicycling Trends and Policies'. *Transport Policy*, *13*(3), pp. 265–279. DOI: 10.1016/j.tranpol.2005.11.001.
39. Jaber, A., Abu Baker, L. and Csonka, B., 2022. The influence of public transportation stops on bike-sharing destination trips: spatial analysis of Budapest City. *Future transportation*, *2*(3). DOI: 10.3390/futuretransp2030038.
40. Rothman, L., Hagel, B., Howard, A., Cloutier, M.S., Macpherson, A., Aguirre, A.N., McCormack, G.R., Fuselli, P., Buliung, R., HubkaRao, T. and Ling, R., 2021. Active school transportation and the built environment across Canadian cities: Findings from the child active transportation safety and the environment (CHASE) study. *Preventive medicine*, *146*, p.106470. DOI: 10.1016/j.ypmed.2021.106470.
41. Voulgaris, C.T., Hosseinzade, R., Pande, A. and Alexander, S.E., 2021. Neighborhood effects of safe routes to school programs on the likelihood of active travel to school. *Transportation research record*, *2675*(8), pp.10-21. DOI: 10.1177/0361198121995490.
42. Baby, S., 2013. AHP modeling for multicriteria decision-making and to optimise strategies for protecting coastal landscape resources. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, *4*(2), pp. 218–227. DOI: 10.7763/IJIMT.2013.V4.395.
43. Melillo, P. and Pecchia, L., 2016, August. What is the appropriate sample size to run analytic hierarchy process in a survey-based research. In *Proceedings of the international symposium on the analytic hierarchy process*, pp. 4-8. DOI: 10.13033/isahp.y2016.130.
44. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421)*.
45. Mehr News Agency. 2020. *Establishment of the first bicycle lane in District 12*. Available at: https://shorturl.at/o8NJF. [In Persian]

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.59-71

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Evaluation of the Efficiency of Metaheuristic Algorithms in the Optimal Design of Pile Wall Retaining Systems

Farshad Taiyari *

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
* corresponding author:(f-taiyari@tvu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 25 December 2023

Revised: 11 February 2024

Accepted: 3 March 2024

Keywords:

Metaheuristic algorithm,
optimal design,
deep excavation,
Pile wall retaining system.

Abstract

The effectiveness of the application of metaheuristic algorithms in the optimal design of retaining structures is investigated in this paper. For this purpose, an ongoing Tabriz metro station project with a deep excavation pit is selected here as a case study. The retaining system of the project consists of secant pile walls supported by a layer of struts. The piles have a circular section consisting of reinforced concrete cores covered by steel sleeves, and the struts are made of steel rectangular hollow sections. A detailed finite element model is developed in the OpenSees platform, including all the construction processes, in order to perform static analyses. Four different metaheuristic algorithms, namely Genetic, Particle swarm optimization, Bee, and Biogeography-based algorithms, are chosen for the optimization problem. The pile external diameter, the steel tube stiffness, the number of longitudinal bars inside the concrete core and their diameters, the center-to-center spaces of the pile elements, the dimensions of structs and their center-to-center spaces, the location of the structs in depth and the buried depth of pile elements are selected as optimization variables. The total cost of the retaining system is considered as an objective function that should be minimized in the design space of the variables. For optimization purposes, an integration of the OpenSees software with the MATLAB platform is done to join the modeling space with the mentioned optimization algorithms. The number of iterations for each run is assumed to be 400, which is also considered a termination criterion. The optimization process is performed 50 times, and the best response is reported here. The results demonstrate an excellent performance of the Genetic algorithm in obtaining the optimum solution with respect to the other three considered algorithms. It exhibits a proper standard deviation and convergence rate in producing the optimum response. It is shown that the soil stress is increased in the depth where struts are installed, while they are reduced near the ground level, where the deflection of piles creates an active situation for the soil. This is true considering the results of all algorithms. Proceeding with the excavation phase increases the soil stress as well as the pile deformation. It can also be obtained that providing a layer of strut seems necessary for reducing pile movements as well as their buried depth.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Taiyari, F. 2025. Evaluation of the Efficiency of Metaheuristic Algorithms in the Optimal Design of Pile Wall Retaining Systems, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.59-71. https://doi.org/10.24200/J30.2024.63750.3285

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ترانشه‌های عمیق

فرشاد طیاری

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.
(f-taiyari@tvu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۰۴
تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۲/۱۱/۲۲
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

واژگان کلیدی:
الگوریتم فراابتکاری،
طراحی بهینه،
ترانشه‌ی عمیق،
سازه‌ی نگهبان،
شمع‌های درجا.

چکیده

در نوشتار حاضر به بررسی تأثیر الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ایستگاه شماره‌ی ۳ متروی تبریز پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا ترانشه‌ی موردنظر در نرم‌افزار اُپن‌سیس مدل‌سازی و فرآیند گام به گام خاک‌برداری آن، مطابق روند اجرایی، شبیه‌سازی شده است. چهار الگوریتم فراابتکاری متداول، یعنی الگوریتم‌های مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبورعسل برای طراحی بهینه استفاده شده‌اند، تا علاوه‌بر مقایسه‌ی عملکرد هر یک در حل مسئله‌ی مذکور، احتمال دستیابی به بهترین پاسخ افزایش یابد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بسیار خوب الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌های استفاده‌شده در دستیابی به طرح بهینه بوده است. به‌منظور بررسی بهتر، توزیع تنش خاک در اطراف سازه‌ی نگهبان و همچنین تغییرشکل المان‌های شمع بررسی شده و نتایج نشان داده‌اند که استفاده از مهار متقابل جهت ایجاد تعادل تغییرشکل‌های قسمت فوقانی و تحتانی شمع‌ها و کاهش عمق مدفون المان‌های شمع ضروری به‌نظر می‌رسد.

۱. مقدمه

امروزه به سبب توسعه‌ی روزافزون شهرها، افزایش تراکم جمعیت و به تبع آن کمبود زمین و قیمت قابل‌توجه آن، ساخت‌وسازهای زیرزمینی رونق بیشتری یافته‌اند؛ که به موجب آن، نیاز به گودبرداری و ایجاد ترانشه‌های قائم در نقاط پرتراکم شهری بیش از پیش احساس می‌شود.

به‌طورکلی گودبرداری‌ها به دو دسته‌ی حفاظت‌شده (مهاربندی‌شده) و حفاظت‌نشده تقسیم می‌شوند. در گودبرداری‌های حفاظت‌نشده، پایداری شیب‌ها و یا جداره‌های قائم گودبرداری‌ها بدون استفاده از سیستم مهاربندی الحاقی، توسط شرایط مکانیکی خاک تأمین می‌شود؛ حال آنکه در صورت عدم کفایت مقاومت برشی خاک در مقابل نیروهای وارده، مقاومت لازم توسط سیستم مهاربندی موسوم به سازه‌ی نگهبان تأمین می‌شود، که از جمله مرسوم‌ترین آن‌ها می‌توان به شمع‌های درجا اشاره کرد. سیستم شمع‌های درجا براساس قرارگیری تعدادی از المان‌های شمع در یک ردیف تعریف می‌شوند؛ که به‌صورت مدفون در زمین قرار می‌گیرند و برای مقابله با لغزش خاک پشتی طراحی می‌شوند.

یکی از مسائل مهم در طراحی سیستم شمع‌ها، علاوه‌بر توجیه اقتصادی، تأمین قابلیت اعتماد مناسب در طراحی آن‌هاست. امروزه بیشتر سیستم‌های سازه‌ی نگهبان براساس روش دیاگرام طراحی می‌شوند؛[۱ و ۲] که توسط چنگ و ونگ[۱] (۱۹۹۶)،[۳] برای استفاده در خاک‌های رسوبی اصلاح شده است. با وجود این، نتایج بررسی‌های انجام‌گرفته در نوشتار اخیر، بر روی روش دیاگرام حاکی از پایین‌بودن نیروهای اولیه‌ی طراحی نسبت به حالت واقعی آن است. علاوه‌بر این، روش ساده‌شده‌ی ریچاردز و المس[۲] (۱۹۷۹)،[۴] نیز به منظور طراحی لرزه‌ای شمع‌ها استفاده می‌شود. براساس روش اخیر می‌توان میزان نیروی زلزله را به صورت بار استاتیکی جانبی معادل تخمین زد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای شمع‌های مختلف و ارزیابی روش ذکرشده صورت گرفته است. به عنوان مثال، در نوشتار گازیتاس[۳] و همکاران (۲۰۰۴)،[۵] رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در برابر زمین‌لرزه‌های با زمان تناوب کوتاه بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از دقت پایین روش مذکور در استخراج رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در مقایسه با بهره‌گیری از تحلیل‌های دقیق است. مطالعه‌ی مادابهوشی و زنگ[۴] (۲۰۰۶)،[۶] نیز در این زمینه نشان می‌دهد که در هنگام زمین‌لرزه، لنگر خمشی شدیدی در سازه‌های نگهبان ایجاد می‌شود، که آثار آن در محاسبات استاتیکی منظور نمی‌شود. کو[۵] و همکاران (۲۰۱۷)،[۷] مدلی برای ارزیابی شمع‌های صفحه‌ای پیشنهاد کرده‌اند که قادر به تخمین نیروهای اندرکنشی بین سازه و خاک براساس مقادیر مختلف بیشینه‌ی شتاب زمین است. لین[۶] و همکاران (۲۰۱۸)،[۸] در مطالعه‌ای به بررسی رفتار لرزه‌ای

[1] Chang & Wong
[2] Rechards & Elms
[3] Gazetas
[4] Madabhushi & Zeng
[5] Qu
[6] Lin

استناد به این مقاله:
طیاری، فرشاد، ۱۴۰۴. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی بهینه‌ی شمع‌های سازه‌ی نگهبان ترانشه‌های عمیق. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۵۹-۷۱.
https://doi.org/10.24200/J30.2024.63750.3285

حق مولف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۳۳

سازه‌های نگهبان شمع‌های صفحه‌ای انکرشده پرداخته‌اند؛ که در آن رفتار شمع‌ها براساس مدل‌سازی عددی و آزمایش میز لرزان ارزیابی و مود خرابی آن‌ها در زلزله‌های مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که انکرها در زمان‌های ابتدایی وقوع زلزله خراب می‌شوند و تنش محوری آن‌ها با افزایش دامنه‌ی زمین‌لرزه افزایش می‌یابد. همچنین مطالعات نشان می‌دهند که علاوه‌بر ملاحظات نیرویی، باید به تغییرمکان سازه‌های نگهبان نیز در طراحی توجه کرد. تغییرمکان زیاد موجب لغزش و جابجایی بیشتر خاک و سازه‌ی روی آن می‌شود، که منجر به وقوع نشست، ترک‌خوردگی، و حتی خرابی سازه‌ها می‌شود. برای این منظور غالباً در آیین‌نامه‌های طراحی، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان سازه‌های نگهبان به درصدی از ارتفاع آن‌ها محدود می‌شود؛ که مقدار آن به عمق حفاری، سختی سازه‌ی نگهبان، و مشخصات خاک محل بستگی دارد.[۹] در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تخمین تغییرمکان در سیستم‌های مختلف سازه‌های نگهبان ارائه شده است. از جمله مو[۱] و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۰] روش جدیدی بر مبنای کرنش‌های کوچک برای تخمین میزان جابجایی گودهای مهاربندی‌شده با سازه‌ی نگهبان ارائه داده‌اند. براساس مطالعات آن‌ها جابجایی گود یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سازه‌های نگهبان است و مقدار آن براساس میزان جابجایی مجاز خاک زیر سازه‌های اطراف گود به‌دست می‌آید. ژنگ[۲] و همکاران (۲۰۱۵)،[۱۱] نیز توانسته‌اند براساس مطالعات عددی سازهای نگهبان بر روی خاک‌های رسی، روش تخمینی ساده‌ای را برای تعیین جابجایی آن‌ها ارائه دهند.

با توجه به اینکه بیشتر مسائل ژئوتکنیکی به‌صورت مسائل چندمتغیره هستند، لذا یافتن پاسخ‌های بهینه براساس روش‌های کلاسیک در بیشتر مواقع امکان‌پذیر نیست. با وجود این، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در طراحی مسائل ژئوتکنیکی بسیار موفق عمل کرده و در سال‌های اخیر بیش از پیش موردتوجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. این الگوریتم‌ها قادر هستند تا فضای جستجوی وسیعی را برای یافتن پاسخ بهینه‌ی موردنظر ارزیابی کنند. با وجود این، پاسخ بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آن‌ها به‌دلیل ماهیت جستجوی تصادفی آن‌ها ممکن است متضمن دستیابی به پاسخ بهینه‌ی کلی نباشد. بنابراین توصیه می‌شود که برای حل یک مسئله‌ی مشخص از چندین روش مختلف بهینه‌سازی استفاده شود.[۱۲]

اخیراً مطالعات بسیاری برای ارائه‌ی طرح بهینه‌ی سیستم‌های سازه‌ی نگهبان از جمله دیوارهای حائل تحت الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، از جمله: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جستجوی گرانشی، روش بهینه‌سازی CO_2، روش کلونی، الگوریتم هارمونی تطابقی، و چند الگوریتم بهینه‌سازی دیگر انجام شده است.[۱۲-۲۰] کالمسی[۳] و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۱] از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای طراحی دیوار حائل طره‌ای بتن مسلح با استفاده از روابط طراحی ارائه‌شده بر مبنای آیین‌نامه‌ی آمریکا بهره گرفته‌اند. کوپیالی‌پور[۴] و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۲] یک الگوریتم جدید هوشمند برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای حائل ارائه و در آن پنج پارامتر: ارتفاع و ضخامت دیوار حائل، چگالی و ضریب اصطکاک خاک، و چگالی مخلوط مصالح سنگی و سیمان را به عنوان پارامترهای کلیدی مطرح کرده‌اند، که در تعیین رفتار دیوارهای حائل تأثیر بسزایی دارند. گندمی و همکاران (۲۰۱۵)،[۱۲] طرح بهینه‌ی دو سازه‌ی حائل طره‌ای را براساس روش‌های هوش دسته‌جمعی ارائه داده‌اند. آیدوقلو[۵] (۲۰۱۷)،[۲۳] از یک روش جدید بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی و ترکیب آن با الگوریتم دیگر برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای حائل طره‌ای تحت شرایط لرزه‌ای استفاده کرده است. همچنین بهینه‌سازی ضریب اطمینان دیوارهای حائل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نوین توسط گردان[۶] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۴] انجام شده است. برای این منظور، ایشان ضریب اطمینان دیوارهای حائل را تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی ارزیابی کرده‌اند. سرانیک[۷] و همکاران (۲۰۰۱)،[۱۵] و یپس[۸] و همکاران (۲۰۰۸)،[۱۶] هزینه‌ی طراحی دیوارهای حائل طره‌ای بتنی مسلح را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کمینه ساخته‌اند. علاوه‌بر مطالعات مذکور، اخیراً پژوهش‌هایی در رابطه با تعیین طرح بهینه‌ی سیستم‌های سازه‌ی نگهبان با شمع‌های درجای بتنی و فولادی نیز توسط طیاری[۹] انجام شده است؛[۲۵ و ۲۶] که در آن‌ها و در پژوهش حاضر، قسمت‌های مختلف سازه‌های نگهبان و خاک‌های اطراف آن در نرم‌افزار المان محدود دقیقاً مدل شده و بهینه‌سازی بر مبنای مدل‌سازی واقعی صورت گرفته است. این در حالی است که اغلب مطالعات پیشین بر روی سیستم‌های دیوار حائل طره‌ای و براساس روابط طراحی ساده‌سازی‌شده‌ی آن‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی استوار بوده است. علاوه‌بر این، به دلیل نبود چنین روابطی برای شمع‌های سازه‌ی نگهبان و لزوم مدل‌سازی دقیق آن‌ها، بهینه‌سازی آن‌ها تا کنون صورت نگرفته است و به‌نظر می‌رسد که توسعه‌ی چنین روش‌هایی با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های دقیق و منطبق با شرایط واقعی برای سیستم‌های مذکور و سیستم‌های مختلف دیگری، که روابط طراحی صریحی ندارند، ضروری باشد.

در مطالعه‌ی حاضر، از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی برای دستیابی به طرح بهینه‌ی سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ متروی تبریز استفاده شده است. سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ به‌صورت سیستم مهار متقابل فولادی به‌همراه المان‌های شمعی قائم است. در پژوهش حاضر، از شمع‌های کامپوزیت شامل غلاف فولادی و هسته‌ی بتنی مسلح به‌عنوان المان‌های قائم استفاده شده است. به‌منظور انجام پروسه‌ی بهینه‌سازی از چهار الگوریتم متداول فراابتکاری، یعنی الگوریتم‌های: ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و بهینه‌سازی بر مبنای جغرافیای زیستی استفاده شده است، تا میزان اثربخشی هر یک از آن‌ها برای حل مسئله‌ی حاضر سنجیده شود و نیز از معیار هزینه‌ی مصالح به‌عنوان تابع هدف استفاده شده است. به این ترتیب که به ازاء گستره‌ای از مقادیر معقول پارامترهای طراحی سیستم سازه‌ی نگهبان، تابع هدف تعیین و آن مقادیری که منجر به ارائه‌ی سیستمی با کمترین میزان هزینه شود، به عنوان متغیرهای بهینه انتخاب شده‌اند. برای این منظور، قطر خارجی شمع، ضخامت غلاف فولادی، تعداد و نمره‌ی آرماتورهای طولی هسته‌ی بتنی، فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها، ابعاد، ضخامت، عمق قرارگیری و فاصله‌ی استرات‌ها، و همچنین عمق مدفون شمع به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند.

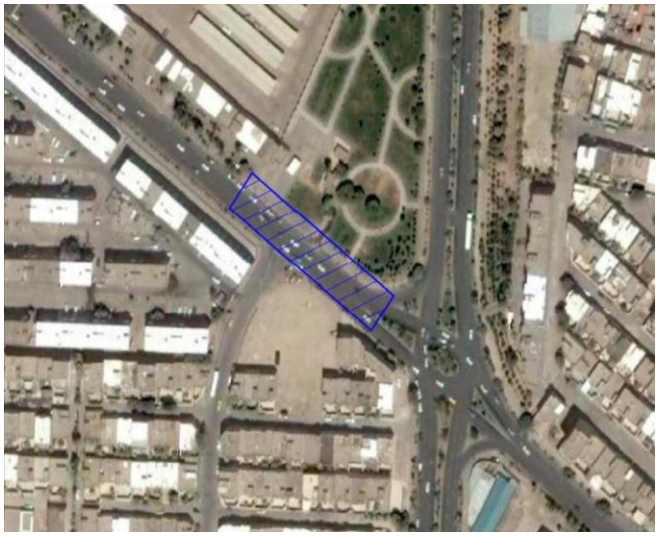
۲. مشخصات کلی خط ۲ قطار شهری تبریز

خط ۲ قطار شهری تبریز از محل کارخانه‌ی کود آلی در غرب شهر آغاز می‌شود

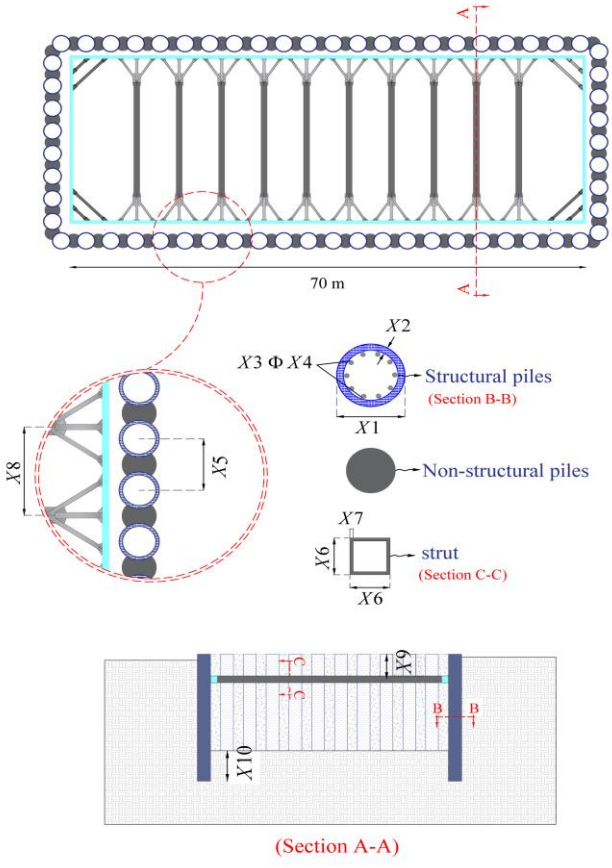
[1] Mu
[2] Zhang
[3] Kalemci
[4] Koopialipoor
[5] Aydogdu
[6] Gordan
[7] Ceranic
[8] Yepes
[9] Taiyari

و پس از عبور از مرکز شهر در محل نمایشگاه بین‌المللی، واقع در میدان بسیج، در بخش شرقی شهر به پایان می‌رسد. مسیر عبوری خط ۲ با ۲۰ ایستگاه مشابه، به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر است. پژوهش حاضر به تحلیل و طراحی بهینه‌ی سازه‌ی نگهبان ایستگاه ۳ در خط ۲ قطار شهری تبریز پرداخته است، که در غرب تقاطع خیابان‌های خطیب و قدس (آخونی) قرار دارد (شکل ۱). همان‌طور که مشخص است، زمین ایستگاه در منطقه‌ی پرجمعیت و مملو از ساختمان واقع شده است، که این امر تغییرمکان جانبی دیواره‌های گود را با محدودیت‌هایی مواجه و حساسیت طراحی و اجرای آن را دو چندان می‌کند.

زمین ایستگاه به شکل مستطیل و با طول و عرض ۷۰ × ۲۵ متر است و تراز ریل در عمق ۲۲ متری از سطح زمین قرار دارد. برای پایدارسازی دیواره‌ی گودبرداری از روش مهار متقابل به همراه سیستم شمع استفاده شده است. اجرای این سیستم در چند فاز مختلف انجام می‌گیرد؛ به این صورت که ابتدا شمع‌ها در طولی به میزان (X۶+۲۲) متر در تمامی دیواره‌های گود اجرا می‌شوند، که در آن X۶ عمق مدفون شمع در خاک زیرین است. سپس خاک‌برداری به صورت گام به گام و در ۲۲ مرحله انجام می‌گیرد و در هر مرحله لایه‌ای از خاک به ضخامت ۱ متر برداشته می‌شود. در تراز ارتفاعی X۵، سیستم مهار متقابل برای کاهش میزان تغییرمکان جانبی شمع‌ها نصب می‌شود. جزئیات آرایش المان‌های شمع و سیستم مهار متقابل در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همچنین نتایج مطالعات ژئوتکنیکی خاک محل در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که سطح آب زیرزمینی در تراز ۱۲ متری زیر سطح زمین قرار دارد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه بررسی‌شده.



شکل ۲. جزئیات سیستم سازه‌ی نگهبان استفاده‌شده در پژوهش حاضر.

۳. روند بهینه‌سازی

در حالت کلی، روند بهینه‌سازی به‌منظور تعیین بهترین راه‌حل از میان تمامی راه‌حل‌های موجود تعریف می‌شود. در این رویکرد از کمینه‌سازی یک تابع هدف f(x) در حضور محدودیت‌های خاص اعمال‌شده برای مسئله‌ی موردنظر استفاده می‌شود. این محدودیت‌ها در حالت کلی به سه دسته‌ی: قیدهای نامساوی (g(x))، قیدهای مساوی (h(x))، و محدوده‌های بیشینه و کمینه‌ی مقادیر متغیرها (L و U) مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} & g_i(x) \le 0 \qquad i = 1,2,...,n \\ & h_j(x) = 0 \qquad j = 1,2,\ldots,p \\ & L_k \le X_k \le U_k \qquad k = 1,2,\ldots,m \end{aligned} \tag{۱}$$

۳.۱. تعریف تابع هدف

تابع هدف باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند بازگوکننده‌ی شرایط واقعی حاکم بر مسئله باشد. در پژوهش حاضر از هزینه‌ی مصالح مصرفی به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی مطابق رابطه‌ی ۲ استفاده شده است:

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در محدوده‌ی ایستگاه بررسی‌شده.

Bulk modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Weight density (kN/m^3)	Thickness (m)	Soil group	Layer
30303	7194	22	15	16.5	12	CL-ML	1
38889	12963	27	15	19.5	13	SM-ML	2
43860	19084	31	20	19.5	14	SM-ML	3

$$f(x)=c_sW_s+c_bW_b+c_cW_c \quad (۲)$$

که در آن، W_s وزن مصالح فولادی استفاده‌شده در استرات‌ها و غلاف‌های فولادی شمع‌ها، W_b وزن میلگردهای مسلح‌کننده‌ی بتن شمع، V_c حجم بتن مصرفی در شمع، و پارامترهای c_s، c_b، و c_c ضرایب متناظر واحد هزینه‌ی مصالح مصرفی هستند.

۲.۳. تعریف قیدها

قیدهای مسئله در حالت کلی به دو صورت قیدهای رفتاری و هندسی تقسیم می‌شوند. قیدهای رفتاری، در واقع بیانگر ظرفیت برشی و خمشی شمع‌ها، مقاومت واژگونی، و ظرفیت لغزشی آن‌ها هستند، که باید کمتر از مقدار مجاز تعیین‌شده براساس آیین‌نامه باشند.[۲۷] علاوه‌بر این، قیدهای هندسی نیز شرایط مرزی مسئله را مشخص می‌کنند. در واقع، قیدهای هندسی، بیانگر حد بالا و پایین مقادیر متغیرهای مسئله هستند. قیدهای هندسی استفاده‌شده در نوشتار حاضر در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۳.۳. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۱.۳.۳. الگوریتم ژنتیک

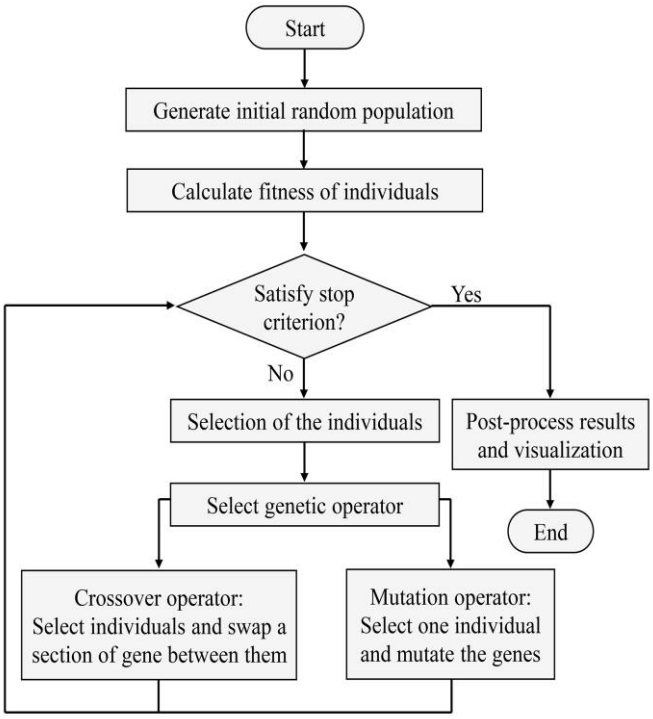
ایده‌ی استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مهندسی، ابتدا در دهه‌ی هفتاد میلادی توسط جان هالند و بر پایه‌ی اصول انتخابی داروین مطرح شد و سپس در سال ۲۰۱۰ توسط دیوید گلدبرگ[۱]،[۲۸] گسترش یافت. اساس کار الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی انتقال خصوصیات موروثی ژن‌های یک نسل به نسل دیگر توسط کروموزوم‌های آن‌هاست. نسل اول، که انتقال‌دهنده‌ی ژن هستند، والدین و نسل بعد فرزندان نامیده می‌شوند. بدیهی است که انتقال تمام کروموزم‌های والدین به فرزندان، موجب تشابه کامل خصوصیات دو نسل خواهد بود. چنین حالتی در واقعیت به‌دلیل وجود دو رخداد اتفاق نمی‌افتد. رخداد اول، جهش است که در آن مشخصات برخی ژن‌ها به صورت کاملاً تصادفی تغییر می‌یابند. در این حالت خصوصیات فرزندان مشابه هیچ‌یک از خصوصیات والدین نخواهد بود. رخداد دیگر، که احتمال وقوع آن بسیار بیشتر است، چسبیدن ابتدای یک کروموزوم به انتهای کروموزوم دیگر است، که با نام تقاطع شناخته می‌شود. در این حالت فرزندان تعدادی از خصوصیات هر یک از والدین را با هم به ارث می‌برند و از شبیه‌شدن فرزند به فقط یکی از والدین جلوگیری می‌شود. بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک، یک روند تصادفی هدایت‌شده است. در این روش، ابتدا مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی به‌صورت کاملاً اتفاقی برای یک جمعیت اولیه (والدین) و در فضای جستجوی معرفی‌شده اختصاص می‌یابند. پس از اجرای الگوریتم، تابع هدف موردنظر برای هر یک از اعضاء جمعیت ارزیابی می‌شود. در گام بعد، نسل دوم براساس توضیحات اخیر شکل می‌گیرد و بار دیگر تابع هدف اعضا ارزیابی می‌شود. این چرخه تا تأمین شرایط تعریف‌شده جهت خاتمه‌ی روند بهینه‌سازی ادامه خواهد یافت. این الگوریتم به اعضاء با شایستگی بالاتر، شانس بیشتری برای بقا و تولیدمثل قائل می‌شود؛ هر چند که اعضاء با شایستگی کمتر نیز به‌طورکامل کنار گذاشته نمی‌شوند. این ویژگی به‌طورخاص برای توابع با تغییرات ناگهانی و دارای چند نقطه‌ی بهینه‌ی موضعی مناسب است و احتمال دسترسی به نقطه‌ی بهینه‌ی کلی را افزایش می‌دهد. فرایند الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۲.۳.۳. الگوریتم ازدحام ذرات

ایده‌ی اولیه‌ی الگوریتم ازدحام ذرات، توسط ابرهارت و کندی[۲] (۱۹۹۵) ارائه شده است،[۲۹] که از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها الگوبرداری می‌کند. به این ترتیب که در فضای جستجو، جمعیت اولیه‌ای متشکل از مجموعه‌ای از ذرات به‌طورتصادفی ایجاد می‌شود و تابع هدف آن‌ها ارزیابی می‌شود. سپس موقعیت

جدول ۲. متغیرهای مسئله به همراه قیدهای هندسی آن‌ها.

Upper bound	Lower bound	Unit	Design variables
2	0.5	m	X1
0.05	0.005	m	X2
40	6	-	X3
36	8	-	X4
5	1	m	X5
1	0.1	m	X6
0.05	0.005	m	X7
10	1	m	X8
15	1	m	X9
10	1	m	X10



شکل ۳. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک.

[1] Goldberg

[2] Kennedy & Eberhart

و سرعت حرکت ذرات با توجه به میزان شایستگی آن‌ها در جهت دستیابی به جواب بهینه مطابق رابطه‌ی ۳ به‌روز می‌شود.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (۳)$$

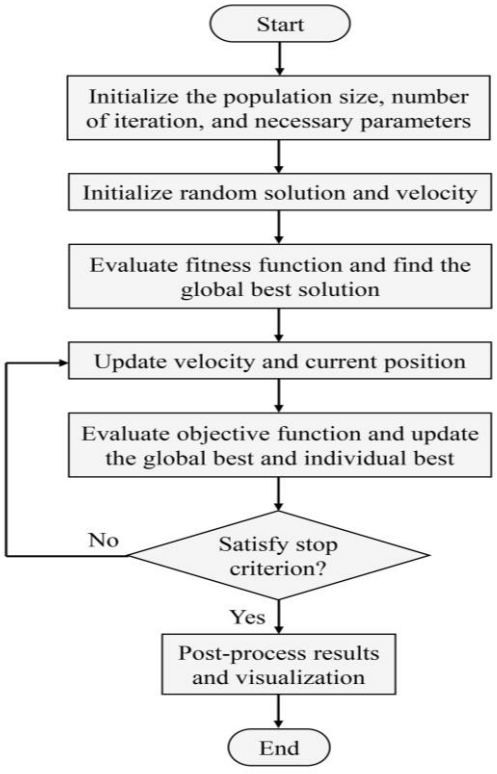
که در آن، X_i^t موقعیت فعلی ذره‌ی i اُم، X_i^{t+1} و V_i^{t+1} به ترتیب موقعیت و سرعت به‌روزشده‌ی آن‌ها هستند. بنابراین حرکت ذرات ناشی از سرعتی است که هر ذره در طول مسئله به‌خود می‌گیرد. میزان و جهت سرعت هر ذره، حاصل‌جمع حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره و همچنین حد فاصل موقعیت فعلی با بهترین موقعیت به‌دست‌آمده در بین تمامی ذرات از ابتدای حل مسئله تاکنون است. به این ترتیب میزان و جهت هر ذره با ذره‌ی دیگر متفاوت خواهد بود و مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + C_1 r_1 \left(P_i - X_i^t\right) + C_2 r_2 \left(P_g - X_i^t\right) \quad (۴)$$

که در آن، V_i^t و V_i^{t+1} به‌ترتیب سرعت‌های فعلی و به‌روزشده‌ی ذره‌ی i اُم، P_i بهترین موقعیت یافته‌شده توسط ذره‌ی i اُم (بهترین موقعیت محلی)، P_g بهترین موقعیت کلی به‌دست‌آمده در بین مجموعه‌ی ذرات، ω ضریب اینرسی در محدوده‌ی (۰-۱/۲)، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی در محدوده‌ی (۰-۲) و r_1 و r_2 مقادیر تصادفی در محدوده‌ی (۰-۱) هستند. فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳.۳.۳. الگوریتم زنبورعسل

الگوریتم زنبورعسل، یکی دیگر از الگوریتم‌های جستجویی مبتنی بر جمعیت است، که توسط فام[1] و همکاران (۲۰۰۵)،[۳۰] مطرح شده است. این الگوریتم برگرفته از رفتار زنبورهای عسل در جستجوی مواد غذایی است.

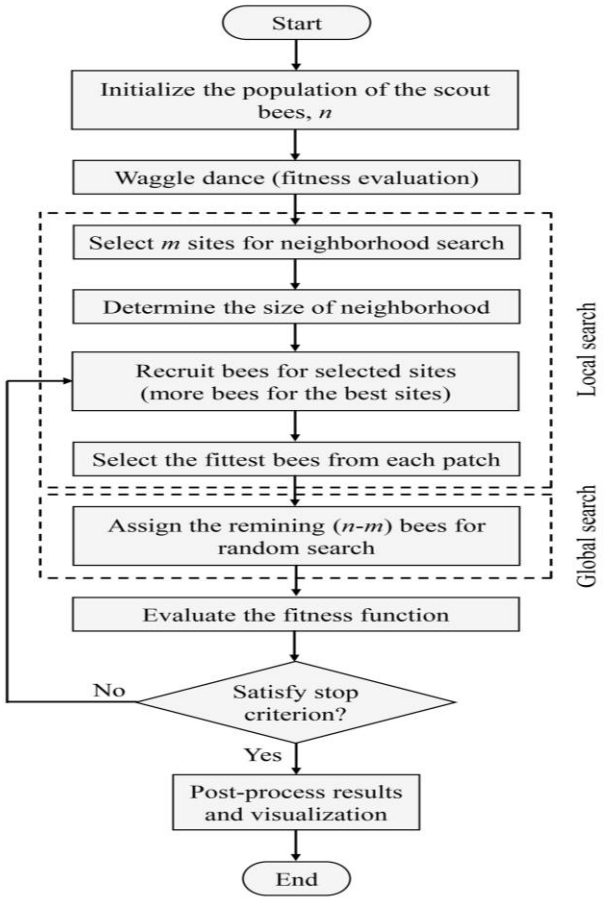


شکل ۴. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات.

مرحله‌ی اول الگوریتم زنبورعسل با تولید تصادفی زنبورهای عسل دیده‌بان در فضای جستجو و ارزیابی اولیه‌ی آن‌ها آغاز می‌شود. هر راه‌حل در الگوریتم مذکور به‌عنوان یک منطقه با منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود، که توسط زنبورهای عسل دیده‌بان جستجو می‌شود. اطلاعات هر منبع غذایی اعم از میزان غنی‌بودن آن توسط رقص زنبورهای دیده‌بان به زنبورهای کارگر انتقال می‌یابد. میزان حرکات رقص و همچنین تعداد زنبورهای کارگر اعزام‌شده به محل، به شایستگی منبع غذایی بستگی دارد، به این ترتیب زنبورهای کارگر استخدام‌شده توسط هر دیده‌بان به جستجوی محدوده‌ی منبع غذایی می‌پردازند. در صورتی که یکی از زنبورهای کارگر استخدام‌شده، منبع غنی‌تری نسبت به منبع مطرح‌شده توسط دیده‌بان ارائه دهد، تبدیل به زنبور دیده‌بان می‌شود؛ در غیر این‌صورت، اگر هیچ منبع بهتری توسط زنبورهای کارگر ارائه نشود، محدوده‌ی موردبررسی کوچک‌تر و جستجوها به منبع پیشنهادی اولیه متمرکز می‌شود و به این ترتیب، بهترین منبع غذایی در آن منطقه ثبت می‌شود و منطقه‌ی موردنظر ترک و دیده‌بان جدیدی به‌طورتصادفی حاصل می‌شود. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم زنبورعسل در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۴.۳.۳. الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی، یک الگوریتم تکاملی بر پایه‌ی جمعیت است، که از پدیده‌ی مهاجرت حیوانات و پرندگان بین جزایر الهام گرفته شده است.[۳۱] جزایر محل سکونت گونه‌های مختلف، معادل محدوده‌ی جستجو در الگوریتم ذکرشده است. مهاجرت گونه‌ها بین جزایر و جهش، دو عملگر مهم در



شکل ۵. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم زنبورعسل.

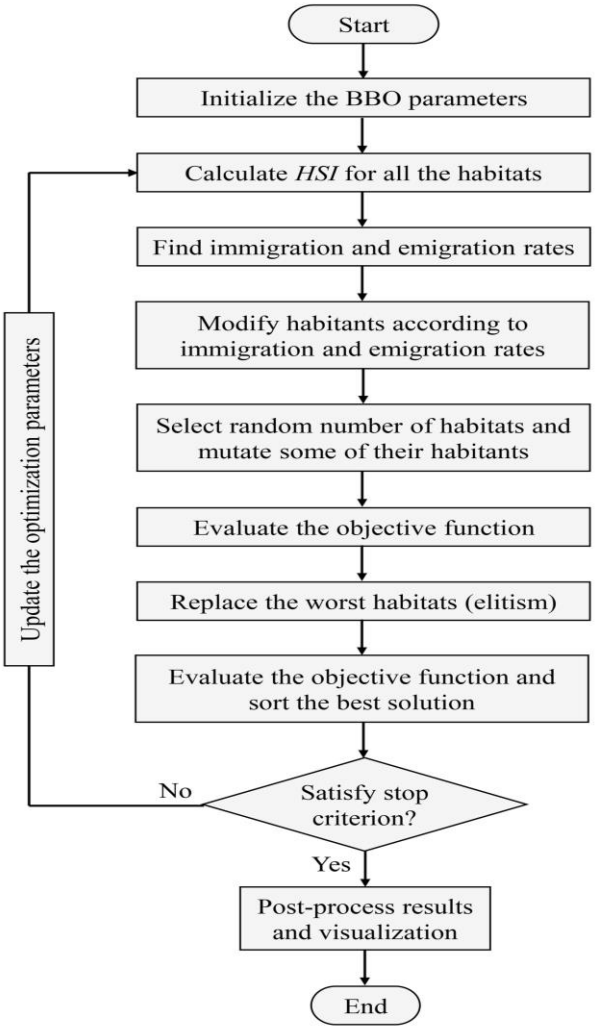
[1] Pham

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی هستند. عملگر مهاجرت موجب ایجاد تغییرات در برخی از متغیرهای طراحی می‌شود، که میزان آن‌ها با دو شاخص صلاحیت (HSI) و (SIV) قابل کنترل هستند. به این ترتیب، جزایری که اسکان مناسبی را برای گونه‌ها تأمین می‌کنند (راه‌حل بهتری را ارائه می‌دهند)، شاخص HSI بالا دارند. چنین جزایری گونه‌های بسیار زیادی دارند، که تمایل به مهاجرت به جزایر مجاور دارند. به‌طوری که نرخ مهاجرت به داخل در آن‌ها به‌دلیل کمبود فضای کافی پایین است. به همین ترتیب جزایر با HSI پایین به‌دلیل کمی جمعیت، نرخ مهاجرت به داخل بالایی دارند. در مقابل، عملگر جهش برای افزایش جمعیت جزایر استفاده‌شده قرار می‌گیرد، که موجب ایجاد یک راه‌حل جدید در فضای جستجو می‌شود. فرایند الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۴. مدل‌سازی عددی

۱.۴. راستی‌آزمایی نرم‌افزاری

به‌منظور کسب اطمینان از راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام‌شده برای سیستم شمع، خاک پشت آن، و اندرکنش آن‌ها، ابتدا مدل ارائه‌شده در برخی نوشتارها،[۳۲ و ۳۳] در نرم‌افزار اُپن‌سیس[1] مدل‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر نوشتارهای اخیر راستی‌آزمایی شده‌اند.

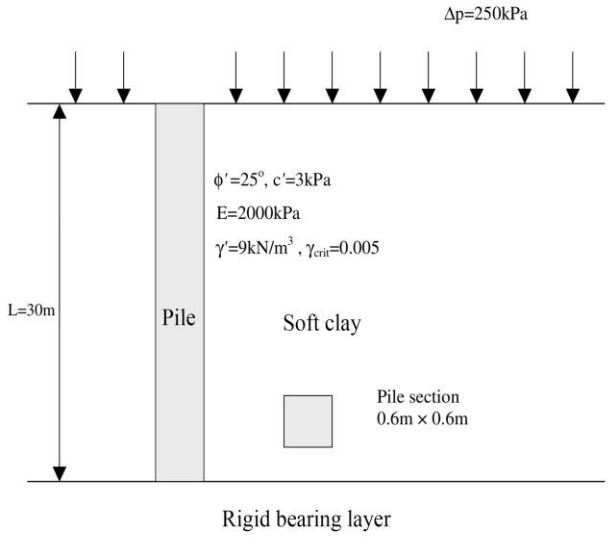


شکل ۶. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی.

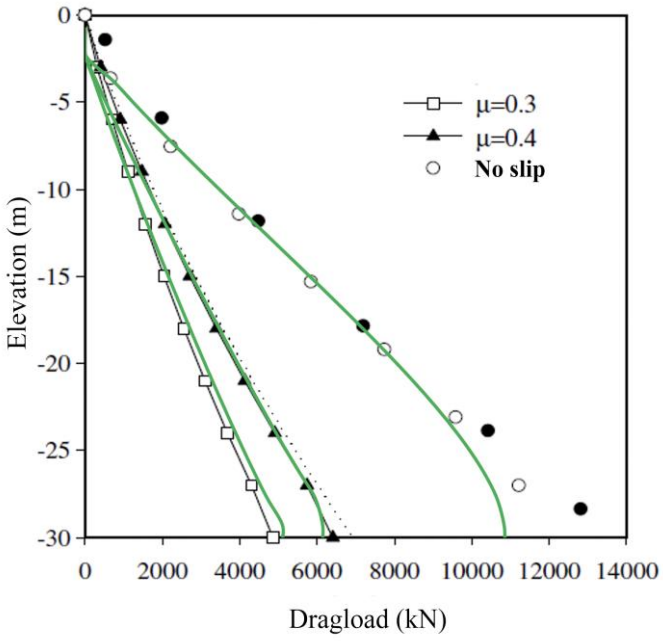
مدل بررسی جهت راستی‌آزمایی، شامل یک لایه خاک به همراه یک شمع مدفون در آن بوده است. در شکل ۷، تصویر شماتیک مدل بررسی‌شده به همراه پارامترهای مختلف آن مشاهده می‌شود. برخی نوشتارهای اخیر، به بررسی نیروی اصطکاکی که بین شمع و خاک اطراف آن اتفاق می‌افتد، پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه‌بر خاک اطراف و سیستم شمع، اندرکنش خاک و سازه نیز مدل‌سازی می‌شود. درنهایت، نیروی اصطکاک بین شمع و خاک مطابق رابطه‌ی ۵ و براساس تنش وارده بر جداره‌ی شمع محاسبه می‌شود:

$$p_D = 2\pi r \sigma_v \qquad (۵)$$

که در آن، P_D معرف نیروی اصطکاکی، r شعاع شمع، و σ_v تنش عمودی در جداره‌ی شمع هستند. همچنین در شکل ۸، مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی



شکل ۷. تصویر شماتیک مدل بررسی‌شده در نوشتار ژئونگ[1] (۱۹۹۲)[۳۲].



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج نوشتار ژئونگ و همکاران (۲۰۰۴)،[۳۳] و نتایج حاصل از مدل‌سازی در اُپن‌سیس.

[1] OpenSees

در نرم‌افزار اُپن‌سیس با نتایج نوشتارهای مذکور مشاهده می‌شود. مدل‌سازی انجام‌شده به‌صورت دوبُعدی و از نوع کرنش مسطح بوده و در آن از المان‌های چهارضلعی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است. برای مدل‌سازی اندرکنش خاک- سازه مطابق نوشتارهای اخیر،[۳۲ و ۳۳] از سه حالت مختلف: (الف) با اصطکاک ۰/۳، (ب) با اصطکاک ۰/۴، و (پ) بدون لغزش استفاده شده است.

نمودارهای شکل ۸، تغییرات نیروی اصطکاکی را در طول شمع در هر سه حالت تعریف‌شده‌ی اخیر نشان می‌دهند. در شکل ۸، خطوط ممتد (سبزرنگ) نتایج حاصل از نرم‌افزار اُپن‌سیس هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتایج به‌دست‌آمده از اُپن‌سیس و نتایج نوشتار ژئونگ و همکاران (۲۰۰۴)،[۳۳] در هر سه حالت تعریف‌شده وجود دارد.

۲.۴. روش مدل‌سازی و تحلیل استفاده‌شده در پژوهش حاضر

جزئیات سیستم سازه‌ی نگهبان مطالعه‌شده به‌همراه متغیرهای طراحی مسئله (جدول ۲ ملاحظه شود) به صورت شماتیک در شکل ۲ مشاهده می‌شود. به‌دلیل تقارن هندسی مقطع گود، فقط نیمی از مقطع در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. همچنین به‌منظور کاهش آثار نامطلوب و غیرواقعی شرایط مرزی در رفتار دیواره‌ی جانبی گود و سازه‌ی نگهبان، خاک‌های اطراف مقطع بررسی‌شده تا فاصله‌ی ۲۵ متری از المان شمع مدل‌سازی شده‌اند. ارتفاع مقطع به‌منظور درنظرگرفتن عمق مدفون شمع‌ها به‌صورت متغیر و برابر با (۲۲+X۶) متر اختیار شده است، که در آن X۶ معرف عمق مدفون شمع در زیرِ زمین است.

مدل‌سازی خاک با استفاده از المان‌های ۴ گره‌یی مستطیلی quad در ابعاد ۰/۵ متر و با درنظرگرفتن دو درجه‌ی آزادی انتقالی انجام شده است. شرایط مرزی در محدوده‌ی انتهایی مقطع به‌صورتی تعریف شده‌اند که از حرکت قائم خاک در مرز پایین و حرکت افقی در مرزهای طرفین اجتناب شود. خصوصیات رفتاری خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب با دستورهای ۰۲ PressureDependMultiYield و PressureIndependMultiYield در نرم‌افزار اُپن‌سیس معرفی شده‌اند. پارامترهای موردنیاز برای تعریف رفتارهای ذکرشده براساس مشخصات جدول ۱ و پیشنهادهای ارائه‌شده در نوشتار یانگ[1] و همکاران (۲۰۰۸)،[۳۴] صورت گرفته است.

المان‌های شمع در نرم‌افزار مطابق فرآیند اجرایی آن در واقعیت مدل‌سازی شده‌اند. به این صورت که ابتدا المان‌های خاک واقع در موقعیت شمع با استفاده از دستور remove برداشته شده‌اند. سپس المان‌های شمع با دستور element dispBeamColumn تعریف شده‌اند. در المان‌های شمع، ۱۰ نقطه‌ی انتگرال‌گیری گائوس- لوباتو در نظر گرفته شده است. سپس مقطع آن‌ها با استفاده از دستور فایبر و اختصاص رفتارهای تنش- کرنش ۰۲ uniaxialMaterial Concrete و ۰۲ uniaxialMaterial Steel به ترتیب برای مصالح بتن و فولاد (میلگردهای داخل بتن، غلاف فولادی، و استرات‌ها) شبیه‌سازی شده است. برای غلاف‌ها از فولادهای S۳۵۵ استفاده شده است، که مقاومت تسلیم و نهایی آن به ترتیب برابر با ۳۵۵ و ۵۲۰ مگاپاسکال است. همچنین مدول کشسانی آن برابر ۲۰۵ گیگاپاسکال است. بتن‌های مصرفی از رده‌ی C۲۵ بوده و رفتار تنش- کرنش آن‌ها مطابق رفتار محصورشده‌ی مندر[2] تعریف شده است.[۳۵] میلگردها از رده‌ی S۴۰۰ با تنش تسلیم و نهایی ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و مدول کشسانی ۲۰۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. سه درجه‌ی آزادی برای المان‌های شمع در نظر گرفته شده و فقط درجه‌ی آزادی قائم آن در پایه‌ی المان مقید بوده است.

