



مقالات پژوهشی:

- ارزیابی اثرات همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در انتخاب شیوه‌های فعال سفر دانش‌آموزان
سید محمدصادی میرنامری، سید محمدحسین دهداد و علی نادران
- تحلیل تأثیر تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌های شبکه‌ی قطری بلندمرتبه با پیکربندی پیرامونی مختلف براساس معیار شاخص نیرومندی
مهیار روشنی، افشین مشکوه‌الدینی و علی معمولی
- ارزیابی رفتار دیوار برشی بتنی مسلح دارای گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل
ابوالفضل عرب‌زاده و امیرپویا غلامرضا
- بررسی آزمایشگاهی کاربرد ذره‌ی هوشمند در توصیف احتمالاتی دینامیک انتقال رسوب بستر بعد از آستانه
حامد فرهادی، کاظم اسماعیلی، مایوسس والبراکیس و عبدالرضا ظهیری
- مدل‌سازی عوامل مؤثر در تغییر تمایل استفاده از تاکسی اینترنتی در شرایط کوید - ۱۹
امد خیری و امیررضا مددخی
- مدل‌سازی رفتاری تأثیر تاکسی‌های اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی
سیدرضا اسماعیل‌زاده و امیررضا مددخی
- شناسایی ترک در اعضاء بتنی با استفاده از مدل‌های رمزگذار - رمزگشا بر پایه‌ی یادگیری عمیق
محمد موسوی، علی بخشی
- تخمین پیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت اثر طیف حوزه‌ی نزدیک گسل با به کارگیری روش‌های خطی‌سازی معادل
محمدرشید سلیمی، مهراں بایزدی، کامران نوبخت وکیلی و آزاد یزدانی
- مطالعه‌ی عددی اتصال توبین به صورت کاملاً پیچی به منظور اتصال گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع سپری‌شکل و نبشی جان
مهدی دره زشتکی، امیر قیامی آزاد و مهدی قاسمی
- بررسی آزمایشگاهی جوش اکسی‌استیلن و قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی، برنجی و برنزی
پهمن شروانی تبار، سعید تقاضی مایان و لارنگ صادقی
- ارزیابی استاتیکی و چندمرحله‌ی مقاومت بیرون کشش ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌ی
علی نمایی کهنل، علیرضا اردکانی و محمود حسنلوراد

ARTICLES:

- Evaluation the Effects of the Covid-19 Pandemic on Choosing Active Travel Modes
M.H. Mirnaseri, M.H. Dehdad and A. Naderan
- Seismic Resilience Analysis of High-Rise Diagrid Structures with Various Skeletal Configurations Based on Robustness Criterion
M. Roshani, A. Mestkat-Dini and A. Massumi
- Evaluation of Behavior of Reinforced Concrete Shear Wall with Irregular Opening Due to Near-Fault Earthquake
A. Arabzadeh and A.P. Gholamrezaie
- Smart-Particle Application for Describing the Probabilistic Particle Transport Dynamics Above Threshold Conditions
H. Farhadi, K. Esmaili, M. Valyakis and A. Zahedi
- Modeling Factors Affecting Utility to Use Internet Taxi Under Covid-19
A. Kheiri and A.R. Mamdohi
- Behavioral Modeling of the Impact of Internet Taxis on the Car Dependency
S.R. Esmailzadeh and A.R. Mamdohi
- Crack Detection in Concrete Members Using Encoder-Decoder Models Based on Deep Learning
M. Mousavi and A. Bakhti
- Estimation of the Peak Response of Nonlinear Systems Under the Effect of Near-Field Design Spectrum Using Equivalent Linearization Methods
M.R. Salimi, M. Balodi, K. Nobakht Vakili and A. Yazdani
- Numerical Study of a Novel Bolted Moment Connection for the Beam to Column Connection Using T-Shapes and Web Angle Sections
M. Darrehzesheshi, A.R. Ghiami Azad and M. Ghassemlieh
- Experimental Investigation of Oxy-Acetylene Welding and Arc Welding with Steel, Brass, and Bronze Electrodes
B. Shervani Tabar, S. Enteghami Mayan and A. Sadeghi
- Evaluation of the Static and Multistage Geocell Pullout Behavior in Coarse Grained Soil
A. Namaei-Kohal, A.R. Ardakani and M. Hassanlou Rad

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

سر دبیر: دکتر محسن قائمیان

سر دبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی

مدیر اجرایی: پریسا مروتی

مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف خان

ویرایش: رزیتا رستخیز پادار

حروفچینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی

صفحه آرایی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیمیا آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

طراح لوگو: زنده یاد مرتضی ممیز

طرح روی جلد و ساختار صفحه آرایی: مصطفی اسداللهی

نظارت فنی و چاپ: پیمان فرگاهی

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله: علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۰۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

پست تصویری: ۶۶۰۱۲۹۸۳

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

سایت اسپرینگر: www.globalsciencejournals.com

پست الکترونیکی: pajouhesh@sharif.edu

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

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بیتا آیتی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر همایون استکانچی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی پاک

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیررضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر حسین رحامی

دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران

دکتر فیاض رحیم زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیر صمیمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ناصر طالب بیدختی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

دکتر محسن قائمیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدجواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر حسن میرزابزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علی نورزاد

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

دکتر جواد واشقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هيات تحريره يه تخصصي

• سردبیر تخصصي: دکتړ ابو الحسن وفایي

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ احمد ابريشم چي

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ همایون استکانچي

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ عباس افشار

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتړ محمد علي پر خورداري

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتړ حسين پور زاهدی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ مسعود تحريشي

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ ايوب ترکيان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ عباسعلي تسنيمي

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتړ حسن حاجي کاظمي

استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتړ سيد محسن حائري

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ امير رضا خويي

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ فياض رحيم زاده

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ علي اکبر رمضانپور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتړ سيد مهدي زهرايي

دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتړ محمد مهدي سعادت پور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتړ عيسي سلاجقه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان

دکتړ مجيد صادق آذر

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتړ ناصر طالب بيدختي

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتړ ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتړ محمد کار آموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتړ محمد تقی کاظمي

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتړ سيد مجدالدین مير محمد حسيني

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتړ سيد شهاب الدين يثري

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتړ علي کاوه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

هيات مشاوران

دکتړ ابراهيم افسر ديزج

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتړ مرتضی اسد امرجي

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی

دکتړ يوسف حسين زاده

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتړ احسان خجسته فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه رفسنجان

دکتړ امير عباس رصافي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

دکتړ بهزاد شکسته بند

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی ارومیه

دکتړ مجيد شالفرش

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتړ عبدالرضا شيخ الاسلامي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتړ جعفر عسکري مارناني

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

دکتړ مجيد قلعهکي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه سمنان

دکتړ محمد طاهر کمالی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه هرمزگان

دکتړ امين کشاورز

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه خلیج فارس

دکتړ مهدي مظاهري

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

دکتړ سيد حسين مهاجري

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه خوارزمی

دکتړ علیرضا ماهپور

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید بهشتی

دکتړ سيد ناصر مقدس تفرشي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتړ علي نیکخو

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتړ غلامرضا هوايي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه امیرکبیر

دکتړ حسن يوسفی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتړ علي اکبر يحيی آبادي

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بجنورد

مقالات پژوهشی:

- ۳ ارزیابی اثرات همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در انتخاب شیوه‌های فعال سفر دانش‌آموزان
سید محمد هادی میرناصری، سید محمد حسین دهناد و علی نادران
- ۱۵ آنالیز تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌های شبکه‌ی قطری بلندمرتبه با پیکربندی پیرامونی مختلف براساس معیار شاخص نیرومندی
مهیار روشنی، افشین مشکوه‌الدینی و علی معصومی
- ۲۹ ارزیابی رفتار دیوار برشی بتنی مسلح دارای گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل
ابوالفضل عرب‌زاده و امیرپویا غلامرضایی
- ۴۳ بررسی آزمایشگاهی کاربرد ذره‌ی هوشمند در توصیف احتمالاتی دینامیک انتقال رسوب بستر بعد از آستانه
حامد فرهادی، کاظم اسماعیلی، مانوسس والیراکیس و عبدالرضا ظهیری
- ۵۵ مدل‌سازی عوامل مؤثر در تغییر تمایل استفاده از تاکسی اینترنتی در شرایط کوید - ۱۹
آصف خیری و امیررضا ممدوحی
- ۶۷ مدل‌سازی رفتاری تأثیر تاکسی‌های اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی
سیدرضا اسماعیل‌زاده و امیررضا ممدوحی
- ۷۹ شناسایی ترک در اعضاء بتنی با استفاده از مدل‌های رمزگذار - رمزگشا بر پایه‌ی یادگیری عمیق
محمد موسوی، علی بخشی
- ۸۹ تخمین بیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت اثر طیف طرح حوزه‌ی نزدیک گسل با به کارگیری روش‌های خطی‌سازی معادل
محمد رشید سلیمی، مهران بایزیدی، کامران نوبخت و کیلی و آزاد یزدانی
- ۹۹ مطالعه‌ی عددی اتصالی نوین به صورت کاملاً پیچی به منظور اتصال گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع
سپری‌شکل و نبشی جان
مهدی دره زرشکی، امیر قیامی آزاد و مهدی قاسمیه
- ۱۱۱ بررسی آزمایشگاهی جوش اکسی‌استیلن و قوس الکتریکی با الکترودهای: فولادی، برنجی و برنزی
بهمن شروانی تبار، سعید انتقامی مایان و ارژنگ صادقی
- ۱۲۱ ارزیابی استاتیکی و چندمرحله‌ی مقاومت بیرون‌گشش ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌ی
علی نمایی کهل، علیرضا اردکانی و محمود حسناورد

ضمائم:

- ۱۳۹ چکیده مقالات به انگلیسی

ارزیابی اثرات همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در انتخاب شیوه‌های فعال سفر دانش‌آموزان

سید محمد هادی میرناصری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

سید محمد حسین دهناد * (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه قم

علی نادران (استادیار)
دانشکده‌ی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۲/۳، ص. ۱۴-۳، (پژوهشی)

با همه‌گیری ویروس کوید ۱۹، برخی کاربران شبکه‌های حمل‌ونقل به دلیل نگرانی ابتلا به این ویروس، شیوه سفر خود را تغییر داده‌اند. برای انجام این مطالعه از نمونه‌ی شامل ۲۶۷ پسر دانش‌آموز و ۵۴۶ دختر دانش‌آموز، براساس یک پرسشنامه مطالعه - محور در شهر قم در سال ۱۳۹۹ استفاده شده است. نتایج برازش مدل‌های انتخاب لوجیت دوجمله‌ی به تفکیک جنسیت و موقعیت زمانی (قبل و بعد از همه‌گیری ویروس کوید ۱۹) مشخص کرد که مقدار پارامتر خوبی برازش مک‌فدن برای تمامی مدل‌ها بزرگتر از ۱۶/۰ و کمتر از ۲۷/۰ است و تغییرات متغیرهای مستقل در این مدل‌ها در سطح مناسبی می‌توانند تغییرات متغیر وابسته را نمایش دهند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های خانوار دانش‌آموز شیوه‌ی سفر والدین در سفرهای کاری و درک از مسافت سفر بین منزل تا مدرسه در مطلوبیت انتخاب شیوه‌های سفر فعال در قبل از همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ اثرگذار بوده است. همچنین، متغیرهای ادراکی والدین دانش‌آموز نسبت به همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ فقط در مدل مربوط به بعد از همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ مربوط به پسران معنادار شده است.

واژگان کلیدی: شیوه‌ی سفر فعال، جنسیت، ویروس کوید ۱۹، مدل انتخاب لوجیت دوجمله‌ی.

۱. مقدمه

مجموعه تصمیماتی که یک فرد در سفر خود اتخاذ می‌کند بیانگر رفتار سفر وی هستند. انتخاب شیوه‌ی سفر نیز یکی از جنبه‌های مهم سفرهای درون‌شهری بوده که در مطالعات متعددی به عنوان نماینده‌ی از رفتار سفر معرفی شده است. در این راستا، شیوه‌های سفر فعال که شامل پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری می‌شوند به دلیل سادگی، اقتصادی بودن و اثر مثبت در پارامترهای ترافیکی و مشخصه‌های مرتبط با سلامتی فردی و اجتماعی می‌توانند نقش مهمی را در جابجایی‌های درون‌شهری ایفا کنند.

در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ی به بررسی چگونگی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی محیط و ویژگی‌های نظری (پندارها و ادراک مرتبط با سفر)^[۱]، با رفتار سفر شهروندان پرداخته‌اند. با این حال، با همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در دنیا رفتار سفر شهروندان با تغییرات گسترده‌ی مواجه شده است. این تغییرات ناشی از دو

در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ی به بررسی چگونگی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی محیط و ویژگی‌های نظری (پندارها و ادراک مرتبط با سفر)^[۱]، با رفتار سفر شهروندان پرداخته‌اند. با این حال، با همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در دنیا رفتار سفر شهروندان با تغییرات گسترده‌ی مواجه شده است. این تغییرات ناشی از دو

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳/۴/۱۴۰۰، اصلاحیه ۱۷/۱/۱۴۰۱، پذیرش ۵/۲/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.58413.2976

۲. مرور ادبیات

با توجه به هدف این مطالعه بخش مرور ادبیات به دو قسمت تقسیم می‌شود. در قسمت اول مطالعاتی که ارتباط بین عوامل محیطی و نظری با انتخاب شیوه‌های سفر دانش‌آموزان را بررسی کرده‌اند ارائه می‌شوند. سپس در قسمت دوم مطالعاتی در رابطه با اثر همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در رفتار سفر شهروندان ارائه خواهند شد.

۱.۲. عوامل محیطی و نظری

در دو دهه اخیر با تمرکز مطالعات مختلف بر رفتار سفر دانش‌آموزان، علیرغم اثرگذاری ویژگی‌های فردی و خانوار در رفتار سفر ارتباط مهمی میان عوامل محیطی با رفتار شیوه‌های سفر فعال دانش‌آموزان دیده شد. با این حال، مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر علاوه بر احتساب متغیرهای محیطی از متغیرهای مرتبط با پندار و درک دانش‌آموز و والدین وی نسبت به شیوه‌های سفر فعال و مسائل مرتبط با آن (مانند وضعیت ایمنی، امنیت و تسهیلات ارائه شده) نیز بهره برده‌اند. نکته جالب توجه این است که در مطالعات متعددی این دو دسته عامل محیطی و نظری در کنار یکدیگر مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج قابل ملاحظه‌ای بدست آمده است. در ادامه مجموعه‌ای از مطالعات در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

پانتر^۱ و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۰ در نورفولک^۲ در انگلستان بررسی کردند که درک از محیط اطراف، پشتیبانی جامعه و پندارهای والدین به چه شکل بر شیوه سفر دانش‌آموزان اثر می‌گذارد.^[۳] نتایج این مطالعه مشخص نمود که پندارهای والدین و نگرانی‌های مرتبط با مسئله‌ی ایمنی، حمایت والدین و دوستان برای انجام سفر با شیوه‌های سفر فعال و درک والدین نسبت به اینکه شاخص قابلیت پیاده‌روی در اطراف محل زندگی در سطح مناسبی قرار دارد به شکل موثری می‌توانند بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار باشند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که هر چه مسافت سفر دانش‌آموز طولانی‌تر باشد، نگرانی‌های والدین نسبت به شیوه‌ی سفر فعال بیشتر می‌شود.

در مطالعه دیگری توسط لارسن^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ ارتباط بین مسائل مرتبط با ایمنی و شیوه سفر انتخابی دانش‌آموزان مقاطع پنجم و ششم ابتدایی بررسی شد.^[۴] نتایج این مطالعه نشان داد که قرار داشتن محل زندگی فرد در اطراف شهر، نیاز به عبور از تقاطع در مسیر، وجود حجم تردد نزدیک به ظرفیت مسیر، عدم وجود پیاده‌رو در مسیر و وجود تسهیلات پارکینگ در مدرسه متغیرهای محیطی اثرگذار در انتخاب پیاده‌روی (با اثر منفی) هستند.

فن گووردن و دی بوئر^۴ در سال ۲۰۱۳ وضعیت شیوه‌های سفر فعال در هلند و فلاندر^۵ را بررسی کردند.^[۵] در این مطالعه سهم شیوه سفر دوچرخه‌سواری به شکل قابل ملاحظه‌ی زیاد بود و سفرهای تحصیلی سهم زیادی داشتند. نتایج این مطالعه مشخص کرد هر چه یک شهر رشد بیشتری از نظر شهرنشینی داشته باشد، به ترتیب احتمال انتخاب دوچرخه‌سواری و پیاده‌روی از سواری شخصی برای انجام سفر تحصیلی بیشتر است. روتن^۶ و همکاران در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۵ در شهر تورنتو^۷ نشان دادند که احتمال اینکه در چهار یا پنج روز از یک هفته کامل شیوه سفر انتخابی دانش‌آموز در سفرهای تحصیلی پیاده‌روی باشد، برای دانش‌آموزانی که والدین آن‌ها درک خطر بیشتری از مسیر از بابت ایمنی تردد فرزند خود دارند به میزان ۴۷ درصد کمتر است.^[۶] آنان همچنین ارزیابی کردند چه ارتباطی بین عوامل محیطی و درک خطر والدین وجود دارد. نتایج مطالعه فوق نشان داد که تراکم بیشتر

چراغ خطر چشمک‌زن در مسیر و وجود گذرگاه عرضی در میانه بلوک تأثیر مستقیم در درک خطر بیشتر والدین دارد.

گولیانی^۸ و همکاران در مطالعه دیگری در تورنتو در سال ۲۰۱۵ بررسی کردند که چه عوامل محیطی و نظری در رفتار انتخاب شیوه سفرهای تحصیلی دانش‌آموزان با سنین ۱۰ و ۱۱ ساله اثرگذار است.^[۷] آنان با استفاده از مدل معادلات ساختاری و به تفکیک جنسیت نتایج خود را ارائه دادند. مطابق با نتایج ارائه شده، برای دختران و پسران مسافت سفر، عدم دسترسی به پیاده‌رو و تراکم تقاطع‌ها همبستگی منفی با ادراک والدین از دو مسئله ایمنی کافی در محل تردد خودروها و زیرساخت‌های مرتبط با پیاده‌روی دارند. همچنین، ادراک والدین از ایمنی محیط خودروها برای پسران با تراکم ترافیک بالای خودروها در محدوده مدرسه و برای دختران با وجود خیابان عریض در مسیر منتهی به مدرسه ارتباط دارد. نکته جالب توجه این است که دو متغیر ادراکی ذکر شده فقط در انتخاب شیوه‌ی سفر پیاده‌روی پسران اثرگذار بوده و اثر آن بر انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی دختران معنادار نشده است.

وی‌گود و سوسیلو^۹ در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۵ در کشور اسکاندینا بررسی کردند که کدام یک از ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی، سفر و عوامل محیطی و نظری بر انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی در سفرهای دانش‌آموزان ۱۰ و ۱۱ ساله اثرگذار است.^[۸] نتایج مشخص کرد که تنها دو متغیر ادراکی شامل کیفیت خوب فروشگاه‌های محلی و وجود ترافیک آرام و ایمن در محل زندگی بر انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی دانش‌آموزان اثرگذار هستند. مطالعه میترا و بولیونگ^{۱۰} در سال ۲۰۱۵ به مقایسه تفاوت رفتار سفر دانش‌آموزان کودک با سنین ۱۱ سال و دانش‌آموزان نوجوان با سنین ۱۴ و ۱۵ سال پرداختند.^[۹] نتایج این مطالعه نشان داد جدا از ویژگی‌های فرد و خانوار و مسافت سفر که بر رفتار انتخاب شیوه سفر دانش‌آموزان اثرگذار بوده، عوامل محیطی غالباً بر رفتار انتخاب شیوه سفر دانش‌آموزان کودک اثرگذار است. مهم‌ترین عوامل محیطی معنادار شده در مدل لوجیت چندجمله‌ی عبارت از عدم نیاز به عبور از عرض خیابان، تراکم زیاد خرده‌فروشی، تراکم ساختمان‌ها و مسیر سفر غیرمستقیم است. در مطالعه دیگری توسط کلارک^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۶ این مسئله بررسی شد که مسیرهای میانبر به چه شکل در انتخاب بیشتر پیاده‌روی اثرگذار خواهند بود.^[۱۰] دو نتیجه مهم مطالعه فوق این بود که اولاً مسیرهای میانبر برای نواحی با اتصال کمتر شبکه معابر و تراکم جمعیت ساکن کمتر کاربرد دارند. دوماً دانش‌آموزانی که مسافت سفر مدرسه تا منزل بیشتری دارند نسبت به میانبرها واکنش بیشتری نشان می‌دهند. اهرن^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۶ در هشت مدرسه ناحیه یورکشایر غربی^{۱۳} در انگلستان به بررسی عوامل موثر بر شیوه سفر دانش‌آموزان با سنین ۴ تا ۱۲ سال پرداختند.^[۱۱] آنان در مطالعه خود نشان دادند که وضعیت ترافیک در مسیر منزل تا مدرسه بر نگرانی‌های والدین نسبت به شیوه سفر انتخابی دانش‌آموز اثرگذار بوده و مانعی بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال است. هلیچ^{۱۴} در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۷ در کشور هلند شیوه‌های سفر فعال را به تفکیک پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری مورد ارزیابی قرار داد.^[۱۲] وی مشخص کرد که عوامل محیطی بر انتخاب این دو شیوه سفر در سفرهای تحصیلی دانش‌آموزان با سنین ۶ تا ۱۱ سال اثرگذار بوده و چگونگی اثر آن‌ها نیز متفاوت است. نتایج مطالعه وی نشان داد متغیرهای تردد در مسیرهای اصلی، وجود تقاطع سه‌راه در مسیر، تنوع کاربری‌ها، همواری مسیر تردد پیاده و دوچرخه و دسترسی به مقاصد مهم‌ترین متغیرهای محیطی اثرگذار بر انتخاب این دو شیوه سفر هستند.

ژانگ^{۱۵} و همکاران در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۷ رفتار شیوه سفر انتخابی دانش‌آموزان ۷ تا ۱۸ ساله را در شهر پکن^{۱۶} در چین بررسی کردند.^[۱۳] آنان در مطالعه خود سفرها را به دو بخش کوتاه‌تر و بلندتر از شش کیلومتر تقسیم کردند و

در سال ۱۷۲۰ در شهر تهران نشان دادند که دسترسی داشتن به ایستگاه حمل و نقل همگانی با اثر منفی بر انتخاب شیوه سفر پیاده روی اثرگذار است.^[۲۱]

۲.۲. همگیری ویروس کوید ۱۹

همگیری ویروس کوید ۱۹ منجر به تغییرات بی سابقه‌ی در الگوی فعالیت‌ها و رفتار سفر در سراسر جهان شده است. برخی از این تغییرات رفتاری در پاسخ به اقدامات محدودکننده اعمال شده توسط دولت (به عنوان مثال قرنطینه کامل یا جزئی) است، درحالی‌که برخی دیگر ناشی از ادراک شهروندان از مسائل ایمنی یا تعهد آن‌ها به رعایت یک‌سری محدودیت‌های مشخص برای جلوگیری از ابتلا به این ویروس است. در این راستا، بررسی مورد اول شاید پیچیدگی زیادی نداشته باشد درحالی‌که در مورد دوم مسائل جانبی مختلفی می‌توانند روی تغییر رفتار سفر شهروندان اثرگذار باشند. از این رو، نیاز است که این مسئله با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد، زیرا ممکن است تغییراتی که ناشی از مورد دوم در رفتار سفر افراد اتفاق می‌افتد منجر به این شود که فرد بعد از عادی شدن شرایط نیز به رفتار سفر سابق خود بازنگردد.

بهداری و همکاران در مطالعه‌ی در سال ۲۰۲۰ تغییرات شیوه سفر نزدیک به ۵۰۰ شهروند هندی را بررسی کردند.^[۲۲] آنان در پرسشنامه طرح شده از افراد خواسته بودند تا شیوه سفری که تا قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ برای اهداف سفر مختلف استفاده می‌کردند را بیان کنند. سپس از آن‌ها خواسته بودند شیوه سفری که در شرایط همگیری ویروس کوید ۱۹ استفاده می‌کنند را معرفی نمایند. نتایج نشان داد جمعیت قابل توجهی از اعضای نمونه تمایل به استفاده از شیوه سفر قبلی خود دارند درحالی‌که افرادی که تمایل زیادی به تغییر شیوه سفر دارند نیز غالباً از شیوه‌های سفر اشتراکی (مانند حمل و نقل همگانی و سرویس‌ها) به وسایل نقلیه شخصی (مانند سواری شخصی و موتورسیکلت) روی آورده‌اند. نتایج همچنین مشخص کرد که متغیرهایی چون سن، درآمد و جایگاه شغلی به طور معناداری در شیوه سفر انتخابی افراد در قبل و بعد از همگیری کوید ۱۹ اثرگذار هستند.

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۰ توسط محمد عبدالله و همکاران تغییرات رفتار سفر افراد پس از همگیری ویروس کوید ۱۹ نسبت به قبل از آن بررسی شد.^[۲۳] برای انجام این مطالعه اطلاعات سفر (شامل: هدف سفر، شیوه سفر، مسافت پیموده شده و تواتر سفر) ۱۲۰۳ نفر از کشورهای مختلف جهان جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که فراوانی اهداف سفر، شیوه سفر، مسافت پیموده شده و تواتر سفر در شرایط قبل و در حین همگیری ویروس کوید ۱۹ تفاوت قابل ملاحظه‌ی دارند. برای نمونه در حین همگیری ویروس کوید ۱۹ غالب سفرها مربوط به خریدهای روزمره بوده است. در حالی که قبل از آن اهداف سفر کاری و تحصیلی نقش چشمگیری داشته‌اند. همچنین، نتایج مشخص کرد که به طور قابل توجهی افراد شیوه سفر خود را از وسایل نقلیه همگانی به شیوه‌های سفر موتوری (شامل موتورسیکلت و سواری شخصی) و شیوه‌های سفر فعال تغییر داده‌اند. در نهایت، جنسیت، مالکیت سواری شخصی، جایگاه شغلی، مسافت سفر، هدف اصلی سفر و عوامل مرتبط با ویروس کوید ۱۹ (مانند نگرانی‌های مربوط به ابتلا) مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر انتخاب شیوه سفر شناخته شدند.

مولوی^{۲۱} و همکاران در مطالعه‌ی در سال ۲۰۲۱ با استفاده از دستگاه GPS نحوه جابجایی ۱۴۳۹ نفر از شهروندان سوئسی را بررسی کردند.^[۲۴] آن‌ها مشخص کردند که متوسط مسافت سفر این افراد در شرایط همگیری ویروس کوید ۱۹ نسبت

انتظار داشتند الگوی سفر بر اساس این تقسیم‌بندی متفاوت بوده و عوامل محیطی به شکل متفاوتی اثرگذار باشند. نتایج مطالعه فوق نشان داد که فرضیه مورد بررسی آن‌ها درست بوده و عوامل محیطی (که غالباً مرتبط با شیوه‌های سفر فعال هستند) بر سفرهای بلندتر از شش کیلومتر اثرگذار نیستند.

ایکدا^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از رویکرد مرور ادبیاتی به بررسی عوامل اثرگذار بر شیوه سفر انتخابی برای سفرهای تحصیلی دانش‌آموزان با سنین بین ۵ تا ۱۳ سال پرداختند.^[۱۴] نتایج این مطالعه مشخص کرد که قابلیت پیاده‌روی^{۱۸}، تعامل اجتماعی با اهالی محل و درک مثبت نسبت به عوامل مرتبط با ایمنی تردد دانش‌آموز به طور معناداری در انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار هستند. گکیر^{۱۹} و همکاران در سال ۲۰۱۸ در شهر فلاندر بلژیک^{۲۰} با استفاده از یک مطالعه آزمایش محور درباره وضعیت ترافیک و زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری بررسی کردند که تمایل والدین به دوچرخه‌سواری فرزندان دانش‌آموزان (با سنین ۱۲ تا ۱۴ سال) در شرایط مختلف چگونه تغییر می‌کند.^[۱۵] برای انجام این امر، از شش تصویر مختلف با توضیحات مربوط به آن استفاده شد. نتایج نشان داد که فراهم کردن مسیر مجزای دوچرخه از سواره‌رو مهم‌ترین عامل در بهبود درک والدین از عوامل محیطی برای تشویق فرزندان به دوچرخه‌سواری در سفرهای تحصیلی است. مطالعه شینر و همکاران در سال ۲۰۱۹ دیگر مطالعه‌ی است که به طور بنیادی به بررسی اثر عوامل محیطی و نظری بر انتخاب شیوه سفر دانش‌آموزان مقطع ابتدایی می‌پردازد.^[۱۶] آنان در این مطالعه از متغیرهای محیطی متعددی استفاده کردند و این متغیرها را در سه بخش متغیر مرتبط با ایمنی (آیا کودک در مسیر مدرسه از نقطه حادثه‌خیز عبور می‌کند؟)، متغیرهای مرتبط با پیاده‌رو و پیاده‌گذر عرضی (شامل عرض پیاده‌رو و فراوانی انواع پیاده‌گذرهای عرضی (و سایر متغیرهای محیطی) غیر از دو دسته قبلی شامل متغیرهای مرتبط با کاربری‌ها، تسهیلات ارائه شده برای سواری شخصی، وضعیت تردد سواری شخصی و وضعیت تقاطعات) تقسیم‌بندی کردند.

حاتم‌زاده و همکاران نیز در مطالعات خود ارتباط بین شیوه سفر پیاده‌روی و عوامل محیطی را در شهر رشت ارزیابی کردند.^[۱۷-۱۸] در یکی از مطالعات آنان که به تفکیک مقاطع تحصیلی بررسی‌های لازم انجام شده بود مشخص شد که در مقطع تحصیلی ابتدایی دانش‌آموزانی که در نواحی با تراکم جمعیت بیشتر زندگی می‌کنند، احتمال انتخاب پیاده‌روی در سفرهای تحصیلی برای آن‌ها کمتر است. همچنین در صورتی که دانش‌آموزان مقطع تحصیلی راهنمایی مقصد سفرهای تحصیلی‌شان مرکز شهر باشد، به احتمال کمتری در سفر خود پیاده‌روی خواهند کرد. در مطالعه دیگر که سفرهای تحصیلی به تفکیک جنسیت مورد ارزیابی قرار گرفته بود نشان داده شد که تراکم جمعیت در ناحیه اطراف مدرسه بر انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی برای پسران اثرگذار است. همچنین، اثر متغیرهای مرتبط با تنوع کاربری‌ها (شامل اتروپی و تعادل اشتغال و جمعیت) و اتصال شبکه‌ی معابر در رفتار انتخاب شیوه سفر پسران و دختران معنادار شناخته شد. علاوه بر این‌ها، در مطالعه دیگری حاتم‌زاده سفرهای تحصیلی شهر رشت را در دو قالب صبحگاهی و عصرگاهی بررسی کرد.^[۱۹] نتایج این مطالعه نیز مشخص کرد که عوامل محیطی غالباً در ناحیه محل سکونت بر انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی اثرگذار هستند. همچنین، در سفرهای صبحگاهی متغیرهای محیطی بیشتری بر رفتار انتخاب شیوه سفر اثر معناداری دارند.

از دیگر مطالعات داخلی می‌توان به مطالعه ارمگان و صمیمی در شهر تهران اشاره کرد.^[۲۰] نتایج این مطالعه نشان داد که تراکم جمعیت بیشتر با اثر مثبت و نگرانی والدین نسبت به ایمنی سفر دانش‌آموز در مسیر منزل تا مدرسه با اثر منفی بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار است. مهدی‌زاده و همکاران نیز در مطالعه خود

به قبل ۶۰ درصد کاهش یافته است. همچنین، تحلیل دقیق شیوه‌های سفر انتخابی افراد نشان داد که میزان استفاده از حمل‌ونقل همگانی ۹۰ درصد کاهش یافته در حالی که سهم دوجرخه‌سواری به شدت افزایش یافته است.

در مطالعه دیگری توسط باری^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۲۱ در دو شهر غربی مازندران و گجرات کشور هند نشان داده شد که خانواده‌ها صرف نظر از وضعیت اقتصادی خود نگرانی‌های مشابهی نسبت به سفر ایمن فرزندان خود به مدارس در شرایط کرونایی دارند.^[۲۵] علاوه بر این، با توجه به عدم وجود زیرساخت مناسب برای سفر ایمن دانش‌آموزان در شرایط کرونایی والدین ترجیح می‌دهند که فرزندانشان را با سواری شخصی به مدرسه برسانند.

۳.۲. جمع‌بندی مرور ادبیات

مطالعات اخیر در حوزه رفتار شیوه سفر غالباً به مسئله انتخاب شیوه سفر دانش‌آموزان پرداخته‌اند. با این حال، وضعیت پیش‌آمده ناشی از همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ باعث شده که تا حدودی رفتار سفر افراد تغییر یابد. پس از تکمیل فرایند مرور ادبیات مطالعه‌ی یافت نشد که تا به حال به بررسی تغییر رفتار شیوه سفر دانش‌آموزان ناشی از همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ در داخل کشور پرداخته باشد. از این رو، این مطالعه در صدد است با در نظر گرفتن عوامل مختلف موثر بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال (شامل: ویژگی‌های فرد و خانوار، ویژگی‌های سفر و عوامل محیطی و نظری) در کنار متغیرهای ادراکی مربوط به همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ تغییر رفتار سفر دانش‌آموزان را ارزیابی نماید. به بیان دیگر، هدف این مطالعه این است که مشخص نماید آیا نسبت به قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ عوامل موثر بر مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال دانش‌آموزان در بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ تغییر کرده یا خیر؟ البته در این بین با توجه به تفاوت ماهوی رفتار انتخاب شیوه‌های سفر تحصیلی بین پسران و دختران (که در مطالعات متعددی نشان داده شده است)، این مطالعه فرایند برازش مدل‌ها را به تفکیک جنسیت مورد ارزیابی قرار داده است تا از این نظر نیز تغییرات رفتاری به شکل بهتری مشخص شود.

۳. روش تحقیق

۳.۱. محدوده‌ی مورد مطالعه

شهر قم با جمعیت ۱/۲ میلیون نفری و مساحت ۲۸۵ کیلومتر مربعی از شهرهای مرکزی ایران به عنوان منطقه‌ی مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی مسیرها در این شهر به صورت شعاعی بوده است که غالباً به حرم حضرت معصومه (س) و بازار منتهی می‌شوند. علاوه بر این، اتصال حلقوی مسیرها باعث شده است حجم زیادی از ترافیک از خطوط شعاعی به این کمان‌ها منتقل شده و وضعیت ترافیک شهر بهبود یابد. در شهر قم با بیش از ۲۲۰ مدرسه دوره متوسطه اول نزدیک به ۵۹۰۰۰ دانش‌آموز تحصیل می‌کنند. در این مطالعه پس از طرح پرسشنامه مورد نظر، این پرسشنامه به صورت اینترنتی در بازه زمانی دو هفته‌ی ۲۲ دی‌ماه تا ۶ بهمن‌ماه به صورت تصادفی در بین ۶۰ مدرسه متوسطه اول شهر قم (از بین بیش از ۲۲۰ مدرسه متوسطه اول موجود در شهر قم) توزیع شد. لینک پرسشنامه در اختیار دانش‌آموزان آن مدارس قرار گرفت و از آن‌ها خواسته شد تا با همراهی والدین خود به سوالات پاسخ دهند. پس از اتمام فرایند جمع‌آوری اطلاعات مشخص شد که از حدود ۱۱۰۰ نفر دانش‌آموز در این مدارس، ۱۲۴۷ نفر (نخ پاسخگویی ۱۱/۳ درصدی) به پرسشنامه پاسخ دادند. با بررسی‌های تکمیلی نیز مشخص شد که ۴۳۴

مورد از مشاهدات از اعتبار کافی برای قرارگیری در فرایند مدلسازی برخوردار نیستند. با حذف این مشاهدات ۸۱۳ مشاهده (۶۵/۲ درصد کل مشاهدات اولیه) به عنوان نمونه نهایی مورد بررسی در این مطالعه انتخاب شد.

۳.۲. مدل انتخاب

متغیر دوگانه انتخاب و عدم انتخاب شیوه‌های سفر فعال با استفاده از مدل‌سازی انتخاب گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه پس از معرفی نظریه مطلوبیت روش مدلسازی انتخاب لوجیت دوجمله‌ی بررسی شده است. تابع مطلوبیت که مقدار مطلوبیت هر گزینه برای یک فرد خاص را نشان می‌دهد وابسته به دو بخش مطلوبیت قابل مشاهده و مطلوبیت غیرقابل مشاهده بوده است که رابطه بین آن‌ها (رابطه ۱) نیز از ساختار خطی تبعیت می‌کند.^[۲۶]

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

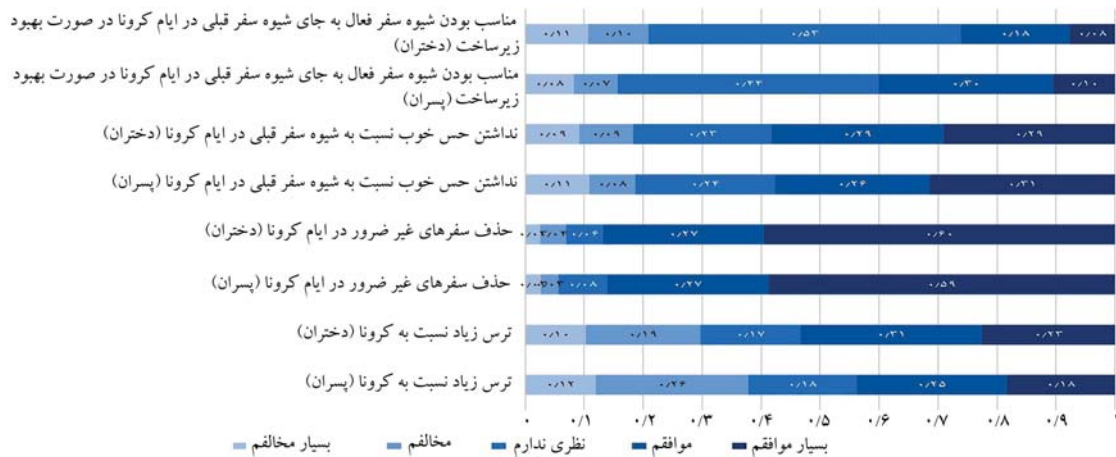
در رابطه فوق، U_{in} مطلوبیت گزینه i برای مشاهده m ام بوده که شامل دو بخش مطلوبیت مشاهده شده (V_{in}) و مطلوبیت مشاهده نشده (ε_{in}) می‌شود. به طور کلی مطلوبیت مشاهده نشده بیانگر اثر دیگر متغیرهای اثرگذار بر مطلوبیت بوده که در جمع متغیرهای اثرگذار در مطلوبیت لحاظ نشده است. همچنین ممکن است اثر بعضی متغیرها بر تابع مطلوبیت به شکل غیرخطی باشد که در این صورت ممکن است خطایی در مقدار مطلوبیت ایجاد شود که وجود بخش مشاهده نشده مطلوبیت می‌تواند به این دلیل باشد. علاوه بر این، مطلوبیت مشاهده شده خود وابسته به ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری مختلفی (شامل ویژگی‌های فرد تصمیم‌گیرنده و ویژگی‌های گزینه انتخابی) است که رابطه بین این‌ها خطی و مطابق با رابطه ۲ است. لازم به توضیح است که خطای مورد اشاره در رابطه ۱ می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد و رابطه خطی ارائه شده در رابطه ۲ می‌تواند یکی از دلایل آن باشد.

$$V_{in} = \beta_i X_{in} + \beta_0 \quad (2)$$

در رابطه فوق V_{in} مطلوبیت مشاهده شده گزینه i برای فرد m ام، β_i بردار پارامترهای تخمینی برای گزینه i و X_{in} بردار ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری مربوط به گزینه گزینه i و فرد n است. در مجموع بر اساس نظریه مطلوبیت با محاسبه مطلوبیت مشاهده‌شده و قابل اندازه‌گیری برای تمامی گزینه‌های پیش‌رو برای یک فرد، گزینه‌ی که بیشترین مطلوبیت را داشته باشد به عنوان گزینه انتخابی فرد شناخته می‌شود. به طور کلی احتمال انتخاب گزینه مورد نظر (در این مطالعه شیوه‌های سفر فعال شامل پیاده‌روی و دوجرخه‌سواری) برای هر فرد که با $(P_n(i))$ نشان داده شده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{In}) \\ = P(\beta_i X_{in} + \beta_0 - \beta_I X_{In} - \beta_I \geq \varepsilon_{In} - \varepsilon_{in}) \quad \forall I \in i \quad (3)$$

در رابطه فوق با فرض پیروی بخش مشاهده نشده مطلوبیت از یک توزیع مشخص، مقدار احتمال انتخاب گزینه i توسط فرد m ام تعیین می‌شود. به ترتیب در صورتی که فرض شود بخش مشاهده نشده مطلوبیت از توزیع نرمال و گامبل تبعیت کند، دو رویکرد مدل‌های انتخاب پرابیت و لوجیت شکل می‌گیرد. در این مطالعه از رویکرد مدل انتخاب لوجیت دوجمله‌ی استفاده شده است. در مدل‌های انتخاب لوجیت دوجمله‌ی دو فرض پایه‌ی در فرایند برازش مدل‌ها اعمال می‌شود. فرض اول استقلال گزینه‌ها از یکدیگر و فرض دوم عدم هم‌وابستگی قسمت مشاهده



شکل ۱. متغیرهای پنداری مرتبط با ویروس کوید ۱۹.

این چهار سوال به بررسی دیدگاه خانواده دانش آموز به موضوعاتی چون ترس از ویروس کوید ۱۹، حذف سفرهای غیر ضروری به دلیل جلوگیری از ابتلا به بیماری، حساس بودن نسبت به شیوه سفر سابق دانش آموز (قبل از شیوه ویروس کوید ۱۹) برای سفر به مدرسه پس از بازگشایی مدارس و موافق بودن با شیوه های سفر فعال برای سفر به مدرسه در راستای جلوگیری از ابتلا به بیماری می پردازد. شکل ۱ پاسخ دانش آموزان و والدین آنها به این سوالات را نشان می دهد.

از شکل ۱ مشخص است که دختران حساسیت بیشتری نسبت به بیماری و ابتلا به کوید ۱۹ دارند. فراوانی نسبی خانواده های پسران و دختران دانش آموزی که سفرهای غیر ضروری خود در ایام پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ را حذف کرده اند تقریباً برابر است. همچنین سهم پسران و دخترانی که نسبت به شیوه سفر قبلی خود حس خوبی ندارند برابر بوده است. نتایج نشان می دهد که پسران با درصد فراوانی بیشتری شیوه های سفر فعال را برای شرایط پس از شیوع کوید ۱۹ برای سفر به مدرسه مناسب می دانند. استفاده از عامل های نهان به جای شاخص ها و متغیرهای مختلف که غالباً با یکدیگر همبستگی معناداری دارند می تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای محدود کردن تعداد متغیرها برای ورود به فرایند مدلسازی تلقی شود. با توجه به اینکه در پرسشنامه مورد بررسی در این مطالعه شش متغیر مرتبط با وضعیت تسهیلات مرتبط با پیاده روی مورد بررسی قرار گرفت، با استفاده از روش ریاضی تحلیل عاملی (تحلیل مولفه های اصلی) این شش متغیر یا شاخص در یک عامل خلاصه شد. این عامل با عنوان دیدگاه مثبت نسبت به تسهیلات پیاده روی در مسیر منزل تا مدرسه نام گذاری شد. همچنین مطابق با نتایج مشخص است که مقدار آلفای کرونباخ و شاخص KMO در سطح بسیار مناسبی (بزرگتر از ۰/۷^[۲۷]) قرار دارد. روش تحلیل مولفه های اصلی همچنین برای استخراج یک عامل نهان از مجموعه چهار پرسش مرتبط با پندار دانش آموزان و خانواده آنها درباره شیوه های سفر فعال مورد استفاده قرار گرفت. از جدول ۱ مشخص است که این چهار متغیر در یک عامل با عنوان پندارهای مثبت به شیوه های سفر فعال خلاصه شده اند. همچنین مقدار شاخص KMO و آلفای کرونباخ برای مجموعه این متغیرها به ترتیب برابر با ۰/۷۴۱ و ۰/۷۷ به بدست آمده است.

نتیجه اعمال روش تحلیل مولفه های اصلی بر چهار متغیر دیدگاهی مرتبط با ویروس کوید ۱۹ نشان داد که دو عامل اصلی بیانگر تغییرات این متغیرها بوده که با عنوان های حساس بودن به ویروس کوید ۱۹ و دیدگاه مثبت به شیوه سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹ نام گذاری شدند. مقدار شاخص KMO و آلفای

نشده توابع مطلوبیت است. در صورتی که این دو فرض برقرار نباشند استفاده از این رویکرد امکان ایجاد خطا در نتایج را فراهم می سازد. در مجموع نحوه محاسبه احتمال انتخاب گزینه i توسط فرد n از طریق رابطه ۴ تعیین می شود.

$$P_n(i) = \frac{EXP[\beta_i X_{in}]}{EXP[\beta_i X_{in}] + EXP[\beta_I X_{In}]} \quad (4)$$

به جهت تخمین بردار ضرایب (β) از رویکرد بیشینه سازی تابع درست نمایی استفاده می شود. این تابع در رابطه ۵ ارائه شده است. در این رابطه δ_{in} مطابق با رابطه ۶ تعریف می شود.

$$LL = \sum_{n=1}^N \left(\delta_{in} [\beta_i X_{in} - \beta_I X_{In}] + \right) \quad (5)$$

$$\delta_{in} = \begin{cases} 1, & \text{اگر فرد شماره } n \text{ گزینه } i \text{ کند} \\ 0, & \text{اگر فرد شماره } n \text{ گزینه } i \text{ نکند} \end{cases} \quad (6)$$

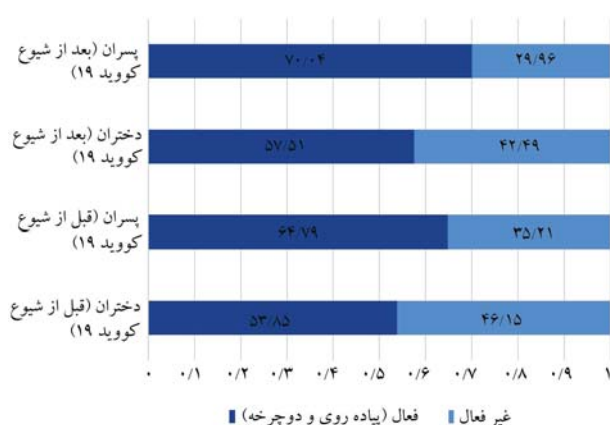
۴. نتایج و تحلیل

در این مطالعه با توجه به اهداف مورد نظر و بررسی ادبیات یک پرسشنامه پژوهشی - محور طراحی شد. در بخش اول پرسشنامه ویژگی های دانش آموز و خانواده وی مورد بررسی قرار گرفته است. بخش دوم درباره شاغل بودن والدین و شیوه سفر آنها برای رفت و برگشت به محل کار سوال شده است. بخش سوم نیز به ارزیابی ویژگی های سفر دانش آموزان در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ پرداخته شده است. در ادامه درباره محیط اطراف منزل و مدرسه و همچنین دیدگاه افراد درباره کیفیت زیرساخت حمل و نقلی مسیر بین منزل تا مدرسه در بخش چهارم سوال شده است. بخش پنجم این پرسشنامه نیز پندارهای دانش آموز و خانواده وی درباره شیوه های سفر فعال و همچنین ویروس کوید ۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است.

دسته ی چهارم متغیرهای پنداری مرتبط با ویروس کوید ۱۹ است. هدف اصلی این مطالعه بررسی احتمالاتی تغییرات رفتار سفر دانش آموزان پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ نسبت به قبل از آن است. از طرفی نگرانی های مرتبط با امکان ابتلا به این ویروس می تواند در رفتار سفر افراد اثرگذار باشد. بنابراین در قسمتی از پرسشنامه از دانش آموزان و والدین آنها خواسته شده به چهار سوال در این رابطه پاسخ دهند.

جدول ۱. نتیجه‌ی تحلیل مولفه‌های اصلی برای استخراج عوامل نهان.

شماره	عنوان عامل	شاخص‌ها (متغیرها)	بار عاملی شاخص‌ها	شاخص KMO	آلفای کرونباخ
۱	دیدگاه مثبت نسبت به تسهیلات پیاده‌روی در مسیر منزل تا مدرسه	زیرساخت پیاده‌روی	۰/۷۵۸	۰/۸۴۳	۰/۸۳
		حفظ و نگهداری پیاده‌روها	۰/۷۶۹		
		پیوستگی پیاده‌روها	۰/۸۰۱		
		فضای سبز	۰/۶۷۵		
		ایمنی	۰/۷۷۶		
۲	پندارهای مثبت به شیوه‌های سفر فعال	امنیت	۰/۶۵۵	۰/۷۴۱	۰/۷۷
		سلامت جسمی	۰/۷۴۶		
		نشاط و شادابی	۰/۷۹۳		
		اقتصادی بودن	۰/۷۶۶		
		اجتماعی بودن	۰/۷۸۹		
۱-۳	حساس بودن به ویروس کوید ۱۹	ترس از کوید ۱۹	۰/۷۷۳	۰/۶۳۸	۰/۵۳
		حذف سفر غیر ضروری	۰/۷۲۴		
		بدبینی به شیوه‌ی سفر سابق	۰/۷۴۸		
		مناسب بودن شیوه‌ی سفر فعال	۰/۹۸۱		
۲-۳	دیدگاه مثبت به شیوه‌ی سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹	بعد از شیوع کوید ۱۹			



شکل ۲. شیوه‌های سفر قبل و پیشنهادی برای بعد از ویروس کوید ۱۹.

شیوه‌های سفر فعال دانش‌آموزان اثرگذار هستند. کلیه این متغیرها که در این مطالعه نیز جمع‌آوری شده است در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همچنین نام‌گذاری اختصاری هر یک از متغیرها در این جدول مشخص است.

در این مطالعه چهار مدل انتخاب لجیت دوجمله‌ای (شامل دو مدل انتخاب شیوه سفر فعال قبل از شیوع کوید ۱۹ برای دختران و پسران و دو مدل انتخاب شیوه سفر فعال بعد از شیوع کوید ۱۹ برای دختران و پسران) برآزش شده است که در جدول ۳ ارائه شده است. از جدول ۳ مشخص است دو دسته تحلیل کلی می‌توان روی نتایج بدست آمده انجام داد. دسته اول مقایسه متغیرهای معنادار شده در تابع مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ به تفکیک جنسیت است. به بیان دیگر، ارزیابی شود آیا در عوامل اثرگذار بر مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال برای پسران یا دختران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ تفاوتی صورت گرفته است یا خیر. دسته دوم نیز

کرونباخ برای این متغیرها اگرچه در سطح بسیار مناسبی قرار نداشته ولی حداقل ضوابط را دارا است.

نتایج بررسی اولیه (شکل ۲) نشان می‌دهد که در مجموع احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال برای پسران نسبت به دختران چه قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ و چه بعد از آن بیشتر است. البته این مسئله منطقی بوده است زیرا بر اساس شرایط فرهنگی شهر قم، پسران در استفاده از دوچرخه به عنوان یک شیوه سفر فعال از آزادی عمل بیشتری برخوردار هستند.

علاوه بر این، مقایسه فراوانی نسبی انتخاب شیوه‌های سفر فعال در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان می‌دهد که هر دو گروه دختران و پسران در شرایط بعد از شیوع رغبت بیشتری به استفاده شیوه‌های سفر فعال نسبت به قبل از شیوع این ویروس دارند. مهم‌ترین دلیل این مسئله نیز اطمینان خاطر دانش‌آموز و والدین وی از ایمن بودن این شیوه سفر در برابر ابتلا به بیماری است. تحلیل‌ها و بررسی‌های دقیق‌تر چگونگی تغییرات شیوه سفر دانش‌آموزان در شرایط قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان می‌دهد از مجموعه نمونه ۸۱۳ عضوی موجود (شامل پسران و دختران) ۳۵۶ نفر (به بیانی ۴۳/۸٪ کل نمونه) شیوه سفر خود را تغییر می‌دهند. جالب توجه است که ۳۱ نفر این افراد در شرایط معمول (قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹) از شیوه‌های سفر فعال استفاده می‌کردند که تصمیم گرفته‌اند بعد از بازگشایی مدارس پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ دیگر سفر خود را با استفاده از شیوه‌های سفر فعال انجام ندهند. همچنین ۶۵ نفر که در شرایط معمول شیوه سفر غیرفعال داشته‌اند بیان کرده‌اند که در شرایط پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ از شیوه‌های سفر فعال استفاده خواهند نمود.

مطابق با ادبیات موضوع مشخص شد که عوامل متفاوتی (شامل ویژگی‌های فردی و خانواده دانش‌آموز، ویژگی‌های محیطی مسیر بین منزل تا مدرسه و درک از آن‌ها، پندارهای دانش‌آموز و خانواده وی درباره شیوه‌های سفر فعال و دیدگاه افراد نسبت به شرایط ایجاد شده بر اثر شیوع ویروس کوید ۱۹) بر رفتار انتخاب

جدول ۲. متغیرهای مورد استفاده در مدل سازی.

تعداد	نوع	توضیح متغیر
متغیرهای وابسته		
AM – BCV۱۹	ساختگی	انتخاب شیوه سفر فعال به عنوان شیوه سفر رایج برای رفت و آمد به مدرسه قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
AM – ACV۱۹	ساختگی	انتخاب شیوه سفر فعال به عنوان شیوه سفر انتخابی بعد از بازگشایی مدارس پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
ویژگی های فردی و خانوار		
Grade۷	ساختگی	پایه تحصیلی هفتم (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
Grade۸	ساختگی	پایه تحصیلی هشتم (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
Grade۹	ساختگی	پایه تحصیلی نهم (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
Obese	ساختگی	فربهی (۱= فرد شاخص توده بدن بالای ۲۵ داشته باشد، ۰= در غیر این صورت)
F_Age	رتبه یی	سن پدر (۱= کمتر از ۴۰ سال، ۲= بین ۴۱ تا ۶۰ سال، ۳= بزرگتر از ۶۱ سال)
M_Age	رتبه یی	سن مادر (۱= کمتر از ۴۰ سال، ۲= بین ۴۱ تا ۶۰ سال، ۳= بزرگتر از ۶۱ سال)
F_Edu	ساختگی	تحصیلات پدر (۱= دانشگاهی، ۰= در غیر این صورت)
M_Edu	ساختگی	تحصیلات مادر (۱= دانشگاهی، ۰= در غیر این صورت)
Large_HH	ساختگی	خانواده پرجمعیت (۱= تعداد اعضای خانواده بیش از ۴ نفر باشد، ۰= در غیر این صورت)
V_Own۱	ساختگی	مالکیت یک وسیله نقلیه شخصی (۱= خانواده یک وسیله نقلیه شخصی داشته باشد، ۰= در غیر این صورت)
V_Own۲	ساختگی	مالکیت دستکم دو وسیله نقلیه شخصی (۱= خانواده دستکم دو وسیله نقلیه شخصی داشته باشد، ۰= در غیر این صورت)
MC_Own	ساختگی	مالکیت موتورسیکلت (۱= خانواده دستکم یک موتورسیکلت داشته باشد، ۰= در غیر این صورت)
Acc-MC	ساختگی	دسترسی دانش آموز به موتورسیکلت (۱= دانش آموز به موتورسیکلت دسترسی دارد، ۰= در غیر این صورت)
شیوه سفر کاری والدین		
FM-Car	ساختگی	شیوه سفر کاری پدر- سواری شخصی (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
FM-MC	ساختگی	شیوه سفر کاری پدر- موتورسیکلت (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
MM-Car	ساختگی	شیوه سفر کاری مادر- سواری شخصی (۱=بلی، ۰= در غیر این صورت)
دیدگاه ها و پندارهای مربوط به شیوه سفر فعال		
Perc-Dis	رتبه یی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به فاصله پیاده روی از منزل تا مدرسه
Perc-Path	عددی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به تسهیلات پیاده روی در مسیر منزل تا مدرسه
Infrastructure	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به وضعیت زیرساخت های مرتبط با پیاده روی (وجود پیاده رو با عرض کافی) و دوچرخه سواری (وجود مسیر ایمن و پارکینگ در مدرسه) در مسیر خانه تا مدرسه
Maintenance	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به وضعیت رسیدگی به پیاده روها (فضاسازی، روشنایی کافی و تمیزی) در مسیر خانه تا مدرسه
connectivity	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به وضعیت رسیدگی به پیاده روها (فضاسازی، روشنایی کافی و تمیزی) در مسیر خانه تا مدرسه
Greenery	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به وضعیت فضای سبز در پیاده روهای مسیر خانه تا مدرسه
Safety	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به سطح ایمنی (سلامتی جسمی در برابر تصادفات) در مسیر خانه تا مدرسه
Security	ساختگی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به سطح امنیت (خطر و تهدید جانی در برابر دزدی و خفت گیری) در مسیر خانه تا مدرسه
Per-Cv19	عددی	حساسیت دانش آموز و والدین وی نسبت به ویروس کوید ۱۹
Per-AMCV۱۹	عددی	دیدگاه والدین دانش آموز نسبت به شیوه سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹
Att-AM	عددی	پندارهای والدین دانش آموز نسبت به شیوه های سفر فعال
Fitness	ساختگی	پندارهای والدین دانش آموز نسبت به اینکه پیاده روی و دوچرخه سواری در سفر به مدرسه و بازگشت به منزل در سلامتی فرزند دانش آموز آن ها موثر است.
Economic	ساختگی	پندارهای والدین دانش آموز نسبت به اینکه پیاده روی و دوچرخه سواری در سفر به مدرسه و بازگشت به منزل از نظر اقتصادی به صرفه است.
Socialize	ساختگی	پندارهای والدین دانش آموز نسبت به اینکه پیاده روی و دوچرخه سواری در سفر به مدرسه و بازگشت به منزل فرصتی برای فرزند دانش آموز آن ها جهت معاشرت با دوستانش است.
Quality_Life	ساختگی	پندارهای والدین دانش آموز نسبت به اینکه پیاده روی و دوچرخه سواری در سفر به مدرسه و بازگشت به منزل در نشاط و شادابی فرزند دانش آموز آن ها موثر است.

جدول ۳. مدل‌های انتخاب لوچیت دوجمله‌یی نهایی برازش شده.

عنوان متغیر	ضرایب متغیرهای معنادار شده (اثر حاشیه‌یی/کشسانی) در مدل انتخاب مربوط به:			
	قبل از شیوع کوید ۱۹		بعد از شیوع کوید ۱۹	
	پسران	دختران	پسران	دختران
مقدار ثابت	۳/۸۷***	۳/۵۹***	۴/۹۹***	۳/۵۴***
Large HH	۱/۲۴***	۰/۳۸*	۰/۷۶**	۰/۴۱**
	(۰/۲)	(۰/۰۷)	(۰/۱)	(۰/۰۸)
V – Own ^۱	-۱/۵۳***	-۱/۰۵***	-۱/۲۸***	-۱/۱۶***
	(-۰/۲۴)	(-۰/۲)	(-۰/۱۷)	(-۰/۲۲)
V – Own ^۲	-۱/۸۱***	-۲/۲۴***	-۱/۳۶*	-۲/۲***
	(-۰/۳۱)	(-۰/۴)	(-۰/۲۲)	(-۰/۴۱)
F-Edu	-۱/۳۶***	-	-۱/۳۱*	-
	(-۰/۲۴)	-	(-۰/۲۱)	-
FM-Car	-	-۰/۴۸**	-	-
	-	(-۰/۱)	-	-
MM-Car	-	-	-۱/۴۳**	-
	-	-	(-۰/۲۴)	-
Perc-Dis	-۰/۶۵***	-۰/۸۴***	۰/۸۸***	-۰/۸۳***
	(-۰/۱۱)	(-۰/۱۶)	(-۰/۱۳)	(-۰/۱۶)
Perc – Cv ^{۱۹}	-	-	۰/۲۸*	-
	-	-	(-۰/۰۴)	-
Perc – AMCV ^{۱۹}	-	-	۰/۳۴**	-
	-	-	(-۰/۰۵)	-
لگاریتم تابع درست‌نمایی	-۱۳۲	-۳۱۳	-۱۱۹	-۳۱۴
آماره $\rho_{McFadden}^M$	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۱۶
*** سطح اهمیت ۱٪؛ ** سطح اهمیت ۵٪؛ * سطح اهمیت ۱۰٪				

بوده (شامل: شیوه سفر کاری پدر- سواری شخصی) در تابع مطلوبیت بعد از شیوع کوید ۱۹ معنادار نشده است. همچنین، از مقادیر اثر حاشیه‌یی در تابع مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال دختران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ مشخص است که تغییر معناداری در اثرگذاری متغیرهای مختلف در انتخاب شیوه سفر فعال در این دو بازه زمانی مختلف وجود ندارد و به نوعی دختران کمتر تحت تأثیر ویروس کوید ۱۹ رفتار سفر خود را تغییر داده‌اند.

متغیر داشتن خانواده پرجمعیت با علامت مثبت در تمامی مدل‌ها معنادار شده است. این بدین مفهوم است که دانش‌آموزان پسر و دختری که در خانواده با دست‌کم پنج عضو زندگی می‌کنند، چه در قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ و چه بعد از آن، به احتمال بیشتری از شیوه‌های سفر فعال بهره خواهند برد. معناداری این متغیر در مطالعه حاتم‌زاده و همکاران در شهر رشت برای دانش‌آموزان دختر نیز نشان داده شده بود.^[۱۷] البته در مطالعه مهدی‌زاده و همکاران در شهر تهران نیز به جای استفاده از این بعد خانوار، از متغیر تعداد فرزند در خانواده استفاده شده است که ارتباط معناداری بین این متغیر و انتخاب شیوه سفر پیاده‌روی حاصل نشده است.^[۲۱] علت معناداری این متغیر می‌تواند به این خاطر باشد که در خانواده پرجمعیت به دلیل بیشتر بودن هزینه‌ها، استفاده از شیوه‌های سفر فعال برای فرزندان یک راهکار مناسب برای کم کردن هزینه‌های مربوط به تحصیل دانش‌آموزان است. از طرفی در این خانواده امکان این که فرزندان خانواده بتوانند با کمک دیگر اعضا با استفاده از شیوه‌های فعال به مدرسه سفر کنند بیشتر است. پس مطابق با

بررسی تفاوت عوامل اثرگذار بر مطلوبیت شیوه‌های سفر بین پسران و دختران است.

نتایج نشان می‌دهد که در تابع مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال پسران قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ پنج متغیر (شامل: تحصیلات دانشگاهی پدر، داشتن خانواده پرجمعیت، داشتن یک سواری شخصی در خانواده، داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانواده و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به مسافت پیاده‌روی از منزل تا مدرسه) معنادار شده است.

مطابق با جدول ۳ در تابع مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال پسران بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ هشت متغیر معنادار شناخته شده که در مقایسه با قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ سه متغیر (شامل: شیوه سفر کاری مادر، حساسیت دانش‌آموز و والدین وی نسبت به ویروس کوید ۱۹ و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به شیوه سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹) بیشتر است. علاوه بر این، در غالب متغیرهای معنادار شده در هر دو مدل مورد اشاره، بزرگی ضرایب نیز متفاوت بوده و این اهمیت غیریکسان این متغیرها در مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال برای پسران در شرایط قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ را نشان می‌دهد. این مطلب از مقادیر اثر حاشیه‌یی محاسبه شده نیز قابل تشخیص است که در ادامه و در قسمت تفسیر ضرایب بررسی شده است.

بررسی همزمان نواح مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال دختران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ بیانگر این است که فقط یکی از متغیرهایی که از قبل اثرگذار

انتظار اولیه، این متغیر با اثر مثبت بر احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال معنادار شد.

لازم به ذکر است معناداری این متغیر در هر یک از چهار مدل مورد اشاره با دیگری تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. برای نمونه مقادیر اثر حاشیه‌یی برای مدل پسران به ترتیب در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ برابر با $0/2$ و $0/1$ است. این بدین معناست که احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال برای پسرانی که در خانواده پرجمعیت زندگی می‌کنند، پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ حدود ۱۰ درصد کمتر نسبت به قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ است. مقدار اثر حاشیه‌یی متغیر داشتن خانواده پرجمعیت برای دختران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ تقریباً برابر و حدود $0/8$ است. در مجموع، این مقادیر ذکر شده بیانگر این است که اهمیت این متغیر در تابع مطلوبیت پسران (چه قبل و چه بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹) بیشتر از دختران است.

متغیر مورد بررسی بعدی مالکیت سواری شخصی است. مطابق با طرح جامع حمل‌ونقل شهر قم، متغیر مالکیت سواری شخصی همبستگی بسیار قوی با درآمد خانوار دارد. از طرفی با توجه به محدودیت امکان پرسش مستقیم درباره درآمد افراد، در این مطالعه این متغیر علاوه بر اثر مستقیم خود بر شیوه سفر انتخابی افراد از جنبه اقتصادی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که هر دو متغیر داشتن یک سواری شخصی در خانواده و داشتن دست‌کم دو سواری شخصی در خانواده با اثر منفی در چهار مدل مورد اشاره معنادار شده است. این نتیجه سازگار با مطالعات متعددی بوده که در این زمینه سفرها تحصیلی دانش‌آموزان را بررسی کرده‌اند. [۲۸، ۲۰، ۱۷]

به طور کلی معناداری این متغیرها را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که دانش‌آموزان در خانواده مالک سواری شخصی (یک و بیشتر) منطقی است که نسبت به دیگران (بدون وسیله نقلیه) به جهت دسترسی داشتن به سواری شخصی و همچنین وضعیت مالی بهتر از شیوه‌های سفر با سختی کمتر استفاده کنند. از طرف دیگر با توجه به وضع مالی بهتر این خانواده‌ها ممکن است والدین، فرزند دانش‌آموز خود را در مدارس خاص و غیردولتی ثبت‌نام کنند و این مسئله می‌تواند به نوعی منجر به مسافت سفر بیشتر دانش‌آموز شود. در این شرایط نیز مطابق با پیش‌فرض اولیه دانش‌آموزان به احتمال کمتری از شیوه‌های سفر فعال بهره خواهند برد. زیرا مسافت سفر زیاد مانع از اجرای این تصمیم خواهد شد.

مقدار اثر حاشیه‌یی این دو متغیر نشان می‌دهد که اثر متغیر داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانواده نسبت به متغیر داشتن یک سواری شخصی در خانواده بزرگتر است. این مورد مطابق با توضیحات ارائه شده منطقی بنظر می‌رسد. از طرف دیگر، مقایسه مقادیر اثر حاشیه‌یی این متغیرها برای دختران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ مشخص می‌کند که اثرگذاری آن‌ها تغییری نداشته است. به بیان دیگر، دخترانی که در خانواده خود به ترتیب ۱ و ۲ (یا بیشتر) سواری شخصی داشته باشند، به ترتیب احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد که مقدار قابل توجهی است. مقایسه مقادیر اثر حاشیه‌یی این متغیرها برای پسران در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان می‌دهد که اثر این متغیرها در احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال در این دو بازه زمانی متفاوت است. در بیانی کامل‌تر می‌توان بیان نمود که در صورتی که در خانواده دانش‌آموز پسر دست‌کم یک سواری شخصی وجود داشته باشد احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال به ترتیب در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ حدود ۲۴ و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. این بدین معناست که بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ اثر منفی این متغیر کاهشی است.

متغیر تحصیلات دانشگاهی پدر در مدل مربوط به پسران در قبل و بعد از شیوع

ویروس کوید ۱۹ معنادار شد. مطابق با مقادیر اثر حاشیه‌یی، اهمیت معناداری این متغیر در این دو بازه تغییر چشمگیری نداشته و در کل در صورتی که پدر دانش‌آموز تحصیلات دانشگاهی داشته باشد، احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال حدود ۲۱٪ کمتر است. این نتیجه نیز در تأیید مطالعات پیشین بود که اثر منفی متغیر تحصیلات بیشتر والدین بر احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال را نشان داده بودند. [۲۹، ۲۰، ۳۰]

نتایج نشان داده است اگر شیوه سفر کاری پدر، رانندگی با سواری شخصی باشد، دختران در قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ به احتمال بیشتری با شیوه‌های سفری غیر از شیوه‌های سفر فعال (مانند همراهی با والدین با سواری شخصی) به مدرسه سفر می‌کردند. این متغیر در شرایط بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ معنادار نشده است. این نتیجه می‌تواند ناشی از مسائل فرهنگی شهر قم باشد که خانواده‌ها حساسیت بیشتری نسبت به سفرهای دختران دارند. از این رو، اگر پدر خانواده با سواری شخصی به محل کار برود، دانش‌آموز دختر را با خود همراه خواهد کرد. مقدار اثر حاشیه‌یی نیز نشان می‌دهد که اگر شیوه سفر کاری پدر، رانندگی با سواری شخصی باشد، احتمال انتخاب شیوه سفر فعال برای دانش‌آموز دختر ۱۰٪ کمتر خواهد بود. نتایج همچنین نشان داد اگر شیوه سفر کاری مادر، سواری شخصی باشد، پسران در سفرهای رفت و برگشتی خود به مدرسه پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ به احتمال کمتری (بر اساس اثر حاشیه‌یی ۲۴٪) شیوه‌های سفر فعال را انتخاب خواهند کرد. احتمالاً علت این مسئله مربوط به این می‌شود که در شرایط قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ مادران حساسیت کمتری نسبت به شیوهی سفر پسران به مدرسه داشته‌اند، ولی پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ حساسیت مادران و فرزندان نسبت به این مسئله باعث شده که فرزندان را با خود همراه کرده و یا آزادی عمل آن‌ها برای شیوه‌های سفر فعال بکاهد. البته معناداری متغیرهای پنداری مرتبط با ویروس کوید ۱۹ در مدل مربوط به پسران بیانگر حساسیت بیشتر آنان است که مویید این استدلال است. دیدگاه دانش‌آموز نسبت به فاصله پیاده‌روی وی تا مدرسه در هر چهار مدل مورد اشاره معنادار شده است. به نوعی هرچه دانش‌آموز فاصله پیاده‌روی خود را بیشتر ببیند، به احتمال کمتری شیوه سفر فعال را انتخاب خواهند کرد. این نتیجه که سازگار با فرضیه اولیه بوده به نوعی اهمیت درک دانش‌آموز از مسافت سفر را نشان می‌دهد. جالب توجه است که اهمیت این متغیر (بر اساس مقادیر اثر حاشیه‌یی برای پسران حدود $0/12$ - و برای دختران حدود $0/16$ -) در شرایط قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ برای پسران و دختران تفاوتی نداشته است. لازم به توضیح است در مطالعات پیشین از مقدار کمی متغیر مسافت سفر استفاده شده بود که اثر منفی آن نیز مشخص شده بود، ولی در این مطالعه دلیل محدودیت اطلاعات در محاسبه مسافت سفر، از متغیر دیدگاهی مرتبط با مسافت سفر شده است که به مانند اثر متغیر کمی مسافت سفر، اثر متغیر دیدگاهی مسافت سفر نیز در احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال منفی شد.

دیدگاه دانش‌آموز و خانواده وی نسبت به ویروس کوید ۱۹ از دیگر متغیر معنادار شده در مدل انتخاب شیوه‌های سفر فعال پسران برای پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ است. این متغیر بیانگر این است که دانش‌آموز و خانواده وی ترس و حساسیت زیادی نسبت به ابتلا به این ویروس از خود نشان داده‌اند. منطقی است که هرچه مقدار این متغیر بزرگتر باشد، فرد ترس بیشتری نسبت به قرارگرفتن در جمع دارد و ترجیح می‌دهد تا با وسیله نقلیه شخصی خانواده به مدرسه رفت‌وآمد کند. مقدار کشسانی محاسبه شده برای این متغیر برابر با $0/4$ - بدست آمده که بیانگر این است به ازای ۱٪ افزایش نگرانی، ۴٪ احتمال انتخاب شیوهی سفر فعال وجود دارد که مقدار قابل ملاحظه‌یی است.

علاوه بر این، متغیر دیدگاه مثبت نسبت به شیوه‌های سفر فعال به‌عنوان یک

شیوه سفر ایمن برای جلوگیری از ابتلا به ویروس کوید ۱۹ نیز با اثر مثبت در مدل انتخاب شیوه‌های سفر فعال پسران برای پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ معنادار شده است. این نتیجه سازگار با فرضیه اولیه بوده و نشان می‌دهد هرچه این نگاه که شیوه‌های سفر فعال در برابر ابتلا به ویروس کوید ۱۹ ایمن است، در میان دانش‌آموزان و خانواده‌های آن‌ها شایع شود، احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال برای افراد بیشتر می‌شود. مقدار کشسانی محاسبه شده برای این متغیر نیز برابر با $0.5/0$ بدست آمده و نشان می‌دهد به ازای 1% بهبود در دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به شیوه‌های سفر فعال به عنوان یک شیوه سفر ایمن برای جلوگیری از ابتلا به ویروس کوید ۱۹، 5% احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی مطلوبیت شیوه‌های سفر فعال در قبل و بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ است. به بیان دیگر، این مطالعه به دنبال این است که ارزیابی کند ویژگی‌های فردی و خانوار، عوامل محیطی و نظری در کنار پندارهای مرتبط با شیوع ویروس کوید ۱۹ به چه شکل در تغییر شیوه‌های سفر فعال دانش‌آموزان نوجوان اثرگذار خواهد بود. همچنین، با توجه به اینکه بین رفتار سفر دانش‌آموزان دختر و پسر؛ به‌ویژه در ایران و در شهرهای کوچک، تفاوت معناداری وجود داشته است، در این مطالعه سعی شده به تفکیک دختران و پسران مدل‌های مجزایی برازش شود تا این تفاوت‌ها به شکل دقیق‌تری بررسی قرار شوند.

نتایج مدل برازش شده برای پسران در قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان داد که پنج متغیر شامل: تحصیلات دانشگاهی پدر، داشتن خانواده پرجمعیت، داشتن یک سواری شخصی در خانواده، داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانواده و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به مسافت پیاده‌روی از منزل تا مدرسه در انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار است. مطابق با علامت معناداری و مقادیر اثر حاشیه‌یی محاسبه شده برای متغیرها مشخص شد متغیر داشتن خانواده پرجمعیت تنها متغیر با اثر مثبت بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال بوده و احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال را تا 20% افزایش می‌دهد. همچنین، داشتن بیش از دو سواری شخصی در منزل بیشترین اثر منفی را در متغیر وابسته داشته و احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال را تا 31% کم می‌کند.

نتایج مدل برازش شده برای دختران در قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان داد که به مانند مدل مربوط به پسران چهار متغیر مشترک داشتن خانواده پرجمعیت، داشتن یک سواری شخصی در خانواده، داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانواده و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به مسافت پیاده‌روی از منزل تا مدرسه بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار است. البته علاوه بر این چهار متغیر یک متغیر دیگر با عنوان شیوه سفر کاری پدر - سواری شخصی نیز بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار شناخته شده است. فقط متغیر با اثر مثبت داشتن خانواده پرجمعیت است که احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال را تا 7% افزایش داده است. از چهار

متغیر دیگر، متغیر داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانوار بیشترین اثر منفی (حدود 40%) را بر احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال دارد. مقایسه متغیرهای معنادار شده در دو مدل انتخاب پسران و دختران برای قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان می‌دهد که اگرچه غالباً متغیرهای مشترکی در هر دو اثرگذار بوده، اما بر اساس مقادیر اثر حاشیه‌یی میزان اثرگذاری این متغیرها متفاوت است.

نتایج مدل برازش شده برای پسران بعد از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان داد که علاوه بر پنج متغیری که در مدل مربوط به قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ معنادار شده بودند، سه متغیر: شیوه سفر کاری مادر - سواری شخصی، حساسیت دانش‌آموز و والدین وی نسبت به ویروس کوید ۱۹ و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به شیوه سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹ نیز بر انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار شناخته شده‌اند. مقادیر اثر حاشیه‌یی و کشسانی محاسبه شده نشان داد که اولاً میزان اثرگذاری متغیرهایی که در مدل قبل از شیوع ویروس کوید ۱۹ معنادار شده بودند، در مدل جدید تغییر پیدا کرده است. دوماً، این سه متغیر جدید دو مورد با اثر منفی (شامل: شیوه سفر کاری مادر - سواری شخصی با اثر حاشیه‌یی $24/0-$ و حساسیت دانش‌آموز و والدین وی نسبت به ویروس کوید ۱۹ با کشسانی $4/0-$) و یک مورد با اثر مثبت (شامل دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به شیوه سفر فعال برای جلوگیری از ابتلا به کوید ۱۹ با کشسانی $5/0$) در احتمال انتخاب شیوه‌های سفر فعال معنادار شده‌اند.

نتایج مدل برازش شده برای دختران پس از شیوع ویروس کوید ۱۹ نشان داد که فقط چهار متغیر شامل: داشتن خانواده پرجمعیت، داشتن یک سواری شخصی در خانواده، داشتن حداقل دو سواری شخصی در خانواده و دیدگاه والدین دانش‌آموز نسبت به مسافت پیاده‌روی از منزل تا مدرسه در انتخاب شیوه‌های سفر فعال اثرگذار است. نکته جالب توجه این است که متغیر شیوه سفر کاری پدر - سواری شخصی که در مدل مربوط به قبل از شیوه ویروس کوید ۱۹ معنادار شده بود، در این مدل ضریب آن معنادار نشد. همچنین، در بررسی‌های بعدی مشخص شد، مقادیر اثر حاشیه‌یی نیز نسبت به قبل تغییر قابل توجهی نداشته است.

یکی از محدودیت‌های مهم این مطالعه عدم دسترسی به اطلاعات محیطی شبکه معابر اطراف منزل و مدرسه دانش‌آموزان بود. در این راستا، پیشنهاد می‌شود مطالعات بعدی ارزیابی شود که جدا از درک دانش‌آموزان و والدین آنان از شرایط محیطی، خود ویژگی‌های محیطی در اطراف منزل و مدرسه می‌توانند در رفتار انتخاب شیوه‌های سفر فعال دانش‌آموزان اثرگذار باشند یا خیر؟ علاوه بر این، یکی از دیگر محدودیت‌های این مطالعه این بود که در زمان انجام مطالعه مدارس به‌صورت رسمی بازگشایی نشده بودند. به همین دلیل از دانش‌آموزان و والدین آنان خواسته شده بود که خود را در شرایطی فرض کنند که مدارس بازگشایی شده است و باید به مدرسه مراجعه کنند. در این شرایط خواسته شده بود که آنان پاسخ دهند که از چه شیوه سفری استفاده خواهند کرد. در کل، توصیه می‌شود با توجه به اینکه مدارس در سال پیش رو به‌صورت رسمی بازگشایی خواهند شد، ارزیابی شود که آیا رفتار سفر دانش‌آموزان در اثر همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ تغییر یافته است یا خیر؟ علت آن چه بوده است؟

پانویس‌ها

1. Panter
2. Norfolk, England

3. Larsen
4. Van Goeverden and De Boer
5. Netherlands and Flanders
6. Rothman

7. Toronto, Canada
8. Guliani
9. Waygood and Susilo
10. Mitra and Buliung
11. Clark
12. Ahern
13. West Yorkshire, England
14. Helbich
15. Zhang
16. Beijing, China
17. Ikeda
18. walkability index
19. Ghekiere
20. Flanders, Belgium
21. Molloy
22. Bari

منابع (References)

1. Thomas, M. "New attitude: Achieving personal and professional success by keeping a positive" (1998).
2. Ben-Akiva, M. and et al. "Extended framework for modeling choice behavior", **10**(3), pp. 187-203 (1999).
3. Panter, J.R. Jones, A.P. and Van Sluijs, E.M.F. "Attitudes, social support and environmental perceptions as predictors of active commuting behaviour in school children," *J. Epidemiol. Community Health*, **64**(1), pp. 41-48 (2010). Doi: 10.1136/jech.2009.086918.
4. Larsen, K., Buliung, R. and Faulkner, G. "Safety and school travel", *Transp. Res. Rec*, **2327**, pp. 9-18 (2012). Doi: 10.3141/2327-02.
5. van Goeverden, C.D. and de Boer, E. "School travel behaviour in the Netherlands and Flanders", *Transp. Policy*, **26**, pp. 73-84 (2013). Doi: 10.1016/j.tranpol.2013.01.004.
6. Rothman, L., Buliung, T.To, R. Macarthur, C. and et al. "Associations between parents perception of traffic danger, the built environment and walking to school", *J. Transp. Heal*, **2**(3), pp. 327-335 (2015). Doi:10.1016/j.jth.2015.05.004.
7. Guliani, A., Mitra, R. Buliung, R.N. and et al. "Gender-based differences in school travel mode choice behaviour: Examining the relationship between the neighbourhood environment and perceived traffic safety", *J. Transp. Heal*, **2**(4), pp. 502-511 (2015). Doi: 10.1016/j.jth.2015.08.008.
8. Waygood, E.O.D. and Susilo, Y.O. "Walking to school in Scotland: Do perceptions of neighbourhood quality matter", *IATSS Res*, **38**(2), pp. 125-129 (2015). Doi:10.1016/j.iatssr.2014.12.002.
9. Mitra, R. and Buliung, R.N. "Exploring differences in school travel mode choice behaviour between children and youth", *Transp. Policy*, **42**, pp. 4-11 (2015). Doi: 10.1016/j.tranpol.2015.04.005.
10. Clark, A.F. Bent, E.A. and Gilliland, J. "Shortening the trip to school: Examining how children's active school travel is influenced by shortcuts", *Environ. Plan. B Plan. Des*, **43**(3), pp. 499-514 (2016). Doi: 10.1177/0265813515614678.
11. Ahern, S.M. Arnott, B. and Chatterton, T. and et al. "Understanding parents' school travel choices: A qualitative study using the Theoretical Domains Framework", *J. Transp. Heal*, **4**, pp. 278-293 (2017). Doi:10.1016/j.jth.2016.11.001.
12. Helbich, M. "Children's school commuting in the Netherlands: Does it matter how urban form is incorporated in mode choice models", *Int. J. Sustain. Transp*, **11**(7), pp. 507-517, (2017). Doi: 10.1080/15568318.2016.1275892.
13. Zhang, R., Yao, E. and Liu, Z. "School travel mode choice in Beijing, China", *J. Transp. Geogr*, **62**, pp. 98-110 (2017). Doi: 10.1016/j.jtrangeo.2017.06.001.
14. Ikeda, E., Hinckson, E. and Witten, K. and et al. "Associations of children's active school travel with perceptions of the physical environment and characteristics of the social environment: A systematic review", *Heal. Place*, **54**, pp. 118-131 (2018). Doi: 10.1016/j.healthplace.2018.09.009.
15. Ghekiere, A. and et al., "An experimental study using manipulated photographs to examine interactions between micro-scale environmental factors for children's cycling for transport", *J. Transp. Geogr*, **66**, pp. 30-34 (2018). Doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.11.005.
16. Scheiner, J., Huber, O. and Lohmuller, S. "Children's mode choice for trips to primary school: a case study in German suburbia", *Travel Behav. Soc*, **15**, pp. 15-27 (Apr. 2019). Doi:10.1016/j.tbs.2018.09.006.
17. Hatamzadeh, Y., Habibian, M. and Khodaii, A. "Walking behavior across genders in school trips, a case study of Rasht, Iran," *J. Transp. Heal*, **5**, pp. 42-54 (2017). Doi:10.1016/j.jth.2016.08.011.
18. Hatamzadeh, Y., Habibian, M. and Khodaii, A. "Effective factors in walking mode choice of different age groups for school trips", *Transp. Res. Procedia*, **25**, pp. 2297-2308 (2017). Doi:10.1016/j.trpro.2017.05.441.
19. Hatamzadeh, Y. "A walking mode choice analysis of school trips across morning and afternoon period students in Rasht, Iran: Does it matter", *Transp. Res. Procedia*, **48** (2018), pp. 3431-3438 (2020). Doi: 10.1016/j.healthplace.2018.09.009.
20. Ermagun, A. and Samimi, A. "Promoting active transportation modes in school trips", *Transp. Policy*, **37**, pp. 203-211 (2015). Doi: 10.1016/j.tranpol.2014.10.013.
21. Mehdizadeh, M., Mamdoohi, A.R. and Nordfjaern, T. "Walking time to school, children's active school travel and their related factors", *J. Transp. Heal*, **6**, pp. 313-326 (Sep. 2017). Doi: 10.1016/j.jth.2017.01.012.
22. Bhaduri, E., Manoj, B.S., Wadud, Z. and et al. "Modelling the effects of COVID-19 on travel mode choice behaviour in India", *Transp. Res. Interdiscip. Perspect*, **8**, p. 100273 (2020). Doi: 10.1016/j.trip.2020.100273.