اثر اندرکنش خاک و سازه با استفاده از روش لاگرانژ و تعریف رفتار ۲D ContactMaterial اعمال شده است. رفتار اخیر بر روی المان ۲D element BeamContact تعریف شده است. برای تعیین ضریب اصطکاک در مدل رفتاری اخیر از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است.[۳۶ و ۳۷]

$$\mu = \tan(\delta) \qquad (۶)$$

که در آن، δ مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

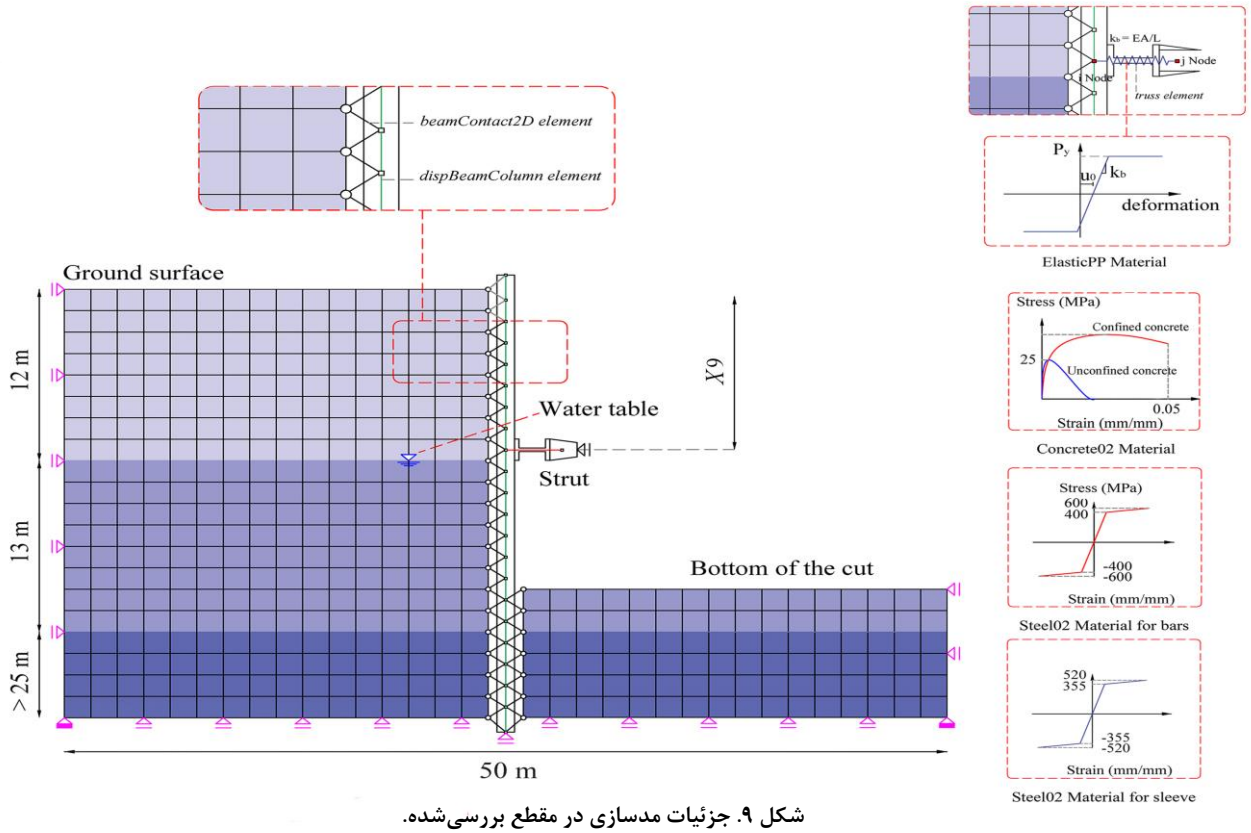
$$\delta = \tan^{-1}\left(\sin\varphi.\frac{\cos\varphi}{1+\sin^2\varphi}\right) \qquad (۷)$$

استرات‌های سیستم مهار متقابل برای مقابله با نیروهای فشاری وارده از طرفین جداره‌ی گود، با مقطع مربعی توخالی و مصالح فولادی S۳۵۵ در نظر گرفته شده‌اند. طراحی استرات‌ها معمولاً به گونه‌ای است که در تمامی شرایط رفتار کشسان داشته باشند تا موجب اختلال در عملکرد شمع‌ها نشوند؛ بنابراین، مدل‌سازی عناصر مذکور در نرم‌افزار توسط المان‌های خرپایی و اختصاص رفتار کشسان uniaxialMaterial ElasticPP تعریف شده است. جزئیات مدل‌سازی مقطع و نحوه‌ی اعمال دستورات ذکرشده در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

فشار سطح خاک در تحلیل‌ها برابر با مقدار ثابت ۵۰ کیلونیوتن بر مترمربع و تأثیر فشار آب حفره‌ای با توزیع مثلثی در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک در نرم‌افزار و شکل‌گیری تنش‌های اولیه در خاک، ابتدا یک تحلیل اولیه با در نظرگرفتن بارگذاری ثقلی انجام شده است. به این ترتیب رفتار خاک مطابق واقعیت و به صورت عادی تحکیم‌یافته می‌شود. تحلیل اولیه با استفاده از دستور nDMaterial InitialStateAnalysisWrapper انجام شده است. در مرحله‌ی بعد، با به‌روزرسانی رفتار خاک، حفاری آغاز و مطابق با فرآیند اجرای گود در واقعیت، تحلیل‌های حفاری به صورت گام به گام و در ۲۲ مرحله انجام و تغییرشکل‌ها و تنش‌های جداره‌ی گود و المان‌های شمع در هر مرحله ارزیابی شده است. درنهایت، با اتمام مراحل خاک‌برداری، مقطع مطالعه‌شده مطابق شکل ۹ است و تنش‌های خاک فقط توسط المان‌های شمع و استرات‌ها تحمل می‌شوند. به‌منظور انجام فرایند بهینه‌سازی از اتصال نرم‌افزار اُپن‌سیس و متلب[3] برای بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی سازه‌ی نگهبان ایستگاه موردنظر استفاده شده است. برای این منظور، از ۴ الگوریتم متداول، یعنی الگوریتم‌های: ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی استفاده شده است. هدف از انتخاب الگوریتم‌های مختلف، امکان مقایسه‌ی نتایج الگوریتم‌ها و تعیین بهترین پاسخ از میان آن‌ها بوده است. مشخصات متغیرهای طراحی به‌همراه فضای جستجوی (بازه‌ی تغییرات) آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. بازه‌های درنظر گرفته‌شده در جدول ۲ براساس محدوده‌های منطقی پارامترها انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمولاً به صورت کمینه‌سازی عمل می‌کنند، لذا در بخش حاضر از هزینه‌ی مصالح مصرفی به‌عنوان تابع هزینه‌ی بهینه‌سازی استفاده شده است.

[1] Yang
[2] Mander
[3] MATLAB



شکل ۹. جزئیات مدسازی در مقطع بررسی‌شده.

مقدار بیشینه‌ی گام‌های بهینه‌سازی برابر با ۴۰۰ در نظر گرفته شده است، که تعیین‌کننده‌ی پایان عملیات بهینه‌سازی است. در واقع، در هر یک از گام‌های بهینه‌سازی توسط سازوکار ویژه‌ی هر الگوریتم به متغیرها مقداردهی می‌شود و مقادیر مذکور به نرم‌افزار اُپن‌سیس منتقل و تحلیل استاتیکی براساس بارهای وارده انجام می‌شود. درنهایت، خروجی حاصل از اُپن‌سیس به متلب منتقل می‌شود و عملیات ارزیابی براساس دستورالعمل خاص هر الگوریتم صورت می‌گیرد. در هر یک از الگوریتم‌ها، میزان جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. بنابراین، در کل تعداد مدل‌های تحلیل‌شده برای دستیابی به مقادیر بهینه برابر (۴۰۰۰۰ = ۱۰۰×۴۰۰) بوده است. حال با تکرار این عملیات در حدود ۵۰ بار، تعداد آنالیز کل، ۵۰ برابر می‌شود که برابر ۲۰۰۰۰۰۰ است. درنهایت، بهترین پاسخ از بین جواب‌های موجود به‌دست‌آمده، به‌عنوان نتایج طراحی بهینه معرفی می‌شود.

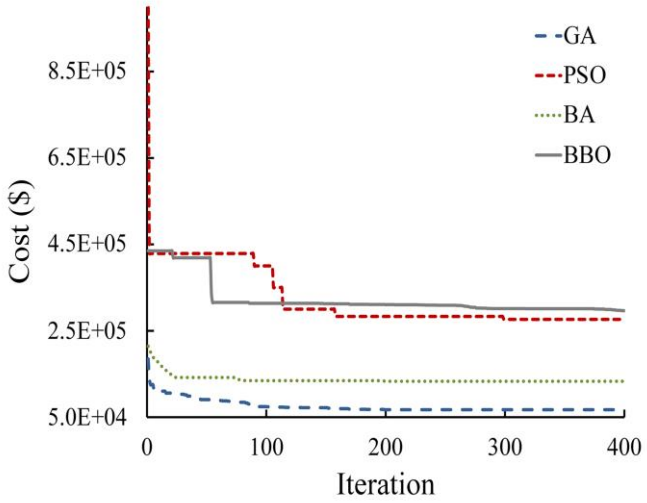
۵. نتایج

طراحی بهینه‌ی شمع‌های سیستم سازه‌ی نگهبان ایستگاه شماره‌ی ۳ متروی تبریز براساس متغیرهای طراحی جدول ۲ و با استفاده از چهار الگوریتم: فراابتکاری مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبورعسل انجام گرفته است. بهترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده از ۵۰ تحلیل مجزا به همراه میانگین و انحراف معیار نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الگوریتم ژنتیک در روند طراحی سیستم سازه‌ی نگهبان منجر به ارائه‌ی طرح بهینه‌تری شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، هزینه‌ی طرح‌های حاصل از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، مبتنی بر جغرافیای زیستی و زنبورعسل به ترتیب ۴/۱، ۴/۴، و ۲/۰ برابر هزینه‌ی متناظر بهترین طرح (یعنی طرح ارائه‌شده براساس الگوریتم ژنتیک) بوده است.

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات تابع هزینه در گام‌های مختلف بهینه‌سازی برای

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج تابع هدف در پروسه‌ی بهینه‌سازی.

Cost ($)			Optimization algorithm
SD	Mean	Best	
1254.25	294431.40	276593.67	PSO
325.35	74325.93	67498.83	GA
835.05	302301.91	296427.07	BBO
651.01	139043.54	133224.98	BA



شکل ۱۰. مقایسه‌ی روند همگرایی سیستم موردنظر براساس ۴ الگوریتم.

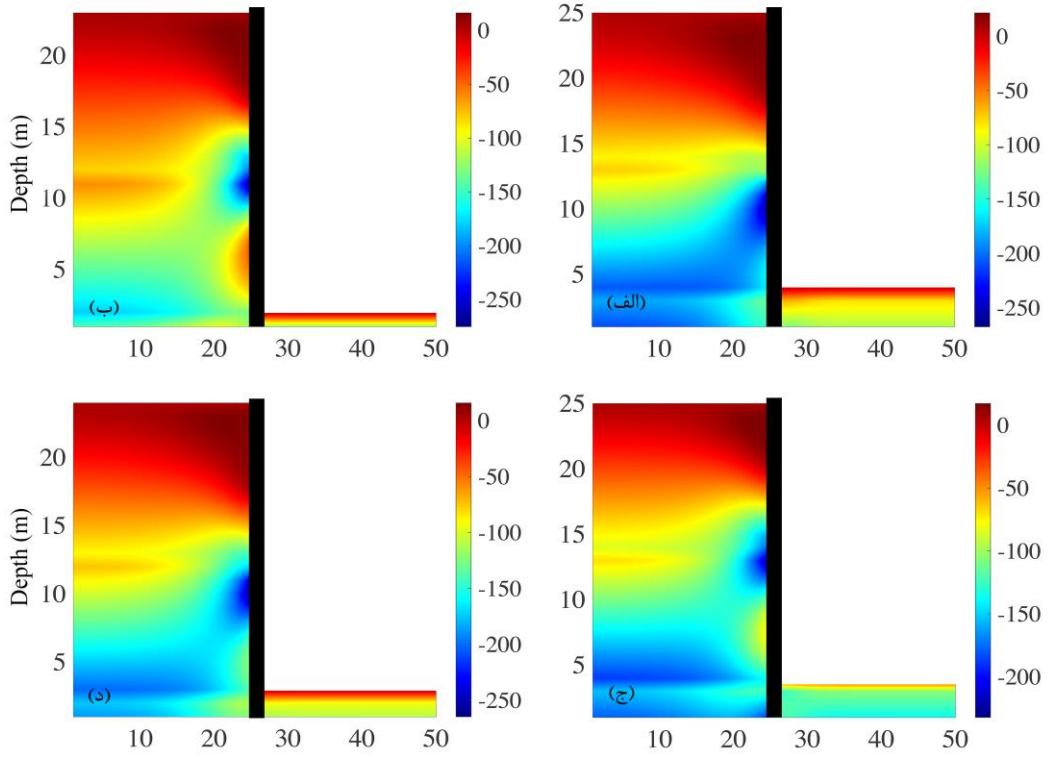
هر یک از الگوریتم‌ها مشاهده می‌شود؛ که در آن، محور قائم معرف هزینه‌ی کل اجرای سازه‌ی نگهبان ایستگاه موردنظر است و محور افقی تعداد تکرارها را نشان می‌دهد. نتایج مذکور به‌منظور کاهش تعداد ارقام و همچنین امکان مقایسه با نتایج متناظر پژوهش‌های پیشین،[۲۵ و ۲۶] بر حسب دلار تنظیم شده‌اند.

مطابق شکل ۱۰، تعداد گام‌های طی‌شده در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی برای دستیابی به پاسخ بهینه به ترتیب برابر با ۹۰، ۳۰۰، ۷۵، و ۲۸۰ بوده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های بهینه‌سازی زنبورعسل و ژنتیک در کمترین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و ازدحام ذرات در بیشترین گام به جواب بهینه رسیده‌اند. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک علاوه‌بر عملکرد مناسب در ارائه‌ی نتایج بهینه‌تر، قابلیت همگرایی سریعی نیز دارد. مقادیر هر یک از متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی و برای هر یک از الگوریتم‌های بررسی‌شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

همان‌طور که در بخش ۴ نیز ذکر شد، تحلیل ایستگاه بررسی‌شده در ۲۲ مرحله انجام شده است. به این ترتیب که در مرحله‌ی صفر، ابتدا تنش‌های برجا بر خاک اعمال و سپس رفتار خاک از حالت کشسان به حالت خمیری تبدیل شده است. سپس حفاری در ۲۲ مرحله انجام گرفته است، که در هر مرحله ارتفاع ۱ متر از خاک برداشته شده است. به این ترتیب نرم‌افزار قادر خواهد بود در هر مرحله با شرایط جدید انطباق پیدا کند. لذا محاسبات عددی، دقت بالایی خواهند داشت. در شکل ۱۱، تنش جانبی خاک در مرحله‌ی آخر گودبرداری برای سیستم سازه‌ی نگهبان طراحی‌شده براساس ۴ الگوریتم موردنظر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تغییرات تنش جانبی در هر ۴ طرح تا حد زیادی مشابه

جدول ۴. مقادیر متغیرهای طراحی در گام آخر فرآیند بهینه‌سازی.

X10 (m)	X9 (m)	X8 (m)	X7 (m)	X6 (m)	X5 (m)	X4	X3	X2 (m)	X1 (m)	Optimization algorithms
3	11.72	7.37	0.036	0.60	2.95	28	14	0.019	0.93	PSO
1	13.19	7.42	0.020	0.70	3.97	16	8	0.024	0.64	GA
2	11.74	6.67	0.024	0.67	4.66	16	8	0.017	1.00	BBO
3	14.83	6.84	0.026	0.61	3.38	25	10	0.025	0.76	BA



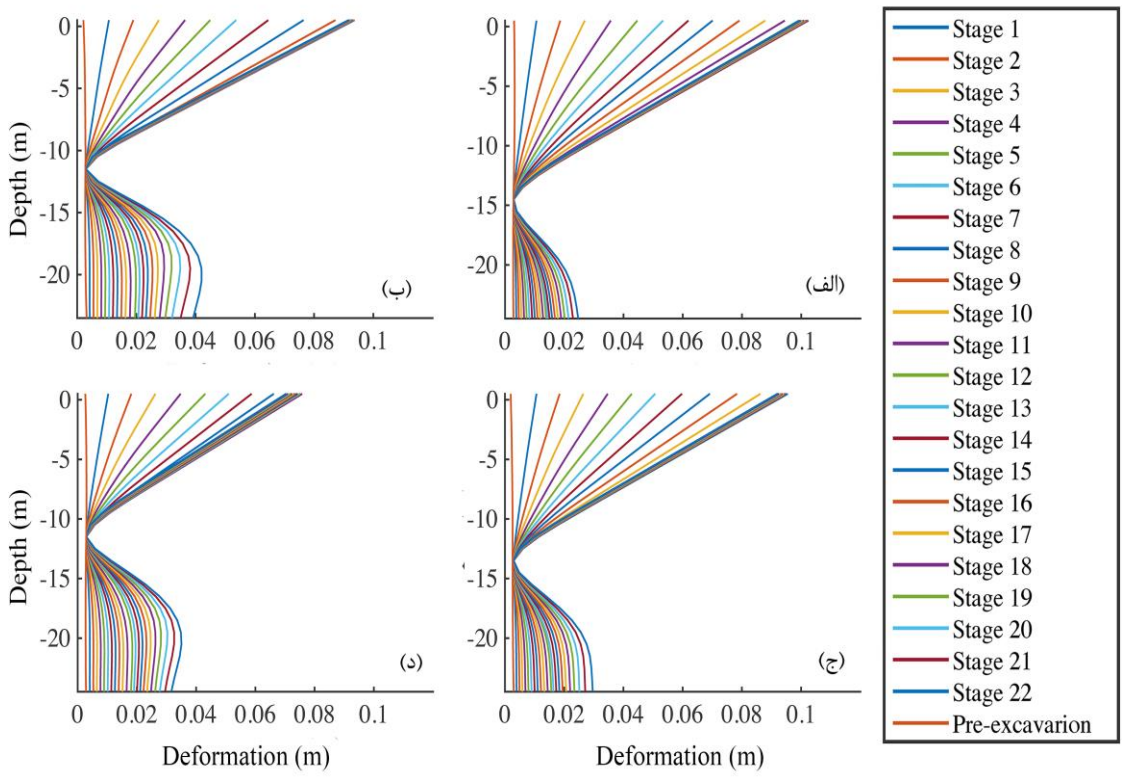
شکل ۱۱. توزیع تنش خاک در دیواره‌ی گود در مرحله‌ی آخر فرآیند گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبورعسل، و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.

هم هستند و تغییرات اندک مشاهده‌شده به دلیل عمق‌های مدفون متفاوت شمع‌ها و همچنین محل‌های متفاوت قرارگیری استرات‌ها در روش‌های مختلف است، که برای الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۲، ۳ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر هستند. ملاحظه می‌شود که محل قرارگیری استرات‌ها در نحوه‌ی تغییرشکل شمع‌ها و در نتیجه در نحوه‌ی شکل‌گیری تنش‌های جانبی خاک تأثیر بسزایی دارد. به این صورت که نواحی متصل به استرات موجب تحمیل تنش موضعی بالایی به خاک پشتی می‌شود؛ این در حالی است که فشار خاک قسمت‌های دیگر توسط تغییرشکل شمع تحمل می‌شود. لذا به‌دلیل امکان حرکت شمع حالت فعال در خاک ایجاد می‌شود، که موجب کاهش تنش جانبی می‌شود. این موارد در شکل‌ها به ترتیب با طیف‌های رنگی آبی و قرمز مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است که در صورت شبیه‌سازی یک‌مرتبه‌ی خاک‌برداری در نرم‌افزار، تأثیر مراحل مختلف گودبرداری قابل رصد نیست و قابلیت اطمینان نتایج کمتر است.

روند تغییرشکل شمع‌ها در مراحل مختلف حفاری در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. کاهش عمق قرارگیری استرات‌ها موجب افزایش تغییرشکل قسمت تحتانی شمع‌ها خواهد شد و برعکس. بدیهی است که عمق مدفون شمع نیز در میزان تغییرشکل آن مخصوصاً در نواحی تحتانی تأثیر زیادی دارد؛ با وجود این، افزایش بسیار زیاد آن موجب بیشترشدن طول شمع مصرفی و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی آن می‌شود. بنابراین، انتخاب نقطه‌ی مناسب برای نصب استرات‌ها از جهت ایجاد تعادل در تغییرشکل‌های نواحی فوقانی و تحتانی شمع، اهمیت بسیاری دارد. در نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف مشاهده می‌شود که در تمامی آن‌ها عمق بهینه‌ی قرارگیری استرات‌ها تا حد زیادی مشابه بوده است.

تغییرمکان بیشینه‌ی شمع‌ها به‌منظور طراحی به ۱۰ سانتی‌متر محدود شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشینه‌ی تغییرمکان در تمامی طرح‌ها در قسمت فوقانی آن‌ها اتفاق افتاده است، که با توجه به آزادبودن انتهای شمع‌ها طبیعی به‌نظر می‌رسد. نواحی مذکور همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود، باعث ایجاد حالت فعال در خاک پشتی شده است، که موجب کاهش تنش جانبی آن می‌شود. در شکل ۱۲، خط اول نشانگر تغییرشکل اندک اولیه‌ی شمع در اثر تنش‌های برجاست و با پیشرفت مراحل حفاری، تغییرشکل شمع افزایش یافته و شمع‌ها تغییرشکل‌های ماندگاری را تجربه کرده‌اند. همچنین براساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که وجود یک ردیف استرات برای نگهداری از سازه‌ی نگهبان مذکور در محدوده‌ی تغییرمکان داده‌شده کافی است و نیازی به استفاده از تعداد ردیف‌های بیشتر استرات نیست.

مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر برخی مطالعات پیشین،[۲۵ و ۲۶] نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های مختلط موجب کاهش هزینه نسبت به حالت‌های استفاده از شمع‌های بتنی و فولادی توخالی می‌شود؛ که با درنظرگرفتن هزینه‌ی شمع‌های بتنی و فولادی به ترتیب برابر با ۲ و ۱۰۲ درصد هستند. علاوه‌بر پایین‌بودن هزینه‌ی اجرای شمع‌های مختلط، شمع‌های مختلط مزیت‌های دیگری نیز دارند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به راحتی اجرا و عملکرد قالبی آن‌ها برای بتن اشاره کرد؛ این در حالی است که در شمع‌های بتنی، دیواره‌ی خاک به‌عنوان قالب عمل می‌کند و از کفایت پوشش بتن نمی‌توان اطمینان حاصل کرد. همچنین قطر شمع نیز در صورت استفاده از مصالح مختلط نسبت به حالت‌های قبل کاهش یافته است. با وجود این، با توجه به درنظرگرفتن تغییرمکان مجاز یکسان در هر سه نمونه، توزیع تنش خاک و نحوه‌ی تغییرشکل شمع در تمامی سه حالت فوق تا حد زیادی مشابه هم هستند.



شکل ۱۲. تغییرمکان شمع در مراحل مختلف گودبرداری برای الگوریتم‌های: (الف) ازدحام ذرات، (ب) ژنتیک، (ج) زنبورعسل، و (د) مبتنی بر جغرافیای زیستی.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، طرح بهینه‌ی سیستم سازه‌ی نگهبان ایستگاه شماره‌ی ۳ متروی تبریز با استفاده از شمع‌های مختلط فولادی- بتنی به همراه مهار متقابل فولادی بررسی شده است. به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی از تحلیل‌های استاتیکی بر روی مدل المان محدود مقطع بررسی‌شده، استفاده شده است. برای این منظور، از ۴ الگوریتم: بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، ژنتیک، ازدحام ذرات، و زنبورعسل استفاده شده است. تعداد ۱۰ متغیر طراحی در مسئله‌ی حاضر در نظر گرفته شده است، که با کمینه‌سازی هزینه‌ی مصالح مصرفی تعیین شده‌اند. اهم نتایج به‌دست‌آمده به این صورت است:

۱- از میان ۴ الگوریتم استفاده‌شده، بهترین پاسخ به‌دست‌آمده مربوط به الگوریتم ژنتیک و با هزینه‌ی مصالح مصرفی برابر ۶۷۴۹۸/۸۳ دلار بوده است.

۲- عمق قرارگیری سیستم مهار متقابل و عمق مدفون شمع‌ها در توزیع تنش خاک و تغییرشکل المان شمع تأثیر زیادی دارد. عمق‌های مدفون شمع‌ها و عمق قرارگیری استرات‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، زنبورعسل، و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۲، ۳ و ۱۱/۷، ۱۳/۲، ۱۱/۷، ۱۴/۸ متر به‌دست آمده است.

۳- وجود سیستم مهار متقابل موجب افزایش تنش خاک در ناحیه‌ی اتصال استرات‌ها با شمع می‌شود. این در حالی است که در نواحی فوقانی به‌دلیل امکان جابجایی آزاد شمع و ایجاد وضعیت فعال در خاک، تنش‌ها به‌میزان کمینه هستند.

۴- مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های مختلط نسبت به شمع‌های بتنی و فولادی، هزینه‌ی پایین‌تر و نیز از نظر اجرایی عملکرد بهتری دارند.

References - منابع

1. Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. State of the art volume, *In 7th ICSMFE*, pp.225-290.
2. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice.* John Wiley & Sons.
3. Chang, J.D. and Wong, K.S., 1996. Apparent pressure diagram for braced excavations in soft clay with diaphragm wall. *In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.87-92.
4 Rechards Jr, R. and Elms, D.G., 1979. Seismic behavior of gravity retaining walls. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *105*(4), pp.449-464. doi.org/10.1061/AJGEB6.0000783
5. Gazetas, G., Psarropoulos, P.N., Anastasopoulos, I. and Gerolymos, N., 2004. Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *24*(7), pp.537-550. doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.005
6. Madabhushi, S.P.G. and Zeng, X., 2006. Seismic response of flexible cantilever retaining walls with dry backfill. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, *1*(4), pp.275-289. doi.org/10.1080/17486020601039170
7. Qu, H.L., Luo, H., Liu, L. and Liu, Y., 2017. Analysis of dynamic coupling characteristics of the slope reinforced by sheet pile wall. *Shock and Vibration*, pp.1-10. doi.org/10.1155/2017/9043518
8. Lin, Y.L., Cheng, X.M., Yang, G.L. and Li, Y., 2018. Seismic response of a sheet-pile wall with anchoring frame beam by numerical simulation and shaking table test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *115*, pp.352-364. doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.028
9. Hashash, Y.M. and Whittle, A.J., 1996. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, *122*(6), pp.474-486. doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1996)122:6(474)
10. Mu, L. and Huang, M., 2016. Small strain based method for predicting three-dimensional soil displacements induced by braced excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *52*, pp.12-22. doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.001
11. Zhang, W., Goh, A.T. and Xuan, F., 2015. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays. *Computers and Geotechnics*, *63*, pp.67-72. doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.09.001
12. Gandomi, A.H., Kashani, A.R., Roke, D.A. and Mousavi, M., 2015. Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques. *Engineering Structures*, *103*, pp.72-84. doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.034
13. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A. and Eslami, M., 2010. Economic design of retaining wall using particle swarm optimization with passive congregation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *4*(11), pp.5500–5507.
14. Khajehzadeh, M. and Eslami, M., 2012. Gravitational search algorithm for optimization of retaining structures. *Indian Journal of Science and Technology*, *5*(1), pp.1821-1827.
15. Ceranic, B., Fryer, C. and Baines, R.W., 2001. An application of simulate annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computers and Structures*, *79*(17), pp.1569–1581. doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00037-2
16. Yepes, V., Alcala, J., Perea, C. and Gonzalez-Vidosa, F., 2008. A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, *30*(3), pp.821–830. doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.023

17. Kaveh, A. and Shakouri, M.A.A., 2011. Harmony search based algorithm for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls. *International Journal of Civil Engineering*, *9*(1), pp.1–8.
18. Öztürk, H.T., Dede, T. and Türker, E., 2020. Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. *Structures*, *25*, pp.285-296. doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020
19. Camp, C.V. and Akin, A., 2012. Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, *138*(3), pp.438–448. doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000461
20. Kaveh, A., Biabani Hamedani, K. and Zaerreza, A., 2021. A set theoretical shuffled shepherd optimization algorithm for optimal design of cantilever retaining wall structures. *Engineering with Computers*, *37*, pp.3265-3282. doi.org/10.1007/s00366-020-00999-9
21. Kalemci, E.N., İkizler, S.B., Dede, T. and Angın, Z., 2020. Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. *Structures*, *23*, pp.245-253. doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013
22. Koopialipoor, M., Murlidhar, B.R., Hedayat, A., Armaghani, D.J., Gordan, B. and Mohamad, E.T., 2020. The use of new intelligent techniques in designing retaining walls. *Engineering with Computers*, *36*, pp.283-294. doi.org10.1007/s00366-018-00700-1
23. Aydogdu, I., 2017. Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization*, *49*(3), pp.381-400. doi.org/10.1080/0305215X.2016.1191837
24. Gordan, B., Koopialipoor, M., Clementking, A., Tootoonchi, H. and Mohamad, E., 2019. Estimating and optimizing safety factors of retaining wall through neural network and bee colony techniques. *Engineering with Computers*, *35*, pp.945-954. doi.org/10.1007/s00366-018-0642-2
25. Taiyari, F., Kharghani, M. and Hajihassani, M., 2020. Optimal design of pile wall retaining system during deep excavation using swarm intelligence technique. *Structures*, *28*, pp.1991-1999. doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.044
26. Taiyari, F., Hajihassani, M. and Kharghani, M., 2022. Efficiency of the evolutionary methods on the optimal design of secant pile retaining systems in a deep excavation. *Neural Computing and Applications*, *34*(22), pp.20313-20325. doi.org/10.1007/s00521-022-07591-w
27. Iranian National Building Codes Compilation Office, 2020. *Iranian National Building Code, Part 9: Reinforced Concrete Buildings Design*, Ministry of Housing and Urban Development (MHUD).
28. Goldberg, D.E., 2010. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. MA: Addison-Wesley, Reading.
29. Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. *In Proceeding of the ICNN'95-international conference on neural networks*, *4*, pp.1942–1948.
30. Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M., 2006. The bees algorithm-a novel tool for complex optimization problems. *In Intelligent Production Machines and Systems*, pp. 454-459. doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X
31. Simon, D., 2008. Biogeography-based optimizatio. IEEE *Transactions on Evolutionary Computation*,*12*(6), pp.702–713.
32. Jeong, S., 1992. Nonlinear three-dimensional analysis of downdrag on pile groups. PhD Thesis, Texas A&M University.
33. Jeong, S., Lee, J. and Lee, C.J., 2004. Slip effect at the pile–soil interface on dragload. *Computers and Geotechnics*, *31*(2), pp.115-126. doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.01.009
34. Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A., 2008. OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements. user's manual, 1(27).
35. Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R., 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, *114*(8), pp.1804-1826. doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1804
36. Randolph, M.F. and Wroth, C.P., 1981. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles. *Geotechnique*, *31*(1), pp.143-157. doi.org/10.1680/geot.1981.31.1.143
37. Loukidis, D. and Salgado, R., 2008. Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand. *Géotechnique*, *58*(4), pp.283-296. doi.org/10.1680/geot.2008.58.4.283

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.72-83

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Investigating the Arrangement of Rebars on the Ductility of Concrete Shear Wall with FEM Simulation

Ebrahim Koochaki* **and Arash Sayari**

[1]Department of Civil Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.
* corresponding author:(e.kouchaki@iausdj.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 9 January 2024

Revised: 6 May 2024

Accepted: 29 May 2024

Keywords:

Concrete shear wall,
reinforcement angle,
ductility,
hardness,
bearing capacity.

Abstract

The structural system of a concrete bending frame is common in most seismic areas and is sometimes combined with braces or shear walls. Iran is considered an earthquake-prone country in the world, where shear walls are widely used in concrete structures. Shear walls are considered to be one of the main earthquake-resistant members in concrete buildings; therefore, the actual performance and behavior of these walls are of interest to engineers and designers. In this study, the effect of rebar arrangement on the ductility of concrete shear walls was investigated by simulating finite elements using Abaqus software. For this purpose, the models made by considering different angles of reinforcement in two cases of short and long concrete shear walls with a height of 2.5 and 4.5 meters, respectively, were modeled and analyzed under bearing load and seven earthquake records. The results showed that when comparing the ductility, stiffness, and bearing capacity for short and long concrete shear wall models with different reinforcement angles up to 75 °, there is a decreasing trend, and adding diagonal reinforcements to the model increases the ductility, stiffness, and bearing capacity. In addition, under the bearing load, the highest von Mises stress occurred at the foot of the shear wall, and in the case of earthquake records, the side areas and corners of the concrete shear wall had the highest von Mises stress. In the case of the stress contour for short walls with 15°, 45 °, and 90 °reinforcement angles under a drift load of 1%, it was observed that with an increase in the reinforcement angle, the stress value in the wall first increased and then decreased. In the case of the stress contour for the short walls with reinforcement angles of 15 °, 45 °, and 90 °under a drift load of 2%, the amount of stress in the wall increased with an increase in the angle of the reinforcement.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:
Koochaki, E. and Sayari, A. 2025. Investigating the Arrangement of Rebars on the Ductility of Concrete Shear Wall with FEM Simulation, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.72-83. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63525.3282

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

بررسی چیدمان میلگرد در شکل‌پذیری دیوار برشی بتنی با شبیه‌سازی اجزاء محدود

ابراهیم کوچکی* و آرش سیاری

گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

*نویسنده مسئول (e.kouchaki@iausdj.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

واژگان کلیدی:

دیوار برشی بتنی،

زاویه‌ی آرماتور ،

شکل‌پذیری،

سختی،

ظرفیت باربری.

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی چیدمان میلگرد در شکل‌پذیری دیوار برشی بتنی با نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است . مدل‌های ساخته‌شده با درنظرگرفتن زاویه‌های مختلف آرماتور در دو حالت کوتاه و بلند به ترتیب . با ارتفاع ۲/۵ و ۴/۵ متر مدل‌سازی و تحت بار پوش‌آور و ۷ رکورد زلزله تجزیه‌وتحلیل شده است. نتایج نشان داده‌اند که در حالت مقایسه‌ی شکل‌پذیری، سختی، و ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه و بلند با زاویه‌های مختلف آرماتور تا زاویه‌ی ۷۵ درجه روند کاهشی داشته و با افزودن آرماتورهای قطری به مدل، موجب افزایش شکل‌پذیری، سختی، و ظرفیت باربری می‌شود. تحت بار پوش‌آور، بیشترین مقدار تنش در پای دیوار برشی بوده و در حالت رکوردهای زلزله، نواحی کناری و گوشه‌های دیوار برشی بتنی، بیشترین مقدار تنش را داشته‌اند.

۱. مقدمه

یکی از سیستم‌های مناسب برای مقابله با نیروهای جانبی مؤثر بر یک سازه (اثر باد یا زلزله)، استفاده از دیوار سازه‌ای برشی است. اثر زلزله در ساختمان‌ها از سایر آثار وارد بر آن‌ها کاملاً متفاوت است. نیروهای ناشی از زلزله به مراتب شدیدتر و پیچیده‌تر از سایر نیروهای مؤثر هستند. عناصر مقاوم در مقابل نیروهای ذکرشده، شامل قاب خمشی، دیوار برشی، یا ترکیبی از آن دو هستند. از لحاظ برتری می‌توان گفت که دیوار برشی، اقتصادی‌تر از قاب است. دیوارهای برشی قسمت عمده‌ی نیروهای جانبی وارد بر سازه و برش‌های حاصل از آن را جذب می‌کنند و در حقیقت دیوارهای بتن‌آرمه‌ای هستند که سختی داخل صفحه‌ای بسیار زیادی دارند. رفتار دیوارهای برشی مشابه رفتار تیرهای طره‌ای است. علت نام‌گذاری این‌گونه دیوارها به نام دیوارهای برشی آن است که عمده‌ی برش ناشی از نیروهای جانبی وارد به سازه را تحمل و به زمین منتقل می‌کنند. با وجود آنکه نام آن‌ها، دیوارهای برشی است؛ اما رفتار آن‌ها مشابه تیرهای طره‌یی با رفتار خمشی است. در دیوارهای برشی با نسبت ارتفاع به عرض کوچک، برش بیش از خمش حائز اهمیت است و رفتار به سمت رفتار برشی متمایل می‌شود. در مقابل، با افزایش نسبت ابعادی در این‌گونه دیوارها رفتار به سمت رفتار خمشی متمایل می‌شود. اجزاء سازه‌ای در جریان اعمال بارهای ثقلی و جانبی در اغلب موارد با ورود به ناحیه‌ی رفتار خمیری و به‌وجودآمدن مفصل خمیری، کمبود ظرفیت مقاومت خود را جبران می‌کنند.

فلسفه‌ی آرماتورگذاری در دیوار برشی بتن‌آرمه با توجه به نوع کارکرد دیوار برشی، به‌عنوان المان باربر جانبی است؛ به‌صورتی که در دیوارهای برشی، که در آن‌ها عملکرد به‌صورت خمشی است، میلگردگذاری متفاوتی متصور است و همچنین در دیوارهای برشی، که عملکرد آن به صورت برشی است، میلگردگذاری متفاوتی تجویز شده است. در پژوهش حاضر بناست که نوع متفاوت آرماتورگذاری در دیوار برشی به شکلی که تاکنون پژوهشگران به آن نپرداخته‌اند، بررسی و ارزیابی عددی شود.

راونجیانت[1] و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی دیوارهای برشی بتنی با بتن سبک در حالت‌های قرارگیری متفاوت میلگردهای جان پرداخته و چهار مدل دیوار برشی با بتن سبک را مطالعه کرده‌اند؛ به صورتی که مدل اولیه، چینش مرسوم آرماتور در دیوار برشی را داشته و در مدل‌های دیگر با اضافه‌شدن میلگرد قطری در دیوار با دو تراکم متفاوت و نیز به‌صورت اضافه‌شدن میلگرد قطری به انتهای دیوار بوده است.[۱]

نگوین[2] و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی و مدل‌سازی عددی دیوار برشی کامپوزیت بتنی به‌همراه ورق‌های فولادی پرداخته و شکست دیوار به‌صورت آزمایشگاهی را اعتبارسنجی و محل‌ها و الگوی آسیب دیوارها را بررسی کرده‌اند. درنهایت، شاخص‌های آسیب در دیوارهای مذکور بررسی شده است.[۲] رضاپور و قاسمیه (۲۰۱۸)، به مدل‌سازی دیوارهای کوپله‌ی برشی بتنی به روش المان

[1] Raongjant

[2] Nguyen

استناد به این مقاله:

کوچکی، ابراهیم و سیاری، آرش، ۱۴۰۴. بررسی چیدمان میلگرد در شکل‌پذیری دیوار برشی بتنی با شبیه‌سازی اجزاء محدود. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۷۲-۸۳.

https://doi.org/10.24200/j30.2024.63525.3282

شاپا الکترونیکی: ۴۷۷۶-۲۶۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

محدود ماکروسکوپیک پرداخته و از المان‌های متفاوت المان محدودی استفاده کرده‌اند. دیوار برشی کوپله با سه تیر با متغیربودن نوع اتصال تیر با سختی متفاوت، مدل‌سازی و رفتار خمشی برشی آن‌ها به‌صورت غیرخطی بررسی شده است. همچنین در پژوهش مذکور، مودهای جابجایی به‌دست آمده و تحت بارهای چرخه‌ای بررسی شده‌اند.[۳]

سوارز[1] و همکاران (۲۰۲۱)، پاسخ دیوارهای برشی ترکیبی آلیاژ حافظه‌دار (SMA)[2] فولاد حاوی SMA فوق‌کشسان نیکل- تیتانیوم را به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی جایگزین در ناحیه‌ی مفصل خمیری با استفاده از مدل‌سازی المان محدود غیرخطی بررسی کرده‌اند. سیستم دیوار هیبریدی باعث ارتقاء خودمحوری و کاهش قابل‌توجه تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. لذا، دو نوع دیوار برشی بتنی مسلح‌شده با فولاد معمولی برای یک ساختمان اداری ۱۰ طبقه با توجه به استاندارد طراحی فعلی بتن کانادا، با فرض دو سناریوی طراحی لرزه‌ای مجزا طراحی شده است: ۱) دیوار برشی با شکل‌پذیری متوسط برای یک منطقه‌ی لرزه‌خیز متوسط در شرق کانادا و ۲) دیوار برشی شکل‌پذیر برای یک منطقه‌ی لرزه‌ای بالا در غرب کانادا. معادل دیوارهای برشی بتن مسلح SMA فولاد هیبریدی، دو دیوار برشی معمولی نیز از نظر هندسه و طرح آرماتور تعریف و طراحی شده‌اند. مدل‌های المان محدود دوبُعدی در مقیاس کامل برای ارزیابی واکنش‌های فشاری و هیسترتیک دیوارها توسعه داده شده‌اند. شباهت در سطح مقطع دیوار و ظرفیت نیروی تسلیم فولاد و آرماتور SMA، امکان مقایسه‌ی بین دیوارها، از جمله: مقاومت، سختی، نیروی محوری، و ظرفیت‌های اتلاف انرژی را فراهم می‌کند. نتایج نشانگر مقاومت جانبی و ظرفیت‌های جابجایی مشابه و ظرفیت ترمیم برتر دیوارهای تقویت‌شده با SMA در مقایسه با دیوارهای تقویت‌شده با فولاد است. علاوه‌بر این، یک مطالعه‌ی اولیه برای بررسی اثر طول میله‌ی SMA در دیوار شکل‌پذیر به‌دلیل تمرکز آسیب در نزدیکی پایه‌ی دیوار انجام شد؛ که در آن، طول‌های مربوط به تقریباً ۵۰ و ۲۰ درصد از طول SMA اصلی در نظر گرفته شده است.[۴]

ژانگ[3] و همکاران (۲۰۲۲)، در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیل عددی، عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی ارتجاعی با استفاده از بتن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی با مقاومت بالا را بررسی کرده‌اند. ایشان آرماتورهای با مقاومت فوق‌العاده بالا (UHSB)[4] را به‌طور ابتکاری در دیوارهای برشی بتن بازیافتی با مقاومت بالا (RAC)[5] برای دست‌یابی به عملکرد ارتجاعی اعمال کرده‌اند. به‌منظور بررسی عملکرد ارتجاعی و لرزه‌ای دیوار برشی، ۵ نمونه با نسبت دهانه‌ی برشی ۲/۲ تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. متغیرها همچنین شامل: نوع تقویت طولی در عناصر مرزی، وجود پوشش ضدخوردگی در UHSB، و نسبت جایگزینی سنگ‌دانه‌ی درشت بازیافتی (RCA) بوده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از UHSB در المان‌های مرزی به‌طور قابل‌توجهی باعث بهبود سختی ثانویه و کاهش جابجایی و عرض ترک در دیوارهای برشی شده است. پوشش ضدخوردگی، مقاومت بین UHSB و RAC را کاهش داده است، اما تأثیر ناچیزی در عملکرد لرزه‌ای و ارتجاعی نمونه‌ها قبل از نسبت دریفت ۲٪ داشته است. افزایش نسبت جایگزینی RCA، کمی نیروی جانبی نمونه‌ها را تحت همان نسبت دریفت کاهش داد، اما دیوارها عملکرد ارتجاعی رضایت‌بخشی را نشان داده‌اند. علاوه‌بر این، مدل‌های المان محدود در آباکوس[6] ایجاد و تجزیه‌وتحلیل شد. نتایج نشان داد که نتایج آنالیز عددی با نتایج آزمایش تطابق خوبی داشته است.[۵]

میائو[7] و همکاران (۲۰۲۲)، به تأثیر نسبت دهانه‌ی برشی و نسبت آرماتور قائم در شکست دیوارهای برشی بتنی با هندسی مشابه پرداخته‌اند. در ابتدا، مدل آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی تأیید شد. سپس آثار نسبت دهانه‌ی برشی و نسبت آرماتور قائم در خواص مکانیکی دیوارهای برشی بتنی با اندازه‌های سازه‌های مختلف با استفاده از روش مذکور بررسی شد. نتایج نشان داد که حالت شکست دیوارهای برشی با افزایش نسبت دهانه‌ی برشی از شکست برشی به شکست خمشی تغییر می‌کند. با افزایش نسبت دهانه‌ی برشی، ظرفیت برشی دیوار برشی کاهش و شکل‌پذیری افزایش یافته است، که منجر به تضعیف اثر اندازه شده است. افزایش نسبت آرماتور قائم، افزایش جزئی در ظرفیت برشی دیوار برشی داشته است، اما تقریباً تأثیری در شکل‌پذیری و اثر اندازه نداشته است.[۶]

چنگ[8] و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای رفتار لرزه‌ای دیوارهای باریک بتن مسلح پیش‌تنیده با پایه‌ی کوتاه[9] را بررسی کرده‌اند. ایشان سه دیوار پایه کوتاه با نسبت ابعادی بالا ۲/۰ برای الگوهای بارگذاری مختلف، از جمله نیروهای محوری ثابت و نیروهای محوری متغیر، همراه با بارگذاری برشی چرخه‌ای را آزمایش کردند و دریافتند که حالت‌های شکست با الگوهای بارگذاری، از جمله: شکست خمشی- برشی (کشش محوری ثابت همراه و بار برشی چرخه‌ای)، شکست فشاری برشی (فشار محوری ثابت همراه و بار برشی چرخه‌ای)، و شکست خمشی (نیروهای محوری متغیر همراه و بارگذاری برشی چرخه‌ای) متفاوت است. نیروهای محوری متغیر منجر به کاهش مقاومت کششی- برشی نرمال و نیز مقاومت فشاری- برشی دیوارهای پایه کوتاه به ترتیب ۸/۵ و ۹/۱ درصد و کاهش ۳۵ درصدی نسبت نهایی کشش برشی شده است. نسبت دریفت نهایی دیوارهای پایه کوتاه از ۱/۸ تا ۳/۷ درصد متغیر بوده است. نیروهای محوری متغیر، بیشینه‌ی عرض ترک را در دیوارهای پایه کوتاه افزایش نداده‌اند، اما به وضوح انرژی انباشته‌شده‌ی دیوارهای پایه کوتاه را کاهش داده‌اند؛ زیرا شکل منحنی‌های هیسترتیک را تغییر داده‌اند. درنهایت، یک مدل المان محدود از دیوارهای پایه کوتاه توسعه داده شده است.[۷]

چنگ[10] و همکاران (۲۰۲۳)، در یک مطالعه‌ی تجربی به بررسی تحلیل مکانیزم عملکرد لرزه‌ای خارج از صفحه‌ی دیوارهای برشی بتن مسلح پرداخته و آثار پارامترهایی، مانند: نسبت فشار محوری، ضخامت دیوار، نسبت ارتفاع به عرض، و عیار بتن در عملکرد لرزه‌ای درون‌صفحه و خارج از صفحه در سطح عضو را در ترکیب با تحلیل پارامتر متغیر المان محدود تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند. در سطح سیستم سازه، تجزیه‌وتحلیل تاریخچه‌ی زمانی سازه‌های دیوار برشی ۲ قاب برای آثار تک‌لرزه‌ای و توالی پس‌لرزه‌ی اصلی ایجاد و آسیب سازه از طریق بیشینه‌ی دریفت طبقه و چرخش ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که عملکرد لرزه‌ای خارج از صفحه‌ی دیوارهای برشی به‌طورقابل‌توجهی ضعیف‌تر از عملکرد لرزه‌ای داخل صفحه با اختلاف ۱۵/۱ تا ۲۰/۱ برابر ظرفیت باربری بوده است،

[1] Soares
[2] Shape Memory Alloy
[3] Zhang
[4] ultra-high strength bars
[5] recycled aggregate concrete
[6] ABAQUS
[7] Miao
[8] Cheng
[9] slender prestressed reinforced concrete short-leg walls
[10] Cheng

که در آن ضخامت دیوار و نسبت ابعاد برابر بوده است. هنگامی که دیوارهای برشی سازه در جهت خارج از صفحه تحت تأثیر لرزه‌ای قرار می‌گیرند، جهت خارج از صفحه‌ی آن‌ها دچار تغییرشکل زیادی می‌شود و آسیب به‌راحتی به‌خصوص در دیوار تک‌جهته با سازه‌ی کمتر رخ می‌دهد. در طراحی لرزه‌ای دیوارهای برشی باید از عملکرد لرزه‌ای داخل صفحه و خارج از صفحه اطمینان حاصل شود و ضخامت دیوار و نسبت ارتفاع به عرض دیوارهای برشی باید به‌طورمنطقی کنترل شوند.[۸]

قاسمی نیا[1] و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی پاسخ دیوارهای برشی بتنی با آرماتورهای تک و دو لایه تحت بارگذاری سیکلی درون‌صفحه پرداخته‌اند. مطالعه‌ی تجربی ایشان، شامل: آزمایش دو دیوار برشی بتنی با درصد آرماتور یکسانی بوده است، که به‌صورت تک‌لایه یا دولایه تحت بارگذاری برشی سیکلی درون‌صفحه قرار گرفته‌اند. هدف از آزمایش اخیر، بررسی اثر جزئیات آرماتور بین پیکربندی تک‌لایه و دولایه بوده است، در حالی که سایر پارامترهای ساختاری کلیدی، مانند: نسبت آرماتور، مقاومت فشاری بتن، سطح بار محوری، نسبت ابعاد، و ضخامت حفظ شده است. نتایج تجربی نشان داده است که دیوار برشی بتنی دولایه دارای مقاومت درون‌صفحه‌ی حدود ۳۰٪ و شکل‌پذیری جابجایی حدود ۹/۷٪، نسبت به دیواربرشی بتنی تک‌لایه بوده است.[۹]

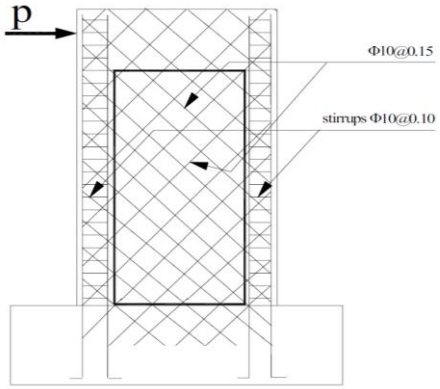
۲. راستی‌آزمایی

به‌منظور راستی‌آزمایی در پژوهش حاضر، از از مدل LW-۲ در نوشتار رانجیانت و همکاران (۲۰۰۹)،[۱] برای اعتبارسنجی نرم‌افزاری پژوهش حاضر استفاده شده است، که مشخصات آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مدل شماتیک شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

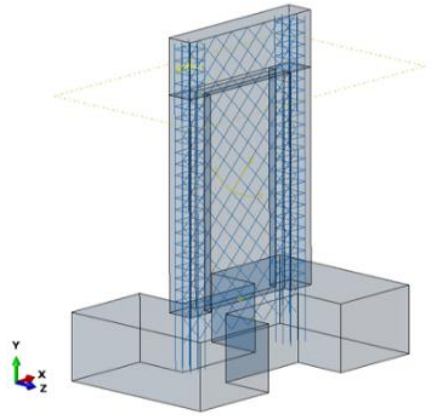
شرایط مرزی در نظرگرفته‌شده در مدل‌سازی حاضر به این‌گونه بوده است که در عضو مرزی تحتانی، درجه‌های آزادی انتقالی و دورانی مقید شده‌اند. همچنین، در المان‌های solid میانی، درجه‌های آزادی خارج از صفحه به‌منظور دست‌یابی به تحلیل ایده‌آل دوبُعدی مقید شده و فقط اجازه‌ی حرکت در راستای انتقال بار داشته‌اند. لازم به توضیح است بارگذاری به گره‌ی فوقانی المان تیر اختصاص داده شده است. همچنین در رابطه با درنظرگرفتن خواص غیرخطی مصالح از اثر باشینگر[2] در تعریف خصوصیات غیرارتجاعی مصالح استفاده شده است. با توجه به بار یکنواخت وارده‌ی دیوار، که از جنس جابجایی و به صورت جابجایی بوده است، نیروی متناظر با هر جابجایی وارد شده است، که درنقطه‌ی فوقانی دیوار خوانش می‌شود، به‌دست آمده است؛ به‌طوری که با داده‌های به‌دست‌آمده، منحنی ظرفیت ترسیم و با منحنی‌های منتشرشده در نوشتار حاضر مقایسه شده است. مقایسه‌ی نمودار ظرفیت باربری– جابجایی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج ملاحظه می‌شود که در حالت دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه با مدل آزمایشگاهی، ۴/۵٪ اختلاف داشته است، که این مقدار برای دیوار با زاویه‌ی ۴۵ درجه به ۴/۷٪ رسیده است.

۳. مدل‌سازی

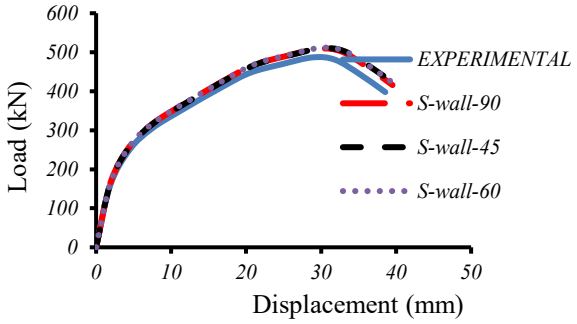
جزئیات هندسی مقاطع و دیوار براساس مدل راستی‌آزمایی رانجیانت و همکاران (۲۰۰۹)،[۱] در شکل ۴ مشاهده می‌شود. لازم به توضیح است که ضخامت دیوار مطالعه‌شده، ۲۰ سانتی‌متر بوده است. در پژوهش حاضر، بتن با استفاده از مدل Concrete damage plasticity مدل شده است، که یک مدل پیوسته بر پایه‌ی حالت خمیری و معیار آسیب برای بتن است. در جدول ۱، مشخصات مکانیکی بتن در نظر گرفته‌شده ارائه شده است.در شکل‌های ۵ و ۶، مشخصات فشاری بتن و مشخصات تنش ترک‌خوردگی بتن اختصاص داده‌شده به آباکوس



شکل ۱. شماتیک مدل LW- ۲ در نوشتار راونجیانت و همکاران (۲۰۰۹) [۱].



شکل ۲. شماتیک مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس.



شکل ۳. مقایسه‌ی نمودار ظرفیت باربری- جابجایی در مدل LW- ۲ و مدل‌های با زوایای مختلف آرماتور.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی بتن در نظر گرفته‌شده.

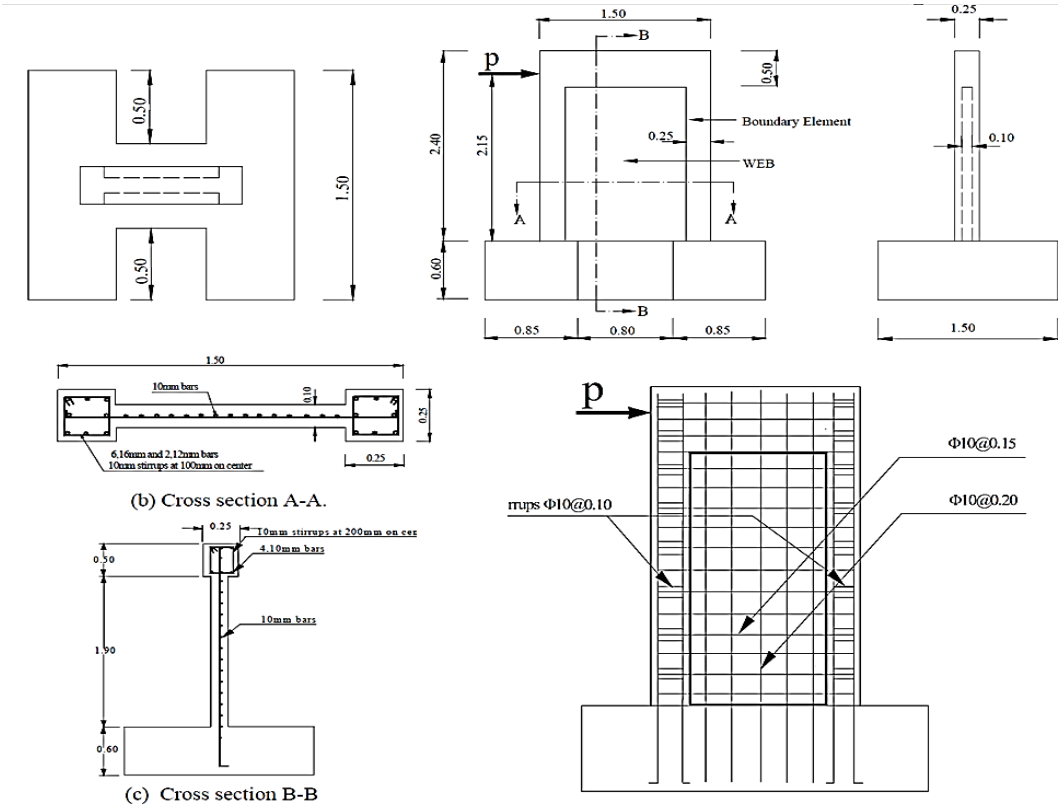
$(Kg/m^3)\ \rho$	v	Modulus Young's (Pa)
2450	0.2	23500000000

[1] Ghaseminia

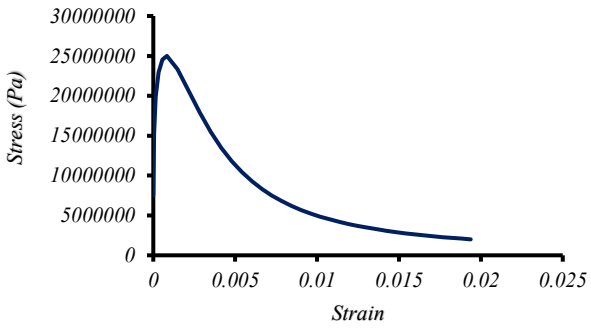
[2] Bauschinger Effect

مشاهده می‌شود. همچنین، در جدول ۲، مشخصات مصالح میلگردهای معرفی‌شده به نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است.

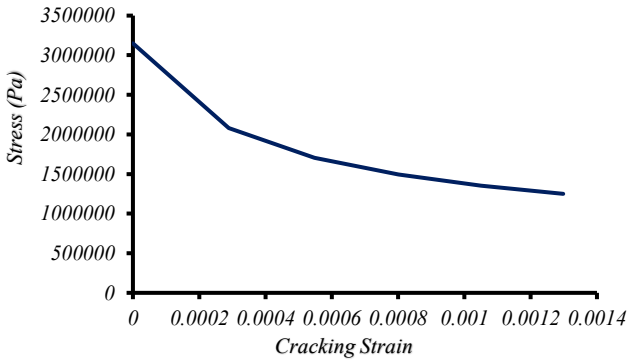
همچنین، در شکل ۷، شماتیک دیوارهای مطالعه‌شده مشاهده می‌شود. در جدول ۳، نیز مدل‌های مطالعه‌شده ارائه شده‌اند.



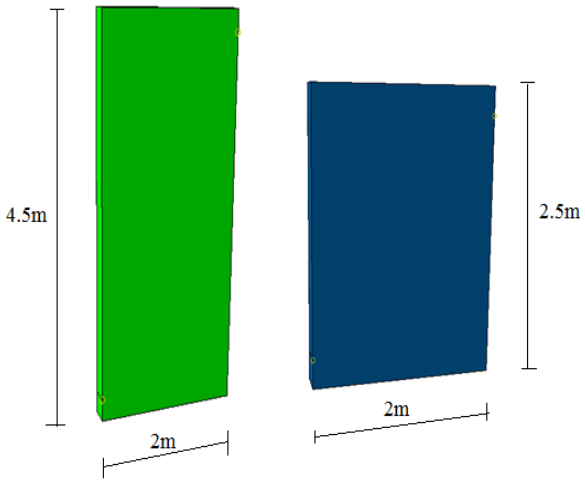
شکل ۴. جزئیات هندسی و آرماتورگذاری برای دیوار در نظر گرفته‌شده [۱].



شکل ۵. مشخصات فشاری بتن اختصاص داده‌شده به آباکوس.



شکل ۶. مشخصات تنش ترک‌خوردگی بتن اختصاص داده‌شده به آباکوس.



شکل ۷. شماتیک دیوارهای مطالعه‌شده.

جدول ۲. مشخصات مصالح میلگردهای معرفی‌شده به آباکوس.

Fu (Kg/cm^2)	Fy (Kg/cm^2)	v	ρ (Kg/m^3)	Young's Modulus (Kg/cm^2)
5640	3600	0.3	7500	2060000

جدول ۳. مشخصات مصالح میلگردهای معرفی‌شده به آباکوس.

Reinforcing armature	The angle of longitudinal reinforcement	The angle of transverse reinforcement	Wall height	Model name
	165	15	2.5	S-wall-15
	150	30	2.5	S-wall-30
	135	45	2.5	S-wall-45
	125	55	2.5	S-wall-55
	120	60	2.5	S-wall-60
	115	75	2.5	S-wall-75
	90	0	2.5	S-wall-90
Two Diagonal reinforcement	90	0	2.5	S-wall-90-D
Two Diagonal reinforcemen	135	45	2.5	S-wall-D
	165	15	4.5	T-wall-15
	150	30	4.5	T-wall-30
	135	45	4.5	T-wall-45
	125	55	4.5	T-wall-55
	120	60	4.5	T-wall-60
	115	75	4.5	T-wall-75
	90	0	4.5	T-wall-90
Two Diagonal reinforcemen	90	0	4.5	T-wall-90-D
Two Diagonal reinforcemen	135	45	4.5	T-wall-D

در پژوهش حاضر، برای تحلیل مدل‌های دیوار برشی تحت بار زلزله از تحلیل دینامیکی غیرخطی dynamic explicit استفاده شده است. تحلیل دینامیکی به‌صورت صریح مخصوص محاسبات مدل‌های بزرگ با زمان‌های پاسخ دینامیکی کوتاه و برای فرایندها یا مدل‌هایی با ناپیوستگی‌های به‌شدت زیاد است. همچنین، تحلیل مذکور امکان تعریف شرایط تماسی عمومی و استفاده از تئوری تغییرشکل‌های بزرگ را فراهم می‌سازد. در مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای اندرکنش آرماتورها و پوشش بتنی از قید Embedded region استفاده شده است، که به کاربر این امکان را می‌دهد که ناحیه‌ای را به‌عنوان میزبان و ناحیه‌ای را به‌عنوان مدفون تعریف کند؛ که در آن، ناحیه‌ی مدفون در کل یا ناحیه‌ای از مدل قرار دارد. از قید Embedded region برای مدل‌کردن سازه‌های بتن‌آرمه با جزئیات زیاد نیز استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، از ۷ رکورد زلزله از مناطق مختلف دنیا استفاده شده است، که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. رکودهای زلزله‌ی استفاده‌شده از سایت PEER دانلود شده‌اند. برای مقیاس‌سازی رکوردهای زلزله در پژوهش حاضر از نرم‌افزار سایسموماچ[1] استفاده شده است. نرم‌افزار سایسموماچ، یکی از مجموعه نرم‌افزارهای کمپانی سایسموسافت[2] است. نرم‌افزار سایسموماچ برای این استفاده می‌شود که رکورد دریافتی را با طیف آیین‌نامه همسو سازد. البته باید به این نکته توجه داشت که برنامه سایسموماچ با رکوردهای دریافتی از سایت PEER مطابقت دارد. در پژوهش حاضر، رکوردهای زلزله براساس طیف خاک تیپ II آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ مقیاس‌سازی شده است. پس از واردکردن رکوردهای زلزله براساس طیف خاک II تعریف‌شده در نرم‌افزار، کار مقیاس‌سازی رکوردها توسط نرم‌افزار انجام می‌شود و می‌توان از رکوردهای اصلاح‌شده در نرم‌افزار آباکوس استفاده کرد. در ادامه، رکوردهای زلزله‌ی اصلاح‌شده در نرم‌افزار از طریق بار تابع زمانی amplitude از نوع Tabular به دیوار اعمال شده است. همچنین

[1] SeismoMatch

[2] SeismoSoft

جدول ۴. مدل‌های مطالعه‌شده.

Name Earthquake	Earthquake Station	Year of events	Earthquake magnitude on the Richter scale	Velocity (m/s)
"Loma Prieta"	"Corralitos"	1998	6.93	462.2
"Northridge-01"	"Pacoima Kagel Canyon"	1994	6.69	508
"Kobe_ Japan"	"Nishi-Akashi"	1995	6.9	609
"Duzce_ Turkey"	"Lamont 1058"	1999	7.14	529.1
"San Simeon_ CA"	"Templeton - 1-story Hospital"	2003	6.52	410.6
"Bam_ Iran"	"Bam"	2003	6.6	487.4
"Montenegro_ Yugoslavia"	"Ulcinj - Hotel Albatros"	1979	7.1	410.3

برای آنالیز مدل‌های پوش‌آور از تحلیل static riks، که یکی از مراحل قابل انتخاب در آباکوس برای تحلیل مسائل استاتیکی است، استفاده شده است. در مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای اندرکنش آرماتورها و پوشش بتنی از قید Embedded region استفاده شده است؛ که به کاربر این امکان را می‌دهد که ناحیه‌ای را به‌عنوان میزبان و ناحیه‌ای را به‌عنوان مدفون تعریف کند؛ که در آن، ناحیه‌ی مدفون در کل یا ناحیه‌ای از مدل قرار دارد. قید Embedded region برای مدل‌کردن سازه‌های بتن‌آرمه با جزئیات زیاد استفاده می‌شود. همچنین در قسمت اعمال بار پوش‌آور، که شامل بارهای معادل ۱ و ۲ درصد دریفت ارتفاع دیوار است، از قیدهای Reference point و Coupling استفاده شده است. همچنین پای دیوار به‌صورت تکیه‌گاه گیردار در نظر گرفته شده است.

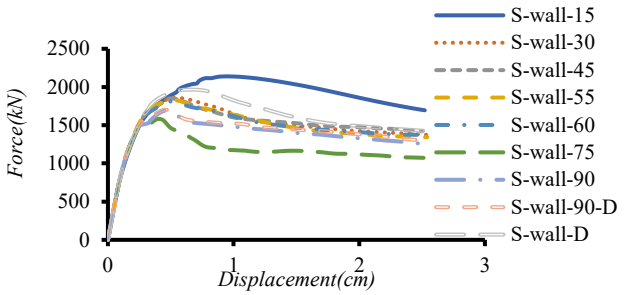
۴. نتایج تحلیل

در شکل ۸، نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار نیرو مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه و کمترین مقدار نیرو مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه است.

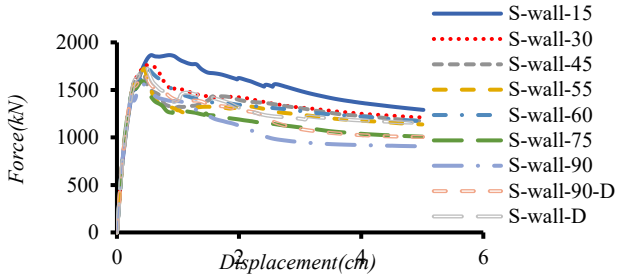
در شکل ۹، نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار نیرو مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه و کمترین مقدار نیرو مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه است.

در شکل ۱۰، نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار نیرو مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه و کمترین مقدار نیرو مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه است.

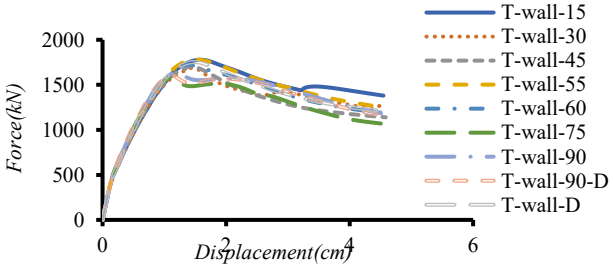
در شکل ۱۱، نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با



شکل ۸. نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.



شکل ۹. نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



شکل ۱۰. نمودار نیرو- تغییر مکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.

آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار نیرو مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه و کمترین مقدار نیرو مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه است.

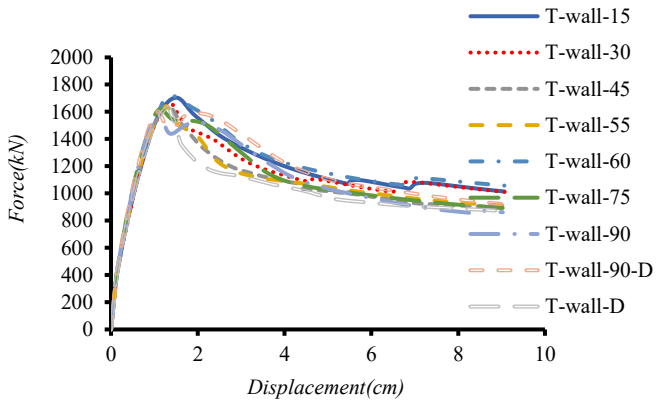
در شکل ۱۲، نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۳۰ درجه استد.

در شکل ۱۳، نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۶۰ درجه است.

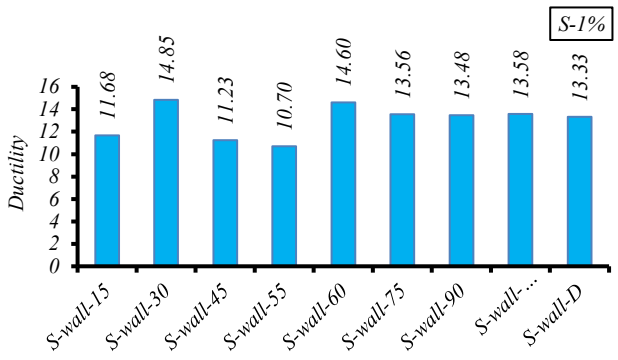
در شکل ۱۴، نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه است.

همچنین در شکل ۱۵، نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه است.

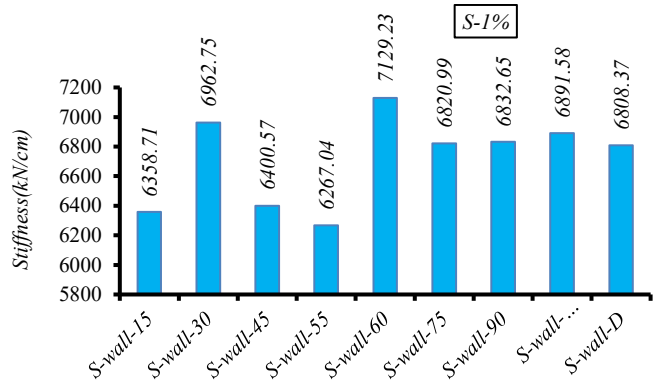
در شکل ۱۶، نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتو ر تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور قطری و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه است. در شکل ۱۷، نیز نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه است.



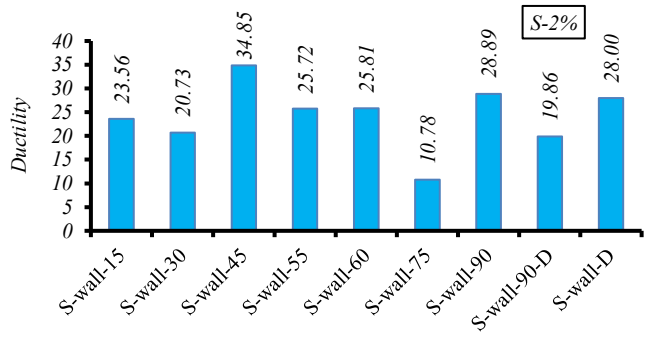
شکل ۱۱. نمودار نیرو- تغییرمکان برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



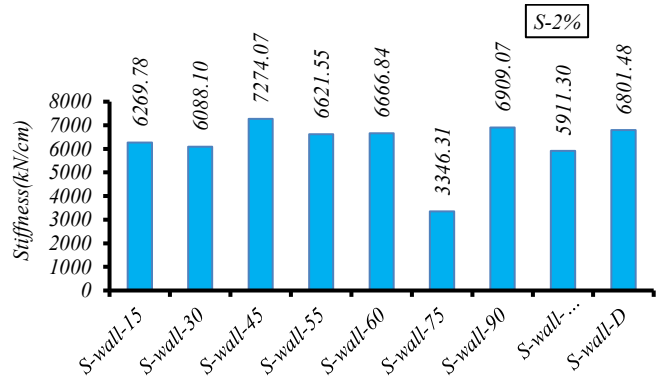
شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی شکل پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.



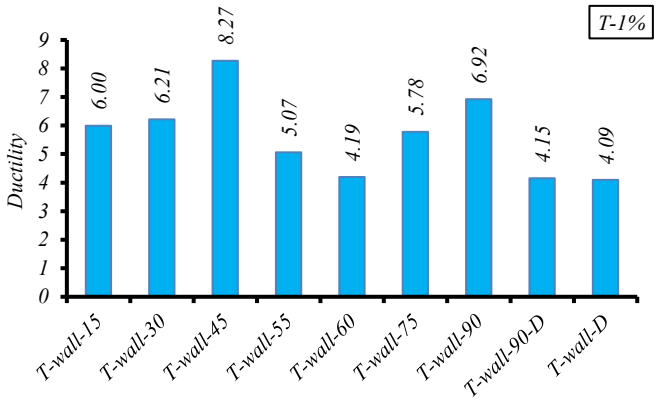
شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



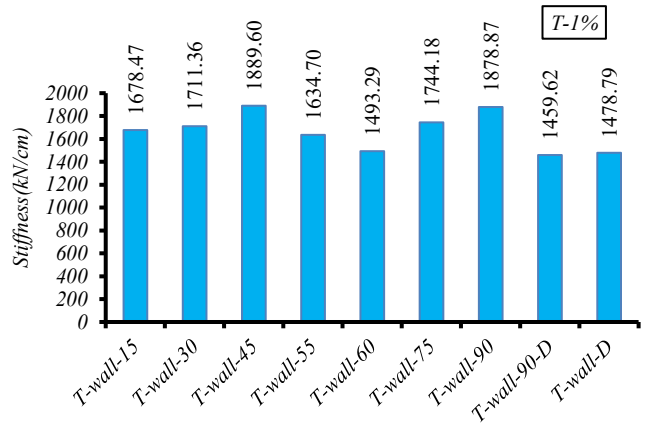
شکل ۱۵. نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.

در شکل ۱۸، نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری بوده است. در شکل ۱۹، نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری است. در شکل ۲۰، نمودار مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، کمترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۶۰ درجه است.

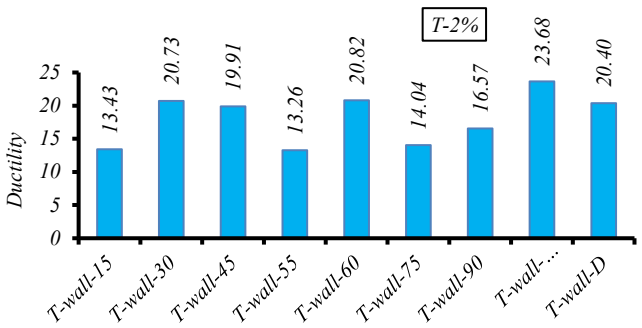
در شکل ۲۱، پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش زاویه‌ی آرماتورها، مقدار تغییرمکان دیوار کاهش یافته است. در شکل ۲۲، پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی کوبه‌ی ژاپن برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش زاویه‌ی آرماتورها، مقدار تغییرمکان دیوار کاهش یافته است.



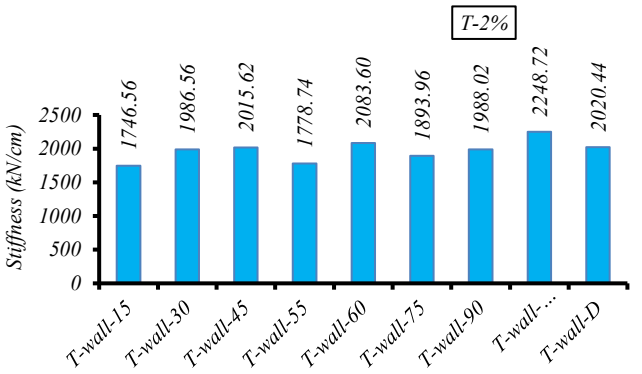
شکل ۱۶. نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.



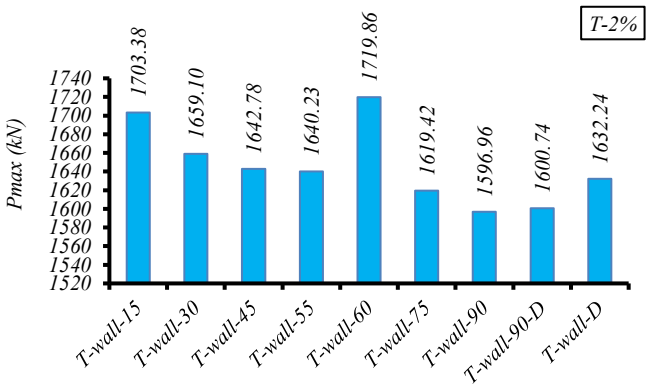
شکل ۱۷. نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪.



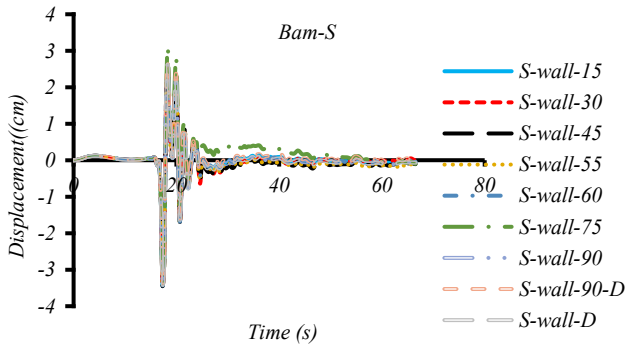
شکل ۱۸. نمودار مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



شکل ۱۹. نمودار مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



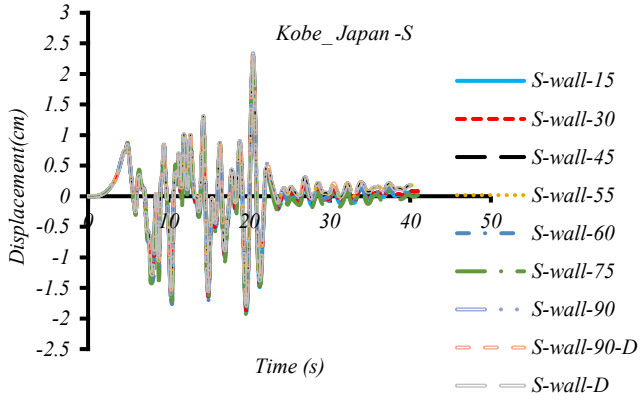
شکل ۲۰. نمودار مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪.



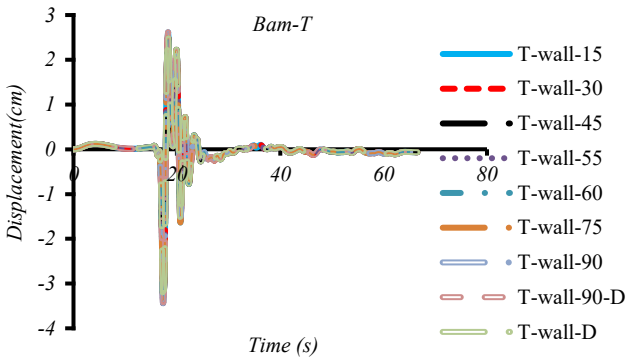
شکل ۲۱. پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور.

در شکل ۲۳، پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش زاویه‌ی آرماتورها، مقدار تغییرمکان دیوار کاهش پیدا کرده است. در شکل ۲۴، پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی کوبه‌ی ژاپن برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش زاویه‌ی آرماتورها مقدار تغییرمکان دیوار کاهش پیدا کرده است.

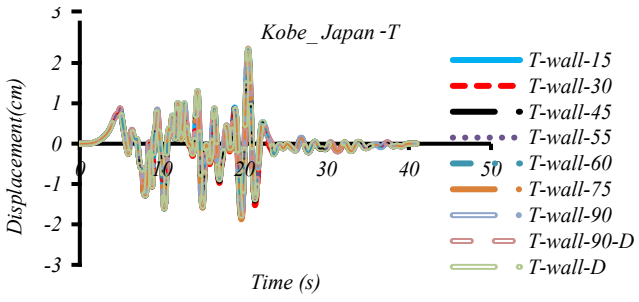
در شکل ۲۵، کانتور تنش برای دیوار کوتاه با زاویه‌ی آرماتور ۹۰ درجه تحت رکورد زلزله‌ی بم مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقادیر تنش در گوشه‌های دیوار اتفاق افتاده است.



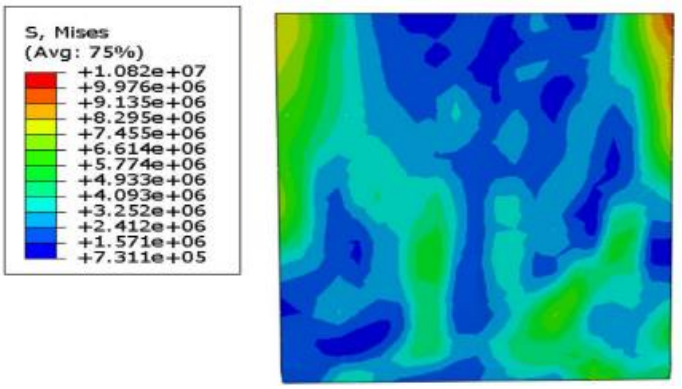
شکل ۲۲. پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی کوبه برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور.



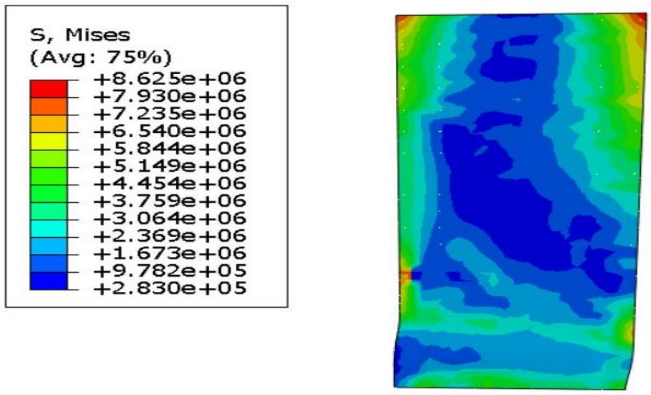
شکل ۲۳. پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور.



شکل۲۴. پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی کوبه‌ی ژاپن برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور.



شکل ۲۵. کانتور تنش برای مدل S-wall-D تحت رکورد زلزله‌ی بم.



شکل ۲۶. کانتور تنش برای مدل T-wall-D تحت رکورد زلزله‌ی بم.

در شکل ۲۶، کانتور تنش برای دیوارهای بلند با زاویه‌ی آرماتور ۹۰ درجه تحت رکورد زلزله‌ی بم مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقادیر تنش در گوشه و کناره‌های دیوار اتفاق افتاده است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، با هدف بررسی چینش آرماتورهای قطری در دیوارهای برشی بتنی، به شبیه‌سازی اجزاء محدود بر پایه‌ی تئوری‌های المان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- در حالت مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه به مقدار ۱۰/۷ و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۳۰ درجه به مقدار ۱۴/۸۵ بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۳۸/۷۸٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ ، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه به مقدار ۶۲۶۷/۰۴ کیلونیوتن بر سانتی‌متر و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۶۰ درجه به مقدار ۷۱۲۹/۲۳ کیلونیوتن بر سانتی‌متر بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۱۳/۷۵٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪، کمترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه به مقدار ۱۵۸۳/۱۴

کیلونیوتن و بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه به مقدار ۲۱۳۸/۹۵ کیلونیوتن بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۳۵/۱۰٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه به مقدار ۱۰/۷۸ و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه به مقدار ۳۴/۸۵ بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۲۲۳/۲۸٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪ ، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه به مقدار ۳۳۴۶/۳۱ کیلونیوتن بر سانتی‌متر و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه به مقدار ۷۲۷۴/۰۷ کیلونیوتن بر سانتی‌متر بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۱۱۷/۳۷٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪، کمترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه به مقدار ۱۵۶۷/۱۸ کیلونیوتن و بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه به مقدار ۱۸۶۶/۰۹ کیلونیوتن بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۱۹/۰۷٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ ، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور قطری به مقدار ۴/۰۹۷ و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه به مقدار ۸/۲۷ است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۱۰۲/۲٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪ ، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری به مقدار ۱۴۵۹/۶۲ کیلونیوتن بر سانتی‌متر و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۴۵ درجه به مقدار ۱۸۸۹/۶۰ کیلونیوتن بر سانتی‌متر بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۲۹/۴۵٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۱٪، کمترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۷۵ درجه به مقدار ۱۵۷۲/۶۷ کیلونیوتن و بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه به مقدار ۱۷۸۲/۶۵ کیلونیوتن بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۱۳/۳۵٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی شکل‌پذیری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪، کمترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ به مقدار ۱۳/۲۶ و بیشترین مقدار شکل‌پذیری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری به مقدار ۲۳/۶۸ بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۷۸/۵۸٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی سختی برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪، کمترین مقدار سختی مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۱۵ درجه و آرماتور قطری به مقدار ۱۷۴۶/۵۶ کیلونیوتن بر سانتی‌متر و بیشترین مقدار سختی مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه و آرماتور قطری به مقدار ۲۲۴۸/۷۲ کیلونیوتن بر سانتی‌متر بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۲۸/۷۵٪ افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی ظرفیت باربری برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش مختلف آرماتور تحت بار دریفت ۲٪، کمترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به مدل دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۹۰ درجه به مقدار ۱۵۹۶/۹۶ کیلونیوتن و بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به دیوار با آرماتور با زاویه‌ی ۵۵ درجه به مقدار ۱۷۱۹/۸۶ کیلونیوتن بوده است، که نسبت به کمترین میزان، به مقدار ۷/۶۹٪ افزایش یافته است.

- در پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف برای مدل‌های دیوار برشی بتنی کوتاه با آرایش مختلف آرماتور تحت نیروی زلزله، پاسخ جابجایی با درنظرگرفتن آرایش‌های مختلف آرماتور نزدیک به هم بوده و در حالت‌های مختلف، اختلاف اندکی با یکدیگر داشته‌اند.

- در پاسخ جابجایی- زمان تحت شتاب‌نگاشت های مختلف برای مدل‌های دیوار برشی بتنی بلند با آرایش‌های مختلف آرماتور تحت نیروی زلزله، پاسخ جابجایی با درنظرگرفتن آرایش‌های مختلف آرماتور نزدیک به هم بوده و در حالت‌های مختلف؛ اختلاف اندکی با یکدیگر داشته و نسبت به دیوار برشی کوتاه، مقدار پاسخ جابجایی در دیوار بلند افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی تنش برای دیوارهای کوتاه با زاویه‌های آرماتور ۱۵، ۴۵، و ۹۰ درجه تحت بار دریفت ۱٪ ملاحظه شده است که با افزایش زاویه‌ی آرماتور، مقدار تنش در دیوار، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. در حالت کانتور تنش برای دیوارهای کوتاه با زاویه‌های آرماتور ۱۵، ۴۵، و ۹۰ درجه تحت بار دریفت ۲٪ ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی آرماتور، مقدار تنش در دیوار افزایش یافته است.

- در حالت مقایسه‌ی تنش برای دیوارهای بلند با زاویه‌های آرماتور ۱۵، ۴۵، و ۹۰ درجه تحت بار دریفت ۲٪ ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی آرماتور، مقدار تنش در دیوار، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. در حالت کانتور تنش برای دیوارهای بلند با زاویه‌های آرماتور ۱۵، ۴۵، و ۹۰ درجه تحت بار دریفت ۲٪ ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی آرماتور، مقدار تنش در دیوار افزایش یافته است.

References- منابع

1. Raongjant, W. and Jing, M., 2009. The effects of diagonal web reinforcement on cyclic behaviour of lightweight structural walls. *Structural Concrete*, *10*(1), pp. 35-43. doi.org/10.1680/stco.2009.10.1.35.
2. Nguyen, N.H. and Whittaker, A.S., 2017. Numerical modelling of steel-plate concrete composite shear walls. Engineering structures, *150*, pp. 1-11. doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.030.
3. Rezapour, M. and Ghassemieh, M., 2018. Macroscopic modelling of coupled concrete shear wall. *Engineering Structures*, *169*, pp. 37-54. doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.088.
4. Soares, M.M., Palermo, D. and Cortés-Puentes, W.L., 2021. Modelling of mid-rise concrete shear walls reinforced with superelastic shape memory alloys: Nonlinear analysis. *Engineering Structures*, *247*, 113049. doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113049.
5. Zhang, J., Zhang, M., Liu, X., Tao, X. and Cao, W., 2022. Experiment and numerical analysis on seismic performance of resilient shear walls using high strength recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, *52*, 104477. doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104477**.**
6. Miao, L., Jin, L., Li, D., Du, X. and Zhang, B., 2022. Effect of shear-span ratio and vertical reinforcement ratio on the failure of geometrical-similar RC shear walls. *Engineering Failure Analysis*, *139*, 106407. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106407.
7. Cheng, X., Ji, X., Xu, Z., Gao, S. and Xu, L., 2022. Seismic behavior of slender prestressed reinforced concrete short-leg walls. *Journal of Building Engineering*, *56*, 104710. doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104710.
8. Cheng, Y., He, H., Sun, H. and Cheng, S., 2023. Experimental study and mechanism analysis of out-of-plane seismic performance of reinforced concrete shear walls. *Journal of Building Engineering*, *80*, 108058. doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108058.
9. Ghaseminia, S.M., Zahra, T., Thambiratnam, D.P. and Thamboo, J., 2023, October. Response of RC shear walls with single and double layers of reinforcements subjected to in-plane cyclic loading. In Structures. *56*, 105005. Elsevier. doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105005.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.84-97

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Experimental Study of Seismic Behavior and Modification of the Failure Region of Mechanical Bar Splices

Mohamad Reza Shokrzadeh[1] and Fariborz Nateghi-Alahi*[2]

[1]Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
* corresponding author: (nateghi@iiees.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 January 2024

Revised: 2 March 2024

Accepted:20 April 2024

Keywords:

Mechanical threaded splice,
cold rolling,
rotating friction welding,
plastic hinges.

Abstract

The problem of overcrowding at the junction of the rebars is very significant, particularly for seismic details. Due to bar length limits, splicing of reinforcing bars is unavoidable in reinforced concrete (RC) structures and may alter the overall behavior of structures under static and dynamic stresses. Mechanical couplers can thus offer an appealing solution that eliminates the disadvantages of traditional reinforcement splicing. In the mechanical splice method, couplers are rigid components that are used to join reinforcement bars together. According to existing research, the failure mechanism of a thread splice under tensile and cyclic loads has not been sufficiently investigated. In addition, the use of the thread splice needs further investigation in the plastic hinge areas of ductile members in seismic areas. In this study, two types of patches are introduced by modifying the method of making a threaded splice and combining it with rotary friction welding. The goal is to modify the coupler's failure area with a threaded bar and use it in the plastic hinge areas of ductile members in seismic areas. The splice area in the suggested method is large. Two techniques are used to increase the splice area: cold rolling and rotating friction welding. In total, 96 samples were tested (three repeated samples of each type). Threaded couplers (TC), oversized-threaded couplers (OTC), rotary friction welding splices with threaded couplers (RFWTC), and non-spliced (NS) reference specimens were tested with and without concrete in uniaxial tensile and cyclic tests. Evaluations were conducted on the sensitivity to bar diameter, bar strength, ductility, energy absorption, and failure mode performance. The RFWTC and OTC exhibited superior performance in terms of strength, ductility, energy absorption, and failure mode, making them appropriate for use in high seismic zones. The TC is also suitable for use in zones with low to medium seismic activity. Furthermore, the anticipated model is enough for estimating the threaded couplers' ultimate tensile strength.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:
Shokrzadeh, M.R. and Nateghi-Alahi, F. 2025. Experimental Study of Seismic Behavior and Modification of the Failure Region of Mechanical Bar Splices, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.84-97.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.63880.3292

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها

محمدرضا شکرزاده [۱] و فریبرز ناطقی الهی [۲*]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲] پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (nateghi@iiees.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

واژگان کلیدی:

وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای،

نورد سرد،

جوش اصطکاکی دورانی،

مفصل خمیری.

چکیده

در نوشتار حاضر، با اصلاح روش ساخت وصله‌ی رزوه‌ای و ترکیب آن با جوش اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شده است. هدف، اصلاح ناحیه‌ی شکست کوپلر با میلگرد رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بوده است. ناحیه‌ی رزوه در روش پیشنهادی بزرگ‌تر شده و برای بزرگ‌ترکردن آن از دو روش نورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دوار استفاده شده است. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه‌ی تکرار از هر نوع) آزمایش شده‌اند. وصله‌های مکانیکی: رزوه‌ای استاندارد (TC)، با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC)، و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) تحت آزمایش‌های کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفته و حساسیت آن‌ها به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی، و عملکرد حالت شکست ارزیابی شده است. وصله‌های RFWTC و OTC بهترین عملکرد را داشتند و برای استفاده در مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد مناسب هستند. علاوه‌بر این، TC برای استفاده در مناطق لرزه‌خیز کم تا متوسط مناسب است.

۱. مقدمه

استفاده از شیوه‌های جدید برای افزایش کیفیت سازه، کاهش هزینه‌های تولید در صنعت ساختمان، علاوه‌بر یک نیاز، یک ضرورت است. وصله‌کردن میلگردها در سازه‌های بتن مسلح، یکی از پرمخاطره‌ترین موارد موجود در اجراست. زیرا رعایت یا عدم رعایت اصول آن، تأثیر زیادی در عملکرد سازه خواهد داشت. عملکرد یکپارچه‌ی وصله‌های مکانیکی به‌شدت در رفتار سازه‌های بتن مسلح تأثیرگذار است. نداشتن رفتار یکپارچه در وصله، باعث ضعف عضو بتن مسلح تحت نیروهای اعمالی به آن می‌شود.[۱-۳] از نظر آیین‌نامه‌ای دو نوع وصله تعریف شده است: وصله‌ی نوع یک، که در نواحی بحرانی اعضاء سازه‌های بتن مسلح مجاز نیست. وصله‌ی نوع دو، که با توجه به عملکرد یکپارچه‌ای که دارد، در هر موقعیتی از سازه قابل‌اجراست.[۴] روش‌های وصله، که تاکنون معرفی و بررسی شده‌اند، را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: پوششی، جوشی، و مکانیکی، که هر کدام مزایا و معایبی دارند.[۵-۸]

مهم‌ترین مشکلات وصله‌ی پوششی، گاه ایجاد تراکم زیاد میلگرد در یک ناحیه‌ی مشخص از عضو، عدم امکان استفاده از وصله‌ی پوششی برای میلگردهای بزرگ‌تر از قطر ۳۶ میلی‌متر، و نیز نیاز به میلگردهای انتظار بسیار بلند (گاه بلندتر از ۶ متر) در سازه‌ی بتنی برای اتصال به قطعه‌ی بعدی است. وصله‌های پوششی تحت نیروهای متناوب و چرخه‌ای در محدوده‌ی کشسان قابل اعتماد نیستند، که این بی‌اعتمادی در وصله‌های پوششی با میلگردهای با قطر بالا همچون میلگردهای با قطرهای ۲۵، ۲۸، ۳۲، و ۳۶ میلی‌متر به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.[۱] این در حالی است که میلگردهای مذکور، المان‌های اصلی سازه‌ی بتنی هستند و هرگونه شک و تردید در مورد کارآیی آن‌ها، نگرانی شدیدی را برای مهندسان و کاربران ایجاد می‌کند. در آیین‌نامه‌ی ۱۹-۳۱۸ ACI، استفاده از وصله‌های پوششی برای میلگردهای با قطر ۳۶ به بالا ممنوع شده است و همچنین استفاده از آن‌ها در میلگردهایی که در کشش قرار دارند، در محل اتصال و محل ایجاد مفصل خمیری مجاز نیست.[۹-۱۵]

قابلیت اعتماد در روش جوش سر به سر (فورجینگ) بسیار پایین است؛ زیرا در روش فورجینگ به‌علت دمای بالای قسمت فورج‌شده، امکان اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌های فیزیکی و مکانیکی نیست. همچنین در روش فورجینگ به‌علت دخالت عوامل متعدد در جوشکاری و همچنین بالابودن خطای انسانی، محیطی، و مخصوصاً خطای ماشین‌آلات استفاده‌شده، بهتر است از روش‌های جایگزین وصله‌ی میلگرد استفاده کرد. پس از وقوع زلزله‌ی کوبه در ژاپن، عملکرد نامطلوبی از میلگردهای وصله‌شده به روش فورجینگ مشاهده شده است؛ که علی‌رغم انجام جوش‌ها به دست جوشکارهای زبده‌ی ژاپنی و نظارت دقیق بر انجام آن‌ها و انجام آزمایش‌های کنترلی، نتایج حاصل از روش فورجینگ در مناطق زلزله‌خیز فاجعه‌بار بوده و به‌هیچ‌وجه قابل‌اطمینان نیست.[۱۶-۲۰]

استناد به این مقاله:

شکرزاده، محمدرضا و ناطق الهی، فریبرز، ۱۴۰۴. مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۸۴-۹۷.

https://doi.org/10.24200/j30.2024.63880.3292

شاپا الکترونیکی: ۴۷۷۶-۲۶۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

در روش وصله‌ی مکانیکی، کوپلرها اجزاء صلبی هستند، که برای اتصال میلگردها به یکدیگر استفاده می‌شوند. کوپلرها را می‌توان به‌طورکلی براساس نحوه‌ی اتصال ایجادشده و میزان تنش بین میلگردها و کوپلرها به ۵ نوع تقسیم کرد: پیچی، پینی، رزوه‌ای، دوغابی، و سرد پرس‌شده.[۲] تنش کششی در یک میلگرد با وصله‌ی مکانیکی، از یک میلگرد به میلگرد دیگر از طریق کوپلر و قطعات آن منتقل می‌شود.[۲۱-۲۳] نصب سریع، کاربرد سازگار با محیط‌زیست و عملکرد قابل‌قبول، همگی از مزایای استفاده از روش‌های وصله‌های مکانیکی هستند.[۳ و ۲۰]

رایج‌ترین نوع استفاده از وصله‌های مکانیکی، وصله‌ی رزوه‌ای است؛ که بزرگ‌ترین ضعف آن، شکست در محل رزوه است.[۲ و ۳]

وصله‌های مکانیکی مطابق استاندارد ACI ۳۱۸ بر دو نوع هستند: ۱) وصله‌ی مکانیکی باید در کشش و فشار دارای کمینه‌ی مقاومت برابر ۱/۲۵ برابر مقاومت تسلیم میلگرد باشند؛ ۲) وصله‌ی مکانیکی باید در کشش و فشار دارای کمینه‌ی دو مقدار ۱/۶ برابر مقاومت تسلیم یا برابر با ۰/۹۵ مقاومت نهایی میلگرد لحاظ شود. وصله‌های مکانیکی نوع اول نسبت به وصله‌های نوع دوم، محدودیت‌های بیشتری از نظر محل استفاده دارند و در منطقه با لرزه‌خیزی کم در هر کجای سازه می‌توانند استفاده شوند؛ ولی در مناطق لرزه‌خیز، استفاده از آن‌ها در نقاطی از سازه که انتظار رفتار غیرخطی از آن‌ها وجود دارد تا فاصله‌ی یک برابر عمق مقطع از محل تشکیل مفصل خمیری و یا در داخل گره‌ی اتصال مجاز نیست. وصله‌های نوع دوم، در هر جای سازه و در هر منطقه‌ی لرزه‌ای می‌توانند استفاده شوند.