23. Abdullah, M., Dias, C., Muley, D. and et al. "Exploring the impacts of COVID-19 on travel behavior and mode preferences," *Transp. Res. Interdiscip. Perspect*, **8**, p. 100255 (2020). Doi: 10.1016/j.trip.2020.100255.
24. Molloy, J., Schatzmann, T. Schoeman, B. and et al. "Observed impacts of the Covid-19 first wave on travel behaviour in Switzerland based on a large GPS panel", *Transp. Policy*, **104**, pp. 43-51 (2021). Doi: 10.1016/j.tranpol.2021.01.009.
25. Bari, C., Chopade, R. Kachwa, S. and et al. "Impact of COVID-19 on educational trips-an Indian case stud", *Transportation Letters*, **13**(5-6), pp. 375-387 (2021).
26. Green, W. *Econometric Analysis* (2005).
27. JP, S. "Applied multivariate statistics for the social sciences. Routledge" (2012).
28. Park, H., Noland, R.B. and Lachapelle, U. "Active school trips: Associations with caregiver walking frequency", *Transp. Policy*, **29**, pp. 23-28 (Sep. 2013). Doi:10.1016/j.tranpol.2013.04.001.
29. Curriero, F.C. and et al. "Exploring walking path quality as a factor for urban elementary school children's active transport to school", *J. Phys. Act. Heal*, **10**(3), pp. 323-334 (2013). Doi: 10.1123/jpah.10.3.323.
30. Yu, C.Y. and Zhu, X. "From attitude to action: What shapes attitude toward walking to/from school and how does it influence actual behaviors", *Prev. Med. (Baltim)*, **90**, pp. 72-78 (2016). Doi: 10.1016/j.ypmed.2016.06.036.

آنالیز تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌های شبکه‌ی قطری بلندمرتبه با پیکربندی پیرامونی مختلف براساس معیار شاخص نیرومندی

مهیار روشنی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

افشین مشکوه‌الدینی* (استادیار)

علی معصومی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۷۵-۷۸، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، تأثیر الگوی هندسی المان‌های قطری بر تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌های شبکه‌ی قطری با استفاده از نمودارهای شکنندگی بررسی شده است. بدین منظور، بر روی سه سازه‌ی ۲۴ طبقه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به همراه یک سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده‌ی مینا، تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (NTHA) و دینامیکی فزاینده (IDA) تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک انجام شده است. با پیاده‌سازی سطوح عملکرد کرانه‌ی رفتار کشسان، استفاده‌ی بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش براساس ضوابط FEMA بر روی نمودارهای شکنندگی، احتمال تجاوز از حالت‌های حدی برای سازه‌های مطالعاتی محاسبه شده است. درنهایت، با در نظر گرفتن فرمولاسیون تابع خسارت پیشنهادی MCEER، شاخص نیرومندی تاب‌آوری لرزه‌ی برای سازه‌ها مشخص شده است. بر پایه‌ی ارزیابی نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی ملاحظه شد که تعبیه‌ی زوایای بزرگ برای المان‌های مورب محیطی، احتمال رخداد سطوح عملکرد در مقابل زلزله را افزایش می‌دهد. براساس پردازش‌های عددی تاب‌آوری لرزه‌ی، مقادیر شاخص نیرومندی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده به ترتیب ۹/۹۵، ۷/۹۱، ۶/۸۸ و ۱/۸۵ درصد محاسبه شده است. مطابق نتایج اخیر نتیجه‌گیری شد که ایجاد الگوی مثالی در قاب‌های پیرامونی باعث کاهش افت کیفیت کارایی و بهبود پایداری دینامیکی سازه‌ها بعد از وقوع زلزله می‌شود.

واژگان کلیدی: سازه‌ی شبکه‌ی قطری، نمودار شکنندگی، تحلیل دینامیکی فزاینده، تاب‌آوری لرزه‌ی، شاخص نیرومندی.

mahyar_roshani@yahoo.com
meshkat@khu.ac.ir
massumi@khu.ac.ir

۱. مقدمه

سازه تشکیل شده‌اند. تأثیر بارهای لرزه‌ی به صورت برآیندهای نیرویی فشاری و کششی در المان‌های مورب سازه‌ی شبکه‌ی قطری ایجاد می‌شود. این در حالی است که در سازه‌های قاب خمشی^۲، تأثیر نیروهای جانبی سبب برآیندهای لنگر خمشی و نیروی محوری در ستون‌ها می‌شود. سازه‌های شبکه‌ی قطری ظرفیت مقاومتی بالایی در برابر لنگر واژگونی و نیروی برشی ناشی از زلزله دارند.^[۱]

حصول عملکرد مطلوب برای سازه‌های شبکه‌ی قطری، وابسته به انتخاب یک الگوی هندسی بهینه و روش مناسب برای کنترل نسبت‌های مقاومتی و طراحی است. تامی و همکاران (۲۰۱۸)، طراحی مقاطع اعضاء مورب سازه‌ی شبکه‌ی قطری را براساس کاهش وزن طبقات مطرح کردند. آنان با بررسی انواع

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به توسعه‌ی اسکلت‌های مقاوم برای بهبود رفتار لرزه‌ی سازه‌ها شده است. سیستم‌های شبکه‌ی قطری^۱ به عنوان یک ساختار جایگزین برای سازه‌های بلندمرتبه با ویژگی‌های معماری و عملکرد مناسب در برابر بارهای جانبی هستند که در آن‌ها، همه‌ی ستون‌های محیطی برخلاف سیستم‌های مرسوم قاب خمشی و مهاربندی، حذف و با گروه المان‌های مورب تیر - ستون جایگزین می‌شوند. ساختارهای شبکه‌ی قطری از یک مجموعه الگوهای مثالی شامل المان‌های مورب بزرگ و تیرها، با پیکربندی‌های مختلف در راستای ارتفاع

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

DOI:10.24200/J30.2022.58867.3012

پیکربندی منظم و نامنظم پیرامونی با زوایای مختلف در سازه‌های شبکه‌ای قطری، بهینه‌یابی الگوهای مثلی را ارزیابی کردند.^[۱] محسنیان و همکاران (۲۰۲۰)، با کنترل توزیع کرنش محوری در المان‌های مورب پیکربندی پیرامونی، پارامترهای طراحی براساس عملکرد را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری بررسی و برای سطح عملکرد ایمنی جانی، ضریب رفتار (R) را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری برابر ۴ محاسبه کردند.^[۲] همچنین مطالعات حشمتی و همکاران (۲۰۲۰)، در مورد آثار وجود هسته‌ی مقاوم مرکزی در سازه‌های شبکه‌ای قطری نشان داد که وجود بخش مذکور می‌تواند سبب افزایش سختی و کاهش روند زوال مقاومت در رفتار لرزه‌ی سازه‌های شبکه‌ای قطری شود. علاوه بر آن نتیجه‌گیری شد که به منظور افزایش حاشیه‌ی اطمینان سازه‌ی شبکه‌ای قطری از سطوح آسیب، زوایای پیکربندی هسته‌ی داخلی باید کوچکتر از پوسته‌ی خارجی باشد.^[۳] صادقی و رفوئی (۲۰۲۰)، بر پایه‌ی بررسی نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده (IDA) پی بردند که استفاده از مهاربند کم‌انرژی‌تاب در سازه‌های شبکه‌ای قطری، منجر به کاهش آثار $P - \Delta$ در المان‌های مورب محیطی و افزایش ظرفیت فروریزش می‌شود.^[۵] وجود مؤلفه‌های سختی برشی و خمشی بزرگ در سازه‌های شبکه‌ای قطری سبب شده است که ساختارهای مقاوم مذکور، برای طراحی سازه‌های با پیچ‌خوردگی هندسی در ارتفاع نیز استفاده شوند. بر همین اساس، سانگ و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر زوایای پیکربندی پیرامونی در سازه‌های شبکه‌ای قطری دارای پیچ‌خوردگی در ارتفاع را بررسی کردند و دریافتند که در سازه‌های شبکه‌ای قطری پیچ‌خورده در ارتفاع، الگوی نامتقارن برای المان‌های مورب محیطی، نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت.^[۶] گیلومر و همکاران (۲۰۲۱)، نیز طراحی براساس جابه‌جایی را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری مطرح و با استفاده از یک روش پیشنهادی، پایداری دامنه‌ی تغییرات تغییرشکل‌های جانبی را در طول رویدادهای لرزه‌ی تبیین رابطه‌سازی کردند.^[۷]

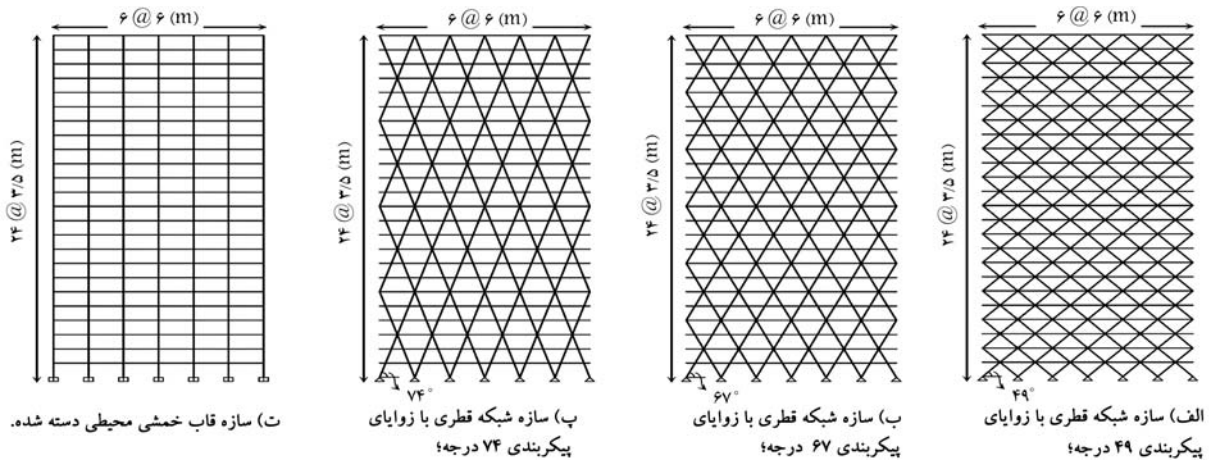
ارزیابی صحیح از رفتار لرزه‌ی و شناسایی سطح عملکرد سازه‌ها، نیازمند کنترل روند آسیب‌پذیری در ساختارهای مقاوم جانبی است. نمودارهای شکنندگی^۴، احتمال تجاوز پارامتر پاسخ سازه از معیاری مشخص را بر پایه‌ی تابع شدت حرکت زمین نشان می‌دهند. با استفاده از نمودارهای شکنندگی، میزان خسارت، همچنین احتمال وقوع فروریزش و کنترل طراحی برای سازه‌ها بررسی می‌شود.^[۹،۸] بدین منظور، تحلیل‌های دینامیکی فزاینده (IDA) براساس پارامتر نیاز لرزه‌ی (DM) موردنظر در سطوح مختلف شدت حرکت زمین (IM) انجام می‌شود.^[۱۰] درنهایت، با محاسبه‌ی احتمال رخداد سطوح عملکرد بر پایه‌ی توزیع احتمالاتی پاسخ لرزه‌ی، نمودارهای شکنندگی محاسبه می‌شوند. رفوئی و سیدکاظمی (۲۰۲۰)، با محاسبه‌ی نمودارهای شکنندگی، تأثیر تغییرات طول دهانه و زوایای پیکربندی پیرامونی را بر مشخصات طراحی سازه‌های شبکه‌ای قطری ارزیابی کردند و دریافتند که افزایش طول دهانه‌ها، تأثیر قابل توجهی در مشخصات رفتار غیرخطی سازه‌های شبکه‌ای قطری ندارد و نیز تأثیر زاویه‌ی المان‌های مورب محیطی در ضریب رفتار (R) سازه‌های شبکه‌ای قطری، وابستگی به ارتفاع سازه دارد.^[۱۱] مرادی و عبدالمحمیدی (۲۰۲۰)، برای محاسبه‌ی نمودارهای شکنندگی در سازه‌های شبکه‌ای قطری، مقادیر پاسخ انرژی کرنشی خمیری را لحاظ کردند و دریافتند که پارامتر مشخصه‌ی انرژی برخلاف دررفت، ارزیابی مناسب‌تری را برای توابع شکنندگی اسکلت مقاوم به دنبال خواهد داشت.^[۱۲] دباغچیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز با انجام تحلیل دینامیکی فزاینده و استخراج نمودارهای شکنندگی، به بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های شبکه‌ای قطری دارای خروج از مرکزیت در الگوی هندسی محیطی پرداختند و دریافتند که استفاده از تیرهای متصل‌کننده‌ی برشی^۵ در پیکربندی

پیرامونی سبب بهبود سختی کشسان و ظرفیت فروریزش سازه‌های شبکه‌ای قطری می‌شود.^[۱۳]

در پژوهش حاضر، عملکرد لرزه‌ی یک گروه سازه‌های هم‌ساختار با دو پیکربندی شبکه‌ای قطری و نیز قاب خمشی دسته‌شده مقایسه شده است. به‌طورکلی، سازه‌ی قاب خمشی به‌علت انعطاف‌پذیری بالا در برابر حرکت‌های زمین، مقادیر پاسخ جابه‌جایی زیادی را ایجاد می‌کند. در این مورد، اهل‌حق و میرقادر (۲۰۲۰) به منظور کنترل پاسخ دررفت در سازه‌های قاب خمشی، استفاده از المان‌های اضافی متصل‌کننده‌ی دو تیر در طبقات مجاور را مطرح کردند. ایشان با بررسی نمودارهای شکنندگی نشان دادند که المان‌های اضافی متصل‌کننده‌ی تیرها باعث افزایش پتانسیل جذب انرژی زلزله و کاهش فولاد مصرفی می‌شوند.^[۱۴]

به‌طورکلی، پدیده‌ی با ماهیت تصادفی زمین‌لرزه، عدم قطعیت زیادی را وارد طراحی سازه‌ها می‌کند. پیش‌بینی به صورت زمان و دوره‌ی بازگشت برای رخداد این وقایع، امری غیرممکن است. این عدم قطعیت در مهندسی زلزله با دو رویکرد از دیدگاه‌های رکوردهای زلزله و نیز رفتار سازه‌ها تعریف می‌شود. رویکرد ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌ها می‌تواند از عدم قطعیت موجود در رفتار دینامیکی اسکلت‌های مقاوم جلوگیری کند.^[۱۵] تاب‌آوری لرزه‌ی برای سازه‌ها به‌عنوان توانایی سیستم باربر جانبی برای کاهش احتمال آسیب ناشی از رویداد لرزه‌ی و یا جذب انرژی آن بیان می‌شود. همچنین، تاب‌آوری به‌صورت قابلیت اسکلت مقاوم در بازسازی هر چه سریع‌تر اعضاء سازه‌ی و غیرسازه‌ی مطرح می‌شود. بر طبق مطالعات برونو و راینهورن^۶ (۲۰۰۶)، برای یک ساختار لرزه‌ی تاب‌آور، موضوعات کاهش در احتمال خرابی، خسارت‌های اقتصادی و جانی متحمل شده به وسیله‌ی زلزله و زمان بازایی سیستم مقاوم لرزه‌ی مطرح می‌شوند.^[۱۶] سایملارو^۷ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۷] تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌ها را براساس چهار معیار نیرومندی^۸، افزونگی^۹، توانمندسازی^{۱۰}، و سرعت^{۱۱} در نظر می‌گیرند.

شاخص نیرومندی (استحکام)، سنجش توانایی سیستم باربر جانبی برای مقاومت در برابر سطح مشخصی از نیاز لرزه‌ی است که بدون تضعیف و خسارت در سازه تعریف می‌شود. شاخص افزونگی نیز تعیین قابلیت جایگزینی مسیر انتقال بار لرزه‌ی است که برای حفظ پایداری سازه در اثر خرابی یک عضو لحاظ می‌شود. بر همین اساس، مؤلفه‌ی توانمندسازی، ظرفیت شناسایی مشکلات و تعیین اولویت آن‌ها به منظور هماهنگی‌سازی منابع در زمان اختلال در عملکرد المان و یا سیستم باربرجانبی سازه است. در نهایت، با استفاده از پارامتر سرعت، ظرفیت دستیابی به اهداف موردنظر در زمان مطلوب برای جلوگیری از خسارت‌ها و نقص در عملکرد لرزه‌ی سازه‌ها تعیین می‌شود.^[۱۷] در واقع، روند پردازش تاب‌آوری، یک درک بهتر برای مدیریت بحران در سازه‌ها را مطرح می‌کند. از میان توابع تاب‌آوری، شاخص نیرومندی به سبب بیان ایمنی سازه برای حفظ پایداری در برابر آسیب‌های موضعی، اهمیت ویژه‌ی نسبت به سایر معیارها دارد. در این باره لیو و فنگ^{۱۲} (۲۰۲۰)، شاخص نیرومندی سازه‌ی شبکه‌ای قطری را با درنظرگرفتن ضرایب آسیب‌پذیری و اهمیت لرزه‌ی برای المان‌های اصلی محاسبه کردند. آنان برای پردازش و توصیف روابط پیشنهادی نیز از نتایج برگرفته از مدل آزمایشگاهی استفاده کردند.^[۱۸] هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر الگوی مثلی محیطی در توابع تاب‌آوری لرزه‌ی سازه‌ها با رویکرد احتمالاتی نمودارهای شکنندگی است. رفتار غیرخطی و مشخصات تاب‌آوری سه سازه‌ی شبکه‌ای قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به همراه سازه‌ی هم‌ساختار قاب خمشی محیطی دسته شده، بر پایه‌ی نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و دینامیکی فزاینده (IDA)،



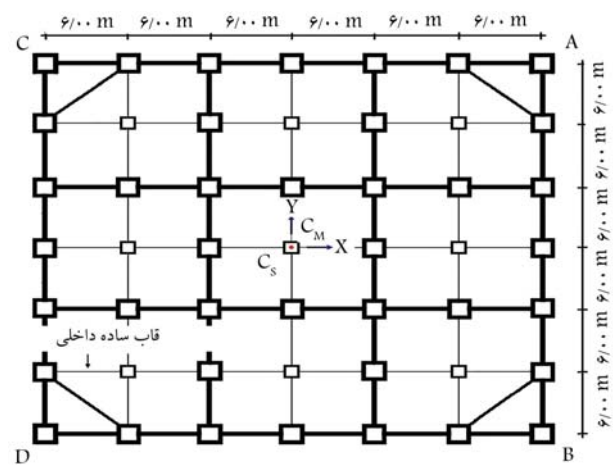
شکل ۱. نمای سازه‌های ۲۴ طبقه‌ی مطالعاتی.

زیاد لرزه‌ی در نظر گرفته شده‌اند. براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار مرده‌ی طبقات برابر با $500 \text{ کیلوگرم بر مترمربع}$ و بار زنده‌ی همه‌ی طبقات و تراز $Z = H$ به ترتیب 200 و $150 \text{ کیلوگرم بر مترمربع}$ تعیین شده است.^[۲۱] ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سیستم‌های مقاوم جانبی، نیازمند تعریف رفتار غیرخطی برای اعضاء سازه‌ی است. بر پایه‌ی توجه به ضوابط ۴۱-۱۷ ASCE/SEI و گزارش FEMA P-۷۹۵، حوزه‌ی عملکرد غیرخطی المان‌های تیر - ستون، تیر و المان‌های قطری در سازه‌های مطالعاتی به ترتیب با نمود بیشتر رفتار محوری - خمشی، خمشی و محوری به صورت مفصل متمرکز اختصاص یافته است.^[۲۲] در شکل ۳، مشخصات رفتار غیرخطی المان‌های سازه‌ها مشاهده می‌شود.

با توجه به اهمیت تعریف مشخصات رفتار کشسان برای سازه‌ها براساس ضوابط ۷-۱۰ ASCE، مقاطع نیم‌رخ‌های فولادی برای المان‌های سازه‌ی به صورت جدول‌های ۱ الی ۴ در نظر گرفته شده‌اند.^[۲۴] همچنین کنترل نسبت‌های مقاومتی و برقراری رفتار پیش‌بینی سخت برای هر ۴ سازه‌ی مطالعاتی تأیید شده است. آنالیز و ارزیابی طراحی سازه‌های مطالعاتی شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده در نرم‌افزارهای Sap۲۰۰۰ و Perform-۳D انجام شده است.^[۲۵] مطابق جدول ۵، سنجش نزدیکی مشخصات مودال، بردارها و مقادیر ویژه‌ی سازه‌های مطالعاتی برپا شده در محیط نرم‌افزار Perform-۳D، در هماهنگی با نتایج متناظر حاصل از نرم‌افزار Sap۲۰۰۰ تأیید می‌شود.

۲.۲. رکوردهای زلزله‌ی انتخابی

رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به سبب حضور پالس در تاریخچه‌ی زمانی سرعت، انرژی جنبشی زیادی را نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور به سازه‌ها تحمیل می‌کنند. همچنین، جنبش‌های نیرومند زمین در میدان نزدیک گسل، مؤلفه‌ی سرعت طیفی بالاتر و باند با پهنای باریک‌تر بسامدهای پراثری (کمتر از 10 هرتز) در طیف فوری، نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور دارند. پالس رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به خصوص با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، نیاز لرزه‌ی زیادی را در سازه‌ها ایجاد می‌کند.^[۲۷] در این باره صحتی و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که پالس و اسپایک‌های پراثری در تاریخچه‌ی زمانی سرعت رکوردهای نیرومند، می‌تواند سبب ایجاد آثار قابل توجه $P - \Delta$ در سازه‌ها شود.^[۲۸] در پژوهش حاضر، 10 رکورد سه مؤلفه‌ی حوزه‌ی



شکل ۲. پلان سازه‌های مطالعاتی.

ارزیابی جامع محاسباتی شده است. نمای سازه‌های مطالعاتی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۲. روش و سازمان پژوهش

۱.۲. طراحی مدل‌های مطالعاتی

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی تغییر زوایای پیکربندی محیطی بر مشخصات رفتار غیرخطی، سه سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای 49° ، 67° و 74° درجه به ترتیب با مدل مثلی ۱، ۲ و ۳ طبقه، همراه با یک سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده‌ی مینا برپا شده‌اند. منظور از مدل شبکه‌ی قطری، تعداد طبقاتی است که توسط المان‌های مورب پیرامونی محصور شده‌اند.

چهار سازه‌ی ۲۴ طبقه‌ی مطالعاتی با رعایت معیار هم‌ارزی سختی، براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و ضوابط طرح لرزه‌ی مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند.^[۲۹] ارتفاع طبقات و طول دهانه‌ها به‌طور یکسان و به ترتیب برابر با 6 و $3/5$ متر لحاظ شده است. در شکل ۲، پلان مربعی سازه‌های مطالعاتی به ابعاد 36×36 متر مشهود است.

سازه‌های مطالعاتی بر روی خاک نوع II و در منطقه با خطر نسبی خیلی

جدول ۱. مشخصات مقاطع المان‌های قاب خمشی (میلی‌متر).

طبقه	ستون‌ها	تیرها
۱ تا ۶	BOX 600×300	PL $500 \times 150 + 350 \times 250$
۷ تا ۱۲	BOX 550×250	PL $450 \times 150 + 350 \times 250$
۱۳ تا ۱۸	BOX 500×200	PL $450 \times 100 + 350 \times 250$
۱۹ تا ۲۴	BOX 450×150	PL $400 \times 100 + 300 \times 200$

جدول ۲. مشخصات مقاطع المان‌های قاب ساده (میلی‌متر).

طبقه	ستون‌ها	تیرها
۱ تا ۵	BOX 500×250	
۶ تا ۱۰	BOX 450×200	
۱۱ تا ۱۵	BOX 400×150	PL $350 \times 100 + 150 \times 200$
۱۶ تا ۲۰	BOX 350×150	
۲۱ تا ۲۴	BOX 300×100	

جدول ۳. مشخصات مقاطع، اعضاء مورب پیکربندی قطری پیرامونی (میلی‌متر).

طبقه	المان‌های قطری با زاویه‌ی		
	۴۹°	۶۷°	۷۴°
۱ تا ۶	BOX 550×250	BOX 500×280	BOX 500×260
۷ تا ۱۲	BOX 500×220	BOX 450×250	BOX 450×240
۱۳ تا ۱۸	BOX 450×180	BOX 400×220	BOX 400×200
۱۹ تا ۲۴	BOX 400×140	BOX 350×180	BOX 350×160

جدول ۴. مشخصات مقاطع، تیرهای پیکربندی قطری پیرامونی (میلی‌متر).

طبقه	تیرهای محیطی در سازه‌های شبکه‌ی قطری
۱ تا ۶	PL $500 \times 150 + 350 \times 250$
۷ تا ۱۲	PL $450 \times 150 + 350 \times 250$
۱۳ تا ۱۸	PL $450 \times 100 + 350 \times 250$
۱۹ تا ۲۴	PL $400 \times 100 + 300 \times 200$

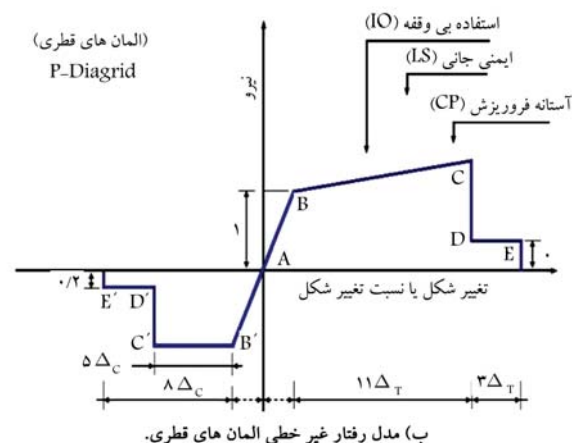
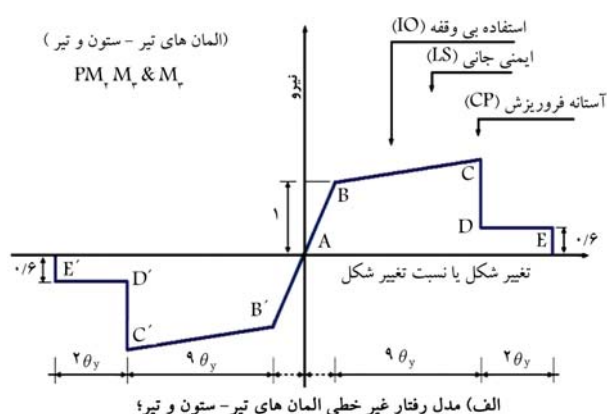
جدول ۵. دوره‌ی تناوب ارتعاش مود اول سازه‌های مطالعاتی (شکل ۱).

سازه‌های مطالعاتی	نرم‌افزار	
	Sap 2000	Perform- $3D$
قاب خمشی دسته شده محیطی	۳/۱۹۸	۳/۱۹۶
شبکه‌ی قطری با زوایای (۴۹°)	۱/۲۲۳	۱/۲۲۳
شبکه‌ی قطری با زوایای (۶۷°)	۱/۲۸۱	۱/۲۸۱
شبکه‌ی قطری با زوایای (۷۴°)	۱/۶۲۲	۱/۶۲۳

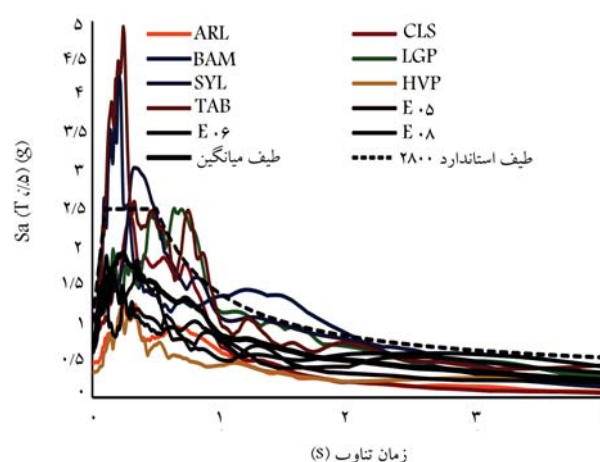
۳. ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مطالعاتی

۱.۳. نتایج تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی

رکوردهای انتخابی به صورت سه مؤلفه‌ی و هم‌زمان درجهت‌های X ، Y و Z سازه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شده‌اند. مؤلفه‌ی موازی با صفحه‌ی شکست گسل (مؤلفه‌ی



شکل ۳. مشخصات رفتار غیرخطی اعضاء سازه‌ی [۲۳، ۲۲]

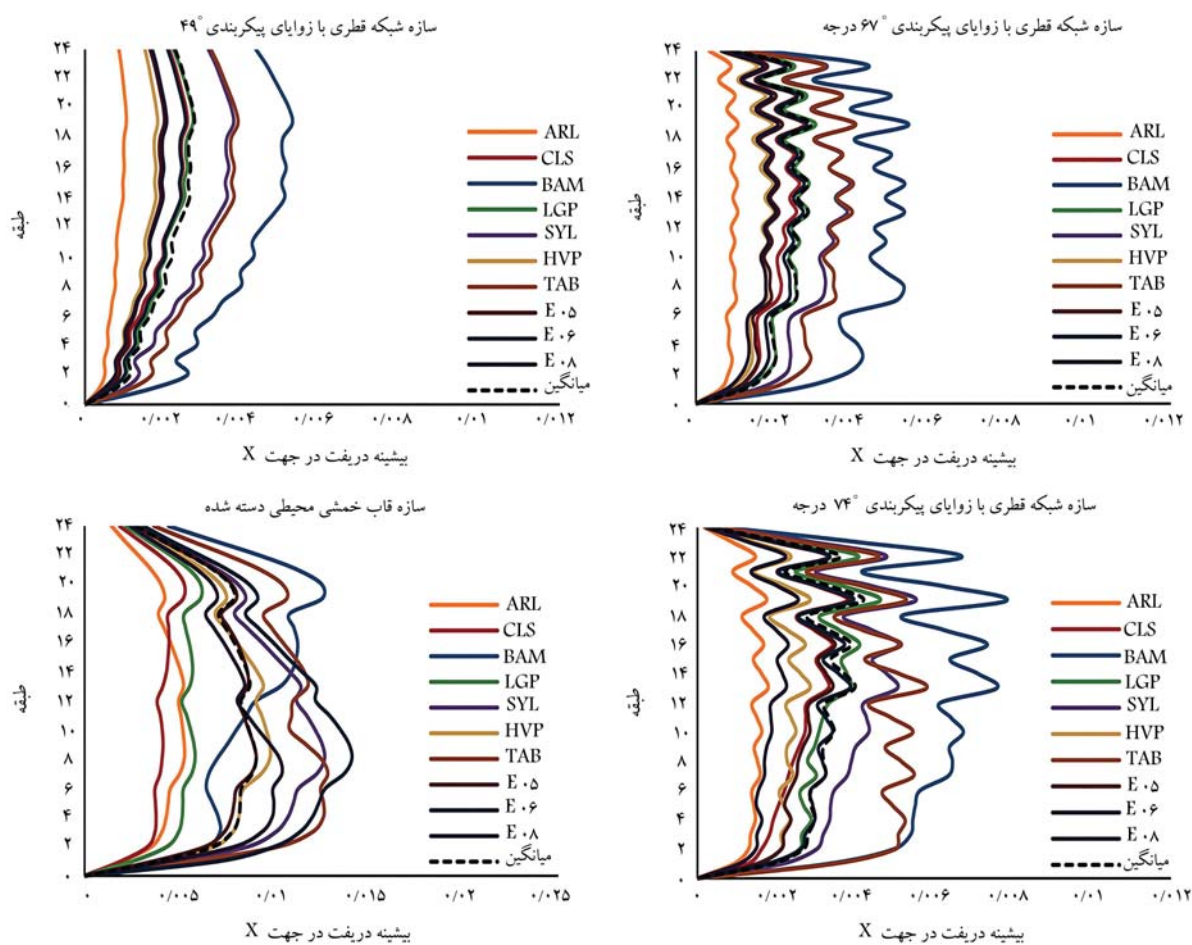


شکل ۴. طیف SRSS پاسخ شتاب رکوردهای زلزله با میرایی ۵٪.

نزدیک، حاوی انواع اثرات جهت‌داری پیش‌رونده^{۱۳}، پس‌رونده^{۱۴} و خنثی^{۱۵} از پنج زلزله (مطابق جدول ۶) در نظر گرفته شده است.^[۲۹] ساختارهای متفاوتی از پالس پیرامنه و بلندمدت سرعت در تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای مربوط به زلزله‌های نورتریج^{۱۶} (۱۹۹۴)، امپریال ولی^{۱۷} (۱۹۷۹)، لوماپیتا^{۱۸} (۱۹۸۹) (کالیفرنیا جنوبی)، بم (۲۰۰۳) و طیس (۱۹۷۸) وجود دارد. در شکل ۴، طیف پاسخ شتاب رکوردهای موردنظر به صورت ترکیب SRSS، مؤلفه‌های LN و TR (در جهت موازی و عمود بر صفحه‌ی شکست گسل)، به همراه طیف استاندارد ۲۸۰۰ مشاهده می‌شود.

جدول ۶. مشخصات رکوردهای زلزله‌ای انتخابی.

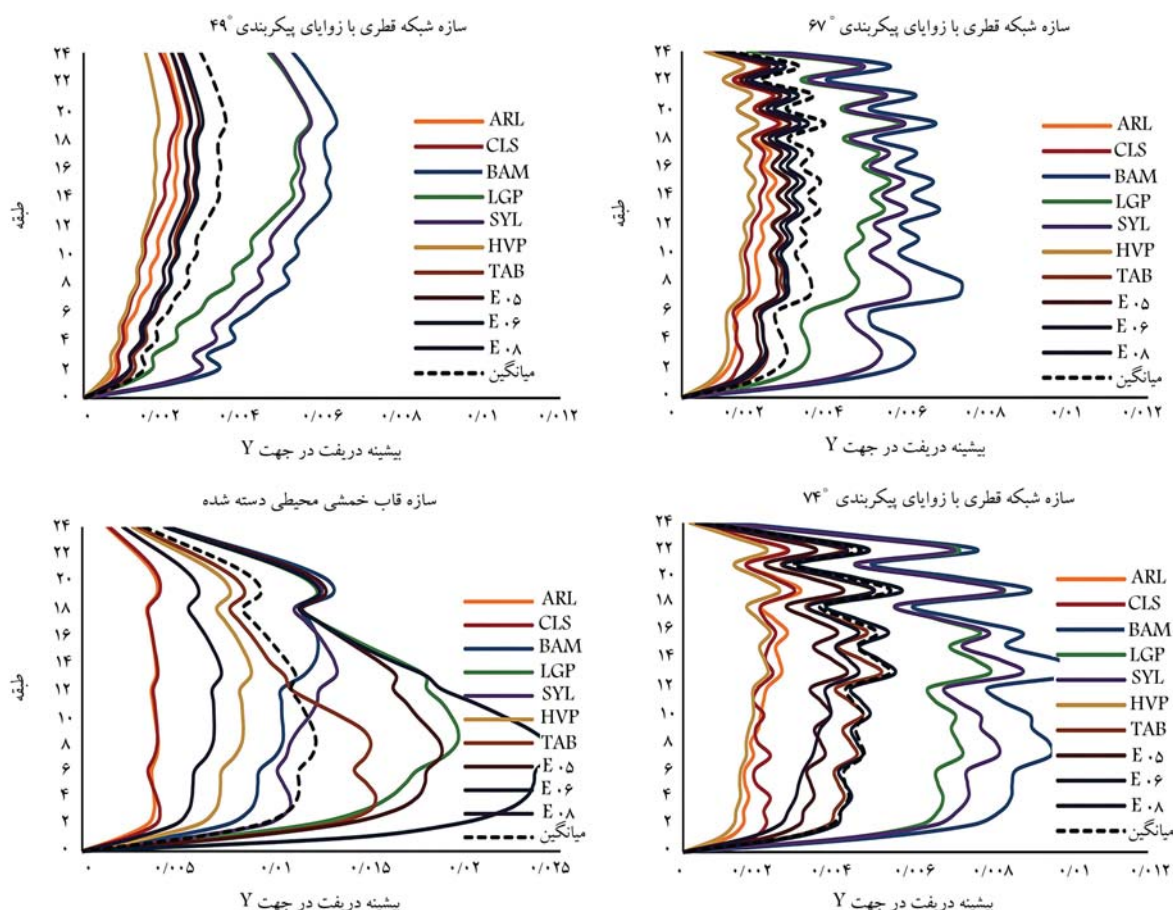
شماره‌ی نگاشت	زلزله	سال رخداد	ایستگاه	بزرگا (M_w)	شتاب (g)	سرعت (cm/s)	پیشینه‌ی مؤلفه TR جابه‌جایی (cm)	اثر جهت‌داری
۱	بم	۲۰۰۳	BAM	۶/۶	۰/۷۶۴	۱۰۷/۴۳	۳۱/۸۲	Forward Dir.
۲	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۵ ($E^{\circ} 5$)	۶/۵	۰/۳۷۹	۹۰/۵۲	۶۲/۱۹	Forward Dir.
۳	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۶ ($E^{\circ} 6$)	۶/۵	۰/۴۳۹	۱۱۰/۱۴	۶۹/۳۱	Forward Dir.
۴	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۸ ($E^{\circ} 8$)	۶/۵	۰/۶۰۲	۵۴/۱۳	۳۱/۲۴	Forward Dir.
۵	امپریال ولی	۱۹۷۹	Holtville(HVP)	۶/۵	۰/۲۵۳	۵۰/۰۳	۳۲/۰۵	Neutral Dir.
۶	لوماپریتا	۱۹۸۹	Los Gatos(LGP)	۶/۹	۰/۵۶۳	۹۶/۲۳	۳۷/۱۲	Forward Dir.
۷	لوماپریتا	۱۹۸۹	Corralitos(CLS)	۶/۹	۰/۶۴۴	۵۵/۴۸	۱۰/۴۶	Backward Dir.
۸	نورث ریج	۱۹۹۴	Arleta(ARL)	۶/۷	۰/۳۴۵	۴۲/۰۴	۱۰/۰۹	Neutral Dir.
۹	نورث ریج	۱۹۹۴	Sylmar Olive View(SYL)	۶/۷	۰/۸۴۳	۱۲۹/۶۱	۳۲/۹۳	Forward Dir.
۱۰	طیس	۱۹۷۸	TAB	۷/۴	۰/۸۵۲	۱۲۱/۶۹	۱۰۰/۴۶	Forward Dir.



شکل ۵. نمودار پوش بیشینه‌ی دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی در جهت X پلان.

نمودارهای پوش بیشینه‌ی دررفت نشان می‌دهند که رکوردهای حوزه‌ی نزدیک با اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، در سازه‌های مطالعاتی تغییرشکل بیشتری را ایجاد می‌کنند. شایان ذکر است که رکوردهای دارای پالس سرعت، به علت تطابق بسامدهای پراثری با محورهای طیفی متناظر با مشخصات مودال سازه‌های بلندمرتبه، قابلیت ایجاد روند کاهش سختی سازه را با شدت بیشتر دارند. نمود اثر مذکور برای رکورد TAB حاوی یک پالس بلندمدت در مؤلفه‌ی TR و نیز برای رکورد SYL دارای

LN در جهت X پلان، مؤلفه‌ی عمود بر صفحه‌ی شکست گسل (مؤلفه‌ی TR) در جهت Y و مؤلفه‌ی قائم در راستای محور Z اسکلت سازه‌های مطالعاتی وارد شده است. یکی از معیارهای مهم برای سنجش طرح لرزه‌ی اسکلت‌های مقاوم، ارزیابی تغییرشکل سازه‌ها است. به‌منظور ارزیابی نیاز لرزه‌ی در سازه‌های مطالعاتی شبکه‌ی قطری و قاب خمشی دسته‌شده، مطابق شکل‌های ۵ و ۶، مقادیر پارامتر پاسخ بیشینه‌ی دررفت طبقات تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به‌صورت میدان آزاد بررسی شده‌اند.



شکل ۶. نمودار پوش بیشینه‌ی دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی در جهت Y پلان.

هندسی پیرامونی، از شدت یکنواختی در نمودار پوش بیشینه‌ی دررفت به‌ویژه در طبقات انتهایی کاسته می‌شود. به عبارت بهتر، هر چه زوایای المان مورب در پیکربندی محیطی بیشتر شود، نمود رفتار غیرخطی سازه‌ی شبکه‌ی قطری به‌طورنسبی به سازه‌ی قاب خمشی نزدیک می‌شود. بر طبق نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی مشاهده شد که کاربرد شبکه‌ی قطری در پیکربندی اسکلت مقاوم نسبت به قاب خمشی محیطی دسته‌شده، سبب کاهش مقادیر بیشینه‌ی دررفت به‌ویژه در تراز طبقات ابتدایی می‌شود.

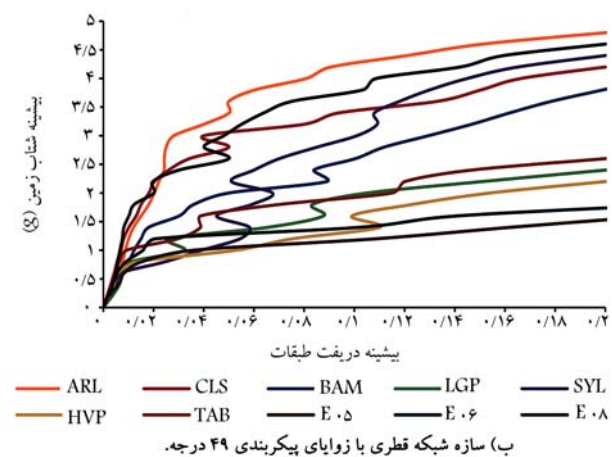
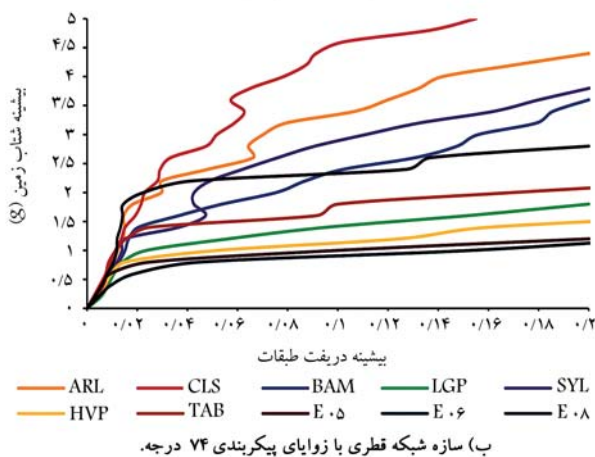
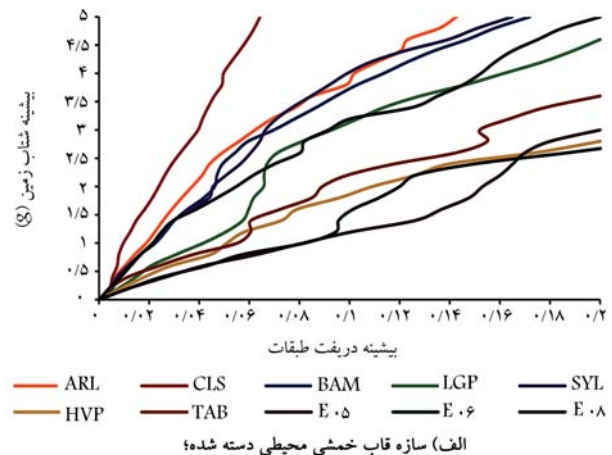
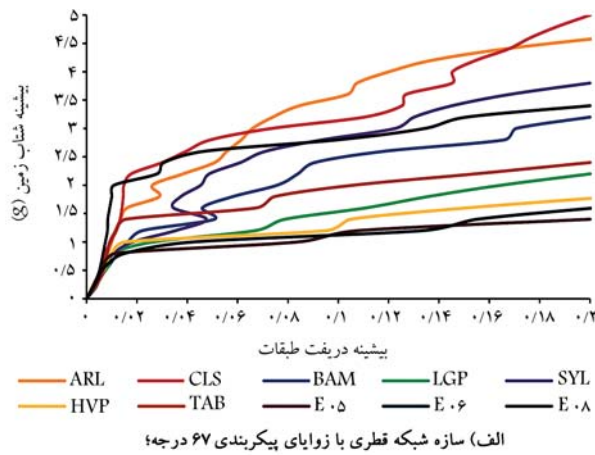
۲.۳. آنالیز شکنندگی ساختارهای مقاوم

نمودارهای شکنندگی، یک معیار سنجشی مهم در بررسی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها هستند. در واقع، احتمال رخداد حالت‌های حدی عملکرد سازه در سطوح مختلف شدت زلزله، با استفاده از منحنی‌های شکست محاسبه می‌شود.^[۳۱،۳۲] بر همین اساس، تحلیل دینامیکی فراینده (IDA) تحت رکوردهای زلزله‌ای انتخابی با گام معادل $0.2g$ بر روی هر ۴ سازه‌ی مطالعاتی انجام گرفت. در تحلیل‌های مذکور، بیشینه‌ی دررفت متناظر با جهات X و Y در مرکز جرم تراز کف طبقات سازه به عنوان پارامتر نیاز (DM) و بیشینه‌ی شتاب رکورد زلزله (PGA)^{۱۹} به عنوان معیار شدت لرزه‌یی (IM) لحاظ شده‌اند.^[۳۲،۳۳] نتایج تحلیل‌های دینامیکی فراینده در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. بر طبق نتایج مذکور نتیجه‌گیری شد که سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، با شدت شتاب

بالس پیوسته‌ی پدانه‌ی سرعت، در مقادیر بیشینه‌ی دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی قابل مشاهده است.

سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده به سبب انعطاف‌پذیری بالا، دارای دامنه‌ی تغییرمکان جانبی بیشتری تحت جنبش‌های نیرومند زمین است. رفتار غیرخطی سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده نشان می‌دهد که معمولاً مقادیر بیشینه‌ی دررفت در نیمه‌ی پایینی ارتفاع سازه رخ می‌دهد. با مقایسه‌ی پوش بیشینه‌ی دررفت سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک دریافت می‌شود که پیکربندی قاب خمشی محیطی، نیاز لرزه‌یی به مراتب بیشتری نسبت به شبکه‌ی قطری پیرامونی در اسکلت مقاوم سازه ایجاد می‌کند. همچنین رکوردهای نیرومند BAM و LGP به سبب مقادیر جابه‌جایی نسبی بزرگ، باعث ناپایداری کلی دینامیکی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی شده‌اند. همچنین در کنار نتایج مذکور ملاحظه شد که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه تحت همه‌ی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، مشخصات رفتار با جنبه‌ی حاکم خطی برقرار است. این مورد نیز نشان‌دهنده‌ی کارایی خوب و قابلیت بالا برای عملکرد لرزه‌یی اسکلت مقاوم با استفاده از پیکربندی با آرایش الگوهای مثلی محیطی است.

پارامتر بیشینه‌ی دررفت (شکل‌های ۵ و ۶) در سازه‌های شبکه‌ی قطری با پیکربندی محیطی مختلف دارای توزیع به نسبت یکنواخت در راستای ارتفاع است. در این مورد، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زاویه‌ی پیکربندی ۴۹ درجه، کمترین مقادیر بیشینه‌ی دررفت را نسبت به دیگر سازه‌های مطالعاتی دارد. روند تغییرشکل سازه‌های شبکه‌ی قطری بدین گونه است که با افزایش زوایای المان‌های مورب در الگوی



شکل ۸. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های مطالعاتی.

شکل ۷. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های مطالعاتی.

ظرفیت مقاومتی سازه را در مقابل وقوع ناپایداری دینامیکی افزایش دهد و قابلیت ثبات اسکلت مقاوم در صورت رخداد احتمالی سطوح عملکردی بالاتر بیشتر شود. در پژوهش حاضر، به منظور سنجش احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد برای سازه‌های مطالعاتی، یک فرایند جامع مطالعاتی بر روی متحنی‌های شکست صورت گرفته است. براساس توابع شکنندگی، روند تجاوز از حالت‌های حدی برای سازه‌ی هدف در سطوح مختلف آسیب لرزه‌ی بررسی شده است.^[۹] ساختار تحلیلی نمودارهای شکنندگی مطابق با رابطه‌ی ۱ ارزیابی و محاسبه شده است:

$$Frag(IM; \delta) = P(\Delta \geq \delta | IM) \quad (1)$$

که در آن، $P(\Delta \geq \delta | IM)$ برابر با احتمال شرطی تجاوز مقادیر پاسخ سازه Δ از حالت حدی عملکردی δ در سطوح مختلف شدت حرکت زمین (با نماد IM) است. در مطالعه‌ی حاضر، تولید ارزیابی نمودارهای شکنندگی از نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده بر پایه‌ی توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال انجام شده است. تابع چگالی احتمال توزیع لوگ - نرمال به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \left[-\frac{(\ln x - \theta)^2}{2\omega^2} \right] \quad 0 < x < \infty \quad (2)$$

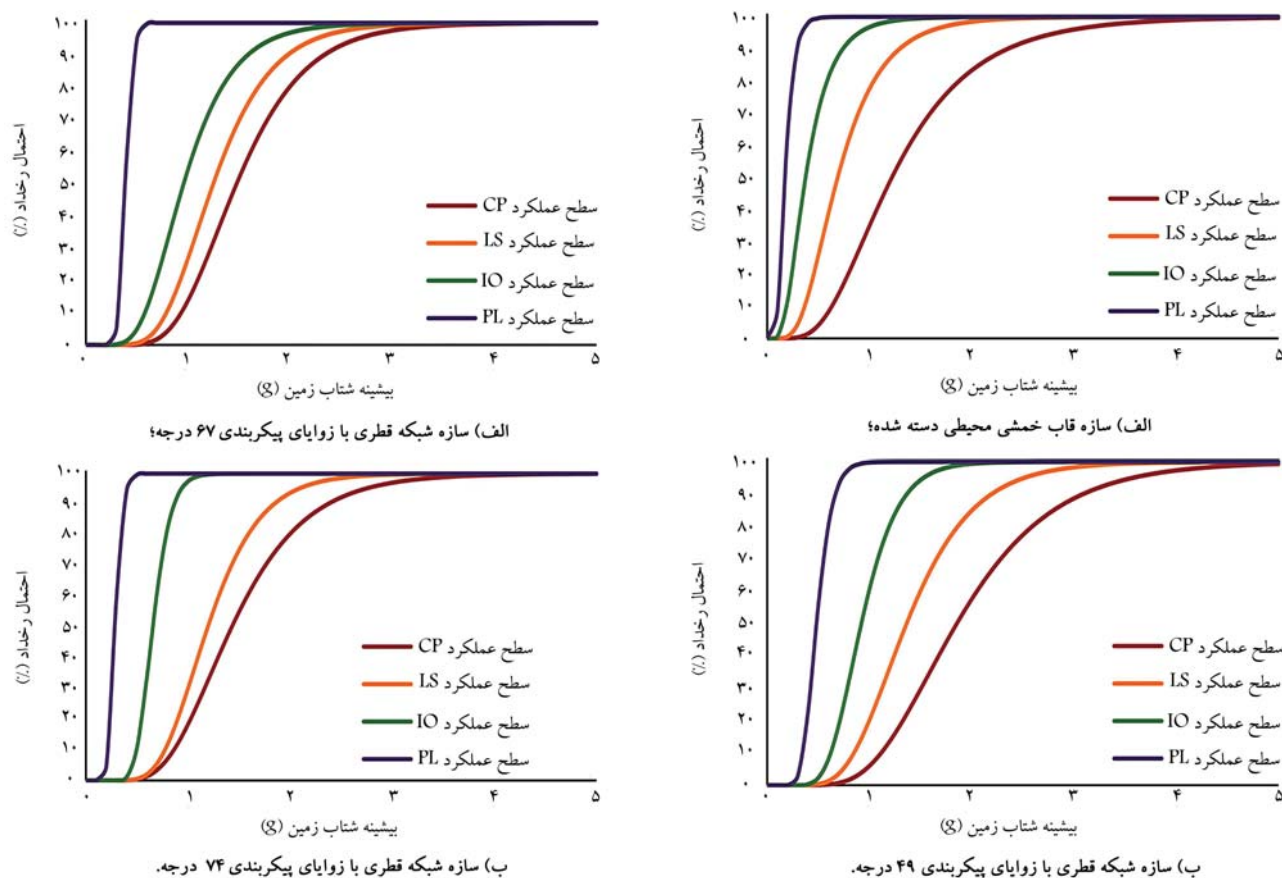
که در آن، پارامترهای θ و ω^2 به ترتیب میانگین و واریانس توزیع نرمال هستند. همچنین، در پردازش‌های عددی نمودارهای شکنندگی، مقدار بیشینه‌ی دررفت طبقات به عنوان متغیر تصادفی Δ برای جامعه‌ی آماری توزیع لوگ - نرمال لحاظ

کمتری محدوده‌ی رفتار غیرخطی را تجربه می‌کند. سازه‌ی مطالعاتی قاب خمشی دسته شده با داشتن قابلیت انعطاف پذیری بالا، براساس الگوهای گسترده‌ی حوزه‌های غیرخطی و مفاصل خمیری به تدریج وارد تراز عملکردی آستانه‌ی فروریزش خواهد شد. این در صورتی است که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با سختی جانبی بزرگ و نیز تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، تمرکزهای حوزه‌ی آسیب‌ها و سپس گسترش ناپایداری‌های موضعی اتفاق می‌افتد.

ملاحظه شد که ظرفیت فروریزش سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای فاقد پالس در تاریخچه‌ی زمانی سرعت، نظیر ARL و CLS، بیشتر از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک حاوی پالس سرعت است. بررسی نتایج رفتاری و نیز توجه به شیب اولیه‌ی نمودارهای IDA برای سازه‌های شبکه‌ی قطری نشان می‌دهد که این ساختارهای مقاوم در برابر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، مشخصات عملکردی مطلوبی دارند و مکانیزم احتمالی تسلیم با روندی آهسته تشکیل می‌شود. مشخصه‌ی بالای مقاومتی سازه‌های شبکه‌ی قطری در حوزه‌ی رفتار غیرخطی بارز است. همچنین، دانسته شد که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری مطالعاتی با افزایش زوایای المان‌های مورب پیکربندی محیطی، سطح شتاب متناسب با عملکرد آستانه‌ی فروریزش نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد مدول‌های مثلی در سازه‌های شبکه‌ی قطری، یک روند سریع‌تر زوال مقاومت و کاهش سختی پدیدار خواهد شد. نکته‌ی دیگر آنکه، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه، قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر سازه‌های مطالعاتی دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از پیکربندی قطری محیطی به عنوان سیستم باربر جانبی، می‌تواند

جدول ۷. محدوده‌ی سطوح عملکرد لرزه‌یی با معیار دررفت. [۳۴، ۳۵]

سطح عملکرد	کرانه‌ی رفتارکشسان (PL)	استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)	ایمنی جانی (LS)	آستانه‌ی فروریزش (CP)
مقادیر مجاز بیشینه‌ی دررفت (درصد)	۵/۰	۱/۰	۲/۰	۴/۰



شکل ۹. نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی برای حالت‌های حدی مختلف.

شده است. همچنین با توجه به پارامترهای تعریف شده در توزیع لوگ - نرمال، نمودارهای شکنندگی براساس رابطه‌ی ۳ به‌دست آورده می‌شوند:

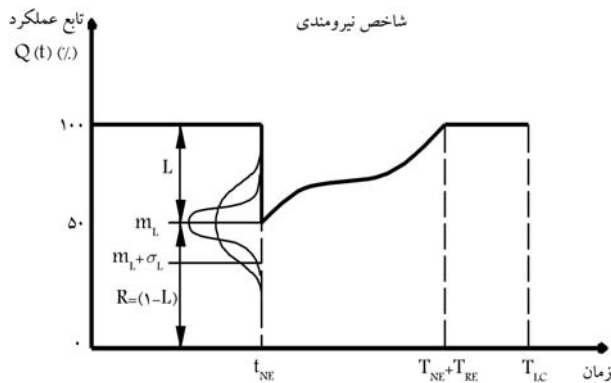
$$Frag(IM; \delta) = 1 - P(x \leq \delta) = 1 - \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (3)$$

در فرمول نهایی با جایگزینی میانگین $\mu = E(x) = e^{\theta + \frac{\omega^2}{2}}$ و انحراف معیار $\sigma = \sqrt{e^{2\theta + \omega^2}(e^{\omega^2} - 1)}$ و متغیر وابسته‌ی X بر پایه‌ی تابع توزیع لوگ - نرمال، مقادیر احتمال فراگذشت از حالت‌های حدی برای سازه‌های مطالعاتی محاسبه می‌شوند. مقادیر مجاز سطوح عملکرد (δ) برای حالت‌های حدی کرانه‌ی رفتارکشسان (PL) ^{۲۰} استفاده‌ی بی‌وقفه (IO) ^{۲۱} ایمنی جانی (LS) ^{۲۲} و آستانه‌ی فروریزش (CP) ^{۲۳} در محاسبات منحنی شکست سازه‌های شبکه‌ی قطری و قاب خمشی محیطی دسته شده، براساس ضوابط FEMA P-۶۹۵ و FEMA ۳۵۶ (جدول ۷) پیاده‌سازی شده است. [۳۴، ۳۵] فروریزش احتمالی دینامیکی، مربوط به وضعیتی است که خرابی کلی در اسکلت مقاوم رخ داده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، منحنی شکست سازه‌های مطالعاتی برای چهار حالت حدی پایه مشاهده می‌شود. بر طبق این نتایج ملاحظه شد که در مقادیر شدت لرزه‌یی یکسان، احتمال رخداد سطوح عملکرد برای سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده بیشتر از

شکل ۱۰. نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی برای حالات حدی مختلف.

ساختارهای شبکه‌ی قطری است. این مسئله نشان می‌دهد که با افزایش شتاب زلزله، تغییرشکل‌های بزرگی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده ایجاد می‌شود. همچنین شیب ساختار نمودارهای شکنندگی مطابق با شکل‌های ۹ و ۱۰، برای وضعیت فروریزش احتمالی سازه‌های مطالعاتی بیان‌کننده‌ی آن است که با افزایش شدت لرزه‌یی، وقوع مود کمانش برای المان‌های اصلی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده با روند سریع‌تری نسبت به سازه‌های شبکه‌ی قطری رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که احتمال تجاوز از سطح عملکرد کرانه‌ی رفتارکشسان (PL) برای هر چهار سازه‌ی مطالعاتی در شکل ۱ تفاوت کمی دارد. پردازش نمودارهای مذکور نشان می‌دهد که در صورت رخداد زلزله با بیشینه‌ی شتاب $1g$ احتمال فراگذشت از تراز عملکرد LS برای سازه قاب خمشی در حدود ۷۸٪ و برای سازه‌های شبکه‌ی قطری نیز کمتر از ۳۰٪ بوده است. بنابراین ساختارهای شبکه‌ی قطری (مطابق شکل ۱)، ظرفیت بالایی به منظور برقراری ایمنی جانی در سازه‌های مطالعاتی، معادل با تراز عملکرد LS دارند.

شایان ذکر است که مقادیر شتاب متناظر با رویکرد تصاعدی خسارت برای سازه‌های شبکه‌ی قطری بیشتر از سازه با اسکلت مقاوم قاب خمشی است. کاربرد پیکربندی پیرامونی قطری می‌تواند میزان آسیب مطابق با رخداد حالت‌های حدی



شکل ۱۱. پردازش عددی مؤلفه‌ی نیرومندی تاب‌آوری لرزه‌یی. [۱۷]

همچنین هر گروه نیز بر پایه‌ی خسارت‌های مالی و جانی تعریف می‌شود. مهم‌ترین بخش خسارت‌های زلزله بر روی سیستم‌های مقاوم، مربوط به خسارت‌های مستقیم بر المان‌های سازه‌یی و غیرسازه‌یی است. بر طبق مفاهیم مطرح شده در مطالعات سایملارو و همکاران (۲۰۰۹)، [۳۶]، تابع خسارت سازه‌ها به صورت رابطه‌ی ۷ به دست آورده می‌شود:

$$L_{DE}(I) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_{S,j}}{I_S} \cdot \prod_{i=1}^{T_i} \left(\frac{1 + \delta_i}{1 + r_i} \right) \right] \cdot P_j \left\{ \bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{lim i}) / I \right\} \quad (7)$$

که در آن، پارامتر P_j احتمال تجاوز از سطح عملکرد j برای هر شدت رکورد زلزله I است. همچنین $C_{S,j}$ هزینه تعمیر سازه در هر سطح عملکرد j ، I_S هزینه جایگزینی المان‌های سازه، r نرخ کاهش سالانه، t_i فاصله‌ی زمانی بین سرمایه‌ی اولیه و رویداد زلزله و δ_i نرخ استهلاک سالانه هستند. در رابطه‌ی ۷، براساس گزارش PEER ۲۰۰۶/۱۱، اثر آسیب ناشی از زلزله در اعضا سازه‌یی و غیرسازه‌یی اسکلت مقاوم به صورت جدول ۸ در نظر گرفته شده است. [۳۷]

شایان ذکر است که پس از تعیین مقادیر پیش فرض برای ضرایب آسیب، ناحیه‌ی خطرپذیری سازه‌های مطالعاتی براساس پارامتر شدت حرکت زمین محاسبه می‌شود. به عبارت بهتر، محدوده‌ی کنترل اسکلت‌های مقاوم، مبتنی بر مشخصات آنالیز مودال سازه‌ها و ویژگی‌های طیفی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک تعیین و تخمین زده می‌شود. مطابق با ضوابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، به منظور ایجاد محدوده‌ی کنترل بر روی نمودارهای شکنندگی سازه‌ها، رابطه‌ی ۸ استفاده می‌شود:

$$C_u = ABI \quad (8)$$

که در آن، با استفاده از نسبت شتاب مبنای طرح به شتاب پایه‌ی A ، ضریب بازتاب B و پارامتر اهمیت I سازه‌های مطالعاتی، حد کنترل عملکرد سازه‌ها (C_u) مشخص می‌شود. با توجه به فرض ساختگاه با خطرپذیری نسبی زیاد، ضریب شتاب مبنای طرح سازه‌ها برابر $0.35g$ لحاظ شده است. سپس، با توجه به ساختگاه با خاک نوع II و دوره‌های تناوب سازه‌های مطالعاتی، ضریب بازتاب B محاسبه می‌شود. در نهایت، با فرض ضریب اهمیت برابر ۱، معین‌سازی محدوده‌ی کنترل رفتار لرزه‌یی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده انجام شد. در شکل ۱۲، کران بالا و پایین محدوده‌ی خطرپذیری سازه‌های مطالعاتی براساس بیشینه و کمینه‌ی ضریب بازتاب B در رابطه‌ی ۸ مشاهده می‌شود.

محاسبات محدوده‌ی کنترل سازه‌های مطالعاتی (مطابق جدول ۹) نشان می‌دهند که سازه‌های با دوره‌ی تناوب کمتر، حد پذیرش بالاتری برای شدت زلزله دارند. همچنین

را در اسکلت مقاوم کاهش دهد. بر طبق نتایج به دست آمده، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی محیطی ۴۹ درجه، بیشترین سطح اطمینان را در برابر احتمال فراگذشت از وضعیت‌های عملکرد لرزه‌یی دارد. بنابراین، به منظور حصول وضعیت رفتار غیرخطی با ایجاد کمترین خرابی در سازه‌های شبکه‌ی قطری، تعریف زوایای کمتر برای الگوی پیکربندی المان‌های مورب پیرامونی همراه با حفظ هم‌ارزی پارامترهای سختی و مقاومت، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را برای رسیدن به یک طرح بهبودیافته‌ی اسکلت مقاوم در پی داشته باشد.

احتمال فراگذشت از حالت حدی آستانه‌ی فروریزش در سطح شتاب لرزه‌یی $1g$ برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده به ترتیب برابر با ۰.۱۴، ۰.۱۸ و ۰.۳۵ درصد است. بر همین اساس، ساختار تحلیلی نمودار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی در سطح عملکرد (CP) نشان می‌دهد که توانایی و قابلیت اسکلت مقاوم سازه‌های شبکه‌ی قطری در جلوگیری از وقوع ناپایداری کلی دینامیکی تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، به مراتب بیشتر از سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده است. کاربرد و تعبیه‌ی الگوی مثالی پیرامونی سبب افزایش پایداری سازه و ایجاد روند مناسب‌تر برای انتقال بارهای دینامیکی در حوزه‌ی رفتار غیرخطی می‌شود.

۳.۳. تاب‌آوری لرزه‌یی براساس شاخص نیرومندی

توانایی پایداری سازه‌ها، در یک سطح عملکرد لرزه‌یی برای سراسر یک بازه‌ی زمانی مشخص، به عنوان شاخص تاب‌آوری لرزه‌یی بیان می‌شود. ارزیابی قدرت سازه‌ها در برابر زلزله مطابق با متغیر تصمیم و سنجش تاب‌آوری (R) بر پایه‌ی مفاهیم و موضوعات مربوطه در گزارش MCEER-۰۹-۰۰۰۹ توسط یک تابع عملکرد $Q(t)$ وابسته به زمان، به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ تعریف می‌شود [۳۶]:

$$R = \int_{t_E}^{t_E + T_{LC}} Q(t) / T_{LC} dt \quad (4)$$

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})] \left[H(t - t_E) - H(t - (t_E + T_{RE})) \right] \times f_{Rec}(t, t_E, T_{RE}) \quad (5)$$

که در آن، عبارت‌های $L(I, T_{RE})$ تابع خسارت، $f_{Rec}(t, t_E, T_{RE})$ تابع بازبازی سازه، $H(t)$ تابع سنجش هوساید، T_{LC} زمان کنترل، T_{RE} زمان بازبازی اسکلت مقاوم از زلزله‌ی E و t_E زمان رخداد زلزله‌ی E هستند. بر پایه‌ی مطالعات سایملارو و همکاران (۲۰۱۰)، کنترل تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌ها به وسیله‌ی ۴ پارامتر: نیرومندی، افزونگی، توانمندسازی و سرعت انجام می‌گیرد. اصلی‌ترین معیار تاب‌آوری، شاخص نیرومندی است که مطابق با رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$Robustness = 1 - \bar{L}(m_L, \sigma_L) \quad (6)$$

که در آن، $\bar{L}$ به عنوان یک متغیر تصادفی و تابعی از میانگین m_L و انحراف معیار σ_L است. همچنین بر پایه‌ی ساختار تحلیلی و پردازش مطابق شکل ۱۱، شاخص نیرومندی و ارزیابی ظرفیت مقاومتی سازه‌های شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده در برابر سطوح مختلف شدت زلزله بررسی شده است. روند محاسباتی خسارت‌های زلزله بر روی اسکلت‌های مقاوم نیز دارای عدم قطعیت است. تابع خسارت $L(I, T_{RE})$ براساس دو پارامتر شدت رکورد زلزله و T_{RE} زمان بازبازی سازه لحاظ شده است. به طور کلی آسیب‌های متحمل یک سازه با تقسیم‌بندی دو گروه خسارت‌های مستقیم و غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۸. ضرایب آسیب مطابق با گزارش ۲۰۰۶/۱۱.PEER.[۳۷]

ضرایب آسیب	سطح عملکرد			
	کرنه‌ای رفتار کشسان (PL) (ناچیز)	استفاده‌ی بی‌وقفه (IO) (کم)	ایمنی جانی (LS) (متوسط)	آستانه‌ی فروریزش (CP) (شدید)
سازه‌یی	۰/۰۵	۰/۲	۰/۶	۱
غیرسازه‌یی	۰/۱	۰/۱	۰	۰
اثر مجموع	۰/۱۵	۰/۳	۰/۶	۱

جدول ۹. مقادیر تابع شکنندگی بر پایه‌ی معیار مفروض محدوددهی کنترل در سازه‌های مطالعاتی.

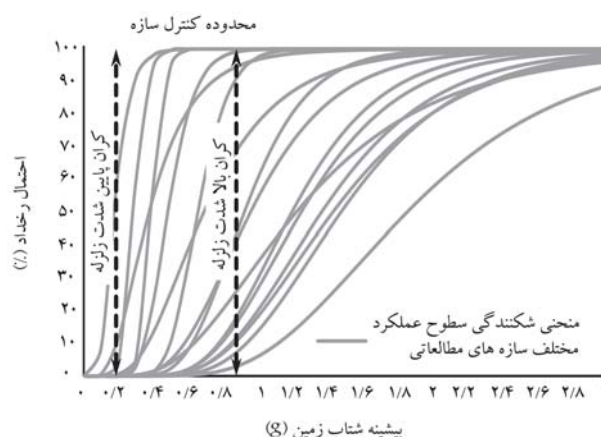
سازه‌های مطالعاتی	دوره‌ی تناوب شتاب مبنای (ثانیه) (T)	طرح (A)	ضریب		محدوده‌ی کنترل سازه (C_u)	احتمال رخداد حالت‌های حدی (%)			
			اهمیت (I)	بازتاب (B)		(PL)	(IO)	(LS)	(CP)
سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده	۳/۱۹۸	۰/۳۵	۱	۰/۶۰۲	۰/۲۱۱	۶۸/۳	۱۳/۷۷	۰/۷۹	۰/۰۳
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹°	۱/۲۲۳	۰/۳۵	۱	۱/۱۷۰	۰/۴۰۹	۲۶/۰۴	۰/۴۲	۰/۰۶	۰/۰۱
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۶۷°	۱/۲۸۱	۰/۳۵	۱	۱/۱۲۸	۰/۳۹۵	۵۲/۴۹	۱/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۱
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۷۴°	۱/۶۲۲	۰/۳۵	۱	۰/۹۴۴	۰/۳۳	۷۵/۹	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۱

به صورت مقادیر بین ۰ تا ۱۰۰ درصد، با در نظر گرفتن خسارت‌های سازه‌یی و غیرسازه‌یی سطوح عملکرد مختلف محاسبه می‌شود. مقادیر بزرگ‌تر مؤلفه‌ی استحکام تاب‌آوری، نشان‌دهنده‌ی کمینه بودن افت عملکرد لرزه‌یی سازه‌ها پس از وقوع زلزله است. بر همین اساس، با مقادیر احتمال رخداد حالت‌های حدی و پیاده‌سازی ضرایب آسیب، تابع خسارت LDE مطابق با رابطه‌ی ۷ برای سازه‌های مطالعاتی به دست می‌آید.

در جدول ۱۰، مقادیر مؤلفه‌ی خسارت برای سازه‌های شبکه‌ی قطری و قاب خمشی محیطی دسته شده ارائه شده است که مطابق آن سازه با اسکلت قاب خمشی، مقادیر تابع خسارت بزرگ‌تری نسبت به سازه‌های شبکه‌ی قطری دارد. این مورد، آسیب‌پذیری بالای سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده را تحت اثر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک بیان می‌کند. همچنین، بیشترین قابلیت پایداری در برابر گسترش خسارت لرزه‌یی نیز برای سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه برآورد شده است. در نتیجه با مجموع خسارت‌های متناظر با سطوح عملکرد لرزه‌یی، مقادیر شاخص نیرومندی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری و قاب خمشی محیطی دسته شده، بر پایه‌ی رابطه‌ی ۶ محاسبه شده است.

در جدول ۱۱، پردازش‌های عددی مربوط به مؤلفه‌ی استحکام تاب‌آوری (شاخص نیرومندی) برای سازه‌های مطالعاتی ارائه شده است که مطابق آن، پارامتر مذکور برای سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده به ترتیب برابر با ۹۵/۹، ۹۱/۷، ۸۸/۶ و ۸۵/۱ درصد محاسبه شده است.

در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که سازه‌های شبکه‌ی قطری دارای مؤلفه‌ی تاب‌آوری سخت ۲۴ به شدت بیشتری نسبت به سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده هستند. بر همین اساس، سازه‌های شبکه‌ی قطری نیز دچار افت کیفیت کارایی عملکرد به نسبت کمتری بعد از رخداد زلزله‌ها می‌شوند. سازه با اسکلت قاب خمشی نیز به سبب تغییر شکل جانبی زیاد، ظرفیت مقاومتی پایین‌تری نسبت به بروز خسارت‌های لرزه‌یی دارد. بدین ترتیب، روند خرابی سازه با ساختار دسته‌شده‌ی قاب خمشی تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، با آهنگ سریع‌تری سپری می‌شود. مقادیر شاخص کیفیت کارایی^{۲۵} سازه‌های شبکه‌ی قطری نشان می‌دهد که زوایای



شکل ۱۲. پیاده‌سازی محدوددهی کنترل در نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی.

در ارزیابی خطرپذیری لرزه‌یی نیز ملاحظه می‌شود که سازه‌های شبکه‌ی قطری نسبت به سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده، تابع شکنندگی با مقادیر کمتری دارند. همچنین برای سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده نیز با توجه به محدوددهی کنترل و جنبه‌ی احتمالاتی آن، ریسک خطر لرزه‌یی بیشتری در تشخیص عملکرد سازه‌ی قاب خمشی لحاظ می‌شود. با استفاده از مقادیر محدوددهی کنترل سازه‌های شبکه‌ی قطری و قاب خمشی محیطی دسته شده، احتمال تجاوز از وضعیت‌های عملکرد کرنه‌ای رفتار کشسان (PL)، استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزش (CP) مطابق جدول ۹ برای سازه‌های مطالعاتی محاسبه شده است. این احتمال رخداد حالت‌های حدی مربوط به احتمال خطر لرزه‌یی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، براساس ویژگی‌های هندسی قاب‌های پیرامونی سازه‌ها است.

بر طبق فرمولاسیون ۹-۰-۰۰۰-۰۰۰۰۰، تاب‌آوری به وسیله‌ی تابع کیفیت کارایی سازه (مؤلفه‌ی استحکام تاب‌آوری) به صورت رابطه‌ی ۶ مطرح می‌شود.^[۳۶] بدین ترتیب، پایداری سازه‌های مطالعاتی در برابر جنبش‌های نیرومند زمین با توجه به میزان خسارت قابل تحمل در هر سطح عملکرد، به وسیله‌ی تاب‌آوری لرزه‌یی سنجیده می‌شود. بر طبق رابطه‌ی ۶، شاخص نیرومندی (مؤلفه‌ی استحکام تاب‌آوری)

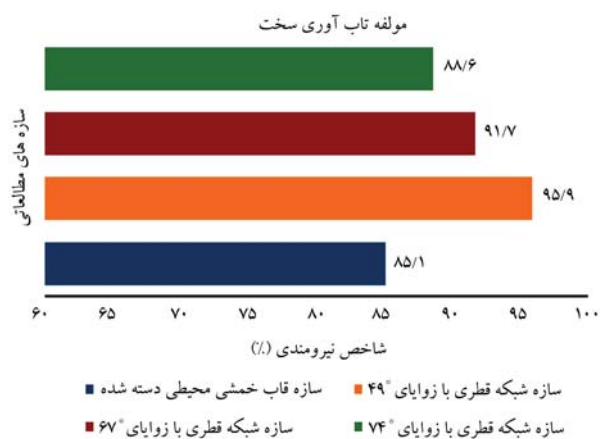
جدول ۱۰. مقادیر تابع خسارت براساس فرمولاسیون ۰۹-۰۰۰۹-MCEER [۳۶]

حالت های حدی		ضریب آسیب		سازه ی قاب خمشی		سازه ی شبکه ی قطری با زوایای					
				محیطی دسته شده		۴۹°		۶۷°		۷۴°	
				احتمال	تابع خسارت (LDE)	احتمال	تابع خسارت (LDE)	احتمال	تابع خسارت (LDE)	احتمال	تابع خسارت (LDE)
کرانه ی رفتار کشسان (PL)		۰/۱۵	۰/۶۸۳	۰/۱۰۲	۰/۲۶	۰/۰۳۹	۰/۵۲۵	۰/۰۷۹	۰/۷۵۹	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
استفاده ی بی وقفه (IO)		۰/۳	۰/۱۳۸	۰/۰۴۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰	۰/۰
ایمنی جانی (LS)		۰/۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰
آستانه ی فروریزش (CP)		۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع		-	-	۰/۱۴۹	-	۰/۰۴۱	-	۰/۰۸۳	-	۰/۱۱۴	-

جدول ۱۱. مقادیر پارامترهای تاب آوری برای سازه های مطالعاتی.

سازه ی مطالعاتی	تابع خسارت	شاخص کیفیت کارایی	شاخص نیرومندی
سازه ی قاب خمشی محیطی دسته شده	۰/۱۴۹	۰/۸۵۱	۸۵/۱
سازه ی شبکه ی قطری با زوایای ۴۹°	۰/۰۴۱	۰/۹۵۹	۹۵/۹
سازه ی شبکه ی قطری با زوایای ۶۷°	۰/۰۸۳	۰/۹۱۷	۹۱/۷
سازه ی شبکه ی قطری با زوایای ۷۴°	۰/۱۱۴	۰/۸۸۶	۸۸/۶

به دست آمده، با افزایش زوایای المان های مورب در سازه های شبکه ی قطری از میزان اثر بخشی پیکر بندی قطری پیرامونی بر کنترل سطح خسارت در اسکلت مقاوم کاسته می شود. در نتیجه، الگوی هندسی پیرامونی با زوایای ۷۴ درجه، به طور نسبی کمترین کارایی را نسبت به زوایای پیکر بندی ۴۹ و ۶۷ درجه، در ایجاد بهبود عملکرد لرزه یی سیستم مقاوم دارد. بنابراین، الگوی مثلی سبب کاهش احتمال آسیب ناشی از رویداد لرزه یی بر رفتار دینامیکی سازه می شود. این مورد، در مقادیر شاخص نیرومندی (مؤلفه ی استحکام تاب آوری) سازه های مطالعاتی (شکل ۱۳) نمود بیشتری دارد. لذا بر طبق نتایج پژوهش حاضر، می توان با تغییر الگوی هندسی پیرامونی سازه، افت و شاخص کیفیت کارایی ناشی از یک زلزله ی بزرگ و پراثری را در ساختارهای مقاوم کنترل کرد. نکته ی مهم آن است که کاربرد پیکر بندی مقاوم شبکه ی قطری با الگوهای مثلی نسبت به انتخاب یک سازه ی قاب خمشی دسته شده، توانایی اسکلت مقاوم برای مقابله با سطح مشخصی از شدت زلزله، همچنین برآورد و رسیدن به شاخص تاب آوری سخت را افزایش می دهد.



شکل ۱۳. مقایسه ی معیار شاخص نیرومندی تاب آوری برای سازه های مطالعاتی.

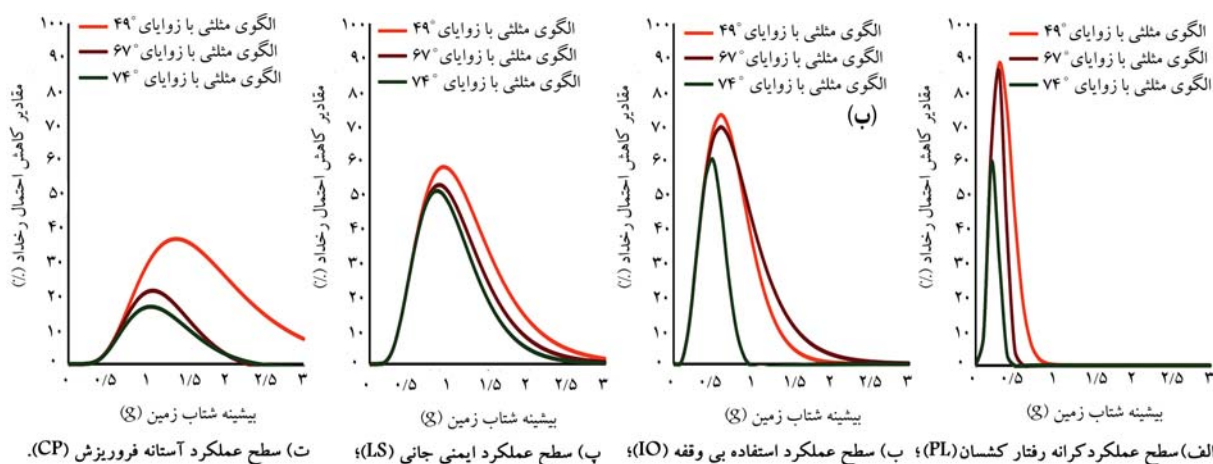
کوچک برای المان های مورب در الگوی مثلی محیطی، سبب تقویت نسبی در قابلیت میرا ساختن انرژی زلزله در سطوح مختلف خسارت می شود. در این باره، پیکر بندی پیرامونی با زوایای ۴۹ درجه، بیشترین شاخص نیرومندی را در سازه های شبکه ی قطری ایجاد می کند.

بنابراین ایجاد پیکر بندی قطری در سیستم مقاوم، توانایی مقابله با عدم قطعیت های فیزیکی رکوردهای زلزله و به ویژه جنبش های نیرومند حوزه ی نزدیک را در ماهیت رفتاری سازه ها بهبود می بخشد. همچنین، مطابق با نمودارهای شکل ۱۴ مشخص شد که استفاده از سازه ی شبکه ی قطری نسبت به ساختار ترکیبی قاب خمشی در اسکلت مقاوم، سبب کاهش نسبی احتمال رخداد سطوح عملکردی در حدود ۲۰ تا ۹۰ درصد می شود. بیشترین اختلاف احتمال فراگذشت از حالت های حدی، مربوط به سطح عملکرد کرانه ی رفتار کشسان (PL) است. در این باره، بالاترین تأثیرگذاری الگوی مثلی محیطی در جلوگیری از وقوع عملکرد احتمالی آستانه ی فروریزش (CP) در سازه به ازاء سطح شتاب ۰/۵g الی ۲g ایجاد می شود. بر طبق نتایج

۴. نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر، سنجش میزان آسیب پذیری سازه های مطالعاتی شبکه ی قطری و قاب خمشی دسته شده در برابر رکوردهای نیرومند حوزه ی نزدیک، مطابق با روابط تاب آوری لرزه یی بوده است. بدین منظور، تحلیل های تاریخچه ی زمانی غیرخطی و دینامیکی فزاینده (IDA) بر روی سازه های مطالعاتی انجام شده است. نمودارهای شکنندگی سازه ها از روی نتایج تحلیل های دینامیکی فزاینده، براساس توزیع آماری لوگ - نرمال پیاده سازی شده است. همچنین، پردازش های عددی مربوط به شاخص نیرومندی سازه های مطالعاتی، بر پایه ی روابط پیشنهادی MCEER در نظر گرفته شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. با مقایسه ی پوش بیشینه ی دریافت سازه های مطالعاتی، مشخص شد که سازه ی



شکل ۱۴. اختلاف احتمال رخداد حالت‌های حدى مختلف برای سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری.

شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹ درجه تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، دارای مقادیر با دامنه‌ی عددی کمتری نسبت به سایر سازه‌های مطالعاتی است. بر همین اساس، در سازه‌های شبکه‌ی قطری نیز با افزایش زوایای پیکربندی المان‌های مورب پیرامونی از شدت یکنواختی توزیع دریافت کاسته شده و مقادیر بیشینه‌ی پارامتر مذکور افزایش می‌یابد.

۶. مطابق با نتایج عددی تاب‌آوری لرزه‌یی، شاخص نیرومندی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده، به ترتیب ۹۵/۹، ۹۱/۷، ۸۸/۶ و ۸۵/۱ درصد محاسبه شده است. بدین ترتیب، سازه‌های شبکه‌ی قطری دارای مقادیر مؤلفه‌ی تاب‌آوری سخت در دامنه‌ی عددی بیشتری نسبت به اسکلت مقاوم قاب خمشی هستند. بنابراین ایجاد و تعبیه‌ی الگوی مثلثی محیطی در اسکلت مقاوم لرزه‌یی، افت کیفیت کارایی سازه بعد از وقوع زلزله را کاهش می‌دهد.

۷. بر پایه نتایج به‌دست آمده، به منظور کاهش مقادیر تابع خسارت حالت‌های حدى مختلف در سازه‌های شبکه‌ی قطری، استفاده از زوایای کوچک‌تر برای پیکربندی پیرامونی نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت. بر همین اساس، چیدمان زوایای ۴۹ درجه برای المان‌های مورب در شبکه‌ی قطری پیرامونی، همراه با کاهش مقادیر احتمالاتی شکنندگی در حدود ۴۰٪ نسبت به سازه‌ی قاب خمشی، بیشترین سطح اطمینان را در برابر رخداد سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش (CP) ایجاد می‌کند.

۸. طراحی و کاربرد پیکربندی قطری محیطی در ساختارهای مقاوم، توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به ویژه حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده را بهبود می‌بخشد. در این باره نیز با افزایش زوایای المان مورب الگوی هندسی پیرامونی، به‌طور نسبی از میزان تأثیرگذاری شبکه‌ی قطری بر کنترل احتمال رخداد وضعیت‌های عملکردی کاسته می‌شود.

۲. بر طبق ارزیابی نمودارهای IDA می‌توان دریافت که قابلیت شکل‌پذیری بالا برای سازه قاب خمشی محیطی دسته شده سبب می‌شود که سازه‌ی مذکور به تدریج دچار زوال مقاومت و کاهش سختی شود.

۳. در پردازش نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی مشاهده شد که در سطح شدت لرزه‌یی یکسان، احتمال رخداد حالت‌های حدى برای سازه‌های شبکه‌ی قطری به شدت کمتر از سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده است. همچنین ایجاد الگوی مثلثی در قاب‌های پیرامونی، توانایی اسکلت مقاوم را برای جلوگیری از وقوع ناپایداری کلی دینامیکی تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک افزایش می‌دهد.

۴. بر طبق نتایج محاسباتی شاخص‌های شکنندگی، مقادیر شتاب متناظر با رویکرد تصاعدی خسارت در سازه‌ی قاب خمشی کمتر از سازه‌های شبکه‌ی قطری است. به عبارت بهتر، وقوع مودهای کماتشی برای اعضاء اصلی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده با آهنگ سریع‌تری رخ می‌دهد.