۲. ضرورت انجام پژوهش

مطالعات انجام‌شده بر روی عملکرد وصله‌ی مکانیکی را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: (الف) شکلی (با و بدون غلاف بتن)، (ب) نحوه‌ی بار اعمال‌شده (چرخه‌ای یا یکنواخت)، و (ج) نرخ بارگذاری. به‌طورکلی، براساس نتایج آزمایش‌های وصله‌های مذکور، می‌توان گفت که رفتار تنش- کرنش میلگردهای متصل‌شده به‌صورت مکانیکی با میلگردهای یکپارچه‌شده متفاوت است، زیرا ظرفیت تغییرشکل میلگردهای متصل به‌صورت مکانیکی کمتر است. به‌عبارت دیگر، میلگردهای یکپارچه، بیشتر از میلگردهایی که به‌صورت مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند، کشیده می‌شوند. کشش ایجادشده در میلگرد باعث ایجاد نیروی برشی در مقطع میلگرد می‌شود و با توجه به اینکه در محل اتصال رزوه وجود دارد و خود ایجاد رزوه به روش سنتی (براده‌برداری یا رولینگ) باعث کم‌شدن مقطع میلگرد در محل رزوه می‌شود؛ که این امر سبب ایجاد ناحیه‌ای با سختی کمتر و مستعد شکست می‌شود. این تذکر لازم است که مطالعات صورت‌گرفته درخصوص ضعف شکست در رزوه در وصله‌ی مکانیکی پیچی بسیار محدود است و عمده‌ی مشکل اتصال‌های مذکور، شکست در محل رزوه است. روش‌های رایج برای ایجاد رزوه در وصله‌های رزوه‌ای مکانیکی به‌صورت براده‌برداری یا رولینگ از روی میلگرد است. به‌علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه، مقاومت آن کاهش می‌یابد و میلگرد در هنگام آزمایش رفت و برگشتی در ناحیه‌ی رزوه دچار شکست می‌شود. همچنین برای دست‌یابی به رفتار لرزه‌ای مناسب وصله‌ی مکانیکی نیاز به آزمایش‌های رفت و برگشتی در اعضاء بتن مسلح است؛ بنابراین، برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش وصله‌ی میلگرد، ارزیابی و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله در طول اعضاء بتن مسلح و روش اجرای آن، داشتن اطلاعات کافی و معتبر از عملکرد انواع روش‌های وصله‌ی میلگردها در اعضاء بتن مسلح و روشن‌شدن نوع وصله، انجام مطالعه‌ی حاضر ضروری است.[۱، ۲، ۱۱، و ۲۳-۲۹]

سازمان‌دهی نوشتار حاضر به این شرح است:
با اصلاح روش ساخت وصله‌ی مکانیکی و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شده است، که می‌توانند در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌خیزی بالا استفاده شوند. ناحیه‌ی وصله در روش پیشنهادی بزرگ‌تر شده است. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه‌ی تکرار از هر نوع) آزمایش شده‌اند. وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای استاندارد (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC)، و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) با قطر میلگرد ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر تحت آزمایش‌های کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفته‌اند و حساسیت آن‌ها به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی، و عملکرد حالت شکست ارزیابی شده است. توضیح کاملی در مورد معیارهای لرزه‌ای وصله‌ی میلگرد براساس استانداردهای مختلف طراحی نیز برای استفاده‌ی عملی در نوشتار حاضر ارائه شده است.

۳. معرفی نمونه‌ها و متغیرهای آزمایش

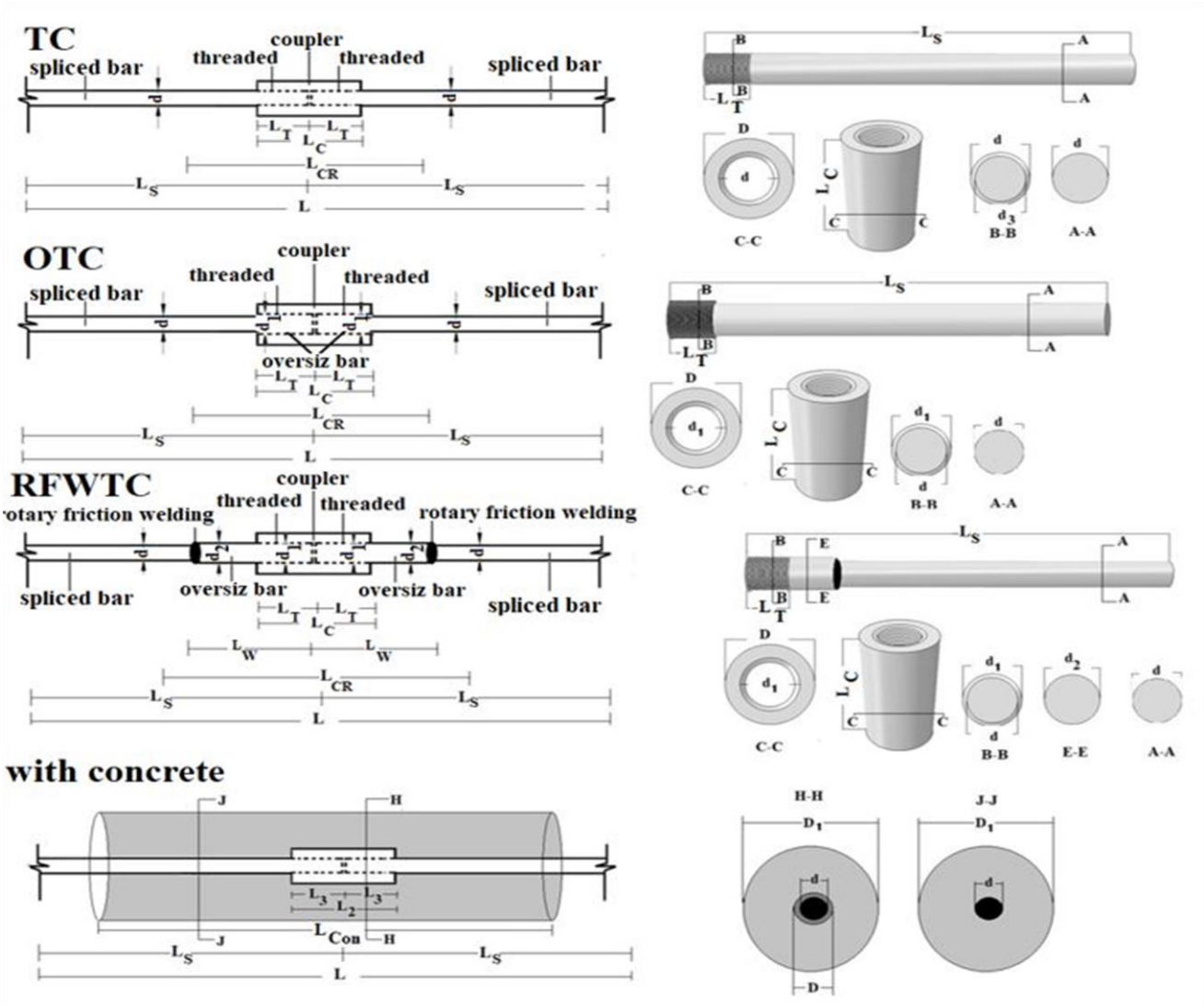
در تمامی نمونه‌ها، میلگرد، بتن مصرفی و ابعاد نمونه‌ها یکسان بوده است. متغیرهای بررسی‌شده در نوشتار حاضر، فقط نوع وصله‌های مکانیکی و قطر میلگرد در نمونه‌ها بوده است. فولاد استفاده‌شده در نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده از نوع AIII و به قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر و تولید کارخانه‌ی فولاد یزد بوده است. کوپلرهای استفاده‌شده، توسط شرکت سهند تولید شده‌اند. لازم به توضیح است که فولاد استفاده‌شده برای ساخت کوپلرهای مذکور مطابق با دستورالعمل DIN ۱.۱۱۹۱ بوده است. سختی وصله‌های مکانیکی بیشتر یا برابر با میلگردهای معمولی بوده است. پس استفاده از آن‌ها برای وصله‌ی آرماتورها به یکدیگر بلامانع است.[۲۰]

۱.۳. نمونه‌های وصله‌ی مکانیکی با و بدون غلاف بتنی

سه نوع وصله‌ی مکانیکی فشاری- کششی، یعنی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC)، و همچنین نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) ساخته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در هر نمونه، از میلگردهای با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. جزئیات نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده‌اند.

شناسه‌ی نمونه‌ها به سه قسمت تقسیم می‌شود: بخش اول، تعیین می‌کند که نمونه بدون غلاف بتن (A) است یا با غلاف بتن (C). بخش دوم، به نوع وصله‌ی مکانیکی اشاره دارد: بدون وصله‌ی مکانیکی (NS)، وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، و اتصال‌های جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای با (RFWTC). در بخش آخر، قطر میلگرد و همچنین پروتکل بارگذاری آزمایش مشخص شده است؛ که در آن، بارگذاری کششی با (M) و بارگذاری رفت و برگشتی با (C) نشان داده شده است.

شایان ذکر است که پروتکل بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه‌های بدون غلاف بتنی با (C_1) و برای نمونه‌های دارای غلاف بتنی با (C_2) مشخص شده است



شکل۱. جزئیات نمونه‌های TC، OTC، و RFWTC بدون غلاف بتن و با غلاف بتنی.

جدول ۱. جزئیات نمونه‌ها.*

Specimen	d_b	L	L_S	L_C	L_T	L_W	L_{Con}	d_1	d_2	d_3	D	D_1
Non-spliced (NS)	16	700	-	-	-	-	600	-	-	-	-	121
	20	700	-	-	-		600	-	-	-	-	151
Threaded couplers (TC)	16	700	350	42	21	-	600	16	-	2.5	23	121
	20	700	350	50	25	-	600	20	-	2.5	30	151
Oversize-threaded coupler (OTC)	16	700	350	46	23	-	600	18	18	2.5	28	121
	20	700	360	54	27	-	600	22	22	2.5	33	151
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	16	700	360	46	23	80	600	18	18	2.5	28	121
	20	700	360	54	27	100	600	22	22	2.5	33	151

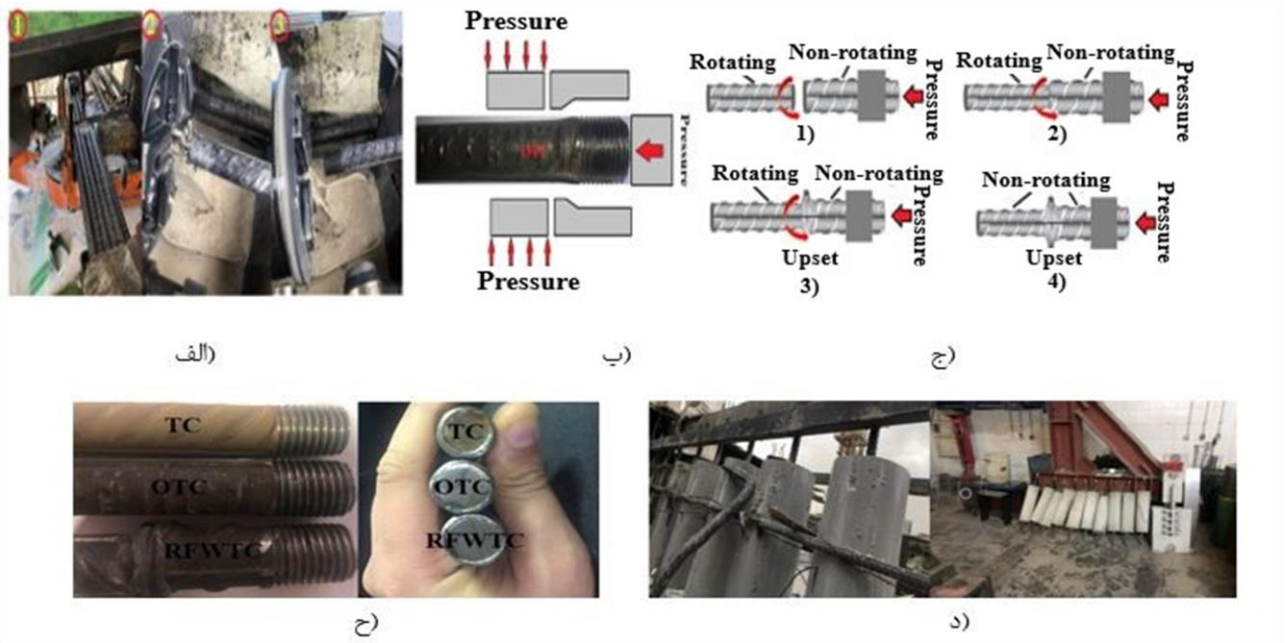
*ابعاد به میلیمتر است

(جدول ۲). در روش TC، ایجاد رزوه به‌صورت نورد سرد توسط دستگاه رولینگ رزوه‌زنی بر روی میلگردها انجام شده است. یک روش نورد سرد ویژه برای ساخت نمونه‌های OTC استفاده شده است. پس از برش توسط اره‌های دیسکی تحت فشار هیدرولیک قرار گرفته و ناحیه‌ی رزوه‌کاری با فشار افزایش یافته و سپس رزوه شده است (شکل ۲: الف، ب، و ج).

در روش جوشکاری اصطکاکی دوار، ۵ برابر قطر میلگرد (یک اندازه بزرگ‌تر) با جوش اصطکاکی دوار به میلگرد اصلی متصل و سپس رزوه شده است (شکل ۲- ج). طول نمونه‌های خارج غلاف بتنی ۷۰۰ میلی‌متر بوده است. نمونه‌های با غلاف بتنی با استفاده از یک قاب پلاستیکی عمودی (مطابق شکل ۲ - د) ایجاد شده‌اند. وضعیت عمودی قاب توسط پایه‌های چوبی حفظ شده است. طول

جدول ۲. شناسه‌ی نمونه‌ها.

	Without concrete tests		With concrete tests	
Sample	**Specimen ID**	**Test protocol**	**specimen**	**Test protocol**
Non-spliced (NS)	A-NS-16M	Monotonic	C-NS-16M	Monotonic
	A-NS-16C_1	Cyclic C_1	C-NS-16C_2	Cyclic C_2
	A-NS-20M	Monotonic	C-NS-20M	Monotonic
	A-NS-20C_1	Cyclic C_1	C-NS-20C_2	Cyclic C_2
Threaded couplers (TC)	A-TC-16M	Monotonic	C-TC-16M	Monotonic
	A-TC-16C_1	Cyclic C_1	C-TC-16C_2	Cyclic C_2
	A-TC-20M	Monotonic	C-TC-20M	Monotonic
	A-TC-20C_1	Cyclic C_1	C-TC-20C_2	Cyclic C_2
Oversize-threaded coupler (OTC)	A-OTC-16M	Monotonic	C-OTC-16M	Monotonic
	A-OTC-16C1	Cyclic C_1	C-OTC-16C_2	Cyclic C_2
	A-OTC-20M	Monotonic	C-OTC-20M	Monotonic
	A-OTC-20C_1	Cyclic C_1	C-OTC-20C_2	Cyclic C_2
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	A-RFWTC-16M	Monotonic	C-RFWTC-16M	Monotonic
	A-RFWTC-16C_1	Cyclic C_1	C-RFWTC-16C_2	Cyclic C_2
	A-RFWTC-20M	Monotonic	C-RFWTC-20M	Monotonic
	A-RFWTC-20C_1	Cyclic C_1	C-RFWTC-20C_2	Cyclic C_2



شکل ۲. فرایند ساخت نمونه‌های TC، OTC، و RFWTC: (الف) TC، (ب) OTC، (ج) RFWTC، (د) قطر نمونه‌ها، (ه) با غلاف بتنی.

نمونه‌های با غلاف بتنی ۷۰۰ میلی‌متر بوده است، که ۶۰۰ میلی‌متر از آن در داخل غلاف بتنی قرار گرفته است. قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته‌شده از میلگردهای db=۱۶ mm برابر با D_c=۱۲۱ mm و قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته‌شده از میلگردهای db=۲۰ mm، برابر با D_c=۱۵۱ mm بوده است (جدول ۱).

در مطالعه‌ی حاضر، از روش پیشنهادی بزرگ‌کردن ناحیه‌ی رزوه‌کاری (از طریق دو روش نورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دورانی) استفاده شده است.

۳.۱.۱. روش نورد سرد

روش اول: ایجاد رزوه به‌صورت براده‌برداری از روی میلگرد است. به‌علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه، مقاومت آن کاهش می‌یابد و میلگرد در هنگام آزمون کشش در ناحیه‌ی رزوه دچار شکست می‌شود.

روش دوم: رزوه به‌صورت نورد سرد انجام می‌شود. این عمل طی فرایند خاص، توسط دستگاه رولینگ رزوه‌زنی بر روی میلگردها انجام می‌شود. در روش حاضر، قرقره‌هایی با گام کوپلر طراحی شده‌اند، که فشار آن‌ها در حالت دوران، سبب ایجاد رزوه روی میلگرد می‌شود (شکل ۲ - الف).

روش سوم: در روش نورد سرد، پس از برش توسط اره‌های دیسکی، ناحیه‌ی رزوه‌کاری تحت فشار هیدرولیک قرار می‌گیرد و بزرگ‌تر می‌شود. اندازه‌ی جدید محل رزوه به نحوی افزایش می‌یابد که امکان اندازه‌ی رزوه‌کاری برای هر میلگرد را یک پله افزایش می‌دهد. به‌طور مثال، میلگرد ۲۰ پس از افزایش، رزوه‌ی ۲۲ خواهد داشت. لازم به توضیح است که فولاد استفاده‌شده برای ساخت کوپلرهای ذکرشده مطابق با دستورالعمل DIN ۱.۱۱۹۱ بوده است. طول رزوه در انتهای میلگرد برابر با ($d-P \leq L \leq d$) بوده است، که در آن، d قطر اسمی میلگرد و

p گام رزوه است. همچنین Dc قطر خارجی کوپلر و Lc طول کوپلر است؛ که در روش اخیر کاهش یافته است، که به دلیل افزایش قطر محل رزوه‌کاری بوده است (شکل ۲ - ب).

۲.۱.۳. روش جوشکاری اصطکاکی

جوشکاری اصطکاکی دورانی، نخستین فرایند از انواع جوش اصطکاکی است، که به‌صورت تجاری استفاده شده است. در فرایند اخیر، یکی از قطعات استوانه‌ای در همان راستای قطعه‌ی دیگر ثابت است، و دوران قطعه‌ی دیگر باعث می‌شود که مواد در فصل مشترک دو قطعه در اثر حرارت، نرم و سپس به یکدیگر جوش بخورند.[۳۰-۳۵] از ویژگی‌های فرایند جوشکاری اصطکاکی این است که علاوه‌بر فلزات همجنس، می‌تواند برای فلزات غیرهمجنس نیز استفاده شود. فرایند مذکور با به‌وجودآوردن گرما از دوران سریع و تحت‌فشار قراردادن دو قطعه نسبت به هم صورت می‌گیرد و ماده در حالت خمیری از محل فصل مشترک دو قطعه به بیرون خارج می‌شود. پس از توقف دوران و قبل از پایین‌آمدن دما، برای به‌دست‌آوردن یک اتصال جوش مستحکم، باید با نیروی زیادی دو قطعه به هم فشرده شوند. نتیجه‌ی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، اتصالی است که در فاز جامد شکل می‌گیرد و مشکلات اتصال‌های ذوبی را ندارد.[۳۴-۳۷]

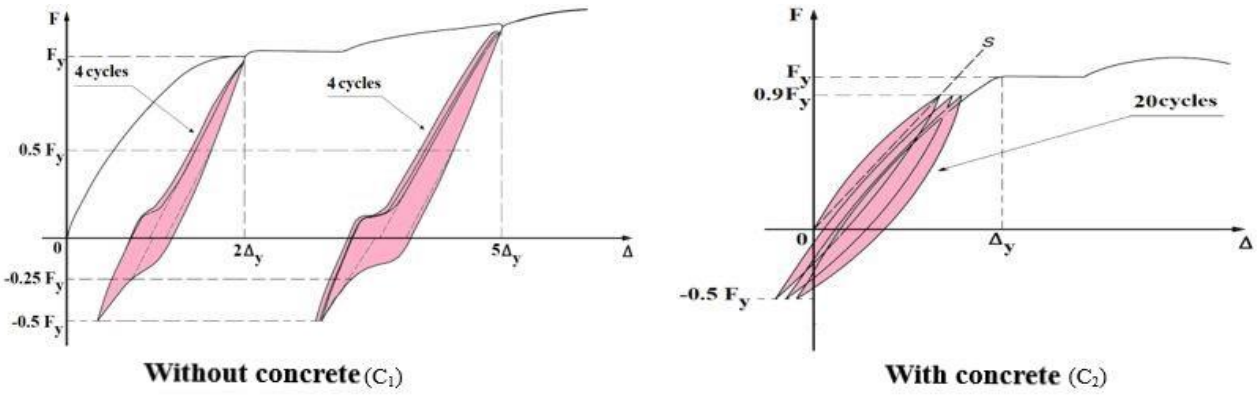
در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی، میلگرد (قطر بزرگ‌تر) رزوه می‌شود و توسط جوشکاری اصطکاکی دورانی به میلگرد اصلی متصل می‌شود (شکل ۲ - ح). وصله‌ی رزوه‌ای یا در کارخانه یا در محل پروژه انجام می‌گیرد. حدود پرت میلگردها در ساختمان‌های متعارف بین ۵ تا ۱۰ درصد است، که بیشتر بخاطر محدودیت استفاده از وصله در ناحیه‌ی مفصل خمیری و یا یک درمیان اجراکردن وصله و میلگرد یکپارچه است. در روش اخیر، فقط یک دستگاه جوش اصطکاکی دورانی اضافه می‌شود، که ابعاد و اندازه‌ی آن، مشابه به دستگاه رزوه‌زنی است. هزینه‌ی انجام هر جوش تقریباً با هزینه‌ی رزوه برابری می‌کند. روش پیشنهادی در کارگاه انجام‌پذیر است. برای میلگرد قطر بزرگ‌تر می‌توان از میلگردهای پرت کارگاهی استفاده کرد. هزینه‌های یک سایز کوپلر بزرگ‌تر و ۲ عدد جوش اصطکاکی دورانی در این روش به پروژه تحمیل می‌شود. ولی در مقابل، میلگردهای پرت کارگاهی به میزان کمینه می‌رسند و همچنین افزایش کمینه‌ی ۲۰ درصدی سرعت اجرا و از همه مهم‌تر افزایش عملکرد سازه در برابر زلزله و کاهش هزینه‌های جانبی از مزایای روش مذکور است.[۲۰]

۲.۳. دستورالعمل بارگذاری برای وصله‌ی میلگرد مکانیکی پیشنهادی

دستگاه استفاده‌شده در نوشتار حاضر ساخت کارخانه‌ی Roell Amsler از کشور آلمان بوده است و برای اعمال نیروهای کششی و فشاری به نمونه‌های گرد و تخت چه به‌صورت استاتیکی و چه به‌صورت دینامیکی به‌کار می‌رود. در حالت استاتیکی، بیشینه‌ی ۶۰۰ کیلونیوتن و در حالت دینامیکی، بیشینه‌ی ۵۰۰ کیلونیوتن نیرو اعمال می‌شود. دستگاه شامل دو فک است: فک بالایی نقش تکیه‌گاه را دارد و فک پایینی به‌عنوان محرک عمل می‌کند. با بالا و پایین بردن فک بالایی می‌توان فاصله‌ی بین دو فک را تغییر داد. علاوه‌بر این، فک پایین را می‌توان تا بیشینه‌ی ۳۰ سانتی‌متر جابجا کرد. کنترل‌کننده‌ی دیجیتالی ۹۶۰۰، واسطه‌ی میان دستگاه و کامپیوتر است؛ که علاوه‌بر کنترل دقیق عملکرد فک پایین، به دو صورت کنترل جابجایی و کنترل نیرو قادر است دو سیگنال جابجایی (Stroke) و نیرو (Load) را از خروجی مبدل‌های نصب‌شده بر Actuator نمونه‌برداری کند و به کامپیوتر انتقال دهد.[۳۸] وصله‌ی مکانیکی میلگرد تحت هر دو بارگذاری کششی تک‌محوری یکنواخت و چرخه‌ای تا شکست، سه نمونه در هر نوع بارگذاری آزمایش شدند. آزمایش کشش یکنواخت میلگرد یکپارچه و وصله‌ی میلگرد مکانیکی‌شده طبق استاندارد ASTM A۷۰۸ E،[۳۹] با کشیدن نمونه به سمت شکست با سرعت کرنش ثابت ۰/۰۱۹ (in./in./min)، که در محدوده‌ی ۰/۰۱۵±۰/۰۰۶ASTM اینچ بوده است، انجام شده است. استاندارد ASTM به دو سرعت قبل و بعد از تسلیم میلگرد اجازه می‌دهد تا سرعت آزمایش را افزایش دهند؛ بدین ترتیب که فقط سرعت کرنش قبل از تسلیم در مطالعه‌ی حاضر برای همه‌ی نمونه‌ها در طول کل آزمایش استفاده شده است، تا خطاهای ایجادشده در نتیجه‌ی آزمایش به میزان کمینه برسد. از آنجایی که طول و عملکرد مهاری یک وصله‌ی آزمایشی (شامل یک وصله‌ی مکانیکی و دو میلگرد متصل)، ممکن است کرنش تسلیم وصله را تغییر دهد، کرنش هدف برای تغییر سرعت را نمی‌توان قبل از آزمایش دقیقاً تعیین کرد و همچنین ممکن است برای انواع مختلف وصله‌های مکانیکی یکسان نباشد. درک رفتار چرخه‌ای وصله‌ی مکانیکی تحت بارگذاری زلزله برای اظهارنظر در مورد اینکه آیا یک کوپلر برای استفاده در نواحی مفصل خمیری اعضاء انعطاف‌پذیر مناسب است، ضروری است. برای بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های درون غلاف بتنی و خارج غلاف بتنی از پروتکل بارگذاری پیشنهادی در دستورالعمل ISO/DIS ۱۵۸۳۵ استفاده شده است (شکل ۳).[۴۰]

۴. مشاهده‌ها، و تجزیه‌وتحلیل نتایج آزمایش‌ها

در بخش حاضر، پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی و فراهم‌ساختن شرایط و مدت‌زمان لازم جهت عمل‌آوری آن‌ها، نمونه‌ها آزمایش و نتایج توسط دستگاه ثبت اطلاعات ثبت شده‌اند. بعد از به‌دست‌آوردن اطلاعات آزمایش، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها آغاز شد. بخش حاضر از مهم‌ترین مراحل کسب



شکل ۳. تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ای.[۴۰]

جدول ۳. نتایج آزمایش نمونه بدون غلاف بتنی*.

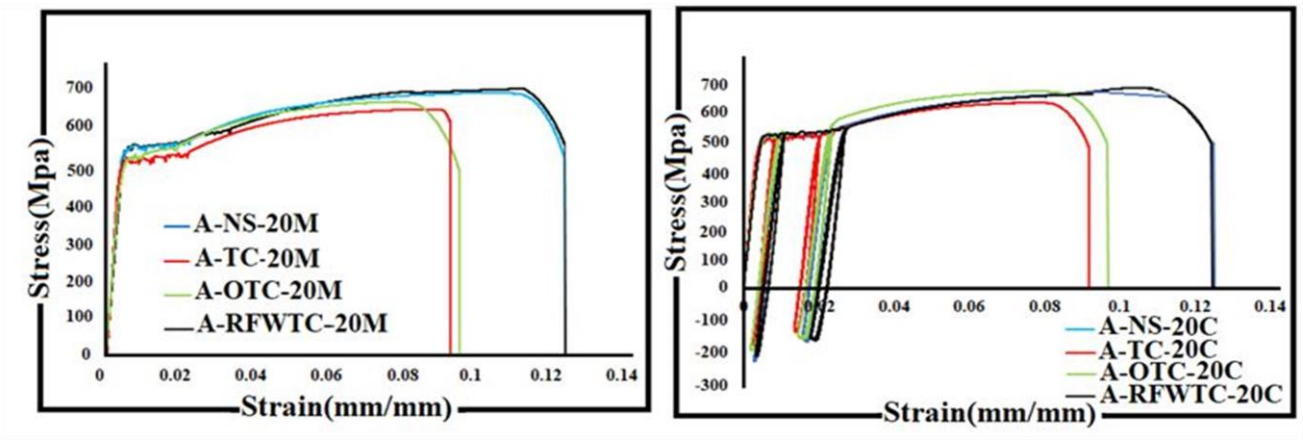
Specimen Average	F_y (kN)	F_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (mm/mm)	ε_u (mm/mm)	μ_ε ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)	μ ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$)	R_u (%)	Ry (%)
A-NS-16M	104±1.7^{ab}	126±2.1^{a}	520± 8.5^{a}	636± 9.9^{a}	0.0040± 0.00017^{a}	0.122± 0.004^{a}	1	30.40	-	-
A-TC-16M	103±2.5^{a}	122±4.9^{a}	530± 4.1^{a}	622± 25^{a}	0.0040± 0.00017^{a}	0.098± 0.003^{a}	0.80	24.50	119.60	101.53
A-OTC-16M	107±1.7^{ab}	127±1.2^{a}	519± 8.6^{a}	644± 6.6^{a}	0.0039± 0.00017^{a}	0.111± 0.003^{a}	0.91	28.46	125.57	99.81
A-RFWTC-16M	110±3.3^{b}	128±3.68^{a}	523± 10^{a}	653± 18^{a}	0.0044± 0.00018^{a}	0.124± 0.005^{a}	1.01	28.20	125.57	100.58
A-NS-16C$_1$	104±0.5^{df}	123±0.5^{de}	524± 8.5^{d}	628± 1.3^{de}	0.0044± 0.00005^{de}	0.132± 0.002^{de}	1	30.00	-	-
A-TC-16C$_1$	102±3.1^{d}	121±0.80^{e}	516± 6.4^{d}	618± 3.8^{e}	0.0038± 0.00020^{e}	0.090± 0.003^{e}	0.68	23.68	117.94	98.47
A-OTC-16C$_1$	109±2.5^{fg}	129±3.6^{d}	511± 6.7^{d}	658± 18.3^{d}	0.0039± 0.0001^{d}	0.097± 0.004^{d}	0.74	25.00	123.45	97.52
A-RFWTC-16C$_1$	112±3.7^{g}	129±3.6^{d}	524± 11^{d}	656± 17.8^{d}	0.0044± 0.00018^{d}	0.130± 0.006^{d}	0.99	29.60	125.20	100.00
A-NS-20M	162±4.5^{h}	195±2.1^{hi}	533± 16^{h}	691± 1.2^{h}	0.0044± 0.00045^{h}	0.124± 0.002^{h}	1	28.20	-	-
A-TC-20M	163±2.1^{h}	189±2.4^{h}	522± 4.5^{h}	660± 8.3^{i}	0.0040± 0.00005^{hi}	0.091± 0.002^{i}	0.73	22.70	123.80	97.94
A-OTC-20M	166±2.9^{h}	195±3.1^{hi}	530± 9.3^{h}	683± 11^{h}	0.0038± 0.00008^{i}	0.097± 0.002^{i}	1.01	25.52	128.14	99.50
A-RFWTC-20M	169±2.1^{h}	199±2.9^{i}	534± 12^{h}	697± 4.4^{h}	0.0044± 0.00008^{h}	0.124± 0.005^{h}	1	28.20	130.76	100.20
A-NS-20C$_1$	161±1.2^{j}	196±0.8^{j}	514± 5.4^{j}	686± 2.9^{jl}	0.0046± 0.00016^{j}	0.128± 0.003^{j}	1	27.80	-	-
A-TC-20C$_1$	160±2.1^{j}	187±2.1^{k}	510± 7.1^{j}	641± 3.6^{k}	0.0040± 0.0002^{k}	0.090± 0.003^{k}	0.70	22.5	124.50	99.22
A-OTC-20C$_1$	169±2.5^{k}	196±1.3^{j}	534± 7.2^{k}	686± 4.5^{j}	0.0039± 0.0001^{k}	0.097± 0.004^{k}	1.00	25.01	133.46	103.90
A-RFWTC-20C1	168±2.6^{k}	198±1.7^{j}	540± 7.0^{k}	693± 6.0^{l}	0.0045± 0.00026^{jk}	0.126± 0.002^{j}	0.99	28.00	134.82	105.05

*حروف مختلف در یک ستون، نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار است ($p<۰/۰۵$)

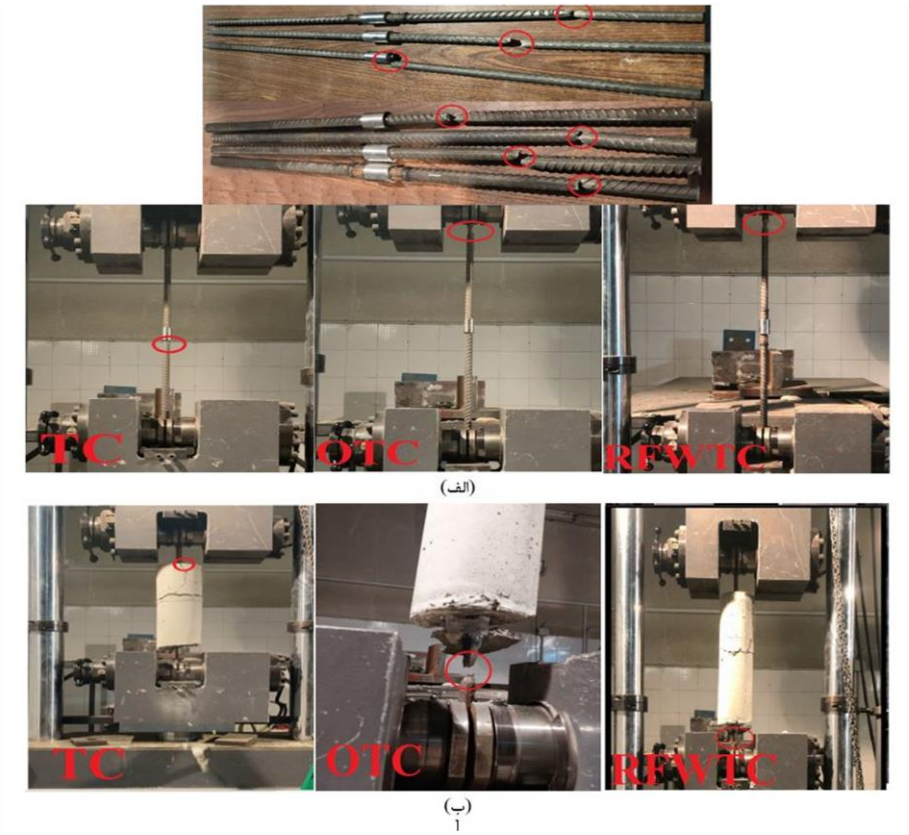
اطلاعات آزمایش است؛ که در آن، ابتدا اطلاعات مربوط به هر نمونه ارائه و سپس با نتایج نمونه‌ی مرجع مقایسه شده است.

۱.۴. نمونه‌ی بدون غلاف بتنی

در بخش حاضر از بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای C_1 برای ارزیابی ۳۶ وصله‌ی مکانیکی میلگرد و ۱۲ میلگرد یکپارچه با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. اندازه‌ی میلگردهای اخیر به‌طورخاص انتخاب شده‌اند، زیرا در بازارها موجود هستند. سه نوع مختلف کوپلر (TC، OTC، و RFWTC) به همراه نمونه‌ی مرجع (NS) متشکل از ۴ گروه مختلف (با اندازه و نوع بارگذاری‌های مختلف)، در برنامه‌ی آزمایشی حاضر گنجانده شده‌اند. کمینه‌ی استحکام تسلیم کششی (f_y) نمونه‌های یکپارچه (مرجع) به ترتیب ۵۱۱ مگاپاسکال برای میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر و ۵۱۰ مگاپاسکال برای میلگرد به قطر ۲۰ میلی‌متر بوده است؛ در حالی که استحکام کششی (f_u) آن‌ها به ترتیب ۶۱۸ مگاپاسکال و ۶۵۴ مگاپاسکال بوده است. هر دو f_y و f_u با تقسیم نیروی متناظر بر مساحت میلگرد اسمی محاسبه شده‌اند (جدول ۳). کمینه‌ی میانگین نهایی کرنش (ε_u) که با تقسیم جابجایی اندازه‌گیری‌شده بر طول نمونه محاسبه می‌شود، برای میلگردهای ۱۶ میلی‌متری ε_u = ۰/۰۹۰ و برای میلگردهای ۲۰ میلی‌متر، ε_u = ۰/۰۹۰ بوده است. در جدول ۳، نتایج آزمایش‌ها بر حسب نیروی تسلیم T_y و استحکام تسلیم f_y، نیروی نهایی T_u، و استحکام نهایی f_u، کرنش میانگین متناظر با استحکام تسلیم ε_y و کرنش‌های میانگین متناظر با استحکام نهایی ε_u، و ضریب شکل‌پذیری محاسبه‌شده به‌عنوان نسبت کرنش‌های نهایی به میانگین تسلیم ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$) ارائه شده است. نمودارهای تنش-کرنش آزمایش‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای بر روی میلگردهای یکپارچه و دارای وصله‌ی مکانیکی در شکل ۴ مشاهده می‌شوند. تقریباً برای هر سه تکرار آزمایش (۱۶ و ۲۰ میلی‌متر)، همه‌ی پاسخ‌ها، در محدوده‌های ۰/۰۹ و ۰/۱۳۰ برای ε_y و ε_u بوده‌اند. اختلافات جزئی در پایان ممکن است مربوط به نوسان‌های منظم مواد باشد، که ذاتی هستند. این تذکر لازم است که سیستم وصله‌های مکانیکی OTC و RFWTC تحت بارگذاری یکنواخت و



شکل ۴. نمودار σ-ε نمونه‌های بدون غلاف بتنی



شکل ۵. ناحیه‌ی شکست نمونه‌های (NS, TC, OTC, RFWTC) تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای (میلگردهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر): (الف) بدون غلاف بتنی، (ب) با غلاف بتنی.

چرخه‌ای، عملکردی مشابه به نمونه‌ی یکپارچه داشته است. شایان ذکر است که بین پیکربندی‌های بررسی‌شده، ε_u به‌طورمداوم کاهش یافته است، همان‌طور که توسط آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای (C_1) در شکل ۴ مشاهده می‌شود. بالاترین مقادیر ε_u در NS و RFWTC در محدوده‌ی ۰/۱۳ مشاهده شده است. TC با ۰/۰۹ بیشترین کاهش ε_u را داشته است. روش تولید OTC و RFWTC باعث افزایش سطح مقطع میلگرد در رزوه‌ها شده است، که با کمترین تنش در ناحیه‌ی کوپلر در توزیع کرنش در طول اتصال اثر مثبت داشته است. تمرکز تنش در رزوه‌ها به‌علت کم‌شدن سطح مقطع رزوه، باعث ایجاد شکست در منطقه‌ی وصله‌ی مکانیکی برای نمونه‌ی TC شده است. کاهش ε_u نشان داده‌شده در نمونه‌ی TC در سطح اتصال رخ می‌دهد و ممکن است پاسخ وصله‌ی مکانیکی را مشخص نکند. از آنجایی که کوپلر سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به میلگرد دارد، قطعه‌ی ضعیف‌تر به خارج از کوپلر منتقل می‌شود. در نتیجه، افزایش کرنش در میلگرد ایجاد می‌شود، به‌ویژه هنگام استفاده از وصله‌ی مکانیکی TC، که منجر به شکست زودرس در نزدیکی اتصال‌دهنده به میلگرد می‌شود (شکل ۵). کاهش ε_u بین اتصال‌ها ممکن است به نسبت با افزایش طول کل نمونه، اهمیت کمتری پیدا کند. همچنین باید برای اعضاء خمشی با وصله‌های مکانیکی به‌دقت بررسی شود، زیرا گرادیان لنگر (تغییرات فیزیکی یک متغیر در فضای چندبُعدی) و تمرکز احتمالی حالت خمیری به کاهش شکل‌پذیری کمک می‌کند. مناطق یا نقاط خاص در یک سازه یا عضو سازه وجود دارد، که در آن‌ها تمرکز بیشتری از تغییرشکل خمیری رخ می‌دهد. در غالب این مناطق می‌توانند ناحیه‌هایی با استحکام کمتر، عملکرد محدودتر یا خواص مکانیکی ضعیف‌تر باشند، که ممکن است به شکست و نقص در سازه

جدول ۴. نتایج آزمایش نمونه با غلاف میلگرد*.

Specimen Average	F_y (kN)	F_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (mm/mm)	ε_u (mm/mm)	μ_ε ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)	μ ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$)	R_u (%)	Ry (%)
C-NS-16M	104±1.7^{ab}	125±2.1^{a}	520±8.8^{a}	637±10^{a}	0.0040±0.00017^{a}	0.110±0.003^{ad}	1	27.50	-	-
C-TC-16M	103±2.5^{b}	122±3.3^{a}	520±4.1^{a}	619±25^{a}	0.0041±0.00012^{a}	0.083±0.003^{b}	0.75	2025	119.03	100.00
C-OTC-16M	106±0.8^{a}	124±1.6^{a}	518±1.3^{a}	645±1.3^{a}	0.0044±0.00001^{b}	0.097±0.004^{c}	0.88	22.00	124.03	100
C-RFWTC-16M	107±0.8^{a}	126±1.0^{a}	523±4.6^{a}	650±1.3^{a}	0.0045±0.00012^{b}	0.112±0.002^{d}	1.02	24.90	125.00	100.58
C-NS-16C$_2$	105±0.5^{e}	125±0.8^{e}	538±3.3^{e}	630±4.1^{e}	0.0045±0.00008^{e}	0.098±0.002^{e}	1	21.80	-	-
C-TC-16C2	104±1.4^{e}	120±0.8^{f}	517±6.4^{f}	619±0.5^{e}	0.0039±0.00021^{f}	0.091±0.003^{f}	0.92	23.30	115.06	96.09
C-OTC-16C$_2$	108±0.5^{f}	129±2.1^{g}	514±6.7^{f}	659±17.0^{f}	0.0040±0.00005^{f}	0.090±0.002^{f}	0.92	22.50	122.50	95.54
C-RFWTC-16C$_2$	112±0.5^{g}	129±1.4^{g}	522±1.4^{f}	673±1.0^{f}	0.0042±0.00012^{f}	0.102±0.002^{e}	1.04	24.30	125.09	97.02
C-NS-20M	162±4.5^{h}	198±0.8^{h}	539±17^{h}	693±3.7^{h}	0.0043±0.00029^{h}	0.109±0.004^{h}	1	25.35	-	-
C-TC-20M	163±2.1^{h}	187±2.1^{i}	523±5.0^{h}	662±7.8^{i}	0.0044±0.00012^{h}	0.083±0.003^{i}	0.76	18.90	122.82	97.03
C-OTC-20M	165±1.2^{hi}	195±1.4^{h}	528±2.9^{h}	693±2.9^{h}	0.0040±0.00024^{h}	0.086±0.004^{i}	1.01	21.50	128.57	98.00
C-RFWTC-20M	169±0.8^{i}	199±2.6^{h}	539±8.2^{h}	693±3.7^{h}	0.0044±0.00021^{h}	0.111±0.003^{h}	1.02	25.80	128.60	100
C-NS-20C$_2$	164±1.4^{ik}	198±0.8^{j}	521±3.3^{j}	688±1.9^{jl}	0.0048±0.00013^{jk}	0.110±0.002^{j}	1	2.300	-	-
C-TC-20C$_2$	161±1.9^{j}	184±1.4^{k}	516±0.9^{j}	649±1.0^{k}	0.0039±0.00013^{l}	0.081±0.002^{k}	0.73	20.75	124.00	99.04
C-OTC-20C$_2$	168±0.5^{kl}	197±0.5^{j}	530±0.5^{k}	685±1.6^{j}	0.0039±0.00033^{l}	0.088±0.002^{l}	1.00	22.60	131.48	101.73
A-RFWTC-20C1	168±2.7^{l}	199±1.7^{j}	539±6.9^{l}	693±6.1^{l}	0.0044±0.00027^{jl}	0.111±0.001^{m}	1.01	25.20	133.01	103.46

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است ($P < 0/05$)

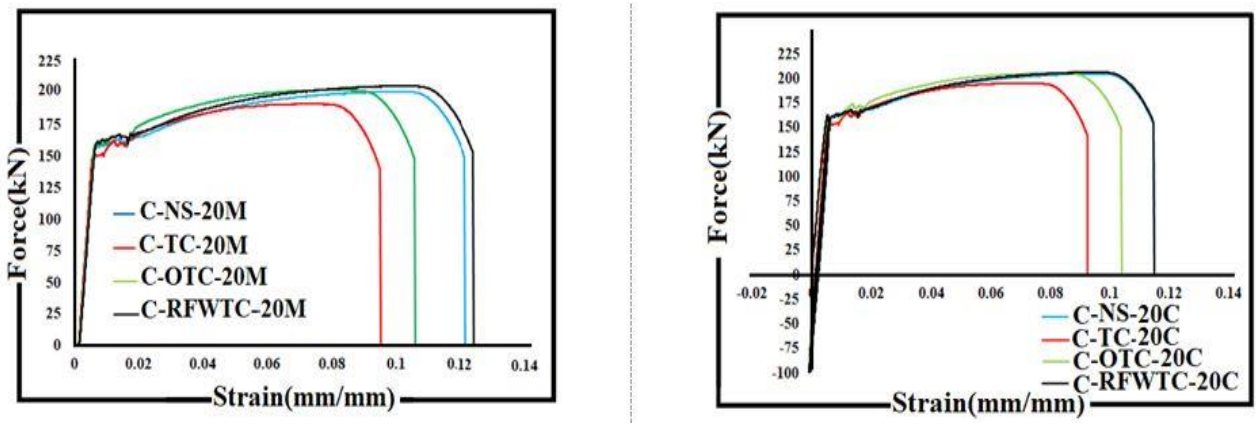
منجر شوند. این تمرکز شکل‌پذیری معمولاً در نقاطی با تنش‌ها و شرایط بارگذاری خاص ظاهر می‌شود و می‌تواند در تحلیل و طراحی سازه‌ها بررسی شود تا بهبود دوام و عملکرد سازه ارائه شود.[۱، ۲، و ۲۳]

۲.۴. نمونه با غلاف بتنی

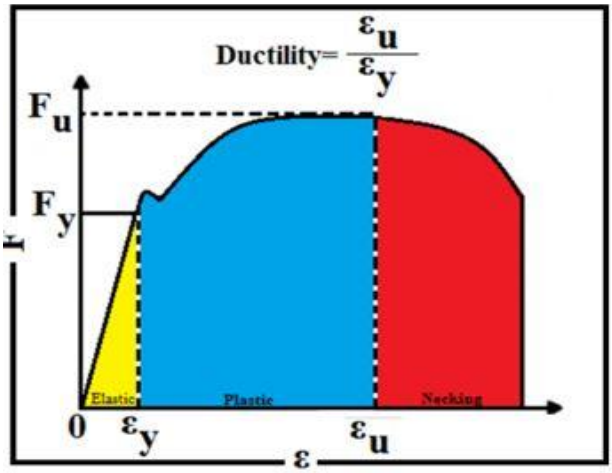
در بخش حاضر، از ۳۶ وصله‌ی مکانیکی میلگرد و ۱۲ میلگرد یکپارچه با سه نوع مختلف کوپلر (TC، OTC، و RFWTC) به همراه نمونه‌ی مرجع (NS) استفاده شده است. نمونه‌های مذکور در ۴ گروه مختلف تحت بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای C_2 (شکل ۶) با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر درون غلاف بتنی ارزیابی شده‌اند. در جدول ۴، یافته‌های کلیدی از آزمایش یکنواخت و چرخه‌ای روی وصله‌ی مکانیکی تعبیه‌شده از نظر نیروی تسلیم T_y و نیروی نهایی Tu ارائه شده است. همچنین، در جدول ۴، تطبیق کلی کرنش متناظر با استحکام تسلیم ε_y و کرنش‌های متناظر با نیروی نهایی ε_u ارائه شده است، که برای مقایسه‌های کیفی با تقسیم جابجایی ثبت‌شده بر طول عضو، که شامل منطقه‌ی بتن و سطح میلگرد آزاد است، محاسبه می‌شوند. نسبت شکل‌پذیری μ نیز ارائه شده است، که از نسبت $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ محاسبه می‌شود. در نمونه با غلاف بتنی با قطر میلگردهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متری با وصله‌ی مکانیکی و بدون وصله‌ی مکانیکی، کاهش ε_u با نوع وصله و نوع بارگذاری وجود دارد. همچنین شایان ذکر است که آزمایش‌های تک‌محوری ε_u کمتری را برای اعضاء با غلاف بتنی نسبت به نمونه‌های بدون غلاف بتنی نشان داده‌اند، به این معنی که پاسخ بتن ممکن است یک حد پایین محافظتی برای عملکرد وصله‌ی مکانیکی در نظر گرفته شود.[۲۴] عبارت "حد پایین محافظتی" به معنای استفاده از یک مقدار یا شرایط کمترینی است که به‌طوراحتیاطی برای محافظت از یک سیستم یا عنصر موردنظر در نظر گرفته می‌شود. در مورد وصله‌ها، حد پایین محافظتی به مقداری اشاره دارد که در صورت رعایت آن، وصله به‌طورقطعی عملکرد خواسته‌شده را ارائه می‌دهد و از شکست و خرابی جلوگیری می‌کند. به‌عبارت دیگر، استفاده از یک حد پایین محافظتی به معنای انتخاب مقادیر کمترینی است که تضمین‌کننده‌ی عملکرد ایمن و قابل اعتماد وصله است. در برخی مطالعات پیشین،[۲۴] عملکرد وصله در حالت بدون غلاف بتنی به‌عنوان یک حد پایین محافظتی محسوب شده است، اما نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که عملکرد اتصال‌ها در غلاف بتنی کمتر از حالت بدون غلاف بتنی بوده است، بدین معنا که با استفاده از حد پایین محافظتی مبتنی بر عملکرد در حالت بدون غلاف بتنی، ممکن است وصله در حالت با غلاف بتنی به‌درستی عمل نکنند و خطر شکست و خرابی وجود داشته باشد.