۵. بر پایه‌ی پردازش تحلیلی شاخص‌های تاب‌آوری لرزه‌یی مشخص شد که سازه‌های

پانویس‌ها

1. Diagrid structure
2. Moment frame
3. Incremental dynamic analysis (IDA)

4. Fragility Curve
5. Shear-link beam
6. Bruneau & Reinhorn
7. Cimellaro
8. Robustness
9. Redundancy

10. Resourcefulness
11. Rapidity
12. Liu & Fang
13. Forward directivity
14. Backward directivity
15. Neutral directivity
16. Northridge
17. Imperial Valley
18. Loma Prieta
19. Peak ground acceleration (PGA)
20. Post-linear (PL)
21. Immediate occupancy (IO)
22. Life safety (LS)
23. Collapse prevention (CP)
24. Hard resilience
25. Quality of structures

منابع (References)

1. Montuori, G.M., Mele, E., Brandonisio, G. and De Luca, A. "Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(17), pp. 1294-1314 (2013).
2. Tomei, V., Imbimbo, M. and Mele, E. "Optimization of structural patterns for tall buildings: The case of diagrid", *Engineering Structures*, **171**(15), pp. 280-297 (2018).
3. Mohsenian, V., Padashpour, S. and Hajirasouliha, I. "Seismic reliability analysis and estimation of multilevel response modification factor for steel diagrid structural systems", *Building Engineering*, **29**, 101168 (2020).
4. Heshmati, M., Khatami, A. and Shakib, H. "Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings", *Structures*, **25**, pp. 113-126 (2020).
5. Sadeghi, S. and Rofooei, F.R. "Improving the seismic performance of diagrid structures using buckling restrained braces", *Constructional Steel Research*, **166**, 105905 (2020).
6. Song, S. and Zhang, C.H. "Lateral stiffness and preliminary design methodology of twisted diagrid tube structures", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(18) (2020).
7. Teran-Gilmore, A., Roeslin, S., Tapia-Hernandez, E. "Displacement-based design of tall earthquake-resistant diagrid systems", *Building Engineering*, **35**, 102022 (2021).
8. Zareian, F., Krawinkler, H., Ibarra, L. and et al. "Basic concepts and performance measures in prediction of collapse of buildings under earthquake ground motions", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **19**(1-2), pp. 167-181 (2010).
9. Mai, Ch., Konakli, K. and Sudret, B. "Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **11**, pp. 169-186 (2017).
10. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Direct estimation of seismic demand and capacity of multi-degree of freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation", *Structural Engineering*, **131**(4), pp. 589-599 (2005).
11. Rofooei, F.R. and Seyedkazemi, A. "Evaluation of the seismic performance factors for steel diagrid structural systems using FEMA P-695 and ATC-19 procedures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **18**, pp. 4873-4910 (2020).
12. Moradi, M. and Abdolmohammadi, M. "Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method", *Constructional Steel Research*, **174**, 106311 (2020).
13. Dabbaghchian, I., Mirghaderi, S.R. and Sayadi, S. "Comparison of seismic behavior of the eccentric and conventional diagrid systems", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **30**(3), e1824 (2021).
14. Ahleghagh, S. and Mirghaderi, S.R. "Decoupling the strength and drift criteria in steel moment-resisting frames", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(17), e1804 (2020).
15. Takewaki, L. "Beyond uncertainties in earthquake structural engineering". *Frontiers in Built Environment* (2015).
16. Bruneau, M. and Reinhorn, A. "Overview of the Resilience Concept", *The 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 2040 (2006).
17. Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. "Framework for analytical quantification of disaster resilience", *Engineering Structures*, **32**(11), pp. 3639-3649 (2010).
18. Liu, C. and Fang, D. "Robustness analysis of vertical resistance to progressive collapse of diagrid structures in tall buildings", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(13), e1775 (2020).
19. The Iranian National Building Code, "Steel structures", 10, Tehran, Iran (2014).
20. Standard No. 2800., *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, th Edition, Tehran, Iran (2014).
21. The Iranian National Building Code., *Design loads for buildings*, 6, Tehran, Iran (2014).
22. ASCE/SEI 41-17, "Seismic evaluation and retrofit of existing Buildings", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2017).
23. FEMA P-795, "Quantification of building seismic performance factors: Component equivalency methodology", Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California (2011).
24. ASCE 7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2010).
25. CSI, Analysis Reference Manual for SAP2000. Berkeley, California, USA (2010).
26. CSI, User Guide PERFORM 3D, "Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures". Berkeley, California, USA (2011).
27. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, USA (2001).

28. Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M. and et al. "Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures", *Engineering Structures*, **33**(3), pp. 767-779 (2011).
29. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Ground Motion Database, University of California Berkeley.
30. Lallemant, D., Kiremidjian, A. and Burton, H. "Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**(9), pp. 1373-1389 (2015).
31. Hajikazemi, M., Mohebi, B. and Montazeri-Pour, M. "Analysis of steel special moment frames including damaged column subjected to far and near-field ground motions", *Australian Journal of Structural Engineering*, **21**(3), pp. 193-207 (2020).
32. Vamvatsikos, D. and Fragiadakis, M. "Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **39**(2), pp. 141-163 (2009).
33. Lachanas, C.G. and Vamvatsikos, D. "Model type effects on the estimated seismic response of a 20-story steel moment resisting frame", *Structural Engineering*, **147**(6), 04021078 (2021).
34. FEMA P-695, "Quantification of Building Seismic Performance Factors", Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California (2009).
35. FEMA 356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Energy Management Agency (FEMA), Reston, Virginia (2000).
36. Cimellaro, G.P.; Fumo, C.; Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. "Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities", Technical Report MCEER-09-0009, University of Buffalo, State University of New York (2009).
37. Tothong, P. and Cornell, C.A. "Probabilistic Seismic Demand Analysis Using Advanced Ground Motion Intensity Measures, Attenuation Relationships, and Near-Fault Effects", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2006/11, College of Engineering, University of California, Berkeley (2007).

ارزیابی رفتار دیوار برشی بتنی مسلح دارای گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل

ابوالفضل عربزاده* (دانشیار)

امیرپویا غلامرضایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۲، ص. ۲۹-۴۰، پژوهشی)

در نوشتار حاضر، برای درک جامعی از رفتار دیوار برشی با گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل، دو ساختمان ۵ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار ایتبس طراحی و دیوارهای برشی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. سپس برای راستی‌آزمایی از مدل آزمایشگاهی آگودا و عربزاده استفاده شده است. با تغییر پارامترهای موقعیت و ابعاد گشودگی‌ها تحت زلزله‌ی نزدیک گسل طبس، نتایج نشان داد که برای هر دو مدل با افزایش فاصله‌ی افقی میان دو گشودگی، برش پایه، تغییرمکان نسبی و انرژی جذب شده افزایش پیدا کرده است. با قرار گرفتن گشودگی در پای دیوار، برش پایه در مدل ۱۰ طبقه نسبت به مدل ۵ طبقه کاهش بیشتری داشته است. حذف گشودگی در طبقه‌ی اول باعث افزایش برش پایه در مدل ۵ طبقه شده است، ولی در مدل ۱۰ طبقه تأثیر چندانی نداشته است. جهت بررسی اثر گشودگی با تغییر عرض و ارتفاع آن و با ثابت نگاه داشتن مساحت بیشینه‌ی گشودگی (۳۰٪) در هر نمونه مشاهده شد که تغییر عرض گشودگی باعث کاهش بسیار کمتر برش پایه در نمونه‌ها شده است.

واژگان کلیدی: دیوار برشی، گشودگی نامنظم، نزدیک گسل، برش پایه.

۱. مقدمه

تا ۱۷٪ کمتر بوده است.^[۴] آلارکن^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، به صورت تجربی آثار بارهای محوری در رفتار لرزه‌ی دیوارهای بتنی را با مرزهای محصور شده بررسی کردند و دریافتند که افزایش بار محوری، تأثیر قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ی حالت گسیختگی دیوارهای بتنی دارد.^[۵] لی^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، سه نمونه دیوار برشی بتن مسلح دارای گشودگی نامنظم، منظم و بدون گشودگی را در معرض بارگذاری چرخه‌ی قرار دادند و دریافتند که تمامی سه نمونه در نهایت با گسیخته شدن بیرونی‌ترین آرماتورها دچار شکست شدند، در حالی که بتن در ناحیه‌ی فشاری خرد و به شدت در نزدیکی پایه‌ی دیوار دچار تورق شده بود. همچنین نمونه‌ی دارای گشودگی منظم، شکل‌پذیرتر از سایر نمونه‌ها بوده است.^[۶] موهان^۴ و همکاران (۲۰۱۷)، شش ساختمان H، L و T شکل با گشودگی منظم و نامنظم برای هر کدام را در نرم‌افزار ایتبس تحت بار زلزله بررسی کردند و دریافتند که برای هر سه نوع ساختمان، دیوار برشی با گشودگی نامنظم، رفتار مناسب‌تری نسبت به دیوار برشی با گشودگی منظم داشته است.^[۷] روشن^۵ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی سه ساختمان ۳۰ طبقه دارای دیوار برشی بدون گشودگی، با گشودگی منظم و با گشودگی نامنظم پرداختند و دریافتند که وجود گشودگی در دیوار برشی، باعث کاهش سختی و مقاومت شده است. همچنین جابه‌جایی و تغییرمکان نسبی دیوار برشی دارای گشودگی نامنظم نسبت به گشودگی منظم کمتر بوده است.^[۸]

با افزایش شهرنشینی، نیاز روزافزون به ساختمان‌های بلندمرتبه بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ساختمان‌های بلندمرتبه، کارآمدی در برابر نیروهای زلزله و باد است. از این رو سازه‌های بلندمرتبه باید سختی کافی به منظور تحمل نیروهای مذکور داشته باشند. یکی از راهکارهای پایداری سازه‌ها در مقابل نیروهای زلزله و باد، دیوار برشی است. تاکنون مطالعات گسترده‌ی بر روی رفتار و ظرفیت جانبی دیوارهای برشی بتن مسلح دارای گشودگی انجام شده است. موسوراکا^۱ (۲۰۱۲) و^[۳-۱] (۲۰۱۳)، مطالعات گسترده‌ی بر روی دیوارهای برشی بتنی با گشودگی‌های منظم و نامنظم انجام داده و دریافتند که زاویه‌ی قرارگیری گشودگی‌ها در دیوار برشی بتنی از عوامل تأثیرگذار در ظرفیت باربری نمونه‌هاست. خاتمی و همکاران (۲۰۱۲)، در بررسی سه نمونه دیوار برشی بدون گشودگی، گشودگی مربعی در مرکز دیوار برشی و گشودگی مربعی در بالای سمت راست دیوار تحت دو زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل دریافتند که مدل دارای گشودگی در مرکز دیوار، بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی ۸٪ کمتر از بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی مربوط به مدلی با گشودگی در سمت راست بوده است. در حالی که برای دیوار برشی کامل، این میزان کاهش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۱۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۹، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59070.3023

شبهه رام^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی ۱۴ سازهی منظم و نامنظم با گشودگی و بدون گشودگی، شامل: سازهی بدون دیوار برشی، دیوار برشی مستطیلی، دیوار برشی L شکل و دیوار برشی جعبه‌یی دریافتند که دیوارهای برشی جعبه‌یی با گشودگی و بدون گشودگی، کارایی مناسب‌تری نسبت به سایر دیوارهای برشی داشته‌اند.^[۹]

آناس^۷ (۲۰۲۱)، با بررسی اثر گشودگی درب و پنجره در دیوار برشی بتنی با تحلیل کسسان خطی در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ به این نتیجه رسید که گشودگی پنجره، تأثیر کمی در سختی جانبی دیوار دارد؛ و اگر نسبت مساحت گشودگی پنجره به مساحت کل دیوار تا ۳٪ باشد، ممکن است تأثیر آن نادیده گرفته شود. همچنین وقتی نسبت ارتفاع به طول دیوار افزایش یافته است، اثر گشودگی کاهش پیدا کرده است.^[۱۰] عرب‌زاده و آگودا (۱۹۹۱)، با بررسی دو نمونه دیوار برشی بتن مسلح با دو ردیف گشودگی به صورت مقیاس شده دریافتند که می‌توان روش‌های موجود برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری دیوارهای با یک ردیف گشودگی را به نمونه‌های با دو ردیف گشودگی گسترش داد.^[۱۱]

علی‌رغم مطالعات گسترده‌یی که بر روی رفتار دیوارهای برشی بتن مسلح دارای گشودگی انجام شده است، همچنان تأثیر برخی از پارامترها شامل موقعیت قرارگیری گشودگی‌ها، گشودگی در پای دیوار و گشودگی‌ها با مساحت متفاوت تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل در دیوارهای برشی با گشودگی نامنظم به روشنی معین نیست و نیاز به مطالعات بیشتری برای دست‌یابی به درک جامعی در مورد نحوه‌ی تغییرات برش پایه، تغییر مکان نسبی، و انرژی جذب شده‌ی نمونه‌ها برای دیوارهای برشی با گشودگی نامنظم است.

۲. طراحی و مدل‌سازی عددی

در بخش حاضر، به اطلاعاتی درباره‌ی رکوردهای زلزله‌ی انتخاب شده، همپایه‌سازی آن‌ها، جزئیات طراحی و مدل‌سازی عددی پرداخته شده است.

۱.۲. رکوردهای زلزله

بانک اطلاعات شتاب‌نگاشت‌ها در دنیا کامل نیست، چرا که زلزله‌ها خیلی دیر اتفاق می‌افتند و بشر نیز مدت زمان زیادی نیست که قادر است رکوردهای زلزله را ثبت کند؛ به همین دلیل تعداد رکوردهایی که در بانک شتاب‌نگاشت‌های دنیا ثبت شده است، بسیار محدود است. لذا نمی‌توان شتاب‌نگاشت‌هایی یافت که دقیقاً مطابق بر پارامترهای مورد نیاز باشند، در نتیجه شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با شتاب مورد نظر هم‌پایه می‌شوند. یکی از نقاط ضعف تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، وابستگی بسیار زیاد تحلیل تاریخچه‌ی زمانی به شتاب‌نگاشت ورودی است و با هر شتاب‌نگاشت، پاسخ متفاوتی به دست می‌آید؛ به همین دلیل است که آیین‌نامه برای انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی مقرر کرده است که بیش از یک شتاب‌نگاشت (دست‌کم سه شتاب‌نگاشت) در محاسبات استفاده شود، تا حتی‌المقدور بتوان به پاسخ‌های دقیق‌تری دست یافت.

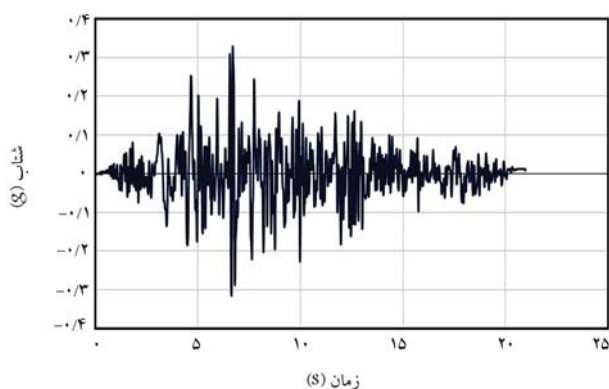
با توجه به اینکه آثار زلزله‌ی نزدیک گسل با افزایش فاصله کاهش پیدا می‌کند، لذا در نظر گرفتن یک دامنه‌ی حد بالا برای فاصله، منطقی به نظر می‌رسد. برای مثال جیانسو و مازولانی^۸ (۲۰۰۱)، محدوده‌ی ۱۵ تا ۳۰ کیلومتری را برای زلزله‌ی نزدیک گسل پیشنهاد کرده‌اند.^[۱۲] با وجود این، UBC۹۷ در جلد دوم، محدوده‌ی ۱۵ کیلومتری را در جدول‌های S-۱۶ و T-۱۶ صفحه‌ی ۳۵ آیین‌نامه پیشنهاد داده

است.^[۱۳] با توجه به مطالعات پیشین، فاصله‌ی ۲۰ کیلومتر می‌تواند حد بالای قابل قبولی برای زلزله‌های نزدیک گسل باشد.

در پژوهش حاضر از سه جفت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل طبس، نورث‌ریج، و کوبه استفاده شده است. زلزله‌ی طبس یکی از بزرگ‌ترین و قدرتمندترین زلزله‌های چند دهه‌ی اخیر ایران و همچنین زلزله‌های کوبه و نورث‌ریج به‌عنوان یک سکوی پرتاب مجدد برای بررسی زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک گسل و مهم‌تر شدن دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌یی بعد از زلزله‌های مذکور، از مهم‌ترین دلایل انتخاب رکوردهای اخیر بوده است. لازم به ذکر است رکوردهای نزدیک و دور از گسل زلزله‌های ذکر شده نیز در بند ۸ با یکدیگر در نمونه‌ی اصلی مقایسه شده‌اند. در ابتدا مطابق با بند ۳.۵.۲ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم صفحه‌ی ۲۲ از سایت PEER، شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های اشاره شده دانلود شده است. هنگامی که شتاب‌نگاشت‌ها توسط شتاب‌نگارها ثبت می‌شوند، دارای مقادیر زیادی نویز هستند و همچنین از سطح مبنا مقداری فاصله دارند، پس فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌ها و اصلاح کردن سطح مبنا آن‌ها، امری ضروری است. این کار با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal در سربگ Baseline Correction and Filter انجام شده است. در این مرحله، شتاب‌نگاشت‌ها وارد برنامه‌ی اکسل شده و مقیاس آن‌ها با ضربی که از تقسیم عدد ۱ بر بیشینه‌ی PGA مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت به دست آمده، انجام شده است. طیف هر زوج شتاب‌نگاشت با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ طبق بند ۲.۵.۳.۳ قسمت ب، صفحه‌ی ۲۳ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم ثبت شده است. مجذور طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت را طبق بند ۳.۳.۵.۲ قسمت پ، صفحه‌ی ۲۳ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم محاسبه و مقایسه‌ی مجذور مربعات زوج شتاب‌نگاشت‌ها با طیف طرح استاندارد انجام شده است. برای هر دوره‌ی تناوب در محدوده‌ی $0.2T$ تا $1.5T$ ، طیف مجذور شتاب‌نگاشت‌ها بیش از ۱۰٪ از $1/3$ برابر طیف طرح استاندارد کمتر نشده است.^[۱۴] مشخصات زلزله‌های انتخابی در جدول ۱ ارائه شده است. رکورد شتاب زلزله‌های استفاده شده در تحلیل، در شکل‌های ۱ الی ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های استفاده شده در تحلیل.

محل وقوع	سال	بیشینه‌ی شتاب زلزله (g)	بزرگا
طبس	۱۳۵۷	۰/۴۰۶	۷/۸
نورث‌ریج	۱۳۷۲	۰/۴۴۷	۶/۷
کوبه	۱۳۷۴	۰/۵۶۸	۶/۸



شکل ۱. رکورد زلزله‌ی طبس.

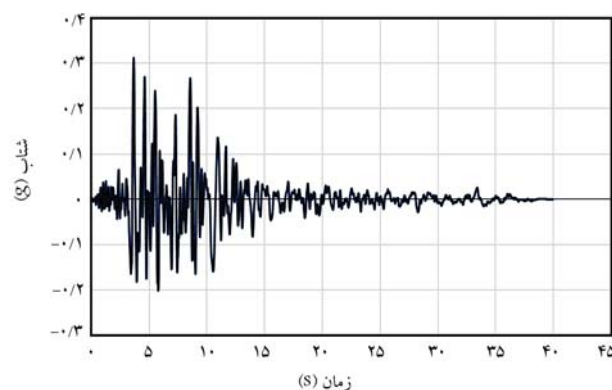
جدول ۲. مشخصات دیوار برشی مدل ۵ طبقه.

طبقه	ضخامت (mm)	ابعاد (mm)	گشودگی	اجزای مرزی
۱	۴۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۵۰۰	۵۰۰ × ۵۰۰
۲	۴۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۵۰۰	۵۰۰ × ۵۰۰
۳	۳۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۴۵۰	۴۵۰ × ۴۵۰
۴	۳۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۴۵۰	۴۵۰ × ۴۵۰
۵	۳۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۴۰۰	۴۰۰ × ۴۰۰

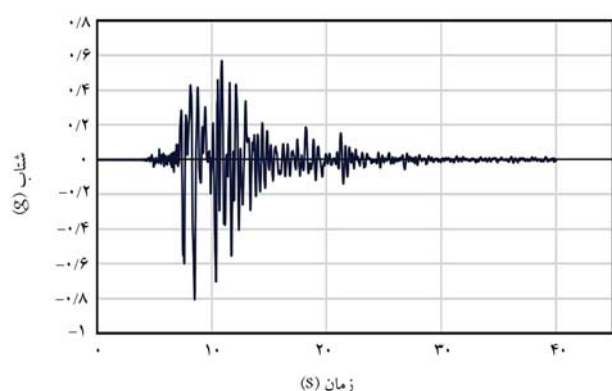
سازه در دو جهت دارای سیستم (قاب خمشی بتن مسلح متوسط و دیوار برشی بتن مسلح ویژه) بوده است. ضریب رفتار سازه برابر با $6/5$ ، ضریب بزرگنمایی تغییرمکان ۵ و ضریب اضافه مقاومت $2/5$ بوده است. برای طراحی سازه‌ها در نرم‌افزار ایتبس از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی استفاده شده است. مطابق با بند ۱۳.۵.۲ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، روش مذکور برای کلیه‌ی سازه‌ها مناسب است. در واقع، روش تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی، محاسبه‌ی لحظه به لحظه‌ی بازتاب‌های ساختمان تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله است. بنابراین در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها باید سعی شود تا حد امکان حرکت واقعی زمین در محل احداث ساختمان شبیه‌سازی شود. آیین‌نامه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ در بند ۳.۵.۲ صفحه‌ی ۲۲، الزامات خاصی را در نظر گرفته است تا هدف مذکور محقق شود.

- دست‌کم سه زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی سه زلزله‌ی مختلف برای انجام تحلیل لازم است.
- شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده باید شرایط زلزله‌ی طرح را ارضاء کنند.
- ساختگاه‌های شتاب‌نگاشت‌ها باید به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی، لرزه‌شناسی، و به خصوص مشخصات لایه‌های خاک با زمین محل ساختمان تا حد امکان مشابهت داشته باشند.

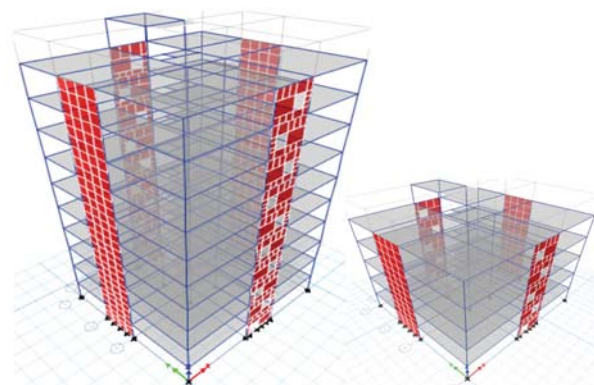
مطابق با بند ۲.۴.۳ صفحه‌ی ۴۴ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، در روش تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان و محاسبات پاسخ مدل ریاضی با فرض رفتار خطی و نسبت میرایی ۵٪ انجام شده است. شتاب‌نگاشت‌های هم‌پایه‌سازی شده در دو جهت عمود بر یکدیگر در امتدادهای اصلی سازه بر آن اثر داده شده است. پس از انجام تحلیل برای زوج شتاب‌نگاشت، مقدار بیشینه‌ی برش پایه، تلاش اعضا و جابه‌جایی نسبی طبقات تعیین و در صورتی که مقدار بیشینه‌ی برش پایه‌ی حاصل از تحلیل (V_i) کمتر از مقدار برش پایه‌ی استاتیکی (V_u) معادل باشد، تلاش‌های اعضا و جابه‌جایی نسبی طبقات باید مجدداً در نسبت $\frac{V_u}{V_i}$ ضرب شوند.^[۱۴] با توجه به اینکه سه زوج شتاب‌نگاشت برای تحلیل در نظر گرفته شده است، تلاش طراحی اعضا و جابه‌جایی نسبی طراحی برابر با بیشینه‌ی مقدار آن‌ها در تحلیل در نظر گرفته شده است. لذا ساختمان‌ها از نظر طراحی لرزه‌ی، محافظه‌کارانه طراحی شده‌اند. مشخصات دیوارهای برشی و اجزاء مرزی برای مدل‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین طول دیوار برشی در هر دو مدل برابر با ۴ متر بوده است. در نهایت، دیوار برشی در دو مدل ۵ و ۱۰ طبقه با مشخصات جدول‌های اخیر، در نرم‌افزار آباکوس^{۱۰} مدل‌سازی شده است.



شکل ۲. رکورد زلزله‌ی نورث ریج.



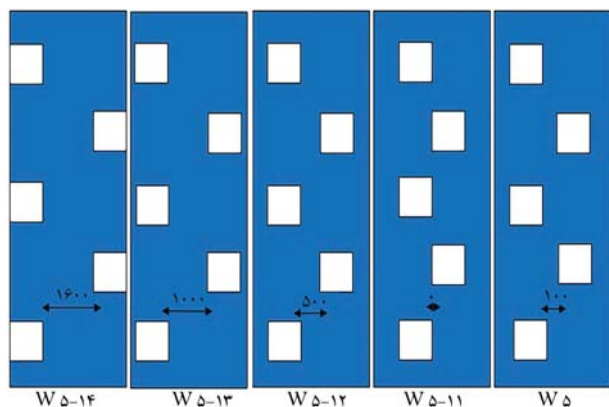
شکل ۳. رکورد زلزله‌ی کوبه.



شکل ۴. طراحی سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار ایتبس.

۲.۲. طراحی سازه در نرم‌افزار ایتبس

نرم‌افزار ایتبس^۹، نرم‌افزاری جهت تحلیل و طراحی سازه‌های ساختمانی است. تمام المان‌های یک ساختمان برای برنامه، شناخته شده هستند. پردازنده‌های طراحی برنامه بسیار کامل و قادر به مدل کردن تمام المان‌های ساختمان هستند. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، در پژوهش حاضر از دو مدل با تعداد طبقات ۵ و ۱۰ استفاده شده است. پلان استفاده شده در مدل‌ها یکسان و به صورت منظم است. سازه‌ها به صورت سه بعدی در نرم‌افزار ایتبس مطابق با شکل ۴ طراحی شده‌اند. فرض شده است که سازه‌های موردنظر در شهری با لرزه‌خیزی خیلی زیاد، مانند تهران تأسیس شده‌اند. ارتفاع طبقات در هر دو مدل $3/2$ متر است. نوع زمین منطقه از نوع II، شتاب مبنای طرح $0/35$ و ضریب اهمیت سازه ۱ بوده است.



شکل ۵. هندسه کلی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس.

وزن سازه) و بررسی مودهای مؤثر، ضرایب آلفا و بتا از روابط رایلی ریتز به دست آمده است (روابط ۱ الی ۴):^[۱۶] قبل از اعمال شتاب زلزله به مدل‌ها، یک تحلیل استاتیکی برای در نظر گرفتن وزن سازه‌ها انجام و سپس شتاب زلزله به مدل‌ها اعمال شده است.

$$C = \alpha [m] + \beta [K] \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} = \frac{\omega_m \omega_n}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -\frac{1}{\omega_n} & \frac{1}{\omega_m} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \xi_m \\ \xi_n \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

$$\xi_m = \xi_n = \xi = 5\%$$

$$\left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \begin{bmatrix} \omega_m \omega_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

۳. فاصله‌ی افقی دو گشودگی نسبت به یکدیگر

وجود گشودگی در دیوارهای برشی بتن مسلح باعث ایجاد ناپوستگی در میلگردگذاری می‌شود که همین امر باعث ایجاد تمرکز تنش در نواحی اطراف گشودگی و ایجاد ترک‌های زودرس می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده این‌طور به نظر می‌رسد که فاصله‌ی افقی دو گشودگی از یکدیگر پارامتری تأثیرگذار است. به همین منظور، ۵ نمونه مطابق با شکل ۵ با نسبت متفاوت فاصله‌ی افقی دو گشودگی به طول دیوار برشی در مدل‌های ۵ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مشخصات نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. W۵ مدل اصلی در نمونه‌ی ۵ طبقه و W۱۰ مدل اصلی در نمونه‌ی ۱۰ طبقه است. لازم به ذکر است برای نشان دادن هندسه‌ی کلی دیوارها در نوشتار حاضر، مانند شکل ۵، با توجه به یکسان بودن هندسه‌ی گشودگی‌ها در مدل‌های ۵ و ۱۰ طبقه و عدم تکرار شکل‌ها، فقط از مدل ۵ طبقه استفاده شده است.

۱.۳. مدل ۵ طبقه

مطابق با شکل‌های ۶ الی ۸، پارامتر فاصله‌ی افقی دو گشودگی از یکدیگر با توجه به بحرانی بودن نواحی قطری میان دو گشودگی، در برش پایه، تغییر مکان نسبی و انرژی جذب شده‌ی مدل ۵ طبقه تأثیرگذار بوده و با دور شدن گشودگی‌ها از یکدیگر افزایش پیدا کرده‌اند. در نمونه‌ی W۵-۱۴، با نسبت فاصله‌ی افقی دو گشودگی به طول دیوار

جدول ۳. مشخصات دیوار برشی مدل ۱۰ طبقه.

طبقه	ضخامت (mm)	ابعاد (mm)	گشودگی	اجزای مرزی
۱	۵۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۶۵۰ × ۶۵۰
۲	۵۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۶۵۰ × ۶۵۰
۳	۴۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۶۰۰ × ۶۰۰
۴	۴۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۶۰۰ × ۶۰۰
۵	۴۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۵۵۰ × ۵۵۰
۶	۴۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۵۵۰ × ۵۵۰
۷	۳۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۵۰۰ × ۵۰۰
۸	۳۵۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۵۰۰ × ۵۰۰
۹	۳۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۴۵۰ × ۴۵۰
۱۰	۳۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	۴۵۰ × ۴۵۰

جدول ۴. مشخصات بتن مصرفی.

مدول کشسانی (kN/mm^2)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
۲۸	۳۰

جدول ۵. مشخصات میلگرد مصرفی.

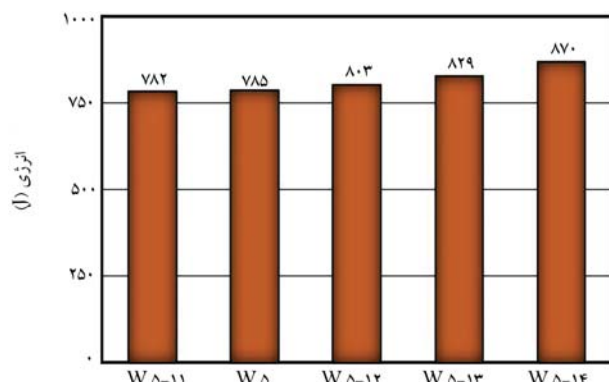
مدول کشسانی (kN/mm^2)	مقاومت تسلیم متوسط (MPa)
۲۰۰	۶۰۰

۳.۲. مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی دیوارهای برشی با گشودگی نامنتظم از نرم‌افزار آباکوس نسخه‌ی ۱۶/۰ استفاده شده است. برای تعیین مدل رفتاری مواد از مدل خسارت خمیری لوبلیتر^{۱۱} و همکاران (۱۹۸۹) استفاده شده است که در ادامه معرفی شده است. سطح تسلیمی معرفی شده در مدل خسارت خمیری لوبلیتر، آثار کاهش سختی را در هر دو حالت ارتجاعی و خمیری به درستی اعمال کرده و تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است. عملکرد اصلی روش مذکور، گسیختگی حاکم بر خردشدگی بتن در فشار و ترک‌خوردگی آن در کشش است. به‌طور کلی می‌توان مشخصه‌های مدل‌های مبتنی بر مدل خسارت خمیری را به این شرح بیان کرد:^[۱۵]

- معرفی یک معیار تسلیم برای شروع تغییر شکل‌های خمیری؛
- معرفی قانون سخت‌شدگی و نرم‌شدگی برای تکامل وضعیت سطح تسلیم؛
- معرفی قانون جریان برای تعیین نمو کرنش خمیری؛
- معرفی پارامتر خسارت برای تعیین وضعیت آسیب‌دیدگی المان بتن مسلح.

مشخصات مصالح (بتن و میلگرد) در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در این تحقیق از تکنیک مش‌بندی Structured استفاده شده است. این تکنیک با استفاده از Mesh Topology های از پیش تعریف شده، مش ایجاد می‌کند. مدل‌سازی آرماتورها با استفاده از المان‌های تیر دوگره‌یی مرتبه‌ی اول B۳۱ و مدل‌سازی بتن با استفاده از المان‌های سه‌بعدی محیط پیوسته‌ی C۳D۸R انجام شده است. المان C۳D۸R، هشت گره و در هر گره، سه درجه آزادی انتقالی دارد و حرف R در نام‌گذاری المان، نشان‌دهنده‌ی استفاده از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته برای افزایش سرعت تحلیل است. تحلیل موردنظر دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی است. لذا برای به‌دست آوردن ماتریس میرایی، ابتدا با تحلیل بسامدی (تحلیل ناشی از



شکل ۸. نمودار بیشینه انرژی جذب شده در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

شده‌ی دیوار نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین در شکل ۹، مقدار تنش شکل‌گرفته در نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش فاصله‌ی افقی دو گشودگی و هنگامی که گشودگی‌ها در لبه‌ی دیوار قرار داشته‌اند، تنش در نواحی قطری میان دو گشودگی و نواحی کناری گشودگی به علت از بین رفتن نواحی مرزی افزایش پیدا کرده است. همچنین در نمونه‌ی W5-12، با طول پایه‌ی دیوار کناری برابر با دیوار میانی گشودگی برش پایه نسبت به نمونه‌ی اصلی (W5) افزایش پیدا کرده و تغییرمکان نسبی ثابت مانده است. همچنین توزیع تنش نیز تغییر چندانی نداشته است.

۲.۳. مدل ۱۰ طبقه

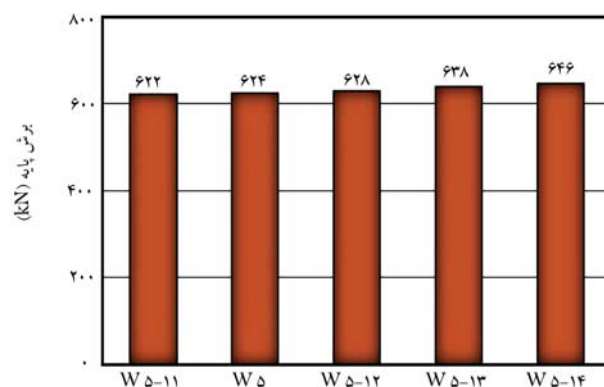
همان‌طور که در نمودار بیشینه‌ی برش پایه در شکل ۱۰ و تغییرمکان نسبی در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، برخلاف مدل ۵ طبقه که با نزدیک شدن گشودگی به لبه‌ی دیوار، برش پایه دیوار تغییر چندانی نکرده است، در مدل ۱۰ طبقه با افزایش نسبت فاصله‌ی افقی دو گشودگی به طول دیوار، برش پایه در نمونه‌های W10-12 و W10-13 نسبت به نمونه‌ی W10-11 افزایش بیشتری داشته است. این روند افزایشی در نمونه‌ی W10-14 با گشودگی در لبه‌ی کناری دیوار به ۱۸/۵٪ رسیده است. همچنین تغییرمکان نسبی ۱۴٪ و انرژی جذب شده نیز مطابق شکل ۱۲، ۱۵/۹٪ نسبت به نمونه‌ی اصلی افزایش داشته است. با توجه به شکل ۱۳ که در آن تنش شکل‌گرفته در نمونه‌ها مشاهده می‌شود، با حرکت گشودگی به سمت لبه‌ی دیوار همانند مدل ۵ طبقه، تنش در نواحی قطری میان دو گشودگی و نواحی کناری گشودگی به علت از بین رفتن نواحی مرزی افزایش پیدا کرده است. برش پایه در نمونه‌ی W10-12 که طول پایه‌ی دیوار قسمت کناری گشودگی برابر با قسمت میانی آن بوده است، نسبت به نمونه‌ی W10، ۴/۲٪ افزایش داشته است، در حالی که تغییرمکان نسبی ثابت مانده است. همچنین تنش شکل‌گرفته نیز نسبت به نمونه‌ی اصلی (W10) تغییر چندانی نکرده است. با توجه به مطالب گفته شده‌ی اخیر، با افزایش تعداد طبقات، تغییر فاصله‌ی افقی دو گشودگی، تأثیر بیشتری در نمونه‌ها داشته است.

۴. اثر گشودگی در پای دیوار

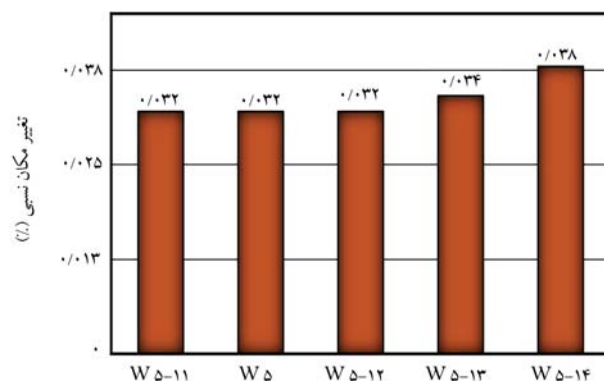
گاهی به دلیل وجود فضای پارکینگ در ساختمان به ناچار گشودگی‌هایی در قسمت تحتانی دیوار ایجاد می‌شود که ممکن است به دلیل تحت فشار بودن دیوار در قسمت‌های تحتانی، تأثیر آن بحرانی‌تر از حالتی باشد که گشودگی در سایر نقاط دیوار قرار می‌گیرد. در دیوارهای مذکور، نمونه‌ی دارای گشودگی در پای دیوار، نمونه‌ی دیگر

جدول ۶. مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

مدل	نسبت فاصله‌ی افقی دو گشودگی به طول دیوار	ابعاد گشودگی (mm)
W5	۰/۰۲۵	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W10		
W5-11	۰	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W10-11		
W5-12	۰/۱۳۷	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W10-12		
W5-13	۰/۲۵	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W10-13		
W5-14	۰/۴	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W10-14		

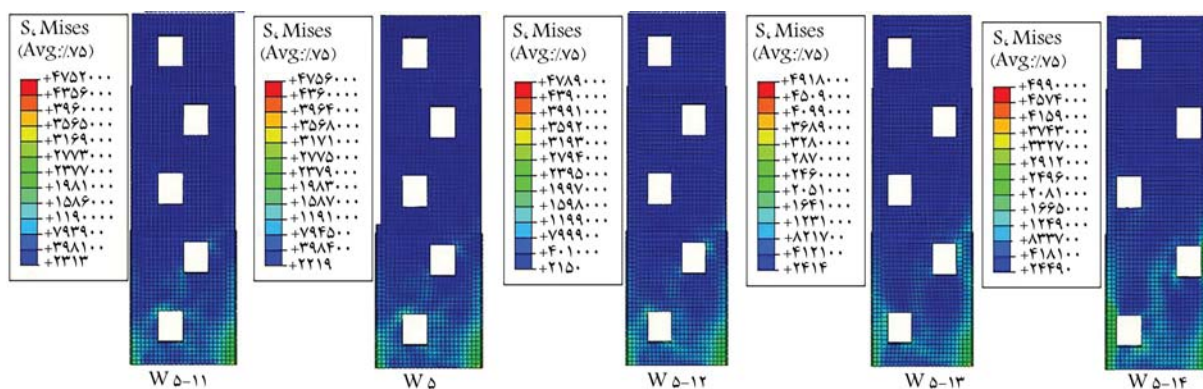


شکل ۶. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



شکل ۷. نمودار تغییرمکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

برشی برابر ۰/۴ با گشودگی در لبه‌ی دیوار، برش پایه‌ی ۳/۵٪، تغییرمکان نسبی ۱۸/۷٪ و انرژی جذب شده‌ی ۱۰/۸٪ نسبت به نمونه‌ی W5-11 که فاصله‌ی افقی دو گشودگی برابر با صفر است، افزایش داشته است. افزایش انرژی جذب شده صحنه بر این نکته می‌گذارد که انرژی جذب شده رابطه‌ی مستقیمی با مساحت زیر نمودار نیرو - تغییرمکان داشته و با افزایش پارامتر برش پایه و تغییرمکان، انرژی جذب



شکل ۹. توزیع تنش شکل گرفته در نمونه‌ها.

فاقد گشودگی در طبقه‌ی اول، و نمونه‌های اصلی (W₅ و W₁₀) دارای گشودگی با فاصله‌ی ۱ متر از پای دیوار بوده‌اند. ابعاد گشودگی‌ها در هر سه حالت به نحوی تعبیه شده است که مجموع مساحت آن‌ها با یکدیگر برابر باشد. نمونه‌های طراحی شده برای بررسی اثر گشودگی در پای دیوار در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود.

۱.۴. مدل ۵ طبقه

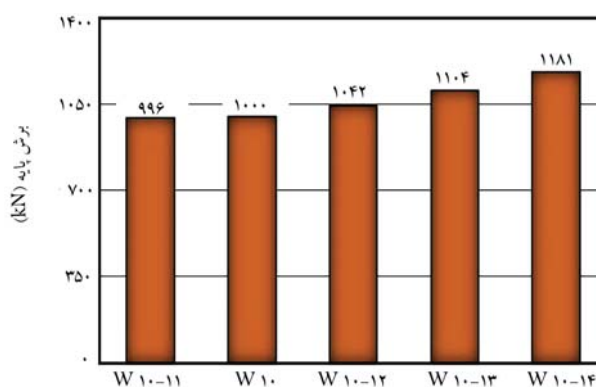
با توجه به شکل ۱۵، نمونه با گشودگی در پای دیوار (W₅-۲۱)، نسبت به نمونه‌ی اصلی دچار ۸/۱۰٪ کاهش در برش پایه شده است. کاهش در برش پایه می‌تواند به این علت باشد که با قرار گرفتن گشودگی در پای دیوار، بتن کمتری از دیوار تحت فشار قرار گرفته است، لذا برش پایه‌ی نمونه W₅-۲۱ با کاهش همراه بوده است. مطابق با شکل ۱۶، تغییرمکان نسبی نمونه با گشودگی در پای دیوار تفاوتی نسبت به نمونه با فاصله‌ی گشودگی ۱ متر از پای دیوار نداشته است. با حذف گشودگی در طبقه‌ی اول، برش پایه نسبت به نمونه‌ی اصلی، ۳/۴٪ افزایش و تغییرمکان نسبی ۴/۹٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین در شکل ۱۷، نمودار برش پایه - زمان نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

۲.۴. مدل ۱۰ طبقه

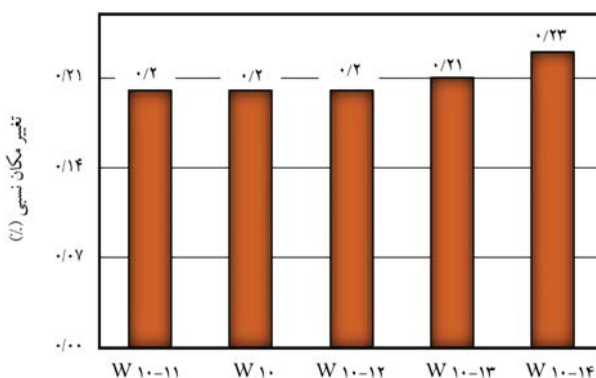
مطابق با شکل ۱۸، نمونه با گشودگی در پای دیوار (W₁₀-۲۱)، ۳۵٪ کاهش در برش پایه نسبت به نمونه‌ی اصلی نشان می‌دهد. کاهش مذکور در برش پایه، تقریباً سه برابر کاهش برش پایه در مدل ۵ طبقه است. که می‌تواند به این دلیل باشد که در دیوار ۱۰ طبقه، قسمت تحتانی دیوار نسبت به مدل ۵ طبقه بیشتر تحت فشار بوده و ایجاد گشودگی در قسمت مذکور به مراتب تأثیر بیشتری داشته است که نشان از بحرانی بودن گشودگی در پای دیوار است. همچنین برش پایه در نمونه‌ی بدون گشودگی در طبقه‌ی اول (W₁₀-۲۲)، تغییر چندانی نسبت به نمونه با فاصله‌ی گشودگی ۱ متر از پای دیوار (W₁₀) نداشته است. در شکل ۱۹، نمودار تغییرمکان نسبی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مطابق آن، هر سه نمونه در مدل ۱۰ طبقه، تقریباً مقدار یکسانی از تغییرمکان نسبی داشته‌اند. همچنین در شکل ۲۰، نمودار برش پایه - زمان نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

۵. تغییر عرض گشودگی

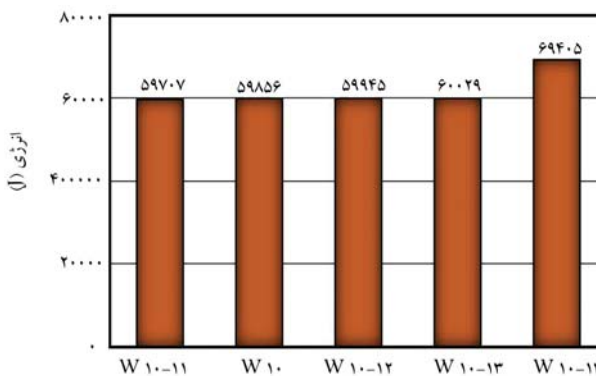
پارامتر مورد بررسی در بخش حاضر، بررسی اثر تغییر عرض گشودگی است. به همین



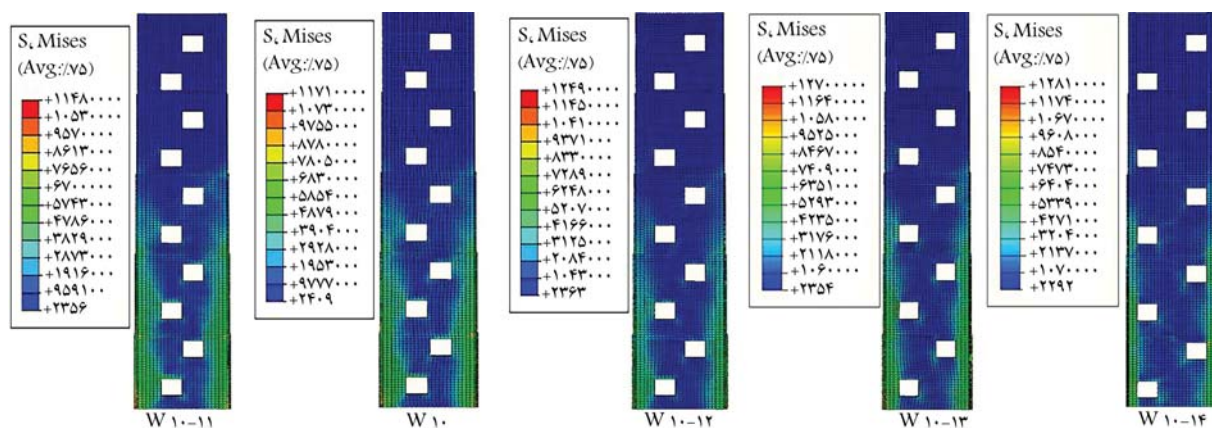
شکل ۱۰. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



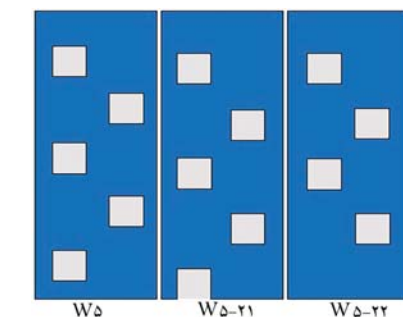
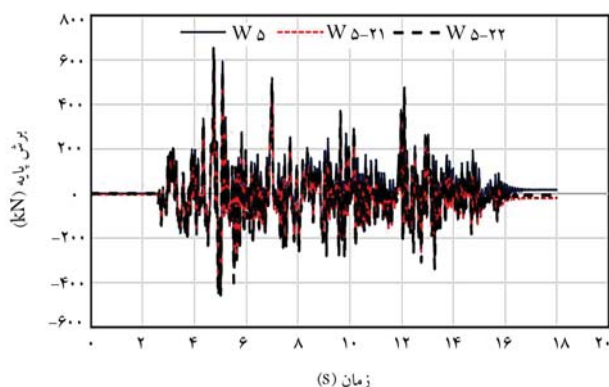
شکل ۱۱. نمودار تغییرمکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



شکل ۱۲. نمودار بیشینه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

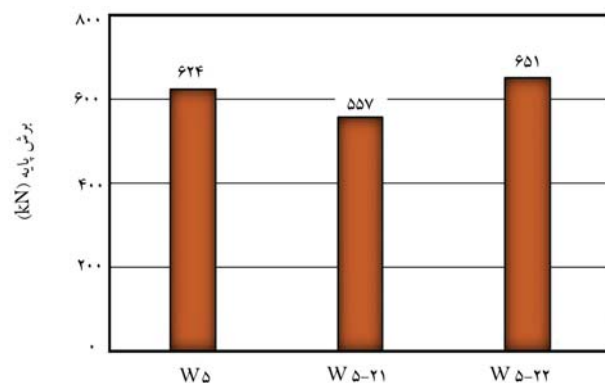
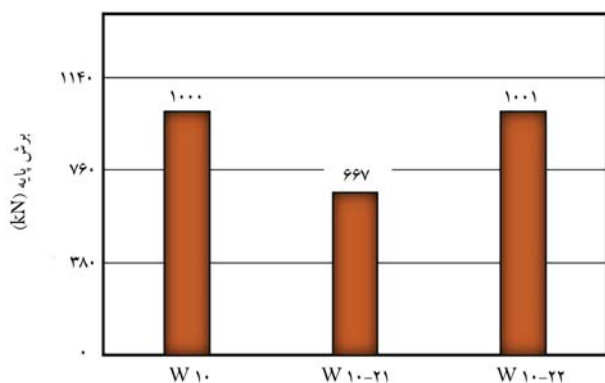


شکل ۱۳. توزیع تنش شکل گرفته در نمونه‌ها.



شکل ۱۴. هندسه کلی نمونه‌ها در نرم افزار آباکوس.

شکل ۱۷. نمودار برش پایه - زمان در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



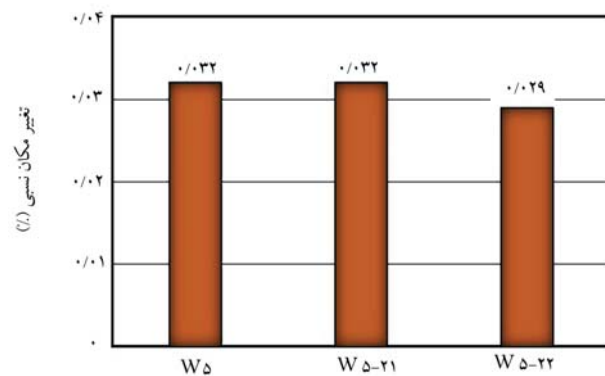
شکل ۱۵. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

شکل ۱۸. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

منظور ۶ نمونه با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار برشی متفاوت در مدل‌های ۵ و ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین هندسه‌ی در نظر گرفته شده برای آن‌ها در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود.

۱.۵. مدل ۵ طبقه

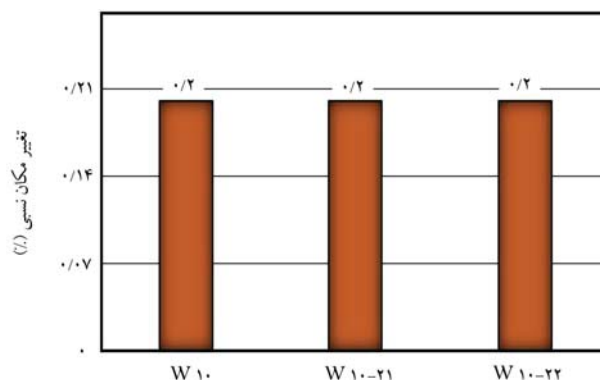
با توجه به شکل ۲۲، با افزایش عرض و به پیروی از آن مساحت گشودگی، برش پایه‌ی سیستم کاهش پیدا کرده است. در مقایسه‌ی مدل W5 که نمونه‌ی بی با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار برابر با ۳/۰ است، با کاهش ۵۰ درصدی در نسبت اخیر، برش پایه در نمونه‌ی W5-31، ۶/۷٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش



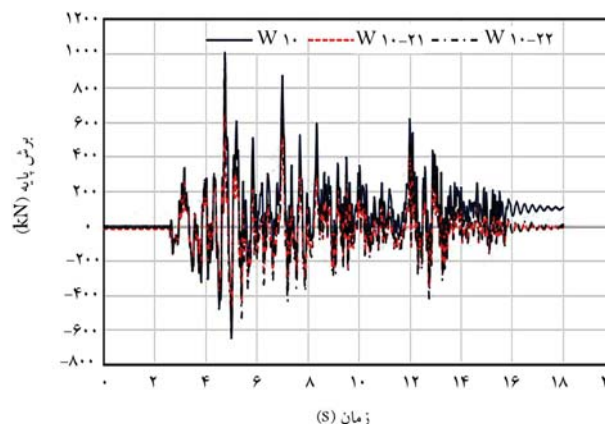
شکل ۱۶. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

جدول ۷. مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

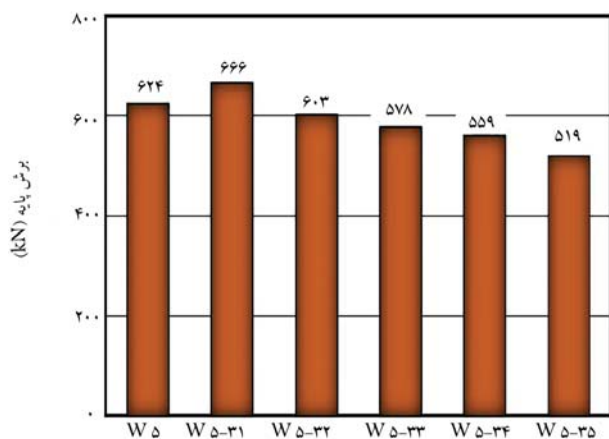
مدل	نسبت عرض به طول دیوار	ابعاد (mm)	گشودگی
W5 W10	۰/۳	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰	
W5-۳۱ W10-۳۱	۰/۱۵	۱۴۵۰ × ۶۰۰	
W5-۳۲ W10-۳۲	۰/۳۷	۱۴۵۰ × ۱۵۰۰	
W5-۳۳ W10-۳۳	۰/۴۵	۱۴۵۰ × ۱۸۰۰	
W5-۳۴ W10-۳۴	۰/۵	۱۴۵۰ × ۲۰۰۰	
W5-۳۵ W10-۳۵	۰/۶۶	۱۴۵۰ × ۲۶۵۰	



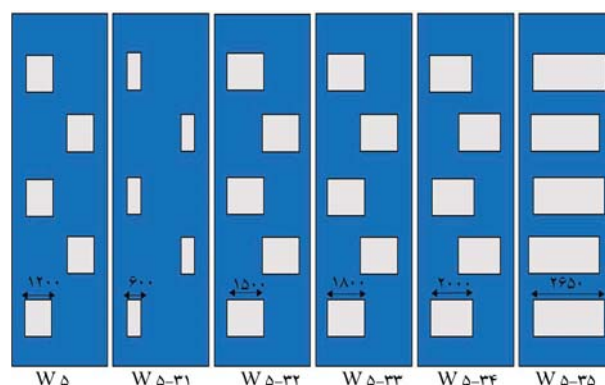
شکل ۱۹. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



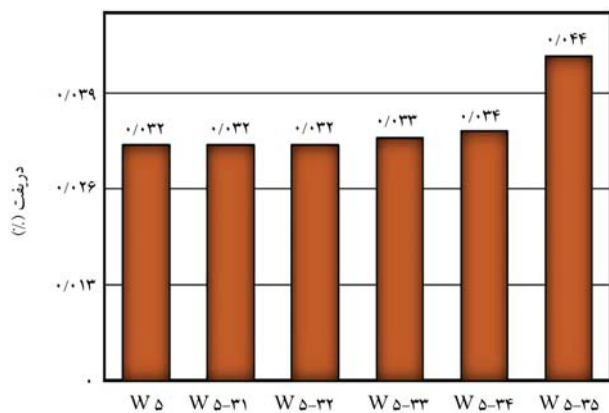
شکل ۲۰. نمودار برش پایه - زمان در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



شکل ۲۲. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



شکل ۲۱. هندسه‌ی کلی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس.

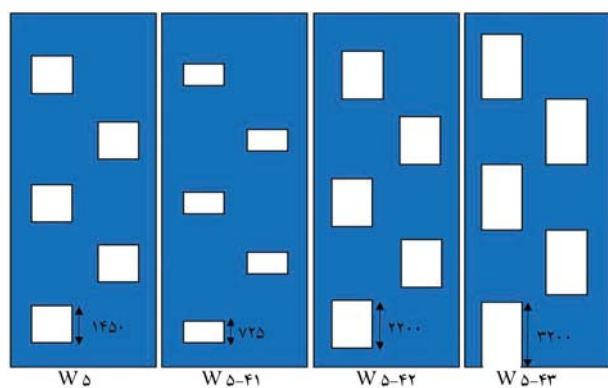


شکل ۲۳. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

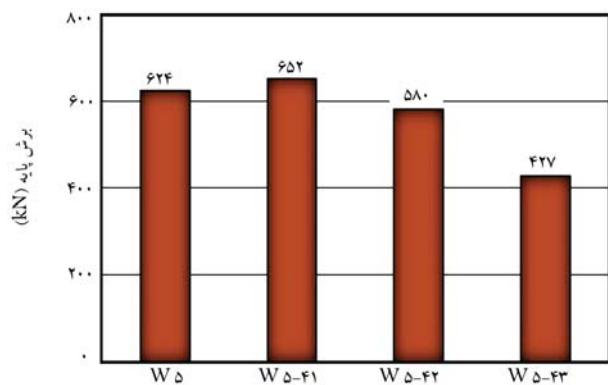
۵ درصدی نسبت عرض گشودگی به طول دیوار، برش پایه ۷/۴٪ کاهش داشته است. برش پایه در نمونه‌ی W5-۳۵ با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار برشی برابر ۰/۶۶ که دارای مقدار بیشینه بین نمونه‌ها بوده و عرض گشودگی تا ناحیه‌ی مرزی دیوار کشیده شده است، برش پایه‌ی سیستم نسبت به نمونه‌ی W5، ۱۶/۹٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۳، تغییر مکان نسبی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مطابق آن، تغییر مکان نسبی در سه نمونه‌ی W5-۳۱، W5-۳۲ و W5-۳۳ با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار برابر با ۰/۳، ۰/۱۵ و ۰/۳۷ با یکدیگر برابر بوده است. به عبارت دیگر، تغییر مکان نسبی در سه نمونه‌ی مذکور با افزایش عرض گشودگی تغییری نکرده است. همچنین در نمونه‌ی W5-۳۵ با بیشترین عرض گشودگی نسبت به نمونه‌ی W5، نمودار تغییر مکان نسبی ۳۷/۵٪ افزایش را نشان می‌دهد.

جدول ۸. مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

مدل	گشودگی	
	نسبت ارتفاع به ارتفاع دیوار	ابعاد (mm)
W۵ W۱۰	۰/۴۵	۱۴۵۰ × ۱۲۰۰
W۵-۴۱ W۱۰-۴۱	۰/۲۲	۷۲۵ × ۱۲۰۰
W۵-۴۲ W۱۰-۴۲	۰/۶۹	۲۲۰۰ × ۱۲۰۰
W۵-۴۳ W۱۰-۴۳	۱	۳۲۰۰ × ۱۲۰۰



شکل ۲۶. هندسه کلی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس.

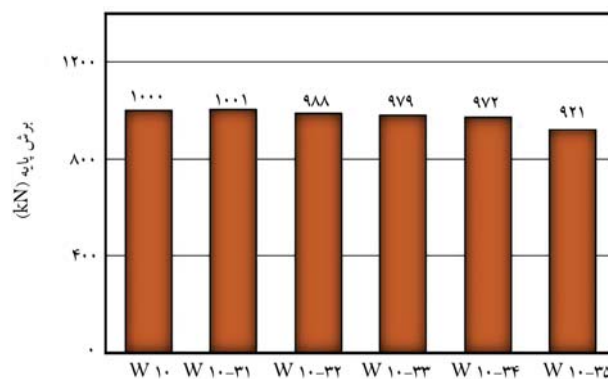


شکل ۲۷. نمودار بیشینه برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

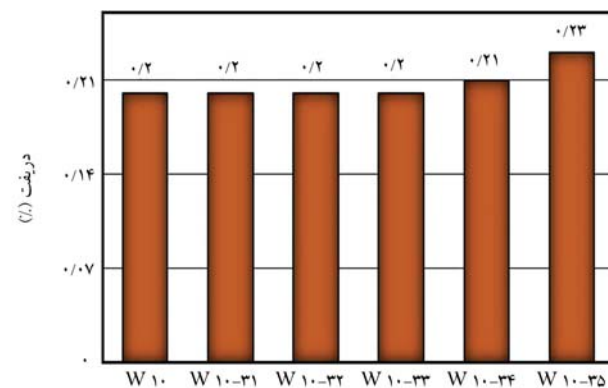
در جدول ۸ ارائه شده است و هندسه کلی آن‌ها در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود.

۱.۶. مدل ۵ طبقه

با توجه به شکل ۲۷، با افزایش ارتفاع گشودگی، کاهش برش پایه در نمونه‌ها اتفاق افتاده است. مدل W۵-۴۱ با نسبت ارتفاع گشودگی به ارتفاع طبقه مساوی با ۰/۲۲، نسبت به نمونه W۵ با ارتفاع گشودگی به ارتفاع طبقه مساوی با ۰/۴۵، ۴/۴٪ افزایش در برش پایه داشته است. همچنین در مدل W۵-۴۲



شکل ۲۴. نمودار بیشینه برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



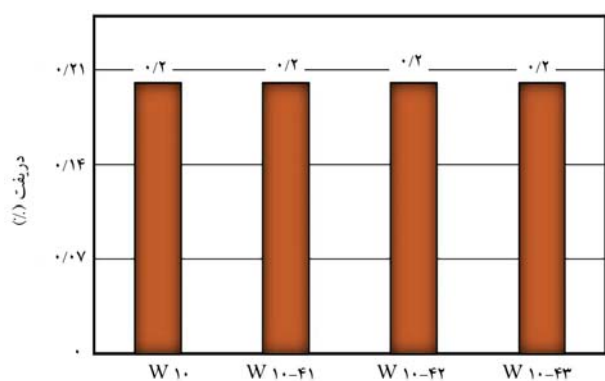
شکل ۲۵. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

۲.۵. مدل ۱۰ طبقه

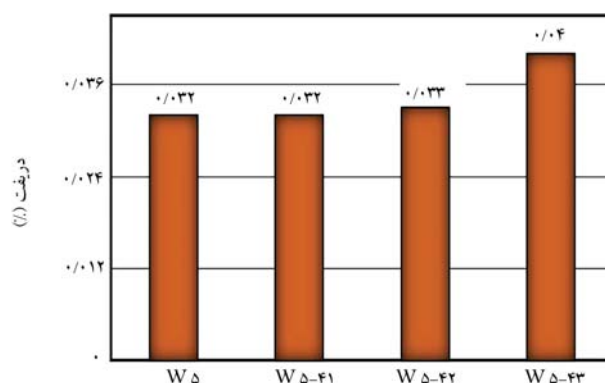
با توجه به شکل ۲۴ که بیشینه برش پایه را نشان می‌دهد، با افزایش عرض گشودگی، برش پایه‌ی سیستم کاهش پیدا کرده است. در مقایسه، مدل W۱۰ با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار ۰/۳، با نمونه W۱۰-۳۱ علی‌رغم کاهش ۵٪ درصدی در نسبت اخیر، برش پایه تفاوت چندانی نکرده است. همچنین با افزایش ۵٪ درصدی نسبت عرض گشودگی به طول دیوار، برش پایه ۲/۱٪ کاهش داشته است. در نمونه W۱۰-۳۵ با نسبت عرض گشودگی به طول دیوار برشی بیشینه ۰/۶۶، برش پایه‌ی سیستم نسبت به نمونه W۱۰، برخلاف مدل ۵ طبقه که ۱۶/۹٪ اختلاف با یکدیگر داشتند، ۷/۹٪ اختلاف را نشان داده است. به‌طور کلی در این قسمت مشخص شد که در دیوار برشی با گشودگی نامنظم در مدل ۱۰ طبقه، پارامترهای در نظر گرفته شده با تغییر عرض گشودگی نسبت به مدل ۵ طبقه کمتر دچار تغییر شده‌اند. در شکل ۲۵، تغییر مکان نسبی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن، در نمونه با بیشترین عرض گشودگی، تغییر مکان نسبی نسبت به نمونه اصلی، ۱۵٪ افزایش داشته است. در حالی که تغییر مکان نسبی در سایر نمونه‌ها با افزایش عرض گشودگی تغییر چندانی نکرده است.

۶. تغییر ارتفاع گشودگی

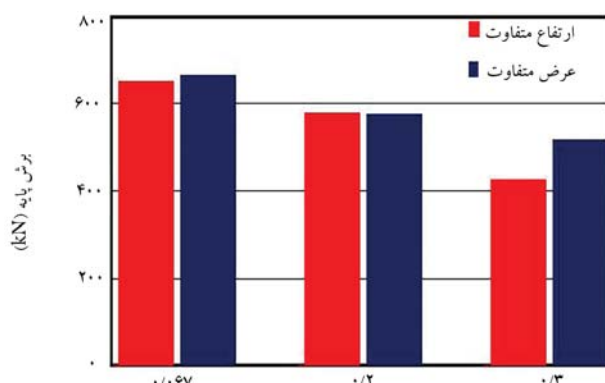
پارامتر مورد بررسی در بخش حاضر، تغییر نسبت ارتفاع گشودگی به ارتفاع دیوار طبقه است. به همین منظور، چهار نمونه با نسبت متفاوت ارتفاع گشودگی به ارتفاع دیوار طبقه در مدل‌های ۵ و ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. مشخصات نمونه‌ها



شکل ۳۰. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

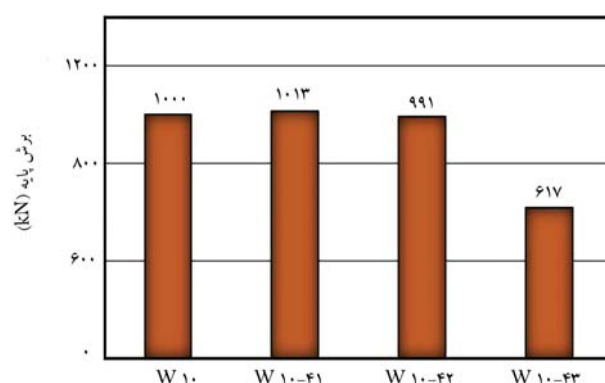


شکل ۲۸. نمودار تغییر مکان نسبی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.



نسبت مساحت گشودگی به مساحت دیوار

شکل ۳۱. نمودار برش پایه - نسبت مساحت گشودگی به مساحت طبقه.



شکل ۲۹. نمودار بیشینه‌ی برش پایه در نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

علت بیشتر تحت فشار بودن پای دیوار، ایجاد گشودگی در ناحیه‌ی مذکور تأثیر بیشتری نسبت به مدل ۵ طبقه داشته است. در شکل ۳۰، تغییر مکان نسبی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. برخلاف مدل ۵ طبقه، که نمودار مذکور روند صعودی دارد، در مدل ۱۰ طبقه مقدار تغییر مکان نسبی در تمام نمونه‌ها تقریباً با یکدیگر برابر است.

۷. نمونه‌ها با مساحت یکسان

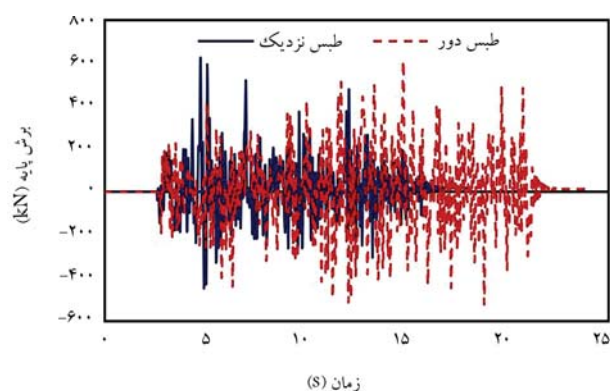
با توجه به تغییر برش پایه‌ی دیوار در اثر متغیرهای ذکر شده‌ی اخیر، در بخش حاضر به بررسی نحوه‌ی تغییرات برش پایه بین نمونه‌های با ارتفاع و عرض متفاوت با مساحت یکسان پرداخته شده است.

۱.۷. مدل ۵ طبقه

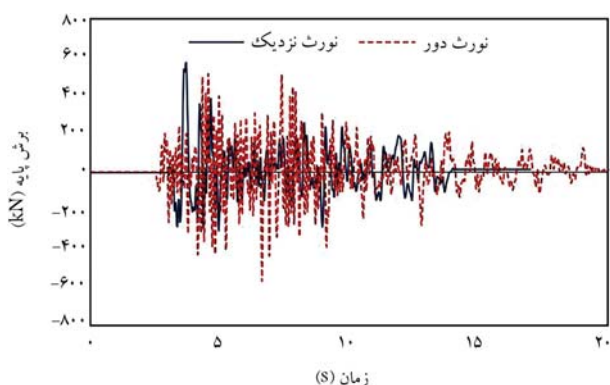
تغییرات برش پایه بر حسب نسبت مساحت گشودگی به مساحت دیوار در نمونه‌های با ارتفاع و عرض متفاوت در شکل ۳۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، با افزایش مساحت گشودگی، برش پایه‌ی سیستم کاهش پیدا کرده است. در گشودگی ۶/۷٪ مساحت طبقه (W5-41 و W5-3) برش پایه‌ی دیوار در نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت، ۲٪ بیشتر از نمونه با عرض گشودگی متفاوت کاهش پیدا کرده است. همچنین در گشودگی ۲٪ مساحت طبقه (W5-42 و W5-33) کاهش برش پایه در دو نمونه یکسان است. این در حالی است که در گشودگی ۳۰٪ مساحت طبقه، کاهش برش پایه‌ی سیستم در نمونه‌ی W5-43 با ارتفاع گشودگی

۲.۶. مدل ۱۰ طبقه

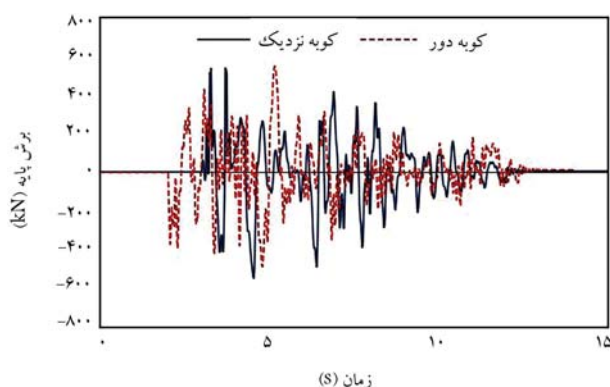
با توجه به شکل ۲۹، برخلاف مدل ۵ طبقه که با افزایش ارتفاع گشودگی برش پایه کاهش چشمگیری پیدا کرده است، در مدل ۱۰ طبقه بین سه نمونه‌ی W10، W10-41 و W10-42 تفاوت چندانی در برش پایه مشاهده نشده است. در مقایسه، نمونه‌ی W10-43 که نسبت ارتفاع گشودگی به ارتفاع طبقه برابر ۱ و نمونه‌ی W10 که نسبت ارتفاع گشودگی به ارتفاع طبقه برابر ۰/۴۵ بوده است، برش پایه‌ی دیوار ۳۸/۳٪ کاهش داشته است. مدل ۱۰ طبقه تا نسبت ارتفاع گشودگی به ارتفاع طبقه برابر با ۰/۶۶، تغییرات کمتری نسبت به دیوار ۵ طبقه داشته است. اما هنگامی که ارتفاع گشودگی برابر با ارتفاع طبقه شده است، به



شکل ۳۳. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور طیس.



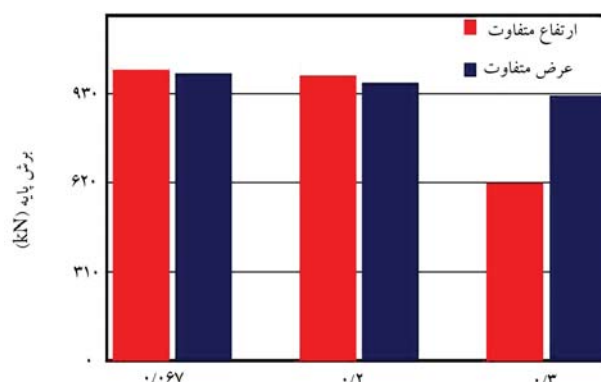
شکل ۳۴. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور نورث ریج.



شکل ۳۵. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور کوبه.

۱.۸. مدل ۵ طبقه

در شکل‌های ۳۳ الی ۳۵، نمودار برش پایه - زمان در مدل ۵ طبقه و شکل‌های ۳۶ الی ۳۸، نمودار برش پایه - زمان در مدل ۱۰ طبقه برای زلزله‌های نزدیک و دور از گسل مشاهده می‌شود. با توجه به خصوصیات رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دور مشاهده می‌شود که زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل در ثانیه‌های ابتدایی، پالس بسیار قدرتمندتری نسبت به زلزله‌های دور از گسل دارند. بیشینه‌ی برش پایه در زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از زلزله‌های دور از گسل بوده است که بیشینه‌ی برش پایه‌ی مذکور در ثانیه‌های ابتدایی نمودار اتفاق افتاده است. همچنین در زلزله‌های دور از گسل، ساختمان مدت زمان بیشتری تحت پالس‌های رکورد قرار گرفته است.



نسبت مساحت گشودگی به مساحت دیوار

شکل ۳۲. نمودار برش پایه - نسبت مساحت گشودگی به مساحت طبقه.

جدول ۹. مشخصات زلزله‌های حوزه‌ی دور از گسل.

محل وقوع	سال	بیشینه‌ی شتاب زلزله (g)	بزرگا
طیس	۱۳۵۷	۰/۱۰۴	۷/۸
نورث ریج	۱۳۷۲	۰/۲۴۲	۶/۷
کوبه	۱۳۷۴	۰/۲۳۸	۶/۸

متفاوت، ۱۸٪ بیشتر از نمونه‌ی W5-۳۵ با عرض گشودگی متفاوت است؛ در حالی که تغییر مکان نسبی دو نمونه تقریباً یکسان است. با توجه به نتایج گفته شده، گشودگی در ۳۰٪ مساحت طبقه که در یکی از مدل‌ها، ارتفاع گشودگی برابر با ارتفاع طبقه شده است، برش پایه در نمونه با عرض گشودگی متفاوت نسبت به نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت کاهش کمتری داشته است.

۲.۷. مدل ۱۰ طبقه

تغییرات برش پایه بر حسب نسبت مساحت گشودگی به مساحت طبقه در نمونه‌های با ارتفاع و عرض گشودگی متفاوت در شکل ۳۲ مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، با افزایش مساحت گشودگی برش پایه سیستم کاهش پیدا کرده است. در گشودگی ۶/۷٪ مساحت طبقه (W10-۴۱ و W10-۳۱) برش پایه‌ی دیوار در نمونه با عرض گشودگی متفاوت، ۱/۳٪ بیشتر از نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت کاهش پیدا کرده است. همچنین در گشودگی ۲۰٪ مساحت طبقه (W10-۴۲ و W10-۳۳) کاهش برش پایه مجدداً در نمونه با عرض گشودگی متفاوت، ۲/۴٪ بیشتر از نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت است. این در حالی است که در گشودگی ۳۰٪ مساحت طبقه، کاهش برش پایه‌ی سیستم در نمونه‌ی W10-۴۳ با ارتفاع گشودگی متفاوت، ۳۳/۱٪ بیشتر از نمونه‌ی W10-۳۵ با عرض گشودگی متفاوت است. با توجه به نتایج گفته شده همانند مدل ۵ طبقه گشودگی در ۳۰٪ مساحت طبقه که در یکی از مدل‌ها، ارتفاع گشودگی برابر با ارتفاع طبقه شده است، در نمونه با عرض گشودگی متفاوت نسبت به نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت برش پایه، کاهش کمتری داشته است.

۸. مقایسه‌ی زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک و دور

در بخش حاضر، به مقایسه‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور در نمونه‌های W10 و W5 پرداخته شده است. مشخصات زلزله‌های حوزه‌ی دور از گسل در جدول ۹ ارائه شده است.

۹. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، برای درک جامعی از رفتار دیوار برشی با گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل، دو ساختمان ۵ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار ایتبس طراحی و دیوارهای برشی در نرم‌افزار آباکوس تحت بار زلزله‌ی طبیس مدل‌سازی و بررسی و نتایج حاصل به صورت جمع‌بندی ارائه شده است:

۱. فاصله‌ی افقی دو گشودگی از یکدیگر پارامتری تأثیرگذار در برش پایه، تغییرمکان نسبی و انرژی جذب شده‌ی دیوار برشی بتن مسلح با گشودگی نامنظم تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل است.

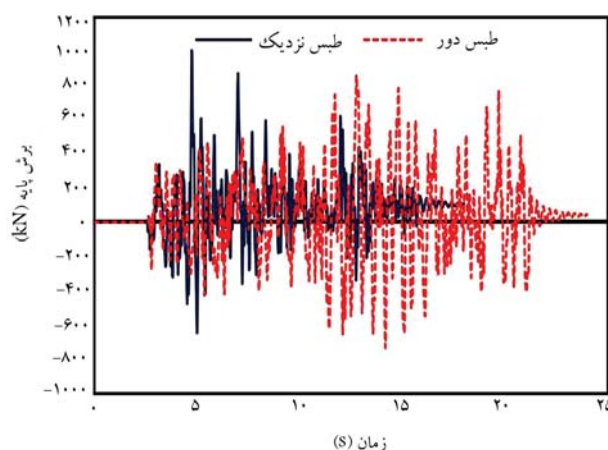
۲. با قرار گرفتن گشودگی در لبه‌ی دیوار در مدل ۵ طبقه، برش پایه برابر با $3/5\%$ و تغییرمکان نسبی برابر با $18/7\%$ افزایش یافته است. همچنین در مدل ۱۰ طبقه، برش پایه، $18/1\%$ و تغییرمکان نسبی، $4/2\%$ افزایش داشته است.

۳. در نمونه با طول پایه‌ی دیوارکنارگشودگی برابر با طول پایه‌ی دیوارمیانی گشودگی، تغییرمکان نسبی نسبت به نمونه‌ی اصلی در هر دو مدل ۵ و ۱۰ طبقه ثابت مانده است، در حالی که برش پایه افزایش پیدا کرده است.

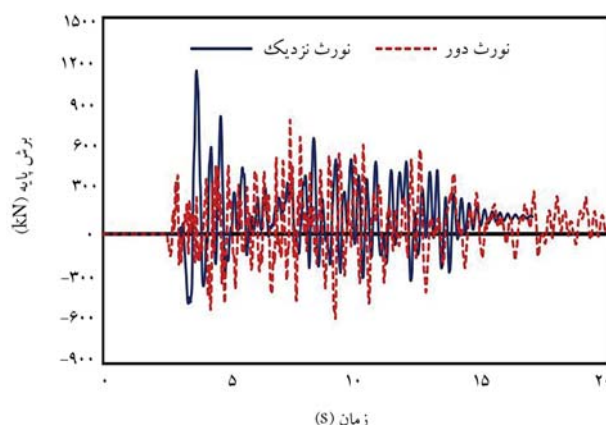
۴. با قرار گرفتن گشودگی در پای دیوار به دلیل از بین رفتن مساحت ناحیه‌ی تحت فشار، مشاهده شده است که در مدل ۵ طبقه، علی‌رغم ثابت بودن تغییرمکان نسبی، مقدار برش پایه برابر با 12% کاهش داشته است؛ در حالی که در نمونه‌ی ۱۰ طبقه با توجه به ثابت بودن تغییرمکان نسبی، 35% کاهش داشته است. حذف گشودگی در طبقه‌ی اول باعث شده است برش پایه در مدل ۵ طبقه، $4/3\%$ افزایش و تغییرمکان نسبی، $9/4\%$ کاهش داشته باشد. همچنین در مدل ۱۰ طبقه، حذف گشودگی از طبقه‌ی اول، تأثیر چندانی در برش پایه و تغییرمکان نسبی نداشته است.

۵. تغییر عرض و ارتفاع گشودگی‌ها، به غیر از مواردی که گشودگی در پای دیوار قرار گرفته است، تأثیر کمتری در برش پایه و تغییرمکان نسبی مدل ۱۰ طبقه نسبت به مدل ۵ طبقه داشته است.

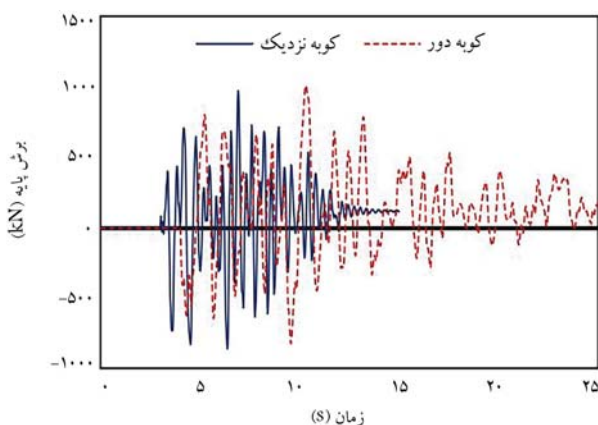
۶. با بررسی سه نسبت متفاوت مساحت گشودگی به مساحت طبقه مشخص شده است که در مدل ۵ طبقه در مساحت‌های $6/7\%$ و 30% ، نمونه‌های با عرض گشودگی متفاوت، برش پایه‌ی بیشتری نسبت به نمونه‌های با ارتفاع گشودگی متفاوت داشته‌اند. همچنین در مساحت 20% ، برش پایه‌ی نمونه‌ها تغییر چندانی نکرده است. در مدل ۱۰ طبقه در مساحت $6/7\%$ و 20% ، نمونه‌های با ارتفاع گشودگی متفاوت، برش پایه‌ی بیشتری نسبت به نمونه‌های با عرض گشودگی متفاوت داشته‌اند. همچنین در مساحت 30% ، برش پایه در نمونه با عرض گشودگی متفاوت، 49% بیشتر از نمونه با ارتفاع گشودگی متفاوت بوده است.



شکل ۳۶. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور طیس.



شکل ۳۷. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور نورث ریج.



شکل ۳۸. نمودار برش پایه - زمان زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور کوبه.

پانویس‌ها

1. Mosoarca

2. Alarcon
3. Li
4. Mohan
5. Roshin

6. Shobha Ram
7. Anas
8. Gioncu & Mazzolani
9. ETABS
10. Abaqus
11. Lubliner

منابع (References)

1. Mosoarca, M. and Stoian, V. "Seismic energy dissipation in structural reinforced concrete walls with staggered opening", *Applied Engineering Science*, **2**(15), pp. 71-78 (2012,b).
2. Mosoarca, M. "Seismic behaviour of reinforced concrete shear walls with regular and staggered opening after the strong earthquakes between 2009 and 2011", *Engineering Failure Analysis* (2013, a).
3. Mosoarca, M. "Failure analysis of RC shear walls with staggered opening under seismic loads", *Engineering Failure Analysis* (2013,b).
4. Khatami, Seyed M., Mortezaei, A. and Barros, R.C. "Comparing effects of openings in concrete shear walls under Near-Fault ground motions", 15th WCEE LIS-BOA (2012).
5. Alarcon, C., Hube, M.A. and de la Liera JC. "Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries", *Engineering Structures*, **73**, pp. 13-23 (2014).
6. Li, B., Pan, Z. and Zhao, Y. "Seismic behaviour of lightly reinforced concrete structural walls with openings", *Institution of Civil Engineers*, 1400428 (2015).
7. Arathi, A.M. "Comparison of RC shear wall with openings in regular and irregular building", *International Journal of Engineering Research and Technology*, ISSN, **06**(06), pp. 2278-0181 (2017).
8. Priya Kale, R.J. "Effects of openings on different shapes of shear wall in RC buildings", *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, **4**(5), ISSN: 2455-2143, pp. 366-370 (2019).
9. Shobha, R., Syed Kaleem, A.Z. and Mohit, M. "Effects of openings on different shapes of shear wall in RC buildings", *COJ Technical and Scientific Research* (2020).
10. Fares, A. "The impact of RC shear wall openings at the lateral stiffness of the cantilever shear walls", *Research on Engineering Structures and Materials*, **7**(1), pp. 51-63 (2021).
11. Aguda, G.O. "Ultimate strength tests for RC coupled walls with openings with two bands of openings", M.S. Thesis, University of Dundee, 459 p. (1991).
12. Gioncu, V. and Mazzolani, F.M. "Earthquake Engineering for Structural Design", Taylor & Francis (2001).
13. Uniform Building Code (Ubc 97), Uniform Code Council (1997).
14. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard No. 2800, 4th edition) (In Persian) (1393).
15. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and et al. "A plastic-damage model for concrete", *Journal of Solids And Structures*, **25**(3), pp. 299-326 (1989).
16. Penzien, C., *Dynamics of Structure*, Computers and Structures inc., 3rd Ed., 752 p. (2003).

بررسی آزمایشگاهی کاربرد ذره‌ی هوشمند در توصیف احتمالاتی دینامیک انتقال رسوب بستر بعد از آستانه

حامد فرهادی (دانشجوی دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

دانشکده‌ی علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مانوسوس والیراکیس (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گلاسکو

عبدالرضا ظهیری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی آب و خاله، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۳۳-۴۰، (پژوهشی)

استفاده از حسگرهای برداشت پارامترهای دینامیک ذره می‌تواند به شناخت بیشتر از دینامیک ذرات در حال انتقال منتج شود. در پژوهش حاضر، از یک ذره‌ی کروی پیش ساخته (با چگالی‌های متفاوت) که با حسگرهای میکروالکترومکانیکال تجهیز شده است (ذره‌ی هوشمند)، برای برداشت داده‌های شتاب، چرخش و جهت ذره، هنگام انتقال در مجاورت بستر تحت جریان آب در فواصل زمانی بسیار کوتاه (0.004 ثانیه در پژوهش حاضر) استفاده شده است. در این راستا، یک سری آزمایش با دبی‌های مختلف که شرایط انتقال ضعیف (نزدیک آستانه) و انتقال قوی (بعد از آستانه با اعداد رینولدز به نسبت بزرگ‌تر) در آن پوشش داده شده است، انجام شده است. انرژی جنبشی ذره به عنوان انرژی تبادل یافته بین ذره با پیرامون (جریان آب، ارتباط ذره با ذرات بستر) بررسی شده است. بررسی میزان دریافت و هدررفت لحظه‌ی انرژی ذره نشان داد که تغییرات تبادل انرژی با افزایش عدد رینولدز ذره به صورت نمایی کاهش می‌یابد. توابع توزیع احتمالاتی حاکم بر انرژی جنبشی ذره تولید و براساس نتایج مشخص شد که تابع توزیع احتمالاتی ویبول در شرایط آستانه و تابع توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال در شرایط انتقال قوی‌تر و تعادلی، رفتار ذره را بهتر توصیف می‌کند.

farhadi.edu@gmail.com;mailto:shsh70@yahoo.com
esmaili@um.ac.ir
manousos.valyrakis@glasgow.ac.uk
zahari.areza@gmail.com

واژگان کلیدی: انتقال رسوب، حرکت تصادفی ذرات بستر، دینامیک انتقال، ذره‌ی هوشمند، حسگر.

۱. مقدمه

چه صورتی منتقل می‌شود، فازهای مختلف انتقال رسوب را در بر می‌گیرد. شروع حرکت ذره، سرآغاز تمام فرایندهای انتقال رسوب است که برای مثال اگر ذره در اندازه‌های کوچک‌تر باشد، می‌تواند به صورت معلق و یا بارشسته و در صورت بزرگ بودن نسبی ذرات تشکیل دهنده، به حالت بار بستر انتقال پیدا کند. بار بستر، بخش مهمی از رسوب انتقالی است که در طول مسیر رودخانه یا هر نوع کانال روباز، با تماس مکرر با سطح بستر، به صورت غلطش، لغزش، یا جهش حرکت می‌کند که منجر به تشکیل یک بار دینامیک^۱ می‌شود. بار بستر از پر اهمیت‌ترین انواع انتقال رسوب است؛ در حالی که علی‌رغم مطالعات متعدد، به دلیل پیچیدگی‌های فیزیکی آن، کمترین دانش از آن در دسترس است.^[۵]

بیش از یک قرن است که روش‌های مطالعه‌ی پدیده‌ی انتقال رسوب، به خصوص بار بستر، برای پاسخ به مسائل پیشامد در طراحی و اجرای سازه‌های هیدرولیکی،

انتقال رسوب باعث تغییرات در سطح سیاره‌ی زمین می‌شود. تغییرات مذکور با کنده شدن (فرسایش) یا جاماندن رسوب‌ها (رسوب‌گذاری)، سبب دگرگونی شکل سطح می‌شوند. تغییر مسیر رودخانه‌ها، جابه‌جایی ماسه‌ها، پوشاندن مراکز جمعیتی زیر توده‌های خاک‌های جابه‌جا شده از جمله مثال‌هایی است که اهمیت پدیده‌ی اخیر را در مقیاس بزرگ مشخص می‌کند. هنگامی که یک ذره‌ی بستر قابل فرسایش در معرض جریان یک سیال نیوتنی قرار می‌گیرد (سیال مذکور می‌تواند آب یا هوا باشد)، ذره‌ی بستر اشاره شده توسط نیروهای جریان می‌تواند شروع به حرکت کند.^[۶-۳] اینکه جریان تا چه مدت توانایی انتقال رسوب (پس از شروع حرکت) را دارد و به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59457.3050

بیشتر به صورت روابط تجربی و نیمه تجربی ارائه شده است. طرح روابط مذکور و تولید فرمول برای انتقال بار بستر با فرض محیط پیوسته و نگرش قطعی به این پدیده بوده است. به دلیل پیچیدگی مسئله، چندان دور از باور نیست که روابط مطرح شده، توانایی توصیف پدیده‌ی انتقال رسوب، مخصوصاً در شرایطی متفاوت از شرایط تولید آن را نداشته باشند.^[۷۶] علاوه بر آن، روابط مذکور، حقیقت تصادفی پدیده‌ی انتقال بار بستر که یک فرایند غیرخطی است، را نادیده گرفته‌اند و یک پدیده‌ی غیرخطی نیاز به محیطی متفاوت از بستر قطعی مکانیک پیوسته برای توصیف دارد. یکی از دلایل اساسی که روابط و توصیف‌های اخیر، نتایج ضعیف ارائه کرده‌اند، این است که فیزیکی را که در روش خود از آن بهره گرفته‌اند، کاملاً اکتشافی^۲ است. برای مثال، تنش برشی میانگین سیال که بر بستر اعمال می‌شود یا سرعت برشی (پارامترهایی که در روابط تجربی کلاسیک استفاده شده‌اند)، عملاً هیچ اطلاعاتی از فیزیک پدیده‌ی انتقال رسوب را در بر ندارند.^[۵] شایان ذکر است که پژوهشگران در قرن بیستم (که عمده‌ی روابط تجربی در مدت زمان مذکور ارائه شده است)، دسترسی به روش‌های اندازه‌گیری و منابع علمی امروز نداشتند و این موضوع قابل قبول است که برای توصیف انتقال رسوب از پارامترهای ماکروسکوپی استفاده شده باشد. در عین حال، با شرایط امروز و در دسترس بودن امکانات آزمایشگاهی و علوم روز، بازگشت به نگرش قطعی و استفاده از پارامترهای ماکروسکوپی روابط تجربی چندان منطقی به نظر نمی‌آید و بد اقبال است که امروزه پژوهشگران از علوم روز به خصوص در زمینه‌ی مکانیک آماری و از ابزارهای اندازه‌گیری که توانمندی رهگیری در مقیاس ذره را دارند، در مطالعه‌ی فیزیک پدیده‌ی انتقال رسوب چشم‌پوشی کنند. ذرات رسوب بستر که در یک جریان آشفته منتقل می‌شوند، حرکات نامنظم و غیرخطی را در نتیجه‌ی نیروهایی که به آن‌ها وارد می‌شود، تجربه می‌کنند. به بیان دیگر، رفتار غیرخطی و تصادفی بودن حرکت بار بستر ناشی از اندرکنش ذره با ذرات دیگر و ذره با سیال است.^[۸]

بنابراین، توصیف حرکت و انتقال ذره‌ی بار بستر در طول مسیر رودخانه، یک مسئله‌ی چالش‌برانگیز است و از آنجا که مباحث کاربردی مبتنی بر آن (مانند فرسایش، طراحی پایه‌ی پل‌ها و آبستگي) نیازمند دانش صحیحی از مشخصات حرکت رسوب در شرایط متفاوت است، اهمیت آن را دوچندان کرده است. با این توضیحات می‌توان به اهمیت استفاده از زبان پدیده‌های تصادفی، یعنی احتمالات، پی برد و از آن برای توصیف انتقال رسوب‌های بار بستر (رسوب‌های کف) استفاده کرد. دستاوردهای علمی و وسایل اندازه‌گیری جدید، این فرصت را به وجود آورده‌اند که حرکت غیرخطی انتقال رسوب، مجدداً ارزیابی شود. وسایل اندازه‌گیری که بتوانند در مقیاس ذره، حرکت رسوب‌ها را رهگیری و مکانیک و دینامیک آن‌ها را بررسی کنند، در دسترس هستند و با توجه به تصادفی بودن حرکت بار بستر، زبان احتمالاتی برای توصیف آن با در نظر گرفتن شرایط مختلف هیدرولیکی می‌تواند نه فقط فیزیک پدیده‌ی مذکور، بلکه پارامترهای دخیل در انتقال رسوب را مشخص کند. پیشرفت علم به خصوص در زمینه‌ی مکانیک‌های ناپیوسته و ریزمقیاس (میکروسکوپی) در کنار روش‌های جدید برای اندازه‌گیری، فرصتی را برای بازگشت و بررسی مجدد مسئله‌ی حرکت رسوب فراهم آورده است، که در پی آن، تمایل جدیدی برای بررسی مجدد حرکت رسوب از دیدگاه تصادفی در بین پژوهشگران ایجاد شده است.

در پژوهش‌هایی که با در نظر گرفتن ذات تصادفی حرکت رسوب انجام شده است، معیارهایی چون تکانه (در مطالعات دیپلاس^۳ و همکاران (۲۰۰۸)،^[۹] سلیک^۴ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۰] و والیراکیس^۵ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] و انرزی (توسط والیراکیس و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۲] برای شروع حرکت معرفی شده‌اند. در این راستا، پژوهش‌های متعددی برای بررسی رفتار تصادفی حرکت ذرات رسوب به صورت بار

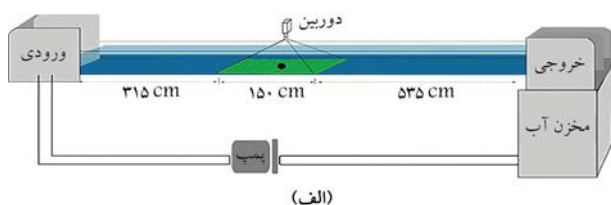
بستر در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شده است (برای مثال، مطالعات رزبری^۶ و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] انسلی و همین^۷ (۲۰۱۴)،^[۱۴] وو و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] و شیم و دووان^۸ (۲۰۱۷) و (۲۰۱۹)،^[۱۶]).

مطالعات رزبری و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] فریبش^۹ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۸] و شیم و دووان (۲۰۱۷)،^[۱۷] تابع توزیع احتمالاتی نمایی را بهترین توصیف برای سرعت حرکت ذره در مسیر جریان اعلام کردند که البته مطالعات اخیر در اعداد رینولدز به نسبت کوچک انجام شده بود. در پژوهش‌های دیگری، همچون مطالعات مارتین و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۳] و انسلی و همین (۲۰۱۴)،^[۱۶] که در اعداد رینولدز به نسبت بالاتر، مطالعات را انجام داده بودند، تابع گوسین (نرمال) برای توصیف سرعت حرکت ذرات در مسیر جریان پیشنهاد شد. بعد از مشاهده‌های متفاوت توسط پژوهشگران، وو^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] در پژوهش خود با افزایش زمان مسافت ذرات بار بستر، جابه‌جایی تابع توزیع انتقال از نمایی به یک تابع گوسین ناقص را مشاهده کردند. مطالعات ایشان، نشان‌دهنده‌ی رفتار متفاوت ذره در شرایط مختلف حاکم بر جریان و نحوه‌ی برداشت داده‌ها در رژیم‌های مختلف انتقال رسوب بوده است. در بررسی حرکت رسوب در شرایط آستانه، سلیک^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۹] تابع توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال و والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] تابع توزیع احتمالاتی ویبول^{۱۲} را به عنوان توصیف‌کننده‌ی تکانه‌های ذرات بار بستر پیشنهاد دادند. دلیل تفاوت نتایج نیز محدودده‌ی مشاهده‌ها بود، به نحوی که در پژوهش سلیک و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۹] بر تمام مشاهده‌های حرکت ذرات نزدیک آستانه (با معیار تکانه) و در پژوهش والیراکیس و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۱] بر حرکت ذرات بعد از آستانه تمرکز شده است.

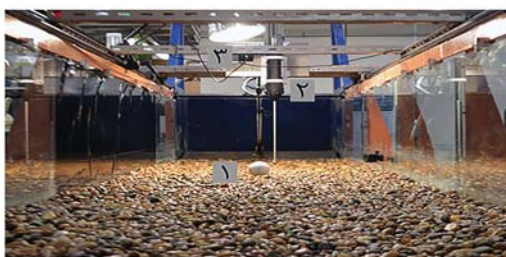
برای برداشت داده‌های دینامیکی ذرات بستر در حین انتقال، می‌توان از حسگرهای دینامیکی (برای مثال شتاب‌سنج و ژيروسکوپ) استفاده کرد. استفاده از ابزار ذکر شده، می‌تواند معایب استفاده از روش‌های دیگر، از جمله برداشت زمانی با فاصله‌های زمانی به نسبت زیاد که بیشتر برای کاربردهای اندازه‌گیری جریان میانگین است، را پوشش دهد. حتی روش‌های ردیابی ذره PTV^{۱۳} نیز قابلیت برداشت داده در ریزمقیاس را ندارد و اصولاً برداشت داده همانند حسگرها که در فواصل زمانی کوتاه انجام می‌شود، ممکن نیست. با توسعه‌ی روش‌های ساخت قطعات الکترونیکی، سیستم میکروالکترومکانیکال (MEMS)^{۱۴}، به عنوان ابزار جدیدی برای اندازه‌گیری در قبال قیمت مناسب محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. قطعات اشاره شده، در اصل یک ماشین مینیاتوری هستند که شامل اجزاء الکترونیکی و مکانیکی هستند. در این قطعات اجزاء مکانیکی (برای مثال، شتاب‌سنج و ژيروسکوپ) و اجزاء الکترونیکی (برای مثال، حافظه‌ی ذخیره و مدار الکتریکی)، به عنوان یک واحد حسگر الکترونیکی کامل، در اندازه‌ی کوچک، ترکیب شده‌اند. با به کارگیری MEMS به همراه یک ذره‌ی ساخته شده، مانند یک ذره‌ی کروی (نماینده‌ی ذرات رسوبی) یا به هر شکل دیگر، مشخصات دینامیکی، هم‌زمان با حرکت و انتقال آن ذره قابل برداشت و اندازه‌گیری خواهد بود. بعضی از پژوهشگران، از حسگرهای MEMS در جهت رهگیری ذرات در هنگام جابه‌جایی بهره گرفته‌اند (آکیلا^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۰] کولارانتا^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۵)،^[۲۱]). هر چند حسگرهای استفاده شده در آزمایش‌های هیدرولیکی در محیط رسوب مطالعه نشده است. آکیلا و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۰] اولین مجموعه‌ی اندازه‌گیری‌های مربوط به حرکت آغازین بار بستر را ارائه کرده‌اند. پژوهش حاضر، بیشتر در رابطه با حسگر استفاده شده و واسنجی آن بوده است. پژوهش فرنک^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۲] اولین کاربرد استفاده از حسگرها در نوسان‌های جریان مربوط به سواحل و اقیانوس و پژوهش هاردینگ (۲۰۱۴)،^[۲۳] تمرکز بر جریان‌های گل‌آلود بوده است. تا

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های انجام شده.

سری آزمایش	$Q (\frac{m^3}{s})$	$H (mm)$	$U (\frac{m}{s})$	Re	$\tau_0 (N/m^2)$	Re^*
۱	۰/۰۱۲۰	۱۳۵	۰/۷۶	۱۲۵۸۷۶	۰/۲۱	۲۳۲/۹۷
۲	۰/۰۱۴۱	۱۳۷	۰/۸۹	۱۴۷۰۹۲	۰/۲۹	۲۷۷/۱۰
۳	۰/۰۱۶۸	۱۴۰	۱/۰۶	۱۷۵۳۷۸	۰/۳۲	۲۸۵/۴۵
۴	۰/۰۱۸۴	۱۴۵	۱/۱۶	۱۹۰۹۳۹	۰/۳۸	۳۱۴/۴۷
۵	۰/۰۲۰۱	۱۴۹	۱/۲۷	۲۰۹۳۲۳	۰/۴۲	۳۳۲/۷۹
۶	۰/۰۲۳۱	۱۵۳	۱/۴۵	۲۳۹۰۲۴	۰/۵۶	۳۸۴/۱۲
۷	۰/۰۲۶۵	۱۶۰	۱/۶۸	۲۷۴۳۸۲	۰/۷۶	۴۴۷/۳۰
۸	۰/۰۲۹۱	۱۶۴	۱/۸۳	۲۹۹۸۴۱	۰/۴۳	۴۴۹/۷۰
۹	۰/۰۳۲۴	۱۶۹	۲/۰۴	۳۳۳۷۸۵	۰/۷۷	۴۵۴/۰۳
۱۰	۰/۰۳۵۰	۱۷۲	۲/۲۱	۳۵۹۲۴۳	۰/۷۸	۵۲۴/۳۷
۱۱	۰/۰۳۷۶	۱۷۵	۲/۳۷	۳۸۶۱۱۶	۱/۱	۵۳۶/۶۷
۱۲	۰/۰۴۰۰	۱۷۸	۲/۵۲	۴۱۰۱۵۹	۱/۱۵	۵۴۸/۸۲
۱۳	۰/۰۴۳۳	۱۸۲	۲/۷۳	۴۴۴۱۰۴	۱/۲۲	۵۶۵/۰۴



(الف)



(ب)

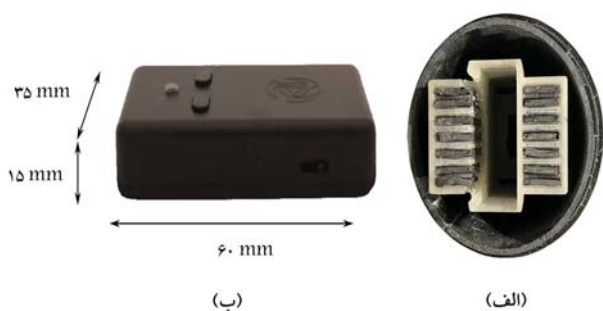
شکل ۱. الف) شکل شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی و ب) نمایی از موقعیت ذره مورد آزمایش (۱)، دستگاه ADV (۲) و دوربین فیلمبرداری از حرکت ذره (۳).

۲. مواد و روش

در پژوهش حاضر، به منظور تأمین شرایط مرزی کنترل شده و امکان برداشت اطلاعات صحیح یک مدل آزمایشگاهی برای رسیدن به اهداف پژوهش فراهم شده است. یک کانال با عرض ۹۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر در آزمایشگاه مهندسی آب دانشگاه گلنگو (شکل ۱) برای انجام آزمایش‌های مربوط به پژوهش حاضر فراهم شده است. در انتهای فلوم برای تنظیم عمق جریان از یک دریچه استفاده شده است. هر آزمایش با یک عمق ثابت آب در مخزن آغاز شد تا شرایط یکسانی برای همه‌ی سری آزمایش‌ها، که شامل ۱۳ بسامد پمپ (نماینده‌ی ۱۳ شدت جریان مختلف) است، برقرار باشد. شرایط هیدرولیکی و دیگر مشخصات آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. کانال مستطیلی با عرض ۹۰ cm، ظرفیت عبور جریان آب با ۷۰ لیتر بر ثانیه در عمق ۴۱ cm دارد. جنس بستر توسط مهره‌های شیشه‌ی کروی با قطر ۱۵ mm (که محدوده‌ی جهت ایجاد زبری مشخص در مسیر جریان در طول ۱۵۰ cm (که محدوده‌ی

پیش از سال ۲۰۱۵، پژوهش‌های مربوط به استفاده از حسگرها در اندازه‌گیری مشخصه‌های مکانیکی و دینامیکی جریان و رسوب بیشتر مربوط به معرفی، واسنجی و مباحث الکتریکی حسگرها بوده است.^[۲۴] بعد از آن پژوهشگران از روش اخیر برای بهره‌گیری در برداشت دینامیک ذرات رسوبی (برای مثال والیراکیس و همکاران (۲۰۱۶)^[۲۵]، فرهادی و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۶]، فرهادی و والیراکیس (۲۰۲۱)^[۲۷] و العیدی و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۸]، ارائه‌ی مفهوم سنگ هوشمند برای ارزیابی آبستگي پایه‌ی پل (رادچنکو (۲۰۱۷)^[۲۹]، رهگیری و بررسی فیزیک زمین لغزش (دست و همکاران (۲۰۲۰)^[۳۰]، دینی و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۱]، حرکت تنه‌های درخت در رودخانه اسپرایتزر^{۱۸} (۲۰۱۹)^[۳۲] و کاربردهای اکو - مورفولوژیکی (کرلی و همکاران (۲۰۲۱)^[۳۳] بهره جستند. تفاوت پژوهش‌ها، بیشتر در نحوه‌ی ارائه‌ی جزئیات، محدوده‌ی هیدرولیکی مطالعه شده و حسگرهای استفاده شده بوده است.

در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از یک ذره‌ی هوشمند (ذره‌ی پیش‌ساخته که مجهز به حسگرهای MEMS)، داده‌های لازم برای توصیف آماری دینامیک ذره بعد از آستانه با چگالی‌های متفاوت، در مسیر یک فلوم آزمایشگاهی با زبری مشخص تحت شدت جریان‌های متفاوت فراهم شود. با روش‌های تصویربرداری می‌توان سرعت لحظه‌ی ذره‌ی هوشمند، را محاسبه و در نهایت تابع توزیع احتمالاتی مناسب که بیانگر رفتار سرعت ذره در آن شرایط باشد، را با معیارهای سنجش آماری به‌دست آورد. با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت برای ذره‌ی مورد آزمایش، می‌توان شرایط رژیم‌های متفاوت انتقال رسوب را ارزیابی کرد. با استخراج داده‌های ذره‌ی هوشمند، انرژی جنبشی ذره ارزیابی شده است. نتایج پژوهش حاضر به دلیل در نظر گرفتن دامنه‌ی بزرگ‌تری از نمونه‌های مربوط به رژیم‌های انتقال رسوب (با در نظر گرفتن چگالی نسبی متفاوت ذرات و اعداد رینولدز ذره $Re^* = (u^*d)/\nu$) که در آن u^* سرعت برشی (m/s)، d قطر ذره (m) و ν لزجت دینامیکی سیال (m^2/s) است، متفاوت برای ایجاد شرایط لازم جهت مشاهده کردن رژیم ضعیف تا رژیم متوسط انتقال رسوب، منتهی به تصمیم‌گیری دقیق‌تری در رابطه با شکل تابع توزیع احتمالاتی مربوط به انتقال رسوب خواهد بود. دلایل مشاهده‌ی توابع گوناگون در توصیف انتقال رسوب، تحلیل و تغییر احتمالی آن با تغییر در رژیم انتقال رسوب بررسی شده است.



شکل ۲. الف) برش از نیمه ذره کروی پیش ساخته با محفظه حسگر که حاوی قسمت‌های سربی برای تنظیم چگالی ذره را دارد و ب) ابعاد محفظه حسگرهای MEMS که حاوی شتاب سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس سنس می‌باشد.

کوچک قابل استفاده برای اندازه‌گیری لحظه‌ی پارامترهای دینامیکی هستند. داده‌های حسگرهای MEMS توسط یک ریزکنترل‌گر^{۲۱} برداشت و در حافظه‌ی خارجی ذخیره می‌شوند. حافظه‌ی خارجی ظرفیت کافی در یک فضای محدود را فراهم می‌کند که شامل یک کارت حافظه (SD) است که به راحتی قابل استفاده است.^[۲۶] هر حسگر یک ولتاژ آنالوگ متناسب با شتاب و یا چرخش محاسبه شده تولید می‌کند. ضرورت دارد که داده‌های خروجی به دلیل نویز (سیگنال اضافی) و یا اختلال در اندازه‌گیری توسط روش‌های پردازش سیگنال ارزیابی شوند.

در پژوهش حاضر، برداشت داده‌های دینامیکی در بسامد ۲۵۰ هرتز انجام شده است. بسامدهای بالاتر، علیرغم دقت بالای برداشت داده، تولید خطای بیشتری نیز دارند و بسامد کمتر از آن نیز ماهیت برداشت لحظه‌ی را دچار چالش می‌کند. حسگرهای استفاده شده در آزمایش‌های پژوهش حاضر از حسگرهای Yost Labs ۳ – Space data – logger در ابعاد ۳۵×۶۰×۱۵ میلی‌متر با وزن ۲۸ گرم بوده است (شکل ۲ ب). شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس استفاده شده در پژوهش حاضر، قابلیت برداشت داده در محدوده‌ی مقیاس $\pm 6g$ ، $\pm 2000^\circ/sec$ و $\pm 1/3 G uass$ را دارند. داده‌های خروجی از حسگر (خوانش‌های شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس برای سه محور مختصات) پس از انجام یک سری اقدام‌های پس‌پردازشی قابل استفاده خواهند بود. تمام روش‌های استفاده شده در فاز پس‌پردازش در محیط متلب به صورت آفلاین انجام شده است. در جدول ۱، Q شدت جریان، H ارتفاع آب، U سرعت جریان، Re عدد رینولدز جریان، τ تنش برشی بستر و Re^* عدد رینولدز ذره هستند.

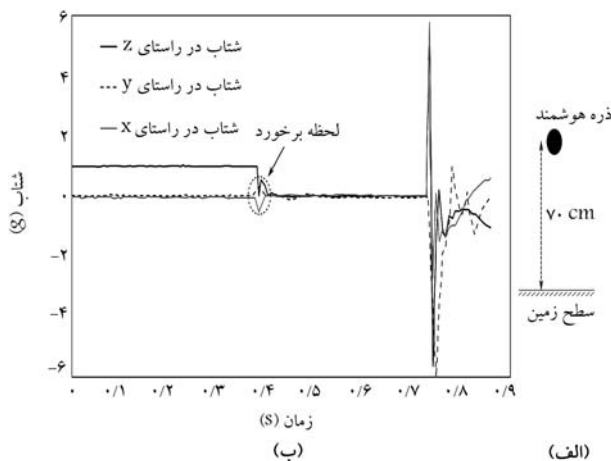
علاوه بر فیلترهایی که برای جدا کردن سیگنال اضافی از اطلاعات واقعی قابل استفاده هستند، سیستم مختصات داده‌های برداشت شده باید برای استفاده به سیستم مختصات مرجع تبدیل شوند. به عبارت دیگر، داده‌های استخراج شده از حسگرها به دلیل حرکت در جریان آب در سیستم مختصات بدنه هستند و قالب لاگرانژی دارند، که باید برای استفاده به مختصات مرجع در قالب اویلری تبدیل شوند. تبدیل سیستم لاگرانژی به اویلری، توسط روش‌هایی همچون ماتریس‌های کوسینوس، زوایای اویلر و چهارگان‌ها (کوآرنیون‌ها) قابل انجام است که در پژوهش حاضر از روش زوایای اویلر استفاده شده است. ماتریس کسینوس^{۲۲} ماتریس انتقال از یک سیستم مختصات اولیه (A) به سیستم مختصات هدف (B) است. با این تعریف، ماتریس انتقال بردارهای محور مختصات A به بردارهای محور مختصات B (یعنی ماتریس کسینوس DCM) به صورت رابطه‌ی ۱ است. که در آن، θ ، φ و ψ زوایای اویلر (زوایای تبدیل) هستند.

مورد آزمایش است) در کانال تعبیه شد. برای اطمینان از عدم حرکت ذرات کف کانال که به عنوان ایجاد زبری تعبیه شده‌اند، چیدمان و آرایش به صورت چندضلعی انتخاب شده است. آرایش مذکور و زبری جهت ثابت بودن زبری جریان و جلوگیری از بروز عدم قطعیت‌های بیشتر بوده است. از ذره‌ی کروی (این ذره‌ی کروی، مجهز به حسگرهای هوشمند بود که در بخش ۱.۲ در مورد آن توضیح داده شده است) با چگالی متفاوت ($\rho^1 = 1380/23 kg/m^3$ ، $\rho^2 = 1500/60 kg/m^3$)، $\rho^3 = 1619/76 kg/m^3$ ، $\rho^4 = 1997/28 kg/m^3$) برای تحلیل حرکت رسوب استفاده شده است. مقادیر اخیر از یک طرف شرایط انتقال رسوب در نزدیک و بعد از آستانه را بدون نیاز به ایجاد سرعت‌های زیاد مهیا کرده‌اند و از طرفی دیگر، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر در حرکت آلاینده‌های پلاستیکی که با وزن کمتر از رسوب‌های کوارتزی ($\rho = 2650 kg/m^3$) به صورت غلطش و چرخش نزدیک بستر حرکت می‌کنند، بهره گرفت. شرایط آزمایش‌ها به گونه‌ی بود که حرکت ذرات در رژیم انتقال ضعیف (شرایط نزدیک و بعد از آستانه) و رژیم انتقال قوی‌تر قرار داشته باشد. در هر آزمایش مقدار دبی به صورت تدریجی افزایش پیدا کرده است تا ذره در شرایط انتقال قرار گیرد، هر چند معیار دقیقی برای تشخیص شرایط آستانه وجود ندارد،^[۲۳] و آن هم پدیده‌ی تصادفی و آماری است.^[۲۵] در این راستا، اولین سری آزمایش با شرایط هیدرولیکی تعریف شده در جدول ۱ (سری آزمایش ۱) هیچ‌گونه حرکتی در ذرات در همه‌ی مقادیر چگالی برای ذرات مشاهده نشد و به عنوان شرایط آستانه (برای آزمایش‌های کوچک‌ترین ذره، یعنی ρ) ثبت شده است. برای اطمینان از یکنواخت بودن جریان، انتهای فلوم مجهز به یک دریچه‌ی قابل تنظیم برای ایجاد عمق ثابت به ازاها بسامد پمپ بود، همچنین مهره‌های کروی بستر به صورت همسطح در بستر کانال چیده شدند تا تلاطم حاصل از چیدمان نامنظم بستر باعث تغییرات زیاد در سطح آب نشود. دبی‌های هر آزمایش (جدول ۱) با تغییر بسامد پمپ (توسط دستگاه اینورتر^{۱۹}) تولید شد. سرعت ورودی جریان توسط دستگاه دبی‌سنس که روی فلوم نصب شده بود، اندازه‌گیری و با توجه به اینکه آب ورودی به کانال توسط یک لوله‌ی ۶ اینچی (در ابتدای کانال) انجام می‌شد، دبی ورودی تولید شده توسط پمپ با بسامد مشخص در هر آزمایش کالیبره شد. همچنین به ازاها بسامد (دبی) با اندازه‌گیری مدرج روی تانک، تغییرات عمق آب با افزایش بسامد قرائت و ضبط شد. سرعت جریان در هر آزمایش با دستگاه سرعت‌سنس ADV^{۲۰} سه‌بعدی (که نحوه‌ی نصب آن در شکل ۱ ب نشان داده شده است) اندازه‌گیری و سرعت متوسط جریان با مقادیر قرائت شده از دبی‌سنس به دست آمده با در نظر گرفتن لوله‌ی ۶ اینچ مقایسه و صحت‌سنجی شد. قرائت‌ها توسط دستگاه سرعت‌سنس (ADV) در مدت زمان ۴ دقیقه (برای اطمینان از برداشت داده‌ی کافی) با بسامد نمونه‌برداری ۲۵ هرتز انجام شد. برای محاسبه‌ی تنش برشی با برداشت سرعت جریان، از تراز ۱۰ تا ۸۰ میلی‌متری بالای ذرات بستر (محاسبات به دلیل شرایط بستر زبر، با در نظر گرفتن خط فرضی دیوار تئوری انجام شده است) توسط دستگاه ADV سه‌بعدی و با محاسبه‌ی سرعت برشی ($u^*/m/s$) که از برازش خطی نمودار نیمه‌لگاریتمی عمق - سرعت متوسط به دست آمده است، استفاده شد $\tau = u^{*2} \rho$ که در آن ρ چگالی ذره (kg/m^3) و τ تنش برشی (N/m^2) است.

۱.۲. ذره‌ی هوشمند

حسگرهای MEMS عموماً شامل یک شتاب‌سنس، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنس سه‌بعدی هستند که به صورت ترکیبی در قالب یک قطعه‌ی الکترونیکی در ابعاد

$$DCM = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (۱)$$



شکل ۳. الف) شمای آزمایش سقوط آزاد ب) شتاب لحظه‌ای اصلاح شده‌ی آزمایش مرتبه دوم سقوط آزاد ذره‌ی هوشمند از ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر.

که در رابطه با حسگر شتاب‌سنج از وضعیت پرتاب آزاد بهره برده است. اگر حسگر بدون چرخش از یک ارتفاع رها شود، شتاب قائم آن همان شتاب ثقل خواهد بود و مولفه‌های شتاب در راستاهای دیگر همدیگر را خنثی می‌کنند. متوسط فاصله (h) را می‌توان از قانون حرکت خطی نیوتن (مطابق رابطه ۳) تخمین زد:

$$h_N = h + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (۳)$$

که در آن، h_N ، v_0 و t ارتفاع نهایی، سرعت ابتدایی و زمان مسافت بین h_N و h است. با ننگ داشتن حسگر (ذره‌ی هوشمند که در قسمت بعد نحوه آماده‌سازی آن توضیح داده شده است شکل ۳الف)، ذره از ارتفاع $h = 70 \text{ cm}$ آزاد و به دلیل اینکه سرعت اولیه ندارد، رابطه به صورت $h = \frac{1}{2} g t^2$ خواهد بود. این آزمایش سه بار انجام شده و مقادیر متوسط ارتفاع با استفاده از داده‌های خروجی از حسگر ۷۱ سانتی‌متر به دست آمده است (زمان سقوط در آزمایش دوم که در شکل ۳ب مشاهده می‌شود، $t = 0.375 \text{ s}$ است که با استفاده از رابطه‌ی اخیر $h = 0.69 \text{ m}$ محاسبه شده است). شتاب‌سنج به صورت عمود رها شد، به این دلیل که تغییرات در جهت‌گیری در طول سقوط آزاد کمترین باشد. در عین حال مقدار کمی تغییر جهت در آغاز سقوط آزاد منجر به ایجاد خطا در محاسبات شده است (۱/۷٪ خطا). برای واسنجی ژيروسکوپ از رهاسازی ذره‌ی هوشمند بر یک سطح شیب‌دار استفاده شده است (شکل ۴). در این نوع آزمایش انرژی جنبشی ذره با انرژی پتانسیل (mgh) که در آن h سطح شیب‌دار است، معادل است (رابطه ۴)، استفاده شده است.

$$mgh = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (۴)$$

که در آن، m ، v ، ω و $I = \frac{2}{5} m r^2$ به ترتیب: جرم، سرعت خطی، سرعت زاویه‌ای ذره و ممان اینرسی ذره‌ی هوشمند (کروی) با شعاع $r = 0.375 \text{ m}$ است. با در نظر گرفتن چرخش محض (یعنی $v = r\omega$) رابطه‌ی ۴ به صورت

۲.۲. نحوه‌ی آماده‌سازی ذره‌ی هوشمند

ذره‌ی هوشمند، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ذره‌ی است که به حسگرهای MEMS که برای برداشت خصوصیات هیدرودینامیکی ذره هنگام انتقال در جریان آب مناسب هستند، مجهز است. ذره‌ی هوشمند، یک ذره‌ی کروی توخالی است که توسط دستگاه پرینتر سه‌بعدی و رزین بی‌رنگ ساخته شده است. شکل نهایی ذره‌ی کروی بعد از رنگ‌آمیزی و آب‌بندی برای استفاده آماده شده است. حسگر MEMS در ذره‌ی مذکور تعبیه شده است. ساختمان داخلی ذره‌ی هوشمند به شکلی تهیه شده است که حسگر داخل آن قرار گیرد (شکل ۲الف). همچنین برای تغییر چگالی ذره از تکه‌های سربی استفاده شده است که برای چگالی دلخواه تکه‌های سربی داخل محفظه‌های مخصوص خود قرار گیرد. جنس ذره‌ی هوشمند از ماده‌ی پلاستیکی با سختی مناسب به نحوی است که در مقابل نیروهای وارده بر آن مقاومت داشته باشد. خشک بودن داخل محفظه‌ی ذره‌ی هوشمند (آب‌بندی مناسب) و وارد نشدن هیچ‌گونه فشار به حسگرها بسیار حائز اهمیت است، که در همین راستا آب‌بندی توسط آب‌بند توسط اورینگ و محفظه‌ی قرارگیری حسگر کاملاً درون محفظه قفل می‌شود و هیچ‌گونه نوسانی در هنگام حرکت متوجه حسگر نمی‌شود. حسگر باید در وسط ذره و با یک جهت از پیش تعیین شده‌ی مشخص در محفظه قرار گیرد که هم توزیع یکنواخت در جرم ذره و هم پیش‌فرض واقع شدن نیروها در مرکز ذره‌ی کروی تحقق یابد.

ذره‌ی هوشمند به صورت برش از نیمه (شکل ۲الف) توسط دستگاه پرینتر سه‌بعدی از جنس پلاستیک سخت (پلاستیک ABS) تهیه شده است. محفظه‌ی تغییر چگالی ذره نیز توسط پرینتر سه‌بعدی تهیه شده است، که با در نظر گرفتن اسلات‌هایی برای افزایش چگالی بتوان به نسبت‌های دلخواه چگالی در آزمایش‌های پژوهش حاضر دست یافت. برای استفاده‌ی کاربردی از حسگر شتاب‌سنج در مطالعات، به دلیل خروجی داده‌های حسگر شتاب‌سنج در مختصات بدنه (سیستم در حال حرکت)، علاوه بر تبدیل آن به محور مختصات ثابت، ضروری است واسنجی انجام و داده‌ها راستی‌آزمایی شوند. برای شتاب‌سنج، ثقل موضعی، زمانی که حسگر در حالت ایستاست، باید از داده‌ها حذف شود (رابطه ۲):

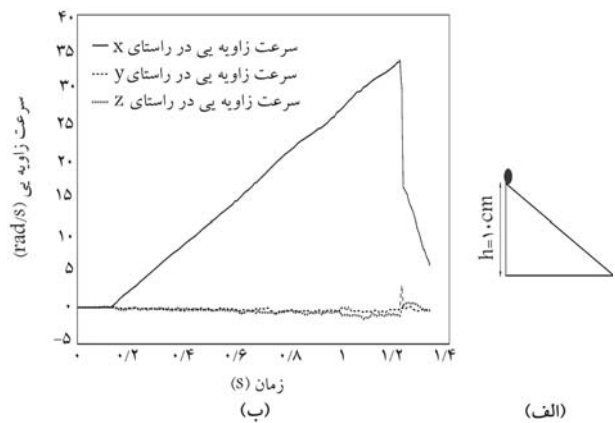
$$a_E(t) = DCM(t) a_b(t) - g_E \quad (۲)$$

که در آن $a_E(t)$ ، $a_b(t)$ ، $DCM(t)$ و g_E به ترتیب شتاب خطی (m/s^2) که به مختصات اولیه منتقل شده است، شتاب خروجی حسگر (m/s^2)، ماتریس کسینوس هادی (ماتریس انتقال به مختصات اولیه)، و ثابت شتاب ثقل

$$g_E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{bmatrix} m/s^2 \text{ است.}$$

۳.۲. واسنجی حسگر MEMS

واسنجی حسگر با استفاده از قوانین ساده‌ی فیزیکی انجام شده است. بدین صورت



شکل ۴. الف) شمای آزمایش انجام شده برای واسنجی ژيروسکوپ (ب) نمودار سرعت زاویه‌یی برای آزمایش مرتبه سوم چرخش ذره هوشمند بر سطح شیبدار با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر.

شکل ۴. الف) شمای آزمایش انجام شده برای واسنجی ژيروسکوپ (ب) نمودار سرعت زاویه‌یی برای آزمایش مرتبه سوم چرخش ذره هوشمند بر سطح شیبدار با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر.

شکل ۴. الف) شمای آزمایش انجام شده برای واسنجی ژيروسکوپ (ب) نمودار سرعت زاویه‌یی برای آزمایش مرتبه سوم چرخش ذره هوشمند بر سطح شیبدار با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر.

۳. نتایج

داده‌های خام برداشت شده از ذره هوشمند (حسگر MEMS) پس از اصلاحات و تبدیل مختصات (از مختصات بدنه به مختصات اویلری) با استفاده از روابط ۱ و ۲، به صورت سری زمانی، رسم و آماده‌ی استفاده برای مطالعه‌ی دینامیک ذره شده است (شکل ۵).

۳.۱. تبادلات انرژی ذره با محیط

برای تمامی آزمایش‌های پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های ذره هوشمند، انرژی جنبشی لحظه‌یی ذره (رابطه‌ی ۵، $k(t)$ ، ژول) به عنوان انرژی تبادلیافته بین ذره و بستر در جریان آب (با نرخ‌های جریان مختلف) بررسی شده است.

$$k(t) = \frac{1}{2}mv(t)^2 + \frac{1}{2}m\omega(t)^2 \quad (5)$$

که در آن، m ، $v(t)$ و $\omega(t)$ به ترتیب جرم (kg)، سرعت خطی (m/s) و سرعت زاویه‌یی ذره (rad/s) است. سرعت خطی ذره با استفاده از رهگیری ذره توسط روش‌های تصویربرداری PTV تخمین سرعت با مقایسه‌ی موقعیت ذره در تصاویر گرفته شده در قبل و بعد) و سرعت زاویه‌یی از حسگر ژيروسکوپ استفاده شده است. برای هر آزمایش (رجوع شود به جدول ۱)، فراز و نشیب‌های سیگنال‌های انرژی جنبشی به عنوان پیک‌های مثبت و منفی ذره دریافت شده است. بدین صورت که انتقال از یک پیک منفی (نشیب) به پیک مثبت (فراز)، نشان‌دهنده‌ی دریافت انرژی و انتقال از یک پیک مثبت به پیک منفی، نشان‌دهنده‌ی هدررفت انرژی ذره در مسیر جریان است. بدین‌وسیله زمان و مقدار انرژی به‌دست آمده/هدررفته قابل محاسبه است. شکل ۶، نمونه‌یی از سیگنال انرژی جنبشی ذره در آزمایش سری ۱۰ (جدول

۱) است. متوسط زمان دریافت و هدررفت انرژی ذره در آزمایش‌های پژوهش حاضر به‌دست آمده و نمودار تغییرات آن در مقابل عدد رینولدز ذره رسم شده است (شکل ۷). مطابق شکل ۷، متوسط زمان دریافت و هدررفت انرژی، با افزایش عدد رینولدز ذره به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. کاهش مقادیر با روند نمایی، نشان دهنده‌ی کم‌رنگ شدن تأثیر عدد رینولدز ذره‌ی بالا در زمان تبادل انرژی ذره با محیط پیرامون است (بستر و سیال) است. همچنین با افزایش عدد رینولدز ذره، زمان تبادل انرژی (دریافت و هدررفت انرژی) در هر چهار چگالی ذره‌ی استفاده شده به یک همگرایی رسیده است که نشان می‌دهد کاهش تأثیر چگالی ذره در مدت زمان تبادل انرژی در رژیم‌های تعادلی انتقال است. در شرایط تعادلی رژیم انتقال، ذره مدت زمان بیشتری در معرض نیروهای سیال قرار می‌گیرد،^[۲۷] و علی‌رغم داشتن مقادیر بیشتر انرژی (شکل ۸)، نوسان مقادیر آن در مدت زمان‌های کوتاه‌تر انجام می‌شود که نشان می‌دهد بسامد بیشتر در تبادل انرژی ذره است. در اعداد رینولدز پایین، برخلاف شرایط با مقادیر بزرگ‌تر (شرایط تعادلی)، زمان تبادل انرژی طولانی‌تری بین ذره و پیرامون اتفاق افتاده است، که نشان‌دهنده‌ی نیاز بیشتر ذره برای حفظ شرایط انتقال است؛ اما در شرایط تعادلی (براساس شواهد)، این نیاز برای انتقال ذره کاهش پیدا کرده و ذره در یک شرایط به نسبت تعادلی در جریان آب توسط نیروهای وارده بر آن کشیده شده است که نشانگر تغییرات تأثیر ارتباط ذره - بستر و ذره - سیال در شرایط مختلف جریان (رژیم انتقال رسوب) در انتقال ذره است. در رژیم‌های انتقال ضعیف، مقادیر پیک مثبت (یعنی مقادیر انرژی دریافتی) و مقادیر پیک منفی (یعنی مقادیر انرژی از دست داده شده) بیشتر از رژیم‌های به نسبت قوی‌تر انتقال است (شکل ۸) که این نیز شواهد زمان دریافت انرژی (شکل ۷) را در دو شرط مذکور تصدیق می‌کند.

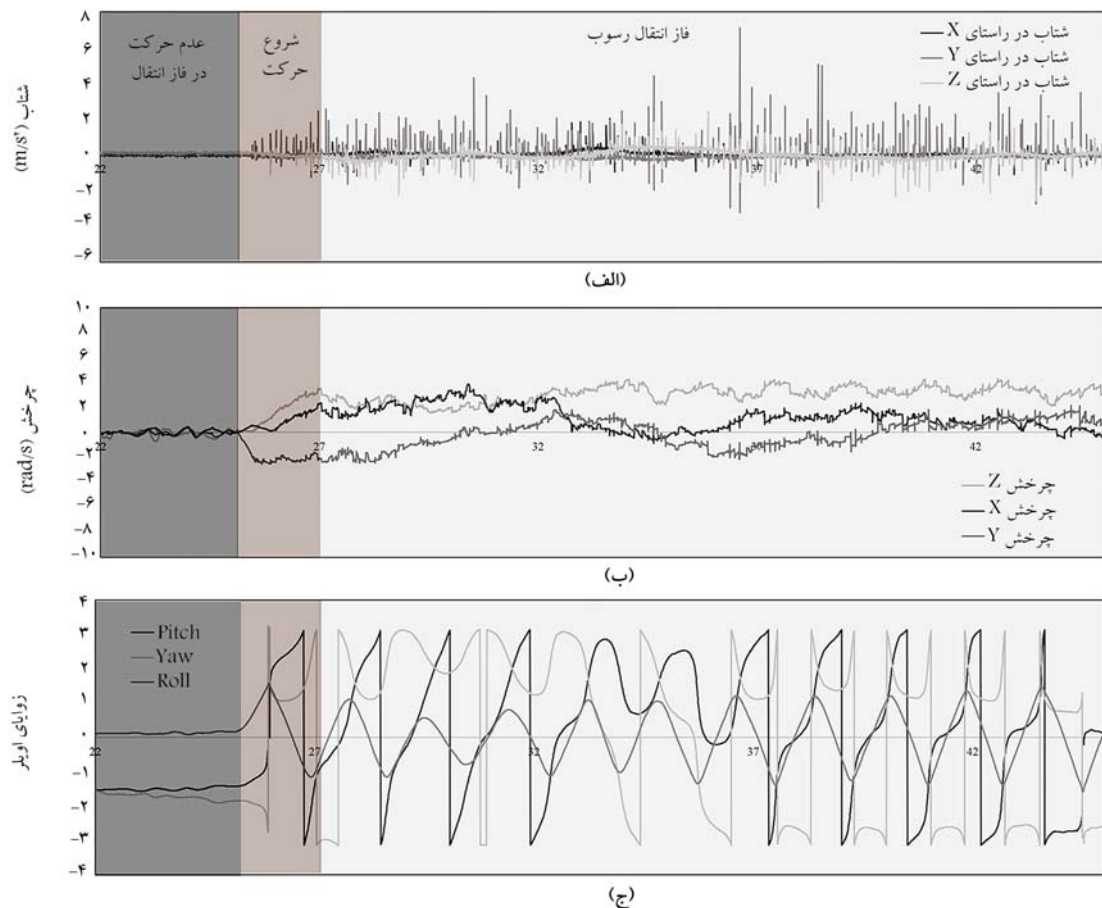
۳.۲. رفتار احتمالاتی انرژی جنبشی ذره

توابع توزیع احتمالاتی تجربی متعددی بر هیستوگرام (توزیع) مشاهداتی مربوط به انرژی جنبشی ذره برازش داده شد و از این بین توابع لوگ - نرمال، نرمال، ویبول و گاما، به دلیل عملکرد بهتر و مشاهده‌های برخی پژوهشگران پیشین مقایسه شدند. با استفاده از معیار کولموگوروف - اسمیرنوف ($D_{m,n}$ ، رابطه‌ی ۶) و معیار اندرسون دارلینگ (AD در رابطه‌ی ۷)، بهترین تابع توزیع احتمالاتی برازش شده بر داده‌های مشاهداتی انتخاب شد.

$$D_{m,n} = \max |F_m(x) - G_n(x)| \quad (6)$$

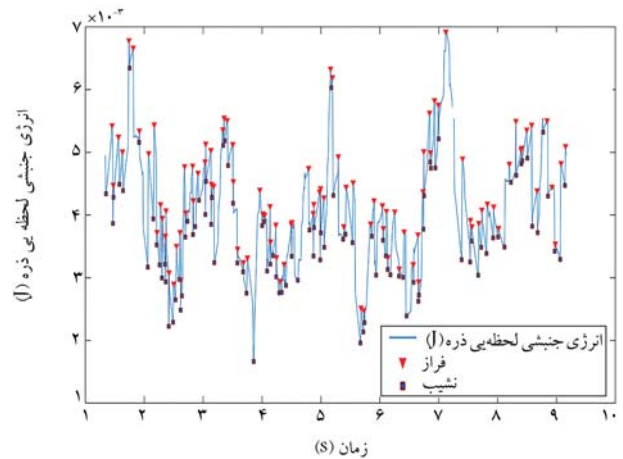
$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot [\ln F(x) + (\ln(1-G(x)))] \quad (7)$$

که در آن، $F_m(x)$ تابع توزیع احتمالاتی تجمعی مشاهداتی با تعداد m نمونه و $G_n(x)$ تابع توزیع احتمالاتی تجمعی محاسبه شده با تعداد n نمونه است. در جدول ۲، نتایج آماری معیارهای کولموگوروف - اسمیرنوف (رابطه‌ی ۶) و اندرسون دارلینگ (رابطه‌ی ۷) برای شرایط انتقال ضعیف (نزدیک و بعد از آستانه با اعداد رینولدز به نسبت پایین‌تر؛ در پژوهش حاضر، سری آزمایش ۲ با توجه به جدول ۱) و شرایط انتقال تعادلی (بعد از آستانه و با اعداد رینولدز به نسبت بالاتر؛ در پژوهش حاضر، سری آزمایش ۱۳ با توجه به جدول ۱)، برای توابع توزیع احتمالاتی ویبول و لوگ نرمال ارائه شده است (به ترتیب $D_{m,n}/LN$ و $D_{m,n}/W$ نتایج معیار آماری کولموگوروف - اسمیرنوف برای توابع ویبول و لوگ - نرمال و ADW و $ADLN$ نتایج معیار آماری اندرسون دارلینگ برای توابع ویبول و لوگ - نرمال هستند). نتایج مذکور



شکل ۵. سری زمانی داده‌های خروجی از ذره هوشمند؛ شتاب اصلاح شده و تبدیل شده به مختصات اوپلری توسط رابطه‌ی ۲ در راستای مختصات x , y , z .

(متناظر با اعداد رینولدز ذره به تناسب کوچک‌تر) به رژیم‌های انتقال تعادلی (متناظر با اعداد رینولدز ذره به تناسب بزرگ‌تر) دستخوش تغییر در شکل و نوع تابع توزیع احتمالاتی شده است. با افزایش عدد رینولدز ذره، شکل تابع پهن‌تر شده (به دلیل کم شدن احتمال وقوع انرژی‌های با مقادیر بیشینه) و در تغییر رژیم انتقال از ضعیف به تعادلی از تابع توزیع ویبول به لوگ - نرمال تغییر ماهیت داده است که نشانگر به تعادلی از تابع توزیع ویبول به لوگ - نرمال تغییر ماهیت داده است که نشانگر آستانه‌ی مشخص برای تغییر رژیم انتقال است. در همپوشانی اخیر، دامنه‌ی تابع توزیع، اهمیت دارد و نه بدنه‌ی تابع توزیع. به همان تناسب که ظرفیت انتقال با بزرگ شدن نیروهای محرک افزایش پیدا می‌کند، همپوشانی مذکور بیشتر شده و بدنه‌ی تابع توزیع احتمالاتی نیروهای محرک با تابع توزیع احتمالاتی نیروهای مقاوم برخورد کرده است. بنابراین، از این منظر نیز تابع ویبول که برای توصیف پدیده‌های حدی مناسب است، به دلیل اهمیت دنباله‌ی تابع آن، توصیف‌کننده‌ی منطقی برای وضعیت رژیم انتقال ضعیف است. همچنین دلیل آنکه انرژی جنبشی و تکانه از توابع توزیع یکسانی پیروی می‌کنند، وابسته بودن دو پارامتر مذکور به مجذور سرعت ذره (u^2) است.



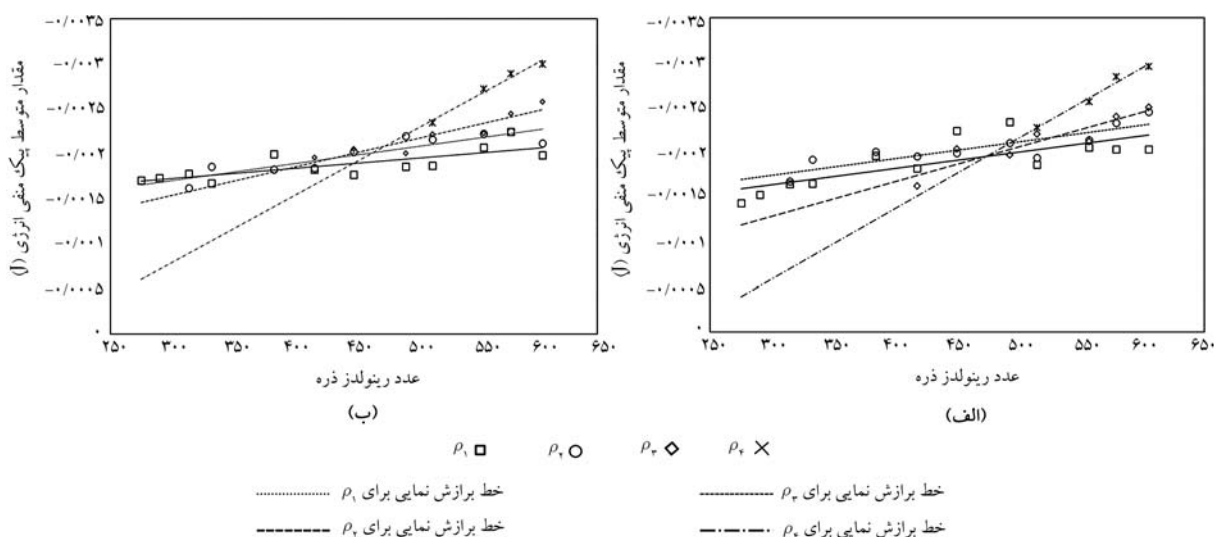
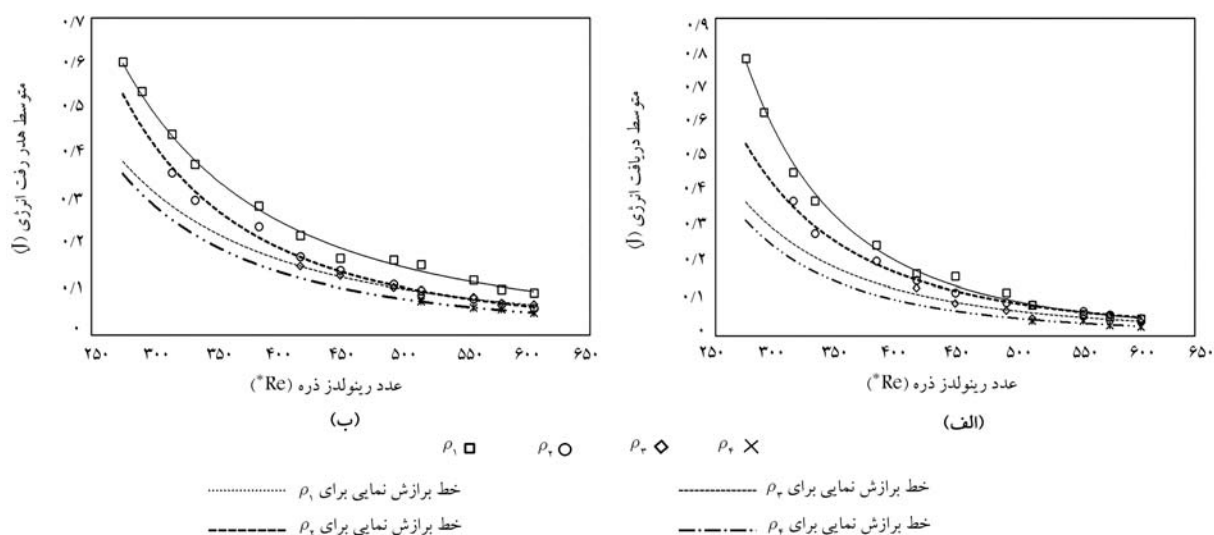
شکل ۶. نمونه‌ی سیگنال انرژی جنبشی ذره (اصلاح شده) به همراه مشخص شدن پیک‌های مثبت (فراز) و منفی (نشیب) انرژی (مربوط به سری ۱۰ آزمایش‌ها).

در سطح اطمینان ۵٪، بهترین توابع توزیع احتمالاتی توصیف‌کننده‌ی انرژی جنبشی لحظه‌ی ذره در شرایط ذکر شده است.

در شکل ۹، توابع توزیع احتمالاتی تجربی و مشاهداتی انرژی جنبشی ذره با چگالی ρ_1 در مقابل یکدیگر برای شرایط ضعیف (شکل ۱۹ الف) و تعادلی (شکل ۹ ب) مشاهده می‌شود که مطابق آن تابع توزیع احتمالاتی در گذار از رژیم‌های انتقال ضعیف

۴. نتیجه‌گیری

پیشرفت در نحوه‌ی اندازه‌گیری آزمایشگاهی در مقیاس‌های کوچک‌تر، شرایط را برای مطالعه و پژوهش مجدد در فیزیک پدیده‌های انتقال ذره‌های رسوبی بستر فراهم کرده است. از آنجایی که حرکت بار بستر، یک پدیده‌ی خطی نیست و عوامل دخیل



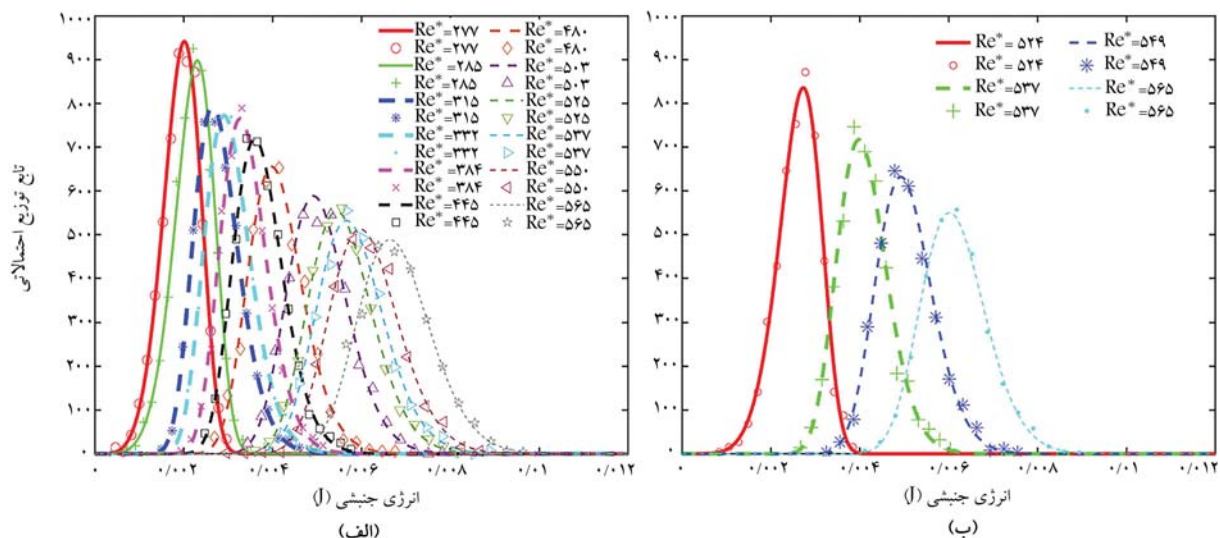
جدول ۲. نتایج معیار آماری کولموگروف - اسمیرنوف و اندرسون دارلینگ در شرایط ضعیف و تعادلی انتقال (بعد از آستانه) برای ذره با چگالی‌های ρ_1 ، ρ_2 ، ρ_3 و ρ_4 .

شرایط انتقال	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4
ضعیف	$D_{m,n/w} = 0.228$	$D_{m,n/w} = 0.274$	$D_{m,n/w} = 0.265$	$D_{m,n/w} = 0.342$
	$AD_w = 0.402$	$AD_w = 0.452$	$AD_w = 0.424$	$AD_w = 0.537$
تعادلی	$D_{m,n/LN} = 0.312$	$D_{m,n/LN} = 0.308$	$D_{m,n/LN} = 0.241$	$D_{m,n/LN} = 0.205$
	$AD_{LN} = 0.484$	$AD_{LN} = 0.462$	$AD_{LN} = 0.426$	$AD_{LN} = 0.403$

برداشت شود. داده‌های خروجی از حسگر هوشمند، بعد از یک سری واسنجی و راستی‌آزمایی، اصلاح و تبدیل مختصات قابل بهره‌برداری بوده است (اصلاح شتاب نقل و تبدیل از مختصات بدنه به مختصات مرجع). در ادامه، نتایج پژوهش حاضر به صورت فهرست ارائه شده است:

• استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی نوین، از جمله حسگرهای MEMS (اینجا

در آن در شرایط مختلف رژیم انتقال متفاوت و غیرخطی است، می‌توان با استفاده از حسگرهای هوشمند، پارامترهای دینامیکی ذره‌ی بستر را در حالت انتقال به صورت لحظه‌یی در فواصل زمانی کوتاه برداشت کرد. در پژوهش حاضر سعی شده است که با در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی در حالت رژیم انتقال ضعیف تا رژیم انتقال تعادلی و قوی (با تغییر در عدد رینولدز ذره)، تا پارامترهای دینامیک انتقال یک ذره (که حاوی حسگرهای شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج سه‌بعدی است)



شکل ۹. نمودار برازش بهترین توابع توزیع احتمالاتی تجربی (ویبول، با خطوط مستقیم) توصیف‌کننده‌ی شرایط نزدیک بعد از آستانه و لوگ - نرمال با خطوط ناپیوسته (توصیف‌کننده‌ی شرایط بعد از آستانه) نشان داده شده‌اند. بر داده‌های مشاهده‌ی انرژی جنبشی لحظه‌ی (نشان‌ها) در سری آزمایش با چگالی‌های: الف) p_1 و ب) p_2 با اعداد رینولدز ذره متفاوت در دو حالت بعد از آستانه و شرایط آستانه.

جریان در فاز انتقال رسوب را می‌توان برداشت کرد. پارامترهای مذکور متناسب با افزایش عدد رینولدز ذره افزایش پیدا کرده است.

- بررسی تبادل انرژی ذره بستر در حالت انتقال با ذرات دیگر و جریان (انرژی جنبشی لحظه‌ی ذره) نشان داد که متوسط هدررفت و استفاده از وسایل اندازه‌گیری مینیاتوری (در پژوهش حاضر، حسگرهای MEMS) می‌تواند با هزینه‌ی به نسبت کمتر، رفتار ذره در شرایط انتقال در حالت بستر را پیش‌کند.
- رفتار ذره در شرایط مختلف انتقال تغییر کرده و همچنین به دلیل استفاده از ذرات با چگالی نسبی کوچک‌تر از ذرات کوآرتزی، می‌توان نتایج پژوهش حاضر را در زمینه‌ی حرکت ماکرو - پلاستیک‌ها (که چالش اکو - هیدرولیکی جدیدی را پیش روی پژوهشگران آورده است)، در بستر رودخانه تعمیم داد.

ذره‌ی هوشمند) می‌تواند برای توصیف پدیده‌ی انتقال رسوب در قالب تصادفی استفاده شود.

- شکل تابع توزیع احتمالاتی انرژی جنبشی ذره از نتایج حاصل از ذره‌ی هوشمند (از ویبول به لوگ - نرمال)، نشان‌دهنده‌ی تغییر رفتار اندرکنش ذره - بستر و تبادل انرژی در رژیم‌های مختلف انتقال است.
- مدت زمان دریافت و هدررفت انرژی جنبشی ذره با افزایش عدد رینولدز به صورت نمایی کاهش پیدا کرده است.
- با استفاده از ذره‌ی هوشمند، مقدار دریافت و هدررفت لحظه‌ی ذره در مسیر

پانویس‌ها

1. Dynamic load
2. Heuristic
3. Diplas
4. Celik
5. Valyrakis
6. Roseberry
7. Heyman & Ancey
8. Shim & Duan
9. Furbish
10. Wu
11. Celik
12. Weibull distribution
13. particle tracking velocimetry (PTV)
14. microelectro mechanical systems (MEMS)
15. Akeila
16. Kularatna

17. Frank
18. Spreitzer
19. Inverter
20. acoustic doppler velocimetry (ADV)
21. Micro controller
22. direct cosine matrix

منابع (References)

1. Abbott, J. and Francis, J.R.D. "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **284**(1321), pp. 225-254 (1977).
2. Dey, S. "Fluvial hydrodynamics", Springer (2014).

3. Bagnold, R.A. "The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **332**(1591), pp. 473-504 (1973).
4. Ancey, C. "Bedload transport: A walk between randomness and determinism Part 1. The state of the art", *Journal of Hydraulic Research*, **58**(1), pp. 1-17 (2020).
5. Furbish, D.J., Roering, J.J., Doane, T.H. and et al. "Rarefied particle motions on hillslopes: 1. Theory", *Earth Surface Dynamics Discussions*, **9**(3), pp. 1-63 (2020).
6. Ancey, C. and Heyman, J. "A microstructural approach to bed load transport: Mean behaviour and fluctuations of particle transport rates", *Journal of Fluid Mechanics*, **744**, pp. 129-168 (2014).
7. Ancey, C. and Pascal, I. "Estimating mean bedload transport rates and their uncertainty", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **125**(7), e2020JF005534 (2020).
8. Fan, N., Singh, A., Guala, M. and et al. "Exploring a semimechanistic episodic Langevin model for bed load transport: Emergence of normal and anomalous advection and diffusion regimes", *Water Resources Research*, **52**(4), pp. 2789-2801 (2016).
9. Diplas, P., Dancey, C.L., Celik, A.O. and et al. "The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions", *Science*, **322**(5902), pp. 717-720 (2008).
10. Celik, A.O., Diplas, P., Dancey, C.L. and et al. "Impulse and particle dislodgement under turbulent flow conditions", *Physics of Fluids*, **22**(4), 046601 (2010).
11. Valyrakis, M., Diplas, P. and Dancey, C.L. "Entrainment of coarse grains in turbulent flows: An extreme value theory approach", *Water Resources Research*, **47**(9) (2011).
12. Valyrakis, M., Diplas, P. and Dancey, C.L. "Entrainment of coarse particles in turbulent flows: An energy approach", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **118**(1), pp. 42-53 (2013).
13. Roseberry, J.C., Schmeeckle, M.W. and Furbish, D.J. "A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**(F3) (2012).
14. Ancey, C., Bohorquez, P. and Heyman, J. "Stochastic interpretation of the advection-diffusion equation and its relevance to bed load transport", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **120**(12), pp. 2529-2551 (2015).
15. Wu, Z., Furbish, D. and Foufoula-Georgiou, E. "Generalization of hop distance-time scaling and particle velocity distributions via a two-regime formalism of bedload particle motions", *Water Resources Research*, **56**(1), pp. e2019WR025116 (2020).
16. Shim, J. and Duan, J. "Experimental and theoretical study of bed load particle velocity", *Journal of Hydraulic Research*, **57**(1), pp. 62-74 (2019).
17. Shim, J. and Duan, J.G. "Experimental study of bedload transport using particle motion tracking", *International Journal of Sediment Research*, **32**(1), pp. 73-81 (2017).
18. Furbish, D.J., Haff, P.K., Roseberry, J.C. and et al. "A probabilistic description of the bed load sediment flux: 1. Theory", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**(F3), pp. (2012).
19. Valyrakis, M. and Farhadi, H. "Investigating coarse sediment particles transport using PTV and "smart-pebbles" instrumented with inertial sensors", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2017).
20. Akeila, E., Salcic, Z. and Swain, A. "Smart pebble for monitoring riverbed sediment transport", *IEEE Sensors Journal*, **10**(11), pp. 1705-1717 (2010).
21. Kularatna, N., Melville, B., Akeila, E. and et al. "Implementation aspects and offline digital signal processing of a smart pebble for river bed sediment transport monitoring", *SENSORS*, 2006 IEEE (2006).
22. Frank, D., Foster, D., Sou, I.M. and et al. "Lagrangian measurements of incipient motion in oscillatory flows", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**(1), pp. 244-256 (2015).
23. Harding, M., Fussell, B.K., Gullison, M. "Design and testing of a debris flow smart rock", *Geotechnical Testing Journal*, **37**(5), pp. 769-785 (2014).
24. Maniatis, G. "On the use of IMU (inertial measurement unit) sensors in geomorphology", *Earth Surface Processes and Landforms*, **46**(11), pp. 2136-2140 (2021).
25. Valyrakis, M., Alexakis, A.-T., Maniatis, G. and et al. "New techniques for environmental monitoring and risk assessment in water surface systems", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2016).
26. Farhadi, H., Esmaili, K., Zahir, A. and et al. "Monitoring particle transport at above threshold flow conditions", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2018).
27. Farhadi, H. and Valyrakis, M. "Exploring probability distribution functions best-fitting the kinetic energy of coarse particles at above threshold flow conditions", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2021).
28. Al-Obaidi, K. and Valyrakis, M. "A sensory instrumented particle for environmental monitoring applications: Development and calibration", *IEEE Sensors Journal*, **21**(8), pp. 10153-10166 (2021).
29. Radchenko, A. "Smart rocks for bridge scour monitoring: Design and localization using electromagnetic techniques and embedded orientation sensors (Publication number 2570)", Doctoral Dissertations, Missouri University of Science and Technology (2017).
30. Dost, J.B., Gronz, O., Casper, M.C. and et al. "The potential of Smartstone probes in landslide experiments: how to read motion data", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **20**(12), pp. 3501-3519 (2020).
31. Dini, B., Bennett, G.L., Franco, A. and et al. "Development of smart boulders to monitor mass movements via the internet of things: A pilot study in Nepal", *Earth Surface Dynamics*, **9**(2), pp. 295-315 (2021).
32. Spreitzer, G., Gibson, J., Tang, M. and et al. "Smart-Wood: Laboratory experiments for assessing the effectiveness of smart sensors for monitoring large wood movement behaviour", *Catena*, **182**, 104145 (2019).

33. Curley, E.A., Thomas, R., Adams, C.E. and et al. "Behavioural and metabolic responses of Unionida mussels to stress", *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* (2021).
34. Buffington, J.M. and Montgomery, D.R. "A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers", *Water Resources Research*, **33**(8), pp. 1993-2029 (1997).
35. Maniatis, G.; Hoey, T.; Hodge, R. and et al. "Inertial drag and lift forces for coarse grains on rough alluvial beds measured using in-grain accelerometers", *Earth Surface Dynamics*, **8**(4), pp. 1067-1099 (2020).
36. Valyrakis, M., Alexakis, A. and Pavlovskis, E. "Smart pebble" designs for sediment transport monitoring", *EGU General Assembly Conference Abstracts* (2015).
37. Pahtz, T., Clark, A.H., Valyrakis, M. and et al. "The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments", *Reviews of Geophysics*, **58**(1), e2019RG000679 (2020).

مدل سازی عوامل مؤثر در تغییر تمایل استفاده از تاکسی اینترنتی در شرایط کوید - ۱۹

آصف خیری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرضا مهدوحی* (دانشیار)

دانشکده ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره ی ۲ - ۳۸، شماره ی ۲/۲، ص. ۵۵-۶۶ (پژوهشی)

به دلیل ادامه ی بحران کوید - ۱۹، سیستم حمل و نقل شهری دچار تغییرهای چشم گیری شده است. همچنین افزایش خطرهای مرتبط با مکان های شلوغ همراه با اقدام های فاصله گذاری اجتماعی در حمل و نقل عمومی و اشتراکی، احتمالاً در گزینه های معمول سفر مسافران تأثیر گذاشته است. در نوشتار حاضر، با استفاده از طراحی پرسشنامه و پرسشگری برخط در شهر تهران سعی شده است برآوردی از میزان استفاده ی افراد از تاکسی های اینترنتی در شرایط کوید - ۱۹ انجام گیرد. برای این منظور، جهت شناسایی عوامل تأثیرگذار در استفاده از تاکسی های اینترنتی با استفاده از ۲۳۳ داده ی حاصل از پرسشگری آنلاین و با توجه به میزان استفاده و تغییرات میزان استفاده ی آن ها قبل و بعد از کرونا، اقدام به ساخت مدل های لوجیت رتبه یی و دوگانه شده است. نتایج نشان دادند که شیوع ویروس کرونا در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی تأثیر منفی داشته است. افزایش قیمت بنزین و نبود پارکینگ در مقصد سفر، در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی تأثیر مثبت داشته است. همچنین افراد دارای خودروی شخصی نسبت به افراد فاقد خودروی شخصی کمتر از تاکسی اینترنتی استفاده کرده و پس از کرونا نیز میزان استفاده ی خود را بیشتر کاهش داده اند.

واژگان کلیدی: تاکسی اینترنتی، تقاضای سفر، مدل لوجیت رتبه یی، مدل لوجیت دوگانه، کرونا.

asef_kheyri@modares.ac.ir
armamdoohi@modares.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از راه های ترغیب دارندگان خودروهای شخصی به استفاده از خدمات حمل و نقل عمومی و اشتراکی، افزایش هزینه ی استفاده از خودروی شخصی از راه افزایش قیمت بنزین است. در ایران، در آبان سال ۱۳۹۸ مسئولان تصمیم به افزایش ۲۰۰ درصدی قیمت بنزین گرفتند که این عمل باعث تغییراتی در رفتار سفر مردم ایجاد کرد؛ بنابراین، در این راستا سؤال هایی در پرسش نامه پرسیده شده است تا اثر افزایش قیمت مذکور در رفتار سفر با تاکسی های اینترنتی بررسی شود.^[۵] همزمان با افزایش قیمت اخیر در ایران، ویروس کرونا در سراسر جهان انتشار یافته و ایران نیز مستثنی نبوده است و به دلیل ادامه ی بحران کوید - ۱۹، سیستم حمل و نقل شهری دچار تغییرات چشم گیری شده است. همچنین افزایش خطرهای مرتبط با مکان های شلوغ همراه با اقدام های فاصله گذاری اجتماعی در حمل و نقل عمومی و اشتراکی، احتمالاً در گزینه های معمول سفر مسافران (مانند: مترو، اتوبوس و دیگر شیوه های حمل و نقل) تأثیر می گذارد و انتظار می رود به دلایل ذکر شده، تمایل به استفاده از وسائط نقلیه ی عمومی و شبه عمومی کاهش یابد.^[۶]

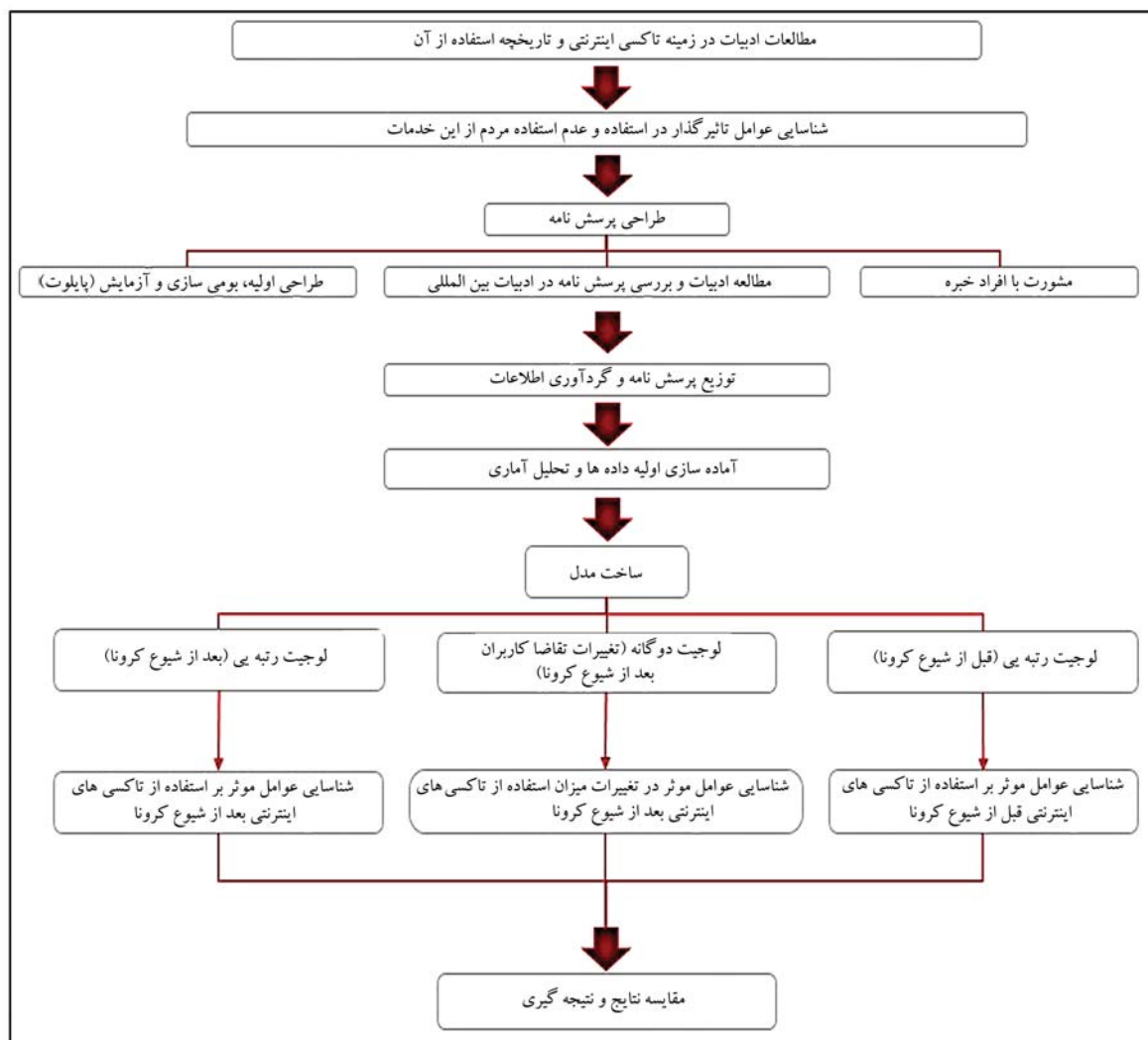
در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تاکسی اینترنتی به عنوان یک شیوه برای حمل و نقل درون شهری، تأثیرگذاری کوید - ۱۹ در میزان تقاضا برای شیوه ی تاکسی اینترنتی، بررسی و با مدل سازی عوامل مؤثر در میزان استفاده ی افراد قبل و بعد از شیوع کرونا و همچنین عوامل مؤثر در تغییر تمایل استفاده ی افراد از تاکسی های

با توجه به افزایش بی رویه ی استفاده از خودروی شخصی و افزایش سفرهای درون شهری و تردد خودروهای تک سرنشین در شهرها، مخصوصاً در کلان شهرهایی مثل تهران، امروزه مشکلات ترافیکی از اصلی ترین مشکلات مردم و مسئولان شهرها محسوب می شوند.^[۱] از این رو هر تلاشی که منجر به کاهش تعداد خودروهای تک سرنشین شود، می تواند در کاهش مشکلات ترافیکی و کاهش مصرف سوخت و آثار مخرب زیست محیطی آن تأثیرگذار باشد.^[۲] از طرفی برای رفع مشکلات اخیر، فقط افزایش ظرفیت و تأمین عرضه ی بیشتر نمی تواند بهترین گزینه تلقی شود؛ چرا که هزینه ی زیادی دارد و در مواردی افزایش عرضه می تواند منجر به افزایش تقاضا شود. بنابراین، یافتن پاسخ مناسب برای سؤال «چگونه می توان بدون صرف هزینه های گزاف مالی و زمانی، وضعیت ترافیک شهری را بهبود بخشید؟»، برای برنامه ریزان حمل و نقل حائز اهمیت است.^[۳] یکی از راه حل های موجود برای کاهش مشکلات ذکر شده، استفاده از حمل و نقل های عمومی و شبه عمومی یا اشتراکی مثل تاکسی های اینترنتی و تشویق مردم و دارندگان خودروهای شخصی به استفاده از خدمات اشاره شده است.^[۴]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱/۲۰، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۵

DOI:10.24200/J30.2022.59510.3057



شکل ۱. نمودار روند کلی انجام پژوهش.