۳.۴. شکل‌پذیری نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

$\mu\varepsilon$ و μ هر نمونه در جدول‌های ۳ و ۴ با استفاده از شکل ۷ و معادله‌ی ۳ تعیین شده است. این تذکر لازم است که می‌توان از نسبت کرنش نهایی به کرنش



شکل ۶. نمودار F-ε نمونه‌های با غلاف بتنی (NS, TC, OTC, RFWTC) تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای.



شکل ۷. تعریف کرنش تسلیم و کرنش نهایی.[۴۱ و ۴۵]

تسلیم برای محاسبه‌ی نسبت شکل‌پذیری استفاده کرد.[۲۴] همچنین، نسبت کرنش نهایی میلگرد وصله‌شده (ε_{usp}) به کرنش نهایی (ε_{ub}) میلگرد یکپارچه می‌تواند برای ارزیابی شکل‌پذیری استفاده شود. در پژوهش حاضر، ε_{usp} مخفف استحکام نهایی میلگرد وصله‌شده است.[۴۱]

$$\text{شکل پذیری } (\mu_\varepsilon) = \frac{\text{کرنش نهایی میلگرد وصله شده } (\varepsilon_{usp})}{\text{کرنش نهایی میلگرد یکپارچه } (\varepsilon_{ub})} \quad (۳)$$

نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)، که بیش از ۰/۶۵ است، می‌تواند الزام‌های آیین‌نامه‌های EC۲،[۴۲] و EC۸،[۴۳] را برآورده سازد. هنگامی که از کلاس میلگرد C استفاده می‌شود،[۴۰] نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)، که بالای ۰/۶۵ است، می‌تواند الزام‌ها را براساس آیین‌نامه‌های اخیر برای شکل‌پذیری متوسط برآورده سازد. با این حال، میلگرد وصله‌شده، که نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$) کمتر از ۰/۶۵ دارد، برای اعضایی که در معرض تغییرشکل‌های غیرکشسان قابل‌توجهی هستند، نامطلوب به‌نظر می‌رسد.[۴۱] برای بررسی حاضر، ضروری است که شرایط ذکرشده، برای میلگردهای وصله‌شده با نسبت شکل‌پذیری زیاد تأیید شوند. همچنین شکل‌پذیری میلگرد وصله‌شده (μ_{sp}) نیز باید دست‌کم به اندازه‌ی میلگرد یکپارچه (μ_b) باشد. برای استفاده از میلگردهای اتصال در اجزاء سازه‌ای که می‌توانند تنش‌های لرزه‌ای قابل‌توجهی را تحمل کنند، نسبت (μ_{sp}/μ_b) باید بزرگ‌تر یا مساوی ۱/۰ باشد. شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز با استفاده از نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$) پیشنهادشده در نوشتار تازارو[1] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۴] ارزیابی شده است. جدول‌های ۳ و ۴ با توجه به معادله‌ی ۳، مقادیر متوسط شکل‌پذیری همه‌ی نمونه‌ها را با هم نشان می‌دهند. توصیه می‌شود که نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در اعضاء سازه‌ای با تغییرشکل غیرکشسان (اجزاء با تنش‌های غیرکشسان به اجزایی اشاره دارند که در مواجهه با شرایط غیرکشسان، توانایی تغییرشکل دائمی (شکل‌دهی غیرکشسان) را از خود نشان می‌دهند) مناسب هستند؛ زیرا مقدار شکل‌پذیری آن‌ها تقریباً برابر با میلگردهای یکپارچه است. همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در اعضاء بتنی در مناطق بحرانی لرزه‌ای استفاده شوند. برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای کم تا متوسط، می‌توان از وصله‌ی میلگرد TC در اعضاء سازه‌ای استفاده کرد.

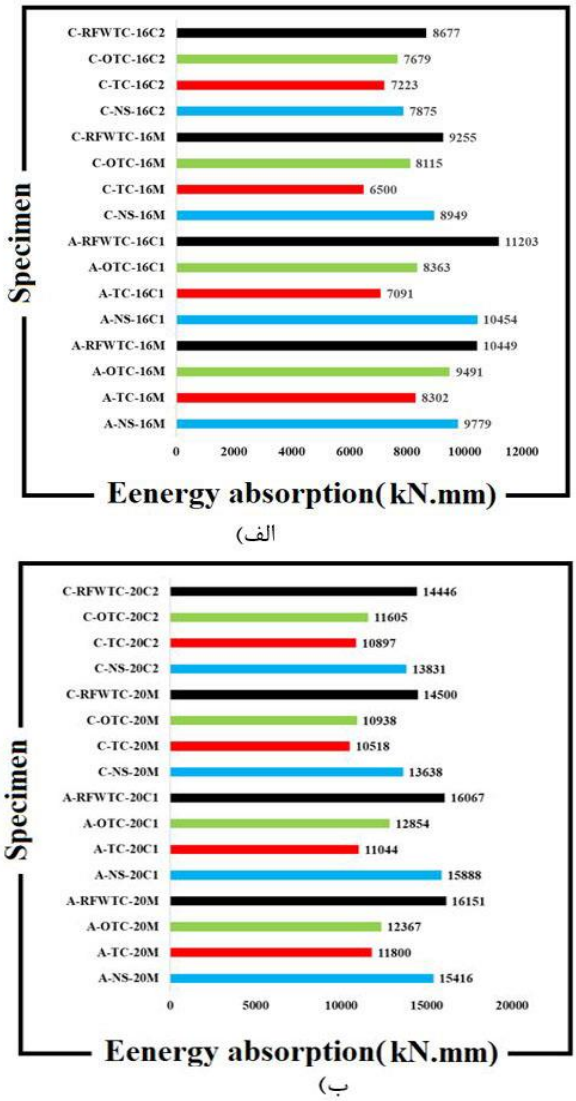
۴.۴. جذب انرژی نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی به‌عنوان منطقه‌ی جذب انرژی شناخته می‌شود و می‌توان آن را به‌عنوان یک جزء مهم برای ارزیابی نحوه‌ی رفتار وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای، به‌ویژه در مناطق لرزه‌ای در نظر گرفت. جذب انرژی هر نمونه در شکل ۸ مشاهده می‌شود. جذب انرژی به‌عنوان نتیجه‌ی میانگین سه نمونه برای هر نمونه محاسبه شده است. عملکرد نمونه‌ی RFWTC از نظر جذب انرژی بالاتر از نمونه‌ی NS بوده است؛ لذا، دست‌یابی به تداوم میلگرد فولادی کافی است. علاوه‌بر این، نمونه‌ی OTC جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی TC دارد.

۵.۴. ارزیابی رفتار مکانیکی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای

در وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای مشخص شده است که مکانیسم میلگرد رزوه‌شده و کوپلر روی میلگرد، استحکام قفل‌شوندگی کافی برای جلوگیری از جابجایی لغزش دارد. از سوی دیگر، قطر رزوه‌ی تعبیه‌شده برای اطمینان از عملکرد بالای وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای حیاتی است. با توجه به استحکام درگیری بالا و اتصال قوی در قسمت رزوه‌ای، هیچ جابجایی لغزشی در کناره‌ی میلگرد رزوه‌ای تشخیص داده نشده است. برای مشاهده‌ی اتصال قوی‌تر بین رزوه و کوپلر، سطح مقطع موقعیت رزوه باید بزرگ‌تر باشد. در صورت وجود سطح مقطع بزرگ‌تر از میلگرد، تنش‌های اتصال در سطح میلگرد یکنواخت خواهد بود. استانداردهای ACI۳۱۸-۱۹،[۴] ACI۴۳۹،[۴۶] و ACI۱۳۳،[۴۷] -ACI 318 و همچنین استانداردهای ISO۱۵۸۳۵-Part۱: ۲۰۱۸ و ISO۱۵۸۳۵-Part۲: ۲۰۱۸،[۴۰] همگی نشان‌دهنده‌ی موارد توصیه‌شده هستند.

[1] Tazarv



شکل ۸. میانگین جذب انرژی نمونه‌ها: (الف) میلگرد ۱۶ میلی‌متر، (ب) میلگرد ۲۰ میلی‌متر.

مطابق با مشخصات ارائه‌شده در BS-۸۱۱۰ و ACI۳۱۸-۱۹، مقاومت کششی نهایی اتصال مکانیکی باید بیشتر از ۱/۲۵ برابر استحکام تسلیم میلگرد باشد؛ بنابراین، ارزیابی نسبت مقاومت نهایی هر نمونه (R_u) بسیار مهم است. در مطالعه‌ی حاضر، R_u مخفف نسبت استحکام کششی نهایی نمونه‌ی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای به میانگین مقاومت کششی تسلیم نمونه‌ی میلگرد یکپارچه است. نسبت R_u در نمونه‌های RFWTC بالاتر از ۱۲۵٪ نسبت R_u هر نمونه است. در نتیجه، این گروه‌ها طبق کد ACI ۳۱۸-۱۹ به استحکام لازم دست یافته‌اند.[۴] در مورد نمونه‌های OTC، آن‌ها مشخصات ACI ۳۱۸ را برآورده می‌سازند (جدول‌های ۳ و ۴). شایان ذکر است که متأسفانه برخی از میلگردها پتانسیل بزرگ‌شدن بیش از حد را ندارند یا به‌عبارتی، بعد از بزرگ‌شدن میلگرد، سختی ناحیه‌ی رزوه که قرار است رزوه شود، به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و رزوه‌کاری را با مشکل مواجه می‌سازد. هیچ فرآیند شکل‌گیری وجود ندارد. که این به نوع تولید میلگرد می‌تواند مرتبط باشد. علاوه‌بر این، نسبت قدرت تسلیم (R_y) محاسبه شده است. R_y نشان‌دهنده‌ی نسبت استحکام کششی تسلیم نمونه‌ی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای به استحکام کششی تسلیم میلگرد یکپارچه است (جدول‌های ۳ و ۴). در حالی که میانگین نسبت‌های R_y در OTC و TC کمتر از ۱ است، متوسط نسبت‌های R_y برای نمونه‌های RFWTC بیشتر از ۱ است. در مقایسه با سایر نمونه‌ها، نمونه‌های RFWTC و OTC از نظر استحکام (R_u و R_y)، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی، و حالت خرابی بهترین عملکرد را دارند. به‌دلیل عملکرد بهبودیافته، اتصال برابر نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در مناطق لرزه‌ای بالا ایده‌آل است. علاوه‌بر این، عملکرد TC از نظر استحکام، اتلاف انرژی و حالت خرابی استانداردها را برآورده کرده است، که بنابراین می‌تواند نیروهای زلزله‌ی کم تا متوسط را تحمل کند.

۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی نوشتار حاضر، اصلاح ناحیه‌ی شکست کوپلر با میله‌ی رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بوده است. وصله‌های مکانیکی مذکور با تغییر روش ساخت وصله‌ی رزوه‌ای و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار و نورد سرد ساخته شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این دو نوع وصله‌ی مکانیکی را می‌توان در بخش‌های مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌ای استفاده کرد. برای ارزیابی دقیق رفتار وصله‌های مکانیکی مذکور پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی به همراه ۳ نمونه‌ی ستون بتن مسلح نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رفتار تک‌محوری یکنواخت و چرخه‌ای با غلاف بتنی و بدون غلاف بررسی شده است. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها ارائه شده‌اند:

۱-رزوه‌های بزرگ‌شده، پتانسیل بهبود عملکرد وصله‌ی مکانیکی در اعضاء بتنی را دارند. شکست شکل‌پذیر را می‌توان در نمونه‌های OTC و RFWTC مشاهده کرد.

۲- نمونه‌های OTC و RFWTC، الزام‌های عملکرد خوبی را برای عضو سازه‌ای که تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، نشان می‌دهند. همچنین استانداردهای مربوط به نواحی لرزه‌ای را برآورده می‌سازند.

۳-به‌دلیل عملکرد بهبودیافته، نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در مناطق لرزه‌ای با خطر زیاد، ایده‌آل هستند.

۴- عملکرد TC از نظر استحکام، اتلاف انرژی و حالت خرابی استانداردها را برآورده ساخته است؛ بنابراین، می‌تواند نیروهای زلزله‌ی کم تا متوسط را تحمل کند.

۵- می‌توان گفت که وصله‌های مکانیکی RFWTC و OTC برای میلگردهای طولی قابل‌اعتماد هستند و حتی می‌توانند عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح را بهبود بخشند.

با این حال، پیشنهاد می‌شود وصله‌های مکانیکی RFWTC و OTC در پژوهش‌های عددی یا آزمایشگاهی عمیق‌تر بررسی شوند، تا توصیه‌ها و نگرانی‌های مربوط به روش ذکرشده‌ی وصله، دقیق‌تر ارائه شود. مطالعات آتی می‌توانند پیامدهای اعمال روش مذکور را برای اعضاء بتن مسلح از جمله: ستون‌ها، تیرها، دال‌ها، و اتصال‌های تیر- ستون مطالعه و بررسی کنند.

References- منابع

1. Abé, M. and Shimamura, M., 2014. Performance of railway bridges during the 2011 Tōhoku earthquake. *J. of Performance of Constructed Facilities*, *28*(1), pp.13–23. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000379.
2. ICC Evaluation Service, LLC (ICC-ES), (n.d.). AC133 - *Acceptance Criteria. Available at*: https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac133/ (Accessed: 13 December 2022).
3. ACI Committee 318, 2019. *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.* American Concrete Institute. DOI:10.14359/51716937.
4. ACI Committee 318, 2019. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19).* American Concrete Institute.
5. ACI Committee 439, 2007. *Types of Mechanical Splices for Reinforcing Bars.* American Concrete Institute.
6. Al-Jelawy, H. M., 2022. Experimental and numerical investigations on monotonic tensile behavior of grouted sleeve couplers with different splicing configurations. *Engineering Structures*, *265*, 114434. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2022.114434.
7. ASTM International, (n.d.). *ASTM E8 / E8M - 16ae1 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.* Available at: https://www.astm.org/Standards/E8 (Accessed: 19 October 2020).
8. Bai, A. S. H. and Ingham, J. M., 2009. Seismic performance of mechanically coupled reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research, 61*(7), pp.529–537. DOI:10.1680/macr.2008.00098.
9. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2017. Ductility considerations for mechanical reinforcement couplers. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2017.08.007.
10. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2018. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices. *Structures, 16*, pp. 358–372. https://DOI:10.1016/j.istruc.2018.11.009.
11. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2019. Inelastic cyclic behaviour of RC members incorporating threaded reinforcement couplers. *Engineering Structures, 180*, pp. 468–483. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2018.11.053.
12. British Standards Institution, 2004. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. British Standards Institution.
13. Çelik, S. and Ersozlu, I., 2014. Investigation of microstructure and mechanical properties of friction welded AISI 316 and CK 45 steels. *High Temperature Materials and Processes.* DOI:10.1515/htmp-2013-0042.
14. Dabiri, H., Kheyroddin, A. and Faramarzi, A., 2022. Predicting tensile strength of spliced and non-spliced steel bars using machine learning- and regression-based methods. *Construction and Building Materials*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126835.
15. Dahal, P. K. and Tazarv, M., 2020. Mechanical bar splices for incorporation in plastic hinge regions of RC members. *Construction and Building Materials*, *258*, 120308. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120308
16. Einea, A., Yehia, S. and Tadros, M. K., 1999. Lap splices in confined concrete. *ACI Structural Journal, 96*(6), pp. 947–955. DOI:10.14359/769.
17. Emre, H. E. and Kaçar, R., 2015. Effect of post-weld heat treatment process on microstructure and mechanical properties of friction welded dissimilar drill pipe. *Materials Research*. DOI:10.1590/1516-1439.308114.
18. European Committee for Standardization, 2004. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee for Standardization.
19. Ghayeb, H. H., Abdul Razak, H., Ramli Sulong, N. H., Mo, K. H., Abutaha, F. and Gordan, M., 2021., 2021. Performance of mechanical steel bar splices using grouted couplers under uniaxial tension. *J. of Building Engineering*. https://DOI:10.1016/j.jobe.2020.101892.
20. Harinkhede, S. and Varghese, V., 2021. Investigation on design of new techniques in mechanical rebar coupler as an alternative to lap splices. *In Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, pp. 57–61. DOI:10.1007/978-981-15-8025-3_7.
21. Hassan, T. K., Lucier, G. W. and Rizkalla, S. H., 2012. Splice strength of large diameter, high strength steel reinforcing bars. *Construction and Building Materials*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.013.
22. Henin, E. and Morcous, G., 2015. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction. *Engineering Structures*, *83*, pp. 154–162. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2014.10.045.
23. Hulshizer, A. J., Ucciferro, J. J. and Gray, G. E., 1994. Mechanical reinforcement couplings meet demands of strength and constructibility. *Concrete International, 16*(12), pp. 47–52.

24. ISO/DIS 15835, 2018. *Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3).* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

25. Kheyroddin, A. and Dabiri, H., 2020. Cyclic performance of RC beam-column joints with mechanical or forging (GPW) splices; an experimental study. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2020.10.071.

26. Kuscu, H., Becenen, I. and Sahin, M., 2008. Evaluation of temperature and properties at the interface of AISI 1040 steels joined by friction welding. *Assembly Automation*. DOI:10.1108/01445150810904468.

27. Lee, C. S. and Han, S. W., 2019. Cyclic behaviour of lightly-reinforced concrete columns with short lap splices subjected to unidirectional and bidirectional loadings. *Engineering Structures*. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2019.03.108.

28. Li, W. and Wang, F., 2011. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering A*. https://DOI:10.1016/j.msea.2011.04.001.

29. Liu, C., Pan, L., Liu, H., Tong, H., Yang, Y. and Chen, W., 2020. Experimental and numerical investigation on mechanical properties of grouted-sleeve splices. *Construction and Building Materials*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120441.

30. Maalekian, M., 2007. Friction welding - Critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*. DOI:10.1179/174329307X249333.

31. Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Khani, M. and Heidari, A., 2018. The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2018.07.011

32. Nateghi-Alahi, F. and Shokrzadeh, M. R., 2019. Behavior considerations for mechanical rebar couplers. *In Behavior Considerations for Mechanical Rebar Couplers.* University of Tokyo, pp. 30–41. Available at: https://isn.ac/XBHB-EZGFF.

33. Saito, T., Yabe, Y. and Fujimori, T., 1985. An ultrasonic testing method for gas pressure welded joints of reinforcing steel bars. *Ultrasonics. https://DOI:10.1016/0041-624X(85)90060-5.*

34. Seshu Kumar, A., Khadeer, S. A., Rajinikanth, V., Pahari, S. and Ravi Kumar, B., 2021. Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints. *Materials Science and Engineering A*. https://DOI:10.1016/j.msea.2021.141844.

35. Sharbatdar, M. K., Jafaria, O. M. and Karimib, M. S., 2018. Experimental evaluation of splicing of longitudinal bars with forging welding in flexural reinforced concrete beams. *Advances in Concrete Construction.* DOI:10.12989/acc.2018.6.5.509.

36. Shokrzadeh, M. R., Aziminejhad, A. and Sarvghadmoghaddam, A., 2016. Hysteretic behavior of concrete connections strengthened by X-shape FRP strips. *Analysis of Structure and Earthquake, 12*(4), pp. 29–40. Available at: https://civil-strj.maragheh.iau.ir/article_525485.html (Accessed: 8 November 2016). [In Persian].

37. Shokrzadeh, M. R., Nateghi-E, Mansoori, M. R. and Javadi, P., 2022. Failure area evaluation of the coupler with threaded bar: Experimental and numerical study. *Int. J. of Advanced Structural Engineering, 12*(1), pp. 531–543. DOI:10.1007/ijase.2022.692294.

38. Shokrzadeh, M. R., Nateghi-E, Mansoori, M. R. and Javadi, P., 2023. The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding. *J. of Building Engineering, 80*, 107964. https://DOI:10.1016/j.jobe.2023.107964.

39. Shokrzadeh, M. R., 2024. Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices in reinforced concrete vertical elements. *Islamic Azad University Science and Research Branch*, pp. 175–488. DOI:10.32432/brs-290180.

40. Shokrzadeh, M. R. and Nateghi-Alahi, F., 2022. Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures, 18*(3–4), pp. 75–88. DOI:10.3233/brs-290180.

41. Structural Engineering Lab - International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, (n.d.). Available at: http://www.iiees.ac.ir/en/structural-laboratory/ (Accessed: 28 November 2021).

42. Tazarv, M., LaVoy, M., Sjurseth, T., Greeneway, E. and Wehbe, N., 2023. Analysis and design of mechanically spliced precast bridge columns. *Engineering Structures, 280*, 115726. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115726.

43. Tazarv, M. and Saiidi, M. S., 2016. Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions. *Engineering Structures*. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2016.06.041.

44. Tazarv, M., Shrestha, G. and Saiidi, M. S., 2021. State-of-the-art review and design of grouted duct connections for precast bridge columns. Structures. https://DOI:10.1016/j.istruc.2020.12.091.

45. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2014. *In Control of Welding*

Distortion in Thin-Plate Fabrication. DOI:10.1016/b978-0-85709-047-8.50016-9.

46. Yamamoto, R. I., Fukada, Y., Tatsumi, M. and Ueyama, K., 2002. New quality inspection method for gas pressure welds. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*. DOI:10.2219/rtriqr.43.7.

47. Yilmaz, M., Kaluc, E., Tülbentci, K. and Karagöz, S., 1996. Investigation into the weld zone of friction welded C45/HS6-5-2 dissimilar steel joints. *J. of Materials Science Letters*. DOI:10.1007/BF00591663.

48. Zhao, E., Song, C., Zhang, X., Zhou, Q. and Yan, K., 2022. Experimental study on monotonic, cyclic mechanics and fatigue performance of pressed cone sleeve splices. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2022.03.050.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.98-109

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Laboratory Investigation of the Behavior of Helical Piles under Monotonic Loading at Different Loading Speeds

Seyed Sajad Hosseini[1], Mohsen Keramati*[1] and Reza Hoseinpour[2]

[1]Faculty of Civil Engineering of Shahrood University, Shahrood, Iran.
[2]Faculty of Civil Engineering of Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
* coreesponding author: (Keramati@shahroodut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Recived: 3 February 2024

Revised: 4 May 2024

Accepted:5 May 2024

Keywords:

Helical Pile,
Physical Modeling,
Monotonic Test,
Loading Speed,
Ultimate Capacity.

Abstract

Today, one of the primary challenges faced by geotechnical engineers in dealing with problematic soils is to choose a suitable improvement method that, in addition to strengthening the soil, does not cause harmful damage to the environment. Helical piles are a new method that has become very popular in recent years due to the unique features of this type of pile, the most important of which is that it is environmentally friendly. Due to their unique shape and section (having one or more helices along the shaft of the pile), Helical piles have a higher load capacity than usual concrete piles. Among the advantages of using this type of pile, it can be a short installation time with minimal noise and vibration (no need to vibrate for installation), is Easy to implement due to limited access, lightweight, reduction of disturbance soil during installation, and poses less environmental risks and is compatible with nature.

According to past studies, it has been found that the current knowledge of the performance of this type of pile and the methods of predicting and determining the bearing capacity currently need to be improved, and this shows the necessity of researching the behavior of these piles.

This research, to predict the tensile behavior of Helical piles under different loading speeds and also to investigate the addition of a second helix to a single-helix Helical pile, using the 1g physical modeling device, in two cases of high (95%) and low (45%) relative densities, has been studied.

The results obtained in this study show that the effect of relative soil compaction on improving the bearing capacity of the soil was more significant than the loading speed and the number of helices. According to the results of the monotonic tests, the final bearing capacity decreased by about 56% with increasing loading speed; on the other hand, by increasing the relative density and increasing the number of helices, the final load capacity increased, respectively by about 468% and 54%.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Hosseini, S., Keramati, M. and Hoseinipour, R. 2025. Laboratory Investigation of the Behavior of Helical Piles under Monotonic Loading at Different Loading Speeds, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.98-109.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.64018.3300

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری

سیدسجاد حسینی [۱]، محسن کرامتی [*۱] و رضا حسین‌پور [۲]

[۱] دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

[۲] دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (Keramati@shahroodut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:

شمع پیچشی،

مدل‌سازی فیزیکی،

آزمایش مونونیک،

سرعت بارگذاری،

ظرفیت باربری نهایی.

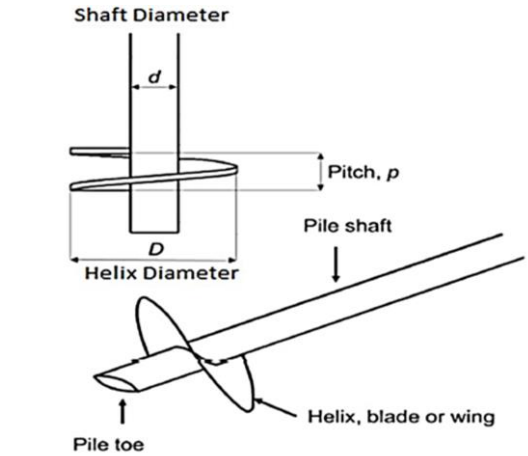
چکیده

استفاده از شمع‌های پیچشی، یکی از روش‌های نوین بهسازی است، که به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها، که مهم‌ترینش دوستدار محیط‌زیست‌بودن است، در سال‌های اخیر رواج بسیاری پیدا کرده است. از آنجایی که در هنگام واردشدن نیروهای فشاری، شافت شمع نقش اساسی و در هنگام واردشدن نیروهای کششی، بال‌ها (پره‌ها) نقش اساسی در تحمل نیروهای مذکور را ایفا می‌کنند، بنابراین پیش‌بینی رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری کششی پیچیده‌تر از بارگذاری فشاری است. در پژوهش حاضر، به‌منظور پیش‌بینی رفتار کششی شمع‌های پیچشی تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و همچنین بررسی افزودن پره‌ی دوم به شمع پیچشی تک‌پره، با استفاده از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی g ۱، در دو تراکم نسبی بالا (۹۵٪) و پایین (۴۵٪) مطالعه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که در آزمایش‌های مونوتونیک، ظرفیت باربری نهایی با افزایش سرعت بارگذاری تا حدود ۵۶٪ کاهش یافته است؛ از طرف دیگر، با افزایش تراکم نسبی و افزایش تعداد پره‌ها، ظرفیت باربری نهایی به ترتیب تا حدود ۴۶۸ و ۵۴ درصد افزایش پیدا کرده است.

۱. مقدمه

بیشتر روش‌های بهسازی پایدار و مقاوم‌سازی خاک‌های مسئله‌دار (اعم از: سُست، واگرا، روانگرا، رمبنده، و خاک ماسه‌ای ناپایدار، و ...) پر هزینه، مدت‌دار، اجرای سخت و از همه مهم‌تر در زمینه‌ی زیست‌محیطی خسارت‌های فراوانی به محیط‌زیست وارد می‌کنند. بنابراین، امروزه مهندسان ژئوتکنیک به دنبال روش‌های نوین بهسازی و دوستدار محیط‌زیست هستند؛ که یکی از آن‌ها، مسلح‌سازی خاک‌های مسئله‌دار با کمک شمع‌های پیچشی[۱] است. شمع‌های پیچشی، نوعی از سیستم فونداسیون عمیق هستند، که در امتداد شافت شمع یک یا چند پره دارند (در شکل ۱ شماتیک اجزاء اصلی شمع‌های پیچشی مشاهده می‌شود) و انواع بارگذاری‌ها را به لایه‌های زیرین و عمیق‌تر منتقل می‌کنند.

امروزه شمع‌های پیچشی، همان‌طور که پرکو[۲] (۲۰۰۹)،[۲] و پک[۳] (۲۰۰۹)،[۳] نشان داده‌اند، به‌طور گسترده‌ای توسط بیشتر مهندس‌ها شناخته شده است و می‌توانند به‌عنوان بخشی اساسی از فونداسیون‌های عمیق استفاده شوند. کوریان و شاه[۴] (۲۰۰۹)، گزارش داده‌اند که اخیراً شمع‌های پیچشی به‌عنوان



شکل ۱. شماتیک اجزاء اصلی شمع پیچشی.[۱]

فونداسیون‌های عمیق برای تحمل نیروهای فشاری و آپلیفت[۵] (بالابرنده) تا ۳۰۰۰ کیلونیوتن استفاده می‌شوند. بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان فونداسیونی عمیق در سازه‌های معمول استفاده کرد.[۴] همچنین به گفته‌ی

[1] Helical Pile
[2] Perko
[3] Pack
[4] Kurian & Shah
[5] Uplift

استناد به این مقاله:

حسینی، سید سجاد، کرامتی، محسن، و حسین پور، رضا، ۱۴۰۴. بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌های پیچشی تحت بارگذاری مونوتونیک در سرعت‌های مختلف بارگذاری. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۹۸-۱۰۹. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64018.3300

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

سیلوا[6] (۲۰۱۴)، تسوها[7] و همکاران (۲۰۱۳)، پرز[8] و همکاران (۲۰۱۸)، شارما[9] و همکاران (۲۰۱۷) در سال‌های اخیر، استفاده از شمع‌های پیچشی به‌عنوان فونداسیون‌های عمیق در کشورهایی مانند ایالات متحده و برزیل فراگیر شده است.[۵-۸] شمع‌های پیچشی عمدتاً برای مقاومت در برابر نیروهای کششی ایجادشده توسط گشتاورهای واژگونی و آپلیفت، در سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند؛[۹] بنابراین، آن‌ها به عنوان یک جایگزین بالقوه برای شمع‌های کوبیده‌شده‌ی معمولی مانند شمع‌های دریایی پیشنهاد شده‌اند، و به‌دلیل تأثیر لنگر پیچشی، ظرفیت باربری آپلیفت زیادی را فراهم می‌کنند.[۱۰-۱۳] استفاده از شمع‌های پیچشی باعث افزایش ظرفیت باربری و ظرفیت بیرون‌کشیدگی نیز می‌شود.[۲]

شمع‌های پیچشی از شمع‌های نوینی هستند که در مقایسه با انواع شمع‌ها و شمع‌های سنتی، نیاز به زمان و هزینه‌ی کمتر و تجهیزات و نیروی کمتری دارند؛ لذا استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده و جزء اقتصادی‌ترین روش‌هاست. از دیگر مزایای شمع‌های پیچشی، برخلاف انواع فونداسیون‌های دیگر، قابلیت اجرا در هر نوع شرایطی از آب و هواست؛ مانند: اجرایی‌بودن در مناطق ساحلی و دریایی که امروزه رواج بیشتری دارد. از آنجا که برای شمع پیچشی نیازی به بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن نیست، سرعت نصب به مراتب بالا می‌رود. برای مثال، زمان لازم برای نصب یک شمع ۶ متری کمتر از ۱۰ دقیقه است و همچنین بلافاصله بعد از نصب شمع، می‌توان سازه را نصب و بارگذاری کرد.[۱۴]

دی برناردو[10] (۲۰۱۲)، مطابق با انجام یک برنامه‌ی آزمایش میدانی در خاک‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ دریافت که شمع‌های پیچشی نه فقط در رسوب‌های ریزدانه، بلکه در همه‌ی انواع خاک‌ها حتی در مناطق یخ‌زده و سایت‌های سنگی قابل استفاده هستند.[۱۵]

بنابراین، فونداسیون شمع‌های پیچشی در دامنه‌ی وسیعی از انواع خاک‌ها، اعم از زمین‌های شنی، سیلابی، باتلاقی، جلگه‌ای، و مناطق دارای یخبندان قابل اجرا هستند. در مناطقی که به راحتی قابل دسترسی نیستند، مانند کوهستان‌ها، استفاده از شمع‌های پیچشی توصیه شده است. برخی دیگر از مزایای اصلی استفاده از شمع‌های پیچشی برای مهندسان ژئوتکنیک، عبارت‌اند از: زمان کوتاه نصب با کمینه‌ی سر و صدا و ارتعاش (برای نصب نیازی به ویبره‌کردن نیست)، مناسب‌بودن در خاک‌های سخت، سهولت نصب با توجه به دسترسی محدود، وزن سبک، کاهش خطرهای حفاری (بی‌نیازی به حفاری و انتقال خاک از محل)، کاهش دست‌خوردگی خاک هنگام نصب، کنترل کیفیت محل با اندازه‌گیری گشتاور نصب، خطرهای کمتر محیط‌زیستی و سازگار با طبیعت (امکان استفاده‌ی مجدد و به مراتب کاهش قابل توجه هزینه)؛ در نتیجه، برای مزایای اصلی در اندازه‌ی معمول شمع‌های پیچشی، با توجه به کارایی و هزینه، انتظار می‌رود که قابلیت استفاده از آن‌ها افزایش یابد.[۱۴]

به‌طورکلی، علی‌رغم مزایای زیاد شمع‌های پیچشی، مرور بر ادبیات و سابقه‌ی موضوع (که در بخش بعد کاملاً بررسی شده است)، فقط بینش محدودی در مورد رفتار آن‌ها در مقایسه با انواع دیگر شمع‌ها ارائه می‌دهد. همان‌طور که توسط مرفیلد[11] (۲۰۱۱)، این موضوع بیان شده است،[۱۶] درک فعلی از شمع‌های پیچشی هنوز رضایت‌بخش نیست، و روش‌های طراحی موجود برای پیش‌بینی ظرفیت باربری آپلیفت ناکافی هستند، و مدل‌های ارزیابی گشتاور به‌طورکلی معتبر نیستند؛ زیرا به ویژگی‌های خاک (که در طول نصب تغییر می‌کنند) و خواص هندسی شمع بستگی دارند. بنابراین، نیاز به مطالعات بیشتری در رابطه با شمع‌های پیچشی وجود دارد.

از نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به روش انجام آزمایش‌های مونوتونیک که به‌صورت g ۱ با کمک جعبه‌ی بزرگ‌مقیاس موجود در مجموعه‌ی آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود قرار گرفته است، اشاره کرد. همچنین، آزمایش‌ها در دو تراکم نسبی سُست و متراکم و در سرعت‌های مختلف بارگذاری انجام شده‌اند، که کاملاً تأثیر پارامترهای مذکور در ظرفیت باربری نهایی بررسی شده است و امید است در آینده بتوان از نتایج پژوهش حاضر در طراحی‌ها استفاده و به کاربرد بیشتر آن‌ها در کشورمان اضافه کرد.

۱.۱. پیشینه‌ی پژوهش

به‌طورکلی برای مطالعه‌ی رفتار پی‌های عمیق، که شمع‌های پیچشی نیز نوعی پی عمیق هستند، از ۴ روش: تحلیلی، عددی، آزمایش‌های میدانی، و روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی، به‌دلیل پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی‌بودن دقیق رفتار مصالح ژئوتکنیکی، نیاز به ساده‌سازی و فرضیات زیادی دارد، که در جواب‌ها تأثیرگذار است. از طرفی، آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و میدانی، اگرچه جواب‌های مناسب و واقعی‌تری ارائه می‌دهند، ولی به‌دلیل زمان‌بربودن و هزینه‌ی بالا گاهی ممکن نیست. آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، نمونه‌ای از آزمایش واقعی است، که می‌توان ویژگی‌های مدل واقعی را مطالعه کرد. از ویژگی‌های اصلی مدل‌های فیزیکی، هزینه‌ی پایین، زمان کوتاه انجام آزمایش‌ها، و کنترل بیشتر و دقیق‌تر بر روی پارامترهای موردمطالعه است.[۱۷] در ادامه، مهم‌ترین مطالعات پیشین بررسی شده‌اند.

احمد و همکاران (۲۰۲۲)، به مطالعه‌ی عملکرد شمع مارپیچی مخروطی تعبیه‌شده در ماسه‌ی سُست تحت بارگذاری استاتیکی و سیکلیک آپلیفت، با استفاده از تحلیل المان محدود ۳ بُعدی و نرم‌افزار Plaxis ۳D پرداخته و دریافته‌اند که تحت تأثیر بارگذاری استاتیکی آپلیفت، هر چه تعداد مارپیچ‌ها بیشتر باشد، ظرفیت آپلیفت شمع پیچشی با افزایش تعداد مارپیچ‌ها افزایش می‌یابد، و به تبع آن، جابجایی در خاک کمتر می‌شود. همچنین تأثیر افزایش تعداد مارپیچ‌ها در یک شمع بیشتر از افزایش مقدار فواصل بین مارپیچ‌ها تحت اثر بارگذاری مونوتونیک و سیکلیک آپلیفت در کاهش دامنه‌ی جابجایی بوده است.[۱۸]

خزایی و اسلامی (۲۰۱۶)، از طریق مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک با استفاده از دستگاه FCV[12] (فشار همه‌جانبه‌ی مخروطی)، آزمایش‌های فشاری و کشش‌محوری با تمرکز بر رفتار نیرو- جابجایی برای ارزیابی عملکرد FCV برای شمع‌های مدل‌شده در خاک ماسه‌ای انجام داده و دریافته‌اند زمانی که تعداد پره و تراکم نسبی خاک بیشتر شده است، ظرفیت باربری شمع پیچشی

[6] Silva
[7] Tsuha
[8] Perez
[9] Sharma
[10] Di Bernardo
[11] Merifield
[12] Frustum Confinning Vessel

افزایش پیدا کرده است و عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. همچنین یک شمع پیچشی با دو پره‌ی مارپیچ توانسته است تقریباً معادل یک شمع فولادی در زمانی که قطر شمع فولادی با قطر پره‌ی مارپیچ یکسان بوده است، عمل کند.[۱۴]

عباس و علی (۲۰۲۰)، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل‌سازی با بارگذاری فشاری و سرعت کرنش ثابت، پارامترهای تأثیرگذار در ظرفیت شمع‌های پیچشی تعبیه‌شده در خاک رس نرم قرارگرفته بر روی خاک ماسه‌ای متراکم را بررسی کردند؛ که با توجه به نتایج آن‌ها، افزودن مارپیچ به شفت شمع برای افزایش ظرفیت شمع‌های پیچشی در مقایسه‌ی شمع‌های پیچشی و فولادی معمولی کارآمدتر بوده و ظرفیت فشاری شمع‌های پیچشی هنگام افزایش تعداد مارپیچ، صرف‌نظر از نوع خاک، قطر مارپیچ و نسبت L/D افزایش یافته است.[۱۹]

جمیل و عباس (۲۰۲۱)، با کمک مدل‌سازی آزمایشگاهی، تأثیر فاصله بین گروه شمع‌های پیچشی و تعداد پره‌های مارپیچ در ظرفیت فشاری در خاک ماسه‌ای و رس نرم را بررسی کردند و دریافتند که افزایش تعداد صفحه‌ی مارپیچ در شمع پیچشی باعث افزایش ظرفیت فشاری نهایی درگروه شمع‌ها شده و هنگامی که فاصله‌ی شمع‌ها بین شمع‌های گروهی افزایش یافته است، ظرفیت فشاری نهایی گروه شمع‌ها در خاک ماسه‌ای افزایش یافته است، در حالی که در خاک رسی نرم کاهش یافته است.[۲۰]

حسین‌پور و همکاران (۲۰۱۳)، با انجام آزمایش‌های مونوتونیک در سرعت بارگذاری ۱۸ (mm/min) به روش مدل‌سازی فیزیکی g ۱، اثر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک‌مارپیچ در عملکرد آن را در خاک ماسه‌ای بررسی کردند و دریافتند که افزودن مارپیچ دوم، باعث افزایش ظرفیت‌های کششی و فشاری شده است. همچنین تأثیر افزودن مارپیچ دوم به شمع تک‌مارپیچ برای ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری مستقل از تراکم نسبی ماسه بوده است. با این حال، هر دو عامل افزایش تراکم نسبی و تعداد پره‌ها، باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شده است، اما تأثیر افزایش تراکم نسبی بسیار بیشتر از افزایش تعداد پره‌ها بوده است.[۲۱]

با توجه به پیشینه‌ی پژوهش مشخص است که مطالعات متعددی در رابطه با اثر تعداد مارپیچ و نوع خاک و ... انجام شده است، و مطالعه‌ای در رابطه با سرعت‌های بارگذاری مختلف انجام نشده است؛ بنابراین، در نوشتار حاضر در درجه‌ی اول به بررسی رفتار شمع‌های پیچشی تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و در ادامه، به بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک و تعداد پره در آن‌ها پرداخته و عوامل مختلف ذکرشده و تأثیر آن‌ها در ظرفیت باربری با هم مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مصالح استفاده‌شده

خاک استفاده‌شده از ماسه‌ی فیروزکوه (D۱۱)، نوعی ماسه‌ی سیلیکاته بوده است، که شکل و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در شکل ۲ و جدول ۱ مشاهده می‌شود. همچنین شمع‌های استفاده‌شده از جنس فلزی، که به ترتیب یک‌پره و دوپره بوده‌اند، در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.



شکل ۲. ماسه‌ی فیروزکوه.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی فیروزکوه.

Parameter	Value	Unit
D_{10}	0.76	mm
D_{30}	1.076	mm
D_{50}	1.318	mm
C_u	1.889	–
C_c	1.061	–
e_{max}	0.96	–
e_{min}	0.66	–
$\gamma_{d\ max}$	15.69	kN/m^3
$\gamma_{d\ min}$	13.23	kN/m^3
$\gamma_{d\ (Dr=45\%)}$	14.22	kN/m^3
$\gamma_{d\ (Dr=95\%)}$	15.4	kN/m^3
$\nu_{s\ (poisson's\ ratio)}$	0.3	–
$G_{soil\ (shear\ modulus)}$	≈ 30	MPa
$\Phi_{\ (Dr\ =45\%)}$	31.5	–
$\Phi_{\ (Dr\ =95\%)}$	38.1	–
$C_{\ (Dr\ =45\%)}$	0.80 ≈ 0	kPa
$C_{\ (Dr\ =95\%)}$	3.91 ≈ 0	kPa



شکل ۳. تصویر شمع‌های پیچشی مدل‌شده.

با توجه به مشخصات خاک که در جدول ۱ ارائه شده است، خاک ماسه‌ای استفاده‌شده با دانه‌بندی یکنواخت و بددانه‌بندی‌شده (SP)[۱۳] مشخص شده است.

۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی بزرگ‌مقیاس با ابعاد مخزن ۱/۲۰×۱×۱/۲۷ متر (به ترتیب طول، عرض، و ارتفاع) که قابلیت انواع مدل‌سازی‌ها را دارد (شکل۴)، برای انجام آزمایش‌های مونوتونیک استفاده شده است.

[13] Sand Poorly Graded



شکل ۴. جعبه‌ی مدل‌سازی بزرگ‌مقیاس موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود.



شکل ۵. مراحل انجام آزمایش‌ها؛ (الف) پُرکردن جعبه، (ب) ترازکردن شمع، (ج) اتصال شمع با لودسل، (د) انجام آزمایش‌های مونوتونیک با سرعت‌های مختلف بارگذاری در تراکم‌های نسبی متفاوت، (ه) اعمال بارگذاری بر روی شمع.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا جعبه‌ی خالی با توجه به تراکم نسبی موردنظر، در ۵ لایه، وزن مشخصی از خاک، که در ادامه توضیح داده شده است، در هر لایه پُر شد. سپس شمع برای انجام آزمایش با سرعت مشخص ۱۵ دور بر دقیقه در خاک با کمک دریل موجود در آزمایشگاه به طوری پیچیده شد که کمترین دست‌خوردگی در خاک ایجاد شود. نوک شمع با یک پیچ به لودسل بسته شد تا در طول آزمایش اتصال کامل برقرار باشد. سپس با توجه به آزمایش مرتبط، بارگذاری لازم اعمال شده است. در شکل ۵، مراحل انجام آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

جعبه‌ی موردنظر به روش بارش ماسه در ۵ لایه‌ی مشخص پُر شد و با توجه به اینکه دو وجه آن شیشه‌ای و قابل رؤیت بوده است، با مشاهده‌ی تغییرات سطح خاک که جزئی است، کنترل تراکم نسبی در آزمایش‌های مختلف بررسی شده است.

جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های مونوتونیک.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)
Test 1	45%	Single-helix	90
Test 2	45%	Single-helix	500
Test 3	45%	Double-helix	90
Test 4	45%	Double-helix	500
Test 5	95%	Single-helix	90
Test 6	95%	Single-helix	500
Test 7	95%	Double-helix	90
Test 8	95%	Double-helix	500

با استفاده از روابط ۱ و ۲، و داشتن حجم کل مخزن و میزان خاک برای پُرشدن هر لایه (پس از عملیات پُرکردن در حالت عادی مخزن و متراکم‌سازی) می‌توان به تراکم‌های نسبی موردنظر ۴۵ و ۹۵ درصد رسید:

$$\gamma_d = \frac{w_s}{V} \quad (۱)$$

$$Dr = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \times \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \quad (۲)$$

که در آن، γ_d وزن مخصوص خاک، w_s وزن خاک، V حجم مخزن، D_r تراکم نسبی، $\gamma_{d\min}$ وزن مخصوص کمینه، و $\gamma_{d\max}$ وزن مخصوص بیشینه هستند.

۳.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

در مجموع، ۳۲ آزمایش مونوتونیک انجام شده‌اند، که به دو دسته‌ی بارگذاری کششی و فشاری تقسیم می‌شوند. برای هر آزمایش، آزمون تکرار برای اطمینان از نتیجه در نظر گرفته شده است (۱۶ آزمون تکرار). T[14]، C[15]، Dr[16]، و V[17] به ترتیب بیانگر آزمایش‌های کششی، آزمایش‌های فشاری، تراکم نسبی خاک، و سرعت بارگذاری هستند، که در ادامه، جزئیات هر آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. ارائه و تحلیل نتایج

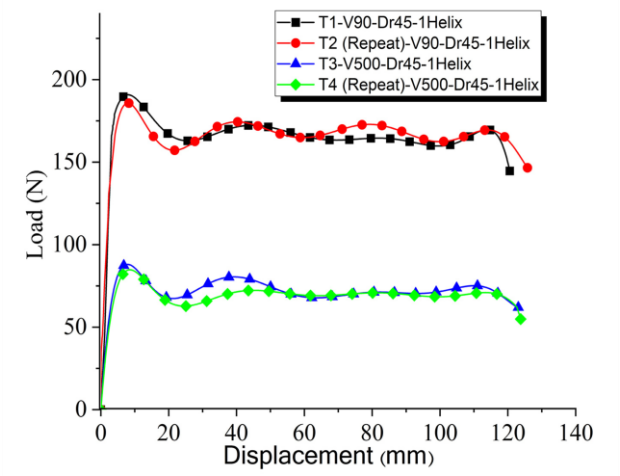
در ادامه، به ترتیب نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر سرعت بارگذاری، درصد تراکم نسبی، و تعداد پره در ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره به صورت نمودار در شکل ۶ مشاهده می‌شود و توضیحات لازم بیان شده است. به‌دلیل هم‌پوشانی و تطبیق نتایج آزمایش‌های اصلی و تکرار، منحنی‌های مربوط به آزمایش‌های تکرار فقط در شکل ۶ نشان داده شده‌اند و در بقیه‌ی شکل‌ها، منحنی‌های مربوط به آزمایش تکرار ارائه نشده است.

۱.۳. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی و فشاری

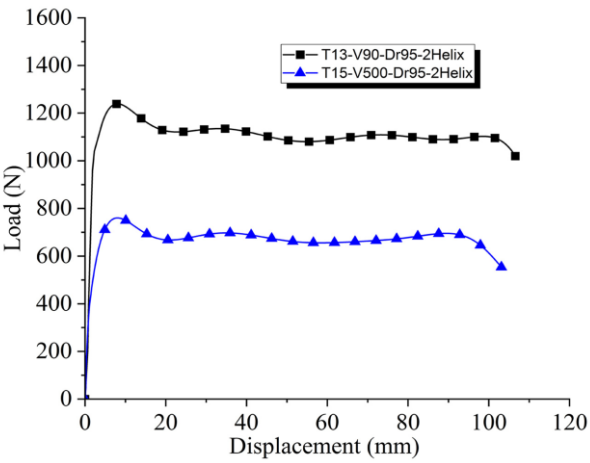
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سرعت بارگذاری از ۹۰ (mm/min) به ۵۰۰ (mm/min)، ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪، به‌طور مشابه در حدود ۵۲٪ و تا بیشینه‌ی ۵۶٪

[14] Tension
[15] Compression
[16] Relative density
[17] Velocity (Loading speed)

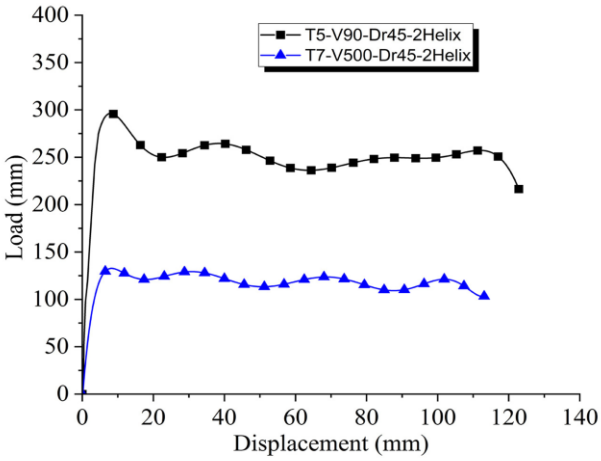
کاهش یافته است (شکل‌های ۶ الی ۹). همچنین مقایسه‌ی اخیر در تراکم‌های نسبی ۹۵ و ۳۰ درصد و بیشینه‌ی ۴۰ درصد بوده است (شکل‌های ۱۰ الی ۱۳). نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که افزایش سرعت بارگذاری از ۹۰ (mm/min) به ۵۰۰ (mm/min)، باعث کاهش در ظرفیت باربری فشاری و کششی شده است، که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت بارگذاری، سرعت جابجایی شمع در خاک بیشتر و به تبع آن، گیرداری بین شمع و خاک کمتر شده است؛ بنابراین، ظرفیت باربری در هر دو حالت کششی و فشاری کاهش یافته است.