درخواست سفر کنند. [۷] نرم افزار، مکان مسافر را به رانندگان نزدیک نشان می دهد و بعد از اینکه راننده یی درخواست را قبول کرد، مسافر مکان فعلی راننده و زمان تقریبی رسیدن آن را می بیند. نرم افزارهای مذکور، مسیریابی را به صورت خودکار به کمک سیستم موقعیت یاب جغرافیایی فراهم می کنند تا راننده های غیر آشنا نیز به سهولت بتوانند مقصد را بیابند. هزینه معمولاً به طور خودکار از حساب بانکی مسافر کسر و بین شرکت عرضه کننده ی تاکسی اینترنتی و راننده تقسیم می شود. قیمت ها به طور پویا و لحظه یی براساس میزان تقاضا و ترافیک تعیین می شود. راننده و مسافر بعد از پایان سفر به یکدیگر امتیاز می دهند که سیستمی مشوق برای رفتار مؤدبانه ی هر دو طرف به وجود می آورد. [۸]

محمدی و همکاران (۲۰۱۶)، با توجه به اینکه بخش عمده یی از مشکلات کلان شهرها به دلیل افزایش تعداد خودروهای شخصی تک سر نشین است، مطالعه یی با عنوان توسعه ی مدل لوجیت چندگانه ی هم پیمایی ارائه دادند که هدف از آن، شناسایی عوامل تأثیرگذار در تمایل استفاده از سیستم هم پیمایی در دانشگاه امیرکبیر بوده است. ایشان از طریق توزیع پرسشنامه و استفاده از مدل لوجیت چندگانه یک تابع مطلوبیت برای استفاده از سیستم هم پیمایی ارائه داده و دریافته اند که استفاده ی رایگان از پارکینگ دانشگاه و استفاده از پارکینگ های عمومی تأثیر منفی در تمایل

اینترنتی بررسی و مشخص شده است که افراد با چه ویژگی اقتصادی - اجتماعی، چگونه رفتاری خواهند داشت. پژوهش حاضر بر تاکسی های اینترنتی در کشورهای در حال توسعه تمرکز دارد که مطالعات بسیار اندکی در این زمینه دارند. ادبیات حاکی از آن است که بیشتر مطالعات انجام شده در مورد تاکسی اینترنتی^۱ در دنیای غرب، به ویژه در آمریکا متمرکز شده و مطالعات کمی درباره ی خدمات تاکسی اینترنتی در سایر نقاط جهان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، صورت گرفته است. به طور خلاصه، روند کلی انجام پژوهش در شکل ۱ مشاهده می شود.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

پیشرفت روزافزون فناوری های ارتباطی به خصوص اینترنت و تلفن همراه هوشمند، نرم افزارهای برخط^۲ و سیستم موقعیت یاب جغرافیایی (GPS)^۳ دسترسی به خدمات حمل و نقلی را ممکن ساخته است که با تقاضای کاربر در اختیارش قرار می گیرند. شرکت های ارائه دهنده ی خدمات تاکسی اینترنتی با کمک فناوری های نام برده این امکان را به مسافر می دهد تا به طور فوری، از طریق یک نرم افزار کاربردی تلفن همراه

افراد در استفاده از هم‌پیمایی دارد و گروه سنی ۴۱ تا ۵۰ سال تمایلی به استفاده از سیستم هم‌پیمایی نشان نمی‌دهند.^[۹]

پاروندا^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ی شرکت‌های تاکسی اینترنتی را با خدمات تاکسی اینترنتی سنتی در منطقه‌ی شهری مانیلا^۵ در فیلیپین بررسی کرده‌اند. شاخص‌های عملکردی کلیدی در مطالعه‌ی ایشان؛ شامل: سرعت سفر، قابلیت اطمینان، هزینه‌ی سفر و کیفیت خدمات بوده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در منطقه‌ی مورد بررسی، تاکسی اینترنتی از رقیب سنتی‌اش ارزان‌تر و قابل‌اطمینان‌تر بوده و سرعت بیشتری داشته است.^[۱۰] فلیپ^۶ و همکاران (۲۰۱۷)، برای بررسی تأثیر عوامل برون‌زای، اجتماعی - اقتصادی و متغیرهای جمعیت شناختی مؤثر در میزان استفاده از خدمات اشتراک خودرو، یک مدل رفتاری پروبیت دوگانه^۷ با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از نظرسنجی انجام گرفته در سال ۲۰۱۴ ساخته‌اند. نتایج مدل ایشان نشان داد که کاربران خدمات اشتراک خودرو را بیشتر جوان‌ها، تحصیل‌کرده‌ها، افراد شاغل و با درآمد بالا و کسانی که در مناطق متراکم‌تر هستند، تشکیل می‌دهند.^[۱۱]

کلیلو و میشر^۸ (۲۰۱۷)، گزارشی با عنوان آشفستگی در حمل‌ونقل پس از ورود تاکسی‌های اینترنتی منتشر و یافته‌های یک پرسشنامه‌ی جامع را که در ۷ شهر بزرگ در آمریکا انجام شده بود، تشریح کرده‌اند. نتایج گزارش شده به این شرح بوده است: بیشتر افرادی که جوان هستند و تحصیلات بالا و درآمد بالاتری دارند، از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند. اصلی‌ترین دلایل استفاده از تاکسی اینترنتی به‌جای خودروی شخصی عبارت‌اند از: ۱. نبود پارکینگ، ۲. گران بودن هزینه‌ی پارکینگ، و ۳. رفتن به فرودگاه و اصلی‌ترین دلایل استفاده نکردن از حمل‌ونقل عمومی و جایگزینی با تاکسی‌های اینترنتی عبارت‌اند از: ۱. کند بودن خدمات حمل‌ونقل عمومی، ۲. نبود تعداد ایستگاه کافی و ۳. شلوغ بودن و جمعیت زیاد.^[۱۲] عالمی^۹ و همکاران (۲۰۱۸)، نیز در مطالعه‌ی دیگری، عوامل مؤثر در استفاده‌ی افراد از تاکسی‌های اینترنتی را با استفاده از داده‌های حاصل از یک پرسشنامه‌ی جامع و ساخت مدل‌های لجیت دوگانه برای دو گروه سنی متفاوت بررسی کردند و دریافتند که جوانان، افراد با تحصیلات بالاتر، مسافرانی که اغلب از هواپیما استفاده می‌کنند و بیشتر سفرهایشان از نوع کاری با مسافت زیاد است، دوستداران محیط‌زیست، طرفداران تکنولوژی و کسانی که دارای تلفن همراه هوشمند هستند و کسانی که دست‌کم یکبار از این خدمات استفاده کرده‌اند، تمایل بیشتری به استفاده از تاکسی‌های اینترنتی دارند. همچنین مدل‌های آن‌ها نشان داد که افراد در مناطق با کاربری‌های مختلط و دسترسی بیشتر با خودرو تمایل بیشتری به استفاده از خدمات مذکور دارند.^[۱۳] صمدزاد و لستون^{۱۰} (۲۰۲۱)، نشان دادند که تاکسی اینترنتی به تنهایی یک شیوه‌ی حمل‌ونقل محسوب می‌شود. آن‌ها با استفاده از طراحی پرسشنامه و اطلاعات به‌دست آمده از آن اقدام به تجزیه و تحلیل آماری و مدل‌سازی لجیت به روش رتبه‌ی کردند و دریافتند عواملی، مانند: تلفن همراه هوشمند، دسترسی آسان به اینترنت، میزان درآمد افراد و نبود فضای پارکینگ در مقصد، در استفاده‌ی بیشتر از خدمات تاکسی اینترنتی تأثیرگذار است. کارمندان زن و دانشجویان بیشتر از دیگران از خدمات تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند. نبود فضای پارکینگ در مقصد در استفاده‌ی افراد اثر مثبت دارد و تاکسی اینترنتی به دلیل سریع بودن و راحتی بیشتر، یک شیوه‌ی جایگزین برای تاکسی‌های دیگر و خدمات حمل‌ونقل عمومی است.^[۱۴] تاکور^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰)، برای ارزیابی ماهیت احتمالی جابه‌جایی شیوه‌ی حمل‌ونقلی تحت تأثیر کوید - ۱۹، یک نظرسنجی برخط انجام دادند و پاسخ‌دهندگان به سؤال‌هایی مربوط به سفرهای کاری، خرید، خرید برخط مواد غذایی، و تحویل غذا، قبل و بعد از کرونا پاسخ دادند. نتایج ایشان نشان داد که حدود ۳۵٪ از پاسخ‌دهندگان

اظهار کرده‌اند که احتمالاً روش حمل‌ونقل خود را برای سفرهای کاری پس از کرونا تغییر می‌دهند. کاهش چشمگیری در استفاده از خدمات اتوبوس و مترو گزارش شده و انواع شیوه‌های حمل‌ونقل اشتراکی نیز کاهش یافته است. انتظار می‌رود این کار به سمت استفاده از وسائط نقلیه‌ی شخصی و حمل‌ونقل عمومی متوسط (IPT)^{۱۲} مانند تاکسی‌ها و ... سوق یابد و همچنین سهم حالت‌های غیرموتوری نیز ممکن است افزایش یابد.^[۱۵]

آچامونگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰)، نشان دادند که قبل از کرونا، کاربران تاکسی اینترنتی معمولاً برای جابه‌جایی از یک مبدأ به یک مقصد، از شیوه‌ی حمل‌ونقلی تاکسی اینترنتی در ترکیب با دیگر شیوه‌های حمل‌ونقلی استفاده می‌کردند، اما در طی همه‌گیری کرونا، الگوی اخیر تغییر کرده و برای جابه‌جایی از یک مبدأ به یک مقصد، به‌طور کامل از خدمات تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند.^[۱۵]

نیان^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۰)، نیز تأثیر کوید - ۱۹ را در فعالیت‌های اجتماعی و رفتار سفر مردم در استفاده از تاکسی‌های اینترنتی به تفکیک اهداف سفر با استفاده از مدل SLM^{۱۵} از جنبه‌های متفاوت و زمان‌های مختلف (قبل و بعد از کرونا) بررسی کرده و دریافت‌اند که تعداد سفرها با تاکسی به شدت کاهش پیدا کرده و در مقابل، به علت کاهش ترافیک شهری، سرعت سفر و زمان سفر به ترتیب بعد از شیوع کرونا افزایش و کاهش یافته است.^[۱۶] ماهرو همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ی عوامل مؤثر در تغییر تمایل استفاده از تاکسی‌های اینترنتی را در شرایط کرونا با استفاده از طراحی پرسشنامه و پرسشگری برخط و ساخت مدل لجیت رتبه‌ی تحلیل و بررسی کردند و نشان دادند که جهت‌گیری سیاسی و تجربه‌های مرتبط با سلامت در دوران همه‌گیری از مهم‌ترین عوامل تغییرات تمایل استفاده از خدمات تاکسی‌های اینترنتی بوده است؛ به‌علاوه‌ی اینکه سن و درآمد در مدل‌های آن‌ها به گونه‌ی معنادار شده است که با افزایش سن و درآمد، میزان استفاده کاهش یافته است. آن‌ها همچنین نشان دادند که کاربران حمل‌ونقل عمومی در شرایط کرونا، تمایل بیشتری به استفاده از تاکسی‌های اینترنتی نسبت به کاربران استفاده‌کننده از خودروی شخصی از خود نشان داده‌اند.^[۱۷]

۳. روش‌شناسی پژوهش

در بخش حاضر، به مبانی نظری مدل لجیت دوگانه و لجیت رتبه‌ی و روش پرداخت آن‌ها پرداخته شده است. مدل‌های انتخاب گسسته به علت ماهیت رفتاری و در نظر گرفتن مطلوبیت به‌عنوان یک متغیر تصادفی، قابلیت بالایی برای مدل‌سازی رفتار انسانی در انتخاب دارند. مدل‌های انتخاب گسسته را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: مدل‌های رتبه‌ی و مدل‌های غیررتبه‌ی.^[۱۸]

عمومی‌ترین چارچوب تئوریک برای ایجاد مدل‌های انتخاب گسسته، تئوری مطلوبیت تصادفی است که در ادامه، فرض‌های آن مطرح شده است:^[۱۹]

۱. افراد متعلق به یک جمعیت داده شده‌ی Q ، گزینه‌ی را انتخاب می‌کنند که مطلوبیت آن‌ها را بیشینه می‌سازد.
۲. مجموعه‌ی معین $A = \{A_1, \dots, A_j, \dots, A_N\}$ از گزینه‌های موجود و مجموعه‌ی X به‌عنوان بردار ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری اشخاص وجود دارد.
۳. هر گزینه‌ی $A_j \in A$ دارای خالص مطلوبیت U_{jq} برای شخص q است. U_{jq} مطابق با رابطه‌ی ۱ متشکل از یک قسمت قابل اندازه‌گیری (V_{jq}) که تابعی از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری X و قسمت دیگر جزء تصادفی (ε_{jp}) است که شامل خصوصیات و سلیقه‌های خاص هر فرد است که دیده نشده و خطای

۲.۳. مدل های رتبه‌ی انتخاب گسسته

با توجه به نوع متغیر وابسته که به صورت گسسته و رتبه‌ی تعریف شده است، از مدل رتبه‌ی جهت شناسایی عوامل مؤثر در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی استفاده شده است. فرضیه‌ی اساسی مدل های انتخاب رتبه‌ی آن است که یک متغیر پیوسته‌ی غیر قابل مشاهده که متغیر نهانی نامیده می‌شود، میزان تمایل فرد به گزینه‌ی مورد نظر را نشان می‌دهد. در مقابل، آنچه که مشاهده می‌شود، انعکاسی از تمایل نهانی مذکور است که به صورت یک متغیر گسسته تعریف می‌شود. مدل های رتبه‌ی به دو شکل کلی لوجیت و پروبیت مطرح می‌شوند و به صورت رابطه‌ی ۹ هستند:

$$Y_i = \beta X_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

که در آن، Y_i متغیر وابسته‌ی غیر قابل مشاهده از نوع فاصله‌ی مربوط به مشاهده‌ی i که اولویت گزینه‌ی مورد نظر را تعیین می‌کند، X_i بردار ویژگی‌های مرتبط با مشاهده‌ی i ، β بردار ضرایب مدل و ε_i قسمت تصادفی مشاهده‌ی i است. حال فرض می‌شود که Z_i واکنش قابل اندازه‌گیری از نوع رتبه‌ی مربوط به مشاهده‌ی i و متناظر Y_i است و دارای M گروه واکنش $R_1, R_2, \dots, R_M$ و منتج از متغیر Y_i به صورت رابطه‌ی ۱۰ است. فرض می‌شود $M + 1$ عدد حقیقی $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_M$ با این شرایط وجود دارند:

$$\mu_0 \leq \mu_1 \leq \dots \leq \mu_M \quad (10)$$

$$Z_i \in R_j \Leftrightarrow \mu_{j-1} \leq Y_i \leq \mu_j, \quad 1 \leq j \leq M$$

که در آن، μ_j آستانه‌ی بالای گروه واکنشی j است که Z_i و مقدار آن را تعیین می‌کند. از آنجا که Z_i رتبه‌ی است، می‌تواند به صورت مجموعه‌ی از متغیرهای ساختگی مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف شود:

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & Z_i \in R_j \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad 1 \leq j \leq M \quad (11)$$

$$Z_{ij} = 1 \Leftrightarrow \mu_{j-1} \leq Y_i \leq \mu_j \Leftrightarrow \mu_{j-1} \leq \sum_k \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \leq \mu_j \Leftrightarrow \frac{(\mu_{j-1} - \sum_k \beta_k X_{ki})}{\sigma} \leq \frac{\varepsilon_i}{\sigma} \leq \frac{(\mu_j - \sum_k \beta_k X_{ki})}{\sigma} \quad (12)$$

که در آن، $k = 0, 1, \dots, K$ نشان‌دهنده‌ی k ویژگی گزینه و σ انحراف معیار ε_i است. اگر ε_i دارای توزیع لجستیک باشد، مدل لوجیت رتبه‌ی و چنانچه دارای توزیع نرمال باشد، مدل پروبیت رتبه‌ی حاصل می‌شود. لوجیت رتبه‌ی به صورت رابطه‌ی ۱۳ است:

$$pr(Z_{ij} = 1) = pr(Z_{ij} \in R_j) = F\left(\frac{\mu_j - \sum_k \beta_k X_{ki}}{\sigma}\right) - F\left(\frac{\mu_{j-1} - \sum_k \beta_k X_{ki}}{\sigma}\right) \quad (13)$$

که در آن، تابع توزیع تجمعی لجستیک به صورت $(1 + e^{-t})^{-1}$ است. پروبیت رتبه‌ی با فرض و رعایت شرایط کلی در حالت $\sigma = 1$ ، به صورت رابطه‌ی ۱۴ است:

$$pr(Z_{ij} = 1) = pr(Z_{ij} \in R_j) = \varphi\left(\frac{\mu_j - \sum_k \beta_k X_{ki}}{\sigma}\right) - \varphi\left(\frac{\mu_{j-1} - \sum_k \beta_k X_{ki}}{\sigma}\right) \quad (14)$$

حاصل از مدل سازی است. بدون از دست دادن کلیت، می‌توان ε را یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و با یک توزیع احتمالی مشخص در نظر گرفت.

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (1)$$

۴. فرد مشخص q ، گزینه‌ی با بیشترین مطلوبیت را انتخاب می‌کند. یعنی اینکه فرد گزینه‌ی A_j را انتخاب می‌کند، اگر و فقط اگر رابطه‌ی ۲ برقرار باشد:

$$U_{jq} \geq U_{iq}, \forall A(q) \quad (2)$$

بنابراین با توجه به رابطه‌ی $V_{jq} - V_{iq} \geq \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq}$ ، رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت:

$$P_{jq} = p\{\varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq} \leq V_{jq} - V_{iq}, \forall A_i \in A(p)\} \quad (3)$$

۱.۳. مدل لوجیت دوگانه

برای شناسایی عوامل مؤثر در اختلاف میزان استفاده‌ی کاربران تاکسی اینترنتی قبل و بعد از شیوع کرونا، از مدل لوجیت دوگانه استفاده شده است. با فرض توزیع گامبل برای جزء تصادفی ε تفاضل آن دارای توزیع لجستیک است و در این حالت، تابع احتمال انتخاب، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین مدل انتخاب گسسته را که همان مدل لوجیت (دوگانه یا چندگانه) است، نتیجه می‌دهد. در این حالت احتمال انتخاب گزینه‌ی j توسط فرد q به صورت رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$P_{jq} = \frac{\exp(\beta V_{jq})}{\sum_{A_i \in A(q)} \exp(\beta V_{iq})} \quad (4)$$

که در آن، تابع مطلوبیت نسبت به ویژگی‌ها به صورت خطی تعریف می‌شود و پارامتر β انحراف استاندارد توزیع گامبل مطابق رابطه‌ی ۵ است:

$$\beta = \frac{\pi}{\sigma \sqrt{\sigma}} \quad (5)$$

هدف از پرداختن به مدل‌ها، یافتن ضرایب متغیرهای توصیفی تابع مطلوبیت است. در این راستا، روش‌های متعددی برای یافتن ضرایب وجود دارد و از جمله روش‌های مرسوم، برآورد درست‌نمایی بیشینه است. در روش مذکور، تابع $L(\beta)$ که حاصل ضرب احتمال انتخاب هر گزینه است، به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$L(\beta) = \prod_{q=1}^Q \prod_{j=1}^N (P_{jp})^{y_{jq}} \quad (6)$$

که در آن، N تعداد مشاهدات در نمونه‌ی مورد نظر، P_{jq} انتخاب گزینه‌ی j توسط فرد q است. متغیر y_{jq} به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$y_{jq} = \begin{cases} 1 & \text{اگر شخص } q \text{ گزینه } j \text{ را انتخاب کند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (7)$$

ضرایب در روش مذکور به صورتی برآورد می‌شود که احتمال وقوع همزمان مشاهدات، بیشینه شود. معمولاً جهت سادگی محاسبات ریاضی در تحلیل‌ها، از لگاریتم $L(\beta)$ به صورت رابطه‌ی ۸ استفاده می‌شود:

$$LL(\beta) = \ln L(\beta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^N y_{jq} \ln(p_{jp}) \quad (8)$$

حال برای بیشینه ساختن مقدار تابع $LL(\beta)$ ، مشتقات جزئی آن نسبت به هر یک از ضرایب برابر صفر قرار داده می‌شود.^[۱۹]

است، که سطوح مختلف استفاده از تاکسی اینترنتی را به صورت رتبه‌بی نشان می‌دهد. در جدول ۱، آمار توصیفی میزان استفاده‌ی کاربران از تاکسی اینترنتی ارائه شده است. در شکل ۲، نیز فراوانی مطلق میزان استفاده‌ی افراد به تفکیک گزینه مشاهده می‌شود. با توجه به محدودیت داده‌ها و کمبود فراوانی در بعضی از گزینه‌ها، برای اینکه مدل واریانس کمتری را تخمین بزند و دقت بالاتری داشته باشد، سطوح جدیدی برای رتبه‌بندی میزان استفاده‌ی افراد تعریف شده است، که در جدول ۱ با عنوان کد جدید ارائه شده است.

طبق اطلاعات جدول ۱، با توجه به اینکه میانگین میزان استفاده‌ی کاربران قبل از کرونا ۳/۲۸ بوده است، درحالی که میانگین استفاده‌ی کاربران بعد از کرونا به ۲/۳۸ تقلیل یافته است. همچنین افزایش سهم گزینه‌ی «استفاده نکردم» از ۴/۷ به ۲۴ درصد، نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان استفاده‌ی کاربران از خدمات تاکسی اینترنتی بعد از کروناست.

برای ارزیابی عوامل مؤثر در تغییرات میزان استفاده از تاکسی‌های اینترنتی بعد و قبل از کرونا نیز متغیر مجازی جدید مطابق رابطه‌ی ۱۷ تعریف شده است که از اختلاف میزان استفاده‌ی کاربران بعد از کرونا و قبل از کرونا به دست می‌آید و کاربران را به دو قسمت تقسیم می‌کند: ۱. کاربرانی که میزان استفاده‌ی خود را بعد از کرونا کاهش داده‌اند؛ و ۲. کاربرانی که میزان استفاده‌ی خود را تغییر نداده و یا افزایش داده‌اند که این متغیر برای مدل‌سازی لوجیت دوگانه استفاده شده است.

(۲۰) (میزان استفاده‌ی قبل از کرونا) - (میزان استفاده در حال حاضر) = Y_2

در جدول ۲، آمار توصیفی تغییرات میزان استفاده‌ی کاربران بعد از کرونا ارائه شده است. مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود که بعد از شیوع ویروس کرونا، ۳۴/۳ از کاربران، میزان استفاده‌ی خود از تاکسی اینترنتی را تغییر نداده‌اند، ۱۴/۵ از آن‌ها میزان استفاده‌ی خود را افزایش داده‌اند و ۵۱/۲ درصد از کاربران میزان استفاده‌ی خود را از خدمات تاکسی اینترنتی کاهش داده‌اند. بررسی مشخصات فردی و اقتصادی - اجتماعی پاسخ‌دهندگان نشان می‌دهد که ۱۴۳ نفر از آنان مرد و ۹۰ نفر زن بوده‌اند. بیشتر پاسخ‌دهندگان از نظر تأهل، مجرد (۶۰٪) بوده‌اند. بیشینه‌ی پاسخ‌دهندگان دارای تحصیلات دانشگاهی و جوانان ۲۳ تا ۴۰ سال بوده‌اند. تمام پاسخ‌دهندگان، نیز دارای تلفن همراه هوشمند بوده و توانایی استفاده از آن و اینترنت را داشته‌اند. بنابراین مشخص است که داشتن تلفن همراه هوشمند و توانایی کار با اینترنت، لازمه و پیش‌نیاز استفاده‌ی افراد از تاکسی اینترنتی است. در جدول ۳، آمار توصیفی برخی از مهم‌ترین مشخصات اقتصادی - اجتماعی کاربران تاکسی اینترنتی ارائه شده است. نتایج توصیفی نظرات کاربران در مورد ویژگی‌ها و خصوصیتی از

که در آن، $\varphi(t)$ نشان‌دهنده‌ی تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است. به علاوه، می‌توان فرض کرد که $\mu_0 = -\infty$ و $\mu_M = +\infty$ را برابر صفر در نظر گرفت.^[۲۰] برای برآورد پارامترهای مدل از روش درست‌نمایی بیشینه استفاده می‌شود. جهت سهولت روابط ۱۵ و ۱۶ لحاظ شده است:

$$y_{ij} = \mu_j - \sum_k \beta_k X_{ki} \quad (15)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi(y_{ij}) \quad (16)$$

بنابراین رابطه‌ی ۱۳ را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۷ نوشت:

$$pr(Z_{ij} = 1) = \varphi_{ij} - \varphi_{ij-1} \quad (17)$$

حال تابع درست‌نمایی به صورت رابطه‌ی ۱۸ تعریف می‌شود:

$$L(\beta) = L(Z | \beta_0, \dots, \beta_k, \mu_1, \dots, \mu_{M-1}) \\ = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^M (\varphi_{ij} - \varphi_{ij-1})^{Z_{ij}} \quad (18)$$

با توجه به اینکه بیشینه‌سازی تابع اخیر مشکل است، از لگاریتم تابع $L(\beta)$ یعنی تابع لگاریتم احتمال (مطابق رابطه‌ی ۱۶) استفاده می‌شود (مک‌لوی، ۱۹۹۳).

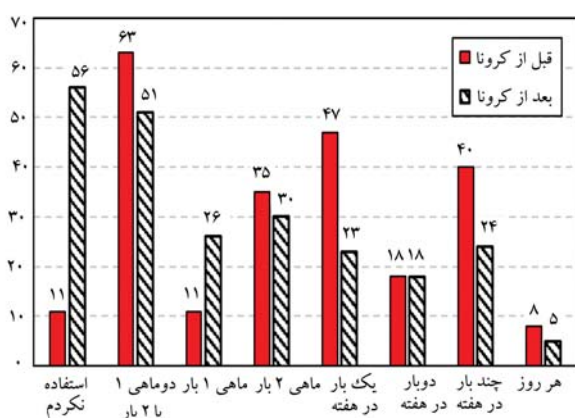
$$LL(\beta) = \ln(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M Z_{ij} \ln(\varphi_{ij} - \varphi_{ij-1}) \quad (19)$$

تابع اخیر در روش درست‌نمایی بیشینه، نقش اساسی دارد و ضوابط ارزیابی نیز بر مبنای همین تابع و مقادیر آن برای شرایط خاص تعریف می‌شوند؛ مانند: تابع لگاریتم احتمال برای ضرایب صفر و در شرایط هم‌گرایی، یعنی $LL(0)$ و $LL(\beta)$.

۴. گردآوری داده

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش حاضر و راستی‌آزمایی فرضیه‌ی تأثیرگذار بودن کوید - ۱۹ در میزان استفاده از تاکسی‌های اینترنتی، اقدام به طراحی پرسش‌نامه به صورت رجحان آشکار و توزیع آن بین کاربران تاکسی‌های اینترنتی به صورت برخط در مهرماه سال ۱۳۹۹ شده است. تعداد داده‌های موردنیاز با روش شارل کوکران با مقدار خطای مجاز به میزان ۰/۰۶۵ و با اطمینان ۹۵٪، حداقل ۲۲۷ داده به دست آمده است.^[۲۱] درنهایت، پس از تحلیل آماری ۲۳۳ داده‌ی حاصل از پرسشگری (تحلیل آمار توصیفی)، با استفاده از ساخت مدل‌های لوجیت رتبه‌بی و لوجیت دوگانه به کمک نرم‌افزار N-Logit، فرضیه‌ی مذکور بررسی و عوامل مؤثر در افزایش و کاهش تمایل افراد برای استفاده از تاکسی اینترنتی تعیین شده است. پرسشنامه‌ی طراحی شده، شامل ۳ بخش اصلی بوده است: ۱. ویژگی‌های فردی و اقتصادی - اجتماعی، مانند: سن، جنسیت، وضعیت تأهل، تعداد خودروی شخصی در خانوار، میزان تحصیلات، شغل و وضعیت درآمد؛ ۲. ویژگی‌های سفر، مانند: اهداف سفر معمول کاربران با تاکسی اینترنتی و میزان استفاده از تاکسی اینترنتی قبل و بعد از کرونا؛ و ۳. نظر کاربران در مورد ویژگی‌ها و خصوصیتی از خود و تاکسی‌های اینترنتی که باعث افزایش و کاهش استفاده‌ی آن‌ها از خدمات مذکور شده است.

پرسش اصلی که مدل‌سازی شده است، عبارت است از: «به چه میزان از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنید (قبل از کرونا و بعد از کرونا)؟»، که پاسخ آن در دو قسمت برای میزان استفاده‌ی قبل و بعد از کرونا به صورت چندگزینه‌بی طرح شده



شکل ۲. نمودار فراوانی مطلق میزان استفاده‌ی کاربران از تاکسی اینترنتی.

جدول ۱. میزان استفاده‌ی کاربران از تاکسی اینترنتی.

مشخصه	گزینه	کد	فراوانی نسبی (درصد)	میانگین	انحراف معیار	کد جدید	فراوانی نسبی (درصد)
استفاده نکردم	۰	۴/۷	۳۱/۷۵	۰			
دو ماهی ۱ یا ۲ بار	۱	۲۷					
ماهی ۱ بار	۲	۴/۷	۱۹/۷۴	۱			
ماهی ۲ بار	۳	۱۵					
یک بار در هفته	۴	۲۰/۲	۲۷/۹۰	۲	۲/۰۲۴		
دو بار در هفته	۵	۷/۷					
چند بار در هفته	۶	۱۷/۲	۲۰/۶۰	۳			
هر روز	۷	۳/۴					
جمع	-	-	۱۰۰	-			
استفاده نکردم	۰	۲۴	۴۵/۹۲	۰			
دو ماهی ۱ یا ۲ بار	۱	۲۱/۹					
ماهی ۱ بار	۲	۱۱/۲	۲۴/۰۳	۱	۲/۱۱۲		
ماهی ۲ بار	۳	۱۲/۹					
یک بار در هفته	۴	۹/۹	۱۷/۵۹	۲			
دو بار در هفته	۵	۷/۷					
چند بار در هفته	۶	۱۰/۳	۱۲/۴۴	۳			
هر روز	۷	۲/۱					
جمع	-	-	۱۰۰	-			

جدول ۲. آمار توصیفی تغییرات میزان استفاده از تاکسی اینترنتی.

تغییرات نسبت به قبل از کرونا	فراوانی		توضیحات	فراوانی نسبی (درصد)	میانگین	انحراف معیار
	مطلق	نسبی (درصد)				
+۴	۱	۰/۴	افزایش	۱۴/۵		
+۳	۴	۱/۷	میزان			
+۲	۷	۳	استفاده			
+۱	۲۲	۹/۴				
۰	۸۰	۳۴/۳	بدون تغییر	۳۴/۳		
-۱	۵۵	۲۳/۶	کاهش	۵۱/۲		۱/۷۷۷
-۲	۲۱	۹				
-۳	۲۳	۹/۹				
-۴	۹	۹/۳				
-۵	۶	۲/۶				
-۶	۵	۲/۱				
جمع	۲۳۳	۱۰۰	-	۱۰۰		



شکل ۳. نقش ویژگی‌های عملکردی سیستم و نگرشی کاربران برای استفاده از تاکسی اینترنتی.



شکل ۴. نقش ویژگی‌های عملکردی سیستم و نگرشی کاربران برای استفاده از تاکسی اینترنتی.

جدول ۳. مشخصات اقتصادی - اجتماعی کاربران تاکسی اینترنتی.

مشخصه	گزینه	فراوانی	
		مطلق	نسبی (درصد)
سن	زیر ۱۸ سال	۳	۱/۳
	۱۹ تا ۲۲ سال	۲۴	۱۰/۳
	۲۳ تا ۲۵ سال	۵۸	۲۴/۹
	۲۶ تا ۳۰ سال	۷۱	۳۰/۵
	۳۱ تا ۴۰ سال	۴۱	۱۷/۶
	۴۱ تا ۵۰ سال	۲۸	۱۲/۰
	۵۱ تا ۶۰ سال	۵	۲/۱
	۶۱ تا ۷۰ سال	۳	۱/۳
	۷۱ سال به بالا	۰	۰
	جمع	۲۳۳	۱۰۰
وضعیت درآمد	زیر ۳/۵ میلیون تومان (سطح یک)	۷۸	۳۳/۵
	۳/۵ تا ۵ میلیون تومان (سطح دو)	۷۳	۳۱/۳
	بالای ۵ میلیون (سطح سه)	۸۲	۳۵/۲
	جمع	۲۳۳	۱۰۰

خود و تاکسی‌های اینترنتی که باعث افزایش و کاهش استفاده‌ی ایشان از خدمات مذکور شده است، در شکل‌های ۳ الی ۵ مشاهده می‌شود.

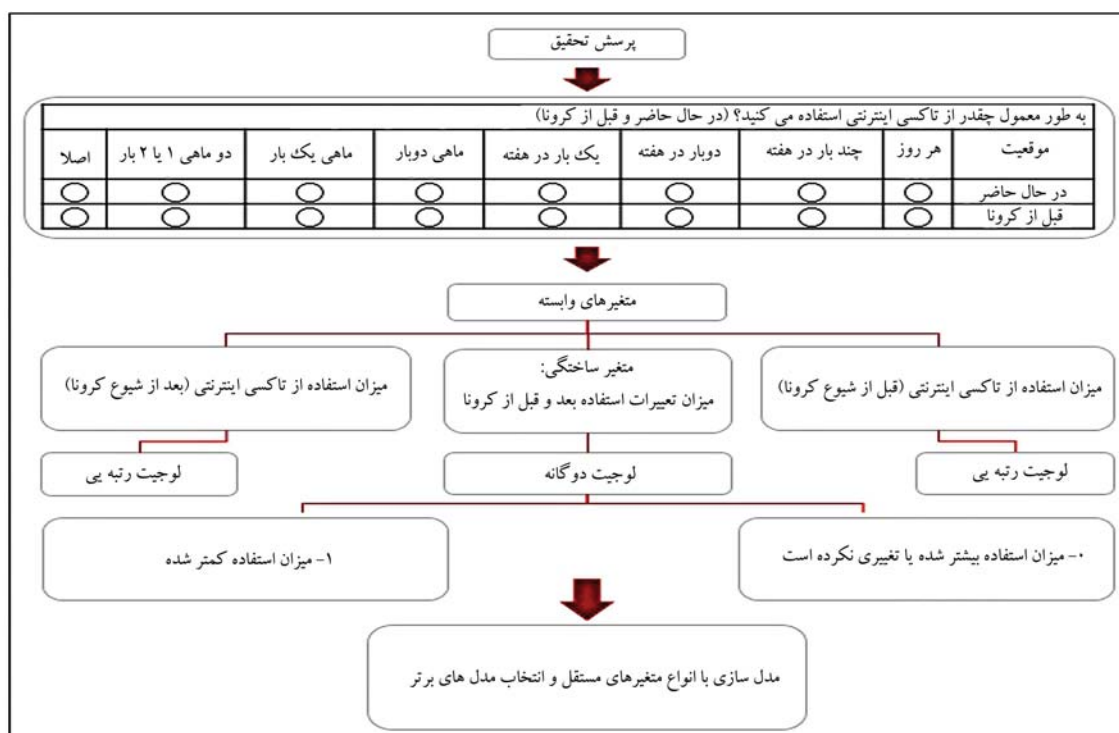
در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که عواملی مانند: امنیت، راحتی، ارزانی، سریع بودن، خدمات شبانه، اعتماد به شرکت‌های تاکسی اینترنتی و وجود شرایط سخت‌گیرانه‌ی استخدام رانندگان از جمله مهم‌ترین علت‌های استفاده‌ی کاربران از تاکسی‌های اینترنتی بوده است. در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود که عواملی مانند: ویروس کرونا و فاصله‌گذاری اجتماعی، داشتن خودروی شخصی، گران بودن و طول کشیدن زمان انتظار تا پذیرش درخواست و رسیدن تاکسی، از جمله مهم‌ترین علت‌های استفاده نکردن افراد از تاکسی‌های اینترنتی بوده است.

۵. نتایج مدل‌سازی

به‌طور خلاصه، روند کلی انجام مدل‌سازی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، در مطالعه‌ی حاضر، دو نوع متغیر وابسته تعریف شده است، متغیر میزان استفاده از تاکسی اینترنتی قبل و بعد از کرونا و متغیر تغییرات میزان استفاده از تاکسی اینترنتی بعد از کرونا که به علت طبیعت و نوع داده‌های گردآوری شده جهت جامعیت مدل‌سازی برای متغیرهای نوع اول از مدل‌های لوجیت رتبه‌ی و برای متغیر نوع دوم از مدل لوجیت دوگانه استفاده شده است. در این راستا، مدل‌های متعددی ساخته



شکل ۵. نقش ویژگی های عملکردی سیستم و نگرشی کاربران برای استفاده نکردن از تاکسی اینترنتی.



شکل ۶. نمودار روند کلی انجام مدل سازی.

شده است که از میان آن ها مدل های ارائه شده در جدول های ۴، ۵ و ۷ برگزیده ۲. ضریب متغیر نداشتن خودروی شخصی، علامت مثبت دارد. یعنی نداشتن خودروی شخصی با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه ی مستقیم دارد.

۳. ضریب متغیر قشر اجتماعی با درآمد سطح یک، علامت منفی دارد. یعنی مسافران با درآمد زیر ۳/۵ میلیون تومان (کم درآمدتر)، نسبت به سایرین کمتر از تاکسی اینترنتی استفاده می کنند؛ بنابراین درآمد کم با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه ی معکوس دارد.

۴. ضریب متغیر گران بودن کرایه، علامت منفی دارد. یعنی مسافرانی که معتقد به گرانی کرایه ی تاکسی اینترنتی هستند، کمتر از سایرین از تاکسی اینترنتی استفاده می کنند؛ بنابراین گرانی کرایه با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه ی معکوس دارد.

۱.۵. نتایج پرداخت مدل لوجیت رتبه یی قبل از کرونا

نتایج پرداخت مدل لوجیت رتبه یی قبل از کرونا در جدول ۴ ارائه شده است که جهت ساخت آن، متغیر وابسته میزان استفاده ی افراد از تاکسی اینترنتی قبل از کروناست که در جدول ۱ با عنوان کد جدید، تعریف و رتبه بندی شده است.

۱. مثبت بودن ضرایب متغیرهای هدف سفرهای تفریحی، کاری و تحصیلی با تاکسی اینترنتی نشان می دهد مسافرانی که معمولاً به ترتیب دارای هدف های مذکور هستند، نسبت به سایرین بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده می کنند.

جدول ۴. نتایج پرداخت مدل لوجیت رتبه‌ی قبل از کرونا.

تعریف متغیر	متغیر	سطح معناداری
هدف سفر کاری	*** ۰/۲۵۷۷	۰/۰۰۰۲
هدف سفر تفریحی	*** ۰/۳۱۹۲	۰/۰۰۰۱
هدف سفر تحصیلی	** ۰/۱۷۶۲	۰/۰۲۵۸
نداشتن خودروی شخصی	*** ۰/۲۳۵۲	۰/۰۰۰۵
درآمد سطح یک (زیر ۳/۵ میلیون تومان)	* — ۰/۴۲۸۳	۰/۰۹۹۸
گزارن بودن کرایه	* — ۰/۱۴۷۹	۰/۰۶۱۷
مدرک فوق لیسانس به بالا داشتن	*** — ۰/۷۱۴۹	۰/۰۰۰۶۳
$LL(0)$		-۳۱۸/۳۲
$LL(\beta)$		-۲۸۳/۶۴
ρ^2		۰/۱۰۹

جدول ۵. نتایج پرداخت مدل لوجیت رتبه‌ی بعد از کرونا.

تعریف متغیر	متغیر	سطح معناداری
هدف سفر کاری	*** ۰/۲۹۳	۰/۰۰۰۱
هدف سفر تفریحی	** ۰/۱۹۹	۰/۰۱۷۴
ویروس کرونا	*** — ۱/۲۷۴	۰/۰۰۰۰
نداشتن خودروی شخصی	*** ۰/۳۶۱	۰/۰۰۰۰
درآمد سطح یک (زیر ۳/۵ میلیون تومان)	*** ۰/۸۷۶	۰/۰۰۰۳۳
نبود پارکینگ در مقصد	* ۰/۱۴۰	۰/۰۶۴۶
مدرک فوق لیسانس به بالا داشتن	** — ۰/۶۸۷	۰/۰۱۳۲
$LL(0)$		-۲۹۴/۷۷
$LL(\beta)$		-۲۳۳/۶۷
ρ^2		۰/۲۴۱

جدول ۶. تعریف متغیر وابسته‌ی لوجیت دوگانه‌ی تغییرات تقاضا.

تغییرات	فراوانی نسبی (درصد)	کد جدید	توضیحات	فراوانی نسبی (درصد)
+۴	۰/۴۳			
+۳	۱/۷۱		مسافری که میزان	
+۲	۳/۰۰	۰	استفاده خود را افزایش	۴۸/۹۳
+۱	۹/۴۴		دادند یا تغییری ندادند	
۰	۳۴/۳۳			
تغییرات	فراوانی نسبی (درصد)	کد جدید	توضیحات	فراوانی نسبی (درصد)
-۱	۲۳/۶			
-۲	۹/۰۱		مسافری که میزان	
-۳	۹/۸۷	۱	استفاده خود را کاهش	۵۱/۰۷
-۴	۳/۸۶		دادند	
-۵	۲/۵۷			
-۶	۲/۱۴			

جدول ۷. نتایج پرداخت مدل لجیت دوگانه‌ی تغییرات تقاضا.

تعریف متغیر	ضریب	سطح معناداری
ویروس کرونا	۰/۸۱۲/***	۰/۰۰۰۱
نداشتن خودروی شخصی	۰/۱۷۹۴/***	۰/۰۰۷۶
تأثیر افزایش قیمت بنزین	۰/۶۲۵۵/**	۰/۰۱۷۹
کارمند خصوصی یا دولتی بودن	۰/۷۸۰۱/**	۰/۰۲۲۲
هدف سفر تحصیلی	۰/۱۲۹۸/	۰/۱۴۹۶
$LL(0)$	-۱۶۱/۴۴۹	
$LL(\beta)$	-۱۲۹/۱۴۱	
ρ^2	۰/۲۰۰	

جدول ۸. اثر حاشیه‌یی متغیرهای توضیحی در مدل لجیت دوگانه.

متغیر	اثر حاشیه‌یی
نداشتن خودروی شخصی	۰/۰۳۳۵/
ویروس کرونا	۰/۱۵۱۷/
افزایش قیمت بنزین	۰/۱۱۷۰/
کارمند خصوصی یا دولتی بودن	۰/۱۴۵۶/
هدف سفر تحصیلی	۰/۰۲۴۲/

۱. ضریب متغیر تأثیر ویروس کرونا در تغییرات میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، علامت مثبت دارد. یعنی شیوع کرونا باعث شده است که مسافران نسبت به قبل، کمتر از تاکسی اینترنتی استفاده کنند.

۲. ضریب متغیر نداشتن خودروی شخصی در تغییرات میزان استفاده از آن، علامت منفی دارد. یعنی مسافرانی که امکان استفاده از خودروی شخصی را ندارند، نسبت به دیگران، تمایل کمتری به کاهش میزان استفاده‌ی خود از تاکسی اینترنتی نشان داده و میزان استفاده‌ی خود را نسبت به قبل یا افزایش داده و یا تغییری نداده‌اند.

۳. ضریب متغیر افزایش قیمت بنزین در تغییرات میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، دارای علامت منفی است. یعنی افزایش قیمت بنزین باعث استفاده‌ی بیشتر افراد از خدمات تاکسی اینترنتی شده و همچنین از کاهش استفاده‌ی مسافران از خدمات مذکور جلوگیری کرده است.

۴. ضریب متغیر تأثیر کارمند سازمان دولتی یا خصوصی بودن در تغییرات میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، علامت منفی دارد. یعنی بعد از کرونا، مسافرانی که کارمند بوده‌اند، نسبت به سایرین تمایل کمتری به کاهش میزان استفاده خود از تاکسی اینترنتی نشان داده و میزان استفاده‌ی خود را نسبت به قبل یا افزایش داده و یا تغییری نداده‌اند.

۵. با توجه به اینکه ضریب متغیر هدف سفر تحصیلی در مدل معنادار نشده است (سطح معناداری ۰/۱۵/)، می‌توان بیان کرد که هدف سفر تحصیلی در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی تأثیر نداشته است. با توجه به اینکه بعد از شیوع کرونا، بیشتر آموزش‌های حضوری لغو و به صورت غیرحضوری و مجازی تشکیل شده‌اند، نتیجه‌ی اخیر منطقی است.

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل لجیت دوگانه‌ی تغییرات تقاضا در جدول ۷، اثر حاشیه‌یی برای متغیرهای مختلف توضیحی مدل مذکور در جدول ۸ ارائه شده است.

۱. نداشتن خودروی شخصی نسبت به داشتن خودروی شخصی باعث ۰/۰۳۳۵ درصد کاهش میزان تغییرات استفاده از تاکسی اینترنتی شده است. یعنی باعث استفاده‌ی بیشتر افراد از تاکسی اینترنتی شده است.

۲. یک واحد افزایش در متغیر شیوع کرونا، باعث ۰/۱۵۱۷ درصد افزایش میزان تغییرات استفاده از تاکسی اینترنتی شده است. یعنی باعث استفاده‌ی کمتر افراد از تاکسی اینترنتی شده است که با توجه به نتیجه‌ی حاصل، مهم‌ترین عامل نیز شناخته شده است.

۳. یک واحد افزایش در متغیر افزایش قیمت بنزین، باعث ۰/۱۱۷ درصد کاهش میزان تغییرات استفاده از تاکسی اینترنتی شده است. یعنی باعث استفاده‌ی بیشتر افراد از تاکسی اینترنتی شده است.

۵. ضریب متغیر نداشتن مدرک کارشناسی ارشد به بالا، علامت منفی دارد. یعنی مسافرانی که مدرک کارشناسی ارشد و بالاتر دارند، کمتر از سایرین از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند.

۲.۵. نتایج پرداخت مدل لجیت رتبه‌یی بعد از کرونا

نتایج پرداخت مدل لجیت رتبه‌یی بعد از کرونا در جدول ۵ ارائه شده است که جهت ساخت آن، از متغیر وابسته‌ی میزان استفاده‌ی افراد از تاکسی اینترنتی بعد از کرونا که در جدول ۱ با عنوان کد جدید معرفی شده است، تعریف و رتبه‌بندی شده است.

۱. مثبت بودن ضرایب متغیرهای هدف سفرهای کاری و تفریحی با تاکسی اینترنتی نشان می‌دهد که مسافرانی که معمولاً هدف سفرهای کاری و تفریحی دارند، نسبت به سایرین بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند.

۲. ضریب منفی در متغیر تأثیر کرونا در استفاده نکردن از تاکسی اینترنتی، یعنی وجود کرونا با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه‌ی معکوس دارد.

۳. ضریب مثبت در متغیر نداشتن خودروی شخصی، یعنی نداشتن خودروی شخصی با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه‌ی مستقیم دارد.

۴. ضریب متغیر قشر اجتماعی با درآمد سطح یک، علامت منفی دارد. یعنی مسافران با درآمد زیر ۳/۵ میلیون (کم درآمدتر)، نسبت به سایرین کمتر از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند؛ بنابراین درآمد کم با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی رابطه‌ی معکوس دارد.

۵. علامت ضریب متغیر نبود پارکینگ در مقصد سفر، مثبت است؛ یعنی نبود پارکینگ یا سخت پیدا شدن جای پارک خودرو در مقصد سفر، با میزان استفاده از تاکسی اینترنتی، رابطه‌ی مستقیم دارد.

۶. ضریب متغیر نداشتن مدرک کارشناسی ارشد به بالا، علامت منفی دارد. یعنی مسافرانی که مدرک کارشناسی ارشد و بالاتر دارند، کمتر از سایرین از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند.

۳.۵. نتایج پرداخت مدل لجیت دوگانه‌ی تغییرات تقاضای کاربران

بعد از کرونا

جهت ساخت مدل لجیت دوگانه‌ی مذکور، متغیر وابسته عبارت از تغییرات میزان استفاده‌ی افراد از تاکسی اینترنتی قبل و بعد از کرونا بوده است که در جدول ۶ دسته‌بندی شده است. نتایج پرداخت مدل لجیت دوگانه‌ی تغییر تقاضا کاربران در جدول ۷ ارائه شده است.

۴. کارمند خصوصی یا دولتی بودن نسبت به کارمند نبودن، باعث ۱۴۵۶/۰ درصد کاهش میزان تغییرات استفاده از تاکسی اینترنتی شده است. یعنی باعث استفاده‌ی بیشتر افراد از تاکسی اینترنتی شده است.

۵. یک واحد افزایش در متغیر هدف سفر تحصیلی، باعث ۳۴۲/۰ درصد افزایش میزان تغییرات استفاده از تاکسی اینترنتی شده است. یعنی باعث استفاده‌ی کمتر افراد از تاکسی اینترنتی شده است.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش بی‌رویه‌ی استفاده از خودروی شخصی و تردد خودروهای تک‌سرنشین، امروزه مشکلات تراکم و آلودگی هوا، دو مشکل اصلی محسوب می‌شوند. از این رو هر تلاشی که منجر به کاهش تعداد خودروهای تک‌سرنشین شود، می‌تواند در کاهش مشکلات ترافیکی و کاهش مصرف سوخت و آثار مخرب زیست‌محیطی آن تأثیرگذار باشد. یکی از راهکارها به‌منظور مدیریت و کاهش تعداد خودروهای تک‌سرنشین، استفاده از حمل‌ونقل‌های اشتراکی، مانند تاکسی‌های اینترنتی است. به دلیل ادامه‌ی بحران کوید - ۱۹، حمل‌ونقل شهری دچار تغییرات چشم‌گیری شده است، همچنین افزایش خطرهای مرتبط با مکان‌های شلوغ همراه با اقدام‌های فاصله‌گذاری اجتماعی در حمل‌ونقل‌های عمومی و اشتراکی، احتمالاً روی گزینه‌های معمول سفر مسافران تأثیر گذاشته است و انتظار می‌رود به دلایل ذکر شده، تمایل به استفاده از وسائط نقلیه‌ی عمومی و شبه‌عمومی کاهش یابد. بنابراین در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تاکسی اینترنتی به عنوان یک شیوه‌ی حمل‌ونقل درون شهری، تأثیرگذاری کوید - ۱۹ در میزان تقاضای شیوه‌ی مذکور بررسی و همچنین عوامل مؤثر در افزایش و کاهش تمایل افراد برای استفاده از تاکسی اینترنتی تعیین شده است. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، اقدام به طراحی پرسش‌نامه و توزیع آن شده و بر مبنای داده‌های حاصل از پرسشگری، پس از تحلیل اولیه‌ی داده‌ها (تحلیل آمار توصیفی)، ساخت مدل‌های لججیت رتبه‌بی و لججیت دوگانه صورت گرفته است. مهم ترین نتایج مطالعه‌ی حاضر عبارت‌اند از:

۱. شیوع کرونا باعث شده است که مسافران نسبت به قبل، از تاکسی اینترنتی کمتر استفاده کنند.
۲. تا قبل از کرونا، مسافرانی که معمولاً به ترتیب دارای هدف سفرهای تفریحی، کاری، و تحصیلی بودند، نسبت به سایرین بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کردند و بعد از کرونا مسافرانی که معمولاً به ترتیب دارای هدف سفرهای کاری و تفریحی بوده‌اند، نسبت به سایرین بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده کرده‌اند. این نتیجه

نشان می‌دهد که بعد از کرونا، مسافرانی که معمولاً هدف سفرهای تفریحی و تحصیلی دارند، نسبت به سایرین میزان استفاده‌ی خود از تاکسی اینترنتی را بیشتر کاهش داده‌اند، که علت این امر می‌تواند غیرحضور شدن تحصیل در کشور، فاصله‌گذاری اجتماعی، و ممنوعیت‌های استفاده از اماکن تفریحی باشد.

۳. افراد فاقد خودروی شخصی نسبت به افراد دارای خودروی شخصی، بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده کرده و پس از کرونا، میزان استفاده‌ی خود را کمتر کاهش داده‌اند.

۴. افزایش قیمت بنزین باعث استفاده‌ی بیشتر افراد از خدمات تاکسی اینترنتی و نیز مانع کاهش استفاده‌ی ایشان از تاکسی اینترنتی بعد از کرونا شده است.

۵. کارمندان نسبت به سایرین تمایل کمتری به کاهش میزان استفاده‌ی خود از تاکسی اینترنتی بعد از کرونا نشان داده و میزان استفاده‌ی خود را کاهش نداده‌اند.

۶. مسافرانی که اظهار به گرانی کرایه‌ی تاکسی اینترنتی داشتند، کمتر از سایرین از تاکسی اینترنتی استفاده کرده‌اند، بنابراین گرانی کرایه در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی تأثیر منفی داشته است.

۷. مسافران کم درآمدتر نسبت به سایرین کمتر از تاکسی اینترنتی استفاده کرده‌اند؛ بنابراین درآمد کم، در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی تأثیر منفی داشته است.

۸. نبود پارکینگ یا سخت پیدا شدن جای پارک خودروی شخصی در مقصد سفر، در میزان استفاده از تاکسی اینترنتی نقش مثبت داشته است.

۹. بیشتر کاربران تاکسی اینترنتی، دارای تحصیلات دانشگاهی و جوانان ۲۳ تا ۴۰ سال بوده و کاربرانی که مدرک کارشناسی ارشد و بالاتر داشته‌اند، کمتر از سایرین از تاکسی استفاده کرده‌اند.

نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به مدیران شهری در سیاست‌هایی که میزان استفاده از تاکسی اینترنتی را کنترل می‌کند، کمک کند. طبق نتایج به‌دست آمده، شیوع کرونا نقش مهمی در کاهش تقاضای تاکسی‌های اینترنتی داشته است؛ بنابراین باید در جهت رفع این مشکل کوشش کرد تا در شرایط کرونا، مردم با اطمینان خاطر بالایی از تاکسی‌های اینترنتی برای انجام سفرهایشان استفاده کنند. با توجه به اینکه هزینه‌ی کرایه‌ها نسبتاً گران است و مردم با سطح درآمدی پایین‌تر نمی‌توانند از خدمات تاکسی‌های اینترنتی استفاده کنند و اینکه اثر نبود پارکینگ در مقصد سفر باعث استفاده‌ی بیشتر مردم از خدمات مذکور شده است، پیشنهاد می‌شود با تشویق مردم به استفاده‌ی کمتر از خودروی شخصی و افزایش هزینه‌ی استفاده از آن، مانند: افزایش هزینه‌ی پارک حاشیه‌یی در خیابان‌ها و کاهش قیمت کرایه‌ها، مردم را به استفاده از خدمات تاکسی‌های اینترنتی ترغیب کرد.

پانویس‌ها

1. ride-hailing
2. online
3. global positioning system
4. Paronda
5. Manila

6. Felipe
7. bivariate ordered probit
8. Clewlow & Mishra
9. Alemi
10. Samadzad & Lesteven
11. Thakur
12. intermediate public transport (IPT)
13. Acheampong

14. Nian
15. lag model spatial (SLM)

منابع (References)

1. Shahanvaz, S. and Daliri, H. "Assessment of the ecological footprint of transportation in Rasht city", *12th Iran Transportation and Traffic Engineering Conference*, Tehran (in Persian) (2013).
2. Li, Z., Hong, Y. and Zhang, Zh. "Do On-demand ride-sharing services affect traffic congestion? evidence from uber entry", Available at SSRN (Aug. 30, 2016).
3. Rezaei, H. "The Effect of even or odd range pricing on device selection (Case study: Tehran)", Master Thesis, Transportation Planning Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil Engineering and Environment (in Persian) (2020).
4. Rahmani, N., Sarhang Ramezan Aghaei, R. and Salami, M. "The role of the coalition in transportation and traffic and strategies for Its application in the country", *13th International Conference on Transportation and Traffic Engineering*, Tehran (in Persian) (2014).
5. Kheyri, A. "Proposing a model on internet taxis demand", Master Thesis, Transportation Planning Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil Engineering and Environment (in Persian) (2021).
6. Palak, T., Mookerjee, P., Jain, A. and et al. "Impact of COVID-19 on urban mobility in India: Evidence from a perception study", The Energy and Resources Institute, Darbari Seth Block, India Habitat Centre, Lodhi Road, New Delhi - 110 003, India (2020).
7. Dawes, M. "Perspectives on the Ridesourcing Revolution: Surveying individual attitudes toward Uber and Lyft to inform urban transportation policymaking", Massavhustts Institue of Technology (2016).
8. Dewey, O.F. and Rayle, L. "How Ridesourcing Went from 'Rogue' to Mainstream in San Francisco", Harvard University Graduate School of Design, 41 p. (2016).
9. Mohamadi, R., Kheirati Kazerooni, A. and et al. "Development of multiple logistics model (Case Study, Amir Kabir University of Technology)", *14th International Conference on Transportation and Traffic Engineering*, Tehran (in Persian) (2016).
10. Paronda, A., Glenn, A., Regido, J.R.F. and et al. "Comparative analysis of transportation network companies (TNCs) and conventional taxi services in Metro Manila", *23rd Annual Conference of the Transportation*, pp. 1-12 (Aug., 2016).
11. Dias, F.F., Lavieri, P.S., Garikapati, V.M. and et al. "A behavioral choice model of the use of car-sharing and ride-sourcing services", *Transportation, Springer*, **44**(6), pp. 1307-1323 (Nov., 2017).
12. Clewlow, R.R. and Mishra, G.S. "Disruptive transportation: the adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States", Institute of Transportation Studies, University of California, Davis (2017).
13. Alemi, F., Circella, G., Handy, S. and et al. "What influences travelers to use Uber? Exploring the factors affecting the adoption of on-demand ride services in California", *Travel Behaviour and Society*, **13**, pp. 88-104 (2018).
14. Lesteven, G. and Samadzad, M. "Ride-hailing, a new mode to commute? Evidence from Tehran, Iran", *Travel Behaviour and Society, Elsevier*, **22**, pp. 175-185 (2021).
15. Acheampong, R.A., Siiba, A., Okyere, D.K. and et al. "Mobility-on-demand: An empirical study of internet-based ride-hailing adoption factors, travel characteristics and mode substitution effects", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **115**, pp. 102638 (2020).
16. Nian, G., Peng, B., Sun, D. and et al. "Impact of COVID-19 on urban mobility during post-epidemic period in megacities: From the perspectives of taxi travel and social vitality", *Sustainability*, **12**(19), pp. 7954 (2020).
17. Said, M., Soria, J. and Stathopoulos, A. "Shifting mobility behaviors in unprecedented times: Intentions to use on-demand ride services during the COVID-19 pandemic", Transportation Research Board, Computers and Society (2021).
18. Ben-Akiva, M. and Ierman, S.R. "Discrete choice analysis: theory and application", The MIT Press, 1st edition (Dec. 18, 1985).
19. Ortuzar, J. and Willumsen, L.G. "Modelling transport. John Wiley & Sons. to travel demand", The MIT Press, 5th Printing, 1993 (2011).
20. McKelvey, R.D. and Zavoina, W. "A Statistical model for the analysis of ordinal level dependent variables", *Journal of Mathematical Sicology*, **4**, pp. 103-120 (1945).
21. Cochran, W., *Sampling Techniques*, 3rd Edition, New York, John Wiley & Sons (1977).

مدل سازی رفتاری تأثیر تاکسی های اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی

سیدرضا اسماعیلزاده (کارشناس ارشد)

امیرضا مهدوحی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران (تأیید شده)، ۳۸-۲، شماره ۲، ص. ۷۷-۶۷، (پژوهشی)
دوره ۲ - ۱۴۰۱

امروزه تاکسی های اینترنتی، نقش مهمی در حمل و نقل پیدا کرده اند، که باعث اهمیت بیش از پیش این موضوع در پژوهش های رفتاری شده است. پژوهش حاضر، براساس داده های جمع آوری شده با پرسش نامه، که به همین منظور طراحی و به صورت برخی (آنلاین) توزیع شده است، به بررسی تأثیر دو شیوه حمل و نقلی پرداخته است. تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی موضوع مهمی است، که کمتر به آن پرداخته شده است. پژوهش حاضر به صورت خاص به تحلیل رفتاری این موضوع پرداخته است. در این پژوهش از مدل انتخاب گسسته ی لوجیت چندگانه و تحلیل آثار حاشیه یی مدل لوجیت و برای تحلیل رفتاری از روش PCA برای کاهش بُعد مؤلفه های اصلی و ۵۹۸ ردیف داده برای مدل سازی استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که بیشتر افراد بعد از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی کمتر استفاده کرده و در تحلیل آثار حاشیه یی، با تغییر سطح تحصیلات افراد، از: دیپلم، کارشناسی و کارشناسی ارشد به دکترا، احتمال انتخاب تاکسی اینترنتی افزایش و احتمال انتخاب خودروی شخصی کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: تاکسی اینترنتی، وابستگی به خودروی شخصی، پرسش گری اینترنتی.

e_seyyedreza@modares.ac.ir
armamdoohi@modares.ac.ir

۱. مقدمه

۱) کسی که سبک زندگی و یا تعدهای وی به شکلی است که فقط وجود یک اتومبیل می تواند نیازهای او را برطرف کند و ۲) کسی که نمی تواند راه دیگری جز سفر با خودروی شخصی را در نظر بگیرد، حتی اگر امکانش مهیا باشد. از سوی دیگر، در نظر گرفتن یک شیوه سفر مشابه با خودروی شخصی، ممکن است باعث کاهش استفاده ی افراد از خودروی شخصی شود. طبق مطالعات انجام شده، هر خودروی اشتراکی می تواند جایگزین ۱۰ خودروی شخصی شود و استفاده از آن می تواند موجب تمایل افراد به فروش خودروی شخصی و عدم تمایل سایر افراد به خرید خودروی شخصی جدید شود.^[۱] بنابراین، با توجه به پدیده تاکسی های اینترنتی، که به علت مزایای مختلف آنها به موضوعی فراگیر تبدیل شده اند و همچنین تأثیر مهم غیرقابل چشم پوشی آنها در میزان استفاده از خودرو، می توان با سنجیدن تأثیر تاکسی های اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی و عوامل مؤثر در آن و میزان آن، در سیاست گذاری های آینده و همچنین سیاست های کلان مربوط به مدیریت تقاضای حمل و نقل، تصمیم های متناسب تری اتخاذ و به پایداری بیشتر سیستم حمل و نقل کمک کرد.

بسیاری از پژوهشگران دریافته اند که ظهور خدمات تاکسی اینترنتی تأثیر بسزایی در شیوه های سفر سنتی دارد. با وجود این، در این زمینه هنوز ایشان به اجماع نرسیده اند. به عنوان مثال، کولولو و میشر^[۲] (۲۰۱۷)، تأثیر او بر^۳ را در حمل و نقل شهری

در دنیای مدرن امروز، شیوه های سفر متفاوتی برای جابه جایی افراد استفاده می شود. چالش مورد بحث شیوه های سفر، علاوه بر فراهم کردن دسترسی مناسب، تراکم ترافیک و آلودگی هواست. یکی از مهم ترین عوامل شرایط نامناسب کنونی از نظر افزایش بیش از پیش تراکم ترافیک و آلودگی هوا، استفاده ی زیاد و وابستگی به خودروی شخصی است. در سیستم حمل و نقل وابسته به خودرو، به دلیل گزینه های جایگزین نامناسب، افراد مجبورند از خودروی شخصی استفاده کنند.^[۱] در نتیجه، انتظار می رود تقریباً هر بزرگسال یک خودروی شخصی داشته باشد. وابستگی به خودرو، تعداد زیادی از راه حل هایی را که می تواند برای حل مشکلاتی، مانند: تراکم ترافیک، هزینه های جاده و پارکینگ، تصادف و آلودگی باشند، را کاهش دهد. از طرفی، سیستم های هم سفری^۱ می توانند پاسخی برای مشکل تراکم ترافیک و آلودگی محیط زیست باشند، زیرا آنها ممکن است موجب کاهش تمایل افراد به استفاده و تملک خودروی شخصی شوند. طبق نظر محقق ایمنی استرالیایی، رای بریندل^۲، یک فرد وابسته به خودرو کسی است که به احتمال زیاد، این شرایط را داشته باشد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2022.59516.3058

آمریکا بررسی کردند و دریافتند که اوبر می‌تواند استفاده از حمل‌ونقل عمومی را ۶٪ کاهش دهد، در صورتی که همه‌ی موارد دیگر برابر است.^[۴] با این حال، پژوهش تجربی هال^۵ و همکاران (۲۰۱۸)، مشخص کرد که اوبر تأثیری مکمل در استفاده از حمل‌ونقل عمومی در شهرهای آمریکا دارد.^[۵]

تحقیق برگر^۶ و همکاران (۲۰۱۸)، نشان داد که خدمات تاکسی اینترنتی، وضعیت تاکسی‌های سنتی را تحت تأثیر قرار داده است و آنها دریافتند که ورود اوبر به شهرها، درآمد رانندگان تاکسی را تقریباً ۱۰٪ کاهش می‌دهد.^[۶] با وجود این، والستن^۷ (۲۰۱۵)، نشان داد که ورود اوبر به شهرها موجب افزایش کیفیت تاکسی‌های سنتی شده و این موضوع شکایت مردم از تاکسی‌های سنتی را کاهش داده است.^[۷]

طبق مطالعات انجام شده در کیپ تاون^۸، بعد از ورود تاکسی اینترنتی (سیستم اشتراک سفر) به آنجا، مردم به جای خودروی شخصی بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند، حتی بعضی از آنها تمایل به فروش خودروی خود دارند.^[۸] وارد^۹ و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر ورود اوبر و لیفت^{۱۰} را به شهرهای ایالات متحده‌ی آمریکا در سرانه‌ی اتومبیل‌های شخصی محلی از طریق یک روش تفاوت در اختلاف^{۱۱} تخمین زده و دریافت‌اند که در دو سال ابتدایی ورود اوبر به شهرها، سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی، ۲/۸٪ کاهش داشته است. در حالی که ورود برنامه‌ی کاربردی لیفت به شهرها باعث کاهش ۴/۶٪ سرانه‌ی مالکیت خودرو در دو سال اول شده است.^[۹]

برخی از پژوهشگران هم معتقدند که ورود تاکسی‌های اینترنتی باعث افزایش تعداد خودروهای شخصی در شهرها شده است. گیو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)، دریافتند که با توجه به هزینه‌ی ورودی کم، درآمد بالا و زمان آزاد برای کار کردن در سیستم تاکسی‌های اینترنتی، بسیاری از مردم خرید یک خودروی جدید را برای فعالیت در شرکت‌های تاکسی اینترنتی در نظر می‌گیرند، در نتیجه مالکیت خودروهای شخصی را افزایش می‌دهند.^[۱۰]

همچنین در پژوهش گانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷)، مشخص شد که به دلیل انعطاف زمان کاری و کسب درآمد بیشتر از درآمد ماهانه و معمول، فرد با تقسیم ظرفیت خودروهای شخصی با افراد دیگر مقدور است که فرصت خوبی برای کسب سود بیشتر داشته باشد. این موضوع، باعث به کار افتادن خودروهای بدون استفاده در سیستم تاکسی‌های اینترنتی شده است، که موجب افزایش استفاده‌ی افراد از خودروی شخصی شده است.^[۱۱]

طبق مطالعات ژانگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۰)، بر اساس داده‌های پانل برای ۱۰۹ شهر بزرگ در چین از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶، به صورت تجربی تأثیر تاکسی اینترنتی (سیستم هم‌سفری) در استفاده از خودروهای شخصی در مناطق شهری تحلیل شده است. نتیجه‌گیری‌های اصلی آن عبارت‌اند از: ۱) تاکسی‌های اینترنتی (سیستم هم‌سفری)، تأثیر منفی قابل‌توجهی در استفاده از اتومبیل‌های شخصی در مناطق شهری داشته‌اند، ۲) در رازمدت، تأثیر منفی تاکسی‌های اینترنتی در استفاده از اتومبیل‌های شخصی در مناطق شهری ابتدا زیاد و سپس کم شده است و ۳) تاکسی‌های اینترنتی تأثیر منفی بیشتری در استفاده از اتومبیل شخصی در شهرهای شرقی چین داشته‌اند، در حالی که تأثیر آنها در شهرهای غربی چین قابل‌توجه نبوده است.^[۱۲]

تاکسی‌های اینترنتی به عنوان یکی از شیوه‌های سفر در حال گسترش شناخته می‌شوند. با افزایش استفاده از آنها، تأثیری که در خودروهای شخصی می‌گذارند، محسوس‌تر خواهد بود. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تاکسی اینترنتی و میزان استفاده از خودروی شخصی در بخش حاضر بررسی شده است. طبق ادبیات پیشین، کاربران تاکسی‌های اینترنتی، عموماً جوان هستند و سطح تحصیلات بالاتری نسبت

به عمومیت جامعه دارند. افراد ثروتمند بیشتر از تاکسی اینترنتی استفاده می‌کنند، که البته این موضوع در بافت‌های محلی صادق نیست.

عواملی مانند داشتن گواهینامه‌ی رانندگی، مالکیت و میزان استفاده از خودروی شخصی برای انتخاب خودروی شخصی نسبت به تاکسی اینترنتی مؤثرند. برخی مسافران تاکسی‌های اینترنتی برای سفرهای خاص از شیوه‌ی حمل‌ونقلی اخیر استفاده می‌کنند. بیشتر مسافران چند بار در ماه از سرویس تاکسی‌های اینترنتی استفاده می‌کنند.

طبق مرور ادبیات انجام شده، در برخی نوشتارها، فقط به موضوع تملک خودروی شخصی^{۱۵} اشاره شده است، در حالی که موضوع وابستگی به خودروی شخصی، امروزه با توجه به اهمیت تعداد خودروی وارد شده به سیستم حمل‌ونقل، که باعث تراکم ترافیک می‌شود، مهم‌تر به نظر می‌رسد. در برخی نوشتارها، نیز به تأثیر تاکسی‌های اینترنتی در سایر شیوه‌های سفر، مانند: حمل‌ونقل همگانی پرداخته شده است، در حالی که تمرکز پژوهش حاضر کاملاً در تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی است. نوع تاکسی اینترنتی، که در نوشتارهای مختلف مورد بحث بوده است، با تاکسی اینترنتی مرسوم در ایران متفاوت است؛ پس بررسی شیوه‌ی سفر با تاکسی اینترنتی به صورت ویژه در ایران مورد نیاز است تا خلأ مطالعاتی در این زمینه مرتفع شود. در نهایت مشاهده می‌شود که تاکسی اینترنتی در تعریف کلی، گاهی موجب کاهش سرانه‌ی خرید خودروی شخصی شده است، گاهی نیز موجب افزایش سرانه‌ی خرید خودروی شخصی و افزایش استفاده از آن شده است. پس مطالعات موجود هنوز به اجماع در این زمینه نرسیده‌اند و نیاز به مطالعات بیشتری احساس می‌شود، تا این مقوله بهتر و دقیق‌تر بررسی شود.

تاکسی اینترنتی ممکن است منجر به کاهش مالکیت خودرو و همچنین کاهش استفاده از آن شود و زندگی بدون خودروی شخصی را برای مردم ممکن سازد، اما ادبیات موجود بر روی این موضوع نظر مشخصی ندارد. در ضمن در بررسی‌های انجام شده، تحلیل رفتاری برای این موضوع صورت نگرفته و تأثیر محل سکونت در یک شهر کوچک و بزرگ بررسی نشده است. به همین منظور و همچنین برای بررسی تأثیر نوع نگرش افراد در تأثیر استفاده‌ی آنها از تاکسی اینترنتی (به ویژه نوع خاص تاکسی‌های اینترنتی که در ایران رواج دارد) در خودروی شخصی به مطالعات بیشتری نیاز است، که در پژوهش حاضر به این موارد پرداخته شده است. در ضمن در پژوهش حاضر، شهر کوچکی مانند بیرجند و شهر بزرگی مانند تهران بررسی شده اند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در بخش حاضر، به بررسی روش‌های استفاده شده در تحلیل تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی پرداخته شده است. با توجه به ماهیت داده‌ی مذکور، مدل انتخاب گسسته‌ی لوجیت چندگانه و روش‌های پرداخت و ارزیابی آن بررسی شده‌اند. در ادامه، به منظور بررسی متغیرهای نگرشی و با توجه به هم‌بستگی آنها، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ساختار آن و ویژگی‌ها و مبانی نظری روش ذکر شده بررسی شده‌اند.

لازم به ذکر است که در نوشتار حاضر، ابتدا با طراحی فرایند گردآوری داده از طریق پرسش‌نامه بر بستر آنلاین، داده‌ها جمع‌آوری شدند. سپس عملیات تمیز کردن داده‌ها انجام شد و داده‌های معتبر برای فرایند مدل‌سازی جدا شدند. در ضمن با توجه به ۲۵ متغیر نگرشی موجود و برای کاهش بعد، جلوگیری از تعامد، صفر شدن احتمال هم‌خطی و بهبود مدل از روش ارزشمند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

با این روش و برابر صفر قرار دادن مشتق‌های جزئی عبارت، به مدل لجیت پرداخت می‌شود.

۳.۲. ساختار روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، روشی برای ایجاد متغیرهای جدید است، که ترکیبی خطی از متغیرهای اصلی هستند. بیشینه‌ی تعداد متغیرهای جدیدی که می‌توان ایجاد کرد، برابر با تعداد متغیرهای اصلی است و متغیرهای جدید بین خودشان همبسته نیستند.^[۱۴] هدف اصلی آنالیز اجزاء اصلی، تشکیل متغیرهای جدید است، که ترکیب‌های خطی متغیرهای اصلی هستند. متغیرهای جدید به مؤلفه‌های اصلی مرتبط و با یکدیگر ناهمبسته هستند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، یک تبدیل خطی متعامد است، که داده را به دستگاه مختصات جدید می‌برد، به این صورت که اولین مؤلفه‌ی اصلی، متغیری است که در داده‌ها، واریانس بیشینه دارد. مؤلفه‌ی دوم نیز مربوط به متغیری با بیشینه‌ی واریانس داده‌های باقی‌مانده است و به همین ترتیب سایر مؤلفه‌ها نیز یافت می‌شوند. در روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، پژوهشگر می‌تواند فقط از چند مؤلفه‌ی اصلی به جای همه‌ی متغیرها استفاده کند. به همین دلیل، تحلیل اجزاء اصلی معمولاً به عنوان روش کاهش داده شناخته می‌شود.

در روش مؤلفه‌های اصلی، شاخص‌های متعدد در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و سپس بارزترین مشخصه‌ها که در واقع بیان‌گر تفاوت‌هاست، به عنوان مؤلفه‌های اصلی شناسایی می‌شوند و با این کار در واقع همبستگی شاخص‌ها از بین برده می‌شود. هدف روش مؤلفه‌های اصلی، پیدا کردن ترکیب خطی از S شاخص $X_1, X_2, \dots, X_N$ برای ایجاد شاخص‌های غیروابسته‌ی $X_1, X_2, \dots, X_S$ است، که در آن S کوچک‌تر یا مساوی N است. عدم وابستگی متغیرها به این معناست که شاخص‌ها هر کدام جنبه‌های متفاوتی از داده‌ها را نشان می‌دهند. بر اساس تعریف، هدف از تحلیل اجزاء اصلی انتقال مجموعه داده‌ی X با ابعاد N ، به داده‌ی Z با ابعاد S است.

یک مؤلفه‌ی اصلی، یک ترکیب خطی نرمال شده از متغیرهای توضیحی اصلی موجود در مجموعه‌ی داده است. در رابطه‌ی ۶، مؤلفه‌ی اصلی اول ارائه شده است:

$$Z_1 = \sigma_1 X_1 + \sigma_2 X_2 + \dots + \sigma_N X_N \quad (6)$$

که در آن، Z_1 مؤلفه‌ی اصلی اول و X_N متغیر توضیحی n ام هستند.

۱.۳.۲. برآورد مدل با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد داده‌ها و ساده‌سازی آنها بسیار استفاده می‌شود.^[۱۵] اگر N تعداد متغیر و n تعداد نمونه‌ی مدنظر باشد، مؤلفه‌ی اصلی k به صورت، $Z_K = (Z_{K1}, Z_{K2}, \dots, Z_{KN})^T$ خواهد بود. ماتریس داده‌ها نیز به صورت $X = [x_{ij}]_{N \times n}$ قابل تعریف است. در ضمن ماتریس مؤلفه‌ی اصلی به صورت $[Z_{kj}]_{r \times n}$ معرفی می‌شود. لازم به ذکر است که Z دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس واحد مطابق رابطه‌ی ۷ است:

$$Z \sim N(0, I) \quad (7)$$

که در آن، I ماتریس واحد است.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، حالتی از تحلیل عاملی است، که می‌تواند با دو تغییر بر روی آن، طبق رابطه‌ی ۸ حاصل شود.

$$X_{N \times n} = \Lambda_{N \times r} Z_{r \times n} + E_{N \times n} \quad (8)$$

استفاده شده است. پس از آن به بررسی مدل لجیت چندگانه با سه تابع مطلوبیت، که در ادامه معرفی شده‌اند، پرداخته شده است. سپس آثار حاشیه‌ی مدل یاد شده بررسی شده است.

۱.۲. ساختار مدل لجیت چندگانه

به طور کلی، با توجه به این‌که نمی‌توان تمام عوامل مؤثر در انتخاب فرد را در نظر گرفت، مطلوبیت تصادفی (رابطه‌ی ۱) هرگزین، شامل دو بخش قابل اندازه‌گیری و تصادفی است:^[۱۳]

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \quad (9)$$

که در آن، U_{ni} مطلوبیت گزینه‌ی i برای فرد n ام، V_{ni} بخش قابل اندازه‌گیری مطلوبیت گزینه‌ی i برای فرد n و ε_{ni} بخش تصادفی مطلوبیت گزینه‌ی i برای فرد n ام هستند.

مدل‌های انتخاب گسسته در توزیع عبارت تصادفی متفاوت هستند. مدل لجیت از توزیع مستقل و یکسان گامبل^{۱۶} پیروی می‌کند. احتمال این‌که فردی گزینه‌ی i را انتخاب کند، از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$P_{ni} = \frac{e^{(V_{ni})}}{\sum_{j \in J_n} e^{(V_{nj})}} \quad (2)$$

که در آن، J_n مجموعه‌ی گزینه‌هایی که در اختیار فرد n ام قرار دارد. در هر آزمایش، فقط بخش قابل اندازه‌گیری تابع مطلوبیت قابل برآورد است، که بخش مدل‌سازی که با مدل‌های مختلف برآورد می‌شوند، روی بخش مذکور تمرکز دارد. بخش قطعی مدل‌سازی به صورت رابطه ۳ نوشته می‌شود:

$$V_{ni} = \beta_1 X_{ni1} + \beta_2 X_{ni2} + \dots + \beta_k X_{nik} \quad (3)$$

که در آن، X_{nik} خصوصیت k ام گزینه‌ی i برای فرد n ام و β_k ضریب متغیر k ام در تابع مطلوبیت است، که باید تخمین زده شوند.

۲.۲. روش پرداخت مدل لجیت

برای پرداخت مدل انتخاب گسسته با ساختار لجیت از روش درست‌نمایی بیشینه^{۱۷} استفاده می‌شود. احتمال رخ دادن هر مشاهده بر مبنای پارامترها و مدل استفاده شده، محاسبه و ضرایب توابع مطلوبیت به نوعی تعیین می‌شوند که حاصل ضرب احتمال وقوع هم‌زمان مشاهده‌ها، بیشترین مقدار را به خود اختصاص دهد (رابطه‌ی ۴).

$$L(\beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{i \in C_n} (P_{in})^{(y_{in})} \quad (4)$$

که در آن، N تعداد افراد تصمیم‌گیرنده، y_{in} اگر شخص گزینه‌ی i را انتخاب کند، مقدار آن یک و در غیر این صورت، صفر است، P_{in} احتمال انتخاب گزینه‌ی i توسط فرد هستند.

برای بیشینه‌سازی عبارت اخیر، می‌توان از آن مشتق جزئی گرفت و مقدار آن را برابر صفر قرار داد. در نتیجه، با جایگذاری مقادیر ارائه شده برای مدل لجیت، رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$LL(\beta) = \sum_n \sum_i y_{in} \cdot (\beta' \cdot X_{in} - L_n \sum_{j \in C_n} e^{(\beta \cdot X_{jn})}) \quad (5)$$

که در آن، E ماتریس خطا دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس Ψ است $(E \sim N(0, \Psi))$ ، X ماتریس داده ها، Λ ماتریس بارگذاری مؤلفه ها و Ψ ماتریس قطری با درایه های ψ_i^2 به عنوان واریانس خطاهاست.

در روش تحلیل مؤلفه های اصلی، ابتدا آن را به صورت همگرا در نظر می گیرند. بدین معنا که هر عضو E واریانس های برابر با $\psi^2 = \sigma^2 I$ دارند؛ به مدل مذکور، مؤلفه های اصلی احتمالی گفته می شود. اگر حد تحلیل مؤلفه ای اصلی احتمالی اخیر، در زمانی که σ به صفر میل کند، مدنظر قرار گیرد، تحلیل مؤلفه ای اصلی استاندارد به دست می آید. بنابراین طبق مطالب گفته شده، مدل تحلیل اجزاء اصلی به صورت معادله ۹ قابل بررسی است:

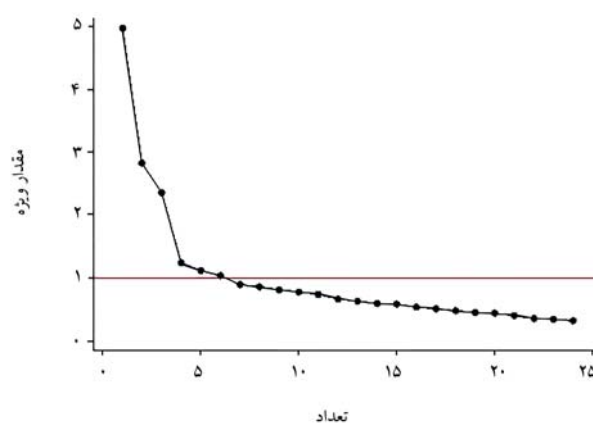
$$Z_{r \times n} = \Lambda_{N \times r}^T X_{N \times n} \quad (9)$$

لذا با مدل اخیر، ماتریس داده ها، روی محور مؤلفه های اصلی Z تصویر می شوند. [۱۶] در تحلیل اجزاء اصلی، هدف مدل این است که Λ طوری به دست آید که درست نمایی $\Lambda \Lambda^T$ ، بیشینه شود. از منظر ریاضی، تعداد r مؤلفه ای اصلی، حاصل ترکیب خطی N متغیر است، که موجب ایجاد یک دستگاه مختصات جدید با دوران دستگاه مختصات اصلی می شود. محورهای مختصات جدید می توانند توصیف بهتری از داده ها را مشخص کنند، زیرا سیستم مختصات جدید مذکور، جهت بیشینه ی تغییرات را نشان می دهد. روش تحلیل مؤلفه های اصلی همواره بر اساس ماتریس همبستگی یا کوواریانس به دست می آید. در نتیجه، مدل تحلیل اجزاء اصلی، می تواند روش مناسبی برای استخراج بیشینه ی واریانس مجموعه ی داده ها برای هر مؤلفه باشد، که این امر موجب تبدیل تعداد زیادی متغیر به مؤلفه های کمتر می شود. [۱۷]

۲.۳.۲. نتایج کاهش بُعد با روش تحلیل مؤلفه های اصلی

تحلیل مؤلفه ای اصلی استخراج متغیرهای با اهمیت (به شکل مؤلفه) از مجموعه ی متغیرهای موجود در یک مجموعه ی داده است. تحلیل مؤلفه ای اصلی در واقع یک مجموعه با بُعد پایین از ویژگی ها را از یک مجموعه ی دارای بُعد بالا استخراج می کند، تا به ثبت اطلاعات بیشتر با تعداد کمتری از متغیرها کمک کند. در بخش حاضر نیز به کاهش ابعاد مجموعه ی اصلی پرداخته شده است.

در ابتدا، باید تعداد مؤلفه هایی که می توانند توضیح دهندگی مناسبی از کل داده ها داشته باشند و نماینده ی خوبی برای آنها محسوب شوند، با معیارهای معرفی شده تعیین شوند. طبق شکل ۱، که نمودار نقطه یی مقادیر ویژه برای پژوهش حاضر است، مشخص است که برای تحلیل داده ها بر اساس معیار مقادیر ویژه ی بیشتر از یک، [۱۴] می توان از ۶ مؤلفه ی اصلی برای مجموعه ی داده ها استفاده کرد.



شکل ۱. نمودار نقطه یی مقادیر ویژه ی مؤلفه های اصلی.

پس از تعیین تعداد مؤلفه های اصلی، به پرداخت و تحلیل مؤلفه ها و محاسبه ی پارامترهای مربوط به هر مؤلفه پرداخته می شود. سپس براساس درصد توضیح دهندگی هر مؤلفه از پارامترهای تعریف شده، می توان برای تعیین ماهیت هر مؤلفه ی اصلی استفاده کرد.

با توجه به میزان توضیح دهندگی متغیرهای مختلف، مشخص شد که با توجه به بالاترین میزان ارتباط بین پارامترها و مؤلفه های اصلی، بیانگر: مؤلفه ی اول، نگرش اقتصادی فرد؛ مؤلفه ی دوم، نگرش افراد در مورد کیفیت خدمات تاکسی های اینترنتی؛ مؤلفه ی سوم، نگرش ترجیح خودروی شخصی در شرایط مختلف؛ مؤلفه ی چهارم، متغیر نگرشی وابستگی به تکنولوژی هستند. مؤلفه های پنجم و ششم، نیز به ترتیب نگرش مهارت در استفاده از خودروی شخصی و اهمیت زمان انتظار برای افراد را مشخص می کند.

۳. فرایند گردآوری داده

در پژوهش حاضر، طراحی فرایند گردآوری داده از طریق پرسش نامه صورت گرفته است. جمع آوری اطلاعات، همواره یکی از روش های معمول پژوهش های آماری و رفتاری مانند پژوهش حاضر بوده است. برای جمع آوری اطلاعات از انواع مختلف پرسش نامه استفاده می شود. پرسش نامه یک ابزار تحقیقاتی با مجموعه یی از پرسش هاست، که با هدف جمع آوری و ثبت اطلاعات استفاده می شود.

با توجه به هدف طراحی پرسش نامه ی مذکور، که بررسی تأثیر تاکسی اینترنتی در استفاده از خودروی شخصی بوده است و با توجه به قرار داشتن در دوره ی قرنطینه ی همگانی به علت شیوع ویروس کرونا و کاهش تردد افراد در سطح شهرها برای جمع آوری داده ها، از پرسش گیری اینترنتی و از طریق پیامک، فضای مجازی، کانال های دانشگاهی و صنف مختلف و ایمیل تصادفی به افراد استفاده شده است. در ضمن پرسش نامه با استفاده از برنامه ی کاربردی سایت پرسش نامه برخط (آنلاین) [۱۸]، در محیط اینترنت قرار گرفته است. همچنین گستره ی زیاد در ویژگی های افراد، مانند شغل، سن و امثال آن (که هر کدام جداگانه در انتخاب تاکسی اینترنتی و خودروی شخصی تأثیرگذارند)، کمک می کند تا نتایجی گرفته شود، که در برگیرنده ی افراد مختلف باشد.

پرسش نامه ی پژوهش حاضر با توجه به مرور ادبیات پیشین، در چهار بخش طراحی شده است:

۱) سؤال های مربوط به مشخصات سفر افراد؛ ۲) سؤال های مربوط به نوع نگرش افراد؛ ۳) مشخصات فردی و مشخصات اجتماعی - اقتصادی افراد و ۴) سؤال های مربوط به یک سفر خاص.

بخش اول اطلاعات، سفرهای کلی افراد را در بردارد. بخش دوم، شامل سؤال های مربوط به متغیرهای نگرشی است، که از متغیرهای: مهارتی، اقتصادی، ترجیح خودروی شخصی، ترجیح تاکسی اینترنتی، متغیر مربوط به استفاده از تکنولوژی و متغیرهای مربوط به وابستگی به خودروی شخصی تشکیل شده اند. بخش سوم پرسش نامه، شامل مشخصات فردی بوده است. در بخش سوم، سؤال مربوط به درآمد به صورت غیرمستقیم پرسیده شده است، به این صورت که ابتدا متوسط درآمد خانوار در شهر محل سکونت افراد پرسیده شده و پس از چند سؤال مقایسه یی میان درآمد افراد با متوسط درآمد ذکر شده، سنجش صورت گرفته است. بخش چهارم سؤال ها، نیز به اطلاعات یک سفر خاص افراد اشاره داشته است.

پس از آن افراد کمتر از ۲۰ سال با ۲۴٪ و سپس افراد بین ۲۷ تا ۳۵ سال با حدود ۱۵٪ مشارکت لازم را داشته‌اند. لازم به ذکر است که کمترین میزان مشارکت مربوط به افراد بالای ۳۵ سال با حدود ۱۰٪ بوده است.

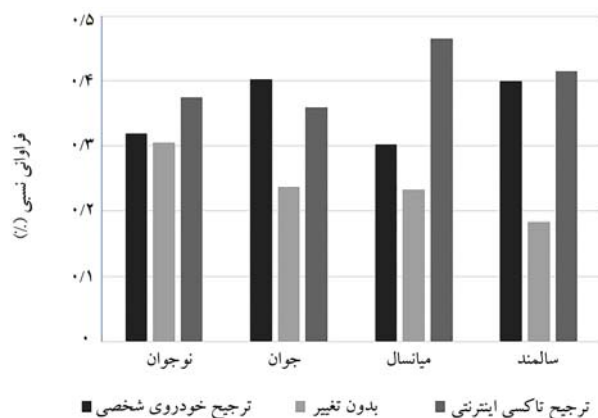
نتایج تحلیل فراوانی نشان می‌دهد که سهم افراد میانسال در نمونه‌ی پژوهش افرادی که تاکسی اینترنتی را انتخاب کرده‌اند، بیشتر از سایر گروه‌ها بوده است (شکل ۳). همچنین بیشترین سهم ترجیح خودروی شخصی مربوط به جوانان و سالمندان بوده است. در بین تمامی گروه‌های سنی، فقط سهم بیشتری از جوانان، خودروی شخصی را به تاکسی اینترنتی ترجیح داده‌اند و در رده‌های سنی دیگر، عکس این موضوع صادق بوده است.