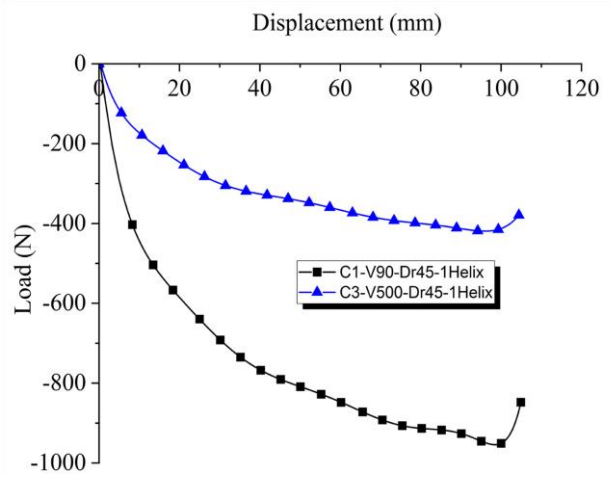
شکل ۶. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۴۵٪



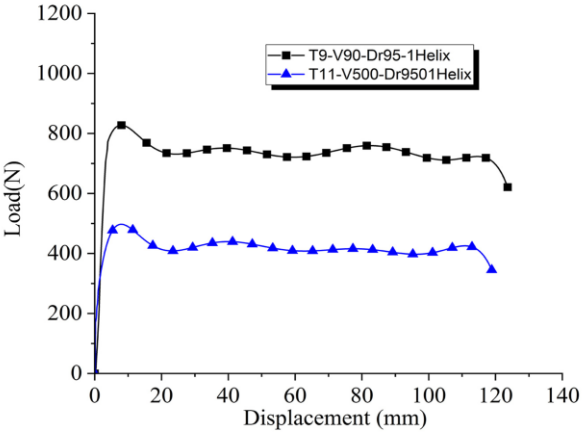
شکل ۹. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



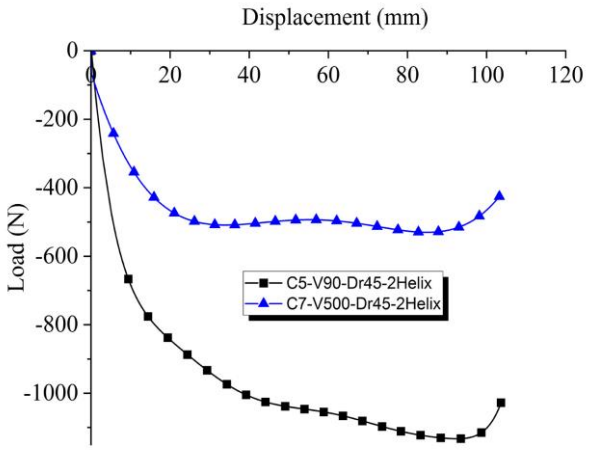
شکل ۷. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۴۵٪



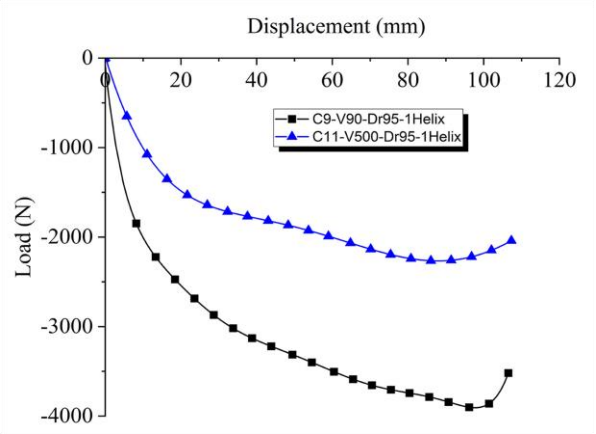
شکل ۱۰. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪



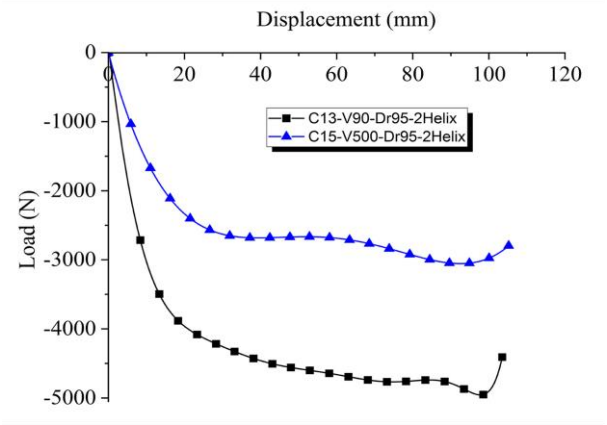
شکل ۸. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۴۵٪



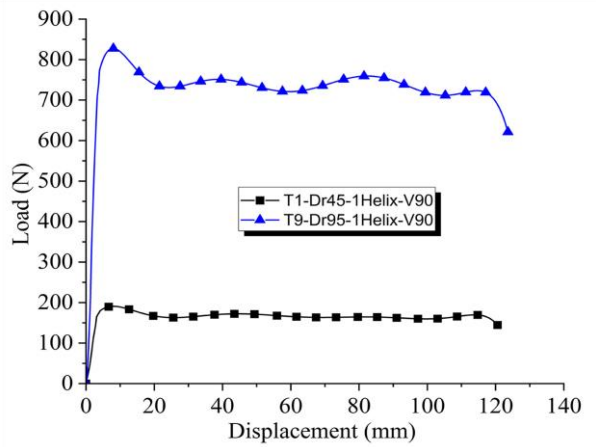
شکل ۱۱. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪



شکل ۱۲. تأثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪.



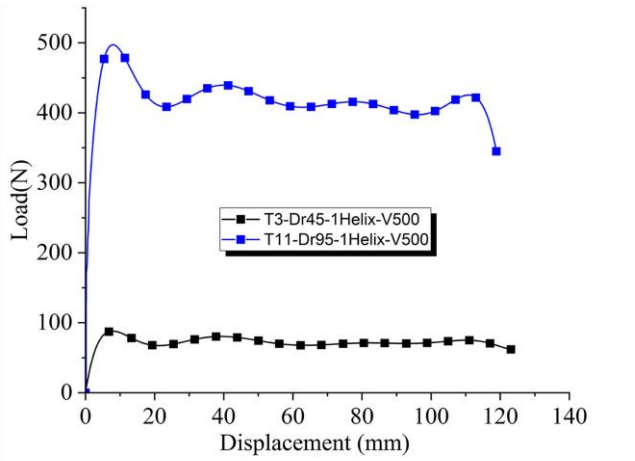
شکل ۱۳. تاثیر سرعت بارگذاری در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در تراکم نسبی ۹۵٪.



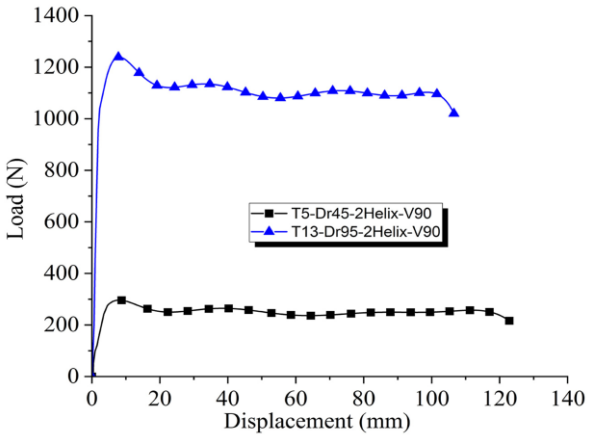
شکل ۱۴. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۲.۳. تأثیر تراکم نسبی خاک در ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری

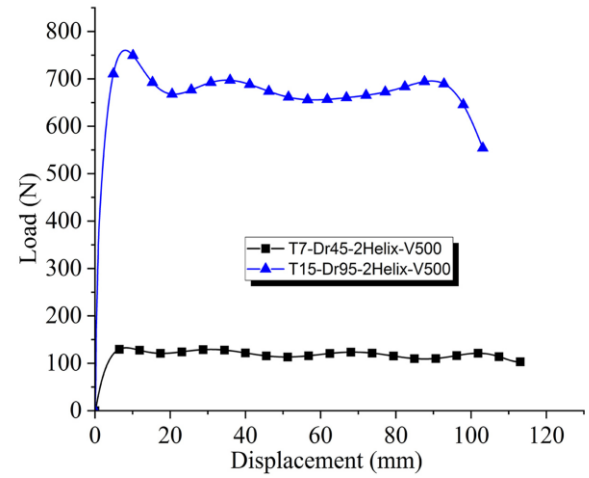
با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵ به ۹۵ درصد، ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع پیچشی تک‌پره و دوپره در حدود ۳۰۹٪ تا بیشینه‌ی ۴۶۸٪ افزایش یافته است، که مقدار ۳۰۹٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min) و ۴۶۸٪ مربوط به سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min) بوده است، که نتایج آن در شکل‌های ۱۴ الی ۲۱ مشاهده می‌شود و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده



شکل ۱۵. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

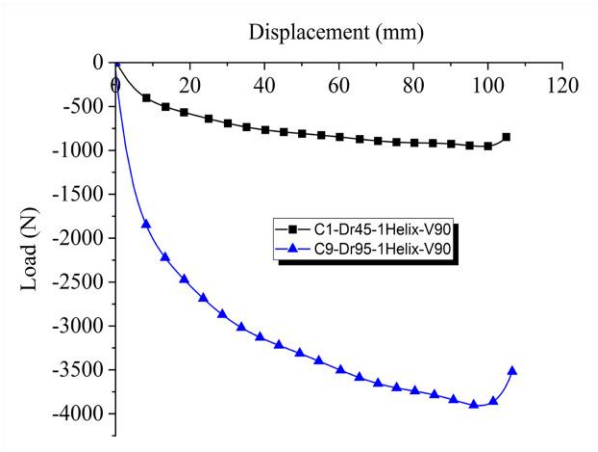


شکل۱۶. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

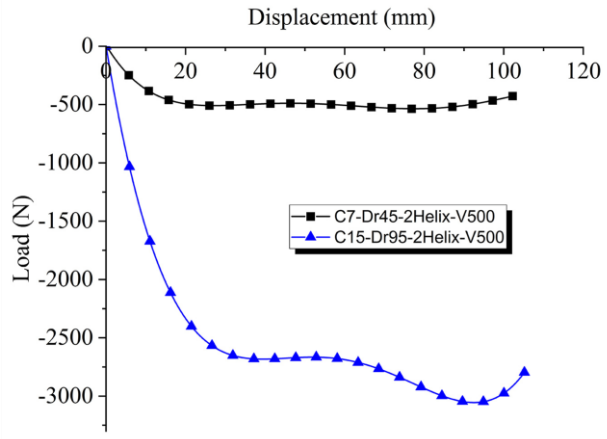


شکل ۱۷. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

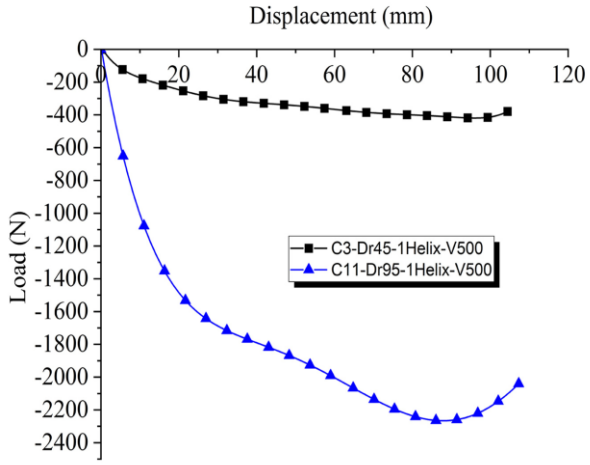
مشخص است که با افزایش درصد تراکم نسبی خاک از ۴۵ به ۹۵ درصد، ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، که دلیل آن نزدیک‌شدن ذرات خاک نسبت به هم (متراکم‌بودن خاک) و گیرداری بیشتر بین خاک و شمع است.



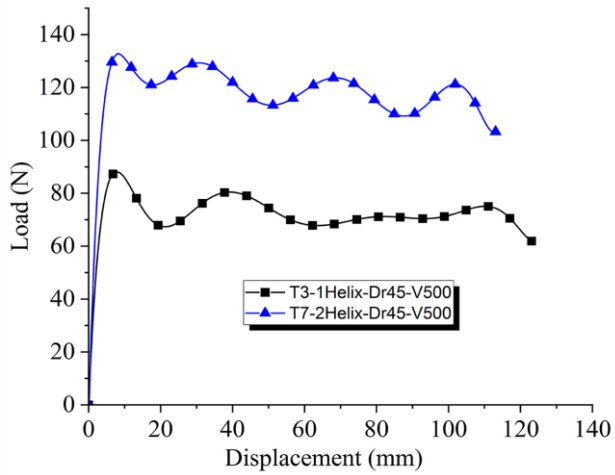
شکل ۱۸. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



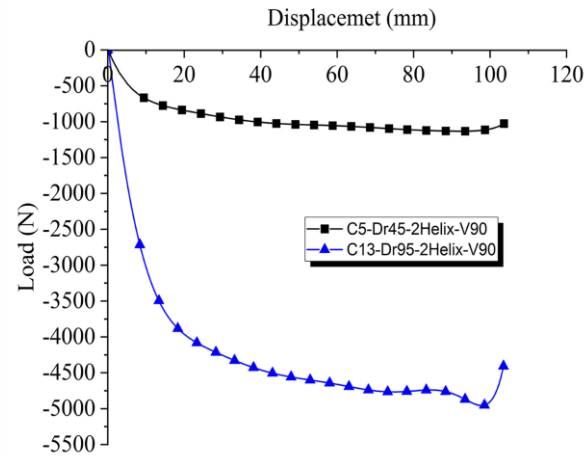
شکل ۲۱. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



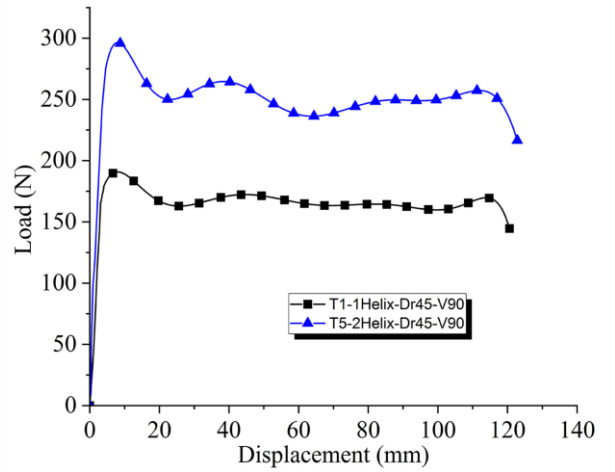
شکل ۱۹. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری کششی شمع دوپره در سرعت بارگذاری۹۰ (mm/min).



شکل ۲۳. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



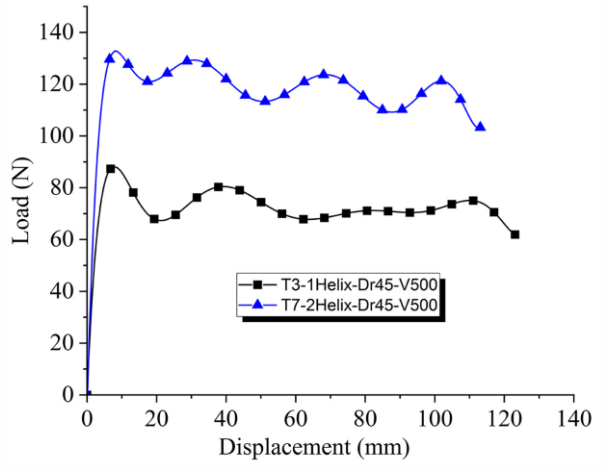
شکل ۲۰. تأثیر تراکم نسبی در ظرفیت باربری فشاری شمع دوپره در سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



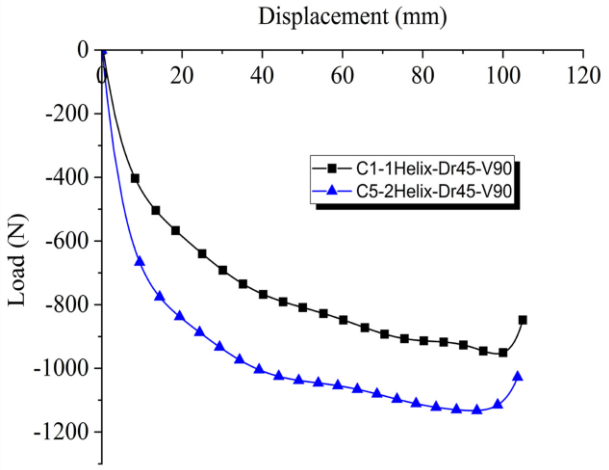
شکل ۲۲. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۳.۳ . تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی و فشاری

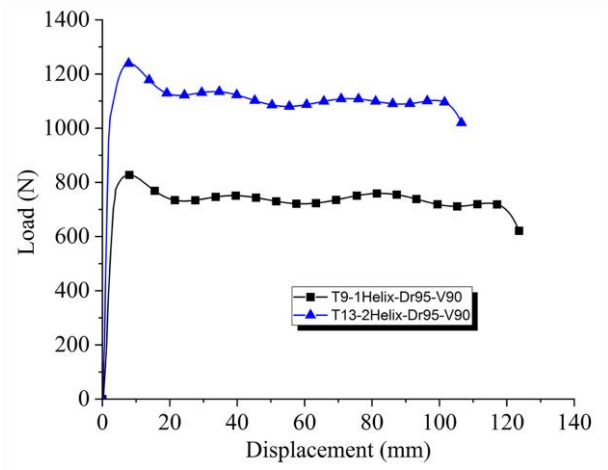
نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها برای تأثیر تعداد پره نشان داده است که با افزایش تعداد پره (از ۱ به ۲)، ظرفیت کششی شمع پیچشی دوپره نسبت به تک‌پره در تراکم‌های نسبی۴۵ و ۹۵ درصد در حدود ۵۰ تا ۵۴ درصد افزایش یافته است (شکل‌های ۲۲ الی ۲۵). در حالی که همین مقایسه برای تأثیر تعداد پره در ظرفیت فشاری در حدود ۱۸و بیشینه‌ی ۳۸ درصد بوده است (شکل‌های ۲۶ الی ۲۹). نتایج نشان می‌دهند ظرفیت‌های باربری کششی و فشاری شمع دوپره نسبت به شمع تک‌پره (افزایش تعداد پره از ۱ به ۲)، باعث افزایش ظرفیت باربری شده است؛ که دلیل آن وجود پره‌ی دوم و ایجاد گیرداری بیشتر شمع در خاک است.



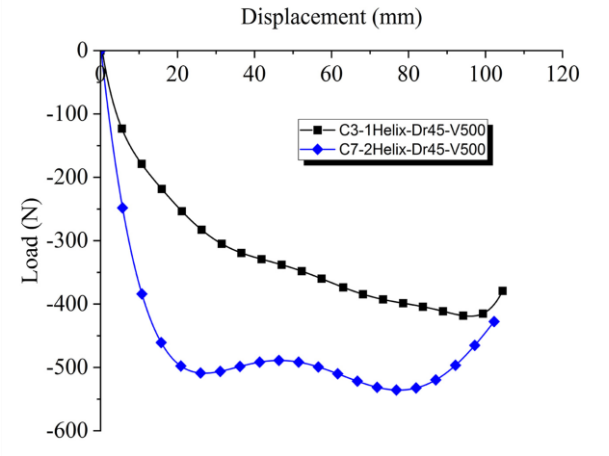
شکل ۲۳. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



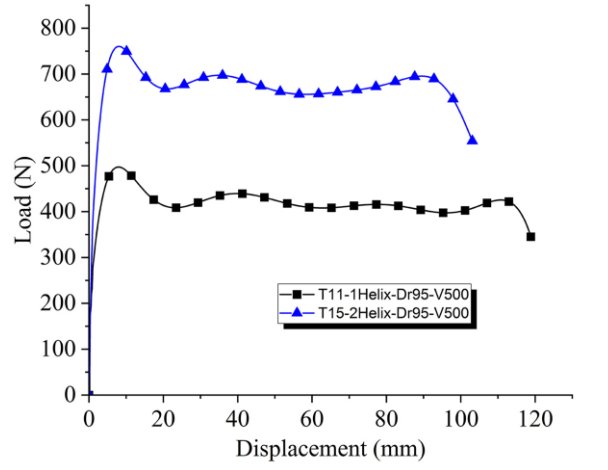
شکل ۲۶. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



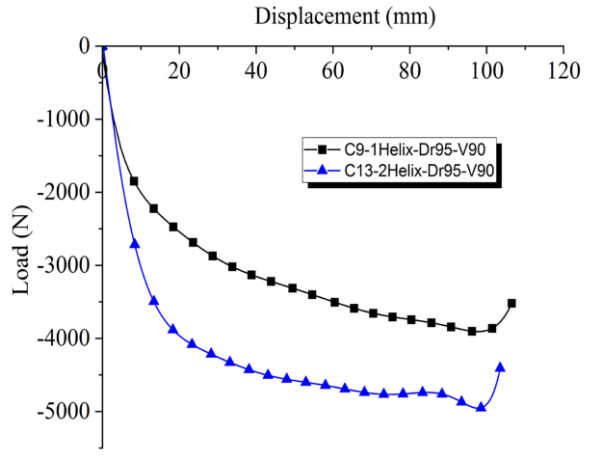
شکل ۲۴. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).



شکل ۲۷. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع در تراکم نسبی ۴۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



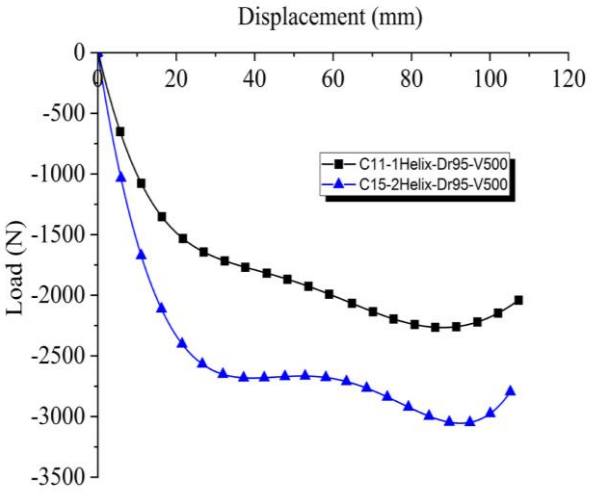
شکل ۲۵. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری کششی شمع در تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).



شکل ۲۸. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری تک‌پره تراکم نسبی ۹۵٪ و سرعت بارگذاری ۹۰ (mm/min).

۴.۳. نسبت ظرفیت کششی به فشاری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، که جزئیات آن در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است، ظرفیت نهایی کششی شمع تک‌پره حدود ۲۰٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۵ درصد است؛ در حالی که در شمع دوپره، ظرفیت نهایی کششی حدود ۲۵٪ ظرفیت نهایی فشاری در تراکم‌های نسبی ۴۵ و ۹۵ درصد است، که این موضوع نشان می‌دهد پیش‌بینی رفتار کششی در مقابل پیش‌بینی رفتار فشاری کار دشوارتری است، زیرا در هنگام آزمایش‌های کششی، پره‌ها در محدوده‌ی خاک دست‌خورده‌ی بالای خود بررسی شده‌اند، در حالی



شکل ۲۹. تأثیر تعداد پره در ظرفیت باربری فشاری شمع تک‌پره در تراکم نسبی ۹۵٪ وسرعت بارگذاری ۵۰۰ (mm/min).

که در آزمایش‌های فشاری، عملکرد پره‌ها در برابر خاک دست‌خورده زیر آن‌هاست.

۴. نتیجه‌گیری

شمع‌های پیچشی به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، در سراسر جهان به شکل روزافزون استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مونوتونیک که با کمک دستگاه مدل‌سازی فیزیکی ۱gانجام شده است، تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله: سرعت بارگذاری، تراکم نسبی خاک، و تعداد پره در ظرفیت‌های کششی و فشاری شمع‌های پیچشی تک‌پره و دوپره تجزیه و تحلیل شده است، که نتایج اصلی به این شرح هستند:

۱. با افزایش سرعت بارگذاری، ظرفیت‌های نهایی کششی و فشاری شمع‌های تک‌پره و دوپره تا بیشینه‌ی حدود ۵۶٪ کاهش پیدا کرده است، که می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش سرعت بارگذاری، سرعت جابجایی شمع در خاک بیشتر می‌شود، بنابراین سبب ایجاد گیرداری کمتر بین خاک و شمع می‌شود.

۲. با افزایش تراکم نسبی خاک، ظرفیت‌های نهایی کششی و فشاری تا بیشینه‌ی حدود ۴۶۸٪ افزایش یافته است، که دلیل آن نزدیک‌شدن ذرات خاک به هم و به‌تبع گیرداری بیشتر بین خاک و شمع بوده است.

۳. با افزایش تعداد پره (از ۱ به ۲)، ظرفیت‌های نهایی و کششی تا بیشینه‌ی حدود ۵۴٪ افزایش یافته است. مشخص است که با افزایش تعداد پره، شمع

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های کششی.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)	Ultimate tension capacity (Q_t)
T 1	45%	Single-helix	90	190.82
T 1 (Repeat test)	45%	Single-helix	90	185.78
T 3	45%	Single-helix	500	87.99
T 3 (Repeat test)	45%	Single-helix	500	84.76
T 5	45%	Double-helix	90	296.4
T 5 (Repeat test)	45%	Double-helix	90	284.46
T 7	45%	Double-helix	500	132.79
T 7 (Repeat test)	45%	Double-helix	500	127.1
T 9	95%	Single-helix	90	827.47
T 9 (Repeat test)	95%	Single-helix	90	803.31
T 11	95%	Single-helix	500	497.25
T 11 (Repeat test)	95%	Single-helix	500	479.2
T 13	95%	Double-helix	90	1238.91
T 13 (Repeat test)	95%	Double-helix	90	1197.73
T 15	95%	Double-helix	500	760.27
T 15 (Repeat test)	95%	Double-helix	500	716.46

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های فشاری.

Test ID	Relative density (Dr) (%)	Helical pile model	Speed of test (V) (mm/min)	Ultimate tension capacity (Q_t)
C 1	45%	Single-helix	90	954.12
C 1 (Repeat test)	45%	Single-helix	90	942.26
C 3	45%	Single-helix	500	419.21
C 3 (Repeat test)	45%	Single-helix	500	404.33
C 5	45%	Double-helix	90	1132.77
C 5 (Repeat test)	45%	Double-helix	90	1108.56
C 7	45%	Double-helix	500	535.78
C 7 (Repeat test)	45%	Double-helix	500	530.12
C 9	95%	Single-helix	90	3906.2
C 9 (Repeat test)	95%	Single-helix	90	3849.52
C 11	95%	Single-helix	500	2266.18
C 11 (Repeat test)	95%	Single-helix	500	2181.18
C 13	95%	Double-helix	90	4955.52
C 13 (Repeat test)	95%	Double-helix	90	4885.28
C 15	95%	Double-helix	500	3055.12
C 15 (Repeat test)	95%	Double-helix	500	2985.25

پیچشی در خاک بیشتر مهار می‌شود؛ بنابراین، به‌موجب آن گیرداری بین خاک و شمع با وجود پره‌ی دوم افزایش می‌یابد و به تبع آن، ظرفیت نهایی و کششی شمع پیچشی تیز افزایش می‌یابد.

۴. از بین ۳ پارامتر مختلفی که بررسی و تجزیه و تحلیل شده‌اند، مشخص است که تأثیر تراکم نسبی خاک در ظرفیت باربری شمع پیچشی بیشتر بوده است.

۵. با توجه به نتایج مشخص است که ظرفیت کششی در تمام آزمایش‌ها بیشتر از ظرفیت فشاری بوده است، که به‌دلیل دست‌خورده‌شدن خاک بالای پره در هنگام نصب شمع است. بنابراین، در آزمایش‌های کششی (حرکت شمع رو به بالا)، خاک دست‌خورده‌ی بالای پره‌ی شمع باعث مقاومت می‌شود؛ در حالی که در آزمایش‌های فشاری (حرکت شمع رو به پایین)، خاک دست‌نخورده‌شده زیر پره مقاومت می‌کند، لذا ظرفیت فشاری شمع از ظرفیت کششی بیشتر خواهد بود.

References- منابع

1. Spagnoli, G. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. 2020.A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. *Marine Georesources and Geotechnology*, *38*(9), pp. 1013–1036. https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1729905.
2. Perko, H.A. 2009. *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons.
3. Pack, J.S. 2009. Practical design and inspection guide for helical piles and helical tension anchors. *IMR, Inc., Denver, Colorado, Revision*, 2.
4. Kurian, N.P. and Shah, S.J. 2009 .Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method. *Canadian Geotechnical Journal*, *46*(6), pp. 627–638. https://doi.org/10.1139/T09-008.
5. Silva, B.C. 2014 .Estimation of uplift capacity of helical anchors based on SPT test. M. Sc. Thesis, Department of Geotechnical Engineering, University of São.
6. Tsuha, C. de H.C. 2013 .Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors.*Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, 18.
7. Perez, Z.A. 2018 .Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, *55*(8), pp. 1067–1080. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0137.
8. Sharma, M., Samanta, M. and Sarkar, S. .Laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal*, *54*(10), pp. 1482–1495. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0243.

9. Liu, H., Zubeck, H.K. and Schubert, D.H. .Finite-element analysis of helical piers in frozen ground. *Journal of Cold Regions Engineering*, *21*(3), pp. 92–106. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2007)21:3(92).

10. Spagnoli, G. and Gavin, K. 2015 .Helical piles as a novel foundation system for offshore piled facilities. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. OnePetro. https://doi.org/10.2118/177604-MS.

11. Al-Baghdadi, T.A. 2015.Modelling of laterally loaded screw piles with large helical plates in sand. in *Frontiers in offshore geotechnics III: proceedings of the 3rd international symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2015)*. Taylor & Francis Books Ltd, pp. 503–508.

12. Fateh, A.M.A., Eslami, A. and Fahimifar, A. 2017. Direct CPT and CPTu methods for determining bearing capacity of helical piles. *Marine georesources & geotechnology*, *35*(2), pp. 193–207. https://doi.org/10.1080/1064119X.2015.1133741.

13. Spagnoli, G. 2018 .A sensitivity analysis on the parameters affecting large diameter helical pile installation torque.depth and installation power for offshore applications', *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, *12*(3), pp. 171–185. https://doi.org/10.1080/19375247.2019.1595996.

14. Khazaei, J. and Eslami, A. 2016 .Geotechnical Behavior of Helical Piles Via Physical Modeling by Frustum Confining Vessel (FCV). *International Journal of Geography and Geology*, *5*(9), pp. 167–181. https://doi.org/10.18488/journal.10/2016.5.9/10.9.167.181.

15. Di Bernardo, G. 2012 .Helical pile Deck foundation. *New Jersey Deck Boulder, USA* .

16. Merifield, R.S. 2011 .Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *137*(7), pp. 704–716. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000478.

17. Zare, M. 2013 .Frustum confining vessel (FCV) for investigation of deep foundations performance. in *Proc., 38th Annual Int. Conf. on Deep Foundation, Deep Foundation Institute, Phoenix, AZ*, pp. 545–553.

18. Ali, A.S., Salim, N.M. and Baqir, H.H. 2022 .The Performance of Taper Helical Pile Embedded in Loose Sand Under Uplift Static and Cyclic Load Using 3D-Finite Element Analysis. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 12033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012033.

19. Abbas, H.O. and Ali, O.K. 2020 .Parameters affecting screw pile capacity embedded in soft clay overlaying dense sandy soil. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 12117. https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012117.

20. Jamill, A.S. and Abbas, H.O. 2021.Effect of Screw Piles Spacing on Group Compressive Capacity in Soft Clay. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1076*(1), p. 012098. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1076/1/012098.

21. Hoseinpour, R., Keramati, M. and de Hollanda Cavalcanti Tsuha, C. 2023 .Effect of the Addition of a Second Helix on the Helical Pile Performance in Sand. *International Journal of Civil Engineering*, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/s40999-023-00893-7.

Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.110-129

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu

Research Note

Economic, Environmental, and Social Assessment of Concrete Pavement Life Cycle: A Literature Review

Mohammad Saleh Entezari, Rashid Tanzadeh* and Fereidoon Moghaddas Nejad

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* corresponding author:(rashidtanzadeh@aut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 February 2024

Revised: 27 July 2024

Accepted: 30 July 2024

Keywords:

Life cycle sustainability
pavement management,
physical modeling,
environmental life cycle analysis,
social life cycle assessment,
life-cycle cost analysis.

Abstract

Concrete is extensively utilized in road pavement construction, including continuously reinforced, jointed plain, jointed reinforced, precast, and eco-block concrete pavements. However, the pavement industry faces significant challenges, such as high construction and maintenance costs, substantial energy consumption, pollution emissions during material production, and adverse impacts of work zones on workers and communities. These multifaceted impacts are evaluated through economic, environmental, and social life-cycle assessment (LCA) tools, forming the basis of life-cycle sustainability assessment (LCSA). This article reviews the historical development of LCSA and outlines its methodological steps based on existing standards. A critical review of concrete pavement LCSA studies examines their scope, including analysis pillars, life-cycle stages, unit processes, pavement types, tools, life-cycle inventory (LCI), and impact categories. Key gaps are identified: only 25% of studies address the use phase, while a mere 20% consider the end-of-life stage. Within the use phase, common focuses include roughness-induced fuel consumption (10% of studies), vehicle operation costs (10%), and work zone impacts (traffic delays: 15%; increased fuel consumption: 10%). Notably, pavement albedo, carbonation, and lighting effects were analyzed in only one study, while CO_2 was the most frequent LCI item (11 references). To address these limitations, the study proposes a standardized framework for scope definition in concrete pavement LCSA, ensuring comprehensive inclusion of unit processes across all life-cycle stages to enhance result reliability. The article concludes with recommendations for future research to advance LCSA methodologies.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Entezari, M.S., Tanzadeh, R. and Moghaddas Nejad, F. 2025. Economic, Environmental, and Social Assessment of Concrete Pavement Life Cycle: A Literature Review, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.110-129
https://doi.org/10.24200/J30.2024.63847.3301

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی: مرور ادبیات

محمدصالح انتظاری، رشید تن‌زاده* و فریدون مقدس‌نژاد

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (rashidtanzadeh@aut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۵/۰۹

واژگان کلیدی:

ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر،
مدیریت روسازی بتنی،
ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر،
ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر ،
ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی‌عمر.

چکیده

در ساخت انواع رویه‌های روسازی راه، از جمله رویه‌های مسلح پیوسته، ساده‌ی درزدار، مسلح درزدار، پیش‌ساخته، و بلوک‌های بازیافتی به‌طورگسترده‌ای از بتن استفاده شده است. هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری، مصرف بالای انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح، و همچنین آثار منفی محیط کاری در کارگران، و جامعه‌ی محلی از مهم‌ترین چالش‌های دست‌اندرکاران صنعت روسازی راه‌ها هستند. با کاربرد شاخص‌های ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی، شاخص پایداری چرخه‌ی عمر قابل تعیین است. در این مقاله، با مروری بر تاریخچه‌ی شکل‌گیری ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر، مراحل مختلف اجرای آن براساس استانداردهای موجود معرفی شده است. همچنین پژوهش‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی بررسی شده است. این چهارچوب دربرگیرنده‌ی فرآیندهایی است که باید در مراحل چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شوند. اعمال چهارچوب مذکور در تحلیل، مانع حذف فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر از تحلیل پایداری می‌شود و می‌توان نتایج را با درصد اطمینان بالاتری پذیرفت.

۱. مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در ساخت راه‌هاست. ضدحریق‌بودن، عمر طولانی، و هزینه‌های پایین حمل‌ونقل، از دلایل اصلی کاربرد بتن بوده است. رویه‌های بتنی را می‌توان در دو دسته‌ی درجاریز و پیش‌ساخته طبقه‌بندی کرد. در رویه‌های درجاریز، بتن‌ریزی در محل پروژه انجام می‌شود. یکی از انواع رویه‌های درجاریز، رویه‌ی بتنی مسلح پیوسته (CRCP)[1] است. از مزایای رویه‌ی بتنی CRCP، که در آن از شبکه‌ی آرماتور استفاده شده است، عبارت‌اند از: عمر مفید بالا، قابلیت استفاده در مناطق پر ترافیک، و نیاز بسیار کم به اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات در طول چرخه‌ی عمر (LCSA)[2]. رویه‌ی بتنی ساده‌ی درزدار (JPCP)[3] و رویه‌ی بتنی مسلح درزدار (JRCP)[4] دو نوع دیگر از رویه‌های بتنی هستند، که در آن‌ها به ازاء هر ۳ الی ۶ متر درزهایی در نظر گرفته می‌شود تا از پدیده‌ی پیچیدگی و تابیدگی بتن جلوگیری شود.[1] در رویه‌های درجاریز از میلگردهای دوخت عرضی برای اتصال دال‌های مجاور به یکدیگر و از داول‌ها در جهت طول برای انتقال بار به دال‌های مجاور استفاده می‌شود. تفاوت آن‌ها در به‌کارگیری شبکه‌ی آرماتور در دال‌های بتنی و مسلح‌ساختن آن‌هاست.

از طرفی، در رویه‌های غیردرجاریز، محل بتن‌ریزی و موقعیت نهایی اجرا متفاوت اند؛ که یکی از انواع آن‌ها، رویه‌ی بتنی پیش‌ساخته (PCP)[5] است، که ساخت یا تعمیر آن سرعت بالایی دارد، عمل‌آوری آن در شرایط مناسب‌تر انجام می‌شود، و در نتیجه مرغوب‌تر است. همچنین، در شرایط آب‌وهوایی مختلف می‌توان آن را اجرا کرد، امکان تولید انبوه و انبارسازی پیش از شروع پروژه را دارد و همچنین معضل گسیختگی زودهنگام بتن در نتیجه‌ی روش‌های غلط اجرا در آن مرتفع شده‌است.[2] از انواع دیگر رویه‌های غیردرجاریز، روسازی با بلوک‌های بتنی بازیافتی است. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بلوک‌های اخیر، عبارت‌اند از: پسماند بازیافت‌شده‌ی ریزدانه و درشت‌دانه، شیشه‌ی بازیافت‌شده‌ی ریزدانه، سیمان، ماسه‌ی رودخانه‌ای، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه، خاکستر بادی، و غیره. اجزاء مذکور با درصدهای مختلفی در فرآیندهای تولید با یکدیگر ترکیب و درنهایت، برای ایجاد زیرساخت‌های راه استفاده می‌شوند.[3]

امروزه درنظرگرفتن شاخص پایداری در صنایع مختلف به یک اصل مهم تبدیل شده است. کاربرد ابزارهای تحلیل پایداری موردتوجه دست‌اندرکاران صنایع مختلف، از جمله: ساختمان‌سازی، راه‌سازی، بازیافت بتن، تولید سیمان، تولید کودهای شیمیایی، و جمع‌آوری ضایعات الکترونیکی قرار گرفته است.[4] از جمله مخاطرات صنعت روسازی راه عبارت‌اند از: هزینه‌های چشمگیر ساخت و نگهداری، مصرف مقدار قابل‌توجه انرژی، تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید

[1] Continuously Reinforced Concrete Pavement
[2] Life Cycle Sustainability Assessment
[3] Jointed Plain Concrete Pavement
[4] Jointed reinforced Concrete Pavement
[5] Precast Concrete Pavement

استناد به این مقاله:

انتظاری، محمدصالح، تن‌زاده، رشید، و مقدس‌نژاد، فریدون، ۱۴۰۴. ارزیابی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی: مرور ادبیات. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص. ۱۱۰-۱۲۹. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63847.3301

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

مصالح، و همچنین آثار منفی اجتماعی در کارگران و اجتماع محلی ناشی از محیط کاری خطرناک. آثار گسترده‌ی اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی موجود در صنعت روسازی، ارزیابی پایداری روسازی در مراحل چرخه‌ی عمر را لازم ساخته است.[۵]

الالول[1] و همکاران (۲۰۲۱)، روش‌های تحلیل هزینه‌های چرخه‌ی عمر را برای روسازی‌های دارای مواد بازیافتی یا طبیعی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مرور کرده‌اند.[۶] لی[2] و همکاران (۲۰۱۹)، با تمرکز بر به‌کارگیری پسماندهایی، از جمله: شیشه، سرباره، لاستیک، تراشه‌ها، و بام‌پوش‌های آسفالتی در روسازی، مطالعات منتشرشده در زمینه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی چرخه‌ی عمر را تحلیل کرده‌اند.[۷] آذری‌جعفری و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ارزیابی مداخلات زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی و بتنی در چرخه‌ی عمر را مرور کرده‌اند.[۸] بررسی مطالعات مروری نشان داده است که علی‌رغم بررسی‌های انجام‌شده بر روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر به‌صورت‌کلی، پژوهش جامعی در حوزه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی منتشر نشده است. در مطالعات منتشرشده در زمینه‌ی ارزیابی چرخه‌ی عمر، تمرکز بر یک نوع روسازی مشخص قرار نگرفته است.

در این راستا، نوشتار حاضر با هدف بررسی و تحلیل مطالعات پیشین، فقط برای رویه‌های بتنی، شناسایی دستاوردها و نواقص تحقیقاتی موجود و همچنین ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده، نگارش شده است. ابتدا مفهوم پایداری چرخه‌ی عمر به‌صورت کلی تعریف شده است. سپس کاربرد آن در صنعت روسازی بررسی شده است. در بخش سوم، به شرح روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر و مراحل مختلف آن پرداخته شده است. بخش چهارم، در برگیرنده‌ی مرور ادبیات موجود در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی بوده و در بخش پنجم، به بررسی و مقایسه‌ی روش‌های تحلیل مطالعات پیشین، ابزارهای استفاده‌شده در آن‌ها، تبیین نواقص مطالعاتی، و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است. همچنین، در آن، چهارچوبی در راستای تعریف گستره‌ی تحلیل پایداری پیشنهاد شده است، که به‌صورت اختصاصی برای رویه‌های بتنی قابل‌استفاده است. در بخش آخر، نتایج و یافته‌های پژوهش بیان شده است.

۲. مفهوم پایداری[3] چرخه‌ی عمر

براساس گزارش سازمان ملل متحد در سال ۱۹۸۷ با عنوان "آینده ی مشترک ما"، پایداری دربرگیرنده‌ی سه رکن اقتصاد، محیط‌زیست، و جامعه است.[۹] در این راستا، ارزیابی چندبُعدی پایداری چرخه‌ی عمر به سه بخش ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر (C-LCA)[4]، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (E-LCA)[5]، و ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر (S-LCA)[6] تقسیم شده است.[۱۰] ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر، قدیمی‌ترین ابزار در تحلیل پایداری است. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده معرفی و در راستای کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز استفاده شده است.[۱۱] این ابزار با نگاهی کلان، به ارزیابی هزینه‌های یک خدمت یا محصول در تمام مراحل چرخه‌ی عمر آن پرداخته و فقط به هزینه‌ی اولیه‌ی آن محدود نشده است.[۶]

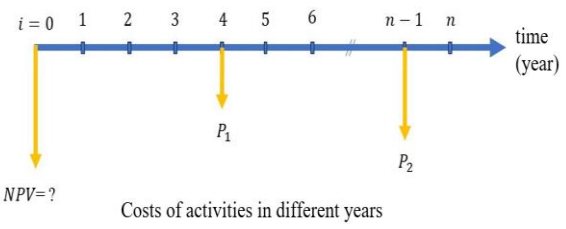
در راستای استفاده از ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCCA) در مقایسه‌ی چند محصول یا فرآیند تولید، ابتدا باید دوره‌ی تحلیل (بازه‌ی زمانی که طی آن راهبردهای پیشنهادی با یکدیگر مقایسه می‌شوند)، هزینه‌های مربوط به هر راهبرد، و زمان پرداخت آن‌ها تعیین شود. در گام بعدی می‌توان از شاخص‌های اقتصادی مختلف در راستای ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مطرح‌شده استفاده کرد. ارزش خالص فعلی (NPW)[7] و هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه (EUAC)[8] از رایج‌ترین شاخص‌های اقتصادی هستند. ارزش خالص فعلی، شاخصی است که جریان‌های ورودی و خروجی نقدینگی در آینده را به ارزش پولی خالص آن‌ها در سال مبدأ تبدیل می‌کند. شاخص هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه، هزینه‌های اعلام‌شده برای سال‌های مختلف را به‌صورت یکنواخت و مساوی بر تمام سال‌های دوره‌ی تحلیل پخش می‌کند. این پارامتر در حالت تخصیص سالانه‌ی بودجه، مناسب‌تر است.[۱۲] با توجه به ارزش متغیر پول در سال‌های مختلف، مقایسه‌ی مستقیم هزینه‌های پروژه‌ها در نقاط زمانی مختلف از چرخه‌ی عمرشان ناممکن است. در نتیجه، متغیری با عنوان نرخ تنزیل تعریف شده است، که با استفاده از آن، مقدار هزینه‌ها در سال‌های مختلف به ارزش فعلی‌شان در سال مبدأ تنزیل پیدا می‌کند. در استفاده از هر یک از دو شاخص اقتصادی معرفی‌شده، پارامتر نرخ تنزیل استفاده شده است.[۱۳] متغیر ارزش خالص فعلی در رابطه‌ی ۱ و متغیر هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه در رابطه‌ی ۲ معرفی شده است:

$$NPV = FC \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (۱)$$

$$EUAC = NPV \cdot \left[\frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (۲)$$

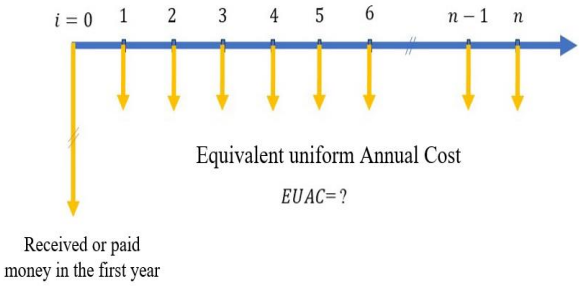
که در آن‌ها، FC هزینه‌ی مربوط به یک فعالیت در نمودار زمانی، n فاصله‌ی زمانی فعالیت تا سال مبدأ، و i نرخ تنزیل هستند. نمودارهای مربوط به متغیر ارزش خالص فعلی و هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

ارزیابی چرخه‌ی عمر یا ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (LCA یا E-LCA) برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ معرفی شده است. سپس در سال ۱۹۹۷، در قالب استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ منتشر و سپس در سال ۲۰۰۶ به‌روزرسانی شده



شکل ۱. محاسبه‌ی متغیر ارزش خالص فعلی برای هزینه‌ی فعالیت‌های انجام‌شده در سال‌های مختلف (به‌عنوان مثال، دو فعالیت در دو سال مختلف).

[1] Alaloul
[2] Li
[3] Sustainability
[4] Cost- Life Cycle Assessment
[5] Environment- Life Cycle Assessment
[6] Social- Life Cycle Assessment
[7] Net Present Worth
[8] Equivalent Uniform Annual Cost



شکل ۲. هزینه‌ی معادل یکنواخت سالیانه
به ازاء مبلغ پرداخت‌شده در سال مبدأ (یا سایر سال‌ها).

است.[۱۱] طبق تعریف استاندارد اخیر، LCA ابزاری است که برای ارزیابی جنبه‌ها و آثار زیست‌محیطی یک محصول در تمام چرخه‌ی عمر آن استفاده شده است. بر این اساس، LCA شامل چهار مرحله است: ۱) تعریف هدف و گستره[۱]، ۲) تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر (LCIA)[۲]، ۳) ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر[۳]، و ۴) تفسیر نتایج[۴]. تصمیم‌گیران با به خدمت‌گرفتن LCA، مراحلی از چرخه‌ی عمر که بیشترین آثار زیست‌محیطی را دارد، شناسایی و به اصلاح آن‌ها می‌پردازند. در نتیجه، اتلاف مواد خام، مصرف انرژی، تولید زباله، هزینه‌ی دفع پسماند، و مخاطرات سلامتی کاهش یافته و این در حالی بوده است که بهره‌وری فرآیند افزایش یافته است.[۱۴] امروزه از LCA به‌طورگسترده‌ای در راستای برچسب‌گذاری زیست‌محیطی محصولات، برنامه‌ریزی راهبردی، فرهنگ‌سازی، آموزش و جلب رضایت مشتری، توسعه یا بهبود فرآیند، و طراحی محصول در کشورهای مختلف جهان استفاده شده است.[۳] تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر به سه روش انجام‌پذیر است:

۱- تحلیل فرآیندی، که در آن پروژه یا محصول تحت مطالعه، به فرآیندهای واحد تقسیم و در گام بعدی، ورودی‌ها و خروجی‌های زیست‌محیطی بیشتر فرآیندهای موجود در مرزهای سیستم تحلیل می‌شوند. پیچیدگی اجرای تحلیل در محصولاتی با فرآیندهای بسیار زیاد و همچنین عدم امکان واردکردن تمامی فرآیندها در تحلیل، از معایب روش تحلیل فرآیندی است.

۲- تحلیل ورودی- خروجی، روش پیشرفته‌تری است که شامل تمامی زنجیره‌ی تأمین یک محصول است و در آن از انبوه اطلاعات گردآوری‌شده طی یک سال در اقتصاد یک کشور در راستای ارزیابی مداخلات زیست‌محیطی یک محصول استفاده می‌شود. در روش مذکور، که براساس روش "ورودی-خروجی‌های اقتصادی" است، ورودی‌ها و خروجی‌های زیست‌محیطی محصولات از جدول‌های موجود در پایگاه‌های داده بازخوانی می‌شود. داده‌های ارائه‌شده در پایگاه‌های مذکور داده برحسب مقادیر متوسط آن صنعت است، که ممکن است باعث ایجاد خطا در تحلیل شود.

۳- تحلیل ترکیبی، از ادغام دو روش تحلیل فرآیندی و روش تحلیل ورودی-خروجی، ایجاد شده است.[۱۵]

آخرین بخش در تحلیل پایداری، یعنی ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر (S-LCA)، روشی است در راستای گردآوری، تحلیل و اطلاع‌رسانی آثار اجتماعی مربوط به یک محصول یا خدمت. هدف نهایی از ارزیابی S-LCA ، راهنمایی تصمیم‌گیران در راستای انتخاب محصول یا خدمت مطلوب براساس تأثیر آن در زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان، و جامعه است. برخلاف ارزیابی آثار زیست‌محیطی، بسیاری از شاخص‌های آثار اجتماعی، کیفی است، که سنجش آن‌ها را دشوار کرده است. یکی از سخت‌ترین مراحل در انجام تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر، جمع‌آوری داده‌هاست. روش ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر، برای نخستین بار در نشریه‌ی برنامه‌ی زیست‌محیطی سازمان ملل متحد و جامعه‌ی شیمی و سم‌شناسی زیست‌محیطی با عنوان "به‌سوی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر" معرفی شده است.[۱۶]

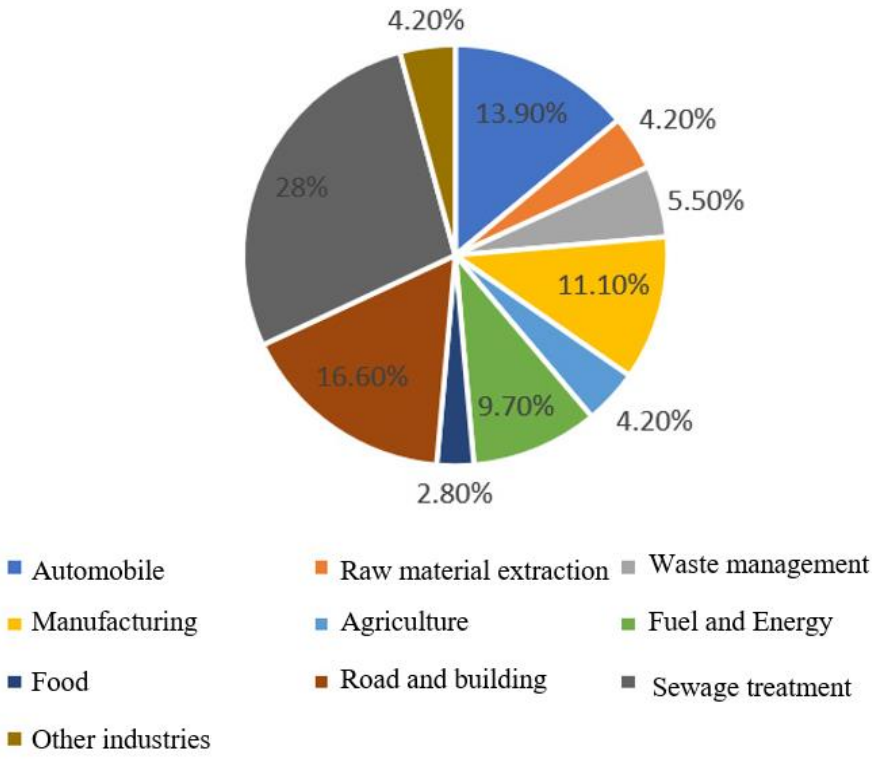
ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی است که سه بخش مذکور را به یکدیگر متصل می‌کند. این مفهوم نسبتاً جدید بوده و هنوز به‌نحوی جامع استفاده نشده است. در بیشتر تحلیل‌ها از ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر چشم‌پوشی می‌شود و فقط به ارزیابی چرخه‌ی عمر و ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCA و LCCA) پرداخته می‌شود.[۱۷] ارزیابی شاخص پایداری چرخه‌ی عمر یک پروژه (LCSA) در مواردی از جمله: تعریف مرزهای یکپارچه برای سیستم‌ها، توسعه‌ی پایگاه‌های منسجم داده‌ها برای بررسی‌های اجتماعی و اقتصادی، تعریف طبقه‌بندی‌های یکپارچه در راستای تحلیل آثار با هدف مقایسه‌پذیری مطالعات مختلف، توسعه‌ی روش‌هایی در راستای پیاده‌سازی تحلیل عدم قطعیت و راهبردهای اطلاع‌رسانی، قابلیت توسعه و گسترش داشته است. همچنین لازم است تا مطالعات موردی بیشتری انجام شود تا درک بهتری از ارتباط میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی ایجاد شود و ادغام نتایج هر سه رکن در قالب تحلیلی یکپارچه امکان‌پذیر شود.[۱۸]

از میان پژوهش‌های منتشرشده با موضوع ارزیابی شاخص پایداری چرخه‌ی عمر یک پروژه (LCSA)، ٪۳۲ در راستای ارزیابی محصول، ٪۲۳ در راستای ارزیابی فرآیندها، و ٪۱۴ هم با هدف ارزیابی خدمات انجام شده‌اند.[۱۸] همچنین در پژوهش‌های مذکور، موضوعات مختلفی مطرح شده است، که سهم هر یک در شکل ۳ مشاهده می‌شود. بر این اساس، بیشترین تحلیل‌ها در زمینه‌ی انواع سوخت و انرژی انجام شده‌اند (٪۲۸). همچنین دیگر صنایعی که بیشترین مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند، به ترتیب عبارت‌اند از: راه و ساختمان (٪۱۶/۶)، خودرو (٪۱۳/۹)، تولید محصولات و قطعات (٪۱۱/۱)، پسماند (٪۹/۷)، تصفیه‌ی آب‌وفاضلاب (٪۵/۵)، کشاورزی (٪۴/۲)، استخراج منابع طبیعی (٪۴/۲)، دیگر موارد (٪۴/۲)، و صنایع غذایی (٪۲/۸).[۱۸]

۱.۲. پایداری چرخه‌ی عمر در روسازی راه‌ها

کاربرد شاخص پایداری در صنعت روسازی راه، موردتوجه مدیران و دست‌اندرکاران کشورها قرار گرفته است.[۵] اولین مرحله‌ی چرخه‌ی عمر روسازی، استخراج مواد خام، حمل به کارخانه، و سپس تولید محصول است. همچنین در صورت استفاده از مصالح مصنوعی، این مراحل شامل: تولید مصالح در موقعیت‌هایی مانند معادن آغاز می‌شود و فرآوری مواد با استفاده از ماشین‌آلات کارخانجات را در پی خواهد داشت. استفاده از مصالح ساختمانی و راه‌سازی دست دوم،که ظرفیت زیادی برای دفن آن‌ها در مدفن‌ها هم وجود مصنوعی در کارخانه، حمل، و فرآوری آن است. استخراج منابع طبیعی با فعالیت ندارد، یک روش جایگزین به جای استفاده از منابع طبیعی است. دومین مرحله‌ی چرخه‌ی عمر روسازی، یعنی: مرحله‌ی ساخت، شامل انتقال مصالح به

[1] Goal and scope definition
[2] Life Cycle Inventory Analysis
[3] Life Cycle Impact Assessment
[4] Interpretation of results



شکل ۳. سهم صنایع مختلف در مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر.

موقعیت پروژه، و استفاده از ماشین‌آلات و نیروی انسانی است. بهره‌گیری از ماشین‌آلات جهت احداث روسازی مستلزم مصرف مقدار قابل توجه سوخت است. سومین مرحله از چرخه‌ی عمر روسازی، بهره‌برداری و استفاده است، که در آن شرایط کاربران راه و وسائط نقلیه‌ی آن‌ها مد نظر قرار گرفته می‌شود. وضعیت نامطلوب رویه‌ی راه منجر به افزایش استهلاک وسائط نقلیه، رشد مصرف سوخت، و افزایش احتمال بروز تصادف‌ها، و نیز متضررشدن کاربران راه می‌شود. چهارمین مرحله یا همان مدیریت راه، عملیات نگهداری، تعمیرات و بازسازی روسازی توسط متولیان راه است. عملیات نگهداری روسازی در دو نوع پیشگیرانه (مانند درزگیری و لکه‌گیری) و اساسی (مانند بازسازی) اجرا می‌شود. با اجرای به‌موقع عملیات نگهداری، اضمحلال روسازی به تعویق می‌افتد و عمر خدمت‌دهی روسازی افزایش می‌یابد. مرحله‌ی پایانی عبارت است از: پایان عمر که شامل مواردی از جمله: تخریب روسازی، حمل، فرآوری پسماند، و درنهایت بازیافت یا انتقال به محل دفن است.[۱۹]

یکی از ویژگی‌های صنعت روسازی راه، استفاده گسترده‌ی آن در بیشتر کشورهای دنیاست. به‌عنوان مثال، در کشور کلمبیا فقط از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹، حدود ۴۰ هزار کیلومتر راه، بازسازی و حدود ۳ هزار کیلومتر راه جدید احداث شده است.[۲۰] همچنین در ایالات متحده‌ی آمریکا، حدود ۶/۵ میلیون کیلومتر راه موجود بوده و سالانه بیش از ۹ میلیارد تن- کیلومتر مسافر و بار توسط روسازی راه‌ها پشتیبانی شده است. این مقیاس‌های کلان، به تأمین مالی مناسبی نیاز دارد. هم اکنون بودجه‌ای بالغ بر ۴۰۰ میلیارد دلار در سراسر جهان، در راستای ساخت و نگهداری روسازی راه‌ها هزینه شده است. اما بودجه‌های در نظر گرفته‌شده با مبالغ قابل هزینه، فاصله‌ی معناداری دارد.[۲۱] در واقع بودجه‌های پایین، متولیان راه در کشورهای مختلف را در راستای تأمین مالی پروژه‌های راه به چالش کشانده است و انتظار می‌رود که چالش اخیر در ۱۰ تا ۲۰ سال آینده، بحرانی‌تر شود. در نتیجه، استفاده از ابزار ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر (LCCA) در راستای امکان‌سنجی اقتصادی گزینه‌های مختلف در بلندمدت و تعیین روسازی با هزینه‌ی بهینه، ضرورت داشته است.[۲۲]

ابزار LCCA، هزینه‌های مربوط به روسازی راه را در همه‌ی مراحل چرخه‌ی عمر آن بررسی کرده است. روسازی‌ها با نزدیک‌شدن به مراحل پایانی عمر خود، دچار خرابی‌های مختلفی می‌شوند؛ در نتیجه، تقاضا در راستای نگهداری و ترمیم آن‌ها افزایش یافته است. به این علت، تقریباً نیمی از بودجه‌ی سالانه‌ی زیرساخت‌های راه، صرف عملیات ترمیم و نگهداری شده است.[۲۱ و ۲۳] از LCCA در راستای ارزیابی توجیه اقتصادی پروژه‌های احداث روسازی استفاده شده است.[۲۴] این تحلیل با به‌کارگیری رویکرد قطعی یا احتمالی انجام شده است. در رویکرد قطعی، مقادیر ثابت و گسسته‌ای برای متغیرها در نظر گرفته می‌شود (به‌عنوان مثال، نرخ رشد سالانه‌ی ترافیک برابر با مقدار ۴٪ قرار داده می‌شود). اما معمولاً در تعیین مقادیر متغیرهای ورودی برای LCCA، مقداری عدم قطعیت وجود دارد. زمانی که در تحلیل پروژه‌ای، نیاز به پیش‌بینی مقادیر ورودی باشد، عدم قطعیت به‌علت‌هایی همچون: الف) غیرمترقبه‌بودن وقایع، ب) تمایز در ساخت‌وساز مناطق مختلف و عدم همخوانی داده‌های آن‌ها، پ) وجود عوامل انسانی که تخمین یا مدل‌سازی آن‌ها پیچیده است، و ت) فقدان داده‌های موردنیاز، ایجاد شده است. در این راستا، می‌توان از رویکرد احتمالاتی در ارزیابی هزینه‌ی چرخه‌ی عمر روسازی استفاده کرد.[۲۳]

در گام بعد، ارزیابی آثار زیست‌محیطی روسازی راه مطرح شده است. مصرف قابل‌توجه سوخت در ماشین‌آلات، حمل‌ونقل، اجرای فرآیندهای آلاینده‌ساز، مانند فرآیندهای خردایش و تولید مصالح، از مهم‌ترین دلایل آثار منفی پروژه‌های ساخت راه در سلامت انسان و محیط‌زیست است. به‌طورکلی، ۱۴٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در جهان از حوزه‌ی حمل‌ونقل نشأت گرفته است، که ۷۲٪ آن در چرخه‌ی عمر راه‌ها ایجاد شده است.[۲۵] از این مقدار، تا

یک چهارم آن مربوط به فرآیندهای تولید مصالح، انتقال، احداث روسازی، نگهداری، ترمیم، و نهایتاً بازیافت است.[۲۶] براساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، اولین مرحله در چرخه‌ی عمر روسازی، یعنی استخراج مصالح طبیعی، انتقال آن‌ها و سپس تولید مصالح، بالاترین میزان انتشار کربن را در مقایسه با سایر مراحل داشته است.[۲۶- ۲۸] براساس نوشتار ما[1] و همکاران (۲۰۱۶)،[۲۹] که در آن بخش‌هایی از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی تحلیل شده است، حدود ۹۰٪ از گازهای گلخانه‌ای منتشرشده ناشی از مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح بوده است، که شامل: سیمان، سنگدانه، فولاد، خاکستر بادی، آب، و افزودنی‌ها می‌شود. از میان این مصالح، در رویه‌های غیرمسلح، تولید سیمان با ایجاد ۱۶۲/۵ کیلوگرم CO_2 به ازاء هر ۱ تن، بیشترین میزان گازهای گلخانه‌ای را وارد محیط‌زیست می‌کند. گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در فرآیند تولید سیمان از دو عامل تجزیه‌ی سنگ آهک و مصرف انرژی نشأت می‌گیرد. در رویه‌های مسلح، بالاتر از تولید سیمان، تولید فولاد با نرخ ۱۵/۲۹۹ کیلوگرم CO_2 به ازاء هر ۱ تن، بیشترین سهم تولید گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. استفاده از مصالح بازیافتی یا جایگزین‌ساختن بخشی از سیمان موردنیاز با دیگر مصالح و به‌کارگیری ماشین‌آلات با مصرف انرژی پایین، از جمله راه‌حل‌های پیشنهادی در راستای کاهش آلایندگی‌های ایجادشده در این مرحله هستند.

آخرین مرحله‌ی ارزیابی در راستای احداث پروژه‌های راه، ارزیابی آثار اجتماعی آن است. این مفهوم به تازگی معرفی شده و تا به امروز، روش استاندارد و یکپارچه‌ای نداشته است. روش اجرای ارزیابی آثار اجتماعی، مشابه با دو رکن دیگر پایداری با چهار مرحله‌ی تعریف هدف و گستره، ارزیابی موجودی، ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر، و نهایتاً تفسیر نتایج انجام‌پذیر است. از تمایزهای روش ارزیابی پایداری اجتماعی، معرفی ذی‌نفعان (افراد یا گروه های دارای منافع و سود در انجام پروژه) است، که در مرحله‌ی تعریف هدف و گستره انجام می‌شود. پس از تعریف ذی‌نفعان، یک روند سلسله‌مراتبی برای مقایسه‌ی منافع به‌دست‌آمده توسط ذی‌نفعان یا مضرات تحمیل‌شده به آن‌ها اجرا می‌شود. در این روند، دسته‌های تأثیرگذاری درنهایت به شاخص‌های اجتماعی تبدیل می‌شود. در مرحله‌ی بعد نیاز است مرحله‌ی ارزیابی آثار چرخه‌ی عمر از طریق امتیازدهی به شاخص‌ها انجام شود. از آنجایی که ارزیابی شاخص‌های اجتماعی در برخی مواقع مستلزم ارزیابی متغیرهای کیفی است، نیاز است تا با پُرکردن پرسش‌نامه یا انجام مصاحبه، اطلاعات مربوط به دسته‌های تأثیرگذاری از ذی‌نفعان پروژه، از جمله کارگران و کارفرمایان، دریافت و سپس به متغیرهای کمّی تبدیل شوند. درنهایت با اجراشدن مرحله‌ی تفسیر نتایج، رویکردی که منجر به بالاترین سطح از منافع برای ذی‌نفعان می‌شود، تعیین خواهد شد.[۳۰]

۳. روش‌شناسی تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر

تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر از ۴ مرحله تشکیل شده است: تعریف هدف و گستره، تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر، تحلیل آثار چرخه‌ی عمر، و نهایتاً تفسیر نتایج. در ادامه، هر یک از این مراحل توضیح داده شده است.

۱.۳. تعریف هدف و گستره

ابتدا هدف از مطالعه‌ای که در حال انجام است، بیان می‌شود. در ادامه، باید به این پرسش‌ها پاسخ داده شود:

- آیا تحلیل، شامل تمامی ارکان اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی می‌شود یا برخی از حوزه‌ها حذف شده‌اند؟
- آیا تمامی مراحل چرخه‌ی عمر روسازی (استخراج و تولید مصالح، ساخت، بهره‌برداری، نگهداری، ترمیم، و بازیافت) در مطالعه مشاهده شده است؟
- مخاطبین تحلیل انجام‌شده چه کسانی هستند؟
- چه ابزارها، روش‌ها، و نرم‌افزارهایی در مطالعه استفاده شده‌اند؟

همچنین باید شرحی از این عناوین بیان شود:

- سیستم‌های در نظر گرفته‌شده و کاربرد آن‌ها و تعریف "واحد عملکردی" بر همین مبنا. واحد عملکردی، واحدی است که نتایج تحلیل چرخه‌ی عمر مربوط به آن است؛ مثلاً ساخت، استفاده، و نگهداری ۱ کیلومتر جاده به مدت ۲۵ سال. هر واحد عملکردی از "فرآیندهای واحد" تشکیل شده است.
- فرضیه‌های مهمی که در نظر گرفته شده‌اند.
- محدودیت‌های مطالعه.[۳۱]

۲.۳. تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر

هر یک از ارکان پایداری، از اجزایی تشکیل شده‌اند و در هر پروژه، اجزاء متفاوتی مؤثر هستند. در این مرحله با مطالعه‌ی هر یک از مراحل چرخه‌ی عمر روسازی، اجزاء مؤثر شناسایی و فهرستی از آن‌ها تهیه می‌شود. در ادامه، به معرفی اجزاء مختلف ارکان پایداری پرداخته شده است.

- **جنبه‌ی زیست‌محیطی:** میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیه‌ی منابع، و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی‌های صوتی و نوری) عواملی هستند که باید در این رکن بررسی شوند.[۱۶ و ۳۲] مؤلفه‌های مختلف موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل جنبه‌ی زیست‌محیطی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.
- **جنبه‌ی اقتصادی:** تمامی هزینه‌های پروژه از مرحله‌ی طراحی تا مرحله‌ی پایان عمر باید در نظر گرفته شوند؛ که شامل: هزینه‌های اداره‌های راهداری

جدول ۱. موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل جنبه‌ی زیست‌محیطی (بر مبنای برخی مطالعات[۳۲ و ۱۶]).

Consumption	Released Emissions					
Energy	Carbon-monoxide	Sulfur	PM-10	VOC	Carbon-dioxide	Lead
Natural Resources	Hg	PAH	Sulfur dioxide	Cd	Nitrogen-oxide	Chlorofluoro-carbons

[1] Ma

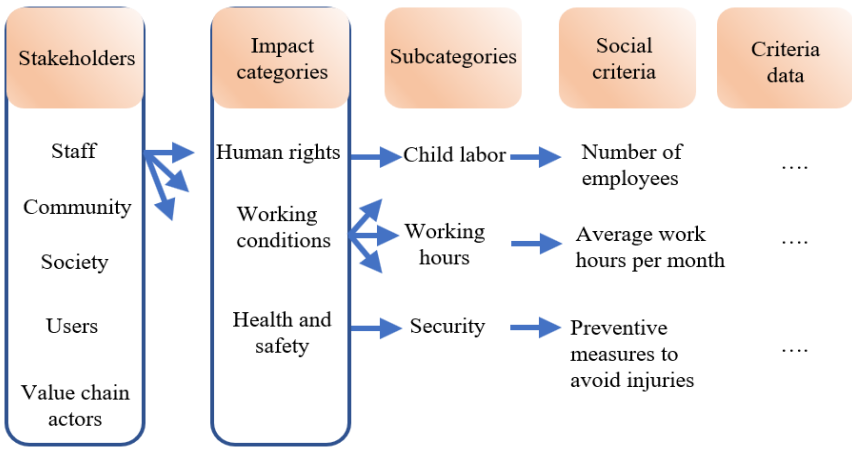
(مانند هزینه‌های استخراج مصالح، ساخت و تعمیر و نگهداری روسازی)، و همچنین هزینه‌های کاربران راه (مانند استهلاک خودرو) می‌شود.[۳۳]

- **جنبه‌ی اجتماعی**، از اجزاء آن به‌عنوان شاخص‌های اجتماعی نام برده می‌شود، نیازمند سه مرحله است: در مرحله‌ی اول، باید ذی‌نفعان تعیین شوند. عموماً ۵ دسته‌ی کارگران و کارفرمایان، محله، جامعه (در سطح کلان و ملی)، کاربران، و نهایتاً بازیگران زنجیره‌ی ارزش به عنوان ذی‌نفعان پروژه در نظر گرفته می‌شوند.[۳۴] مرحله‌ی دوم، تعریف دسته‌های تأثیرگذار در هر گروه از ذی‌نفعان است. چند مورد از دسته‌های تأثیرگذار پیشنهادی توسط برنامه‌ی زیست‌محیطی سازمان ملل در راهنمای ارزیابی اجتماعی چرخه‌ی عمر، عبارت‌اند از: حقوق بشر، شرایط کاری، سلامتی و امنیت. سپس برای هر دسته‌ی تأثیرگذاری باید زیرمجموعه‌هایی تعریف شود؛ که با تعریف آن‌ها می‌توان شاخص‌های اجتماعی را در مراحل مختلف چرخه‌ی عمر ایجاد کرد. شاخص‌های اجتماعی همان موجودی چرخه‌ی عمر هستند.[۳۵] در شکل ۴، اجرای روند سلسله‌مراتبی ذکرشده برای گروه اول ذی‌نفعان، یعنی کارگران و کارفرمایان مشاهده می‌شود.

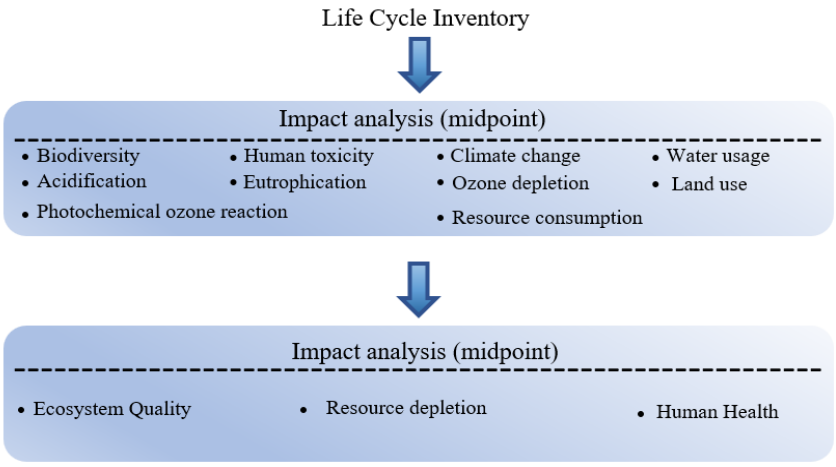
۳.۳. تحلیل آثار چرخه‌ی عمر

در این مرحله، پس از تکمیل طبقه‌بندی اجزاء چرخه‌ی عمر، از روش‌های مختلف مدل‌سازی برای اندازه‌گیری کمّی آثار زیست‌مح یطی، اجتماعی، و اقتصادی آن‌ها استفاده شده است.

- **جنبه‌ی زیست‌محیطی:** هدف از این مرحله بررسی جامع آثار زیست‌محیطی ناشی از موجودی چرخه‌ی عمر است. برای این منظور، باید آن‌ها را به گروه‌های تأثیرگذاری تبدیل و سپس به اندازه‌گیری مقادیر مربوط به هر گروه پرداخت. این فرآیند دارای سه مرحله‌ی: ۱) انتخاب گروه‌های تأثیرگذاری، ۲) تخصیص هر یک از اجزاء موجودی چرخه‌ی عمر به گروه تأثیرگذاری مربوط به آن، و ۳) مدل‌سازی شاخص‌های گروه‌های تأثیرگذاری بوده است. همچنین گام‌های نرمال‌سازی، وزن‌دهی، و دسته‌بندی نیز می‌توانند به صورت اختیاری توسط پژوهشگران اجرا شوند. گروه‌های تأثیرگذاری را می‌توان تا نقطه‌ی میانی یا نقطه‌ی انتهایی ادامه داد. در رویکرد نقطه‌ی میانی، معضلات زیست‌محیطی به‌صورت جزئی و دقیق بیان می‌شوند. اما در گروه‌های تأثیرگذاری نقطه‌ی انتهایی، تمامی معضلات با رویکردی کلان به سه دسته‌ی: سلامتی انسان، تخلیه‌ی منابع، و کیفیت اکوسیستم تقسیم می‌شوند (در برخی منابع "تغییر اقلیم" نیز در آثار نقطه‌ی نهایی ارائه شده است).[۷] در شکل ۵، گروه‌های تأثیرگذاری در نقطه‌های میانی و انتهایی مشاهده می‌شوند.
- **جنبه‌ی اجتماعی:** در این مرحله، چهارچوب‌هایی برای امتیازدهی به شاخص‌های اجتماعی (که در مرحله‌ی قبل، یعنی تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر تعریف شده‌اند) در نظر گرفته شده است. شاخص‌های اجتماعی به دو نوع کمّی و نیمه‌کیفی تقسیم شده‌اند. سپس آن‌ها براساس امتیازهای دریافت‌شده، تبدیل به آثار اجتماعی می‌شوند. تا به امروز هیچ روش و چهارچوب یک‌دست



شکل ۴. اجرای روند سلسله‌مراتبی تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر برای گروه "کارگران و کارفرمایان" از مجموعه‌ی ذی‌نفعان.[۳۵]



شکل ۵. گروه‌های تأثیرگذاری در نقطه‌ی مربوط به تحلیل آثار جنبه‌ی زیست‌محیطی.[۳۶]

و مشخصی برای تحلیل آثار اجتماعی ارائه نشده است. اما در برخی روش‌های پیشنهادی، این امتیازدهی به‌صورت نسبی انجام شده است؛ بدین صورت که میزان شاخص‌ها در پروژه با مقادیر متوسط در کشور مقایسه و سپس امتیازهایی به هر شاخص تخصیص داده شده است.[۳۷]

- **جنبه‌ی اقتصادی:** جنبه‌ی اقتصادی در تحلیل آثار مطرح نمی‌شود. چرا که تحلیل موجودی چرخه‌ی عمر خود مقادیر هزینه‌ها را کاملاً محاسبه می‌کند و شامل آثار چرخه‌ی عمر نیز است.[۳۸]

۴.۳. تفسیر نتایج

این مرحله به بیان نتایج حاصل از مراحل ارزیابی موجودی و ارزیابی آثار اختصاص دارد. بخش تفسیر باید براساس یک تحلیل یکپارچه، پایدارترین گزینه‌ی انتخابی را از میان سایر گزینه‌های موجود معرفی کند. همچنین پیشنهاد می‌شود این موارد در بخش حاضر پوشش داده شود:

- موازنه‌ای میان عواید اقتصادی و معضلات زیست‌محیطی و اجتماعی (در صورت وجود)؛

- شناسایی مراحل چرخه‌ی عمر یا شاخص‌های بحرانی؛

- تأثیر کیفیت داده‌های استفاده‌شده در نتایج.[۱۶]

۴. مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی

در بخش حاضر، نوشتارهای منتشرشده با موضوع ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی مرور شده است. بخش اول، شامل نوشتارهایی است که دربرگیرنده‌ی سه بخش: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی هستند. مائو و همکاران (۲۰۱۲)،[۲۱] در بررسی رویه‌های: بتنی درزدار، درزدار مسلح، و مسلح پیوسته، دو مرحله‌ی استخراج مصالح و همچنین ساخت روسازی را با استفاده از روش ورودی- خروجی اقتصادی مطالعه کرده‌اند. براساس نتایج، CRCP در هر سه رکن پایین‌ترین هزینه‌ها را دارد، که این موضوع طبیعتاً ناشی از ضخامت کم آن است. از سوی دیگر، JRCP بالاترین هزینه‌ها را داشته است. سپس چویی[۱] و همکاران (۲۰۱۵)، علاوه‌بر بررسی مراحل استخراج مصالح و ساخت روسازی، مرحله‌ی نگهداری و ترمیم را نیز برای سه نوع رویه‌ی بتنی مشخص‌شده بررسی کرده‌اند؛[۳۹] و در آن نیز CRCP، پایین‌ترین هزینه‌ها را در هر سه بخش داشته است. در مطالعات اشاره‌شده، تحلیل بُعد اجتماعی با درنظرگرفتن میزان انتقال بار براساس مسافت انجام شده است؛ شاخصی که به‌تنهایی نمی‌تواند تحلیل اجتماعی را پوشش دهد.

شی[۲] و همکاران (۲۰۱۹)، پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی ساده و حاوی بتن بازیافتی را ارزیابی و چهار مرحله از چرخه‌ی عمر روسازی را با استفاده از ورودی- خروجی اقتصادی بررسی کرده‌اند.[۴۰] به‌منظور تحلیل بُعد اجتماعی، تأثیرگذاری هر نوع روسازی در ابتلای افراد به سرطان تعیین شده است. پژوهش اخیر نشان داد که رویه‌ی RCA-PCC[۳] در مرحله‌ی تولید مصالح و ساخت بسیار پایدارتر از رویه‌ی PCC[۴] بوده است. اما در مرحله‌ی بهره‌برداری، پایداری رویه‌ی بازیافتی مقداری کمتر بوده است. با توجه به فقدان روش‌های یکپارچه‌سازی نتایج، امکان تصمیم‌گیری دقیق برای انتخاب روسازی پایدارتر فراهم نشده است.

بخش دوم، شامل نوشتارهایی است که چرخه‌ی عمر روسازی بتنی را از منظر دو رکن زیست‌محیطی و اقتصادی مطالعه کرده‌اند. موگا[۵] و همکاران (۲۰۰۹)، به ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی درزدار و مسلح پیوسته‌ی حاوی خاکستر بادی و سرباره پرداخته و با درنظرگرفتن سه مرحله‌ی استخراج، ساخت، و نگهداری و با استفاده از روش ورودی- خروجی اقتصادی انجام داده‌اند.[۴۱] نتایج مربوط به ارزیابی هزینه‌های اقتصادی نشان داد علی‌رغم اینکه هزینه‌های مرحله‌ی نگهداری CRCP، ٪۸۰ کمتر از JPCP است، مجموع هزینه‌های مراحل چرخه‌ی عمر رویه‌ی CRCP، ٪۴۶ بالاتر از رویه‌ی JPCP است. همچنین JPCP کاهشی ۴۲ الی ۶۷ درصدی را نسبت به CRCP در انتشار گازهای گلخانه‌ای در پی داشته است. علت تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای توسط JPCP، عدم استفاده از آرماتورهای فولادی بوده است. در مطالعه‌ی مذکور، از میان شاخص‌های اندازه‌گیری بُعد زیست‌محیطی، فقط گرمایش جهانی و مصرف انرژی در نظر گرفته شده است.

ژانگ[۶] و همکاران (۲۰۱۰)، مراحل استخراج، ساخت، بهره‌برداری، و نگهداری روسازی بتنی ساده را مطالعه کرده و در این راستا، نرم‌افزارها و مدل‌های SimaPro 7, Mobile 6.2, NONROAD, KyUCP را استفاده کرده‌اند. پژوهش اخیر نشان داد که بهینه‌سازی عملیات نگهداری و ترمیم رویه‌ی بتنی (به روش ارائه‌شده در آیین‌نامه) با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی پویا، می‌تواند باعث کاهش حدود ۵ درصدی انرژی و گازهای گلخانه‌ای رویه‌های بتنی شود. حیدری و همکاران (۲۰۲۰) از مدل TOPSIS[۷] و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی بتنی با درنظرگرفتن تمامی مراحل چرخه‌ی عمر آن استفاده کرده‌اند.[۴۳] براساس نتایج مطالعه‌ی موردی، دو رویه‌ی JRCP و JPCP با ضخامت‌های ۲۵ سانتی‌متر، عملکردهای نزدیکی از منظر میزان آلایندگی داشته و JPCP با اختلافی ۰/۲ درصدی، عملکرد مطلوب‌تری ارائه کرده است. همچنین از نظر مصرف انرژی نیز در عملکردی نزدیک، JPCP با برتری ۰/۱۴ درصدی، بازدهی بیشتری داشته است. از آنجایی که در پژوهش اخیر، از روش تصمیم‌گیری چندشاخصی TOPSIS برای انتخاب گزینه‌ای که برآیند عملکرد آن از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی بهتر بوده است، استفاده شده است؛ بررسی معناداری اختلاف برای دو مقدار گزارش‌شده برای رویه‌ها انجام نشده است. در مقایسه‌ی هزینه‌های اقتصادی چرخه‌ی عمر، اختلاف میان دو رویه‌ی مذکور بیشتر شده و JRCP با ٪۷/۵ اختلاف نسبت به JPCP، نیازمند سرمایه‌گذاری بالاتری بوده است. انتظار می‌رود افزایش هزینه‌های مذکور ناشی از تولید آرماتور فولادی در مرحله‌ی احداث JRCP بوده باشد؛ چرا که سایر هزینه‌های تحلیل‌شده، شامل هزینه‌های تعمیرات خودروها (بر مبنای میزان ناهمواری راه) و هزینه‌ی زمان سفر از گروه هزینه‌های کاربران و هزینه‌های سناریوهای نگهداری و پایان عمر از دسته‌ی هزینه‌های متولیان راه دارای اختلافات کمی در دو رویه‌ی مذکور بوده است. به‌علاوه، JPCP نسبت به CRCP با ضخامت ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر نیز برتری داشته و در هزینه‌های اقتصادی و میزان آلایندگی به ترتیب ۱۵/۲۴ و ۰/۵

[1] Choi
[2] Shi
[3] Recycled Concrete Aggregates - Portland Cement Concrete
[4] Portland Cement Concrete
[5] Muga
[6] Zhang
[7] Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

درصد کاهش داشته است. نتایج مطالعه‌ی موردی نشان داده است که میزان کربن منتشرشده و میزان مصرف انرژی باید به‌عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب پایدارترین رویه‌ی راه بررسی شوند.

بخش سوم، شامل نوشتارهایی است که فقط شامل بُعد زیست‌محیطی در تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی هستند. پارک و همکاران (۲۰۰۳)، ساخت جاده با انواع روسازی از روسازی‌های صلب را بررسی کرده و ضمن درنظرگرفتن تمام مراحل چرخه‌ی عمر روسازی به جز مرحله‌ی بهره‌برداری بیان کرده‌اند که عمده‌ی انرژی مصرف‌شده در مرحله‌ی تولید مصالح مصرف شده است.[۴۴] سپس مرحله‌ی ترمیم و نگهداری بیشترین سهم مصرف انرژی را داشته است. مراحل ساخت و تخریب نیز در جایگاه‌های بعدی قرار داشته‌اند. سهم بیشتر در مصرف انرژی معادل انتشار آلاینده‌های بیشتر بوده است.

زاپاتا و گامباتس[۱] (۲۰۰۵)، مراحل استخراج و تولید مصالح و ساخت روسازی مسلح پیوسته را بررسی کرده و نشان داده‌اند که استخراج مصالح و احداث روسازی فقط ۶٪ از سهم انرژی مصرفی را در بر گرفته است. این در حالی است که ۹۴٪ از سهم انرژی مصرف‌شده به مرحله‌ی تولید مصالح (تولید سیمان ٪۶۱، تولید فولاد ۳۲٪ ، و تولید بتن ۱٪) اختصاص یافته است.[۴۵] همچنین در صورتی که درصد وزنی سیمان در بتن از ۱۲ به ۸ درصد کاهش یابد و خاکستر بادی جایگزین ۴٪ مذکور شود، مصرف انرژی ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند. کاکور و تاتاری[۲] (۲۰۱۱)، مراحل استخراج و ساخت (شامل حمل‌ونقل مصالح) از یک روسازی بتنی مسلح پیوسته را ارزیابی کردند و دریافتند که با ایجاد ۱ کیلومتر CRCP، در حدود ۳ میلیون کیلوگرم CO_2 انتشار یافته است، که تقریباً همه‌ی آن به مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح (سیمان) مرتبط بوده است (در نوشتار مذکور، مشخصات رویه مشخص نشده است).[۴۶] تحلیل اخیر با استفاده از مدل Hybrid Eco-LCA انجام شده است. همچنین تحلیل حساسیت مونت‌کارلو نشان داد که جایگزین‌شدن خاکستر بادی با سیمان، تأثیر زیادی در کاهش میزان CO_2 داشته است. لویجس (۲۰۱۱)، در پژوهشی به ارزیابی روسازی‌های بتنی درزدار در سیستم‌های اجرایی مختلف پرداخته و در مقایسه با سایر نوشتارهای موجود در ادبیات موضوع، کامل‌ترین فهرست از فرآیندهای چرخه‌ی عمر بتن را داشته است.[۴۷] طبق نتایج به‌دست‌آمده، بهینه‌سازی بتن با ۳۰٪ خاکستر بادی، استفاده از سنگ‌دانه‌های سفید و استفاده از ظرفیت کربناسیون بتن پس از پایان عمر، تا ۷۰٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است. به منظور اجرای تحلیل از ابزار CMLCA استفاده شده است.

جولین[۳] و همکاران (۲۰۱۴)، پژوهشی با موضوع CRCP انجام داده‌اند، که از معدود مطالعاتی بوده است که در آن اجرای روکش‌های آسفالتی بر رویه‌های بتنی در مرحله‌ی ترمیم و نگهداری مطرح شده است.[۴۸] یکی از اهداف نوشتار اخیر، ارزیابی پایداری دو سناریوی نگهداری مختلف برای CRCP از نظر زیست‌محیطی بوده و براساس نتایج آن، در ترمیم و نگهداری ۳۰ ساله‌ی CRCP، جایگزین‌ساختن طرح اول (شامل تراش و اجرای روکش آسفالتی) با طرح دوم (اجرای روکش‌های آسفالتی با زمان‌بندی متفاوت)، کاهش ۳۰ درصدی مصرف انرژی و کاهش ۳۵ درصدی گرمایش جهانی را به دنبال داشته است. اناستاسیو[۴] و همکاران (۲۰۱۵)، در ارزیابی روسازی بتنی در مراحل استخراج، ساخت و پایان عمر آن، سه نوع رویه، شامل: ۱) بتن با سیمان پوزولانی، ۲) بتن با یک ملات آبی تازه، و ۳) بتن پوزولانی با خاکستر بادی را در نظر گرفته‌اند.[۴۹] رویه‌ی نوع ۱ دارای بیشترین، رویه‌ی نوع ۳ دارای حد متوسط، و رویه‌ی نوع ۲ دارای کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده است. حسین و همکاران (۲۰۱۶)، مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح را برای روسازی‌های احداث‌شده با بلوک‌های بازیافتی تحلیل کرده‌اند.[۳] طبق نتایج تحلیل از روش ارزیابی آثار IMPACT 2002+[۵]، تولید بلوک‌های بازیافتی در مقایسه با تولید بلوک‌های با مصالح طبیعی، ۳۰٪ انرژی کمتری مصرف و حدود ۲۰٪ گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر کرده است.

مارتینز-آرکوئلز[۶] و همکاران (۲۰۱۹)، ضمن استفاده از روش ارزیابی آثار IMPACT2002+ و نرم‌افزار SimaPro، به مقایسه‌ی چرخه‌ی عمر روسازی بتنی ساده و روسازی حاوی بتن بازیافتی پرداخته‌اند.[۲۰] کاربرد بتن بازیافتی به جای مصالح طبیعی در تولید بتن جدید، تا ۲۳٪ باعث کاهش مخاطرات سلامتی انسان و تا ۱۰٪ باعث صرفه‌جویی در مصرف منابع شده است. استخراج سنگ آهک و حمل آن، بحرانی‌ترین فرآیندها در تحلیل بوده است. با توجه به مصرف سوخت، بیشترین تأثیر را در تحلیل زیست‌محیطی داشته است. فاصله‌ی حمل یکی از عوامل تأثیرگذار در این تحلیل است؛ به حالتی که اگر فاصله‌ی انتقال مصالح بتن بازیافتی کمتر از ۳۰ کیلومتر باشد، استفاده از آن‌ها توصیه شده است. پلسکن[۷] و همکاران (۲۰۲۲)، به تحلیل مرحله‌ی نگهداری روسازی بتنی ساده با روکش آسفالتی پرداخته‌اند.[۵۰] سه سناریوی عنوان‌شده، شامل: ۱) تراش و اجرای روکش آسفالتی، ۲) تعمیر خرابی‌های موجود و اجرای روکش‌های آسفالتی، و ۳) جایگزینی کامل روسازی با مصالح جدید است. براساس نتایج تحلیل نرم‌افزار GaBi، این سه سناریو به ترتیب شماره‌گذاری، دارای کمترین تا بیشترین آثار مخرب در سلامتی انسان، گرمایش جهانی، و تخریب لایه‌ی اوزون بوده‌اند.

بخش چهارم، شامل نوشتارهایی است که فقط بُعد اقتصادی در آن‌ها بررسی شده است. وو[۸] و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی بتنی درزدار پرداخته‌اند.[۵۱] دو راهبرد متفاوت نگهداری برای آزادراهی در چین بررسی شده است. هزینه‌های کاربران در هر دو راهبرد تقریباً یکسان بوده است. با این حال هزینه‌های اداره‌ی راه در راهبرد (ب)، تقریباً ۲۰٪ بیشتر از راهبرد (الف) بوده است. در نتیجه، با به‌کارگیری تحلیل قطعی، راهبرد (الف) انتخاب شده است. اما پس از اجرای تحلیل احتمالاتی مشخص شد که راهبرد (الف) که ارزان‌تر بود، عدم قطعیت بالاتری داشته است. در نتیجه راهبرد (ب)، با هزینه‌هایی پایین‌تر، در تحلیل مبتنی بر ریسک انتخاب شده است. یه‌پز[۹] و همکاران (۲۰۱۶)، مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی بتنی ساده را مطالعه و در آن، برنامه‌ی ترمیم و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) یک روسازی بتنی با به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری را بهینه‌سازی کرده‌اند.

لی و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ی مراحل استخراج، ساخت و نگهداری

[1] Zapata & Gambatese
[2] Kucukvar & Tatari
[3] Jullien
[4] Anastasiou
[5] Impact Assessment of Chemical Toxics
[6] Martinez-Arguelles
[7] Pleşcan
[8] Wu
[9] Yepes

روسازی‌های بتنی درزدار، و مسلح پیوسته پرداخته‌اند و در آن، از JPCP در حدود ۱۵٪ هزینه‌ی پایین‌تری از CRCP داشته است. اکبریان و همکاران (۲۰۱۷)، مراحل بهره‌برداری و نگهداری روسازی بتنی ساده را تحلیل کرده و اجرای روکش‌های بتنی در مرحله‌ی ترمیم و نگهداری روسازی مطرح شده است. روش محاسبه‌ی هزینه‌های اولیه، تأخیرهای ترافیکی ناشی از ترمیم و استهلاک خودرو ارائه و در یک مثال عددی ارزیابی شده است. همچنین اندازه‌گیری استهلاک خودرو، به‌عنوان یکی از مؤثرترین مؤلفه‌های چرخه‌ی عمر روسازی معرفی شده است. مطالعه‌ی موردی برای یک رویه‌ی بتنی ساده با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و دوره‌ی نگهداری ۲۰ ساله، شامل: عملیات پُرکردن ترک‌ها و درزها (به میزان ۱٪)، لکه‌گیری تمام‌عمق (۷٪)، جزئی (۱٪)، تراش الماسه (۲۳٪)، و بازسازی (۳٪) انجام شده است. تبدیل هزینه‌های چرخه‌ی عمر به ارزش خالص فعلی نشان داد که هزینه‌های عمر ۳۴ ساله‌ی روسازی مطرح‌شده در سال مبدأ برابر با حدود ۴/۲ میلیون دلار بوده است، که به ترتیب از زیاد به کم، از این عوامل نشأت گرفته است: احداث روسازی، استهلاک ناشی از ناهمواری، نگهداری و تعمیرات، تأخیرات ترافیکی. دی‌پندله[1] (۲۰۱۸) به ارزیابی روسازی بتنی درزدار با درنظرگرفتن مراحل استخراج، احداث و نگهداری پرداخته و در آن، احداث و ترمیم و نگهداری یک روسازی بتنی با ۸۳۶۰ مترمربع مساحت بررسی شده است. لایه‌های مختلف این روسازی عبارت بوده‌اند از: رویه‌ی بتنی درزدار به ضخامت ۱۷۵ میلی‌متر، اساس دانه‌ای به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، و بستر. بر این اساس هزینه‌ی ساخت و ۵ بار تعمیر و نگهداری (شامل عملیات پیشگیرانه و اساسی) معادل ۳۸۵ هزار دلار (در دوره‌ی عملکردی ۹۰ ساله) بوده است.

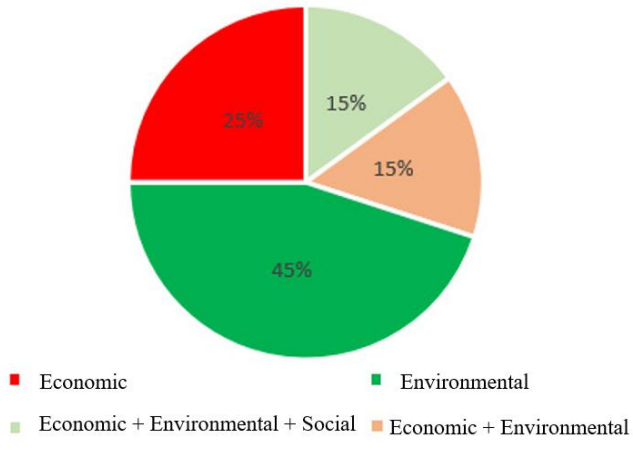
۵. بحث و بررسی

در بخش حاضر، نوشتارهای بررسی‌شده در بخش مرور ادبیات ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی، با توجه به روش‌ها و جزئیات تحلیل موضوع بررسی‌شده و ابزارهای استفاده‌شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند، تا ضمن تعیین روند انجام پژوهش، در راستای انجام پژوهش‌های آینده، راهبردهای مناسب پیشنهاد شود. در جدول ۲، منابع موجود در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی با توجه به نوع رویه‌های بررسی‌شده (ستون ۳)، ارکان ارزیابی‌شده از پایداری (ستون ۴)، مراحل در نظر گرفته‌شده از چرخه‌ی عمر (ستون ۵)، روش تحلیل (ستون ۶) و ابزارهای استفاده‌شده (ستون ۷) مقایسه شده‌اند. با بررسی منابع پژوهشی ارائه‌شده در جدول ۲، این نتایج به‌دست آمده است :

- تا به امروز هیچ مطالعه‌ای با درنظرگرفتن هر ۳ رکن پایداری و هر ۵ مرحله‌ی چرخه‌ی عمر برای روسازی‌های بتنی انجام نشده است. به‌علاوه، مرحله‌ی یکپارچه‌سازی نتایج به جهت انتخاب بهترین روسازی از منظرهای: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی در هیچ‌یک از منابع موجود بررسی نشده است.
- در مطالعاتی که هر ۳ رکن پایداری در نظر گرفته شده است، یگانه روش تحلیل بررسی‌شده، روش ورودی- خروجی اقتصادی بوده است. هیچ مطالعه‌ای با روش فرآیندی یا هیبریدی (ترکیب روش‌های فرآیندی و ورودی- خروجی اقتصادی) با درنظرگرفتن هر ۳ رکن پایداری به‌منظور ارزیابی پایداری بتن انجام نشده است.