مطابق جدول ۱ مشاهده می‌شود که ۲۳۰ نفر (۳۸/۵٪) گزینه‌ی سوم را انتخاب کرده‌اند، که به این معناست که بعد از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی، کمتر استفاده کرده‌اند و این گزینه در مقایسه با دیگر گزینه‌ها، بیشتر انتخاب شده است. همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشخص است، بیشتر افرادی که تاکسی اینترنتی در استفاده‌ی آنها از خودروی شخصی مؤثر بوده بوده است، مرد بوده‌اند.

طبق جدول ۳، نیز تمیز و بهداشتی بودن وسیله‌ی نقلیه و امکان توقف برای هر مدت زمان در هر لحظه و هر مکان از عواملی بوده‌اند که نسبت به سایر عوامل، تأثیر بیشتری در ترجیح خودروی شخصی در تاکسی اینترنتی داشته‌اند. در ضمن لازم به ذکر است که از ۵۹۸ داده‌ی جمع‌آوری شده، ۲۶۷ داده از تهران، ۱۱۱ داده از بیرجند (یکی از شهرهایی که بیشترین پاسخگویی را داشته است) و ۲۲۰ داده از سایر شهرها جمع‌آوری شده است.

۳.۳. وابستگی به خودروی شخصی

برای تعیین میزان وابستگی به خودروی شخصی، با توجه به سؤالی که در پرسش‌نامه از افراد پرسیده شده است، افرادی که به رانندگی با خودروی شخصی علاقه‌مند هستند و فقط زمانی که مجبور شوند، از اتوبوس یا سایر شیوه‌های حمل‌ونقلی استفاده می‌کنند، در گروه افراد بسیار وابسته طبقه‌بندی شده‌اند. افرادی که به رانندگی با خودروی شخصی علاقه دارند، چون دلیلی برای تغییر آن نمی‌بینند و به گزینه‌های جایگزین خودروی شخصی زیاد فکر نمی‌کنند، عضو طبقه‌ی افراد با وابستگی زیاد به خودروی شخصی هستند. در ضمن، افرادی که شرایط موجود جاده‌ها، مثل ترافیک و رفتار سایر رانندگان، رانندگی را برای آنها سخت می‌کند و تمایل دارند در صورت وجود گزینه‌های جایگزین، از آنها برای سفرهای خود استفاده کنند، عضو دسته‌ی افراد با



شکل ۳. ترجیح رده‌های سنی مختلف به انتخاب خودروی شخصی یا تاکسی اینترنتی.

آمارگیری پژوهش حاضر، به صورت برخط انجام شده است. پس از انجام طرح آزمایشی پرسش‌نامه و برطرف کردن نقاط ضعف آن با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و اساتید حمل‌ونقلی و تحلیل نتایج آن، تعداد ۶۸۱ داده جمع‌آوری شده است، که پس از حذف داده‌های مشکوک، پرت و نامناسب، نهایتاً فرایند مدل‌سازی روی ۵۹۸ داده انجام شده است.

در نتیجه، از داده‌های گردآوری شده‌ی اخیر با استفاده از متغیرهای برداشت شده از فرایند پرسش‌نامه و متغیرهای ناشی از کاهش ابعاد متغیرهای نگارشی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، برای ساخت مدل انتخاب وسیله‌ی سفر (مدل انتخاب گسسته) استفاده شده است، که در ادامه، به آن پرداخته شده است.

۱.۳. حجم نمونه

محاسبه‌ی حجم نمونه در کارهای آماری برای تحلیل درست جامعه‌ی آماری اهمیت زیادی دارد. از این رو روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی حجم نمونه وجود دارد، در پژوهش حاضر، از یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای محاسبه‌ی حجم نمونه، که استفاده از فرمول کوکران است (رابطه ۱۰)، استفاده شده است.

$$n = \frac{z^2 pq N}{d^2 (N - 1) + z^2 pq} \quad (10)$$

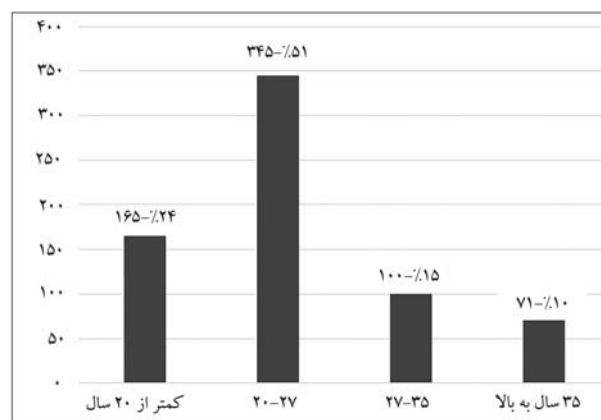
که در آن، n حجم نمونه‌ی آماری، N حجم جامعه‌ی آماری، d اشتباه مجاز؛ z مقدار متغیر نرمال با سطح اطمینان $1 - \alpha$ است. همچنین، p نسبت برخورداری از صفت مورد نظر و $q = (1 - p)$ نسبت عدم برخورداری از صفت مورد نظر است.

با در نظر گرفتن مقدار خطای مجاز در حد ۵٪ و مقدار متغیر نرمال برای سطح اطمینان ۹۵٪، در جوامع خیلی بزرگ، مانند جامعه‌ی مدنظر پژوهش حاضر، کمینه‌ی حجم نمونه، ۳۸۴ عدد برآورد شده است.^[۱۸] پس تعداد ۵۹۸ داده‌ی نهایی برای پژوهش حاضر مناسب است.

۲.۳. تحلیل آمار توصیفی

در بخش حاضر، داده‌ها از نظر کمی و آماری بررسی شده‌اند. جدول‌ها و شکل‌های ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی نتایج برگرفته از داده‌های جمع‌آوری شده برای بررسی تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی است.

طبق نتایج تحلیل، فراوانی افراد بین ۲۰ تا ۲۷ سال، ۵۱٪ نمونه را تشکیل می‌دهند، که بیشترین میزان پاسخگویی میان تمام رده‌ی سنین را دارد (شکل ۲).



شکل ۲. توزیع فراوانی سن در نمونه‌ی پژوهش.

جدول ۱. نتایج تحلیل فراوانی گزینه‌های پاسخ متغیر وابسته (تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی).

متغیر وابسته	کد متغیر	فراوانی مطلق	فراوانی نسبی (درصد)
Y (تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی)	۱ (استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی)	۲۲۰	۳۶/۸
	۲ (عدم تغییر)	۱۴۸	۲۴/۷
	۳ (استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی)	۲۳۰	۳۸/۵
	مجموع	۵۹۸	۱۰۰/۰

جدول ۲. نتایج تحلیل فراوانی جنسیت افراد به تفکیک گزینه‌های متغیر وابسته.

نام متغیر	کد متغیر	جنسیت	
		مرد	زن
Y (تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی)	۱ (استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی)	۱۰۲ (٪۳۵/۶)	۱۱۸ (٪۳۷/۸)
	۲ (عدم تغییر)	۷۲ (٪۲۵/۲)	۷۶ (٪۲۴/۳)
	۳ (استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی)	۱۱۲ (٪۳۹/۲)	۱۱۸ (٪۳۷/۸)

جدول ۳. نتایج تحلیل فراوانی میزان تأثیر عوامل مؤثر در ترجیح خودروی شخصی در تاکسی اینترنتی.

متغیر	فراوانی نسبی (درصد)				میانگین	انحراف معیار
	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم		
دسترسی آسان	۲۹/۳	۲۹/۳	۲۳/۹	۱۲/۲	۵/۴	۱۰۰
امنیت	۲۸/۳	۲۶/۹	۲۵/۱	۱۴/۵	۵/۲	۱۰۰
کنترل مسیر	۳۱/۳	۲۶/۸	۱۹/۹	۱۴/۷	۷/۴	۱۰۰
تمیز بودن	۳۶/۸	۲۵/۶	۲۲/۱	۱۱/۹	۳/۷	۱۰۰
امکان توقف	۴۹/۷	۲۸/۴	۱۲/۹	۶/۷	۲/۳	۱۰۰

مدل در جدول ۴ ارائه شده است.

وابستگی کم به خودروی شخصی هستند. در نهایت نیز افرادی که همیشه سعی می‌کنند از روش‌های غیرآلاینده و سازگار با محیط زیست برای جابه‌جایی استفاده کنند و از خودروی شخصی بسیار کم استفاده می‌کنند، عضو دسته‌ی با وابستگی بسیار کم به خودروی شخصی هستند.

۴. نتایج پرداخت مدل

پس از بررسی‌های انجام شده و انتخاب داده‌های مورد نیاز، عملیات مدل‌سازی بر روی ۵۹۸ داده انجام شده است. با توجه به این‌که هر نفر، سه گزینه برای انتخاب داشت که تأثیر تاکسی اینترنتی در استفاده از خودروی شخصی را مشخص می‌کرد و هر گزینه از زیاد تا کم دسته‌بندی شده بود.

در ادامه‌ی بخش حاضر، به بررسی نتایج مدل پرداخته شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های مختلفی با در نظر گرفتن اجراها و متغیرهای متفاوت مدل‌سازی بررسی شده‌اند. در ادامه، بهترین آنها، تفسیر و تحلیل شده است. نتایج پرداخت

۱.۴. مدل تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی

در مدل مذکور، تابع مطلوبیت اول، مربوط به مطلوبیت گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی پس از ظهور پدیده‌ی تاکسی اینترنتی است. تابع مطلوبیت دوم، مربوط به عدم تغییر نوع شیوه‌ی سفر، و تابع مطلوبیت سوم، مربوط به تأثیر تاکسی اینترنتی در کاهش وابستگی افراد به خودروی شخصی است. گزینه‌ی پایه در پژوهش حاضر، گزینه‌ی تأثیر نداشتن تاکسی اینترنتی در استفاده از خودروی شخصی تعریف شده است، که مربوط به تابع مطلوبیت دوم بوده و ضریب ثابت برای آن صفر تعیین شده است (جدول ۴).

۱.۱.۴. تابع مطلوبیت استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی پس از ظهور تاکسی اینترنتی

در تابع مطلوبیت اول، که مربوط به افرادی است که پس از ظهور تاکسی اینترنتی، از خودروی شخصی بیشتر استفاده می‌کنند، ضریب منفی متغیر مربوط به دارندگان

جدول ۴. نتایج پرداخت مدل لجیت چندگانه‌ی تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی.

تابع مطلوبیت گزینه پس از ظهور تاکسی اینترنتی				
متغیرها	توضیحات متغیرها	استفاده‌ی بیشتر از	عدم تغییر	استفاده‌ی کمتر از
		خودروی شخصی	شیوه‌ی سفر	خودروی شخصی
A _۱	ضریب ثابت	* - ۰/۷۱ (-۱/۷۲)	** - ۰/۷۵ (-۲/۰۲)	
PHD _۱	متغیرهای مجازی تحصیلات دکتری	*** - ۱/۷۵ (-۳/۳۸)		
D - VHIGH	وابستگی خیلی زیاد به خودروی شخصی	** - ۰/۵۰ (۲/۰۵)		
AIM-CAR-WORK	متغیر مجازی هدف سفر کاری با خودروی شخصی	** - ۰/۴۵ (۱/۹۶)		
AIM-CAR-MEET	متغیر مجازی هدف سفر دیدار نزدیکان با خودروی شخصی	*** - ۰/۷۶ (۲/۷۵)		
AIM-CAR-RECREATION	متغیر مجازی هدف سفر تفریحی با خودروی شخصی	** - ۰/۶۶ (-۲/۴۶)		
TEH _۲	متغیر مجازی سکونت در تهران		** - ۰/۴۲ (۲/۰۳)	
TEEN _۲	متغیر مجازی سن کمتر از ۲۰ سال		*** - ۰/۶۹ (۲/۹۸)	
WAGE _۲	درآمد		** - ۰/۲۳ (-۲/۱۱)	
Pc-ECO	مؤلفه‌ی اصلی اول - متغیر نگرشی اقتصادی		*** - ۰/۶۶ (۷/۸۶)	*** - ۰/۹۱ (۱۰/۳۲)
Pc-SK	مؤلفه‌ی اصلی پنجم - متغیر مهارتی		** - ۰/۲۳ (۲/۳۱)	
AIM-TAXI-MEET	متغیر مجازی هدف سفر دیدار نزدیکان با تاکسی اینترنتی		** - ۰/۴۸ (۱/۹۹)	
BACH _۳	متغیر مجازی تحصیلات لیسانس		* - ۰/۴۰ (-۱/۸۵)	
D-LOW	متغیر مجازی وابستگی کم به خودروی شخصی		* - ۰/۴۲ (۱/۹۲)	

ادامه ی جدول ۴.

*** ^o / ۲۳ (۳/۷۵)	مؤلفه ی اصلی دوم - متغیر نگرشی کیفیت خدمات تاکسی های اینترنتی	Pc-ITP
*** ^o / ۶۰ (۲/۸۳)	متغیر مجازی هدف سفر مراجعه به ادارات با تاکسی اینترنتی	AIM-TAXI-OFFICE
*** ^o / ۶۵ (۳/۱۰)	متغیر مجازی هدف سفر بازگشت به منزل با تاکسی اینترنتی	AIM-TAXI-HOME
	-۶۵۶/۹۷۰۱	LL(0)
	-۶۴۶/۴۲۳۶	LL(C)
	-۴۶۹/۵۹۳۱	LL(β)
	^o / ۲۸۵۲	ρ^2
	^o / ۲۷۳۵	ρ_c^2

پنجم، یعنی متغیرهای نگرشی اقتصادی و متغیرهای مهارتی در استفاده از خودروی شخصی با ضریب مثبت، احتمال انتخاب گزینه ی اخیر را افزایش می دهد.

۳.۱.۴. تابع مطلوبیت استفاده ی کمتر از خودروی شخصی پس از ظهور تاکسی اینترنتی

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل لوجیت چندگانه مطابق جدول ۴ مشخص است افرادی که وابستگی کمی به خودروی شخصی دارند، نسبت به سایر افراد پس از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی خود کمتر استفاده می کنند؛ چون ضریب متغیر وابستگی کم به خودروی شخصی در تابع مطلوبیت سوم، که مربوط به تأثیر تاکسی اینترنتی در استفاده از خودروی شخصی است، مثبت بوده است. در نتیجه با تغییر نگرش افراد می توان به کاهش میزان استفاده ی آنها از خودروی شخصی کمک کرد.

ضریب منفی متغیر افراد دارای مدرک کارشناسی نشان دهنده ی تأثیر معکوس متغیر ذکر شده در تغییر شیوه ی سفر افراد است؛ به بیان دیگر افرادی که مدرک کارشناسی دارند، نسبت به سایرین بعد از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی خود بیشتر استفاده کرده اند. با توجه به این موضوع و نتایج قبل، می توان اشاره کرد که با افزایش سطح تحصیلات، تمایل افراد به کاهش استفاده از خودروی شخصی افزایش یافته است.

در ضمن متغیر مؤلفه های اصلی اول و دوم نیز با علامت مثبت در تابع مطلوبیت سوم معنادار شده اند، که این موضوع به این معناست که متغیرهای نگرشی اقتصادی و کیفیت خدمات تاکسی اینترنتی، تأثیر مستقیم در کاهش وابستگی به خودروی شخصی با تاکسی اینترنتی دارد.

همچنین متغیرهای مجازی مربوط به هدف سفر مراجعه به اداره ها و بازگشت به منزل، با ضریب مثبت معنادار شده است. این بدان معنی است که پس از ظهور تاکسی اینترنتی، افرادی که با اهداف مراجعه به اداره ها و بازگشت به منزل سفر می کنند، تمایل شان به استفاده از خودروی شخصی کاهش یافته است.

۲.۴. آثار حاشیه یی

نتایج تحلیل آثار حاشیه یی متغیرهای مختلف در جدول ۵ نشان می دهد که با تغییر سطح تحصیلات از مقطع دیپلم به دکتری، سهم گزینه ی استفاده ی بیشتر از

مدرک دکتری است؛ که نشان می دهد افرادی که تحصیلات دکتری دارند، نسبت به سایرین، احتمال کمتری به انتخاب گزینه ی مذکور دارند، به این معنی که این قبیل افراد پس از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی، کمتر استفاده می کنند.

در ضمن، افرادی که وابستگی بسیار زیادی به خودروی شخصی دارند، نسبت به سایر افراد، پس از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی خود بیشتر استفاده می کنند، چون ضریب این متغیر در تابع مطلوبیتی که مربوط به تأثیر تاکسی اینترنتی در استفاده از خودروی شخصی است، مثبت بوده است. این موضوع با توجه به نوع نگرش وابسته ی افراد اشاره شده، طبیعی به نظر می رسد.

همچنین، افرادی که با هدف کاری و دیدار نزدیکان از خودروی شخصی استفاده می کنند، با توجه به ضریب مثبت متغیر مجازی مربوط به آنها، نسبت به سایرین با احتمال بیشتری گزینه ی اول را انتخاب و از خودروی شخصی خود بیشتر استفاده می کنند.

ضریب منفی متغیر مجازی در هدف سفر تفریحی با خودروی شخصی نشان می دهد که افراد با هدف سفر تفریحی از خودروی شخصی کمتر استفاده می کنند. این موضوع می تواند نشان دهنده ی این باشد که افراد تمایل دارند سفرهای تفریحی خود را با شیوه ی دیگری انجام دهند و از وابستگی آنها به خودروی شخصی در سفرهای تفریحی کاسته می شود.

۲.۱.۴. تابع مطلوبیت عدم تغییر شیوه ی سفر پس از ظهور تاکسی اینترنتی

همان طور که در جدول ۴ مشخص است، با توجه به ضرایب معنادار شده در تابع مطلوبیت دوم، که گزینه ی تأثیر نداشتن تاکسی اینترنتی در میزان استفاده از خودروی شخصی است، به تحلیل ضرایب آن پرداخته شده است. افرادی که در تهران زندگی می کنند، نسبت به سایر شهرها، احتمال بیشتری برای انتخاب این گزینه دارند، چون ضریب آن در این تابع مطلوبیت مثبت شده است. لازم به ذکر است افرادی که سن کمتر از ۲۰ سال دارند، طبق مدل با توجه به ضریب مثبت متغیر مرتبط، احتمال بیشتری به انتخاب گزینه ی مذکور دارند و این موضوع به علت استفاده ی کمتر آنها از شیوه های سفر مختلف منطقی است. متغیر درآمد نیز در بخش حاضر با ضریب منفی بوده است، که نشان می دهد با کاهش درآمد افراد، احتمال این که تاکسی اینترنتی در استفاده ی این افراد از خودروی شخصی تأثیر نداشته باشد، بیشتر است. در نهایت، با توجه به معنادار شدن متغیرهای مربوط به مؤلفه های اصلی اول و

جدول ۵. نتایج تحلیل اثر حاشیه‌ی بی‌متغیرهای توضیحی.

متغیر	تغییر سطح	آثار حاشیه‌ی بی	
		تغییر به خودروی شخصی	تغییر به تاکسی
سطح تحصیلات	از دیپلم به دکتری	-۲۵/۸۲۵	۱۳/۲۸۰
	از کارشناسی به دکتری	-۲۲/۲۱۸	۱۱/۷۰۰
	از کارشناسی ارشد به دکتری	-۲۲/۳۰۲	۱۱/۷۲۷
محل سکونت	از تهران به بیرجند	۴/۵۸۷	-۱۰/۷۷۵
	از نوجوان به جوان	۴/۴۸۳	-۱۰/۵۱۹
سن	از نوجوان به میانسال	۶/۰۲۰	-۱۳/۶۶۱
	از نوجوان به سالمند	۸/۷۷۸	-۲۰/۷۴۶

جدول ۶. جدول فراوانی برآورد - مشاهده‌ی میزان تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی.

مشاهده	برآورد		
	استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی	بدون تغییر	استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی
استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی	۱۳۸	۴۳	۳۸
بدون تغییر	۴۲	۴۸	۵۸
استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی	۴۰	۵۶	۱۳۳
مجموع	۲۲۰	۱۴۷	۲۲۹

با تغییر سن از نوجوانی به جوانی، سهم گزینه‌های استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی و تاکسی اینترنتی به اندازه‌ی ۴۸۳٪ و ۳۵٪ افزایش و سهم گزینه‌ی بدون تغییر بودن شیوه‌ی سفر، ۵۱۹٪ کاهش یافته است. در نتیجه، جوانان نسبت به نوجوانان، تمایل بیشتری به تغییر شیوه‌ی سفر خود دارند.

با تغییر سن از نوجوانی به میانسالی، سهم گزینه‌های استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی و تاکسی اینترنتی به ترتیب ۲۰٪ و ۶۴۱٪ افزایش و سهم گزینه‌ی بدون تغییر ماندن نوع شیوه‌ی سفر، ۶۶۱٪ کاهش یافته است. بنابراین، میانسال‌ها نسبت به نوجوانان، تمایل بیشتری به تغییر شیوه‌ی سفر خود دارند.

با تغییر سن از نوجوانی به پیری، سهم گزینه‌های استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی و تاکسی اینترنتی به ترتیب ۸/۷۷۸٪ و ۱۱/۹۶۸٪ افزایش و سهم گزینه‌ی بدون تغییر ماندن نوع شیوه‌ی سفر، ۷۴۶٪ کاهش یافته است. بنابراین، افراد دارای سن بالا نسبت به نوجوانان تمایل بیشتری به تغییر شیوه‌ی سفر خود دارند.

با توجه به نتایج یاد شده، می‌توان گفت نوجوانان نسبت به سایر سنین، انعطاف‌پذیری کمتری برای تغییر نوع شیوه‌ی سفر خود دارند، که این مورد می‌تواند به دلیل گزینه‌های محدود حمل‌ونقلی برای ایشان باشد. در ضمن با روش‌های مختلف، مانند فرهنگ‌سازی مناسب برای نوجوانان، می‌توان از وابستگی زیاد جامعه‌ی آینده به خودروی شخصی جلوگیری کرد.

۳.۴. درصد برآورد درست

یکی از روش‌های ارزیابی صحت عملکرد مدل انتخاب، محاسبه‌ی درصد برآورد درست مدل با استفاده از جدول برآورد و مشاهده است. عناصر قطری جدول برآورد

تاکسی اینترنتی، ۱۲/۵۹۸٪ افزایش یافته و همچنین سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی، ۲۵/۸۲۵٪ کاهش داشته است؛ بنابراین، با تغییر سطح تحصیلات افراد از دیپلم به دکتری، احتمال انتخاب تاکسی اینترنتی افزایش و احتمال انتخاب خودروی شخصی کاهش یافته است.

با تغییر سطح تحصیلات از کارشناسی به دکتری، سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی ۲۲/۲۱۸٪ کاهش داشته و سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی، ۵۱۸٪ و بدون تغییر بودن انتخاب افراد نیز ۱۱/۷۰۰٪ افزایش داشته است. با تغییر سطح تحصیلات افراد از کارشناسی به دکتری تمایل به استفاده از خودروی شخصی کاهش و تمایل به استفاده از تاکسی اینترنتی افزایش یافته است.

با تغییر سطح تحصیلات از کارشناسی ارشد به دکتری، سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی، ۲۲/۳۰۲٪ کاهش و سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی، ۵۷۵٪ افزایش داشته است. در نتیجه، با تغییر سطح تحصیلات از کارشناسی ارشد به دکتری، تمایل افراد به استفاده از خودروی شخصی کاهش و تمایل به تاکسی اینترنتی افزایش یافته است.

با تغییر محل سکونت از تهران به بیرجند، سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از تاکسی اینترنتی نسبت به خودروی شخصی، ۶/۱۸۸٪ افزایش، سهم گزینه‌ی استفاده‌ی بیشتر از خودروی شخصی، ۴/۵۸۷٪ افزایش و سهم گزینه‌ی بدون تغییر بودن شیوه‌ی سفر، ۱۰/۷۷۵٪ کاهش یافته است. در نتیجه، با تغییر محل سکونت از کلان‌شهر تهران به بیرجند، که شهر کوچکی است، تمایل به تاکسی اینترنتی و خودروی شخصی افزایش و تمایل به عدم تغییر شیوه‌ی سفر کاهش یافته است؛ پس تأثیر تاکسی اینترنتی در شهر بیرجند در تغییر نوع وسیله‌ی نقلیه برای سفرهای درون‌شهری بیشتر بوده است.

و مشاهده، نشانگر میزان برآورد درست مدل و عناصر غیرقطری، نشانگر میزان برآورد نادرست مدل هستند. برای محاسبه‌ی میزان برآورد درست مدل می‌توان تعداد برآورد درست را بر تعداد کل تقسیم کرد (رابطه‌ی ۱۱). فراوانی برآورد و مشاهده‌ی میزان تأثیر تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی حاکی از این است که درصد برآورد صحیح مدل، ۵۳/۳۴ بوده است (جدول ۶). با توجه به درصد برآورد درست، بیش از نیمی از برآورد مدل با واقعیت انطباق داشته است:

$$\frac{\text{The number of correct estimates}}{\text{Total}} \times 100 = \text{Percent correct} \quad (11)$$

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از تاکسی اینترنتی و خودروی شخصی بر یکدیگر اثرگذارند. بررسی تأثیر دو شیوه‌ی حمل‌ونقلی مذکور در ادبیات پیشین، بیشتر با تمرکز بر مالکیت خودروی شخصی بوده و مطالعات محدودی به ویژه به صورت نگرشی در این زمینه انجام شده است.

در پژوهش حاضر، تأثیر تاکسی اینترنتی در میزان استفاده از خودروی شخصی در شرایط معمول سنجیده شده است. براساس ۵۹۸ داده‌ی پالایش شده طی فرایند گردآوری داده‌ها از طریق پرسش‌نامه‌یی که به همین منظور طراحی و تدوین شده بود، مدل‌های لجیت چندگانه برای تعیین نوع اثرگذاری تاکسی اینترنتی و خودروی شخصی بر یکدیگر استفاده شده است. برای تفسیر بیشتر نتایج، آثار حاشیه‌یی برای هر مدل بررسی و برای تشخیص میزان دقت مدل‌ها، درصد برآورد درست آنها تحلیل شده است. لازم به ذکر است که متغیرهای مختلف، مانند متغیرهای مجازی و ترکیبی در مدل بررسی شده‌اند، که در صورت معنادار شدن در مدل نهایی گزارش شده‌اند. نتایج فرایند مدل‌سازی نشان می‌دهد که افراد با تحصیلات دکتری پس از ظهور تاکسی اینترنتی از خودروی شخصی کمتر استفاده می‌کنند، که شاید علت آن سطح تحصیلات بالاتر و آگاهی بیشتر ایشان باشد، که سبب می‌شود در راستای کاهش

استفاده از خودروی شخصی برای کاهش آثار منفی حاصل از آن مانند آلودگی هوا گام بردارند. افراد با هدف سفر تفریحی از خودروی شخصی کمتر استفاده می‌کنند، که نشان‌دهنده‌ی تمایل افراد با هدف تفریحی به تغییر شیوه‌ی سفر و کاهش وابستگی آنها به خودروی شخصی است. در ضمن افراد با وابستگی بسیار زیادی به خودروی شخصی، از خودروی شخصی بیشتر استفاده می‌کنند، که با توجه به نگرش این افراد منطقی به نظر می‌رسد و افرادی که وابستگی کمی به خودروی شخصی دارند، از خودروی شخصی خود کمتر استفاده می‌کنند؛ در نتیجه نگرش افراد تأثیر بسزایی در تغییر رفتار سفرشان خواهد داشت و این موضوع نشان می‌دهد که وابستگی به خودروی شخصی، نقش مهمی در نوع انتخاب شیوه‌ی سفر ایفا می‌کند. براساس نتایج ذکر شده با تغییر نگرش افراد می‌توان به کاهش میزان استفاده‌ی آنها از خودروی شخصی کمک کرد، که این تغییر نگرش با فرهنگ‌سازی به روش‌های مختلف در فضای مجازی و رسانه‌ی ملی انجام پذیر است. در ساکنان کلان‌شهر تهران نسبت به بیرجند، که شهر کوچکی با جمعیت در حدود ۲۸۵ هزار نفر است، تمایل به تاکسی اینترنتی و خودروی شخصی، افزایش و تمایل به عدم تغییر شیوه‌ی سفر، کاهش یافته است.

پژوهش حاضر، مدیران و سیاست‌گذاران را در راستای تعیین و اصلاح قوانین با توجه به نتایج ارائه شده و بررسی نوع نگرش افراد و تأثیر آن در انتخاب شیوه‌ی سفر، تأثیرگذاری شیوه‌ی سفر جایگزین تاکسی اینترنتی در وابستگی به خودروی شخصی، تعیین ویژگی افرادی که با معرفی یک شیوه‌ی جایگزین به کاهش استفاده از خودروی شخصی خود تمایل دارند، و ترغیب آنها به استفاده از شیوه‌ی سفر جایگزین با در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای ایشان و در نتیجه نزدیک شدن به یک سیستم پایدار یاری می‌رساند.

به منظور ادامه‌ی پژوهش، می‌توان به بررسی تأثیر تاکسی اینترنتی در میزان استفاده از خودروی شخصی در شهرهای دیگر و مقایسه‌ی نتایج آن با پژوهش حاضر و بررسی انتقال‌پذیری آن، بررسی و تحلیل تأثیر تاکسی اینترنتی بر وابستگی به خودروی شخصی در دوران کرونا و بررسی و تحلیل عواملی که باعث تغییر شیوه‌ی سفر افراد با سطح تحصیلات دکتری در دوران قبل و بعد از کرونا شده است، اشاره کرد.

پانویس‌ها

- ride hailing
- Brindle
- Clewley & Mishra
- Uber
- Hall
- Berger
- Wallsten
- Cape Town
- Ward
- lyft
- difference in difference
- Guo
- Gong
- Zhong
- car ownership

- independently and identically distributed gumbel
- maximum likelihood estimation
- <https://porseshnameonline.com>

منابع (References)

- Conley, J. and McLaren, A.T. "Car Troubles: Critical Studies pp. 190-230 (2009). Of Automobility And Auto-Mobility", *Routledge*, first edition,
- Brindle, R. "Kicking the habit (Part 2): what are the real options for reducing 'car dependence'?", *Road and Transport Research*, **12**(4), pp. 34-40 (2003).
- Tchorek, G., Brzozowski, M., Dziewanowska, K. and et al. "Social capital and value co-creation: the case of a

- polish car sharing company", *Sustainability*, **12**(11), pp. 1-20 (2020).
4. Clewlow, R.R. and Mishra, G.S. "Disruptive transportation: the adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the united states", *Institute of Transportation Studies*, University of California, Davis, Research Report UCD-ITS-RR-17-07 (2017).
5. Hall, J.D., Palsson, C. and Price, J. "Is uber A substitute or complement for public transit", *Journal of Urban Economics*, **108**, pp. 36-50 (2018).
6. Berger, T., Chen, C. and Frey, C.B. "Drivers of disruption? estimating the uber effect", *European Economic Review*, **110**, pp. 197-210 (2018).
7. Wallsten, S. "The competitive effects of the sharing economy?: How is uber changing taxis??" , *Technology Policy Institute*, Washington D.C. (June 2015).
8. Vanderschuren, M. and Baufeldt, J. "Ride-sharing: A potential means to increase the quality and availability of motorised trips while discouraging private motor ownership in developing cities?" , *Research in Transportation Economics*, **69**, pp. 607-614 (2018).
9. Ward, J.W., Michalek, J.J., Azevedo, I.L. and et al. "On-demand ride sourcing has reduced per-capita vehicle registrations and gasoline use in U.S. states", *Transportation Research Board 97th Annual Meeting Compendium of Papers*, No. 18-05185, **108**, pp.289-301 (2018).
10. Guo, Y., Xin F., Barnes, S. and Li, X. "Opportunities or threats? the rise of online collaborative consumption and its impact on new car sales", *Electronic Commerce Research and Applications* , **29**, pp. 133-141 (2018).
11. Gong, J., Greenwood, B.N. and Song, Y. "Uber might buy me a mercedes benz?: An empirical investigation of the sharing economy and durable goods purchase", *SSRN Electronic Journal*, pp. 0-48 (2017).
12. Zhong, J., Lin, Y. and Yang, S. "The impact of ride-hailing services on private car use in urban areas: An examination in chinese cities", *Journal of Advanced Transportation*, **2020**, pp.10-12 (2020).
13. Hensher, D., Rose, J. and Greene, W.H. "Applied choice analysis: A primer", *Cambridge University Press*, second edition, pp.438-450 (2005).
14. Sharma, S. "Applied multivariate techniques", *John Wiley & Sons Inc.*, USA (1995).
15. Jolliffe, I. "Pincipal component analysis", *2nd Edition*, Springer, New York (2002).
16. Babania, M., Pourdoorish, A. and Mirasharfi, S.B. "The role of principal component analysis (PCA) in big data modeling", *3rd International Conference on Soft Computing*, pp.2-7, Rudsar (in Persian) (2019).
17. Tabachnick, B.G. and Fidell, L.S. "Using multivariate statistics", *5th edition*, Boston, MA: Allyn & Bacon, pp.497-503 (2007).
18. Cochran, W.G. "Sampling techniques", *3rd edition*, John Wiley & Sons, New York, pp.18-80 (1977).

شناسایی ترک در اعضاء بتنی با استفاده از مدل‌های رمزگذار - رمزگشا بر پایه‌ی یادگیری عمیق

محمد موسوی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی بخشی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۲/۳، ص. ۷۹-۸۸، (پژوهشی)

شناسایی ترک از مسائل ضروری و بنیادی زمینه‌ی پایش سلامت سازه‌های مهندسی است. پژوهش حاضر به ارائه‌ی مدلی بر پایه‌ی یادگیری عمیق پرداخته است، که به واسطه‌ی آن بتوان فرایند شناسایی ترک در سطوح بتنی را به صورت خودکار به انجام رساند. برای رسیدن به بیشترین دقت و همچنین کاهش زمان آموزش مدل از آموزش انتقالی در رویکرد آموزش استفاده شده است. استفاده از انواع روش‌های داده‌افزایی، کمک شایانی به توانایی مدل در مواجهه با شرایط تصویربرداری و نوفه‌های موجود در تصاویر کرده است. مدل مورد نظر با استفاده از یک مجموعه داده‌ی برچسبگذاری شده‌ی آموزش دیده و دقت نهایی براساس پارامتر ارزیابی اصلی پژوهش برابر ۹۱/۳۸٪ گزارش شده است. روش موجود نسبت به روش‌های پیشین پردازش تصویر، دقت بسیار بالاتری دارد و همچنین وجود انواع ترک در مجموعه‌ی داده‌ی استفاده شده کمک می‌کند که مدل برای انواع ترک‌ها قابلیت تعمیم داشته باشد و از دقت و کیفیت بخش‌بندی آن کاسته نشود.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ها، یادگیری عمیق، بینایی رایانه، یادگیری ماشین، تشخیص ترک.

mohammad.mousavi@sharif.edu
bakhshi@sharif.edu

۱. مقدمه

زیرساخت‌ها و سازه‌های پراهمیت، همچون: پل‌ها، سدها، تونل‌ها و آسمان‌خراش‌ها، در مواجهه با عواملی چون: زلزله، شرایط جوی، افزایش عمر، خستگی ناشی از بارگذاری‌های دوره‌یی و غیره، کاهش شدیدی در میزان باربری خود را تجربه می‌کنند. از اولین نشانه‌های بروز آسیب در سازه‌ها (به خصوص سازه‌های بتنی) می‌توان به پیدایش ترک‌ها اشاره کرد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترک‌ها می‌توانند به بروز ناپیوستگی و همچنین کاهش سختی اعضاء سازه‌یی منجر شوند.^[۱] لذا تشخیص به موقع ترک‌ها در سازه، ضرورت بسیار بالایی دارد. در سال‌های اخیر، پایش سلامت سازه‌ها^۱، کمک شایانی در تشخیص به موقع ترک‌ها داشته است. البته حسگرهای رایج در فرایند پایش سلامت همچون پیزوالکتریک^۲ یا فیبر نوری^۳ می‌توانند هزینه‌های زیادی با خود به همراه داشته باشند. علاوه بر این، تعداد بهینه‌ی حسگرها جهت پایش تمامی قسمت‌های سازه، همواره یکی از چالش‌های موجود در این مبحث بوده است. با توجه به چالش‌های اخیر، پایش بصری سازه‌ها همواره به عنوان جزئی ضروری از پایش سلامت سازه‌ها مطرح بوده است. با توجه به چالش‌ها و خطاهای مرتبط با پایش بصری سازه‌ها، روش‌های مختلف پردازش تصویر، همواره به عنوان یک راه حل برای اتوماسیون فرایند مذکور مطرح بوده است. این حوزه از پایش سلامت سازه‌ها (پردازش تصویر)، در سال‌های اخیر با توسعه‌ی هوش مصنوعی و به خصوص

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2022.59496.3055

پیدایش مبحث یادگیری عمیق^۴، به یکی از مباحث مورد توجه در پایش سلامت سازه‌ها مبدل شده است.

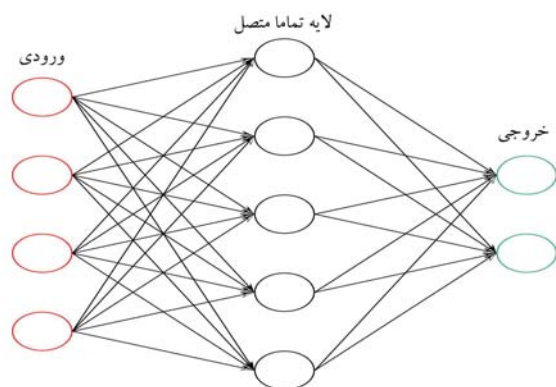
در گذشته، پردازش تصاویر عمدتاً با استفاده از روش‌های سنتی، همچون لبه‌یاب‌ها^۵ و تبدیل‌های حوزه‌ی بسامدی مانند فوریه انجام شده است. مطالعات زیادی در جهت اتوماسیون پایش بصری سازه‌ها، روش‌های اخیر را به کار برده‌اند.^[۶-۳] اگرچه روش‌های سنتی در دوره‌یی مورد استقبال گسترده بوده‌اند، اما ضعف‌هایی مانند حساسیت بسیار زیاد نسبت به وجود نوفه و همچنین سرعت پردازش بسیار کم، امکان بهره‌گیری عملی از آنها را غیرممکن ساخته است. از سال ۲۰۱۲، با ظهور شاخه‌ی یادگیری عمیق و توسعه‌ی شبکه‌های عصبی کانولوشن^۶، تحولی شگرف در حوزه‌ی بینایی رایانه صورت گرفته است، که این تحول به سرعت وارد تمامی رشته‌های مرتبط با پردازش تصاویر نیز شده است. پایش سلامت سازه‌ها نیز از قاعده‌ی مذکور مستثناء نبوده و در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری پیرامون استفاده از یادگیری عمیق در پایش سلامت سازه‌ها صورت گرفته است. در ابتدا، چا^۷ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۷] با استفاده از یادگیری عمیق و فرایند دسته‌بندی^۸ توانستند به طور تخمینی الگوی ترک را در اعضاء بتنی تشخیص دهند. اگرچه مدل ابتدایی مذکور، دقت بسیار کمی داشت، اما سرآغاز مطالعات بسیاری بوده است، که به نتایج دقیق‌تری منجر شده است. ایشان پس از آن در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸،^[۸] با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی کانولوشن ناحیه‌محور^۹ توانستند نواحی وجود ترک را با دقت بیشتری استخراج کنند. پس از آن، گوپالاکریشنان^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷)،^[۹]

شده است. یادگیری انتقالی، روش استفاده شده در آموزش مدل است که تأثیر به سزایی در افزایش سرعت یادگیری دارد و همچنین، تعداد داده‌ی مورد نیاز جهت آموزش مدل کاهش می‌یابد، که این موضوع در بحث بخش‌بندی تصویر، با توجه به فرایند زمانبر برچسب‌گذاری دستی داده‌های آموزش، بسیار مفید است.

۲. روش‌های استفاده شده

در بخش کنونی، به توضیح مختصری از روش استفاده شده در پژوهش حاضر پرداخته شده است. روش استفاده شده در پژوهش حاضر، یادگیری عمیق در حقیقت زیرشاخه‌ی نوین از شاخه‌ی یادگیری ماشین است. استفاده از یادگیری ماشین، از دیرباز در حل مسائل مهندسی رواج داشته است. شبکه‌های عصبی نمونه‌ی شاخص و بسیار کاربردی از مدل‌های یادگیری ماشین هستند، که در حل مسائل مختلف استفاده می‌شوند. با توجه به این‌که مدل استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، حالتی پیشرفته و تعمیق‌یافته از شبکه‌های عصبی است، توضیحی مختصر از عملکرد شبکه‌های عصبی ارائه شده است.

در شکل ۱، که نمایی بسیار ساده از یک شبکه‌ی عصبی است، مکانیزم عملکرد شبکه‌های عصبی مشاهده می‌شود. در حل مسائل مرتبط با شبکه‌ی عصبی، داده‌ی ورودی مسئله مشخص است، داده‌ی خروجی نیز می‌تواند با کمک آزمایش و یا نظر کارشناسی مشخص شود، اما فرمول بندی مشخصی ما بین مقادیر ورودی و خروجی به سادگی قابل استخراج نیست. در حل چنین مسائلی، شبکه‌ی عصبی می‌تواند راه‌گشا باشد؛ بدین ترتیب که تعداد زیادی از مقادیر ورودی و خروجی به صورت بردارهایی از داده‌ها تعریف می‌شوند و یک لایه‌ی شبکه‌ی عصبی (مانند شکل ۱) در تمام عناصر بردار ورودی مذکور ضرب و در نهایت بردار خروجی مدل حاصل می‌شود. یادگیری ماشین به زبان ساده عبارت است از بهینه کردن مقادیر موجود در عناصر این لایه‌ی میانی (لایه‌ی پنهان) به صورتی که حاصل ضرب آن در بردار ورودی، بردار خروجی را حاصل کند. این فرایند بهینه‌سازی، که به آموزش مدل شناخته می‌شود، توسط یک الگوریتم بهینه‌ساز^{۱۸} و با کمک یک تابع هزینه انجام می‌پذیرد؛ بدین صورت که در هر مرحله از آموزش، الگوریتم بهینه‌ساز مقادیری برای لایه‌ی پنهان پیشنهاد می‌کند و پس از ضرب شدن بردار در بردارهای ورودی و استخراج خروجی، اختلاف خروجی به دست آمده با خروجی واقعی که در دسترس بوده است (مقدار هزینه)، محاسبه می‌شود و این فرایند ادامه پیدا می‌کند، تا این‌که مقدار هزینه به کمترین مقدار ممکن برسد. پس از کامل شدن فرایند آموزش و ارزیابی عملکرد مدل، می‌توان با اتکا به مدل مذکور، مقادیر



شکل ۱. نمایی ساده از عملکرد یک شبکه‌ی عصبی.

در مطالعه‌ی بر روی دسته‌بندی تصاویر جهت تشخیص ترک در تصویر برخلاف مدل‌های قبلی، از یادگیری انتقالی^{۱۹} استفاده کردند، که مدل استفاده شده‌ی ایشان، یکی از مدل‌های معروف شبکه‌ی عصبی کانولوشنی با نام VGG۱۶^[۱۰] بوده است، که بر روی مجموعه‌ی داده‌ی تصویری Image-net^[۱۱] آموزش دیده است. در فرایند یادگیری انتقالی استفاده شده در مطالعه اخیر، قسمتی از مدل که قرار است ویژگی‌های داده‌ی تصویری را استخراج کند، به صورت از پیش آموزش‌یافته برای مدل تعریف می‌شود و مدل فقط برای لایه‌های نهایی، که مربوط به عملیات دسته‌بندی است، آموزش می‌بیند. بدین ترتیب قسمت عظیمی از بار محاسباتی وارده برای آموزش مدل کاسته می‌شود. با توجه به این‌که مدل‌های از پیش آموزش دیده‌ی مذکور بر روی مجموعه‌ی داده‌های بزرگ و فراگیری آموزش دیده‌اند، در صورت عدم تغییر در نوع و ماهیت داده، می‌توانند برای سایر مسائل نیز استفاده شوند، بدون آن‌که تغییر محسوسی در عملکرد آنها مشاهده شود.

تا این‌جا بیشتر مطالعات ذکر شده بر روی فرایندهای دسته‌بندی و یا تشخیص ترک، که فقط ناحیه‌ی وقوع ترک را تخمین می‌زدند، تمرکز داشته‌اند؛ در صورتی که فرایند پایش سلامت، نیاز به دقت بالایی برای مکان‌یابی ترک‌های مورد نظر دارد. با پیشرفت مطالعات در کاربرد یادگیری عمیق در پایش سلامت بصری سازه‌ها، دانگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۲] از یک شبکه‌ی تماماً کانولوشنی^{۱۳} استفاده کردند و فرایند بخش‌بندی یا تقسیم‌بندی معنایی^{۱۴} را بر روی داده‌های تصویری ترک بتن انجام دادند. در فرایند بخش‌بندی، یک تصویر جدید با ابعاد تصویر ورودی ایجاد می‌شود، که در آن پس‌زمینه به رنگ سیاه است و نواحی ترک با رنگ سفید مشخص می‌شود؛ به عبارتی، یک تصویر دودویی^{۱۵} خواهد بود که نواحی زمینه با مقدار صفر و نواحی ترک با مقدار یک مشخص خواهند شد. این فرایند به عنوان فرایند دسته‌بندی در مقیاس پیکسل نیز شناخته می‌شود، چرا که در طی آن هر پیکسل از تصویر در یک دسته‌ی مخصوص به خود طبقه‌بندی می‌شود. مدل استفاده شده در پژوهش اخیر، نوعی رمزگذار - رمزگشا^{۱۶} است، که در قسمت رمزگذار، ویژگی‌های تصویر استخراج و در قسمت رمزگشا، تصویر دودویی جدید ایجاد و خروجی مدل حاصل می‌شود.

در ادامه، با توسعه‌ی نسل جدیدی از رمزگذار - رمزگشاها مدلی با نام U-Net^[۱۳] ارائه شده است، که اوایل برای استفاده در داده‌های پزشکی استفاده می‌شده است، ولی به دلیل توانایی بالای آن در امر بخش‌بندی تصاویر، به سرعت در سایر مسائل نیز به کار گرفته شده است. لیو^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۴] با بهره‌گیری از مدل U-Net، فرایند بخش‌بندی تصویر را برای تشخیص ترک در بتن انجام دادند و توانستند به دقت نزدیک به ۹۰٪ دست پیدا کنند. البته در مطالعه‌ی مذکور نیز چالش‌هایی موجود بوده است، از جمله این‌که داده‌های استفاده شده، شامل ترک‌هایی با الگوی یکسان و ضخامت‌های مشابه بوده است، که در نتیجه‌ی آن، مدل نهایی در تشخیص ترک با ابعاد متفاوت با مشکل مواجه بوده است. همچنین رمزگذار استفاده شده در مدل U-Net ساختار بسیار ساده‌ی دارد، که در مقایسه با مدل‌های جدید، دقت نسبتاً کمتری دارد.

در پژوهش حاضر، فرایند بخش‌بندی تصاویر با استفاده از یادگیری عمیق برای شناسایی ترک در تصاویر اعضاء بتنی انجام شده است. برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر، از یک مجموعه داده‌ی جدیدتر استفاده شده است، که تفسیر دقیق‌تری از محتوای ترک‌ها را ارائه می‌دهد و شامل انواع مختلف ترک با ضخامت‌های متفاوت می‌شود. ضمناً مدل استفاده شده در پژوهش حاضر، یک مدل رمزگذار - رمزگشای U شکل است، که در قسمت رمزگذار آن از شبکه‌ی کانولوشنی RensNet۱۰۱^[۱۵] که یکی از مدل‌های بسیار دقیق و معروف کانولوشنی در حوزه‌ی یادگیری عمیق است، استفاده

هر یک از آنها، یک لایه‌ی تجمیع^{۱۹} اضافه می‌شود، که برای کنترل تعداد پارامترها ضروری است. در شکل ۴، نحوه‌ی عملکرد لایه‌های تجمیع مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، فرایند تجمیع به دو صورت تجمیع بیشینه و تجمیع میانگین اعمال می‌شود، که در یادگیری عمیق، عموماً از حالت تجمیع بیشینه استفاده می‌شود.

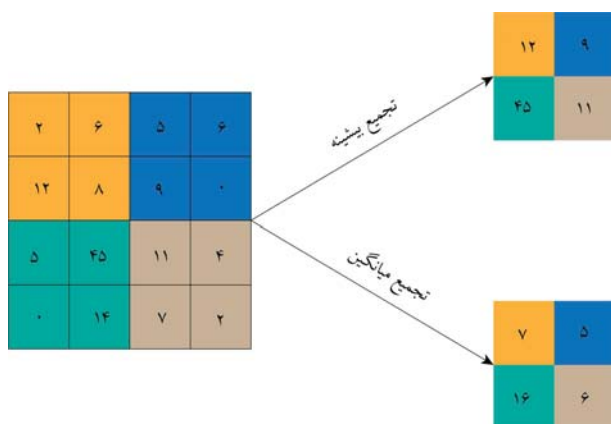
فرایند تجمیع با هدف کاهش ابعاد خروجی هر لایه از مدل انجام می‌پذیرد. به طور مثال، در شکل ۴ که ابعاد تجمیع در آن برابر 2×2 است، ابعاد داده‌ی خروجی به نصف حالت اولیه کاهش پیدا کرده است.

آخرین قسمت از یک مدل شبکه‌ی عصبی کانولوشنال در حالت کلی، مطابق شکل ۳، از یک یا چند لایه‌ی تماماً متصل تشکیل می‌شود، که فرایند دسته‌بندی داده را بر عهده دارد. البته این ساختار مختص حالت‌های عمومی مدل‌های کانولوشنال است، که برای مسائل دسته‌بندی تصاویر استفاده می‌شوند؛ در سایر مسائل همچون تشخیص اشیاء^{۲۰} و یا بخش‌بندی معنایی^{۲۱} تصاویر لازم است که تغییراتی در این قسمت نهایی مدل اعمال شود، که خروجی مطلوب حاصل شود. به طور مثال، در مدل‌های استفاده شده در مسائل بخش‌بندی، که موضوع بحث پژوهش حاضر نیز است، استفاده از لایه‌های رمزگشا^{۲۲} رایج است، که عملی عکس لایه‌های کانولوشن پیشین انجام می‌دهند و در چیدمان متقارن با لایه‌های قبل از خود، اصطلاحاً یک مدل رمزگذار- رمزگشا^{۲۳} را تشکیل می‌دهند.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در پژوهش حاضر فرایند بخش‌بندی تصویر برای تصاویر ترک اعضاء بتنی به انجام رسیده است. اگرچه مدل‌های رایج شبکه‌ی عصبی عمدتاً با هدف حل مسائل دسته‌بندی توسعه داده می‌شوند، اما قسمت استخراج ویژگی^{۲۴} مدل‌های مذکور برای تمامی مسائل بینایی رایانه قابل استفاده است و هسته‌ی اصلی تمامی مدل‌های استفاده شده در بینایی رایانه یک شبکه‌ی عصبی کانولوشن است. در بخش بعد، توضیحاتی در مورد مدل استفاده شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

۱.۲. مدل استفاده شده

در مطالعه‌ی حاضر، از یک مدل رمزگذار- رمزگشای U شکل استفاده شده است، که یکی از موفق‌ترین مدل‌ها در زمینه‌ی بخش‌بندی تصاویر است. این دسته از مدل‌ها (رمزگذار- رمزگشا)، از یک رمزگذار تشکیل می‌شود، که عموماً یک مدل شبکه‌ی عصبی کانولوشن است، که از قسمت دسته‌بندی‌کننده‌ی^{۲۵} آن صرف‌نظر و فقط قسمت استخراج ویژگی به عنوان رمزگذار مدل وارد شده است. همچنین برای رسیدن به برجسب دودویی مورد نظر برای عملیات بخش‌بندی تصویر، یک رمزگشا وظیفه‌ی

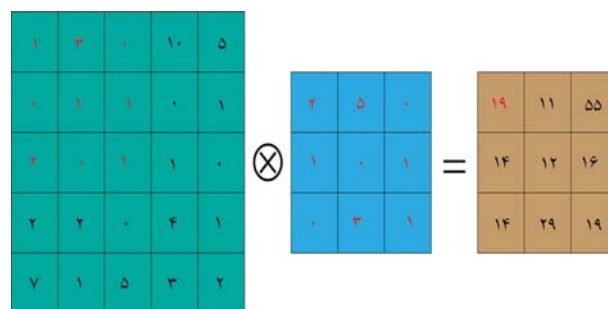


شکل ۴. عملکرد لایه‌های تجمیع در شبکه‌های عصبی کانولوشن.

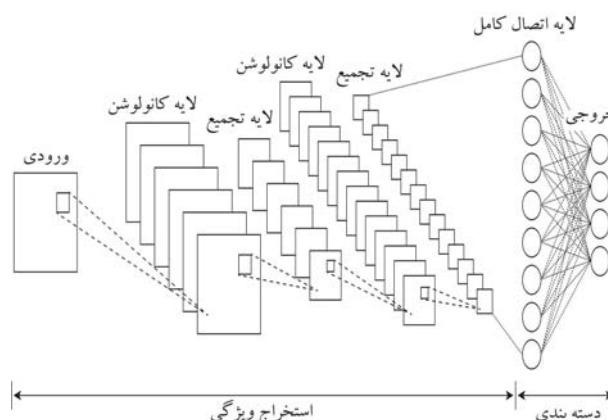
خروجی را برای داده‌هایی محاسبه کرد، که هیچ اطلاعی از خروجی آنها در دست نیست.

اگرچه شبکه‌های عصبی قادر به حل بسیاری از مسائل هستند، یک محدودیت همواره آنها را دچار مشکل می‌کند. همان‌گونه که در توضیحات قبل اشاره شد، داده‌ی ورودی به این مدل لازم است از نوع بردارهای یک بُعدی باشد؛ لذا محدودیت اخیر، عملکرد شبکه‌های عصبی را در مواجهه با داده‌های دو یا چندبُعدی با چالش فراوان همراه کرده است. یکی از مهم‌ترین داده‌هایی که شامل محدودیت مذکور است، داده‌ی تصویر است، که عموماً به صورت تانسورهای سه بُعدی RGB در دسترس هستند و ارتباط بین عناصر آن در هر سه بُعد برقرار است و لذا تبدیل آن به بردارهای ستونی باعث از بین رفتن بخشی از ارتباط بین عناصر می‌شود. در چنین داده‌هایی، استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنال به جای شبکه‌های عصبی ساده توصیه می‌شود. در شبکه‌ی عصبی ساده، به جای این‌که عملکرد به صورت ستونی تعریف شود، به صورت ماتریس‌های کوچک دو یا سه بُعدی (کرنل یا فیلتر) تعریف می‌شود، با انجام عمل کانولوشن بر روی سطح داده (تصویر)، فرایند یادگیری انجام می‌پذیرد. فرایند کانولوشن برای یک داده‌ی دو بُعدی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

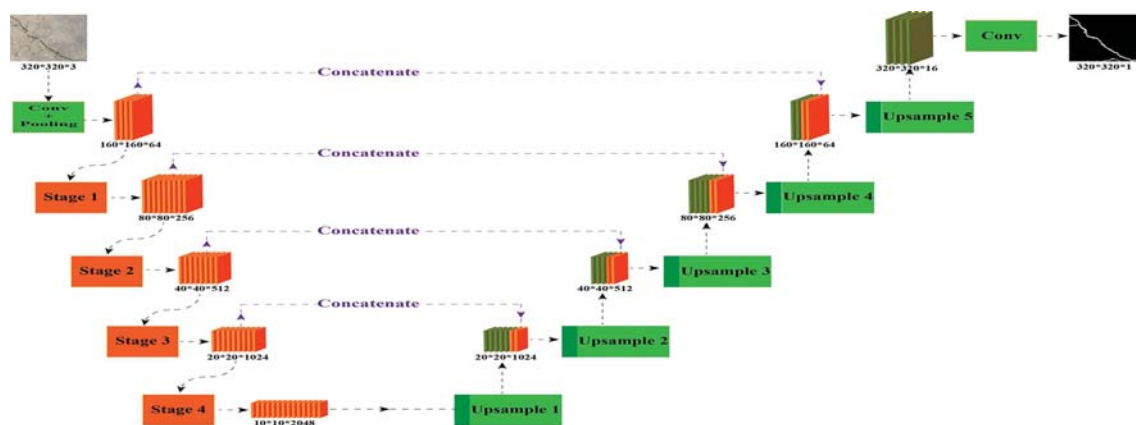
در شکل ۲، هر درایه از ماتریس خروجی از مجموع حاصل ضرب یکایک عناصر ماتریس کرنل در ماتریس ورودی حاصل شده است. در یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی، هر لایه از شبکه از تعدادی متغیر فیلتر (کرنل) کانولوشن تشکیل شده است، که به ترتیب بر ورودی اعمال می‌شوند. همچنین با توجه به پیچیدگی داده‌ی تصویر، لازم است که عملیات اخیر در مقیاس‌های مختلف انجام پذیرد؛ لذا یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی معمولاً از بر هم نهی تعدادی لایه‌ی کانولوشنی ایجاد می‌شود. در شکل ۳، نمایی ساده از یک شبکه‌ی عصبی کانولوشن مشاهده می‌شود. مدل کانولوشن شکل ۳ از ۲ لایه‌ی کانولوشن تشکیل شده است، که پس از



شکل ۲. فرایند کانولوشن در یک داده‌ی دو بُعدی.



شکل ۳. نمایی ساده از یک شبکه‌ی عصبی کانولوشن.



شکل ۵. معماری کلی مدل استفاده شده در پژوهش حاضر.

جدول ۱. جزئیات مدل ResNet ۱۰۱ رمزگذار استفاده شده در مدل حاضر.

مرحله	ابعاد خروجی	ابعاد و تعداد فیلترها
لایه ابتدایی	160×160	7×7
۱	80×80	$\left\{ \begin{matrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{matrix} \right\} \times 3$
۲	40×40	$\left\{ \begin{matrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{matrix} \right\} \times 4$
۳	20×20	$\left\{ \begin{matrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{matrix} \right\} \times 23$
۴	10×10	$\left\{ \begin{matrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{matrix} \right\} \times 3$

۲.۲. داده‌ی استفاده شده

در مطالعه‌ی حاضر، از یک مجموعه‌ی داده‌ی دسترسی آزاد با ۴۵۸ تصویر از سطوح بتنی دارای ترک استفاده شده است.^[۱۶] تصاویر موجود در مجموعه‌ی اخیر از ساختمان‌های مختلف در دانشگاه فنی خاورمیانه^{۲۷} در ترکیه گرفته شده و هر یک از آنها به صورت دستی برچسب‌گذاری و در قالب یک تصویر دودویی (سیاه و سفید) ارائه شده‌اند. نمونه‌هایی از تصاویر موجود در مجموعه‌ی ذکر شده به همراه برچسب‌های متناظر با هر یک در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

از مجموعه داده‌ی اخیر تا کنون مجموعه‌های ثانویه‌ی زیادی استخراج شده است، که از جمله‌ی آنها می‌توان به مجموعه‌ی ارائه شده توسط ژانگ^{۲۸} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۷] که برای دسته‌بندی تصاویر استفاده می‌شود، اشاره کرد. ابعاد اصلی تصاویر در مجموعه‌ی داده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر برابر با $(320 \times 320 \times 3)$ بوده است، که برای آموزش مدل بسیار بزرگ است و هزینه‌ی محاسباتی بسیار زیادی را تحمیل می‌کند؛ لذا تصاویر به اندازه‌ی (320×320) تبدیل و از تصاویر با ابعاد جدید برای آموزش مدل یادگیری عمیق استفاده شده است.

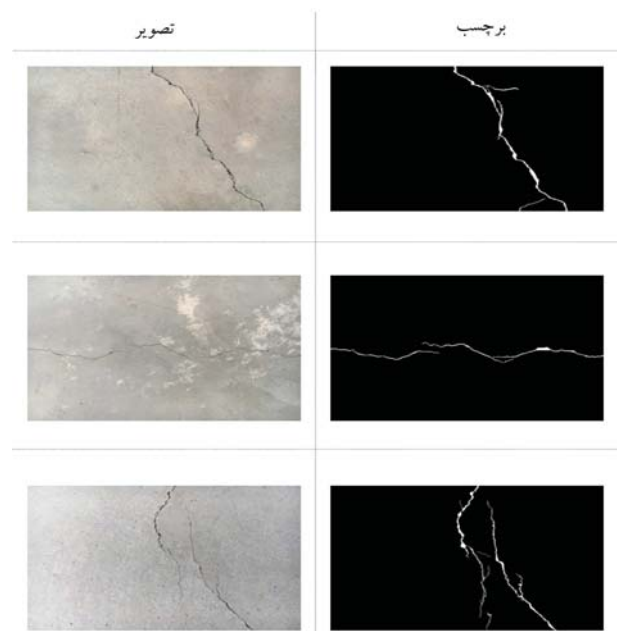
برگرداندن ابعاد داده را به مقدار متناظر اولیه بر عهده دارد (در قسمت قبل ذکر شد که واحد استخراج ویژگی در یک مدل شبکه‌ی عصبی کانولوشن برای کار کردن در مقیاس‌های مختلف، به صورت مرحله‌ی ابعاد داده را کاهش می‌دهد، لذا از داده‌ی نهایی ایجاد شده در یک مدل شبکه‌ی عصبی کانولوشن نمی‌توان مستقیماً برای عملیات بخش‌بندی تصویر استفاده کرد).

در مدل ایجاد شده در مطالعه‌ی حاضر، شبکه‌ی عصبی کانولوشن ResNet ۱۰۱ به عنوان رمزگذار و برای قسمت رمزگشای آن از رمزگشای پیشنهادی U-Net استفاده شده است. تفاوت مدل اخیر با مدل‌های ساده‌تر رمزگذار- رمزگشا در این است که در مدل‌های U شکل، اتصال‌هایی تعریف می‌شوند که عناصر موجود در رمزگذار را با عناصر ایجاد شده در رمزگشا مرتبط می‌سازد و بدین صورت نقشی اصلاحی در خروجی نهایی مدل ایفا می‌کند، که تأثیر به سزایی در دقت نهایی مدل دارد. معماری کلی مدل ساخته شده، در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

قسمت رمزگذار مدل ResNet ۱۰۱، یکی از مدل‌های عمیق از خانواده‌ی مدل‌های ResNet است، که از چهار بخش اصلی تشکیل شده است، که هر یک از آنها از واحدهای سه لایه‌ی کانولوشنی تشکیل شده‌اند، که مجموع لایه‌های موجود در مدل برابر با ۱۰۱ می‌شود. در جدول ۱، ترتیب و جزئیات مربوط به مدل ResNet ۱۰۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در مدل استفاده شده در پژوهش حاضر به لایه‌ی دسته‌بندی‌کننده نیاز نیست، در نتیجه، لایه‌ی دسته‌بندی‌کننده از معماری مدل حذف و مدل ارائه شده در جدول ۱، ۱۰۰ لایه دارد.

در ادامه، با توجه به این‌که ابعاد داده طی پنج مرحله کاهش پیدا کرده است، یک رمزگشای پنج مرحله‌ی به مدل اضافه شده و داده به یک تانسور با ابعاد اولیه‌ی (320×320) با ۱۶ کانال بازگشته است. هر لایه از رمزگشای مذکور، ابعاد داده را به دو برابر افزایش داده و پیکسل‌های جدید افزوده شده را با توجه به مقادیر موجود در داده‌ها پر کرده است.

در روش استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، برای بخش‌بندی تصاویر ترک، در مجموع دو برچسب برای اختصاص به پیکسل‌های تصاویر در نظر گرفته شده است: ترک و زمینه. با توجه به این موضوع، یک لایه‌ی کانولوشن، که وظیفه‌ی دسته‌بندی یکایک پیکسل‌ها را بر عهده دارد، به مدل افزوده شده است. در لایه‌ی مذکور از یک فعال‌ساز از نوع سیگموئید^{۲۶}، که یکی از فعال‌سازهای رایج برای دسته‌بندی‌های دودویی است، استفاده می‌شود. در نهایت، خروجی مدل به صورت یک تصویر دودویی با مقادیر صفر و یک است، که پیکسل‌های با مقدار صفر مربوط به زمینه و پیکسل‌های با مقدار یک، محل ترک را مشخص می‌کنند.



شکل ۶. نمونه‌هایی از داده‌های موجود در مجموعه‌ی داده.

در فرایند یادگیری ماشین، معمولاً داده‌های موجود به دو دسته اختصاص می‌یابند: دسته‌ی اول، که برای آموزش استفاده می‌شود و دسته‌ی دوم، که برای ارزیابی نهایی مدل استفاده می‌شود. اما در مبحث یادگیری عمیق، موضوع کمی متفاوت است. به علت احتمال وقوع بیش برآزش^{۲۹} در هنگام آموزش مدل، لازم است روشی اتخاذ شود که از عدم وقوع پدیده‌ی مذکور اطمینان حاصل شود. بیش‌برآزش در مبحث یادگیری به حالتی اطلاق می‌شود که فرایند یادگیری بر روی داده‌ی آموزش بیش از اندازه انجام شود؛ در این حالت دقت پیش‌بینی مدل بر روی داده‌های آموزش بسیار بالاست، ولی برای پیش‌بینی داده‌های جدید مدل ناتوان است و عملکرد بسیار ضعیفی از خود نشان می‌دهد. به همین جهت لازم است روشی پیشنهاد شود که مدل را رصد و پیش از وقوع بیش برآزش، از ادامه‌ی آموزش مدل جلوگیری کند. روش پیشنهادی برای غلبه بر چالش اخیر این بوده است که مجموعه‌ی داده‌ی استفاده شده به سه بخش آموزش^{۳۰}، اعتبارسنجی^{۳۱} و ارزیابی^{۳۲} تقسیم و آموزش طی دوره‌های^{۳۳} جداگانه انجام شود و در پایان، هر دوره‌ی اعتبارسنجی مدل با کمک داده‌های اعتبارسنجی انجام شود. بدین ترتیب در لحظه‌ی که مقدار هزینه^{۳۴} برای داده‌های اعتبارسنجی شروع به افزایش کند، لحظه‌ی شروع بیش‌برآزش است. در فرایند آموزش مدل در پژوهش حاضر، مجموعه‌ی داده‌ی متشکل از ۴۵۸ تصویر، به سه قسمت تقسیم شده است: ۳۲۰ تصویر مختص آموزش، ۶۹ تصویر به منظور اعتبارسنجی و ۶۹ تصویر دیگر به منظور ارزیابی نهایی مدل استفاده شده‌اند.

۳.۲. پارامترها و معیارهای ارزیابی

در پژوهش حاضر با توجه به پیچیدگی داده‌ها و خروجی‌ها لازم بود پارامترهای دقیقی برای ارزیابی پیش‌بینی‌ها در نظر گرفته شوند. در داده‌های تصویری موجود در مجموعه‌ی داده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، قسمت عمده‌ی تصاویر را پس‌زمینه‌ی آنها تشکیل داده و فقط درصدی بسیار جزئی (حدود ۲/۵٪) از پیکسل‌های هر تصویر متعلق به پیکسل‌های ترک بوده است. در این حالت اگر یک معیار مطلق برای سنجش مدل در نظر گرفته شود، مسئله

با خطاهای زیادی مواجه می‌شود. حالتی فرض شود که قصد مسئله را برای دقت مطلق بهینه سازد؛ در این حالت اگر مدل، یک تصویر تماماً سیاه (تمامی پیکسل‌ها برابر صفر) به عنوان خروجی دهد، با توجه به درصد کم پیکسل‌های ترک، دقتی نزدیک به ۹۷/۵٪ حاصل می‌شود، در حالی که مدل هیچ‌گونه پیش‌بینی انجام نداده است و عملاً دقت مدل باید صفر گزارش شود. به همین علت ضروری است که از پارامترهای نسبی در سنجش دقت مدل مذکور استفاده شود. در پژوهش حاضر، از سه پارامتر اصلی که در مدل‌های بخش‌بندی تصویر به کار گرفته می‌شود، استفاده شده است، که عبارت‌اند از: صحت^{۳۵}، فراخوانی^{۳۶} و دقت F۱^{۳۷}، که در ادامه، به توضیح مختصر آنها پرداخته شده است.

- **صحت (Precision):** در مدل پیش رو هر چه مقدار صحت بیشتر باشد، احتمال وجود مثبت‌های کاذب کمتر می‌شود. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر، مدل با پیکسل‌های ترک به عنوان مثبت (عدد ۱) و پیکسل‌های زمینه به عنوان منفی (عدد ۰) دسته‌بندی می‌شوند، با افزایش صحت مدل، احتمال تشخیص غلط پیکسل زمینه به عنوان ترک کمتر می‌شود. این پارامتر با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۱)$$

که در آن، TP^{۳۸} بیان‌گر تعداد پیکسل‌هایی است که ترک به درستی تشخیص داده شده است (مثبت صحیح). FP^{۳۹} نیز بیان‌گر تعداد پیکسل‌هایی است که ترک تشخیص داده شده است، اما تشخیص صحیح نبوده است (مثبت کاذب). هدف نهایی در بهینه‌سازی پارامتر صحت این است که هیچ پیکسلی به غلط در دسته‌ی ترک قرار نگیرد؛ لذا پیکسل‌های ترکی، که به غلط به عنوان زمینه در نظر گرفته شده‌اند، در پارامتر صحت تغییری ایجاد نمی‌کنند. در نتیجه پارامتر صحت نمی‌تواند به تنهایی برای سنجش دقت نهایی مدل استفاده شود. بر این اساس پارامتر دیگری با عنوان حساسیت نیز تعریف می‌شود.

- **فراخوانی یا حساسیت (Recall):** پارامتر فراخوانی، که برای سنجش توانایی مدل در حدس پیکسل‌های ترک استفاده می‌شود، با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۲)$$

که در آن، FN^{۴۰} بیان‌گر تعداد پیکسل‌هایی است که مربوط به ترک است، اما به عنوان ترک تشخیص داده نشده‌اند (منفی کاذب). هدف نهایی در بهینه‌سازی پارامتر فراخوانی این است که هیچ پیکسلی از قسمت ترک به غلط به عنوان زمینه در نظر گرفته نشود و تأثیر زیادی در کاهش پیکسل‌های FP یا مثبت کاذب ندارد.

با توجه به این‌که دو پارامتر صحت و فراخوانی، محدودیت‌هایی دارند که باعث می‌شود به تنهایی عملکرد مناسبی نداشته باشند؛ لذا پارامتر دقت F۱-Score، که ترکیبی از دو پارامتر صحت و فراخوانی است، به عنوان سومین پارامتر ارزیابی مدل، به این صورت تعریف می‌شود:

- **F-Score:** پارامتر دقت F۱ بیان‌گر یک توزیع بک‌نواخت از دو پارامتر صحت و فراخوانی است. پارامتر F۱Score با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$F1 = \frac{2 \times Pr \times Re}{Pr + Re} \quad (۳)$$



شکل ۷. نتایج اعمال چند نمونه‌ی داده‌افزایی برای یک تصویر.

۶.۲. آموزش مدل

همان‌گونه که در بخش ۲.۲ اشاره شده است، آموزش و ارزیابی مدل در پژوهش حاضر بر روی یک مجموعه داده‌ی تصویری شامل ۴۵۸ تصویر انجام شده است، که ۳۲۰ تصویر برای فرایند آموزش، ۶۹ تصویر برای اعتبارسنجی، و ۶۹ تصویر برای ارزیابی نهایی مدل استفاده شده است. در ضمن مدل‌های یادگیری عمیق برای آموزش نیاز به تعداد بسیار بیشتری از داده‌ها دارند، لذا به عنوان یک راه‌حل رایج اقدام به داده‌افزایی^{۴۴} در قسمت استفاده شده در آموزش مدل شده است. داده‌افزایی عبارت از استخراج داده‌های جدید با استفاده از داده‌های موجود است. در داده‌های تصویری، رایج‌ترین روش‌های داده‌افزایی عبارت‌اند از: دوران، تغییر روشنایی، وارونه‌سازی، تغییر کانتراست و غیره. به کمک داده‌افزایی می‌توان احتمال بروز بیش‌برازش را به میزان کمینه رساند.

در مطالعه‌ی حاضر، از ۶ روش داده‌افزایی استفاده شده است، که به ترتیب عبارت‌اند از: وارونگی تصاویر در راستاهای عمودی و افقی، دوران تصادفی تصویر، انتقال چشم‌انداز^{۴۵}، اعمال نوفه‌ی گوسی^{۴۶}، تغییر تصادفی روشنایی^{۴۷} و تغییر تصادفی کانتراست^{۴۸}. هر یک از تغییرات مذکور چنانچه لازم باشد، برای برچسب‌ها نیز اعمال می‌شوند. در شکل ۷، نمونه‌هایی از نتایج حاصل از داده‌افزایی مشاهده می‌شود.

مهم‌ترین نکته در روش‌های داده‌افزایی این است که بدون آن‌که محتوای جدیدی تولید شود، داده‌های موجود به شکلی افزایش می‌یابند که بیشترین دقت ممکن در مدل حاصل می‌شود، بدون این‌که بیش‌برازش رخ دهد؛ همچنین در حالتی که تعداد داده‌ها کم باشد، مدل به سرعت دچار بیش‌برازش می‌شود.

در آموزش مدل پژوهش حاضر از یادگیری انتقالی، که یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد در یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است، استفاده شده است. بدین ترتیب که قسمت رمزگذار مدل ResNet ۱۰۱، دارای مقادیر وزن اولیه‌ی حاصل از آموزش قبلی بر روی مجموعه‌ی داده‌ی ImageNet هستند، که نقطه‌ی شروع بسیار خوبی برای مدل است. بدین ترتیب فرایند آموزش بسیار کوتاه‌تر از حالت معمول است و همچنین دقت مدل نیز بیشتر از سایر حالت‌هاست و احتمال بیش‌برازش نیز کمتر است.

پژوهش حاضر، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون^{۴۹} و با بهره‌گیری از کتابخانه‌ی Tensorflow^[۲۰] که توسط تیم توسعه‌ی هوش مصنوعی گوگل^{۵۰} ارائه شده است، به انجام رسیده است. جهت افزایش سرعت آموزش مدل

در مراجع مختلف بینایی رایانه، پارامتر دقت F۱، به عنوان دقیق‌ترین پارامتر برای عملیات بخش‌بندی تصاویر در نظر گرفته می‌شود. پارامتر دقت F۱، همچنین در تمامی مطالعات مربوط به بخش‌بندی تصاویر در حوزه‌ی شناسایی ترک در بتن، به عنوان پارامتر اصلی ارزیابی مدل‌ها استفاده می‌شود.

در پژوهش حاضر با توجه به پیشنهاد شی^{۴۱} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۸] پیکسل‌های TP با در نظر گرفتن دو پیکسلی مرزی محاسبه شده‌اند. استدلال ارائه شده جهت چنین فرضی آن است که ترک معمولاً دارای نواحی مرزی است و برچسب‌گذاری نواحی مرزی در برچسب‌گذاری دستی، دقت چندانی ندارد؛ لذا در نظر گرفتن ۲ تا ۵ پیکسل اضافه به عنوان پیکسل‌های TP امری رایج است. بنابر فرض اخیر، در مطالعه‌ی حاضر، اگر یک پیکسل مثبت تشخیص داده شده و فاصله‌ی آن با پیکسل‌های ترک، کمتر از دو پیکسل بوده است، به عنوان مثبت صحیح (TP) دسته‌بندی شده است. لازم به یادآوری است که مقدار اخیر در مطالعه‌ی شی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۸] با توجه به کیفیت پایین‌تر برچسب‌گذاری دستی، مساوی ۵ پیکسل در نظر گرفته شده است.

۴.۲. تابع هزینه

تابع هزینه، یکی از مهم‌ترین ارکان فرایند یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است. در بسیاری از مراجع پیشین، یادگیری ماشین به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی قابل تعریف است، که هدف آن رسیدن به مقدار کمینه‌ی هزینه است. در نتیجه بسیار مهم است که برای حل یک مسئله از چه تابع هزینه‌ی استفاده شود و میزان تناسب تابع هزینه با پارامترهای مورد نظر در حل مسئله، تأثیر مستقیمی در عملکرد نهایی مدل دارد.

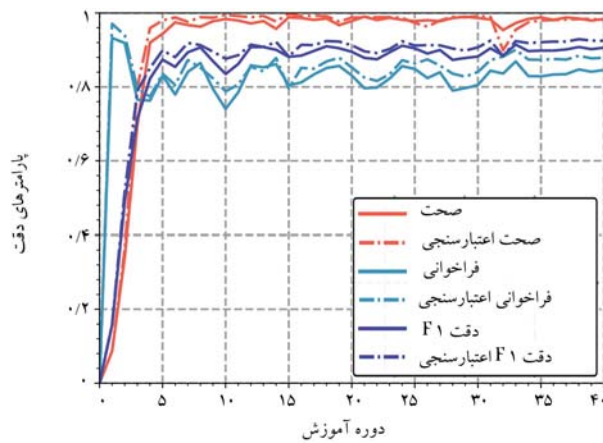
با توجه به این‌که هدف در مطالعه‌ی حاضر، رسیدن به بیشترین دقت F۱-Score بوده است، لازم بود تابع هزینه‌ی تعریف شود که بیشترین تناسب را با پارامتر F۱Score داشته باشد. خوشبختانه تابع هزینه‌ی با عنوان دایس^{۴۲}،^[۱۹] مستقیماً مقدار F۱ را بهینه می‌سازد رابطه‌ی ۴:

$$Dice_Loss = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{2|\hat{y} \cap y|}{|\hat{y}| + |y|} \right) \quad (4)$$

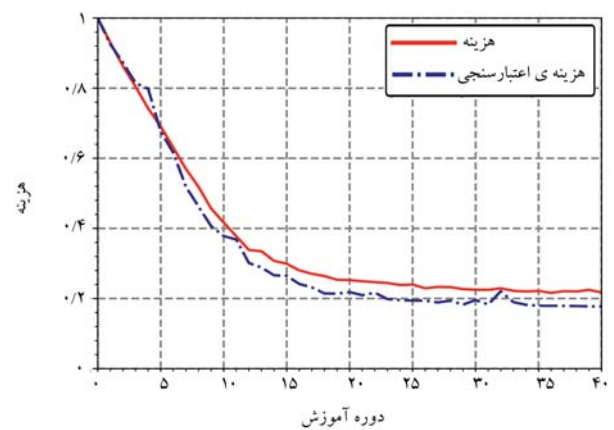
که در آن، $\hat{y}$ و y به ترتیب بیان‌گر برچسب حقیقی و برچسب پیش‌بینی شده هستند. همچنین N تعداد کلاس موجود در مسئله است.

۵.۲. بهینه‌ساز

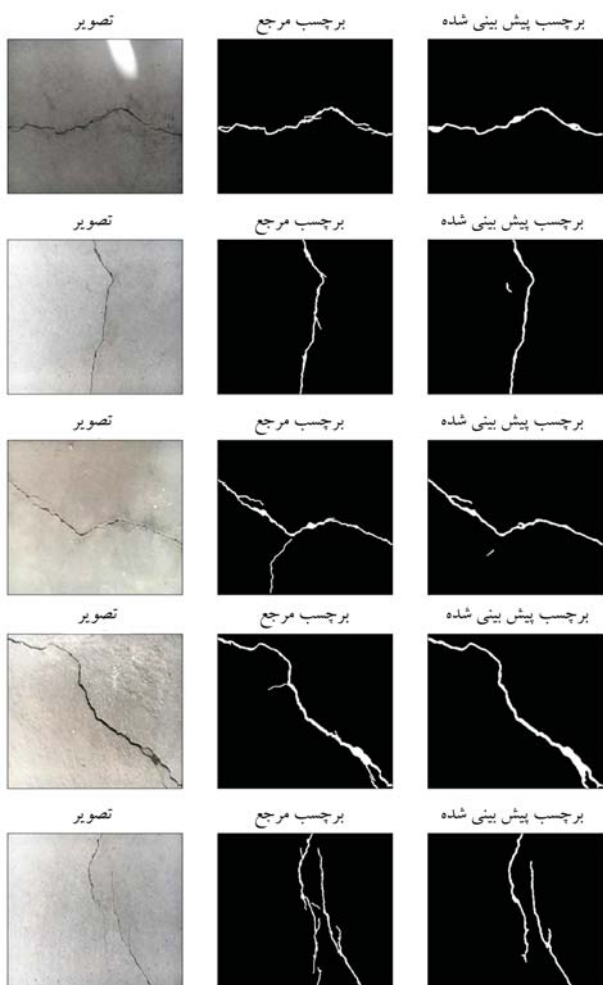
در مبحث یادگیری عمیق، الگوریتم‌های بسیاری جهت بهینه‌سازی توابع هزینه معرفی شده‌اند، که هر یک برای دسته‌ی از مسائل، می‌توانند مناسب باشند. در حوزه‌ی بینایی رایانه، دو الگوریتم کاهش تصادفی گرادین (SGD)^{۴۳} و آدام (Adam) بهترین عملکردها را از آن خود کرده‌اند. هر دو مورد از الگوریتم‌های فوق بر اساس کاهش گرادین عمل می‌کنند، با این تفاوت که آدام ترکیبی از دو زیرمجموعه‌ی کاهش گرادین تصادفی RMSProp و AdaGrad است. ترکیب دو زیرمجموعه‌ی اخیر در الگوریتم آدام، اگرچه در مسائل بسیار دشوار، دقت کمتری نسبت به SGD ارائه می‌دهد، اما سرعت همگرایی بسیار بالای آن و همچنین مقاومت آن در برخورد با نوفه، آن را به پرکاربردترین الگوریتم بهینه‌سازی در زمینه‌ی بینایی رایانه تبدیل ساخته است. در پژوهش حاضر، از الگوریتم آدام با نرخ یادگیری ۰/۰۰۰۱ به عنوان الگوریتم بهینه‌ساز استفاده شده است.



شکل ۹. نمودار تغییرات پارامترهای ارزیابی در طول آموزش.



شکل ۸. نمودار تغییرات هزینه در طول آموزش مدل.



شکل ۱۰. نمونه‌هایی از پیش‌بینی مدل برای داده‌های ارزیابی (تصویر سمت راست) به همراه برچسب‌های اصلی (تصویر وسط).

و ۹ رخ نداده است، می‌توان اطمینان داشت که پدیده‌ی بیش‌برازش در مدل استفاده شده رخ نداده است.

اطلاعات و جزئیات موجود در جدول ۲ و شکل‌های ۸ و ۹، حاکی از همگرایی بسیار سریع مدل استفاده شده در پژوهش حاضر است. علت این پدیده را می‌توان

ResNet۱۰۱، به جای واحد پردازنده‌ی مرکزی (CPU) ^{۵۱}، از یک پردازنده‌ی گرافیکی (GPU) ^{۵۲}، مدل N-VIDIA TESLA-K ۸۰ استفاده شده است، که در بستر CUDA ^{۵۳}، با زبان برنامه‌نویسی پایتون مرتبط بوده و سرعت پردازشی ده‌ها برابر پردازنده‌های CPU داشته است. آموزش مدل در ۴۰ دوره انجام پذیرفته و در پایان هر دوره‌ی عملیات اعتبارسنجی، وضعیت برازش مدل بررسی شده است.

۳. نتایج و بحث

پس از تکمیل مدل و معرفی تمامی پارامترهای معرفی شده در بخش ۲، آموزش مدل شروع شده است. هر دوره از آموزش مدل حدود ۵۳ ثانیه زمان می‌برد، که در مجموع تمامی ۴۰ دوره، حدود ۳۵ دقیقه زمان لازم است تا فرایند یادگیری تکمیل شود. تغییرات مقادیر هزینه و پارامترهای ارزیابی مدل در طول فرایند آموزش در جدول ۲ ارائه شده است، که در آن، مقادیر مربوط به دقت $F1$ ، که پارامتر اصلی دقت مطالعه‌ی حاضر است، با رنگ خاکستری مشخص شده است.

در جدول ۲ مشاهده می‌شود که با گذشت مراحل آموزش مدل، مقادیر هزینه، کاهش و متقابلاً مقادیر دقت، افزایش یافته است. در مراحل پایانی نیز مدل به حالتی ثابت دست یافته و تغییرات با کندی مواجه شده است. لازم به ذکر است که در صورت ادامه‌ی روند آموزش، احتمال وقوع بیش‌برازش وجود دارد، که در این حالت مقادیر هزینه و دقت برای داده‌های آموزش با شیب تدریجی پیشین به پیشرفت خود ادامه می‌دهند، اما عملکرد مدل برای داده‌ی اعتبارسنجی با افت شدید روبه‌رو می‌شود، که بدین معناست عملکرد مدل برای داده‌های جدید با اختلال مواجه شده است. لذا لازم است که از ادامه‌ی بیشتر روند آموزش جلوگیری به عمل آید.