همچنین با نگاه آماری دقیق‌تر به جدول ۲ می‌توان دریافت:

- با توجه به ستون سوم جدول، که نشانگر رویه‌های بتنی بررسی‌شده در مطالعات مختلف است، CRCP و JPCP که به ترتیب در ۴۰ (۸ مرجع) و ۳۵ (۷ مرجع) درصد نوشتارها بررسی شده‌اند، بیشترین فراوانی در تحلیل‌های انجام‌شده را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بلوک‌های بازیافتی با فقط یک تحلیل، کمترین تعداد ارزیابی‌ها را داشته‌اند. همچنین، هیچ تحلیلی در راستای ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته ثبت نشده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت CRCP و JPCP بیشترین توجه را از سمت پژوهشگران داشته و همچنین ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته باید در پژوهش‌های آتی بررسی شود.
- با توجه به ستون چهارم، از میان ۲۰ پژوهش انتشاریافته در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی، ۷۵٪ شامل ارزیابی زیست‌محیطی (۱۵ مرجع)، ۵۵٪ شامل ارزیابی اقتصادی (۱۱ مرجع)، و نهایتاً ۱۵٪ دارای ارزیابی اجتماعی (۳ مرجع) بوده‌اند. بر این اساس، بدیهی است که ارزیابی اجتماعی رویه‌های بتنی نیازمند توجه بیشتری در پژوهش‌های آینده است.
- برخی پژوهش‌ها حاوی تحلیل‌های ۳ رکنی (ارکان زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی)، ۲ رکنی (ارکان زیست‌محیطی و اقتصادی) و تک‌رکنی (زیست‌محیطی یا اقتصادی) بوده‌اند. شکل ۶، بیانگر سهم هر یک از انواع تحلیل‌های مذکور در ادبیات موضوع است. حدود نیمی از نوشتارها (۴۵٪) فقط با درنظرگرفتن رکن زیست‌محیطی انجام شده است. سپس، تحلیل‌های مبتنی بر رکن اقتصادی، بیشترین سهم (۲۵٪) را در میان ادبیات مروری داشته‌اند. تحلیل‌های مبتنی بر ۲ رکن (محیطی و اقتصادی) و ۳ رکن (محیطی، اقتصادی و اجتماعی) هر یک با سهم یکسان (۱۵٪) در جایگاه بعدی قرار گرفته‌اند.
- در ستون ۵، مراحلی از چرخه‌ی عمر رویه‌ی بتنی که در تحلیل وارد شده‌اند، مشخص شده است. سهم هر یک از ۵ مرحله‌ی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در تحلیل‌های انجام‌شده بدین شرح است: تولید مصالح در ۸۰٪ از نوشتارها (۱۶ مرجع) ، ساخت در ۷۰٪ از نوشتارها (۱۴ مرجع) ، نگهداری و تعمیرات در ۶۵٪ از نوشتارها (۱۳ مرجع) ، بهره‌برداری در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع)، و پایان عمر در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع). بر این اساس مشخص است که پژوهشگران به ساده‌سازی مراحل مختلف چرخه‌ی عمر رویه‌ی بتنی از جمله بهره‌برداری و پایان عمر پرداخته‌اند. به‌منظور اجرای تحلیل‌های واقع‌گرایانه، لازم است این مراحل در پژوهش‌های آینده وارد شوند.



شکل ۶. ارزیابی نوشتارهای انتشاریافته در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی براساس تعداد ارکان بررسی‌شده.

[1] Diependaele

ستون هفتم در جدول ۲، نشان‌دهنده‌ی استفاده‌ی محدود از نرم‌افزارهای تجاری رایج در زمینه‌ی ارزیابی پایداری است. به‌منظور ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر، نرم‌افزار SimaPro در ۲ مرجع و نرم‌افزار GaBi در ۱ مرجع استفاده شده است. در هیچ‌یک از پژوهش‌ها، از ابزار قدرتمند OpenLCA استفاده نشده است. همچنین به‌منظور ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر، فقط در یکی از مراجع، نرم‌افزار RealCost استفاده شده است. از دیگر ابزارهای استفاده‌شده برای تحلیل پایداری در مطالعات می‌توان به محاسبه‌گرهای آنلاین CMU (EIO-LCA Feature)[1]، و CMCLA[2] و همچنین نرم‌افزار Ecorce اشاره داشت. در بیشتر پژوهش‌ها از مراحل بهره‌برداری و پایان عمر در تحلیل پایداری چشم‌پوشی شده است. در ادامه، با بررسی دقیق تحلیل‌هایی که در آن‌ها مراحل بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات و همچنین پایان عمر در نظر گرفته شده است، فرآیندهای واحد مربوط به این مراحل برشمرده شده است.

جدول ۲. بررسی و مقایسه‌ی مطالعات انجام‌شده با موضوع: ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر انواع روسازی‌های بتنی.

Category	Reference	Pavement types	Pillars			Evaluated stages of life cycle					Analysis Method	Analysis tools / standards	
			Env.	Eco.	Soc.	Material	Const.	Use	Rehab.	EOL		Environmental	Economic
Three-pillar analysis	[21]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	-	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[39]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	✓	★	★	-	★	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[40]	PCC, RCA-PCC	✓	✓	✓	★	★	★	-	★	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature), TRACI	
Two-pillar analysis	[41]	JPCP - CRCP	✓	✓	-	★	★	-	★	-	Economic Input-Output	CMU (EIO-LCA Feature)	
	[42]	PCC	✓	✓	-	★	★	★	★	-	Hybrid	SimaPro 7, Mobile 6.2, NONROAD, KyUCP	-
	[43]	JPCP, JRCP, CRCP	✓	✓	-	★	★	★	★	?	Hybrid	TOPSIS, Monte Carlo Simulation	
Single-pillar analysis (Environmental)	[44]	Road construction	✓	-	-	★	★	-	★	★	Hybrid	-	-
	[45]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	Process	-	-
	[46]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	-	-	Hybrid	Hybrid Eco-LCA model	-
	[47]	JPCP in 12 different systems	✓	-	-	★	★	★	★	★	Hybrid	CMCLA	-
	[48]	CRCP	✓	-	-	★	★	-	★	-	Hybrid	ECORCE	-
	[49]	Modified PCC	✓	-	-	★	★	-	-	★	Hybrid	-	-
	[3]	Eco-block, Natural block	✓	-	-	★	-	-	-	-	Hybrid	IMPACT2002+	-
	[20]	PCC, RCA-PCC	✓	-	-	★	-	-	-	-	Hybrid	SimaPro, IMPACT2002+	-
	[50]	PCC	✓	-	-	-	-	-	★	-	Hybrid	GaBi	-
Single-pillar analysis (Economic)	[51]	JPCP	-	✓	-	-	-	-	★	-	Hybrid	-	-
	[52]	PCC	-	✓	-	-	-	-	★	-	Hybrid	-	-
	[53]	JPCP - CRCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	Hybrid	-	RealCost
	[54]	PCC	-	✓	-	-	-	★	★	-	Hybrid	-	-
	[55]	JPCP	-	✓	-	★	★	-	★	-	Hybrid	-	-
Total (Percentage)		-	15 (75%)	11 (55%)	3 (15%)	16 (80%)	14 (70%)	5 (25%)	13 (60%)	4 (20%)	-	-	-

[1] Carnegie Mellon University (Environmental Input-Output – Life Cycle Analysis)

[2] Chain Management by Life Cycle Assessment

فرآیندهای واحدی که در مرحله‌ی بهره‌برداری از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در نظر گرفته شده‌اند، در جدول ۳ معرفی شده‌اند. با توجه به جدول اخیر، ناهمواری مسیر می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت (از منظر محیطی) و افزایش هزینه‌های نگهداری خودرو (از دید اقتصادی) شود، که هر یک از این عوامل در ۴۰٪ پژوهش‌های مرتبط بررسی شده‌اند.

با توجه به اینکه سطوح مختلف ناهمواری منجر به بروز استهلاک با شدت‌های مختلف در خودروها می‌شود و از آنجایی که مدل دقیقی در پژوهش‌های بررسی‌شده برای تعیین میزان استهلاک براساس مقادیر مختلف ناهمواری مشاهده نشده است، پیشنهاد می‌شود مدلی برای محاسبه‌ی میزان استهلاک براساس شاخص‌های ناهمواری توسعه یابد و در تحلیل‌های پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی استفاده شود. از طرفی، وجود مناطق کارگاهی می‌تواند منجر به تأخیرهای ترافیکی (از منظر اقتصادی) یا افزایش مصرف سوخت وسائط نقلیه (از منظر محیطی) شود، که هر یک از دو عامل مذکور به ترتیب در ۶۰ و ۴۰ درصد از مطالعاتی که مرحله‌ی بهره‌برداری در آن‌ها وارد شده است، در نظر گرفته شده‌اند.

آلبدو، کربناسیون (که دو پدیده‌ی قابل توجه در مرحله‌ی بهره‌برداری هستند و تعریف آن‌ها در پاراگراف بعدی ارائه شده است) و تأمین روشنایی روسازی، فقط در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند و سایر تحلیل‌های موجود، فاقد فرآیندهای مذکور هستند. فقدان هر یک از مراحل اخیر در تحلیل، منجر به خطا در نتیجه‌گیری شده است و در نتیجه لازم است در پژوهش‌های آینده، به آن‌ها توجه شود. برخی از فرآیندهای مرحله‌ی تعمیر و نگهداری توضیح داده شده است.

- **آلبدو:** این فرآیند از به‌وقوع پیوستن دو پدیده‌ی واداشت تابشی و جزیره‌ی گرمایش شهری به‌وجود می‌آید.
- **واداشت تابشی:** عبارت است از توانایی روسازی برای بازتاب اشعه‌ی دریافت‌شده به بیرون از اتمسفر زمین. این پدیده باعث خنک‌شدن شرایط اقلیمی می‌شود. کاهش واداشت تابشی به پدیده‌ی گرمایش جهانی منجر می‌شود.[۴۶]
- **پدیده‌ی جزیره‌ی گرمایش شهری:** عبارت است از گرم‌شدن محیط به‌علت جذب اشعه‌ی نور خورشید و آزادسازی گرما. روسازی راه با جذب گرما، محیط اطراف را گرم می‌کند. در نتیجه، با تغییر نیازهای سرمایش و گرمایش ساختمان‌های اطراف، در انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد. پیدایش پدیده‌ی جزیره‌ی گرمایش شهری منجر به افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه تولید آلاینده‌های بیشتر شده است. همچنین این پدیده، بیماری‌هایی را برای مردم ساکن در آن منطقه به‌وجود خواهد آورد.[۵۶]
- **کربناسیون:** با تولید سیمان، مقدار زیادی CO_2 وارد محیط شده است. از سوی دیگر، فرآیند هیدراسیون سیمان در روند تولید بتن، مقدار قابل‌توجهی کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) تولید می‌کند. در طول چرخه‌ی عمر رویه‌ی بتنی، کربن دی‌اکسید موجود در اتمسفر به سطح متخلخل بتن نفوذ می‌کند و با کلسیم هیدروکسید در مجاورت آب واکنش شیمیایی می‌دهد؛ که از طریق آن، CO_2 موجود در اتمسفر مصرف می‌شود. در واقع بتن بخشی از CO_2 تولیدشده در فرآیند تولیدش را جذب و جبران می‌کند. به این فرآیند شیمیایی کربناسیون اتلاق می‌شود و حاصل آن کلسیم کربنات ($CaCO_3$) است.[۵۶] این فرآیند منجر به کاهش آلودگی‌های موجود در طبیعت شده است.
- **تولید شیرآبه:** یکی از انواع مصالح بازیافتی که امروزه به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در ساخت روسازی بتنی استفاده می‌شود، سنگ‌دانه‌های بتنی بازیافتی (RCA)[1] است. وجود فلزات سنگین، از جمله: کروم (Cr) و کادمیم (Cd) و ترکیب‌های شیمیایی از جمله سولفات در بتن باعث شده است که با نفوذ آب، شیرآبه‌ای قلیایی به‌وجود آید و به داخل زمین نفوذ کند.[۵۷] شیرآبه‌ی مذکور می‌تواند منجر به آلودگی زیست‌محیطی قابل توجهی بر خاک و آب‌های زیرزمینی شود.

سناریوهای نگهداری و تعمیرات رویه‌های بتنی، از جمله نوع و جزئیات عملیات، زمان‌بندی اجرا و معیار برنامه‌ریزی در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. عوامل بررسی‌شده در تحلیل مرحله‌ی بهره‌برداری از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	First Factor: Road roughness		Second Factor: Work zones		Other factors
	Fuel usage (Environmental)	Vehicle costs (Economic)	Traffic delays (Environmental)	Fuel usage (Economic)	
[40]	-	✓	-	-	-
[42]	✓	-	✓	✓	-
[43]	-	✓	✓	-	-
[57]	-	-	-	✓	Albedo, carbonation, and pavement illumination
[54]	✓	-	✓	-	-
Total (Percentage)	2 (40%)	2 (40%)	3 (60%)	2 (40%)	-

[1] Recycled Concrete Aggregate

جدول ۴. سناریوهای نگهداری و تعمیرات بررسی شده در تحلیل مرحله ی نگهداری و تعمیرات از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Maintenance and rehabilitation operations											Explanations
	Crack sealing	Patching	Recon-struction	Diamond grinding	Joint filling	Mill & overlay	Overlay	Grouting	Groov-ing	Dowel treatment	Shoulder repair	
[39]	-	-	✓ JRCP: every 15 years, JPCP every 20 years, and CRCP, every 30 years	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[41]	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	Scheduling was based on Michigan DoT's M&R plan.
[42]	✓ In years 11 and 31	-	✓ In the 20th year of the 40-year period	-	✓ In years 11 and 31	-	✓	-	-	-	-	-
[43]	-	-	-	-	-	✓ 2.5-cm milling and 10-15 cm overlay	✓ 15-cm	-	-	-	-	Overlay was considered to be either stabilized or unstablized.
[44]	-	-	✓ Every 20 years	-	-	✓ Every 7 years	-	-	-	-	-	-
[47]	-	-	✓ Every 10 years, after the 20th year	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	-	-	-	-	-	✓ 2.5-cm overlay	✓ Every 3 to 5 years for half width or every 11 years for the whole width	-	-	-	-	-
[50]	-	-	-	-	-	✓ 9-cm overlay	-	-	-	-	-	-
[51]	✓	✓	-	✓	✓	-	✓ Slurry seal				-	Preventive maintenance performed annually and major maintenance performed in years 11 and 18
[52]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Scheduling based on: 1- the correlation of maintenance and PCI and 2- the increase in pavement life after each M&R operation
[53]	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
[54]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓ Micro-surfacing, chip seal, and fog seal	-	-	-	✓	All operations concentrated in the 20th year of the 35-year period
[55]	✓ Every 10 years	-	✓ In 50th year	-	✓ Every 5 years, after the 15th year	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	6 (46%)	4 (31%)	8 (62%)	4 (31%)	5 (38%)	4 (31%)	5 (38%)	1 (8%)	1 (8%)	1 (8%)	1 (8%)	-

مطابق با جدول اخیر، عملیات در نظر گرفته‌شده در برنامه‌ریزی‌های نگهداری و تعمیرات عبارت‌اند از: بازسازی (۶۳٪ از نوشتارها شامل مرحله‌ی نگهداری و تعمیرات)، درزگیری (۴۶٪)، پُرکردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیارانداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪)، و بهسازی شانه‌ها (۸٪). همچنین سایر نکات قابل توجه در جدول بدین شرح است:

- به انواع روکش‌های حفاظتی اسلاری سیل، میکروسرفسینگ، چیپ‌سیل، و فاگ‌سیل در برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات رویه‌های بتنی توجه شده است.
- داول‌ها یا میلگردهای دوخت قرارگرفته در درزها، سازوکار انتقال بار میان دال‌های بتنی را فراهم می‌کنند. زمانی که میلگردهای دوخت مذکور دچار پوسیدگی می‌شوند، نیاز به ترمیم و جایگزینی آن‌ها وجود دارد. این عملیات در ۸٪ از نوشتارها، وارد تحلیل پایداری چرخه‌ی عمر شده است. به‌منظور جلوگیری از پوسیدگی میلگردهای دوخت می‌توان از پوشش پوکسی روی میلگردها استفاده کرد.
- لکه‌گیری می‌تواند در عمق‌های مختلفی اجرا شود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده، عمق لکه‌گیری در محاسبات در نظر گرفته نشده است.

فرآیندهای واحد در نظر گرفته‌شده در مرحله‌ی پایان عمر از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول مذکور، یکی از عواملی که در تحلیل اقتصادی باید در نظر گرفته شود، ارزش اسقاط است، که فقط در ۲۵٪ از تحلیل‌ها، شامل مرحله‌ی پایان عمر در نظر گرفته شده است. ۳ فرآیند واحد دیگر، که در مرحله‌ی پایان عمر باید در نظر گرفته شوند، عبارت‌اند از: تخریب، دفن در مدفن و بازیافت که این عوامل همگی در ۷۵٪ از مطالعات شامل مرحله ی پایان عمر وارد شده‌اند. نرخ‌های بازیافت بتن و فولاد نیز در مطالعات، مقادیر مختلفی داشته‌اند، که در جدول اخیر مشاهده می‌شوند.

موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل‌های انجام‌شده برای ارزیابی زیست‌محیطی رویه‌های بتنی در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق با جدول ۶، انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ و انتشار گازهای آلاینده‌ی هوا در ۳۱٪ از پژوهش‌های منتشرشده شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند. انواع گازهای در نظر گرفته‌شده در هر یک از دو دسته‌ی مذکور نیز همراه تعداد مطالعات مرتبط در جدول معرفی شده‌اند. پژوهشگران گاز گلخانه‌ای CO_2 را در عمده‌ی مطالعات (۸۴٪) به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های موجودی چرخه‌ی عمر در نظر گرفته‌اند. به‌علاوه، مصرف انرژی در ۷۷٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از موجودی‌های چرخه‌ی عمر در نظر گرفته شده است. پس از CO_2، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت‌اند از: CH_4، SO_2، و NOx که هر یک در ۳۱٪ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی ارزیابی شده‌اند. همچنین کمترین فراوانی مربوط به NH_3 بوده است، که فقط در ۸٪ از پژوهش‌های شامل ارزیابی زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است.

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی در مرحله‌ی تحلیل آثار چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی در جدول ۷ ارائه شده‌اند. دسته‌های تحلیل‌شده در پژوهش‌های پیشین به ترتیب بیشترین فراوانی، عبارت‌اند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸۹٪)، تخلیه‌ی لایه‌ی اوزون (۴۴٪)، مردابی‌شدن (۴۴٪)، انتشار مواد سمّی (۳۳٪)، مصرف آب (۳۳٪)، اسیدی‌شدن (۳۳٪)، انتشار مواد آلی/ غیرآلی مضر برای تنفس (۲۲٪)، انتشار مواد ایجادکننده‌ی سرطان یا بیماری‌های غیر از سرطان (۲۲٪)، اشغال زمین (۲۲٪)، سمیّت زیست‌محیطی (۲۲٪)، مسمومیت انسانی (۱۱٪)، استخراج مواد معدنی (۱۱٪)، تشعشات یونی (۱۱٪)، ایجاد ریزگرد (۱۱٪) و مصرف انرژی غیرتجدیدپذیر (۱۱٪).

*در این پژوهش‌ها، سهم هر یک از وسایل نقلیه در حمل‌ونقل مواد نیز مشخص و در مرحلهٔ تحلیل تاثیرات ارزیابی شده‌است.

دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی پایانی درنظر گرفته‌شده در تحلیل‌های زیست‌محیطی پیشین در جدول ۸ ارائه شده‌اند. تخلیه‌ی منابع در ۷۵٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، تغییر اقلیم در ۵۰٪، سلامتی انسان در ۵۰٪، و کیفیت زیست‌بوم در ۲۵٪ از مراجع مذکور ارزیابی شده‌اند.

بررسی منابع انتشاریافته در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی نشان داد که چهارچوب واحدی در راستای مرحله‌ی تعریف گستره‌ی تحلیل وجود ندارد؛ به گونه‌ای که هر یک از پژوهشگران، فرآیندهای مختلفی را در تحلیل اعمال کرده و یا فرآیندهایی را در نظر نگرفته‌اند. این در حالی است که حذف فرآیندهای واحد از گستره‌ی تحلیل می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود. بر این اساس، چهارچوبی برای مرحله‌ی "تعریف گستره‌ی تحلیل" در بخش کنونی

جدول ۵. عوامل بررسی‌شده در مرحله‌ی پایان عمر از چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Economic Analysis	Economic or Environmental Analysis		
	Scrap Value	Demolition	Landfill	Recycling
[40]	✓	-	-	-
[44]	-	✓	✓	✓ Rate of 35%
[47]	-	✓	✓	✓ Rates of 50% for concrete and 70% for steel
[49]	-	✓	✓	✓ Rate of 80% for concrete
Total (Percentage)	1 (25%)	3 (75%)	3 (75%)	3 (75%)

جدول ۶. موجودی چرخه‌ی عمر در تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Greenhouse Gas Emissions						Air-polluting Gas Emissions						Energy use
	CO2	CH4	HFC	PFC	N2O	CO	NH3	NOx	PM10	PM2.5	SO2	VOC	
[21]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[39]	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓
[40]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[41]	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓
[42]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[43]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[44]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
[45]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[46]	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓
[47]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
[49]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	11 (84%)	4 (31%)	3 (23%)	3 (23%)	2 (15%)	3 (23%)	1 (8%)	4 (31%)	2 (15%)	2 (15%)	4 (31%)	2 (15%)	10 (77%)
Total (Percentage)	11 (84%)						4 (31%)						10 (77%)

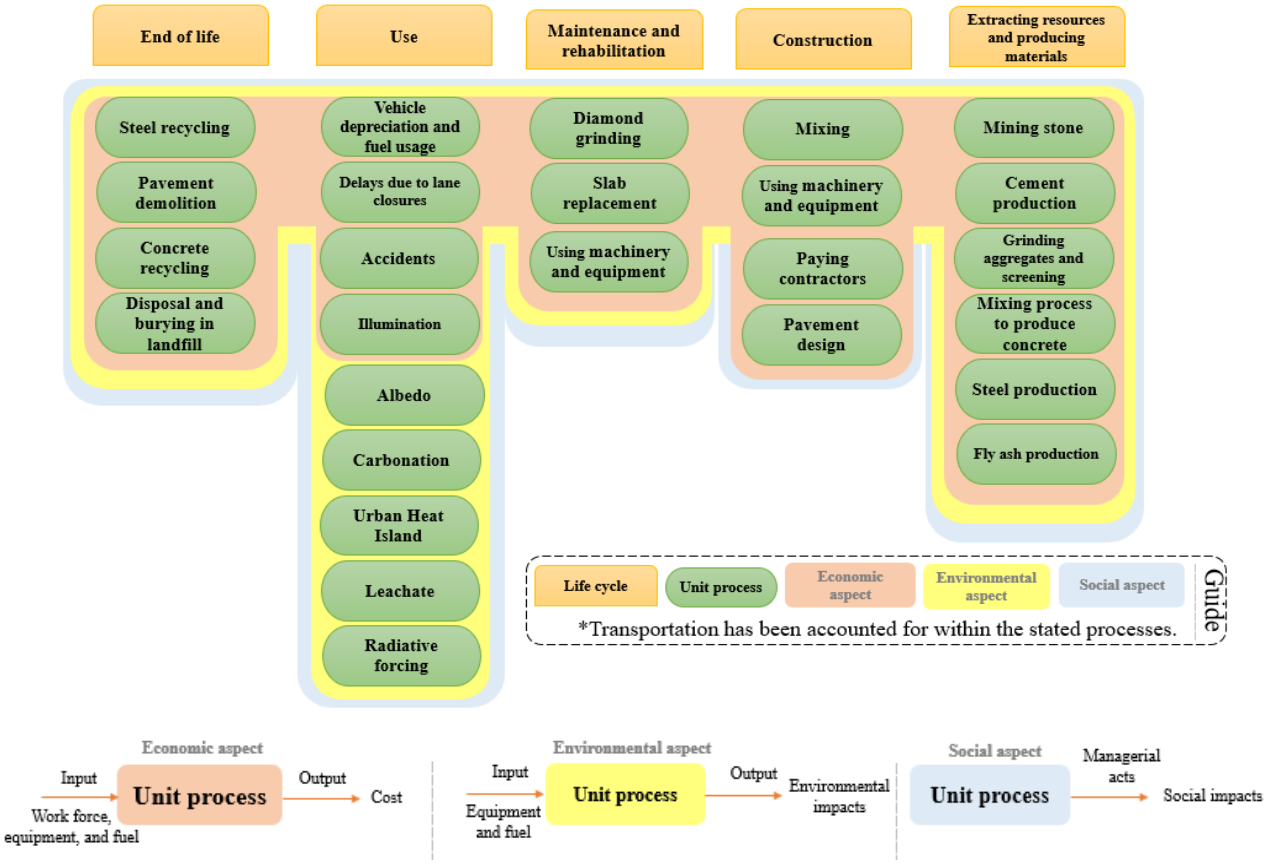
جدول ۷. دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی واردشده در مرحله‌ی ارزیابی آثار تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Global warming potential	Hazardous Waste	Toxic release	Water use	Ozone Layer depletion	Acidific-ation (water or air)	Eutrophic-ation (water or air)	Human toxicity	Minerals extraction	Respiratory organics/ inorganics	Ionizing radiation	Carcinogens / Noncarcinogens	Land occupation	Particulate air	Ecotoxicity	Non-renewable energy usage
[21]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[39]	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[40]	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-
[41]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[48]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[49]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[3]	✓	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓
[20]	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
[50]	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Total (Percentage)	8 (89%)	2 (22%)	3 (33%)	3 (33%)	4 (44%)	3 (33%)	4 (44%)	1 (11%)	1 (11%)	2 (22%)	1 (11%)	2 (22%)	2 (22%)	1 (11%)	2 (22%)	1 (11%)

معرفی شده است ، که فرآیندهای واحد تعریف‌شده در آن اختصاص به رویه‌های بتنی دارد. باتوجه به ادبیات موضوع، بررسی این فرآیندها برای تحلیل کامل پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی ضروری هستند. چهارچوب اختصاصی پیشنهادی برای تعریف گستره‌ی تحلیل که در شکل ۷ مشاهده می‌شوند، با گردآوری فرآیندهای مختلف ارائه‌شده در ادبیات موضوع ایجاد شده است. با توجه به چهارچوب پیشنهادی:

جدول ۸. دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی پایانی واردشده در مرحله‌ی تحلیل آثار ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

Reference	Endpoint impact categories			
	Climate change	Ecosystem Quality	Human Health	Resource depletion
[46]	-	-	-	✓
[49]	-	-	-	✓
[20]	✓	✓	✓	✓
[51]	-	✓	-	✓
Total (Percentage)	2 (50%)	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)



شکل ۷. فرآیندهای واحد در روش پیشنهادی برای ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی و مرزهای سیستم در روش پیشنهادی برای ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

۱. مرحله‌ی استخراج و تولید مصالح باید شامل: فرآیندهای واحد استخراج سنگ، تولید سیمان، فولاد و خاکستر بادی، سنگ‌شکنی، سرند، و نهایتاً اختلاط مواد اولیه بتن باشد.

۲. مرحله‌ی ساخت باید شامل: فرآیندهای اختلاط بتن، به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات جهت اجرای روسازی، پرداختی شرکت‌های پیمانکاری، و طراحی فنی روسازی باشد.

۳. فرآیندهای واحد برای مرحله‌ی ترمیم و نگهداری، لازم است شامل: به کارگیری تجهیزات برای سایر عملیات نگهداری پیشگیرانه یا اساسی، مانند: لکه‌گیری، درزگیری، روکش تراش با صفحات الماسه، جایگزینی دال، و همچنین عملیات بازسازی باشد.

۴. فرآیندهای واحد مرحله‌ی بهره‌برداری باید در برگیرنده‌ی استهلاک خودروها، تأخیر زمانی ناشی از بستن خطوط عبوری، تصادف‌ها، تأمین روشنایی، کربناسیون، جزایر گرمایش شهری، تولید شیرآبه، و واداشت تابشی باشد.

۵. در نهایت، مرحله‌ی پایان عمر لازم است فرآیندهای واحد بازیافت فولاد، تخریب روسازی، بازیافت بتن و دفن در محل دفن پسماند را داشته باشد.

۶. نتیجه‌گیری

ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر (LCSA)، چهارچوب جامعی در راستای تحلیل مراحل مختلف چرخه‌ی عمر یک محصول از سه دیدگاه: زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی است. در تحلیل اقتصادی چرخه‌ی عمر (LCCA)، هزینه‌های کاربران و متولیان محصول تعیین شده است. در تحلیل زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (LCA)، میزان انتشار آلاینده‌ها، مصرف انرژی یا حامل‌های انرژی، تخلیه‌ی منابع و آثار منفی محیطی (از جمله آلودگی‌های

صوتی و نوری) بررسی شده است. نهایتاً، تحلیل اجتماعی چرخه‌ی عمر (SLCA)، تأثیر محصول در زندگی کارکنان، مصرف‌کنندگان، جامعه، و دیگر ذی‌نفعان را از طریق شاخص‌هایی، مانند: امنیت، سلامتی، وضعیت شغلی، و غیره مورد سنجش قرار داده است. امروزه به اهمیت استفاده از شاخص پایداری در صنعت روسازی راه توجه شده است. هزینه‌های اقتصادی کلان، مصرف مقدار قابل توجه انرژی و تولید انبوه آلاینده‌ها در فرآیند تولید مصالح و ساخت، آثار منفی اجتماعی در کارگران و اجتماع محلی، که ناشی از محیط کاری خطرناک است، از دلایل اصلی این رویکرد بوده است. دست‌اندرکاران و مدیران صنعت راه، در هنگام احداث روسازی یا انتخاب راهبردهای تعمیر و نگهداری، با گزینه‌های مختلفی مواجه هستند. شاخص پایداری، قابلیت امکان‌سنجش، و تعیین گزینه‌های مختلف را برای کارشناسان فراهم می‌کند، تا گزینه‌ی انتخابی، کمترین آثار اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی را داشته باشد. مراحل مختلف تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی عبارت‌اند از: استخراج مواد اولیه/ تولید مصالح، احداث روسازی، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، و پایان عمر.

پژوهشگران از سال ۲۰۰۹ میلادی تا به امروز، به پژوهش در زمینه‌ی ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پرداخته‌اند. بررسی مطالعات موجود نشان داده است که:

- از میان منابع منتشرشده، ۴۵٪ بر تحلیل زیست‌محیطی، ۲۵٪ بر تحلیل اقتصادی، ۱۵٪ بر تحلیل دو رکن اقتصادی و زیست‌محیطی، و ۱۵٪ بر تحلیل سه رکن: اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی تمرکز یافته است. همچنین در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی، ارزیابی زیست‌محیطی، بیشترین سهم (۱۵ مرجع)، ارزیابی اقتصادی، سهم متوسط (۱۱ مرجع)، و نهایتاً ارزیابی اجتماعی، کمترین سهم (۳ مرجع) را داشته‌اند.
- از میان مراحل چرخه‌ی عمر، بهره‌برداری فقط در ۲۵٪ از مطالعات (۵ مرجع) و پایان عمر فقط در ۲۰٪ از مطالعات (۴ مرجع) در نظر گرفته شده‌اند. حذف مراحل چرخه‌ی عمر از تحلیل پایداری منجر به نتایج غیرواقعی در ارزیابی‌ها شده است.
- عوامل در نظر گرفته‌شده در ارزیابی مرحله‌ی بهره‌برداری، شامل: تأثیر ناهمواری مسیر در افزایش مصرف سوخت (۲ مرجع) و افزایش هزینه‌های نگهداری خودرو (۲ مرجع) و همچنین تأثیر مناطق کارگاهی در افزایش تأخیرهای ترافیکی (۳ مرجع) یا افزایش مصرف سوخت وسائط نقلیه (۲ مرجع) بوده است. آلبدو، کربناسیون، و تأمین روشنایی روسازی، فقط در ۱ تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.
- سناریوهای مختلف نگهداری و تعمیرات برای رویه‌های بتنی توسعه داده شده‌اند، که عملیات آن شامل: بازسازی (۶۳٪ از نوشتارها شامل مرحله‌ی نگهداری و تعمیرات)، درزگیری (۴۶٪)، پُرکردن درزهای بتن (۳۸٪)، اجرای روکش (۳۸٪)، لکه‌گیری (۳۱٪)، تراش الماسه (۳۱٪)، تراش و روکش (۳۱٪)، ریختن گروت (۸٪)، شیارانداختن (۸٪)، ترمیم داول‌ها (۸٪)، و بهسازی شانه‌ها (۸٪) بوده است.
- به‌منظور ارزیابی مرحله‌ی پایان عمر در تحلیل‌های اقتصادی، ارزش اسقاط بررسی شده است (۱ مطالعه). در تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، ۳ فرآیند واحد در نظر گرفته شده‌اند، که عبارت‌اند از: تخریب، دفن در مدفن، و بازیافت (۳ مطالعه).
- بررسی مطالعات منتشرشده از منظر موجودی چرخه‌ی عمر نشان داده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۸۴٪ از تحلیل‌های زیست‌محیطی، انتشار گازهای آلاینده‌ی هوا در ۳۱٪ و مصرف انرژی در ۷۱٪ از مطالعات در نظر گرفته شده‌اند. در پژوهش‌های منتشرشده، پژوهشگران بیشترین توجه را به گاز CO_2 به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های موجودی چرخه‌ی عمر داشته‌اند (۱۱ مرجع). پس از CO_2، آلاینده‌هایی که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت بوده‌اند از: CH_4، SO_2، و NOx، که به هر یک از آن‌ها در ۳۱٪ از پژوهش‌ها توجه شده است.
- بررسی دسته‌های اثرگذاری نقطه‌ی میانی در پژوهش‌های پیشین نشان داد که ۳ دسته‌ای که بیشترین فراوانی را در تحلیل‌های انجام‌شده داشته‌اند، عبارت‌اند از: پتانسیل گرمایش جهانی (۸ مطالعه)، تخلیه‌ی لایه‌ی اوزون (۴ مطالعه)، و مردابی‌شدن (۴ مطالعه).

- در آن دسته از تحلیل‌های زیست‌محیطی که اثرگذاری نقطه‌ی نهایی بررسی شده است (۴ مطالعه): تخلیه‌ی منابع در ۷۵٪ از تحلیل‌ها، تغییر اقلیم در۵۰٪، سلامتی انسان در۵۰٪ ، و کیفیت زیست‌بوم در ۲۵٪ از مطالعات مذکور ارزیابی شده‌اند.

آن دسته از موضوعاتی که تا به امروز، مطالعه‌ی جامعی در مورد آن‌ها انجام نشده است، شناسایی شده‌اند. خلأهای مطالعاتی مذکور بدین شرح هستند:

- ✓ به‌کارگیری روش هیبریدی ارزیابی پایداری در تحلیل‌های سه رکنی،
- ✓ استفاده از نرم‌افزار قدرتمند OpenLCA به‌منظور تحلیل زیست‌محیطی،
- ✓ ادغام نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت مستقل رکن و یکپارچه‌سازی در قالب یک شاخص مشترک،
- ✓ ارزیابی پایداری رویه‌های بتنی پیش‌ساخته،
- ✓ توسعه‌ی مدلی برای محاسبه‌ی استهلاک وسائط نقلیه براساس میزان ناهمواری و به‌کارگیری آن در ارزیابی پایداری مرحله‌ی بهره‌برداری،
- ✓ اجرای تحلیلی مبتنی بر هر ۳ رکن پایداری با درنظرگرفتن تمامی ۵ مرحله‌ی چرخه‌ی عمر رویه‌های بتنی.

همچنین کاربرد نرم‌افزارهای قدرتمند محاسبه‌ی آثار زیست‌محیطی و اقتصادی از جمله: SimaPro و Gabi، نیازمند توسعه و گسترش بیشتری در مطالعات آینده هستند. ارزیابی پایداری رویه‌ی Eco-block که فقط در یک پژوهش بررسی شده است، نیز نیازمند پژوهش‌های گسترده‌تری توسط پژوهشگران است. همچنین مرور ادبیات پیشین، ناهماهنگی های موجود در فرآیندهای گستره‌ی تحلیل را نشان داده است. به‌عبارت دیگر، پژوهشگران در پژوهش‌های مختلف، فرآیندهای متفاوتی را به‌صورت سلیقه‌ای از تحلیل حذف یا به تحلیل اعمال کرده‌اند. این امر باعث غیرواقعی‌بودن نتایج و عدم مقایسه‌پذیری نتایج پژوهش‌های مختلف با یکدیگر شده است. این در حالی است که با درنظرگرفتن تمامی مراحل و فرآیندهای موجود در تحلیل چرخه‌ی عمر روسازی، نتایجی جامع و قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. در راستای رفع مشکل اخیر، چهارچوبی برای مرحله‌ی تعریف گستره پیشنهاد شده است، که شامل فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر برای رویه‌های بتنی بوده است و می‌تواند به‌صورت یکپارچه در مطالعات ارزیابی پایداری چرخه‌ی عمر استفاده شود. با توجه به چهارچوب پیشنهادی برای تعریف گستره، از حذف فرآیندهای مختلف چرخه‌ی عمر و غیرواقعی‌بودن نتایج به‌دست‌آمده جلوگیری خواهد شد.

References- منابع

1. European Concrete Paving Association (EUPAVE). 2020. Guide for Design of Jointed Concrete Pavements. Brussels.
2. Novak, J., Kohoutkova, A., Kristek, V., and Vodicka, J., 2017. Precast concrete pavement – systems and performance review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 236, No. 1, pp. 012030). IOP Publishing. 10.1088/1757-899X/236/1/012030
3. Hossain, Md. U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., and Cheng, J.C.P., 2016. Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment, 21*, pp.70-84. https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0988-2
4. Xiaoyan, Z., Easa S.M., Yang, Z., Ji, T., and Jiang, Z., 2019. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Cleaner Production, 213*, pp.659-672. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227
5. Zheng, X., Easa, S.M., Ji, T., and Jiang, Z., 2020. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *Journal of Cleaner Production, 264*, pp.121466. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124976
6. Alaloul, W.S., Altaf, M., Musarat, Javed, M.F., and Mosavi, A., 2021. Systematic review of life cycle assessment and life cycle cost analysis for pavement and a case study. *Sustainability,* 13, 4377. https://doi.org/10.3390/su13084377
7. Li, J., Xiao, F., Zhanng, L, and Amirkhanian, S.N., 2019. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production, 233*, pp.1182-1206. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061
8. AzariJafari, H., Yahia, A., and Amor, M.B., 2016. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production, 112*, 2187-2197. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080
9. World Commission on Environment and Development (WCED), 1987. *Our Common Future (The Brundtland Report), 17*(1), pp.1-91.
10. Klopffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life-cycle Assessment, 13*(2), 89-95. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.115
11. Hamdar, Y., Chehab, G.R. and Srour, I., 2016. Life-Cycle Evaluation of Pavements: A Critical Review. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, *9*(6). https://doi.org/10.25103/jestr.096.02
12. Diependaele, M., 2018. A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements. *Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association*.
13. *Guidelines for life cycle cost analysis,* Stanford University ,2005.
14. International organization for standardization, 2006. *Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework*. ISO.
15. Yang, Y., Heijungs, R., and Brandao, M., 2017. Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA. *Journal of Cleaner Production, 150*, pp.237-242. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.006
16. United Nations Environment Programme and Society for Environmental Toxicology and Chemistry (UNEP/SETAC), 2012. *Towards a life cycle sustainability assessment: making informed choices on products.* UNEP/SETAC, Paris, France.
17. Zamgani, A., Pesonen, H.-L., and Swaar, T., 2013. From LCA to Life cycle sustainability assessment: concept, Practice and future directions. *International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(9), pp.1637-1641. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0648-3
18. Costa, D., Quinteiro, P., and Dias, A.C., 2019. A systematic review of life cycle sustainability assessment: current state, Methodological challenges, and implementation issues. *Science of the Total Environment, 686*, pp.774-787. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.435
19. Hoxha, E., Vignisdottir, H.R., Barbieri, D.M., Wang, F., Bohne, R.A., Kristensen, T., and Passer, A., 2021. Life cycle assessment of roads: exploring research trends and harmonization challenges. *science of the total environment. 759,* pp.143506. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506
20. Martinez-Arguelles, G., Acosta, M.P., Dugarte, M., and Fuentes, L., 2019. Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the northern region of colombia: case study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2673*(5), pp.397-406. https://doi.org/10.1177/0361198119839955
21. Mao, Z., 2012. *Life-cycle assessment of highway pavement alternatives in aspects of economic,*

environmental, and social performance (Doctoral dissertation, Texas A & M University).

22. Pittenger, D., Gransberg, D.D., Zaman, M., and Riemer, C., 2012. Stochastic life-cycle cost analysis for pavement preservation treatments. *Journal of Transportation Research Board, 2292*(1), pp.45-51. https://doi.org/10.3141/2292-06
23. Babashamsi, P., Yussof, N.I.M., Ceylan, H., Nor, N.G.M., and Jenatabadi, H.S., 2016. Evaluation of Pavement Life-cycle cost analysis: review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology, 9*(4), pp.241-254. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004
24. Hass, R., Tighe, S.L., and Falls, L.C., 2006. Determining return on long-life pavement investments. *Transportation Research Record, 1974*(1), pp.10-17. https://doi.org/10.1177/0361198106197400102
25. Giunta, M., 2020. Assessment of environmental impact of road construction: modelling and prediction of fine particulate matter emissions. *Building and Environment, 176,* pp.106865. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106865
26. Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P., Xue, S., Yu, Q., and Li, Q., 2022. Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering.* https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.06.001
27. Bizarro, D.E.G., Steinmann, Z., Nieuwenhijse, I., Keijzer, E., and Hauck, M., 2021. Potential carbon footprint reduction for reclaimed asphalt pavement innovations: LCA Methodology, best available technology, and near future reduction potential. *Journal of Sustainability. 13*(3), pp.1382. https://doi.org/10.3390/su13031382
28. Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., and Wang, C., 2016. Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: a case study of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health. 13*(3), pp.351. https://doi.org/10.3390/ijerph13030351
29. Ma, F., Sha, A., Yang, P. and Huang, Y., 2016. The greenhouse gas emission from Portland cement concrete pavement construction in China. *International journal of environmental research and public health*, *13*(7), pp.632. https://doi.org/10.3390/ijerph13070632
30. Blaaw, S.A., Maina, J.W., and Grobler, L.J., 2021. Social life cycle inventory for pavements – A case study of South Africa. *Transportation Engineering. 4*, pp.100060. https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100060
31. Stripple, H., 2001. *Life cycle assessment of road - a Pilot study for inventory analysis.* Second Revised Edition, IVL-report B1210 E.
32. Natham, R., McNeil, S., and Van Dam, T.J., 2009. Integrating environmental perspectives into pavement management: adding the pavement life-cycle assessment tool for environmental and economic effects to the decision-making toolbox. *Journal of Transportation Research Board, 2093*(1), pp.40-49. https://doi.org/10.3141/2093-05
33. Santos, J. and Ferreira, A., 2012. Life-cycle cost analysis system for pavement management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *48*, pp.331-340. https://doi.org/10.1080/10298436.2011.618535
34. UNEP/SETAC., 2013. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA). Life-cycle Initiative. UNEP/SETAC, Paris, France.
35. Benoît Norris, C., Traverzo, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T. and Russo Garrido, S., 2020. Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations.

[36. Huang, Y., Bird, R., and Heidrich, O., 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production,* 283-296. *17*(2), pp.283-296. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005
37. Wang, S., Hsu, C., and Hu, A.H., 2016. An analytic framework for social life cycle impact assessment – part1: methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment, 21*, pp.1514-1528. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1114-9
38. Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Ciroth, A., Brent, A.C., and Pagan, R., 2011. Environmental life cycle costing: a Code of Practice. *International Journal of Life Cycle Assessment, 16*, pp.389-391. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0287-5
39. Choi, K., Lee, H.W., and Mao, Z., 2015. Environmental, Economic, and social implications of highway concrete rehabilitation alternatives. *Journal of Construction Engineering and Management. 142*(2), pp.04015079. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001063
40. Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., and Graseley, Z., 2019. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production, 225*, pp.414-425. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.288

41. Muga, H.E., Mukherjee, A., Mihelcic, J.R., and Kueber, M.J., 2009. An integrated assessment of continuously reinforced and jointed plane concrete pavements. *Journal of Engineering, Design and Technology,7*(1),pp.81-98. https://doi.org/10.1108/17260530910947277
42. Zhang, H., Keoleian, G.A., Lepech, M.D., and Kendall, A., 2010. Life-cycle optimization of pavement overlay systems. *Journal of Infrastructure Systems. 16(4), pp.310-322.* https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000042
43. Heidari, M.R., Heravi, G. and Esmaeeli, A.N., 2020. Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, *254*,pp.120046.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046
44. Park, K., Hwang, Y., Seo, S. and Seo, H., 2003. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. *Journal of construction engineering and management*, *129*(1), pp.25-31. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(25)
45. Zapata, P. and Gambatese, J.A., 2005. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of infrastructure systems*, *11*(1), pp.9-20. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9)
46. Kucukvar, M. and Tatari, O., 2012. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(1), pp.86-90. https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.006
47. Loijos, A.A.N., 2011. *Life cycle assessment of concrete pavements: impacts and opportunities* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
48. Jullien, A., Dauvergne, M. and Cerezo, V., 2014. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *Transportation research part D: transport and environment*, *29*, pp.56-65. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006
49. Anastasiou, E.K., Liapis, A. and Papayianni, I., 2015. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, *101*, pp.1-8. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009
50. Pleșcan, C., Barta, M., Maxineasa, S.G. and Pleșcan, E.L., 2022. Life cycle assessment of concrete pavement rehabilitation: a Romanian case study. *Applied Sciences*, *12*(4), pp.1769. DOI:10.3390/app12041769
51. Wu, D., Yuan, C. and Liu, H., 2017. A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case. *International Journal of Pavement Engineering*, *18*(1), pp.11-25. https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1030743
52. Yepes, V., Torres-Machi, C., Chamorro, A. and Pellicer, E., 2016. Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm. *Journal of Civil Engineering and Management*, *22*(4), pp.540-550. https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1120770
53. Lee, E.B., Thomas, D.K. and Alleman, D., 2018. Incorporating road user costs into integrated life-cycle cost analyses for infrastructure sustainability: A case study on Sr-91 corridor improvement project (Ca). *Sustainability*, *10*(1), pp.179. *Sustainability.* https://doi.org/10.3390/su10010179
54. Akbarian, M., Swei, O., Kirchain, R. and Gregory, J., 2017. Probabilistic characterization of life-cycle agency and user costs: case study of Minnesota. *Transportation Research Record*, *2639*(1), pp.93-101. https://doi.org/10.3141/2639-12
55. *Diependaele, M., 2018. A guide on the basic principles of Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements. Brussels, Eupave, European Concrete Paving Association*.
56. Rabehi, M., Mezghiche, B., and Guettala, S., 2013. Correlation between initial absorption of the cove concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Construction and Building Materials, 45,* pp.123-129. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074
57. Głuchowski, A., Sas, W., Dzięcioł, J., Soból, E. and Szymański, A., 2018. Permeability and leaching properties of recycled concrete aggregate as an emerging material in civil engineering. *Applied Sciences*, *9*(1), pp.81. https://doi.org/10.3390/app9010081

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

شریف

مجله‌ی علمی «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 Wordبا قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاما فقط در محیط Mathtypeارائه 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 رایانامه سازمانی 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 و چکیده انگلیسی بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کلمه با قلم Times ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی، زیربخش‌ها و 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 px ۶ 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 و با فرمت Harvard باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی [In Persian] داخل براکت قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples: Journals:

Mashaly E., El-Heweity M., Abou-Elfath H. and et al., 2011. Behavior of four-bolt extended end-plate connection subjected to lateral loading. *Alexandria Engineering Journal*, *50*(1), pp.79-90. https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.011.

Journals:

Sabzevari, S. and Shahabian, F., 2018. Optimum selection of corrugated sandwich panels shape and materials subjected to blast loading. *J. of Structural and Construction Engineering*, *5.2*(17), pp.39-52 [In Persian]. DOI:10.22065/jsce.2018.126299.1531.

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G., 1990. The preforation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches. *Int. J. of Mech. Sci.*, *20*(3), pp.801-820.

Book:

Hindmarsh, J., 1975. *The Electrical-Circuit Viewpoint*, In Electrical Machines and their Applications, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp.57-130, Pergamon Press, Oxford, UK.

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).

Civil Engineering

Sharif

1

Spring
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 **AXIAL AND FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS RETROFITTED WITH FRP COMPOSITES THROUGH THE CORNER STRIP-WRAP TECHNIQUE**
Alireza Saljoughian and Davood Mostofinejad

15 **EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW METALLIC DAMPER USING HOURGLASS FUSE**
Mohammad Hosein Afridoon, Reza Aghayari, Mohammad. H Adibrad and Mehrzad Tahamouliroudsari

25 **ENHANCING THE DURABILITY AND ELASTIC MODULUS OF OIL-CONTAMINATED SOILS IN WET-DRY CYCLES THROUGH STABILIZATION WITH TRADITIONAL MATERIALS**
Hadis Nasiri, Navid Khayat and Ahad Nazarpour

39 **INVESTIGATING THE RATIO OF $PM_{2.5}$ TO PM_{10} PARTICLE CONCENTRATION IN TEHRAN CITY AND COMPILING AN INDEX FOR THE OCCURRENCE OF DUST**
Zohreh Zeynadini Mansorabadi and Yousef Rashidi

48 **PRIORITIZING THE CONSTRUCTION OF BICYCLE LANES IN THE CENTRAL AREA OF TEHRAN BASED ON SUSTAINABLE TRANSPORTATION PRINCIPLES**
Khashayar Mahmoudian and Amirhassan Kermanshah

RESEARCH NOTES:

59 **EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF METAHEURISTIC ALGORITHMS IN THE OPTIMAL DESIGN OF PILE WALL RETAINING SYSTEMS**
Farshad Taiyari

72 **INVESTIGATING THE ARRANGEMENT OF REBARS ON THE DUCTILITY OF CONCRETE SHEAR WALL WITH FEM SIMULATION**
Ebrahim Koochaki and Arash Sayari

84 **EXPERIMENTAL STUDY OF SEISMIC BEHAVIOR AND MODIFICATION OF THE FAILURE REGION OF MECHANICAL BAR SPLICES**
Mohamad Reza Shokrzadeh and Fariborz Nateghi-Alahi

98 **LABORATORY INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF HELICAL PILES UNDER MONOTONIC LOADING AT DIFFERENT LOADING SPEEDS**
Seyed Sajad Hosseini, Mohsen Keramati and Reza Hoseinpour

110 **ECONOMIC, ENVIRONMENTAL, AND SOCIAL ASSESSMENT OF CONCRETE PAVEMENT LIFE CYCLE: A LITERATURE REVIEW**
Mohammad Saleh Entezari, Rashid Tanzadeh and Fereidoon Moghaddas Nejad