همچنین در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای تغییرات هزینه و پارامترهای ارزیابی در طول فرایند آموزش مشاهده می‌شوند. توضیحات اخیر درباره‌ی نمودارهای مذکور نیز صدق می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر هزینه و پارامترهای ارزیابی برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به موازات هم پیشرفت کرده و در مراحل پایانی آموزش به ثبات رسیده‌اند. گفتنی است که در صورت وقوع پدیده‌ی بیش‌برازش، نمودارهای مربوط به داده‌ی اعتبارسنجی دچار افت ناگهانی می‌شود؛ که بدان معناست که با وجود افزایش دقت برای داده‌ی آموزش، عملکرد مدل برای داده‌های جدید ضعیف‌تر شده است. با توجه به این‌که چنین آفتی در نمودارهای شکل‌های ۸

جدول ۲. جزئیات پارامترهای مدل در طی آموزش.

گام	هزینه	صحت	فراخوانی	دقت F1	هزینه ی اعتبارسنجی	صحت اعتبارسنجی	فراخوانی اعتبارسنجی	دقت F1 اعتبارسنجی
۱	۰/۹۲۹۵۲۷	۰/۰۸۷۰۷۹	۰/۹۳۲۴۷۴	۰/۱۵۷۳۸۷	۰/۹۲۵۰۱۴	۰/۰۸۷۶۱۰	۰/۹۷۰۸۳۰	۰/۱۵۹۴۷۲
۲	۰/۰/۸۶۳۱۳۵	۰/۳۴۱۱۴۳	۰/۹۱۸۸۲۳	۰/۴۸۹۶۰۶	۰/۸۷۳۱۱۳	۰/۳۶۴۶۵۸	۰/۹۳۹۹۱۵	۰/۵۱۶۳۸۳
۳	۰/۸۰۴۴۹۷	۰/۶۹۶۲۲۹	۰/۷۶۵۴۱۴	۰/۷۱۴۳۹۱	۰/۸۱۴۶۳۰	۰/۷۹۹۵۸۴	۰/۷۹۵۴۲۹	۰/۷۸۹۴۰۵
۴	۰/۷۴۲۳۲۹	۰/۹۱۹۷۵۰	۰/۷۶۳۰۹۲	۰/۸۲۲۴۱۴	۰/۷۹۸۵۲۹	۰/۹۵۹۰۸۵	۰/۷۷۳۶۴۶	۰/۸۵۰۹۱۲
۵	۰/۶۹۰۴۲۳	۰/۹۴۳۹۴۷	۰/۸۳۰۴۳۸	۰/۸۷۳۸۰۱	۰/۶۷۶۴۲۴	۰/۹۷۹۸۶۳	۰/۸۳۵۶۲۲	۰/۸۹۸۷۲۰
۶	۰/۶۳۰۵۶۸	۰/۹۷۴۶۸۵	۰/۷۷۹۳۳۴	۰/۸۵۴۲۵۱	۰/۶۱۵۶۰۸	۰/۹۸۸۱۳۷	۰/۸۰۵۲۴۳	۰/۸۸۰۵۳۸
۷	۰/۵۶۹۴۵۴	۰/۹۶۷۵۸۴	۰/۸۴۰۴۹۶	۰/۸۹۳۵۹۲	۰/۵۱۹۲۰۴	۰/۹۷۶۲۲۲	۰/۸۷۲۷۳۸	۰/۹۱۹۰۷۴
۸	۰/۵۱۸۸۴۷	۰/۹۶۳۰۸۷	۰/۸۶۴۶۶۱	۰/۹۰۶۹۵۸	۰/۴۶۳۳۹۹	۰/۹۸۸۶۴	۰/۸۵۲۲۷۴	۰/۹۱۳۰۸۹
۹	۰/۴۵۹۳۳۳	۰/۹۷۷۸۶۰	۰/۷۹۴۴۳۴	۰/۸۶۹۵۷۷	۰/۴۰۶۷۶۰	۰/۹۸۷۳۷۶	۰/۸۲۳۱۷۳	۰/۸۹۵۳۸۷
۱۰	۰/۴۱۶۹۵۵	۰/۹۸۳۶۳۶	۰/۷۴۰۶۰۹	۰/۸۳۴۹۴۱	۰/۳۷۸۲۴۸	۰/۹۹۵۲۹۷	۰/۷۸۸۰۵۸	۰/۸۷۶۲۱
۱۱	۰/۳۷۷۴۷۴	۰/۹۷۹۷۶۸	۰/۷۸۵۴۹۶	۰/۸۶۲۱۴۷	۰/۳۶۸۲۸۶	۰/۹۹۱۷۷۳	۰/۸۰۶۴۵۳	۰/۸۸۵۹۰۱
۱۲	۰/۳۳۸۷۳۰	۰/۹۷۱۷۳۹	۰/۸۵۸۲۰۱	۰/۹۰۸۰۴۲	۰/۳۰۱۳۶۱	۰/۹۸۸۷۱۴	۰/۸۵۴۸۶۴	۰/۹۱۴۳۲۵
۱۳	۰/۳۳۴۸۳۸	۰/۹۷۸۱۰۲	۰/۸۵۲۹۸۳	۰/۹۰۷۸۳۰	۰/۲۸۸۵۵۰	۰/۹۹۲۰۹۸	۰/۸۴۲۱۰۲	۰/۹۰۸۸۳۶
۱۴	۰/۳۰۷۴۵۶	۰/۹۵۷۲۱۷	۰/۸۶۱۶۴۸	۰/۹۰۰۵۶۳	۰/۲۶۶۲۵۷	۰/۹۷۷۱۲۵	۰/۸۷۷۹۰۷	۰/۹۲۲۰۱۲
۱۵	۰/۲۹۹۲۹۴	۰/۹۸۸۳۱۷	۰/۸۰۴۱۷۵	۰/۸۸۱۶۰۷	۰/۲۶۴۸۹۵	۰/۹۹۷۷۱۱	۰/۷۹۶۱۸۲	۰/۸۸۲۶۷۶
۱۶	۰/۲۸۰۳۱۱	۰/۹۸۶۴۶۲	۰/۸۱۲۳۷۶	۰/۸۸۴۷۳۷	۰/۲۴۱۶۰۵	۰/۹۹۱۶۵۱	۰/۸۵۱۴۲۷	۰/۹۱۳۹۱۲
۱۷	۰/۲۷۰۶۳۱	۰/۹۸۱۴۹۸	۰/۸۳۳۷۴۶	۰/۸۹۷۳۹۵	۰/۲۳۱۸۴۲	۰/۹۹۳۱۹۱	۰/۸۴۹۳۲۶	۰/۹۱۳۱۶۳
۱۸	۰/۲۶۴۲۲۲	۰/۹۸۵۲۹۱	۰/۸۵۱۱۷۶	۰/۹۱۰۰۶۲	۰/۲۱۴۶۴۶	۰/۹۹۱۶۸۰	۰/۸۶۸۹۶۴	۰/۹۲۴۰۲۲
۱۹	۰/۲۵۳۴۱۳	۰/۹۶۷۰۷۷	۰/۸۵۶۹۵۹	۰/۹۰۴۷۰۳	۰/۲۱۳۸۸۵	۰/۹۷۶۵۱۶	۰/۸۷۸۹۴۰	۰/۹۲۲۸۱۱
۲۰	۰/۲۵۲۸۲۵	۰/۹۷۸۴۲۳	۰/۸۳۱۰۳۷	۰/۸۹۵۰۲۴	۰/۲۱۸۳۴۰	۰/۹۸۷۶۶۲	۰/۸۵۲۶۹۶	۰/۹۱۲۸۱۲
۲۱	۰/۲۴۹۲۵۶	۰/۹۹۰۳۰۹	۰/۷۹۶۴۲۹	۰/۸۷۸۶۹۵	۰/۲۰۹۶۱۷	۰/۹۸۷۸۸۶	۰/۸۲۵۴۰۱	۰/۸۹۶۳۶
۲۲	۰/۲۴۶۷۹۳	۰/۹۸۱۰۷۴	۰/۷۹۸۳۲۷	۰/۸۷۴۸۸۱	۰/۲۱۶۷۲۱	۰/۹۸۸۹۰۶	۰/۸۱۶۲۷۶	۰/۸۹۱۶۲۱
۲۳	۰/۲۴۴۳۳۷	۰/۹۸۷۱۵۸	۰/۸۲۲۷۱۳	۰/۸۹۳۷۱۴	۰/۱۹۸۴۹۴	۰/۹۸۸۹۳۴	۰/۸۳۳۹۸۱	۰/۹۰۲۴۲۱
۲۴	۰/۲۳۸۶۰۵	۰/۹۸۱۵۲۳	۰/۸۵۶۲۰۱	۰/۹۱۱۶۹۰	۰/۱۹۵۳۸۳	۰/۹۸۶۶۶۸	۰/۸۷۲۱۱۲	۰/۹۲۳۴۳۸
۲۵	۰/۲۳۹۷۵۰	۰/۹۷۸۲۵۷	۰/۸۴۸۵۸۴	۰/۹۰۴۲۵۷	۰/۱۹۴۳۲۴	۰/۹۷۳۱۸۸	۰/۸۶۳۳۰۳	۰/۹۱۱۸۴۲
۲۶	۰/۲۲۹۴۵۲	۰/۹۰۸۶۰۳	۰/۸۲۴۰۸۸	۰/۸۹۰۳۹۱	۰/۱۹۳۹۱۵	۰/۹۶۳۱۸۲	۰/۸۷۴۵۲۲	۰/۹۱۳۱۶۸
۲۷	۰/۲۳۳۱۴۴	۰/۹۷۷۹۲۸	۰/۸۳۹۵۸۸	۰/۸۹۹۸۸۲	۰/۱۸۸۸۷۶	۰/۹۷۹۹۹۷	۰/۸۵۷۸۱۲	۰/۹۱۲۴۸
۲۸	۰/۲۳۲۵۰۷	۰/۹۸۶۳۴۱	۰/۷۹۰۱۹۰	۰/۸۷۳۲۳۳	۰/۱۹۳۹۹۸	۰/۹۸۹۷۶۵	۰/۸۳۵۸۳۸	۰/۹۰۳۹۰۵
۲۹	۰/۲۲۶۹۲۷	۰/۹۹۰۱۵۷	۰/۷۹۶۷۴۹	۰/۸۷۸۳۳۱	۰/۱۸۲۵۲۵	۰/۹۸۸۵۴۵	۰/۸۲۷۸۴۲	۰/۸۹۸۳۴
۳۰	۰/۲۲۴۹۵۵	۰/۹۸۶۵۵۶	۰/۸۰۵۱۷	۰/۸۸۲۲۶۴	۰/۱۹۵۹۱۸	۰/۹۹۱۹۵۷	۰/۸۴۰۵۹۳	۰/۹۰۷۰۳۶
۳۱	۰/۲۲۴۸۸۹	۰/۹۸۲۶۲۳	۰/۸۴۳۹۸۱	۰/۹۰۴۶۶۹	۰/۱۸۲۷۷۲	۰/۹۸۹۷۰۸	۰/۸۷۲۶۴۱	۰/۹۲۵۱۱۵
۳۲	۰/۲۲۹۱۲۲	۰/۹۵۳۸۹۵	۰/۸۳۶۲۲۴	۰/۸۸۴۹۲۹	۰/۲۲۱۰۳۴	۰/۸۹۹۰۶۱	۰/۸۸۲۳۳۳	۰/۸۸۳۵۱۵
۳۳	۰/۲۲۲۱۱۳	۰/۹۷۳۰۳۱	۰/۸۶۸۹۴۱	۰/۹۱۴۷۶۶	۰/۱۸۹۷۵۲	۰/۹۵۴۸۰۳	۰/۹۰۰۶۹۴	۰/۹۲۳۹۴۳
۳۴	۰/۲۲۰۲۷۰	۰/۹۸۴۰۷۵	۰/۸۲۹۵۱	۰/۸۹۶۸۱۸	۰/۱۸۲۱۱۶	۰/۹۷۴۷۸۰	۰/۸۷۴۰۵۸	۰/۹۱۸۸۲۴
۳۵	۰/۲۲۱۶۱۸	۰/۹۸۷۸۸۸	۰/۸۲۸۶۸۹	۰/۸۹۸۳۴۵	۰/۱۷۹۳۹۲	۰/۹۸۰۱۱۴	۰/۸۷۳۲۶۲	۰/۹۲۱
۳۶	۰/۲۱۶۰۷۷	۰/۹۸۱۵۳۶	۰/۸۳۳۵۷۷	۰/۸۹۸۳۰۱	۰/۱۷۹۳۰۸	۰/۹۸۰۹۱۹	۰/۸۷۵۵۵۰	۰/۹۲۲۷۲
۳۷	۰/۲۲۱۰۵۹	۰/۹۸۷۸۶۱	۰/۸۳۴۵۹	۰/۹۰۱۳۵۸	۰/۱۷۹۰۸۴	۰/۹۸۲۳۶۳	۰/۸۷۳۸۸۲	۰/۹۲۲۵۱۵
۳۸	۰/۲۲۰۲۶۴	۰/۹۸۵۰۳۴	۰/۸۴۷۲۸۶	۰/۹۰۸۰۳۷	۰/۱۷۸۵۳۵	۰/۹۸۳۶۳۹	۰/۸۸۴۴۴	۰/۹۲۹۱۱۵
۳۹	۰/۲۲۴۵۶۲	۰/۹۷۹۶۰۳	۰/۸۴۱۰۴۵	۰/۹۰۲۲۲۰	۰/۱۷۷۸۰۷	۰/۹۸۴۱۸۰	۰/۸۷۷۳۷۳	۰/۹۲۵۳۵۵
۴۰	۰/۲۱۷۵۱۲	۰/۹۸۳۸۹۴	۰/۸۴۵۸۵۵	۰/۹۰۶۱۷۱	۰/۱۷۷۰۹۶	۰/۹۸۱۳۲۸	۰/۸۷۸۸۷۸	۰/۹۲۴۷۸۷

جدول ۳. پارامترهای نهایی پیش‌بینی مدل برای داده‌ی ارزشیابی.

پارامتر	مقدار
صحت	0.9939
فراخوانی	0.8499
دقت F1	0.9138

در روش یادگیری انتقالی استفاده شده در پژوهش حاضر جستجو کرد؛ که در آن، قسمت رمزگذار مدل، که یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنال است، به صورت از پیش آموزش دیده در مدل قرار گرفته و لذا نیازی به آموزش مجدد آن نبوده است. در مطالعه‌ی حاضر، فقط قسمت رمزگذار مدل، آموزش داده شده است، که این موضوع علاوه بر افزایش دقت، به طرز چشمگیری سرعت آموزش مدل را نیز افزایش داده است.

مقادیر دقت نهایی برای داده‌ی ارزشیابی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین زمان لازم جهت انجام پیش‌بینی برای داده‌های جدید حدود 0.2 ثانیه است. در شکل ۱۰، چند نمونه از نتایج خروجی مدل به همراه برجسب اصلی مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با هدف اتوماسیون مبحث بازرسی بصری در حوزه‌ی پایش سلامت سازه‌ها و با بهره‌گیری از مبحث یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی کانولوشنال و کاربرد آنها در حوزه‌ی بینایی رایانه اقدام به شناسایی ترک در اعضا بتمی شده است. نوع شبکه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، یک شبکه‌ی رمزگذار- رمزگشا (Encoder-Decoder) بوده است، که با برقراری ارتباط میان عناصر رمزگذار و رمزگشا به حالت بهینه‌ی خود می‌رسد. در قسمت رمزگذار مدل مذکور از شبکه‌ی

عصبی کانولوشن پرکاربرد و معروف ResNet۱۰۱ و در قسمت رمزگشا نیز از پنج لایه‌ی بازگرداننده استفاده شده است، تا ابعاد داده‌ی رمزگذاری شده را به مقدار اولیه‌ی دلخواه برساند. مدل مذکور بر روی یک مجموعه داده‌ی برجسب‌گذاری شده شامل ۴۵۸ تصویر از سطوح ترک‌خورده‌ی بتن آموزش دیده است، که در فرایند آموزش آن از انواع روش‌های داده‌افزایی و همچنین از یادگیری انتقالی استفاده شده است، تا نتیجه‌ی بهینه حاصل شود. در نهایت دقت ارزیابی 0.9138 ، بیان‌گر قدرت بسیار بالای مدل مذکور در تشخیص ترک در سطوح بتنی است.

البته دقت به این موضوع ضروری است که اگر چه مجموعه داده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، مجموعه‌ی کامل و دقیق و در برگیرنده‌ی انواع مختلف ترک‌ها بوده است، اما زمینه‌ی تصاویر اغلب ساده و بدون حضور اجسام خارجی بوده است، در نتیجه باید انتظار مقداری خطا در عملکرد مدل مذکور در مواجهه با زمینه‌های پیچیده‌تر را داشت. همچنین به عنوان مسیری برای مطالعات پیش رو می‌توان این موضوع را مد نظر قرار داد و به عنوان چالشی نسبتاً پیچیده، اقدام به رفع و رجوع آن کرد.

علاوه بر این، تمرکز پژوهش حاضر بر روی رسیدن روشی بهینه در بخش‌بندی تصاویر ترک در بتن بوده است، که این روش قادر است بیشترین جزئیات مربوط به ترک را در مقیاس پیکسل گزارش کند. با توجه به این‌که جزئیاتی، همچون: نوع ترک، ابعاد و محل قرارگیری آن در مبحث پایش سلامت سازه‌ها، اهمیت ویژه‌ی دارد، می‌توان روش ارائه شده در پژوهش حاضر را توسعه داد و در مطالعات پیش‌رو، جزئیات مورد نظر را در قالب یک مثال عملی برای یک نمونه‌ی بتنی استخراج کرد. برای این منظور می‌توان از دوربین‌های چندگانه که قادر به محاسبه‌ی ابعاد هستند، استفاده و ابعاد را استخراج کرد. همچنین از بُعد نرم‌افزاری می‌توان مدل‌های جانبی یادگیری ماشین را تعریف کرد، که برخی ویژگی‌ها، که به کمک ابعاد قابل استخراج نیستند، را نیز به دست آورد.

پانویس‌ها

1. structural health monitoring
2. piezoelectric
3. fiber optic
4. deep learning
5. edge detectors
6. convolutional neural networks
7. Cha
8. classification
9. region-based convolutional neural network
10. Gopalakrishnan
11. transfer learning
12. Dung
13. fully convolutional neural network
14. semantic segmentation
15. binary image
16. encoder - decoder
17. Liu
18. optimizer
19. pooling
20. object detection
21. semantic segmentation

22. decoder
23. encoder-decoder
24. feature extraction
25. classifier
26. Sigmoid
27. middle east technical university
28. Zhang
29. overfitting
30. train
31. alidation
32. test
33. epochs
34. loss
35. precision
36. recall
37. F1-score
38. true positive
39. false positive
40. false negative
41. Shi
42. Dice Loss
43. stochastic gradient descent
44. data augmentation
45. perspective transform

46. gaussian noise
47. random brightness
48. random contrast
49. Python
50. Google brain team
51. central processing unit
52. graphics processing unit
53. compute unified device architecture

منابع (References)

1. Aboudi, J. "Stiffness reduction of cracked solids", *Engineering Fracture Mechanics*, **26**(5), pp. 637-650 (1987).
2. Huang, T., Chang, C. and Yang, Z. "Elastic moduli for fractured rock mass", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **28**(3), pp. 135-144 (1995).
3. Abdel-Qader, I., Abudayyeh, O. and Kelly, M.E. "Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges", *Journal of Computing in Civil Engineering*, **17**(4), pp. 255-263 (2003).
4. Sinha, S.K. and Fieguth, P.W. "Automated detection of cracks in buried concrete pipe images", *Automation in Construction*, **15**(1), pp. 58-72 (2006).
5. Metni, N. and Hamel, T. "A UAV for bridge inspection: visual servoing control law with orientation limits", *Automation in Construction*, **17**(1), pp. 3-10 (2007).
6. Adhikari, R., Moselhi, O. and Bagchi, A. "Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection", *Automation in Construction*, **39**, pp. 180-194 (2014).
7. Cha, Y.J., Choi, W. and Büyüköztürk, O. "Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **32**(5), pp. 361-378 (2017).
8. Cha, Y.J., Choi, W., Suh, G. and et al. "Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **33**(9), pp. 731-747 (2018).
9. Gopalakrishnan, K., Khaitan, S.K., Choudhary, A. and et al. "Deep convolutional neural networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection", *Construction and Building Materials*, **157**, pp. 322-330 (2017).
10. Simonyan, K. and Zisserman, A. "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition", *ArXiv Preprint ArXiv*, **1409**, 1556v6 (2014).
11. Deng, J., Dong, W., Socher, R. and et al. "Imagenet: A large-scale hierarchical image database", *In: 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 248-255 (2009).
12. Dung, C.V. "Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network", *Automation in Construction*, **99**, pp. 52-58 (2019).
13. Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T. "U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation", *In: International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, Springer, pp. 234-241 (2015).
14. Liu, Z., Cao, Y., Wang, Y. and et al. "Computer vision-based concrete crack detection using U-net fully convolutional networks", *Automation In Construction*, **104**, pp. 129-139 (2019).
15. He, K., Zhang, X., Ren, S. and et al. "Deep residual learning for image recognition", *In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 770-778 (2016).
16. Özgenel, Çağlar, FLrat. "Concrete crack segmentation dataset", *In: Mendeley Data* (Ed.), V1 (2019). DOI:10.17632/jwsn7tfbrp.1.
17. Zhang, L., Yang, F., Zhang, Y.D. and et al. "Road crack detection using deep convolutional neural network", *In: 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 3708-3712 (2016).
18. Shi, Y., Cui, L., Qi, Z. and et al. "Automatic road crack detection using random structured forests", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **17**(12), pp. 3434-3445 (2016).
19. Milletari, F., Navab, N. and Ahmadi, S.-A. "V-net: fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation", *In: 2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV)*, IEEE, pp. 565-571 (2016).
20. Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P. and et al. "TensorFlow: large-scale machine learning on heterogeneous systems", *ArXiv Preprint*, **1603**, 04467 (2016).
21. NVIDIA Developer, Vingelmann, P. and Fitzek, Frank H.P. "CUDA Toolkit", Available at: <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit> (2020).

تخمین بیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت اثر طیف طرح حوزه‌ی نزدیک گسل با به کارگیری روش‌های خطی سازی معادل

محمدرشید سلیمی* (استادیار)

مهران بابزیدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گاهران نوبخت وکیلی (مربی)

آزاد یزدانی (استاد)

گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲، ص. ۸۹-۹۸، (پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، پاسخ غیرخطی سیستم‌های هیستریزس دوخطی تحت اثر زمین‌لرزه‌های سازگار با طیف طرح هدف با به کارگیری روش‌های خطی سازی آماری معادل مرتبه‌های دوم و سوم محاسبه شده است. طیف طرح هدف براساس طیف آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران در منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد، خاک نوع II و در دو حالت با و بدون آثار حوزه‌ی نزدیک به گسل در نظر گرفته شده است. طیف پاسخ سیستم‌های خطی معادل به دست آمده از رویکردهای تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخی‌های زمانی در محدوده‌ی رفتار کشسان با متوسط طیف پاسخ حاصل از تحلیل‌های تاریخی‌های زمانی غیرخطی مربوط به ۲۵۰ رکورد مصنوعی سازگار شده با طیف هدف در مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلابت سیستم مقایسه شده‌اند. براساس نتایج به دست آمده، انطباق مطلوب نتایج خطی سازی مرتبه‌ی سوم با نتایج تحلیل تاریخی‌های زمانی غیرخطی، بیانگر کارآمد بودن و دقت مناسب روش در تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید است.

واژگان کلیدی: ارتعاش‌های تصادفی، حوزه‌ی نزدیک گسل، روش خطی سازی، طیف توان، هیستریزس دوخطی.

۱. مقدمه

در مجاورت گسل‌های فعال، حرکت‌های زمین به طور قابل توجهی تحت تأثیر مکانیسم گسل، راستا و جهت انتشار گسیختگی نسبت به ساختگاه و همچنین تغییر شکل‌های محتمل استاتیکی سطح زمین همراه با آثار جابه‌جایی ماندگار است.^[۱] پیامدهای اخیر باعث می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ی حاصل از گسیختگی در یک پالس با محدوده‌ی بسامد مشخص تجمیع شود و منجر به خسارت‌های شدیدی به سازه‌های واقع در مناطق نزدیک گسل مخصوصاً سازه‌های با دوره‌ی تناوب بالا شود. از این رو، بیشتر آیین‌نامه‌های بارگذاری بعد از وقوع زلزله‌های مخربی، از جمله: زمین‌لرزه‌های لندرز (۱۹۹۲)، نورث ریچ (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) در پی اعمال آثار حوزه‌ی نزدیک در دستورالعمل‌های لرزه‌ی شده‌اند. آثار ذکر شده در بیشتر استانداردها یا آیین‌نامه‌ها،^[۲-۴] به صورت ضرایب بزرگ‌نمایی در طیف طرح کشسان و در برخی از آیین‌نامه‌ها،^[۵] نیز مستقیماً در پهنه‌بندی لرزه‌ی اعمال شده است. در آخرین ویرایش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱/۲۹، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۵.

DOI:10.2400/J30.2022.59600.3063

mr.salimi@uok.ac.ir
mehran21day@gmail.com
k.vakili@uok.ac.ir
a.yazdani@uok.ac.ir

آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران، ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰^[۶]، نیز آثار حوزه‌ی نزدیک تحت ضریب اصلاح طیفی (N)، برای مناطق مختلف لرزه‌ی لحاظ شده است. از آنجا که زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، ویژگی‌های مختلفی دارند، لذا ضریب اصلاحی طیف کشسان به تنهایی نمی‌تواند آثار واقعی حوزه‌ی نزدیک به گسل را دقیقاً ارائه کند.^[۷]

یکی از مهم‌ترین آثار حوزه‌ی نزدیک به گسل، افزایش پاسخ‌های غیرخطی سیستم‌های سازه‌ی نسبت به پاسخ سازه‌ها در حوزه‌ی دور از گسل است، که این موضوع مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است.^[۸-۱۰] مطالعات زیادی در راستای بررسی عملکرد سازه‌های مختلف تحت آثار حوزه‌ی نزدیک انجام شده است، به طوری که بیشتر آن‌ها به یک نتیجه‌ی تقریباً یکسان، یعنی افزایش پاسخ‌های مختلف لرزه‌ی سیستم‌های سازه‌ی دست پیدا کرده‌اند.^[۱۱-۱۴]

بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی برای تخمین بارهای طراحی و ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مهندسی، از طیف طرح کشسان به دست آمده از تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی استفاده می‌کنند. از آنجا که رفتار واقعی سازه‌های مهندسی

تحت تحریک‌های شدید، از جمله زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک در محدوده‌ی رفتار غیرخطی قرار می‌گیرد؛ لذا برآورد دقیق پاسخ سیستم‌های غیرخطی جهت تأمین عملکرد مطلوب سازه‌ی، ضروری به نظر می‌رسد. در چند دهه‌ی اخیر، مطالعات مختلفی جهت لحاظ کردن آثار غیرخطی در تحلیل‌های مبتنی بر طیف طرح‌کشان انجام شده است که در این راستا، به منظور استخراج طیف پاسخ غیرخطی، از ضرایب کاهش نیمه تجربی تعریف شده برای نیروهای لرزه‌ی و یا روش‌های مبتنی بر انتگرال‌گیری از معادلات حرکت سیستم غیرخطی و انجام تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی استفاده شده است.^[۱۷-۱۵] یکی از ایرادهای استفاده از روش‌های مذکور، لزوم انتخاب و به مقیاس درآوردن تعداد زیادی شتاب‌نگاشت سازگار با طیف طرح‌کشان است.^[۱۸]

یکی از اهداف تئوری ارتعاش‌های تصادفی، تخمین پیشینه‌ی پاسخ‌های محتمل سیستم‌های سازه‌ی است. از این رو، تئوری ارتعاش‌های تصادفی، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی احتمالاتی پاسخ لرزه‌ی سازه‌هاست.^[۱۹] در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی، با توجه به اینکه حل دقیق معادله‌های حرکت حاکم بر سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی محدود بوده و فقط برای تعداد محدودی از سیستم‌ها توسعه داده شده است؛ بنابراین، استفاده از روش‌های تقریبی برای تعیین آماره‌های پاسخ سیستم‌های غیرخطی امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، برای محاسبه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی، روش‌های مختلفی توسعه داده شده است که می‌توان به روش‌های: معادله‌ی فوکر-پلانک-کلموگروف^۱، میانگین‌گیری تصادفی^۲، اغتشاشی^۳، بسط ممان‌ها^۴، تعادل انرژی تلف شده^۵، سیستم غیرخطی معادل^۶، خطی‌سازی معادل (ELM)^۷ و روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو اشاره کرد.^[۲۰-۲۱] بیشتر روش‌های ذکر شده، به جز دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و خطی‌سازی معادل، محدود به سیستم‌های غیرخطی با تعداد درجه‌های آزادی مشخص هستند و بیشتر در سیستم‌های تحت تحریک‌های تصادفی مانا، کاربرد دارند. اگرچه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، محدودیت خاصی ندارند، اما آن‌ها یک فرایند تکراری، زمان‌بر و پرهزینه به منظور دستیابی به دقت مناسب پاسخ دارند. با توجه به محدودیت‌های اشاره شده، روش‌های خطی‌سازی معادل به عنوان محبوب‌ترین روش‌ها برای تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی پذیرفته شده‌اند.

در روش خطی‌سازی معادل، سیستم غیرخطی موردنظر با یک سیستم خطی معادل با همان درجه آزادی جایگزین می‌شود. پارامترهای سیستم خطی معادل از طریق کمینه‌سازی میانگین مربعات خطا بین پاسخ سیستم‌های غیرخطی و خطی تعیین می‌شوند. فرض اصلی روش‌های خطی‌سازی معادل، در نظر گرفتن توزیع گوسین^۸ به عنوان توزیع حاکم بر پاسخ سیستم‌هاست. این فرض می‌تواند با افزایش درجه غیرخطی سیستم، باعث کاهش دقت روش ELM شود. دقت و کارایی روش‌های خطی‌سازی معادل توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده‌اند.^[۲۱-۲۳] به طور کلی، روش ELM می‌تواند در تخمین میانگین پاسخ‌های سیستم غیرخطی، دقیق باشد؛ اما ممکن است برای تخمین پاسخ‌های غیرگوسی،^[۲۴] به ویژه در ناحیه‌ی دم توزیع پاسخ،^[۲۵] مؤثر نباشد. از دیگر معایب روش ELM می‌توان به عدم مدل‌سازی تغییرشکل‌های ماندگار و همچنین عدم برآورد دقیق احتمال خرابی سیستم‌های سازه‌ی تحت تحریک‌های تصادفی شدید اشاره کرد.^[۲۵] اخیراً به منظور بهبود کارایی روش‌های ELM، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. سو و همکاران^[۲۶] (۲۰۱۸)، رویکردی را ارائه کردند که در آن روش خطی‌سازی معادل با روش فرمول‌بندی صریح حوزه‌ی زمانی ترکیب شده است. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم عددی ترکیب شده از دو روش اخیر، برای تحلیل ارتعاش‌های تصادفی سیستم‌های دافینگ و هیستریزس بسیار کارآمد هستند. ژائو و هوانگ^۹ (۲۰۱۹)،^[۲۷] نیز روش

خطی‌سازی معادل مبتنی بر تبدیل فوری به‌ی سریع را برای افزایش دقت و کارایی تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی ناماناً ارائه دادند. تلاش‌های زیادی در دهه‌ی اخیر، برای توسعه‌ی روش‌های خطی‌سازی معادل برای انواع سیستم‌های یک درجه و چند درجه آزادی صورت گرفته است، که در این میان می‌توان به مطالعات اسپانوس و جیارالیس^{۱۰} (۲۰۱۳-۲۰۰۸)،^[۲۸-۲۱] برای سیستم‌های مختلف غیرخطی اشاره کرد. ایشان در مطالعات نخست خود به معرفی یک چارچوب ترکیبی از روش‌های خطی‌سازی آماری با طیف‌های توان سازگار شده با طیف پاسخ جهت تخمین پیشینه‌ی پاسخ لرزه‌ی نوسان‌گرهای غیرخطی بدون انجام تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی پرداختند.^[۲۸، ۲۹] در مطالعات اخیر، با استفاده از روش میانگین‌گیری آماری، پارامترهای سیستم خطی معادل تخمین زده شده‌اند. این رویکرد در سطوح پاسخ غیرخطی شدید، دقت مناسبی ندارد. از این رو، اسپانوس و جیارالیس (۲۰۱۳)،^[۳۰] در مطالعه‌ی دیگر رویکرد مطالعات پیشین خود را با استفاده از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌ی بالا توسعه دادند که کاربرد آن برای سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی،^[۳۱، ۳۲] و چند درجه آزادی،^[۳۲] تحت رکوردهای سازگار با طیف طرح‌کشان بررسی شده است. در بیشتر مطالعات انجام شده در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی، بررسی کارایی رویکردهای خطی‌سازی معادل با استفاده از رکوردها یا طیف‌های پاسخ حوزه‌ی دور از گسل انجام شده است، در صورتی که با اعمال آثار حوزه‌ی نزدیک گسل در آیین‌نامه‌های لرزه‌ی، بررسی کارایی رویکردهای خطی‌سازی معادل، امری ضروری به نظر می‌رسد.

در نوشتار حاضر، با استفاده از روش خطی‌سازی معادل، سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی (SDOF) با رفتار نیرو- جابه‌جایی دوخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران برای مناطق دور و نزدیک گسل ارزیابی شده‌اند. لرزه‌خیزی منطقه، خیلی زیاد و خاک ساخگاه، نوع II در نظر گرفته شده است. هدف اصلی نوشتار حاضر، بررسی آثار حوزه‌ی نزدیک گسل در پاسخ سیستم‌های غیرخطی است. علاوه بر این، در مطالعه‌ی حاضر، آثار مرتبه‌ی خطی‌سازی در دقت تخمین پاسخ‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح بررسی شده است. اهمیت این موضوع در انتخاب روش‌های خطی‌سازی معادل جهت تحلیل سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی شدید، از جمله زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک است.

۲. خطی‌سازی آماری برای سیستم‌های غیرخطی یک

درجه آزادی

در حالت کلی، معادله‌ی حاکم بر یک سیستم غیرخطی تحت تحریک تصادفی به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$m\ddot{x} + \zeta m\omega_n \dot{x} + f(\dot{x}, z, x_y) = -G(t) \quad (1)$$

که در آن، $G(t)$ تحریک ورودی، m جرم سیستم، ω_n بسامد طبیعی، ζ نسبت میرایی و x پاسخ سیستم غیرخطی هستند. علامت نقطه بالای متغیرها، نشان‌دهنده‌ی مشتق نسبت به زمان است. در رابطه‌ی ۱، عبارت $f(\dot{x}, z, x_y)$ تابع نیروی بازگرداننده‌ی سیستم غیرخطی است که به صورت شکل ۱ تعریف شده است. تابع $f(\dot{x}, z, x_y)$ به جابه‌جایی تسلیم (x_y) نسبت سختی بعد از تسلیم به سختی اولیه α (نسبت صلیبت) و متغیر حالت هیستریزس z که به عنوان جابه‌جایی نسبی المان اصطکاکی

که به صورت روابط ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند: [۲۸]

$$\omega_{eff}^T = \omega_n^T \times \left\{ 1 - \frac{\lambda(1-\alpha)}{\pi} \int_1^\infty \left(\frac{1}{z^T} + \frac{1}{\theta z} \right) \sqrt{z-1} \exp\left(\frac{-z^T}{\theta}\right) dz \right\} \quad (6)$$

$$\zeta_{eff} = \zeta \frac{\omega_n}{\omega_{eff}} + \left(\frac{\omega_n}{\omega_{eff}} \right)^2 \frac{1-\alpha}{\sqrt{\pi\theta}} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{\theta}}\right) \right) \quad (7)$$

$$\theta = 2 \int_0^\infty \frac{G(\omega)/x_y^T}{(\omega^T - \omega_{eff}^T)^2 + (2\zeta_{eff}\omega_{eff})^T} d\omega \quad (8)$$

حل روابط اخیر به پارامترهای ω_n ، ζ و α مربوط به مشخصه‌های سیستم غیرخطی و $G(\omega)$ تابع طیف توان مربوط به تحریک ورودی وابسته است. پارامترهای سیستم خطی معادل ω_{eff} و ζ_{eff} از طریق حل عددی معادلات غیرخطی ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند.

۲.۲. خطی‌سازی معادل با استفاده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم

به منظور افزایش دقت تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی با استفاده از رویکردهای خطی‌سازی معادل می‌توان از معادلات مرتبه بالای سیستم‌های خطی معادل استفاده کرد. در این راستا، آسانو و ون^{۱۲} (۱۹۸۴)، [۲۳] روابط مربوط به سیستم خطی معادل مرتبه‌ی سوم را ارائه کردند. فرم کلی معادله‌ی حرکت مربوط به سیستم خطی معادل ذکر شده به صورت رابطه‌ی ۹ است:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \alpha\omega_n^T x + \omega_n^T(1-\alpha)(C_1\dot{x} + C_T z) = -\ddot{u}_g \\ \dot{z} + C_T\dot{x} + C_T z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

ضرایب C_1 تا C_T که در معادلات اخیر ظاهر شده‌اند، پارامترهای سیستم خطی معادل مرتبه‌ی سوم در محدوده‌ی زمانی هستند که از رویکرد کمینه ساختن میانگین مجذور خطا بین روابط ۱ و ۹ محاسبه می‌شوند. نحوه‌ی محاسبه‌ی ضرایب ذکر شده به صورت مفصل در نوشتار اسپانوس^{۱۳} و همکارش (۲۰۱۳)، [۲۰] ارائه شده است. ضرایب C_1 تا C_T وابسته به واریانس $\dot{x}$ ، z و کوواریانس $\dot{x}z$ هستند، به همین جهت $\sigma_{\dot{x}}^T$ ، σ_z^T و $\rho_{\dot{x}z}$ از فرمول‌بندی در حوزه‌ی بسامد وابسته به تحریک ورودی برای سیستم خطی مطابق روابط ۱۰ الی ۱۲ به‌دست می‌آیند. [۲۰]

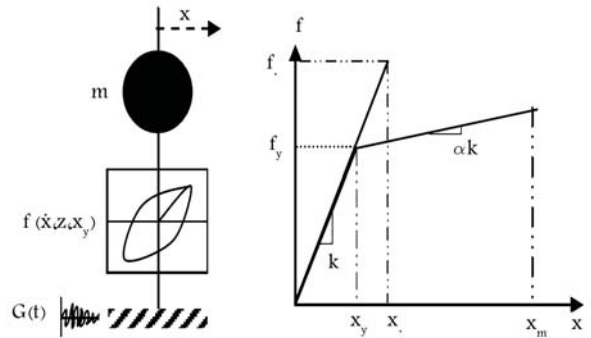
$$\sigma_{\dot{x}}^T = \int_0^\infty \omega^T \left| \frac{i\omega + C_T}{\sum_{j=0}^T (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$\sigma_z^T = \int_0^\infty \left| \frac{-i\omega C_T}{\sum_{j=0}^T (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (11)$$

$$\rho_{\dot{x}z} = -\frac{C_T \sigma_z}{C_T \sigma_{\dot{x}}} \quad (12)$$

که در روابط ۱۰ و ۱۱، پارامتر A_j نیز به صورت روابط ۱۳ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} A_0 = \alpha\omega_n^T C_T \\ A_1 = \alpha\omega_n^T + (2\zeta\omega_n + (1-\alpha)\omega_n^T C_1) C_T - (1-\alpha)\omega_n^T C_T C_T \\ A_2 = C_T + 2\zeta\omega_n + (1-\alpha)\omega_n^T C_1 \\ A_3 = 1 \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۱. سیستم غیرخطی یک درجه آزادی تحت تحریک تصادفی $G(t)$.

کولمب تعریف می‌شود، بستگی دارد. تابع $f(\dot{x}, z, x_y)$ به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود:

$$f(\dot{x}, z, x_y) = k[\alpha x + (1+\alpha)f_1(\dot{x}, z, x_y)] \quad (2)$$

که در آن، $\dot{z}$ و $f_1(\dot{x}, z, x_y)$ مطابق روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شوند:

$$\dot{z} = \dot{x}(1 - U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_1(\dot{x}, z, x_y) = & z(1 - U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) + \dots \\ & x_y(U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن‌ها، $U\{\cdot\}$ تابع پله‌ی هویساید است که به ازاء مقادیر $v \geq 0$ ، $U\{v\} = 1$ و به ازاء مقادیر $v < 0$ ، $U\{v\} = 0$ است. حل معادله‌ی دیفرانسیل رابطه‌ی ۱ به دلیل وجود ترم غیرخطی $f(\dot{x}, z, x_y)$ کار ساده‌ی نیست. از این رو، در بخش حاضر، به منظور تخمین پاسخ سیستم غیرخطی، دو رویکرد مختلف جهت تعریف سیستم خطی معادل متناظر با سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی ارائه شده است. در رویکرد اول، از روش میانگین‌گیری آماری جهت استخراج پارامترهای سیستم خطی معادل استفاده می‌شود. در رویکرد دوم نیز با بهره‌گیری از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌ی بالا در محدوده‌ی بسامدی و جایگزین کردن آن با سیستم غیرخطی، امکان تعریف سیستم خطی معادل فراهم می‌شود.

۱.۲. خطی‌سازی معادل با استفاده از روش میانگین‌گیری آماری

برای سیستم‌های دارای رفتار هیستریزیسی، توابع سیستم غیرخطی به تاریخچه‌ی پاسخ سیستم وابسته است. در این راستا، کاهی^{۱۱} (۱۹۶۰)، [۲۳] از رویکرد میانگین‌گیری مربعات خطاها برای خطی‌سازی سیستم‌های غیرخطی استفاده کرده است. معادله‌ی سیستم خطی معادل متناظر با سیستم‌های غیرخطی با رابطه‌ی تغییرشکل - نیرو دوخطی، به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$\ddot{x} + 2\zeta_{eff}\omega_{eff}\dot{x} + \omega_{eff}^T x = -\ddot{u}_g \quad (5)$$

که در آن، $\ddot{u}_g$ شتاب تحریک ورودی و ω_{eff} و ζ_{eff} بسامد و نسبت میرایی سیستم خطی معادل با کمینه‌سازی میانگین مجذور خطای پاسخ بین روابط ۱ و ۵ هستند

که در آن، $\lambda_{j,m,G}$ ممان های مرتبه m پاسخ طیفی است که مطابق رابطه ی ۱۸ محاسبه می شود: [۲۷]

$$\lambda_{j,m,G} = \int_0^\infty \frac{\omega^m G(\omega)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_j \omega \omega_j)^2} d\omega \quad (18)$$

از آنجا که محاسبه ی ضریب بزرگ نمایی (η_j) در سیستم های تحت ارتعاش های تصادفی، نیازمند حل دقیق مسئله ی اولین عبور پاسخ از سطحی خاص از شدت با احتمال p است، لذا برای محاسبه ی ضریب η_j ، روابطی دقیق و کلی در دسترس نیست. از این رو، پژوهشگران از طریق روش های نیمه تجربی اقدام به تخمین ضریب بزرگ نمایی تحریک های غیرمانا کرده اند. [۲۸، ۲۹] در مطالعه ی حاضر، از رابطه ی نیمه تجربی و کاربردی وانمارک (۱۹۷۶)، [۳۰] مطابق رابطه ی ۱۹ استفاده شده است:

$$\eta_j = \sqrt{2 \ln \left\{ 2 v_j \left[1 - \exp \left(-q_j^{1/2} \sqrt{\pi \ln(2 v_j)} \right) \right] \right\}} \quad (19)$$

که در آن v_j ، q_j و η_j مطابق روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می شوند:

$$v_j = - \frac{\omega_j T_s \exp \left(-2 \left(\frac{1 - \exp(-2\zeta_j \omega_j T_s)}{1 - \exp(-\zeta_j \omega_j T_s)} - 1 \right) \right)}{2\pi \ln(0.5)} \quad (20)$$

$$q_j = \sqrt{1 - \frac{1}{1 - \zeta_j^2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{\zeta_j}{\sqrt{1 - \zeta_j^2}} \right)}; \quad \zeta_j = \frac{\zeta}{1 - \exp(-2\zeta \omega_j T_s)} \quad (21)$$

اکنون با در اختیار داشتن طیف طرح/پاسخ مشخص، طیف توان گسسته از رابطه ی بازگشتی زیر در تعداد نقاط مشخص N و بسامد طبیعی $\Delta\omega$ با گام های $\Delta\omega$ به دست می آید. [۳۰] رابطه ی طیف توان در محدوده ی بسامد به صورت رابطه ی ۲۲ بیان می شود:

$$G(\omega_k) = \frac{\zeta_k}{\omega_k \pi - \zeta_k \omega_{k-1}} \times \left(\frac{Sa^2(2\pi/\omega_k, \zeta)}{\eta_k^2} - \Delta\omega \sum_{i=1}^{k-1} G(\omega_i) \right) \quad (22)$$

که در آن، هر چقدر $\Delta\omega$ کوچک تر باشد، میزان دقت بیشتر می شود. برای کاربردهای مهندسی مقدار $\Delta\omega = 0.1^\circ$ ، دقت کافی دارد. ω_N بسامدی است که از آن بسامد به بعد، دامنه ی طیف توان به صفر میل می کند و همچنین ω_0 کمترین مقدار بسامد طبیعی جهت تعریف رابطه ی ۱۹ است (رابطه ی ۲۳):

$$\omega_0 = \min_{\omega_k} \left(\ln \left\{ 2 v_j \left[1 - \exp \left(-q_j^{1/2} \sqrt{\pi \ln(2 v_j)} \right) \right] \right\} \geq 0 \right) \quad (23)$$

بر اساس روابط ۱۷ الی ۲۱، می توان طیف پاسخ شبه شتاب $D(\omega_k, \xi)$ مربوط به طیف توان به دست آمده از رابطه ی ۲۲ را محاسبه کرد. در گام اول محاسبات ممکن است طیف پاسخ شبه شتاب $D(\omega_k, \xi)$ در تمام بسامدهای طبیعی سیستم به طیف پاسخ/طرح هدف، یعنی Sa_{target} همگرا نشود. از این رو، جهت سازگاری مطلوب طیف $D(\omega_k, \xi)$ با طیف Sa_{target} ، از یک فرایند تکراری بر اساس رابطه ی ۲۴ استفاده می شود: [۳۰]

$$G^{(M+1)}(\omega_k) = G^{(M)}(\omega_k) \left(\frac{Sa(2\pi/\omega_k, \zeta)}{D^{(M)}(2\pi/\omega_k, \zeta)} \right)^2 \quad (24)$$

که در آن، M تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به یک همگرایی قابل قبول است.

ضرایب C_1 تا C_7 و معادلات ۱۰ الی ۱۲، تشکیل یک دستگاه ۷ معادله ی غیرخطی و ۷ مجهول را می دهند که برای حل دستگاه معادلات غیرخطی مذکور می توان از الگوریتم های بهینه سازی، مانند روش ناحیه ی اطمینان داگ لگ ۱۴ استفاده کرد. [۳۵] از دیدگاه تئوری و آنالیزهای عددی می توان دریافت که سیستم های خطی مرتبه ی سوم نسبت به سیستم های خطی مرتبه ی دوم، [۲۳، ۲۹-۲۸، ۲۱] مشخصات آماری پاسخ سیستم غیرخطی را دقیق تر برآورد می کنند. با این حال، سیستم خطی مرتبه ی سوم را نمی توان به راحتی به پیشینه ی پاسخ های سیستم خطی یا طیف طرح/پاسخ مرتبط ساخت. جهت رفع مشکل اخیر، با تعریف یک سیستم خطی مرتبه ی دوم متناظر با سیستم خطی معادل مرتبه ی سوم این ارتباط ایجاد می شود. این کار از طریق برابر قراردادن مشخصات آماری پاسخ سیستم های خطی مرتبه ی سوم با مرتبه ی دوم تحقق پیدا می کند. [۳۷] معادله ی حرکت سیستم خطی مرتبه ی دوم متعارف با پارامترهای معادل ω_{eff} و ζ_{eff} و شرایط اولیه ی سکون تحت شتاب $\ddot{u}_g$ به صورت رابطه ی ۱۴ است:

$$\ddot{x} + 2\zeta_{eff}\omega_{eff}\dot{x} + \omega_{eff}^2 x = -\ddot{u}_g \quad (14)$$

که در آن، x پاسخ سیستم خطی مرتبه ی دوم است. پارامترهای سیستم خطی ω_{eff} و ζ_{eff} نیز با برابر قرار دادن واریانس های پاسخ سرعت و جابه جایی سیستم های خطی مرتبه های دوم و سوم مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ به دست می آیند:

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty \frac{G(\omega)}{(\omega^2 - \omega_{eff}^2)^2 + (2\zeta_{eff}\omega_{eff}\omega)^2} d\omega = \int_0^\infty \left| \frac{i\omega + C_7}{\sum_{j=1}^7 (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (15)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2 = \int_0^\infty \frac{\omega^2 G(\omega)}{(\omega^2 - \omega_{eff}^2)^2 + (2\zeta_{eff}\omega_{eff}\omega)^2} d\omega = \int_0^\infty \omega^2 \left| \frac{i\omega + C_7}{\sum_{j=1}^7 (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (16)$$

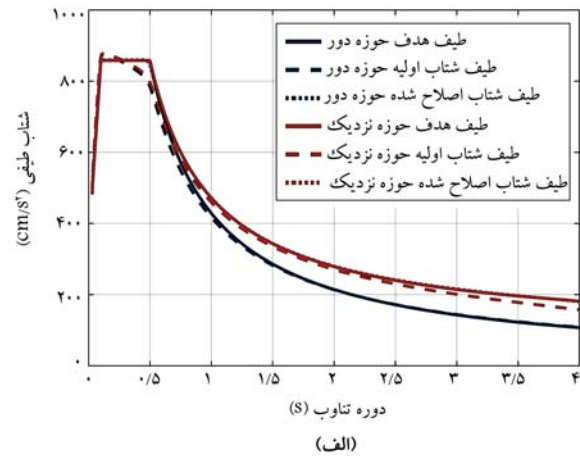
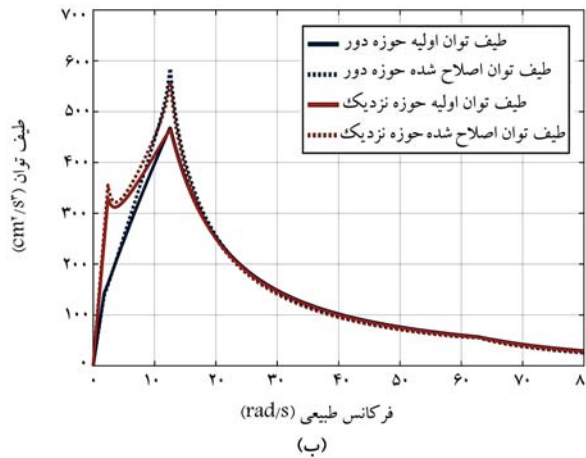
مقادیر پارامترهای سیستم خطی ω_{eff} و ζ_{eff} در روابط اخیر نیز بر اساس رویکرد اشاره شده برای حل دستگاه معادلات غیرخطی با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی، قابل محاسبه هستند. اکنون می توان بر اساس سیستم خطی تعریف شده، طیف پاسخ خطی معادل متناظر با سیستم های غیرخطی تحت تحریک های ورودی را محاسبه کرد.

۳. محاسبه ی طیف توان سازگار با طیف پاسخ

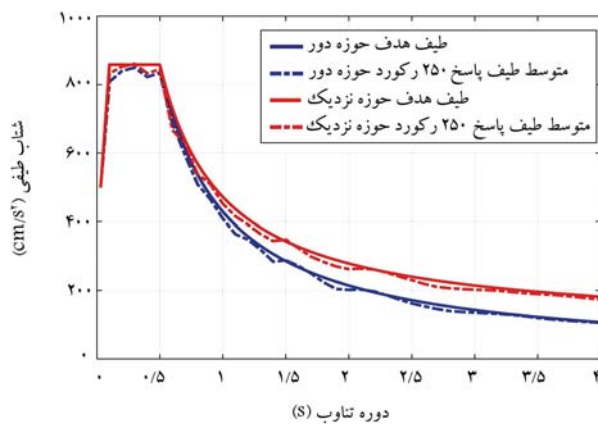
فرمول بندی سیستم های خطی معادل در بخش های ۱/۲ و ۲/۲ بر اساس تابع طیف توان مربوط به تحریک ورودی در حوزه ی بسامدی $G(\omega)$ است. لذا به منظور ارتباط دادن طیف توان تحریک ورودی با طیف طرح/پاسخ، لازم است تحریک ورودی لرزه یی توسط طیف پاسخ شبه شتاب

$Sa(2\pi/\omega_j)$ سیستم یک درجه آزادی خطی با بسامد طبیعی ω_j و نسبت میرایی ζ بیان شود. در این چارچوب، تحریک ورودی به صورت یک فرایند شبه مانا دارای زمان ارتعاش محدود T_s مبتنی بر طیف پاسخ Sa به وسیله ی مفهوم ضریب بزرگ نمایی η_j به صورت رابطه ی ۱۷ بیان می شود: [۳۰]

$$Sa\left(\frac{2\pi}{\omega_j}, \zeta\right) = \eta_j \omega_j^2 \sqrt{\lambda_{j,0,G}} \quad (17)$$



شکل ۲. الف) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای حوزه‌های نزدیک و دور از گسل و خاک نوع II؛ ب) طیف توان متناظر با طیف‌های هدف.



شکل ۳. متوسط طیف پاسخ ۲۵۰ شتاب‌نگاشت مصنوعی و سازگار شده با طیف هدف در حوزه‌های نزدیک و دور از گسل.

مشخص شدن پارامترهای مربوط به سیستم‌های خطی معادل جهت تخمین پاسخ سیستم‌های خطی معادل از رویکردی‌های مبتنی بر ارتعاش‌های تصادفی خطی و تحلیل‌های تاریخیچه زمانی خطی استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از رویکردهای مذکور با نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی مقایسه شده‌اند. در این راستا، برای استخراج نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی سیستم‌های غیرخطی از ۲۵۰ رکورد مصنوعی تولیدی سازگار با دو حالت طیف هدف استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، جهت تولید رکوردهای مصنوعی از نرم‌افزار SeismoArtif استفاده شده است، که در آن رکوردهای مصنوعی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی با اتخاذ توابع پوش و چگالی طیف توان تولید شده‌اند.^[۴۲،۴۱] در شکل ۳، متوسط طیف پاسخ کشسان مربوط به ۲۵۰ رکورد تولیدی سازگار با طیف‌های هدف مشاهده می‌شود.

پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی غیرخطی با استفاده از تئوری ارتعاش‌های تصادفی به کمک رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$\max_T \{|x(t)|\} = \eta_{eff} \sigma_x \quad (25)$$

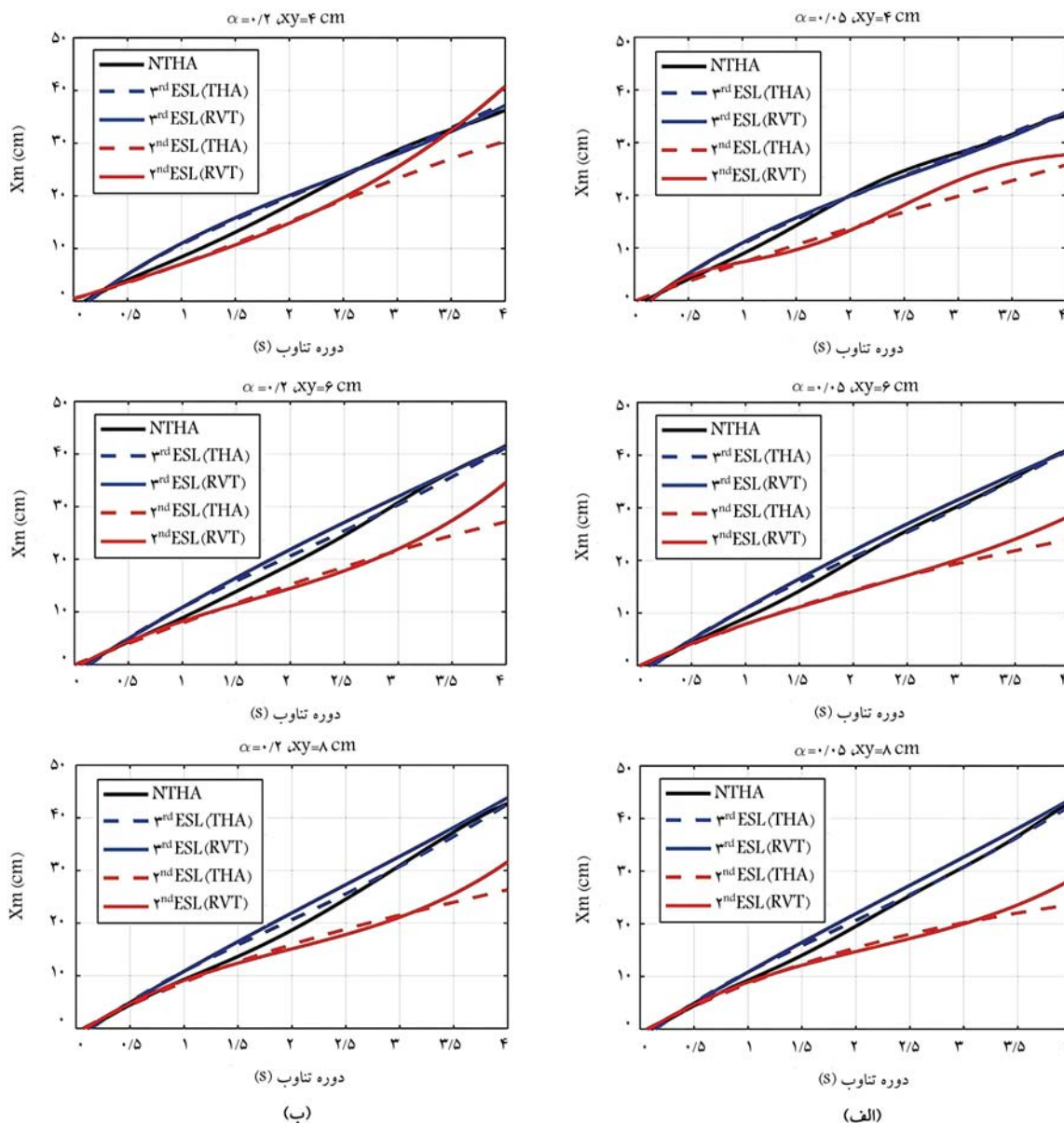
که در آن، σ_x برابر با مقادیر انحراف معیار پاسخ سیستم‌های خطی معادل η_{eff} نیز ضریب بزرگ‌نمایی محاسبه شده توسط پارامترهای معادل سیستم خطی مرتبه‌های

۴. پیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت

تحریک‌های سازگار با طیف پاسخ

در نوشتار حاضر، از روش‌های خطی‌سازی معادل توضیح داده شده در بخش‌های قبل، جهت محاسبه‌ی پیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی با رفتار نیرو - جابه‌جایی دوخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، ساختگاه از نوع خاک II و در منطقه‌ی لرزه‌خیزی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. به منظور تعریف تحریک ورودی سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی، طیف هدف براساس طیف طرح کشسان بکنواخت با نسبت میرایی ۵٪ در آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله،^[۶] برای دو حالت با و بدون لحاظ کردن آثار حوزه‌ی نزدیک گسل (ضریب اصلاحی N) استفاده شده است. در نوشتار حاضر، لحاظ کردن ضریب اصلاحی در طیف هدف منجر به تولید طیف هدف حوزه‌ی نزدیک و در نظر نگرفتن ضریب مذکور، بیانگر طیف هدف حوزه‌ی دور از گسل است. براساس طیف هدف تعیین شده و سایر فرضیات اشاره شده‌ی اخیر، طیف توان مربوط به تحریک ورودی مطابق روابط ۱۷ الی ۲۴ قابل محاسبه است. در شکل ۲، طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای مناطق حوزه‌های نزدیک و دور از گسل و همچنین طیف توان متناظر با طیف‌های مذکور با در نظر گرفتن مقادیر $\Delta\omega = 0.1 \text{ rad/s}$ و $T_s = 2.0 \text{ s}$ ثانیه مشاهده می‌شود.

طیف‌های توان به دست آمده در شکل اخیر، طی سه مرحله تکرار به همگرایی کامل رسیده‌اند. همان‌طور که در شکل (الف) مشاهده می‌شود، آثار حوزه‌ی نزدیک در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم از دوره تناوب‌های میانی به بالا، با افزایش دوره‌ی تناوب سازه افزایش پیدا کرده است. این موضوع نیز برای طیف توان صدق می‌کند. در شکل (ب) نیز مشاهده می‌شود که در بسامدهای طبیعی پایین (دوره‌ی تناوب بالا)، آثار حوزه‌ی نزدیک قابل توجه است. بنابراین انتظار می‌رود این امر موجب افزایش پاسخ سازه‌ها در محدوده‌ی بسامدی طبیعی پایین شود. برای پی بردن به این موضوع، طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی برای حالت‌های مختلف جابه‌جایی تسلیم، یعنی ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر و در دو نسبت صلبیت ۰/۵ و ۰/۲ محاسبه شده‌اند. پاسخ‌های غیرخطی براساس روش‌های خطی‌سازی معادل مرتبه‌های دوم و سوم به دست آمده‌اند. با

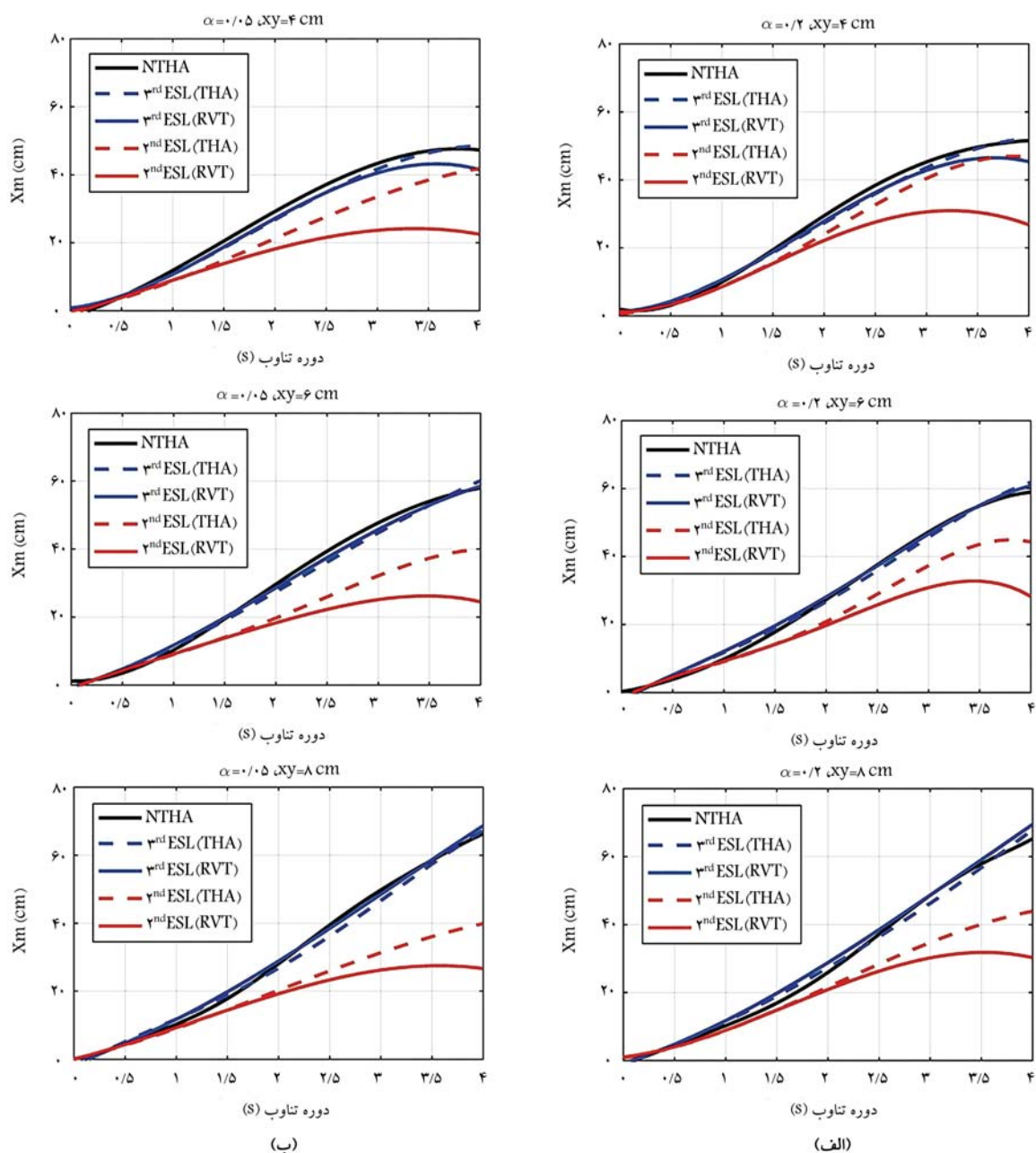


شکل ۴. طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی دور از گسل. که در آن، $2^{nd}ESL$ بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی دوم و $3^{rd}ESL$ بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی سوم است. همچنین RVT ، THA و $NTHA$ به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی خطی و غیرخطی هستند.

تاریخچه‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی غیرخطی اختلاف پیدا کرده‌اند. اختلاف بین نتایج، با افزایش دوره‌ی تناوب بیشتر نمایان شده است. با مقایسه‌ی نتایج برای دو نسبت صلبیت نشان داده شده در شکل ۴ (الف و ب) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت صلبیت، اختلاف بین نتایج خطی‌سازی معادل و تحلیل تاریخی‌ی زمانی غیرخطی کمتر شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم به‌دست آمده از رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخی‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخی‌ی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی‌های تسلیم انطباق کامل دارند و این امر بیانگر دقت مناسب روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم در برآورد پاسخ سیستم‌های غیرخطی است.

دوم و سوم و استفاده از روابط ۱۹ الی ۲۱ هستند. نتایج طیف پاسخ غیرخطی برای حوزه‌های دور و نزدیک از گسل و به‌کارگیری روش‌های مختلف تحلیلی در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

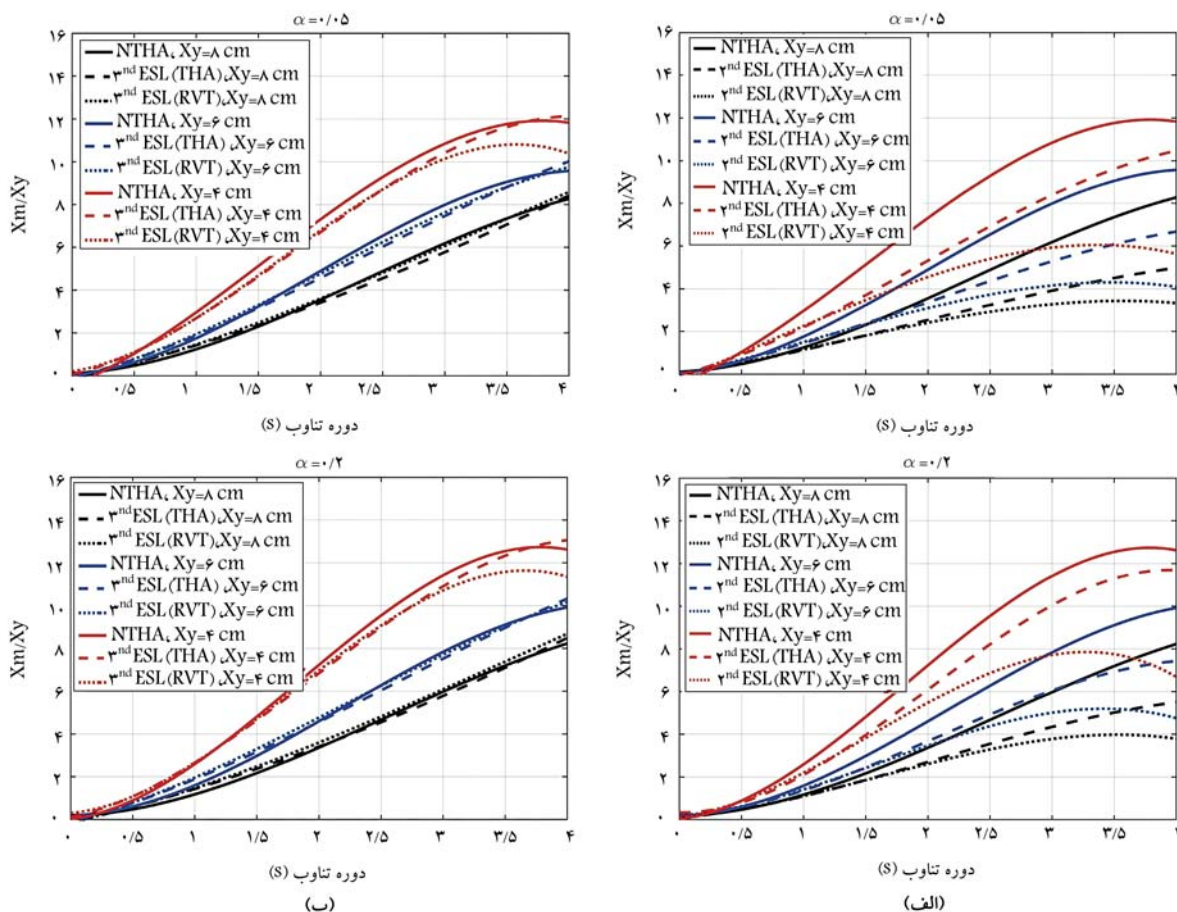
محور عمودی در شکل‌های مذکور (X_m)، بیانگر پاسخ بیشینه‌ی سیستم‌های غیرخطی است که برای تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی، متغیر X_m ، بیانگر متوسط پاسخ بیشینه‌ی سیستم‌ها تحت رکوردهای مصنوعی است. در شکل ۴، نتایج پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی دور برای مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی تسلیم مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش مقادیر جابه‌جایی تسلیم، نتایج طیف پاسخ به‌دست آمده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل



شکل ۵. طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی نزدیک به گسل. که در آن، $3^{rd}ESL$ بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی دوم و $3^{rd}ESL$ بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی سوم است. همچنین RVT ، THA و $NTHA$ به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل‌های تاریخی‌چهی زمانی خطی و غیرخطی هستند.

اختلاف مذکور با افزایش دوره‌ی تناوب بیشتر خواهد شد. نکته‌ی قابل توجه در شکل اخیر، وجود اختلاف قابل توجه در نتایج رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی خطی در تخمین پاسخ سیستم خطی معادل مرتبه‌ی دوم از دوره‌های تناوب میانی به بالاست که این امر در حالت حوزه‌ی دور از گسل بسیار کمتر است. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی نتایج برای دو نسبت صلبیت $0.5/0$ و $2/0$ در شکل‌های ۵ (الف و ب) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت صلبیت، اختلاف بین نتایج خطی‌سازی معادل و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی کمتر شده است، به‌طوری‌که در برخی موارد (جابه‌جایی‌های تسلیم کم) نتایج مربوط به رویکرد تحلیل تاریخی‌چهی زمانی خطی در روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم با نتایج

نتایج طیف پاسخ غیرخطی برای مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی تسلیم با در نظر گرفتن آثار حوزه‌ی نزدیک در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی‌های تسلیم انطباق دارند، اما این موضوع برای روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم صدق نمی‌کند. در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقادیر جابه‌جایی تسلیم، نتایج طیف پاسخ حاصل از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی اختلاف زیادی پیدا کرده‌اند.



شکل ۶. نمودارهای شکل‌پذیری - دوره‌ی تناوب سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی نزدیک گسل: الف) نتایج روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی دوم، ب) نتایج روش خطی‌سازی آماری مرتبه سوم، در این شکل ۲nd ESL بیانگر روش خطی‌سازی مرتبه دوم و ۳rd ESL بیانگر روش خطی‌سازی مرتبه سوم می‌باشد. همچنین RVT، THA و NTHA به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاشات تصادفی و تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی خطی و غیرخطی هستند.

تحریک‌های شدید است. از سوی دیگر، تطابق کامل نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلبیت‌های مختلف (شکل ۶ ب)، گویای دقت و کارآمدی روش مذکور در تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید است.

۵. نتیجه‌گیری

برآورد دقیق آماره‌های پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید، یکی از موضوعات اساسی در مهندسی زلزله براساس عملکرد است. در پژوهش حاضر، آثار حوزه‌ی نزدیک مندرج در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی ایران (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) با عنوان ضریب اصلاح طیفی (N)، در پاسخ سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی با رفتار هیستریزس دوخطی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، جهت تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌های دوم و سوم استفاده شده است. از رویکردهای اشاره شده می‌توان برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرخطی متناظر با یک طیف پاسخ/طرح مشخص بدون نیاز به انتگرال‌گیری عددی معادلات غیرخطی حرکت سیستم‌ها تحت رکوردهای زمین‌لرزه

تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انطباق خوبی پیدا کرده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ برای یک مقدار جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلبیت مشخص می‌توان پی برد که پاسخ سیستم‌های غیرخطی متأثر از آثار حوزه‌ی نزدیک است، به طوری که آثار مذکور باعث افزایش پاسخ‌های غیرخطی مخصوصاً در نواحی دوره‌های تناوب متوسط به بالا می‌شود.

جهت درک بهتر کارآمدی روش‌های خطی‌سازی معادل تحت آثار حوزه‌ی نزدیک، مقایسه‌ی بین نتایج روش‌های خطی‌سازی معادل با روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در قالب نمودارهای شکل‌پذیری - دوره‌ی تناوب (شکل ۶) برای مقادیر جابه‌جایی تسلیم ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر در دو نسبت صلبیت ۰/۵ و ۰/۲ ارائه شده است. در شکل (۶ الف) نتایج شکل‌پذیری در مقابل دوره‌ی تناوب سیستم‌های یک درجه آزادی غیرخطی با استفاده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، بین نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در محدوده‌ی دوره‌های تناوب متوسط به بالا برای تمام مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم اختلاف زیادی مشاهده می‌شود.

اگرچه اختلاف بین نتایج با افزایش نسبت صلبیت سیستم‌ها کاهش پیدا می‌کند، اما این اختلاف همچنان قابل ملاحظه است. اختلاف زیاد نتایج، بیانگر دقت پایین روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم در برآورد پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت

زمانی غیرخطی ۲۵° رکورد سازگار شده با طیف هدف آیین نامه در مقادیر مختلف جابه جایی تسلیم و نسبت صلبیت سیستم مقایسه شده اند. نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر نشان داد که آثار حوزه ی نزدیک باعث افزایش چشمگیر پاسخ سیستم های غیرخطی شده است. همچنین نتایج نشان می دهد که روش خطی سازی مرتبه ی دوم در تخمین پاسخ سیستم های غیرخطی تحت تحریک های شدید، دقت خوبی ندارد؛ به طوری که با افزایش دوره ی تناوب، اختلاف پاسخ سیستم خطی معادل استنتاج شده از روش خطی سازی آماری مرتبه ی دوم با تحلیل های تاریخیچه ی زمانی غیرخطی بیشتر می شود.

از سوی دیگر، انطباق خوب نتایج خطی سازی مرتبه ی سوم با نتایج تحلیل تاریخیچه ی زمانی غیرخطی بیانگر کارآمد بودن و دقت مناسب روش مذکور در تخمین پاسخ سیستم های غیرخطی تحت آثار حوزه ی نزدیک است. نکته ی قابل توجهی که براساس نتایج می توان به آن اشاره کرد، انطباق کامل نتایج رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش های تصادفی و تحلیل تاریخیچه ی زمانی خطی در روش خطی سازی مرتبه ی سوم است، به طوری که این انطباق در روش خطی سازی مرتبه ی دوم مشاهده نمی شود.

استفاده کرد. در این راستا، به منظور بررسی آثار حوزه ی نزدیک ارائه شده در آیین نامه ی لرزه یی ایران، از تحریک های لرزه یی که طیف پاسخ آن ها سازگار با طیف هدف (طیف طرح آیین نامه) است، استفاده شده است. به منظور استخراج طیف پاسخ سیستم خطی معادل متناظر به طیف های هدف تعیین شده، طیف توان تحریک ورودی متناظر با طیف های هدف بر مبنای رویکردی در حوزه ی ارتعاش های تصادفی محاسبه و در نهایت با تخمین پارامترهای معادل سیستم های خطی معادل، طیف پاسخ سیستم خطی معادل از رویکردهای حوزه ی بسامدی و زمانی در محدوده ی کشسان محاسبه شده اند. در رویکرد استفاده شده در نوشتار حاضر، پارامترهای معادل سیستم خطی به طور صریح با طیف پاسخ از پیش تعیین شده و سیستم هیستریزیس دوخطی در نظر گرفته شده مرتبط بوده اند. از این رو می توان با استفاده از پارامترهای معادل سیستم خطی، تخمین های قابل اعتمادی از بیشینه ی پاسخ غیرخطی متناظر با یک طیف هدف مشخص به دست آورد.

در نوشتار حاضر، جهت بررسی کارآمدی روش های خطی سازی معادل، نتایج حاصل از روش های مذکور با متوسط طیف پاسخ حاصل از تحلیل های تاریخیچه ی

پانویس ها

1. Fokker-Planck-Kolmogorov equation
2. stochastic averaging
3. perturbation method
4. moment closure
5. dissipation energy balancing method
6. equivalent non-linearization method
7. equivalent linearization method (ELM)
8. Gaussian distribution
9. Zhao & Huang
10. Spanos & Giaralis
11. Caughey
12. Asano & Iwan
13. Spanos
14. trust region dogleg

منابع (References)

5. JSCE (Japan Society of Civil Engineers), "Earthquake resistant design codes in Japan" (2000).
6. BHRC, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Standard No. 2800, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran (2014).
7. Somerville, P.G. "Engineering characterization of near fault ground motions", Proc. NZSEE 2005 Conf. (2005).
8. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures", John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford (2001).
9. Luco, N. "Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures and near-source effects", PhD. Thesis, Stanford University (2003).
10. Chioccarelli, E. and Iervolino, I. "Near-source seismic demand and pulse-like records: A discussion for L'Aquila earthquake", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **39**(9), pp. 1039-1062 (2010).
11. Zamora, M. and Riddell, R. "Elastic and inelastic response spectra considering near-fault effects", *J. Earthq. Eng.*, **15**(5), pp. 775-808 (2011).
12. Mazza, F. and Vulcano, A. "Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated rc framed buildings", *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, **41**(2), pp. 211-232 (2012).
13. Yazdani, A. and Yazdannejad, K. "Estimation of the seismic demand model for different damage levels", *Earthquakes Struct.*, **194**, pp. 183-195 (2019).
14. Baghaei Lake, E., Homami, P. and MeshkatDini, A. "Evaluation of robustness component of seismic resilience in low-and mid-rise braced frame structures in
1. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Wellington, New Zeal. Stand. New Zeal.*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).
2. Standard, N.Z. "NZS 1170.5: 2004, Structural design actions part 5: Earthquake actions-New Zealand", Wellington, New Zeal. Stand. New Zeal (2004).
3. Code, U.B. "Structural engineering design provisions", Int. Conf. Build. Off (1997).
4. Construction, R.O.C. "Planning agency (2005) seismic design code for buildings in Taiwan", ROC Minist. Inter. (n.d.).

- the near-field site", *Sharif J. Civ. Eng.*, **37**(2.2), pp. 159-171 (2021).
15. Cuesta, I. and Aschheim, M.A. "Inelastic response spectra using conventional and pulse R-factors", *J. Struct. Eng.*, **127**(9), pp. 1013-1020 (2001).
 16. Elnashai, A.S. and Mwafy, A.M. "Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings", *Struct. Des. tall Build.*, **11**(5), pp. 329-351 (2002).
 17. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems", *J. Struct. Eng.*, **130**(9), pp. 1309-1319 (2004).
 18. Giaralis, A. and Spanos, P.D. "Wavelet-based response spectrum compatible synthesis of accelerograms? Eurocode application (EC8)", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **29**(1), pp. 219-235 (2009).
 19. Fujimura, K. and Der Kiureghian, A. "Tail-equivalent linearization method for nonlinear random vibration", *Probabilistic Eng. Mech.*, **22**(1), pp. 63-76 (2007).
 20. Yazdani, A. and Salimi, M.R. "Earthquake response spectra estimation of bilinear hysteretic systems using random-vibration theory method", *Earthquakes Struct.*, **8**(5), pp. 1055-1067 (2015).
 21. Roberts, J.B. and Spanos, P.D. "Random vibration and statistical linearization", Courier Corporation (2003).
 22. Crandall, S.H. "On using non-Gaussian distributions to perform statistical linearization", *Int. J. Non. Linear. Mech.*, **39**(9), pp. 1395-1406 (2004).
 23. Anh, N.D., Hieu, N.N. and Linh, N.N. "A dual criterion of equivalent linearization method for nonlinear systems subjected to random excitation", *Acta Mech.*, **223**(3), pp. 645-654 (2012).
 24. Weiqiu, Z. and Guoqiang, C. "Nonlinear stochastic dynamics: A survey of recent developments", *Acta Mech. Sin.*, **18**(6), pp. 551-566 (2002).
 25. Salimi, M.-R. and Yazdani, A. "Reliability-based fragility analysis of nonlinear structures under the actions of random earthquake loads", *Struct. Eng. Mech.*, **66**(1), pp. 75-84 (2018).
 26. Su, C., Huang, H. and Ma, H. "Fast equivalent linearization method for nonlinear structures under non-stationary random excitations", *J. Eng. Mech.*, **142**(8), pp. 4016049 (2016).
 27. Zhao, N. and Huang, G. "Efficient nonstationary stochastic response analysis for linear and nonlinear structures by FFT", *J. Eng. Mech.*, **145**(5), pp. 4019023 (2019).
 28. Spanos, P.D. and Giaralis, A. "Statistical linearization based estimation of the peak response of nonlinear systems subject to the EC8 design spectrum", *AIP Conf. Proc.*, pp. 1236-1244 (2008).
 29. Giaralis, A. and Spanos, P.D. "Effective linear damping and stiffness coefficients of nonlinear systems for design spectrum based analysis", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **30**(9), pp. 798-810 (2010).
 30. Spanos, P.D. and Giaralis, A. "Third-order statistical linearization-based approach to derive equivalent linear properties of bilinear hysteretic systems for seismic response spectrum analysis", *Struct. Saf.*, **44**, pp. 59-69 (2013).
 31. Giaralis, A. and Spanos, P.D. "Derivation of equivalent linear properties of Bouc-Wen hysteretic systems for seismic response spectrum analysis via statistical linearization", 10th HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Greece (2013).
 32. Mitseas, I.P., Kougiumtzoglou, I.A., Giaralis, A. and et al. "A novel stochastic linearization framework for seismic demand estimation of hysteretic MDOF systems subject to linear response spectra", *Struct. Saf.*, **72**, pp. 84-98 (2018).
 33. Caughey, T. K., "Random excitation of a system with bilinear hysteresis", *J. Appl. Mech. Dec.*, **27**(4), pp. 649-652 (1960).
 34. Asano, K. and Iwan, W.D. "An alternative approach to the random response of bilinear hysteretic systems", *Earthq. Eng & Struct. Dyn.*, **12**(2), pp. 229-236 (1984).
 35. Nocedal, J. and Wright, S. "Numerical Optimization", Springer Science & Business Media (2006).
 36. Vanmarcke, E.H. "Chapter 8: Structural response to earthquakes", *Developments in Geotechnical Engineering*, **15**, pp. 287-335 (1976).
 37. Michaelov, G., Lutes, L.D. and Sarkani, S. "Extreme value of response to nonstationary excitation", *J. Eng. Mech.*, **127**(4), pp. 352-363 (2001).
 38. Corotis, R.B., Vanmarcke, E.H. and Cornell, A.C. "First passage of nonstationary random processes", *J. Eng. Mech. Div.*, **98**(2), pp. 401-414 (1972).
 39. Giaralis, A. and Spanos, P.D. "Derivation of response spectrum compatible non-stationary stochastic processes relying on Monte Carlo-based peak factor estimation", *Earthquakes Struct.*, **3**(3), pp. 581-609 (2012).
 40. Cacciola, P., Colajanni, P. and Muscolino, G. "Combination of modal responses consistent with seismic input representation", *J. Struct. Eng.*, **130**(1), pp. 47-55 (2004).
 41. Gasparini, D.A. "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra", *MIT Dep. Civ. Eng. Res. Rep.*, (1976).
 42. Seismo Artif, <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>. (2021)

مطالعه‌ی عددی اتصالی نوین به صورت کاملاً پیچی به منظور اتصال گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان

مهدی دره زرشکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرضا قیامی آزاد* (استادیار)

مهدی قاسمیه (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۱۰-۹۹، (پژوهشی)

با توجه به تجربیات گذشته‌ی مهندسان، معمولاً اتصالات‌های جوشی در هنگام زلزله، عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند. با وجود این، در همه‌ی اتصالات‌های گیردار از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی موجود در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به نحوی از جوش استفاده شده است. به همین دلیل در نوشتار حاضر، به بررسی یک نوع اتصال گیردار کاملاً پیچی با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان پرداخته شده است. ابتدا به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود و روش اجزاء تشکیل‌دهنده، شیوه‌ی برای محاسبه‌ی سختی و مقاومت اتصال ارائه شده و پس از طراحی تعداد زیادی اتصال و محاسبه‌ی سختی آنها، با استفاده از الگوریتم یادگیری رگرسیون خطی چندگانه، یک مدل ساده برای محاسبه‌ی سختی اتصال ارائه شده است، که نتایج نشان‌دهنده‌ی خطای ناچیز مدل مذکور در محاسبه‌ی سختی اتصال است. همچنین اتصال مورد نظر از نظر صلابت نیز بررسی شده است، که نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد صلب آن است.

واژگان کلیدی: روش اجزاء تشکیل‌دهنده، اجزاء محدود، یادگیری ماشین، مقاطع سپری شکل، اتصال کاملاً پیچی، سختی اولیه.

۱. مقدمه

قاب‌های خمشی متوسط و ویژه در گروه اتصالات‌های از پیش تأیید صلاحیت شده قرار گرفته باشد.

مهم‌ترین شاخص و امتیاز اتصال تیر به ستون به کمک سپری، میزان شکل‌پذیری و اتلاف انرژی آن در مقایسه با اتصالات‌های جوشی است.^[۱] هوانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۳] با استفاده از سوراخ لوبیایی در جان سپری، تأثیر طول سوراخ لوبیایی را در میزان شکل‌پذیری و اتلاف انرژی اتصال بررسی کردند و دریافتند که عملکرد لرزه‌یی اتصال مذکور، عالی است. همچنین ونگ^۳ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۴] با اختصاص طول تغییرشکل آزاد مناسب در جان سپری و استفاده از فولاد با نقطه‌ی تسلیم پایین، از سپری هم‌زمان به عنوان اتصال دهنده و فیوز مستهلک‌کننده‌ی انرژی استفاده کردند و دریافتند که اتصال مذکور دارای عملکرد خستگی عالی و ظرفیت بالای انرژی است.

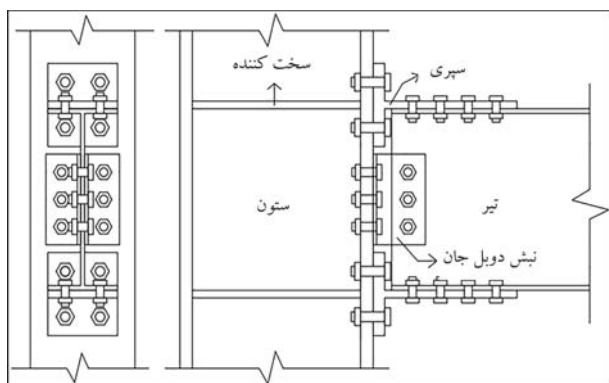
به صورت کلی سه نوع مکانیزم خرابی در بال سپری ممکن است رخ بدهد، که وقوع هر کدام به مقاومت نسبی بین ورق و پیچ‌ها بستگی دارد.^[۵] با توجه به شکل ۱، در مکانیزم ۱، مقاومت ورق در مقایسه با پیچ کم است و دو مفصل خمیری در ورق بال سپری تشکیل می‌شود. در مکانیزم ۲، مقاومت ورق و پیچ به یکدیگر نزدیک است

تجربه‌ی زمین‌لرزه‌ی نورتریج^۱ (۱۹۹۴)، باعث کاهش اطمینان مهندسان از عملکرد اتصالات‌های جوشی در زلزله شده است. با بررسی ساختمان‌های تخریب شده مشخص شده است که اتصالات‌های خمشی جوشی عملکرد خوبی از خود نشان نداده و در سطح پایینی از شکل‌پذیری بدون شکل‌گیری مفصل خمیری دچار شکست شده‌اند. بیشتر خرابی‌های ساختمان ناشی از یک شکست ترد در اتصالات‌های جوشی بوده و فقط ۲ یا ۳ اتصال از بین تعداد زیادی اتصال بررسی شده، به تغییرشکل خمیری قابل توجهی رسیده‌اند. همچنین بیشتر مهندسان اعتقاد داشتند که آزمایش‌های کنترل کیفیت جوش، کارایی لازم را نداشته و نتوانسته‌اند به خوبی کیفیت جوش را ارزیابی کنند و به عنوان یک راهکار جایگزین، مهندسان تمایل بیشتری به استفاده از اتصالات‌های پیچی نشان داده‌اند.^[۱] با توجه به این‌که در تمام اتصالات‌های از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،^[۲] به نحوی از جوش استفاده شده است؛ در نتیجه، نیاز به یک اتصال گیردار کاملاً پیچی است، که برای استفاده در

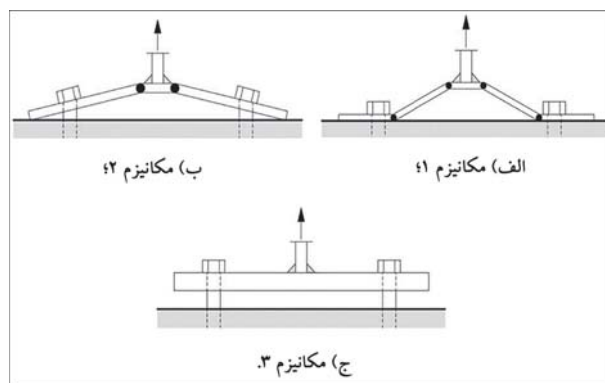
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۶.

DOI:10.24200/J30.2022.59751.3069



شکل ۲. جزئیات اتصال با سپری و نبشی جان.



شکل ۱. انواع مکانیزم خرابی در بال سپری.^[۷]

همچنین هنتوش و عبود^۸ (۲۰۱۴)،^[۱۷] با استفاده از مفاهیم روش اجزاء تشکیل‌دهنده، مدلی را برای توصیف رفتار و سختی سپری ساخته شده، که شامل تغییر شکل‌های کلی سپری و بال ستون است، ارائه کرده‌اند. مدل مذکور، رفتار غیرخطی، پیش‌تندگی پیچ‌ها و اندرکش تماسی آنها را در نظر گرفته است.

بر خلاف اتصال مورد مطالعه‌ی ایشان، که در آن از نبشی جان با پیچ و مهره برای انتقال برش تیر به ستون استفاده شده است، در مطالعاتی که در گذشته بر روی اتصال با استفاده از مقاطع سپری انجام شده است، در اغلب موارد، ساز و کاری برای انتقال برش در نظر گرفته نشده و یا این‌که در موارد اندکی، از ورق جان با جوش برای انتقال برش استفاده شده است.

آیین‌نامه‌های طراحی، اتصال‌هایی که بدون نیاز به انجام آزمایش و تهیه‌ی مدارک و فقط با تأمین الزامات و محدودیت‌های لازم، عملکرد لرزه‌یی مناسب دارند، را اتصال‌های از پیش تأیید شده می‌نامند. با توجه به موارد ذکر شده، هر سه مشخصه‌ی مقاومت، صلبیت و شکل‌پذیری به صورت متعادل در اتصال تیر به ستون به کمک سپری وجود دارد و مطالعات انجام شده بیان‌گر شکل‌پذیری مناسب اتصال تیر به ستون توسط سپری است. همچنین آیین‌نامه‌ی AISC،^[۱۸] اتصال مذکور را در حالتی که از ورق جان برای انتقال برش استفاده شود، از پیش تأیید صلاحیت شده می‌داند. در نتیجه با توجه به موارد ذکر شده، تصمیم‌گیری در رابطه با قرار گرفتن یا قرار نگرفتن اتصال با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان در گروه اتصال‌های از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،^[۲] نیاز به بررسی بیشتری دارد.

به همین دلیل در پژوهش حاضر، ابتدا در نرم‌افزار آباکوس^۹، مدل اجزاء محدود شبیه‌سازی و در برابر نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. سپس با استفاده از مفاهیم آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ بخش ۸-۱،^[۱۳] روش اجزاء تشکیل‌دهنده برای اتصال پیشنهادی مطابق با شکل ۲ پیاده‌سازی و با چند مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی صحت‌سنجی صورت گرفته و در انتها، با توسعه‌ی نرم‌افزار در محیط اکسل به طراحی ۱۱۱۵ اتصال با مقطع سپری و نبشی جان پرداخته شده است، تا تمام حالت‌های ممکن را پوشش دهد. سپس به کمک روش اجزاء تشکیل‌دهنده، پارامترهای: سختی، لنگر تسلیم و دوران تسلیم اتصال استخراج و میزان صلبیت و شکل‌پذیری اتصال مذکور بررسی شده است، تا شناخت بهتری از آن حاصل شود. در انتها، از طریق روش یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های به دست آمده، یک فرمول ساده برای محاسبه‌ی سختی ارائه و نیز اتصال از نظر صلبیت طبقه‌بندی شده است. در شکل ۳ روند انجام پژوهش در قالب یک فلوچارت مشاهده می‌شود.

و خرابی شامل ترکیبی از تسلیم ورق و گسیختگی پیچ‌هاست. در مکانیزم ۳، مقاومت ورق بیشتر از پیچ‌هاست و در نتیجه، فقط پیچ‌ها دچار گسیختگی می‌شوند.^[۷] تفاوت اصلی اتصال اخیر در مقایسه با اتصال‌های تیر به ستون به کمک ورق‌های بال، کمتر بودن مقاومت و سختی فخرهای معرف رفتار بال سپری در اتصال است و در نتیجه، صلبیت کمتری نسبت به سایر اتصال‌ها دارد. سختی فخرهایی که معرف میزان صلبیت اتصال هستند، به ضخامت سپری، موقعیت، اندازه و جنس پیچ‌های استفاده شده در اتصال سپری به ستون وابستگی شدیدی دارند.^[۹-۸،۳] مطالعات زیادی در خصوص بررسی تأثیر پارامترهای سپری در سختی اتصال در گذشته انجام شده است، که می‌توان به مطالعات فرناندز^۴ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۰] بر روی شکل‌پذیری مؤلفه‌های کششی اتصال اشاره کرد، که در آن، یک مدل برای پیش‌بینی پارامترهای کلیدی پاسخ نیرو - تغییر شکل سپری ارائه شده است.

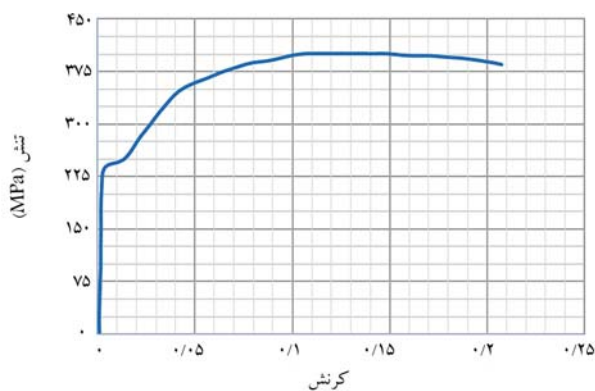
کنگ و کیم^۵ (۲۰۱۸)،^[۱۱] با هدف پیش‌بینی سختی اولیه و لنگر نهایی اتصال با سپری، چندین شبیه‌سازی اجزاء محدود انجام دادند و یک مدل برای تعیین سختی اولیه و انواع مکانیزم‌های خرابی برای سپری تعیین کردند. اخیراً مطالعه‌ی بر روی تأثیر افزودن سخت‌کننده به بال سپری در میزان سختی اتصال انجام شده است، که نتایج آن نشان می‌دهد افزودن سخت‌کننده می‌تواند بین ۷ تا ۸ درصد، سختی اولیه‌ی اتصال را افزایش دهد.^[۱۲]

رفتار یک سازه‌ی فولادی به طور قابل توجهی تحت تأثیر اتصال‌ها بین اعضاء فولادی است. به همین دلیل در آیین‌نامه‌ی اروپا، شماره‌ی ۳، بخش ۸-۱،^[۱۳] توجه ویژه‌ی به پیش‌بینی رفتار دورانی اتصال صورت گرفته و روش اجزاء تشکیل‌دهنده^۶ را ارائه داده است. روش اخیر، مبتنی بر جداسازی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی اتصال به مجموعه‌ی از فخرها و اجزاء صلب است. در آیین‌نامه‌ی اشاره شده، فرمول‌هایی برای بررسی رفتار سپری با دو پیچ در هر ردیف ارائه شده است، اما برای سپری با ۴ پیچ در هر ردیف، مطالعات محدودی انجام شده است. به همین دلیل ماسیمو^۷ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۶] با مدل‌سازی اجزاء محدود به بررسی الگوی خط تسلیم مطابق با مکانیزم‌های تخریب متفاوت پرداخته و طول مؤثر سپری را با استفاده از یک رویکرد انرژی ارزیابی کرده‌اند.

یکی از مشکلات اتصال اخیر این است که اغلب پروفیل‌های نورد شده برای ساخت سپری برای استفاده در تیرهای عمیق مناسب نیستند. به همین دلیل مطالعه‌ی برای بررسی عملکرد اتصال مذکور توسط مقاطع سپری ساخته شده، برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط انجام شده و نتایج نشان داده است که مقاطع ذکر شده برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط مناسب هستند.^[۱۴-۱۶]

جدول ۱. جزئیات قطعات مدل شده. [۴]

قطعه	مشخصات (mm)	
ستون	عرض	۳۰۰
	ضخامت	۳۶
	عرض	۶۲۸
	ضخامت	۲۴
تیر	طول	۱۰۶۰
	عرض	۲۰۰
	ضخامت	۱۶
	عرض	۳۱۸
سپری	ضخامت	۱۰
	طول	۱۳۵۱
	طول	۲۷۰
	عرض	۲۰۰
پیچ	ضخامت	۲۹
	طول	۳۰۰
	عرض	۲۰۰
	ضخامت	۲۰
M۲۲	قطر پیچ [۱۹]	۲۲
	قطر سرپیچ [۱۹]	۳۸
	ضخامت سرپیچ [۱۹]	۱۴
	طول مغزی پیچ	۳۶
M۲۷	قطر پیچ [۱۹]	۲۷
	قطر سرپیچ [۱۹]	۴۹
	ضخامت سرپیچ [۱۹]	۱۷
	طول مغزی پیچ	۶۵



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش فولاد Q235B.

ستون در نظر گرفته شده‌اند. تماس قائم از نوع تماس سخت^{۱۰} و تماس مماسی از نوع پتالتی^{۱۱} با ضریب اصطکاک ۰/۳۵ و با لغزش محدود^{۱۲} در نظر گرفته شده است.

روش حل از نوع تحلیل استاتیکی بوده و برای جلوگیری از بروز مشکلات برهم‌کنش سطوح تماس در تحلیل اتصال، فرایند تحلیل به ۵ مرحله تقسیم شده است:

در مرحله اول، جابه‌جایی سپری‌های بالا و پایین به طور موقت محدود و یک بار محوری خیلی کوچک به تمام پیچ‌ها اعمال می‌شود تا تمام قطعات در تماس با



شکل ۳. فلوچارت روند انجام پژوهش.

۲. مدل سازی اجزاء محدود

برای محاسبه‌ی دقیق سختی و پیشینه‌ی ظرفیت لنگر اتصال با استفاده از مقاطع سپری و نبشی جان، تحلیل غیرخطی سه‌بعدی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام و دقت مدل با مقایسه‌ی خروجی مدل اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی، که توسط هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۴] صورت گرفته بود (نمونه‌ی T-۰ با سوراخ استاندارد)، بررسی شده است.

۱.۲. هندسه‌ی مدل

قسمت‌های مدل شده، شامل: ستون، ورق پیوستگی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر، تیر، سخت‌کننده با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، مهار جانبی در محل اعمال بار به تیر برای جلوگیری از کماتش پیش‌شی - جانبی، سپری و پیچ‌ها با دو قطر متفاوت است. جزئیات هندسه‌ی مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. مشخصات مصالح مدل

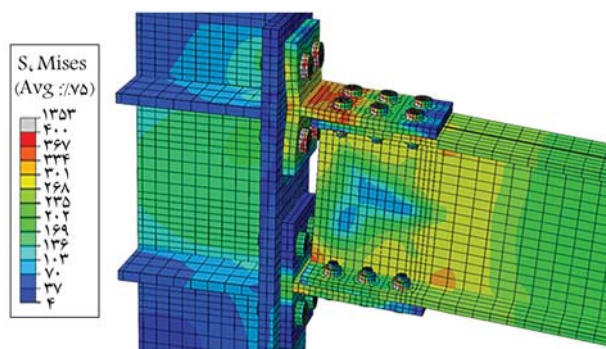
ستون، ورق پیوستگی، سپری، تیر و سخت‌کننده‌ی آن از فولاد با رده‌ی Q235B بودند و از پیچ‌های پر مقاومت کلاس ۱۰/۹ استفاده شده است. مقادیر دقیق تنش تسلیم، تنش کششی نهایی، درصد افزایش طول در لحظه‌ی گسیختگی (A) و نسبت پواسون (ν) مصالح از آزمایش کشش کوپن به دست آمده است، که در جدول ۲ ارائه شده و نمودار تنش - کرنش فولاد Q235B مطابق با شکل ۴ است.

۳.۲. شرایط مرزی و بارگذاری

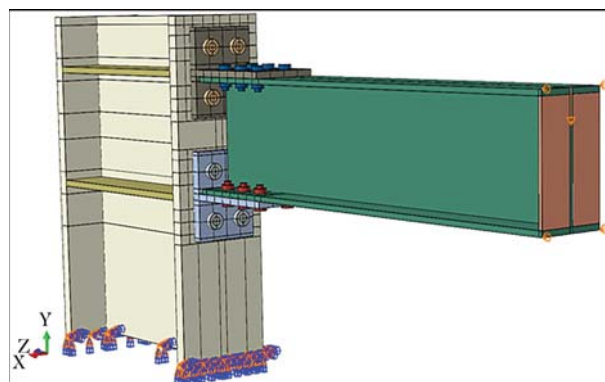
پای ستون به صورت کاملاً گیردار بوده و تمام درجه‌های آزادی انتقالی و دورانی آن بسته شده و انتهای دیگر آن کاملاً آزاد بوده است. برای جلوگیری از کماتش پیش‌شی - جانبی اتصال، مطابق با تنظیم‌های آزمایشگاهی در انتهای آزاد تیر از تغییر شکل جانبی تیر جلوگیری به عمل آمده و بارگذاری به صورت تغییر شکل کنترل به انتهای تیر اعمال شده است (شکل ۵). تمام حالت‌های تماس، شامل: مغزی پیچ با دیواره‌ی سوراخ پیچ، سر پیچ با تیر، ستون و سپری، جان سپری با بال تیر و بال سپری با بال

جدول ۲. مشخصات مصالح فولاد سازه‌یی. [۴]

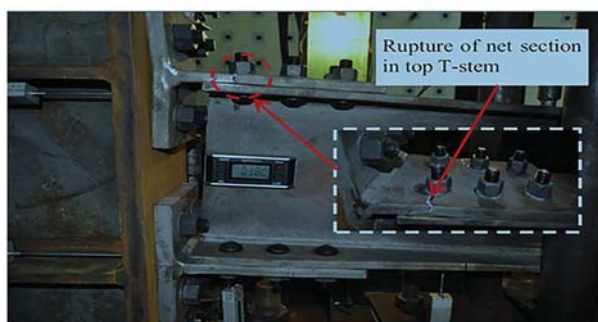
قطعه	Fy(MPa)	Fu(MPa)	A(%)	E(MPa)	ν
ستون	۲۴۰	۴۰۰	-	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳
جان تیر	۲۷۲/۶۴	۳۹۸/۱۴	۲۱/۵	۱۷۸/۰۰۰	۰/۳
بال تیر	۲۳۷/۳۱	۴۰۰/۷۲	۲۱/۴	۲۰۰/۰۰۰	۰/۲۷
جان سپری	۲۳۷/۲۲	۴۰۰/۵۹	۲۱/۲	۱۹۹/۰۰۰	۰/۲۸
بال سپری	۲۳۶/۵۲	۴۰۹/۹۵	۲۵/۱	۲۱۵/۰۰۰	۰/۲۹
M۲۲	۱۰۱۰	۱۱۲۲	۱۱/۸	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳
M۲۷	۱۰۱۲	۱۱۲۴	۱۲/۴	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳



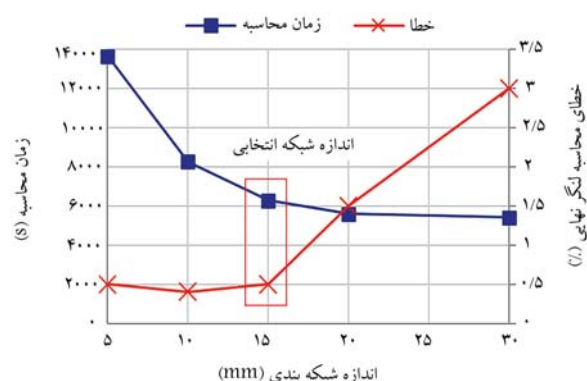
الف) توزیع تنش مدل المان محدود اتصال صحت سنجی؛



شکل ۵. جزئیات شرایط مرزی و بارگذاری اتصال در مدل اجزاء محدود.



ب) حالت گسیختگی در مدل آزمایشگاهی اتصال صحت سنجی. [۳۲]



شکل ۶. نتایج تحلیل حساسیت شبکه بندی سپری.

شکل ۷. توزیع تنش و حالت گسیختگی در مدل‌های اجزاء محدود و آزمایشگاهی.

شده است، که در آن، زمان محاسبه و میزان خطا مقدار مناسبی داشته است. همچنین برای پیچ‌ها از ابعاد شبکه‌ی ۵ میلی‌متر و برای تیر و ستون از ابعاد شبکه‌ی ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است.

۵.۲. نتایج اجزاء محدود

پس از تحلیل اتصال در نرم‌افزار برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و تحلیل، لازم است نتایج اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و میزان خطا کنترل شود. مقایسه‌ی توزیع تنش و حالت گسیختگی اتصال مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در هر دو مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی، حالت شکست اتصال، گسیختگی سطح مقطع خالص جان سپری بوده است. بال سپری و پیچ‌های آن تحت نیروی اهرمی شدیدی قرار گرفته و تغییر شکل زیادی را تجربه کرده‌اند.

برای محاسبه‌ی مقادیر لنگر و دوران اتصال با استفاده از مدل اجزاء محدود،

یکدیگر قرار بگیرند. در مرحله‌های دوم و سوم، به ترتیب محدودیت موقتی جابه‌جایی سپری‌های بالا و پایین برداشته می‌شود. در مرحله‌ی چهارم، نیروی پیش‌تنیدگی تا مقدار مورد نظر به پیچ‌ها اعمال می‌شود؛ و در مرحله‌ی پنجم، با حفظ نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها، بارگذاری تا لحظه‌ی رسیدن به جابه‌جایی مورد نظر در انتهای تیر ادامه می‌یابد.

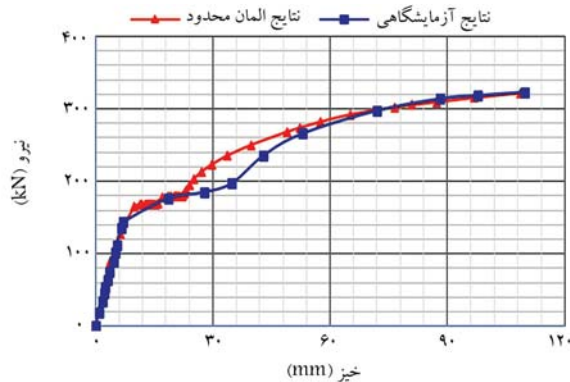
۴.۲. شبکه بندی مدل

برای مدل‌سازی تمام قطعات از اجزاء هشت‌گه‌ری مکعبی سه‌بعدی استفاده شده است. برای (C3D۸R) انتخاب اندازه‌ی مناسب شبکه بندی قطعات اتصال، به تحلیل حساسیت نیاز است، که در شکل ۶ برای سپری، که مهم‌ترین قطعه است، نتایج آن ارائه شده است.

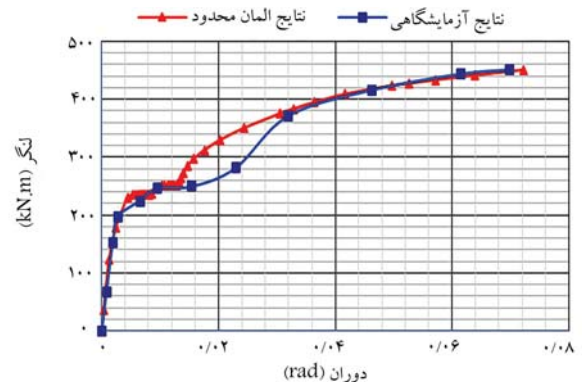
در نتیجه با توجه به شکل ۶، برای سپری از ابعاد شبکه‌ی ۱۵ میلی‌متر استفاده

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود.

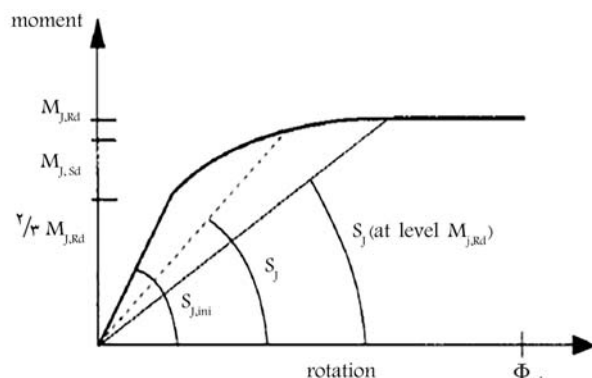
نمونه	P_u (kN)	Δ_u (mm)	M_u (kN.m)	φ_u (rad)	$k_{j,s}$ (kN.m/rad)
آزمایشگاهی	۳۲۲	۱۰۹/۴	۴۵۰/۸	۰/۰۷	۸۲/۳۷۳
اجزاء محدود	۳۲۲/۷	۱۰۸/۲	۴۵۱/۸	۰/۰۷۲	۸۰/۰۰۰
درصد خطا	۰/۲	۱/۱	۰/۲	۲/۸	۲/۹



شکل ۹. نمودار نیرو - تغییرشکل مدل‌های آزمایشگاهی [۴] و اجزاء محدود.



شکل ۸. نمودار لنگر - دوران مدل‌های آزمایشگاهی [۴] و اجزاء محدود.



شکل ۱۰. جزئیات منحنی لنگر - دوران در روش اجزاء تشکیل‌دهنده. [۱۳]

می‌شود. $M_{j,RD}$ لنگر تسلیم اتصال است، که از کمینه‌ی لنگر قابل تحمل توسط اجزاء به دست می‌آید $S_j, S_{j,ini}$ و ϕ_{ed} به ترتیب برابر با سختی اولیه، سختی سکانتی و بیشینه‌ی ظرفیت دورانی اتصال هستند.

در شکل ۱۱، هندسه و مدل مکانیکی اتصال در روش اجزاء تشکیل‌دهنده، نحوه‌ی قرارگیری فنرهای معرف هر جزء اتصال در مدل، نحوه‌ی دوران و بازوی لنگر اتصال مشاهده می‌شود.

۱.۳. سختی اجزاء اتصال

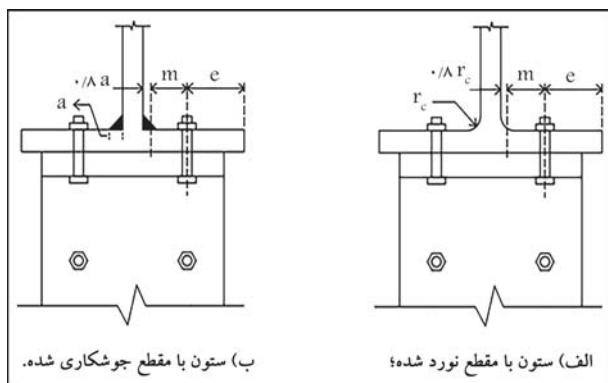
در جدول ۴، خلاصه‌ی اجزاء استفاده شده برای تعیین مقاومت و سختی اتصال پیچی با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان ارائه و نیز جزئیات محاسبه‌ی سختی هر یک از فنرهای K_1 الی K_{11} ارائه شده است (رابطه‌های ۴ الی ۱۲).

$$k_1 = \begin{cases} \frac{0.78 A_{vc}}{\beta Z_1} & \text{Unstiffened column} \\ \infty & \text{Stiffened column} \end{cases} \quad (4)$$

۳. روش اجزاء تشکیل‌دهنده

آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ بخش ۸-۱، [۱۳] روشی را با عنوان اجزاء تشکیل‌دهنده برای محاسبه‌ی مقاومت، سختی اولیه، سختی سکانتی و دوران اتصال ارائه داده است. بر اساس آیین‌نامه‌ی مذکور، روش ارائه شده زمانی خصوصیات اتصال را درست پیش‌بینی می‌کند که اتصال برای تشکیل مفصل خمیری در تیر طراحی شده باشد، ساز و کار مناسبی برای انتقال برش اتصال در نظر گرفته باشد و نیروی محوری اتصال کمتر از ۵٪ ظرفیت خمیری محوری تیر باشد.

جزئیات منحنی لنگر - دوران در روش اجزاء تشکیل‌دهنده در شکل ۱۰ مشاهده



شکل ۱۲. پارامترهای m و e.

$$k_r = \begin{cases} \frac{0.5 b_{eff,c,w,c} t_{wc}}{d_c} & \text{Unstiffened column} \\ \infty & \text{Stiffened column} \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{eff,c,w,c} = t_{wT} + 2\sqrt{a_p} + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (6)$$

$$s = \sqrt{a_c} \text{ or } r_c \quad (7)$$

که در آنها، $b_{eff,c,w,c}$ عرض مؤثر جان ستون در فشار، d_c عمق جان ستون، t_{wT} ضخامت جان سپری، a_p ضخامت گلوگاه مؤثر جوش اتصال سپری به بال آن، t_{fc} ضخامت بال ستون، s_p ضخامت مؤثر بال سپری، a_c ضخامت گلوگاه مؤثر جوش اتصال جان ستون به بال آن و r_c شعاع ماهیچه‌ی جان و بال ستون هستند.

$$k_r = \frac{0.5 b_{eff,t,w,c} t_{wc}}{d_c} \quad (8)$$

که در آن، $b_{eff,t,w,c}$ عرض مؤثر جان ستون در کشش است، که باید برابر با طول مؤثر سپری معادل بال ستون در خمش (l_{eff}) مطابق جدول ۶، در نظر گرفته شود. در صورت استفاده از ورق مضاعف، باید t_{wc} به $2t_{wc}$ تغییر یابد.

$$k_r = \frac{0.9 l_{eff} t_{fc}^2}{m^3} \quad (9)$$

که در آن، l_{eff} برابر با کمترین مقدار طول مؤثر به دست آمده (انفرادی، گروهی، دایروی، غیردایروی) از جدول ۶ است، که در آن، p فاصله‌ی افقی میان مرکز سطح دو ردیف پیچ است و مقادیر m و e از شکل ۱۲ و همچنین مقدار α از شکل ۱۳ قابل محاسبه هستند.

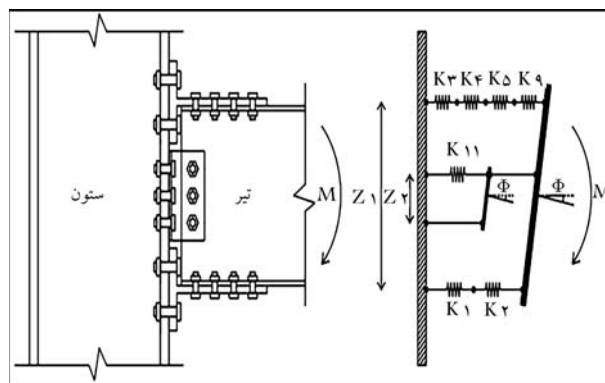
$$k_\delta = \frac{0.9 l_{eff} t_p^2}{b^3} \quad (10)$$

که در آن، پارامتر l_{eff} برابر با کمترین مقدار به دست آمده از الگوی دایروی و غیردایروی در جدول ۷ و t_p ضخامت بال سپری هستند. پارامترهای a ، b ، e ، w ، t_{fc} و b_{fcT} در جدول ۷ با استفاده از شکل ۱۴ قابل محاسبه هستند.

$$k_9 = \frac{1}{L_b} \frac{A_s}{6} \quad (11)$$

که در آن، A_s برابر با مجموع مساحت پیچ‌های اتصال بال سپری به ستون و L_b طول مغزی پیچ و نصف طول سرپیچ و مهره هستند:

$$k_{11} = \frac{0.9 l_{eff} t_a^2}{q^3} \quad (12)$$



شکل ۱۱. مدل مکانیکی اتصال در روش اجزاء تشکیل دهنده.

جدول ۴. اجزاء تشکیل دهنده‌ی اتصال.

فهر	اجزاء	
K_1	پنل جان ستون در برش	۱
K_2	جان ستون در فشار	۲
K_3	جان ستون در کشش	۳
K_4	بال ستون در خمش	۴
K_5	بال سپری در خمش	۵
∞	بال و جان تیر در فشار	۶
∞	جان سپری در کشش و فشار	۷
∞	پیچ‌های اتصال جان سپری به بال تیر در برش	۸
K_9	پیچ‌های بال سپری در کشش	۹
∞	لهیلگی و برش قالبی جان سپری و بال تیر	۱۰
K_{11}	نبشی جان در خمش	۱۱

جدول ۵. مقادیر تقریبی پارامتر β .

مقدار β	حالت	هندسه اتصال
$\beta \approx 1$	$M_{b1,Ed}$	
$\beta = 0$	$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	
$\beta \approx 1$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$	
$\beta \approx 2$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$	
$\beta \approx 2$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} = 0$	

که در آن، A_{vc} مساحت جان ستون در برش و پارامتر β ، بیان‌گر هندسه و نحوه‌ی بارگذاری اتصال است (جدول ۵). Z_1 بازوی لنگر اتصال است، که با استفاده از شکل ۱۱ قابل محاسبه است. در صورت استفاده از ورق مضاعف باید به A_{vc} مقدار $w_z t_{wc}$ افزوده شود، که در آن t_{wc} ضخامت جان ستون و w_z عرض ورق مضاعف هستند.

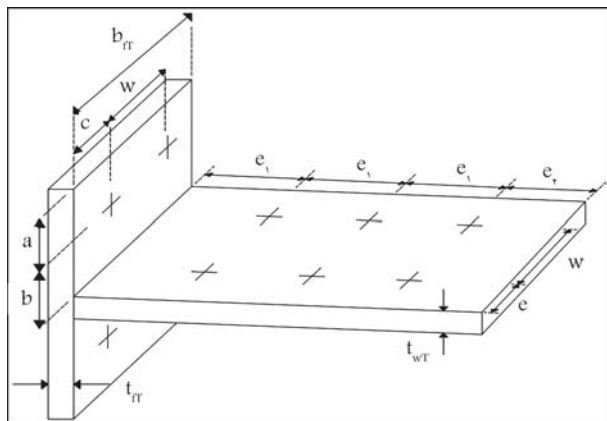
جدول ۶. طول مؤثر بال ستون در خمش.

طول مؤثر بال ستون در خمش برای ستون بدون سخت‌کننده			
ردیف‌های پیچ به صورت انفرادی		ردیف‌های پیچ به صورت گروهی	
الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$	الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$
کمترین مقدار:	کمترین مقدار:	کمترین مقدار:	کمترین مقدار:
$4\pi m$	$2(\pi m + p)$	$2(4m + 1/25e)$	$2(2m + 0/625e + 0/5p)$
$2(\pi m + 2e_1)$	$2(2e_1 + p)$	$2(2m + 0/625e + e_1)$	$2(e_1 + 0/5p)$

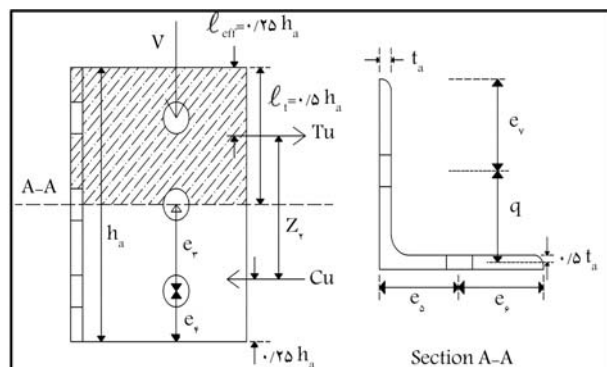
e_1 برابر با فاصله‌ی ردیف پیچ‌ها تا انتهای آزاد بال ستون در جهت محور طولی ستون است.
طول مؤثر بال ستون در خمش برای ستون با سخت‌کننده
ردیف‌های پیچ به صورت انفرادی

الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$
کمترین مقدار: $4\pi m$ و $2(\pi m + 2e_1)$	$2(e_1 + \alpha m - (2m + 0/625e))$

e_1 برابر با فاصله‌ی ردیف پیچ‌ها تا سخت‌کننده‌ی ستون در جهت محور طولی ستون است.



شکل ۱۴. جزئیات هندسه‌ی بال سپری.



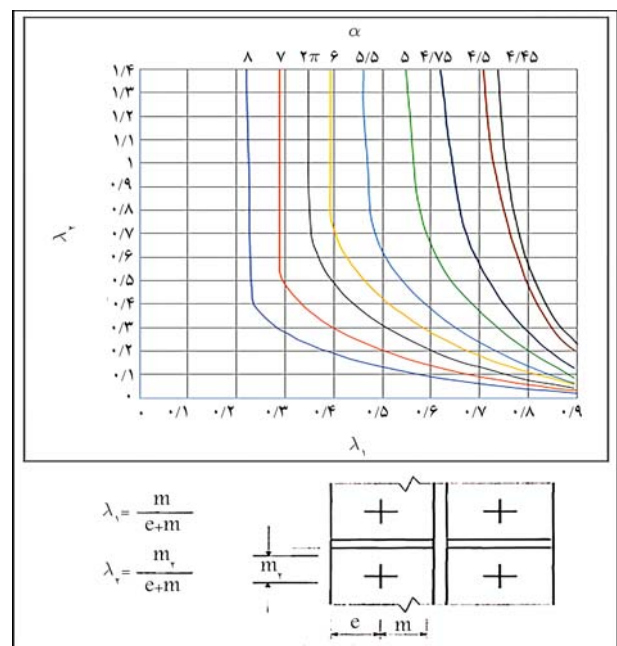
شکل ۱۵. جزئیات هندسه‌ی نبشی جان اتصال.

$$S_{j,ini} = \frac{E Z_1^*}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} + \frac{E Z_1^*}{k_1} \quad (13)$$

همچنین سختی متناظر اتصال در حالت تحلیل کشسان نیز با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود:

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\eta} \quad (14)$$

پارامتر η ضریب اصلاح سختی است، که برای اتصال مورد مطالعه، می‌توان مقدار η را ۲ در نظر گرفت.^[۱۳]



شکل ۱۳. پارامتر α برای ستون با سخت‌کننده.^[۱۴]

جدول ۷. طول مؤثر بال سپری.

الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$
کمترین مقدار:	کمترین مقدار:
$2\pi b$	$2(4b + 1/25a)$
$2(\pi b + w)$	$2(e + 2b + 0/625a) b_{fT}$
$2(\pi b + 2e)$	$2(0/5w + 2b + 0/625a)$
$l_{eff,1} = l_{eff,nc}, l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$	
$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	

که در آن، مقادیر q و l_{eff} (طول مؤثر نبشی در خمش) از شکل ۱۵ به دست می‌آیند:

پس از محاسبه‌ی سختی تمام اجزاء، سختی اولیه اتصال به صورت رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

۲.۳. مقاومت اجزاء

برای طراحی و محاسبه‌ی مقاومت تمام اجزاء اتصال به غیر از بال سپری می‌توان از روابط ارائه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،^[۱] استفاده کرد. برای محاسبه‌ی مقاومت بال سپری، ابتدا باید نیروی اهرمی^{۱۳} ایجاد شده در آن را محاسبه کرد. نیروی کششی وارد شده بر بال سپری باعث بیرون کشیده شدن بال سپری در محدوده‌ی بین پیچ‌های آن و نیز سبب جداشدگی بال سپری از بال ستون می‌شود. با جدا شدن قسمت میانی بال سپری، لبه‌های آن به طرف داخل تغییر شکل می‌دهند و مانند یک اهرم به بال ستون فشار وارد می‌کنند. به واکنش تکیه‌گاهی فشار تماسی مذکور، نیروی اهرمی Q گفته می‌شود (شکل ۱۶ - الف).

برای محاسبه‌ی نیروی اهرمی می‌توان از روش نایر - بیرکمو - مانس،^[۲] استفاده کرد. پژوهشگران مذکور برای تعیین نیروی اهرمی سپری با پیچ $A490$ ، رابطه‌ی ۱۵ را ارائه کرده‌اند:

$$Q = F \left[\frac{100bd_b^2 - 14b_w t_{FT}^2}{62ad_b^2 + 21b_w t_{FT}^2} \right] \quad (15)$$

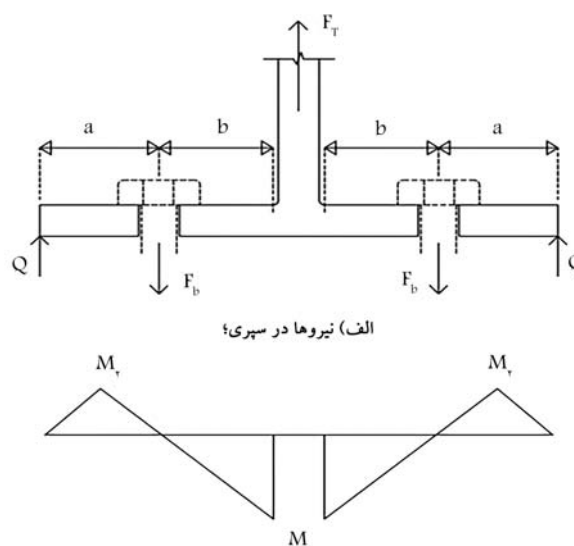
که در آن، F و b_w به ترتیب نیروی خارجی وارد بر هر پیچ و عرض باربر آن هستند. پس از محاسبه‌ی نیروی اهرمی، برای محاسبه‌ی مقادیر لنگر M_1 و M_2 در شکل ۱۶ - ب می‌توان از روابط ۱۶ و ۱۷ استفاده کرد:

$$M_1 = Fb' - Qa', \quad M_2 = Qa' \quad (16)$$

$$a' = a + \frac{d_b}{\gamma}, \quad b' = b - \frac{d_b}{\gamma} \quad (17)$$

بزرگ‌ترین مقدار M_1 و M_2 ملاک تعیین ضخامت بال سپری خواهد بود. زمانی طراحی بال سپری و پیچ‌های آن بهینه خواهد بود که دو مقدار M_1 و M_2 تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک باشند. در انتها لازم است که ظرفیت کششی پیچ‌های بال سپری برای مجموع نیروهای خارجی و اهرمی کنترل شود. رابطه‌ی ۱۸:

$$F + Q \leq \phi R_{nt} \quad (18)$$



شکل ۱۶. عمل اهرمی در بال سپری.

پس از محاسبه‌ی مقاومت تمام اجزاء، مقاومت اتصال با استفاده از رابطه‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$M_{j,Rd} = \min(R_{u,i}) \times Z \quad (19)$$

۳.۳. صحت‌سنجی روش اجزاء تشکیل‌دهنده

به منظور بررسی صحت روش استفاده شده، نتایج حاصل از روش اجزاء تشکیل‌دهنده با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۴] و دوان و جیانگ^{۱۴} (۲۰۰۵)،^[۲۱] مقایسه شده است. همچنین برای اطمینان بیشتر، پس از صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، نتایج دو مدل اجزاء محدود با روش اجزاء تشکیل‌دهنده مقایسه شده است. جزئیات هندسه‌ی مدل‌های اجزاء محدود در جدول ۸ ارائه شده است. پارامترهای ارائه نشده در جدول ۸ برابر با مدل آزمایشگاهی هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۴] در نظر گرفته شده است.

نتایج صحت‌سنجی روش اجزاء تشکیل‌دهنده در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۹ نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اجزاء تشکیل‌دهنده در پیش‌بینی سختی اتصال است. خطای بیشتر روش مذکور در محاسبه‌ی سختی برای نمونه‌های آزمایشگاهی می‌تواند به این دلیل باشد که هر دو نمونه از زبانه‌ی برشی برای انتقال برش تیر به ستون استفاده نشده و مشکلاتی مانند تأخیر برش باعث افزایش خطا شده است. با توجه به این‌که روش‌های مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی، برخلاف روش اجزاء تشکیل‌دهنده، زمان‌بر و نیازمند به صرف هزینه‌ی زیاد بوده است، روش ارائه شده با خطای قابل قبول می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای به دست آوردن مشخصات اتصال باشد.

۴. مطالعه‌ی پارامتریک با استفاده از روش یادگیری

ماشین (ML)^{۱۵}

پس از صحت‌سنجی روش ارائه شده، برای مطالعه‌ی پارامتریک روی اجزاء اتصال، به کمک برنامه‌نویسی در اکسل، ابتدا ۱۱۱۵ اتصال با تغییر در ابعاد تیر به صورت ظرفیتی طراحی شده است. در طراحی اخیر، ارتفاع تیر از ۳۵ تا ۶۵ سانتی‌متر، عرض بال تیر از ۱۲ تا ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت بال تیر از کمینه‌ی آیین‌نامه تا ۵/۰ سانتی‌متر بیشتر از آن متغیر بوده‌اند و ضخامت جان تیر برابر کمینه‌ی آیین‌نامه در نظر گرفته شده است. سپس با اعمال الگوریتم‌های یادگیری ماشین روی داده‌ها، سعی شده است برای پیش‌بینی سختی اولیه‌ی اتصال، یک فرمول ساده ارائه شود.

در پژوهش حاضر، از روش یادگیری نظارت شده و الگوریتم یادگیری رگرسیون خطی چندگانه استفاده شده و با استفاده از روش معادلات نرمال پارامترهای مدل سختی به دست آمده است، که در ادامه، به صورت مختصر به آن اشاره شده است.

$$x = \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \quad (20)$$

جدول ۸. جزئیات هندسه‌ی مدل اجزاء محدود.

قطعه		مدل ۱ (mm)	مدل ۲ (mm)
ستون (با سخت‌کننده)		$H700 \times 300 \times 24 \times 36$	$H700 \times 300 \times 24 \times 36$
تیر	مدل	$H450 \times 200 \times 10 \times 11$	$H500 \times 200 \times 11 \times 13$
	طول	۱۹۴۷	۱۹۴۳
l_{load}		۲۰۰۰	
b_{fT}		۲۰۰	
w		۱۰۰	
e		۵۰	
a		۵۲	
b		۵۲	
سپری (شکل ۱۴)	e_1	۷۰	۷۵
	e_2	۵۰	۵۵
	t_{wT}	۲۰	۲۶
	t_{fT}	۳۳	۳۷
	پیچ بال سپری	۲۷M	۲۷M
پیچ جال سپری		$8 \times M22$	$8 \times M24$
	مدل	$2L150 \times 100 \times 10$	
نیشی (شکل ۱۵)	h_a	۱۹۰	۲۳۰
	q	۴۵	
	e_2	۶۰	۷۰
	e_2	۳۵	۴۰
	e_5	۹۰	۹۷
	e_6	۶۰	۵۳
	e_7	۵۰	
	پیچ	۲۰M	۲۲M

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود با روش اجزاء تشکیل‌دهنده.

سختی سکانتی (kN.m/rad)			
مدل	آزمایشگاهی و اجزاء محدود	اجزاء تشکیل‌دهنده	خطا %
هوانگ و همکاران ^[۴]	۸۲/۳۷۳	۷۲/۸۶۸	۱۱/۵
دوان و همکاران ^[۲۱]	۶۸۴۸	۷۵۲۷	۹/۹
مدل ۱	۱۴۴/۰۰۰	۱۴۶/۵۶۶	۱/۸
مدل ۲	۱۹۰/۰۰۰	۱۹۲/۹۳۱	۱/۵

$$X\theta = y \rightarrow X^T X\theta = X^T y \rightarrow$$

$$(X^T X)^{-1}(X^T X)\theta = (X^T X)^{-1}X^T y \rightarrow \theta = (X^T X)^{-1}X^T y \quad (23)$$

که در رابطه‌ی ۲۰، X ماتریس متغیرهای مستقل است، که در آن n بیان‌گر تعداد متغیرهای مستقل و m بیان‌گر تعداد نمونه‌های آموزش است. در رابطه‌ی ۲۱، θ ماتریس پارامترهای مدل سختی است، که از یادگیری ماشین به دست می‌آید. در رابطه‌ی ۲۲، y ماتریس متغیرهای وابسته است و با استفاده از رابطه‌ی ۲۳ می‌توان پارامترهای مدل سختی را به دست آورد.

برای کاهش خطا و آموزش بهتر مدل، لازم است با استفاده از رابطه‌ی ۲۴ بر روی داده‌ها نرمال‌سازی انجام شود تا متغیرهای ورودی بی‌مقیاس شوند و در دامنه‌ی کوتاه‌تری (۰ تا ۱) قرار بگیرند.

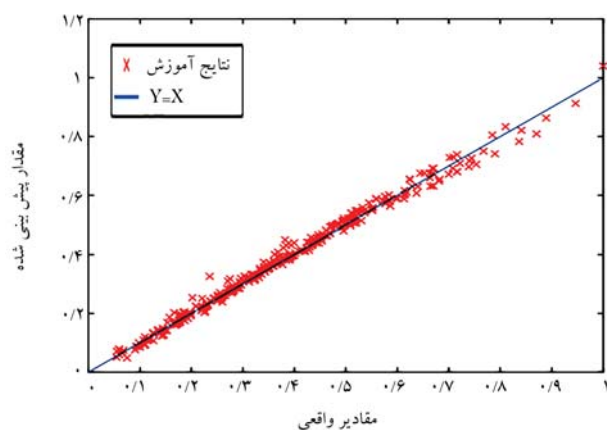
$$z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (24)$$

برای ارزیابی عملکرد رگرسیون خطی و محاسبه‌ی خطای آموزش می‌توان از دو روش ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) ^{۱۶} و R^2 استفاده کرد (رابطه‌های ۲۵ و ۲۶):

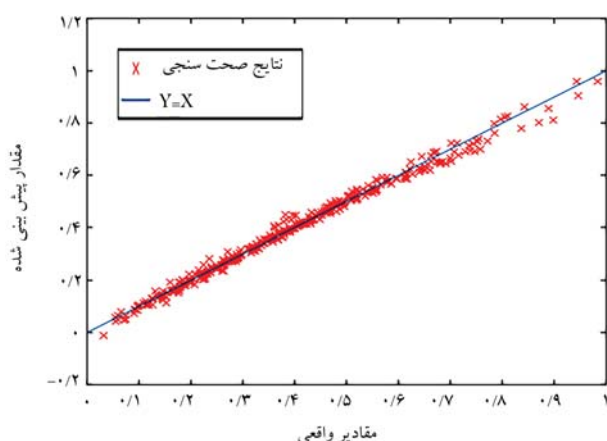
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y^i - h(x^i))^2} \quad (25)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$y = \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^n \end{bmatrix} \quad (22)$$



شکل ۱۷. دیاگرام پراکنش نمونه‌های آموزش.



شکل ۱۸. دیاگرام پراکنش نمونه‌های صحت‌سنجی.

آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. تجمع نتایج در نزدیکی خط با زاویه‌ی ۴۵ درجه ($y=x$)، نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب یادگیری ماشین است. با توجه به رابطه‌ی ۲۸ با مقایسه‌ی ضرایب پارامترهای مستقل، ارتفاع تیر و قطر پیچ اتصال بال سپری به بال ستون، بیشترین تأثیر مثبت را در میزان سختی اتصال دارند. همچنین فاصله‌ی افقی مرکز سطح پیچ بال سپری تا جان ستون و فاصله‌ی قائم مرکز سطح پیچ بال سپری تا جان سپری بیشترین تأثیر منفی را در سختی اتصال دارند. به همین صورت می‌توان تأثیر بقیه‌ی متغیرهای ورودی را بررسی کرد. لازم به ذکر است که رابطه‌ی ۲۷ را همانند روش اجزاء تشکیل‌دهنده، فقط می‌توان برای به دست آوردن سختی اتصال، که برای تشکیل مفصل خمیری در تیر طراحی شده است و از نبشی برای انتقال برش جان تیر بهره می‌برد، استفاده کرد.

۵. طبقه‌بندی اتصال از نظر صلبیت

آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳، ۱۳^[۱۳] کمیت بدون بُعد k_b را برای طبقه‌بندی اتصال پیشنهاد کرده است، که به صورت رابطه‌ی ۲۹ تعیین می‌شود:

$$k_b = \frac{S_{j,ini}}{EI_b / L_b} \quad (29)$$

جدول ۱۰. جزئیات محاسبه‌ی پارامترهای رابطه‌ی ۲۷.

$z_1 = \frac{h_b^2 - 1225}{3000}$	ارتفاع تیر
$z_2 = \frac{h_c - 30}{30}$	ارتفاع ستون
$z_3 = \frac{b_{fc} - 22}{18}$	عرض بال ستون
$z_4 = \frac{t_{fc} - 1/6}{0.8}$	ضخامت بال ستون
$z_5 = \frac{t_{wc} - 0.5/7}{0.7}$	ضخامت جان ستون
$z_6 = \frac{t_s}{1/4}$	ضخامت ورق مضاعف
$z_7 = \frac{m - 3/5}{1/8}$	فاصله‌ی افقی مرکز پیچ تاجان ستون
$z_8 = \frac{b_{fT} - 17}{18}$	عرض بال سپری
$z_9 = \frac{t_{fT} - 2/2}{1/8}$	ضخامت بال سپری
$z_{10} = \frac{a - 4/6}{1/9}$	فاصله‌ی قائم مرکز پیچ تا لبه‌ی بال سپری
$z_{11} = \frac{b - 3/5}{1/7}$	فاصله‌ی مرکز پیچ تا جان سپری
$z_{12} = d_b - 2$	قطر پیچ‌های اتصال بال سپری به بال ستون
$z_{13} = \frac{w - 7/8}{6/9}$	فاصله‌ی افقی مرکز تا مرکز پیچ‌های بال سپری
$z_{14} = \frac{q - 3/2}{1/1}$	فاصله‌ی پیچ نبشی تا بر ساق آن + نصف ضخامت نبشی

جدول ۱۱. نتایج عملکرد رگرسیون خطی.

مقدار	پارامترهای ارزیابی ML
۰/۰۱۵	آموزش RMSE
۰/۰۱۸	صحت‌سنجی RMSE
۰/۹۹۳	آموزش R^2
۰/۹۹۰	صحت‌سنجی R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y^i - h(x^i))^2}{\sum_{i=1}^m (y^i - \bar{h}(x^i))^2} \quad (26)$$

که در رابطه‌ی ۲۵، تابع $h(x^i)$ بیان‌گر مقدار خروجی تابع حاصل از یادگیری ماشین به ازاء نمونه‌ی i است. در رابطه‌ی ۲۶، هر چه مقدار R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر خطای کمتر آموزش است. به منظور بررسی میزان تعمیم‌پذیری مدل ارائه شده و صحت‌سنجی آن، با استفاده از ۶۰٪ نمونه‌ها، آموزش صورت گرفته و سپس با استفاده از بقیه‌ی نمونه‌ها، صحت‌سنجی انجام شده است. مدل به دست آمده از یادگیری ماشین برای محاسبه‌ی سختی اتصال در رابطه‌ی ۲۷ ارائه شده است:

$$S_{j,ini} (kg \cdot \frac{cm}{rad}) = 5/54 \times 10^9 Z_j + 12/01 \times 10^8 \quad (27)$$

نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای z_1 تا z_{14} در رابطه‌ی ۲۸ در جدول ۱۰ ارائه شده است (واحد تمام پارامترها سانتی‌متر است).

$$\begin{aligned} Z_j = & -0/083 + 0/9 z_1 - 0/221 z_2 - 0/033 z_3 + \\ & 0/391 z_4 + 0/109 z_5 + 0/292 z_6 - 0/573 z_7 - \\ & 0/033 z_8 + 0/137 z_9 + 0/088 z_{10} - 0/312 z_{11} + \\ & 0/776 z_{12} - 0/161 z_{13} - 0/034 z_{14} \end{aligned} \quad (28)$$

نتایج عملکرد رگرسیون خطی و خطای آموزش با دو روش RMSE و R^2 در جدول ۱۱ برای نمونه‌های آموزش و صحت‌سنجی ارائه شده است، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار خوب یادگیری ماشین است. همچنین نمودار پراکنش برای نمونه‌های

جدول ۱۲. نتایج طبقه‌بندی اتصال بر حسب صلبیت.

طول تیر اتصال $L_b (cm)$	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰
کمینه‌ی مقدار k_b	۳۶	۲۳	۱۹
میانگین k_b	۳۷/۱	۳۱/۸	۲۶/۵
درصد اتصال صلب	٪۱۰۰	٪۹۷	٪۶۱
درصد اتصال نیمه‌صلب	٪۰	٪۳	٪۳۹
درصد اتصال ساده	٪۰	٪۰	٪۰

۶. نتیجه‌گیری

است و قابلیت استفاده در قاب خمشی متوسط (IMF) ^{۱۷} و قاب خمشی ویژه (SMF) ^{۱۸} را دارد.

به نظر می‌رسد اتصال پیشنهادی با انجام مطالعات آزمایشگاهی روی آن، این پتانسیل را داشته باشد که به عنوان اولین اتصال از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی کاملاً پیچ و مهره‌ی (بدون جوش)، برای اتصال تیر به ستون در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان پیشنهاد شود.

در پژوهش حاضر، یک نوع اتصال کاملاً پیچی گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع سپری‌شکل و نبشی جان بررسی شده است. ابتدا به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود و روش اجزاء تشکیل‌دهنده سعی شد تا سختی اولیه و لنگر تسلیم اتصال بررسی شود. سپس به کمک روش یادگیری ماشین، یک فرمول ساده برای برآورد سختی اتصال مذکور ارائه و در انتها، میزان صلبیت آن بررسی شده است. با توجه به کارهای انجام شده، این نتایج به دست آمده است:

- با استفاده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی ارائه شده، سختی اتصال محاسبه و با مقایسه‌ی روش مذکور با چند مدل آزمایشگاهی و اجزاء محدود صحت‌سنجی شده است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اجزاء تشکیل‌دهنده در پیش‌بینی سختی اتصال است. با توجه به این‌که روش مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی زمان‌بر و نیازمند به صرف هزینه‌ی زیاد هستند، روش ارائه شده با خطای قابل قبول می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای به دست آوردن مشخصات اتصال باشد.
- با توجه به مدل اجزاء محدود، در اتصال مورد نظر، بال سپری و پیچ‌های آن تحت نیروی اهرمی شدیدی قرار می‌گیرند و تغییرشکل در بال سپری و کشیدگی در پیچ‌های آن قابل توجه است.
- با اعمال الگوریتم یادگیری ماشین روی داده‌ها، یک فرمول ساده برای محاسبه‌ی سختی اتصال به دست آمد. خطای آموزش با استفاده از دو روش RMSE و R^2 برای نمونه‌های آموزش و صحت‌سنجی محاسبه شد، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار خوب فرمول ارائه شده در پیش‌بینی سختی اتصال است.
- با توجه به سختی اولیه‌ی به دست آمده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده، اتصال مورد نظر بر اساس صلبیت آن دسته‌بندی شد، که با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد اتصال به صورت صلب است و قابلیت استفاده در قاب خمشی متوسط (IMF) و قاب خمشی ویژه (SMF) را دارد.

که در آن، E مدول کشسانی فولاد تیر اتصال و I_b و L_b به ترتیب ممان اینرسی و طول تیر هستند. EI_b/L_b ضریب صلبیت تیر متصل به اتصال است. $S_{j,ini}$ سختی اولیه‌ی اتصال است، که از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید.

آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳،^[۱۳] برای قاب‌هایی با حرکت جانبی (مهار نشده)، در صورتی که مقدار k_b بزرگ‌تر از ۲۵ باشد، اتصال را صلب فرض می‌کند و در صورتی که مقدار k_b کوچک‌تر یا مساوی ۵/۰ باشد، در گروه اتصال‌های ساده (مفصلی) قرار می‌دهد. چنانچه مقدار k_b برای اتصالی در یک قاب مهار نشده‌ی عددی بین ۲۵ و ۵/۰ باشد، در گروه اتصال نیمه‌صلب قرار می‌گیرد. برای اتصال‌ها، قاب‌هایی با حرکت جانبی مقید (مهار شده)، در صورتی که k_b بزرگ‌تر یا مساوی ۸ باشد، در گروه اتصال‌های صلب قرار می‌گیرد.

با توجه به مفاهیم ارائه شده و با استفاده از سختی اتصال به دست آمده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده برای ۱۱۱۵ اتصال طراحی شده، در این‌جا به طبقه‌بندی اتصال از نظر صلبیت پرداخته شده است. نتایج طبقه‌بندی صلبیت اتصال برای قاب‌های مهار نشده با سه طول تیر متفاوت در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج طبقه‌بندی نشان می‌دهد که اتصال اخیر برای طول تیر اتصال بزرگ‌تر یا مساوی ۶ متر به صورت صلب عمل می‌کند. بالای ۶۰٪ از اتصال‌های طراحی شده، برای طول تیر ۵ متر عملکرد صلب داشته‌اند. هر چند که با توجه به مقدار کمینه و میانگین به دست آمده برای مقدار k_b ، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال‌های قرار گرفته در گروه نیمه‌صلب برای تیر با طول ۵ متر نیز عملکردی بسیار نزدیک به اتصال صلب دارند و می‌توان از خطای آن صرف‌نظر کرد.

با توجه به این‌که تمام اتصال‌ها به صورت ظرفیتی طراحی و سپس با روش‌های ارائه شده، سختی آنها محاسبه و کنترل شده است؛ لذا با توجه به نتایج طبقه‌بندی اتصال در بخش حاضر، اتصال به صورت هم‌زمان دارای صلبیت و مقاومت کامل

پانویس‌ها

1. Northridge
2. Huang
3. Weng
4. Fernandez
5. Kong & Kim

6. component method for steel joint
7. Massimo
8. Hantouche & Abboud
9. Abaqus
10. hard contact
11. penalty
12. finite sliding
13. prying force

14. Jiang
15. machine learning
16. root mean square error
17. intermediate moment frame
18. special moment frames

منابع (References)

1. Earthquake Engineering Research Center, "SAC phase 1 analytical studies of building performance [interne]", *SAC Steel Project* (2004).
2. Office of National Building Regulations of Iran, "Topic 10 design and execution of steel buildings", 4th edition, Iran Development Publishing, p.316 (in Persian) (2013).
3. Azhari, M. and Mirghaderi, R. "Design of steel structures by LRFD and ASD method", 1st ed., *Arkan danesh*, p. 878 (in persian) (2014).
4. Huang, J., Wang, J., Chen, W. and et al. "Cyclic performance of double tee connections with short slotted holes", *J. Constr. Steel Res.*, **145**, pp. 254-265 (2018).
5. Wang, M., Dong, K. and Liu, M. "Damage control mechanism and seismic performance of a steel moment connection with replaceable low-yield-point steel double T-stub fuses", *Thin-Walled Struct.*, **157**, pp.107143 (Dec 2020).
6. Massimo, L., Gianvittorio, R., Aldina, S. and et al. "Experimental analysis and mechanical modeling of T-stubs with four bolts per row", *J. Constr. Steel Res.*, **101**, pp. 158-174 (2014).
7. Timmers, R. "Generalized method for identifying yield-line patterns in T-stubs using discontinuity layout optimization", *Eng. Struct.*, **244**, pp.112802 (2021).
8. Pachideh, G., Kafi, M. and Gholhaki, M. "Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater", *Structures*, **28**, pp. 467-481 (Dec 2020).
9. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Kafi, M. "Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper", *Steel Compos Struct.*, **36**(2), pp. 197-211 (Jul 2020).
10. Fernandez-Cenicerros, J., Sanz-Garcia, A., Antoñanzas-Torres, F. and et al. "A numerical-informational approach for characterising the ductile behaviour of the T-stub component. Part 1: refined finite element model and test validation", *Eng. Struct.*, **82**, pp. 236-248 (2015).
11. Kong, Z. and Kim, S.E. "Numerical estimation for initial stiffness and ultimate moment of T-stub connections", *J. Constr. Steel Res.*, **141**, pp. 118-131 (2018).
12. Harsha, R.H. and Manasa, K.P. "Numerical study on double tee connections with rib stiffener and shear tab", *In proceedings of the International Conference on Systems, Energy & Environment (ICSEE), GCE Kannur, Kerala* (Aug 2019).
13. CEN. EN 1993-1-8, "Eurocode 3: design provisions of steel structures, part 1.8: design of joints", (2005).
14. Girão Coelho, A.M., Simões Da Silva, L. and Bijlaard, F.S.K. "Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted T-stub connections", *J. Struct. Eng.*, **132**(6), pp. 918-928 (2006).
15. Hantouche, E.G., Rassati, G.A., Kukreti, A.R. and et al. "Built-up T-stub connections for moment resisting frames: experimental and finite element investigation for prequalification", *Eng. Struct.*, **43**, pp. 139-148 (2012).
16. Yuan, H.X., Hu, S., Du, X.X. and et al. "Experimental behaviour of stainless steel bolted T-stub connections under monotonic loading", *J. Constr. Steel Res.*, **152**, pp. 213-224 (2019).
17. Hantouche, E.G. and Abboud, N.H. "Stiffness modeling of bolted thick built-up T-stub connections including secondary prying effect", *J. Constr. Steel Res.*, **95**, pp. 279-289 (2014).
18. ANSI/AISC-358-16, "Steelmoment frames for prequalified connections", 2016, *Ansi/Aisc*, pp. 358-416 (2018).
19. Ansi, B18.2.3.7M, "Metric heavy hex structural bolts", American National Standards Institute, Standards, American, *Society of Mechanical Engineers [ASME]*, **f**, pp. 9-16 (1979).
20. Girão Coelho, A.M. and Bijlaard, F.S.K. "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections", *J. Constr. Steel Res.*, **63**(9), pp. 1228-1240 (2007).
21. Duan, Q.C. and Jiang, C.R. "Research on the behavior of beam-to-column T-connections of steel frame", *Building Structure*, **35**, pp. 39-40 (In Chinese) (2005).

بررسی آزمایشگاهی جوش اکسی استیلن و قوس الکتریکی با الکترودهای: فولادی، برنجی و برنزی

بهمن شروانی تبار* (استادیار)

سعید انتقامی مایان (کارشناس ارشد)

ارژنگ صادقی (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۱۱۱-۱۱۹، (پژوهشی)

با پیشرفت صنعت جوشکاری و اهمیت جلوگیری از خوردگی فلز جوش در شرایط محیطی مختلف، بررسی کارایی روش های مختلف جوشکاری با انواع فلز پرکننده، امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. در پژوهش حاضر، به صورت آزمایشگاهی مقاومت و کیفیت جوشکاری با استفاده از سه الکتروده: برنجی، برنزی و فولادی با دو فرایند جوشکاری قوس الکتریکی و اکسی استیلن بررسی شده است. در این راستا، ابتدا به کمک آزمون کشش، مشخصات مصالح فلز پایه تعیین و پس از آن، با تهیه، ساخت و جوشکاری ۴۶ نمونه ی آزمایشگاهی، رفتار انواع جوش در سه حالت بارگذاری: کششی، برشی و خمشی بررسی شده است. بررسی نتایج آزمایش ها نشان داد که با تقریب قابل قبولی می توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکتروده فولادی را در تمام ضخامت ها، یکسان لحاظ کرد؛ همچنین می توان از تأثیر ضخامت در مقاومت کششی جوش صرف نظر کرد. این در حالی است که ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی استیلن دارد. نتایج آزمایش ها نیز نشان داد که جوشکاری با قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی در انواع نمونه ها، مقاومت های بهتری نسبت به سه نوع جوش دیگر دارد و بعد از آن، مقاومت جوشکاری با قوس الکتریکی با الکتروده فسفر برنز در رتبه ی دوم است.

واژگان کلیدی: جوش اکسی استیلن، جوش قوس الکتریکی، الکتروده برنزی، الکتروده برنجی، الکتروده فولادی.

۱. مقدمه

در منطقه ی تفتیده و تحت تأثیر حرارت HAZ^۱، ساختار اولیه ی فولاد تغییر پیدا می کند و متناسب با جنس فلز جوش و میزان واکنش پذیری آن با فلز پایه و سرعت سرد شدن آن، شکل پذیری و قابلیت ترک خوردگی جوش تحت تأثیر قرار می گیرد. میزان تغییرات خواص مکانیکی جوش و کیفیت واکنش جوش با فلز پایه به پارامترهای متعددی از شرایط جوشکاری، مانند: روش جوشکاری، دمای محیط، مدت زمان جوشکاری، سرعت سرد شدن و ضخامت قطعه و نوع درز جوش بستگی دارد. تعدد پارامترهای دخیل در بحث مقاومت جوش منجر شده است که یکی از متداول ترین مد خرابی در انواع مختلف سازه ها، خرابی جوش در ناحیه ی تفتیده ی اتصال باشد، که بیانگر اهمیت بررسی خواص جوش تحت بارگذاری های مختلف خواهد بود. در راستای بررسی خواص جوش، کارایی، سازگاری و مقاومت فرایندهای جوشکاری در انواع مصالح متداول بررسی شده است. با توجه به قابلیت زنگ زدن جوش در سازه های در معرض رطوبت،^{۱،۲} بررسی کارایی فرایندهای جوشکاری (جوشکاری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۵.

DOI:10.24200/J30.2022.59572.3061

b.shervani@azaruniv.ac.ir
Shahab.ss349@yahoo.com
a.sadeghi@azaruniv.ac.ir

قوس الکتریکی، جوش کاری زیر بودری، جوشکاری با گاز محافظ و جوشکاری با اکسی استیلن) با سیم جوش برنجی و برنزی، امری اجتناب ناپذیر است.^۳ فلز برنج، آلیاژ مس است که از مس و روی و گاهی اوقات از قلع و مقداری سرب تشکیل می شود. برنج را می توان با الکترودهای گرافیتی و الکتروده معمولی جوشکاری کرد. در جوشکاری با الکتروده گرافیتی از آلیاژ برنز یا از آلیاژی مشابه آلیاژ فلزی، که باید جوش داده شود، استفاده می شود. در جوشکاری برنج از جریان معکوس استفاده می شود و فاصله ی الکتروده تا قطعه ی کار باید حدود ۵ تا ۶ میلی متر باشد. هاگنس^۲ و همکاران (۲۰۰۲)،^۴ جوشکاری فلز برنج با جریان برق را بررسی کردند و دریافتند که برنج در مقابل زنگ زدن و پوسیدن مقاوم است؛ ولی چون فلز روی در دمایی نزدیک دمای ذوب برنج، تبخیر می شود، بخار شدن فلز روی و تولید گاز سمی در محیط کار به همراه تیره شدن محل جوشکاری به دلیل اکسید حاصل، جوشکاری فلز برنج با الکتروده فلزی با مشکل روبرو می شود. ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷)،^۵ در بررسی رفتار اتصال جوشی آلومینیوم به فولاد گالوانیزه دریافتند که با تغییر مقدار حرارت حوضچه ی مذاب، مقاومت جوش و ترکیب شیمیایی ناحیه ی جوش متفاوت خواهد شد.

لین^۴ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۶] نیز در بررسی تطابق روش جوشکاری قوسی با الکتروتد تنگستنی نتیجه گرفتند که در فرایند اخیر، مصالح فولادی بدون ذوب باقی می‌مانند و ذوب شدن مصالح آلومینیومی منجر به ایجاد پوششی بر روی فولاد می‌شود.

همچنین اورت^۵ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۷] در بررسی جوش کاری فلز مس، دریافتند که بهترین روش جوشکاری مس با جوش گاز اکسیژن و کاربید است، ولی می‌توان جوشکاری را با قوس الکتریکی نیز انجام داد. در روش اخیر، ورق‌های مس را مانند ورق‌های فولادی برای جوشکاری آماده می‌کنند، ولی چون قابلیت هدایت حرارت مس زیاد است، باید مقدار آمپر را اندکی بیشتر در نظر گرفت و بهتر است که همیشه با جریان مستقیم جوشکاری را انجام داد. زاویه‌ی الکتروتد نسبت به قطعه‌ی کار، مانند جوشکاری فولاد است و طول قوس باید حدود ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر باشد.

در همان سال، لیاثو^۶ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۸] نیز پس از بررسی جوشکاری آلیاژهای فولاد بیان کردند که برای مصارف در صنعت، فولاد را با مواردی، از قبیل: منگنز، نیکل، تنگستن و کرم ترکیب می‌کنند و می‌توان آنها را با قوس الکتریکی به هم جوش داد؛ ولی جوشکاری آنها به مراتب سخت‌تر از آهن است. زیرا در بعضی موارد، آلیاژ اصلی فولاد در نتیجه‌ی حرارت زیاد تجزیه و یا باعث سخت شدن قسمت گرم شده می‌شود. این امر منجر به ایجاد ترک در سطح جوشکاری خواهد شد. ضمناً گل جوش و گاز حاصل از سوختن پوسته‌ی الکتروتد در گرده‌ی جوشکاری باقی می‌ماند و باعث کاهش استحکام جوشکاری می‌شود.

بدود و موموجیمو^۷ (۲۰۱۵)، اثر حرارت ورودی در خواص مکانیکی فولاد کم کربن را با استفاده از دو نوع جوشکاری اکسی‌استیلن و قوس الکتریکی با الکتروتد پوشش‌دار بررسی کردند و دریافتند که با افزایش گرمای ورودی، استحکام کششی و سختی کاهش می‌یابد، ولی استحکام جوش در مقابل آزمایش ضربه افزایش می‌یابد.^[۹]

سویتز^۸ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰] طی آزمایش‌هایی در بررسی تأثیر نوع فلز پرکننده در اتصال بین سیلیکون برنز و فولاد ضدزنگ با جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروتد تنگستن (TIG) دریافتند که استحکام و شکل‌پذیری اتصال مذکور هنگام استفاده از سیلیکون برنز به عنوان فلز پرکننده، نسبت به حالتی که از فولاد ضدزنگ برای فلز پرکننده استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد.

سیوی‌جان^۹ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۱] بر اساس نتایج یک برنامه‌ی آزمایشگاهی که انجام داده بودند، پیشنهاد کردند که در صورت لزوم، جوش اکسی‌استیلن را می‌توان به عنوان یک جایگزین برای جوشکاری با قوس الکتریکی در نظر گرفت. این پیشنهاد در رابطه با تعمیرات اضطراری، جوشکاری در مناطق دورافتاده و مناطقی با عدم دسترسی به منابع الکتریکی است.

چنگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۲] اتصال مس به فولاد ضدزنگ را با دو روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروتد تنگستن (TIG)^{۱۱} و جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ خنثی (MIG)^{۱۲} و با استفاده از سه نوع فلز پرکننده (فلز بر پایه‌ی مس، فلز بر پایه‌ی مس - نیکل و فلز بر پایه‌ی آهن) بررسی کردند و دریافتند که بیشینه‌ی استحکام کششی با استفاده از فلز پرکننده بر پایه‌ی مس به دست می‌آید و همچنین اتصال اخیر، بیشترین تغییر شکل خمیری را نیز از خود نشان می‌دهد.

سینک^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۳] در نوشتاری با مرور نوشتارهای پیشین به کاربردهای جوش اکسی‌استیلن، مانند برش فلزات و آلیاژها در بسیاری از صنایع پرداختند، که با استفاده از مشعل اکسی‌استیلن به راحتی انجام‌پذیر است. از نتایج بیان شده در پژوهش مذکور آن است که خواص مکانیکی جوش به نوع شعله‌ی مورد استفاده برای جوشکاری بستگی دارد و برای جوشکاری عناصر فولادی نباید

از شعله‌ی اکسیدکننده استفاده شود؛ زیرا فلز ذوب شده در محل جوش، از نوع متخلخل، اکسید شده و شکننده خواهد بود. همچنین ایشان تأکید کرده‌اند که هر چند جوشکاری اکسی‌استیلن در صنایع کوچک، کاربرد فراوانی دارد، اما مطالعات کمی در مورد آن انجام شده است.

کورزک^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۴] اتصال عناصر فلزی را با سه روش: جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروتد تنگستن (TIG)، جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ فعال (MAG)^{۱۵} و جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروتد پوشش‌دار بررسی کردند و آزمایش‌هایی برای تعیین خواص مکانیکی به ویژه سختی و استحکام اتصال‌ها در برابر بار و دمای بهره‌برداری انجام دادند و دریافتند که سه روش اخیر از نظر استحکام، اختلاف جزئی با یکدیگر دارند و تقریباً یکسان عمل می‌کنند.

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی مقاومت، کارایی و تطابق روش‌های مختلف جوشکاری با انواع فلز پرکننده، چهار نوع جوشکاری (ترکیبی از سه نوع الکتروتد و دو نوع فرایند جوشکاری) بررسی شده است. فرایندها و الکترودهای بررسی شده، شامل: جوشکاری اکسی‌استیلن با الکتروتد برنجی، جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروتد فولادی و جوشکاری با الکتروتد برنزی (فسفربرنز) با دو فرایند قوس الکتریکی و اکسی‌استیلن هستند. در این راستا، ابتدا با انجام آزمایش کشش استاندارد، مشخصات مصالح فلز پایه تعیین شده است. پس از آن، با تهیه، ساخت و جوشکاری ۴۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی، رفتار انواع جوش در سه حالت: بارگذاری کشش، برش و خمش بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. معرفی مدل‌های آزمایشگاهی

نحوه‌ی نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱، مشخصات الکترودهای مصرفی در جدول ۲ و مواد تشکیل‌دهنده‌ی آنها در جدول ۳ ارائه شده‌اند. به منظور بررسی مشخصات مکانیکی فلز پایه، سه آزمایش کشش فولاد مطابق استاندارد ASTM E8/E8M،^[۱۵] انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، میانگین تنش تسلیم و تنش نهایی فلز پایه به ترتیب برابر ۲۷۹۰ و ۴۰۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده است.

مطابق اهداف پژوهش، رفتار جوش در سه حالت بارگذاری کششی، برشی و خمشی و مطابق جزئیات آیین‌نامه‌ی جوشکاری ساختمانی ایران،^[۱۶] بررسی شده است. مطابق شکل ۱، در بررسی مقاومت جوش تحت کشش، قطعات فولادی به صورت مستطیلی به ابعاد ۵۰ × ۲۵۰ میلی‌متر و در ۳ ضخامت (t) مختلف: ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر لحاظ شده‌اند. در این حالت، ۲۴ نمونه برای آزمون کشش آماده شدند، که شامل: ۳ ضخامت ورق و ۴ روش جوشکاری متفاوت بوده و از هر نمونه، ۲ مورد تهیه شده است. مطابق شکل ۲، در تعیین مقاومت جوش تحت برش، قطعات فولادی به صورت مستطیلی به ابعاد ۴۰ × ۲۰۰ میلی‌متر و در ۲ ضخامت

جدول ۱. نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی.

فرایند جوشکاری و نوع الکتروتد	نام نمونه‌ها
اکسی‌استیلن با فسفر برنز	A1 و A2
قوس الکتریکی با فسفر برنز	B1 و B2
قوس الکتریکی با الکتروتد فولادی	C1 و C2
اکسی‌استیلن با برنج	D1 و D2

جدول ۲. مواد تشکیل دهنده الکترودهای مصرفی بر حسب درصد.

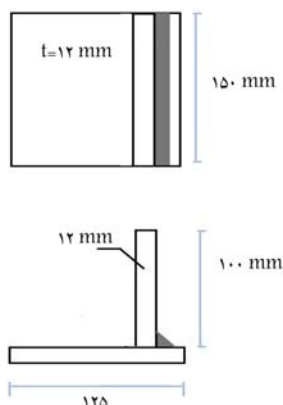
جنس سیم جوش	Fe	Cu	Zn	C	Mn	Si	P	Sn
فولادی	۹۹	-	-	۰/۰۸	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۰۲	-
فسفر برنز	-	۹۵	-	-	-	-	۰/۴	۴/۶
برنجی	-	۶۰	۳۹/۵	-	-	۰/۳	۰/۲	-

جدول ۳. مشخصات الکترودهای مصرفی.

جنس سیم جوش	تنش کششی نهایی (N/mm ²)	تنش تسلیم (N/mm ²)	ازدیاد طول (%)
فولادی	۵۵۰-۴۵۰	۳۶۰	۲۲
فسفر برنز	۴۵۰-۳۰۰	۳۰۰	۲۶
برنجی	۳۵۰-۳۰۰	۲۱۵	۲۱

جدول ۴. نتایج آزمایش آزمون کشش بر روی فلز پایه.

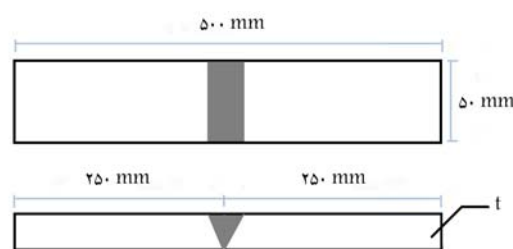
نمونه	مدول کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (kg/cm ²)	تنش نهایی (kg/cm ²)
۱	۱۹۶	۲۷۵۵	۴۰۵۱
۲	۱۹۱	۲۸۰۳	۴۰۷۷
۳	۲۰۶	۲۸۱۲	۴۰۸۱



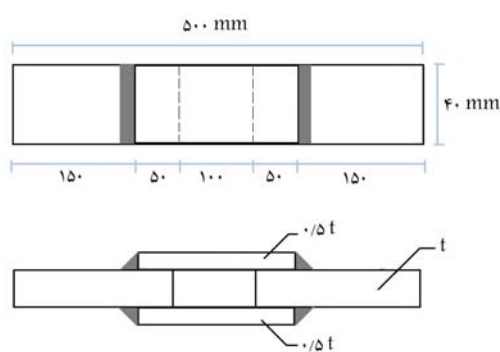
شکل ۳. ابعاد نمونه های آزمون جوش تحت خمش.



شکل ۴. آماده سازی نمونه های کششی برای جوشکاری.



شکل ۱. ابعاد نمونه های آزمون جوش تحت کشش.



شکل ۲. ابعاد نمونه های آزمون جوش تحت برش.

۲.۲. آماده سازی و جوشکاری نمونه های آزمایشگاهی

مطابق جزئیات آیین نامه ی جوشکاری ساختمانی ایران، نشریه ی ۲۲۸ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور^[۱۶] و استاندارد AWS D1/1^[۱۷]، قطعات از ورق پایه در کارگاه برشکاری توسط دستگاه گیوتین و مطابق ابعاد مذکور در شکل های ۱ تا ۳ برش داده شدند. به دلیل وجود پلیسه ها و لبه های تیز و برنده، قطعات بعد از برش، پلیسه گیری و سپس آماده ی جوشکاری شدند. در ادامه، جزئیات نمونه های آزمایشگاهی در هر ۳ حالت بارگذاری کششی، برشی و خمشی تشریح شده است.

۱.۲.۲. نمونه های آزمون کشش جوش

به منظور بررسی رفتار جوش تحت کشش، ۲۴ نمونه در کارگاه ساخته شدند و برای ایجاد جوش با نفوذ کامل در نمونه های آزمون کشش جوش مطابق شکل ۴، لبه ی ورق های با ضخامت بزرگ تر و مساوی ۵ میلی متر به شکل V برش داده شده است. در شکل های ۵ الی ۷، نمونه هایی از مدل های آزمایشگاهی مشاهده می شود.

۲.۲.۲. نمونه های آزمون برش جوش

برای بررسی رفتار جوش تحت برش، ۱۴ نمونه در کارگاه ساخته شدند. همان طور که

مختلف t برابر ۱۰ و ۲۰ میلی متر لحاظ شده اند. در این حالت، ۱۴ نمونه در کارگاه ساخته شد. ضخامت ورق های اصلی برابر t (در ۲ ضخامت مختلف ۱۰ و ۲۰ میلی متر) و ضخامت ورق های اتصال دهنده برابر $\frac{t}{4}$ است. نهایتاً، مطابق شکل ۳، در تعیین مقاومت جوش تحت خمش، قطعات فولادی به کمک دو ورق به ابعاد $125 \times 125 \times 12$ میلی متر و 100×150 میلی متر ساخته شدند و تحت بارگذاری قرار گرفتند. در این حالت نیز ۸ نمونه در کارگاه ساخته شده است.



شکل ۸. ورق‌های اصلی با ضخامت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر برای آزمون برش جوش.



شکل ۵. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش اکسی استیلن با الکتروود فسفر برنز.



شکل ۹. آماده‌سازی نمونه‌های برشی برای جوشکاری.



شکل ۶. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش اکسی استیلن با الکتروود برنج.



شکل ۱۰. جوشکاری نمونه‌های آزمون برش در حالت تخت.



شکل ۷. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی با الکتروود فولادی.

قبلاً ذکر شد، ورق‌های اصلی به صورت مستطیلی به ابعاد 40×200 میلی‌متر و در ۲ ضخامت مختلف t برابر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر آماده شدند. در این حالت، ضخامت ورق‌های اتصال‌دهنده به ترتیب برابر ۵ و ۱۰ میلی‌متر بوده است، که جزئیات آن در شکل‌های ۸ الی ۱۲ مشاهده می‌شوند.

۳.۲.۲. نمونه‌های آزمون خمش جوش

۸ نمونه‌ی خمشی برای بررسی کیفیت جوش تخت در کارگاه ساخته شدند، که جزئیات کلی ساخت آنها در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ مشاهده می‌شوند.

۳.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و بارگذاری مدل‌ها

در پژوهش حاضر، نمونه‌ها توسط دستگاه کشش یونیورسال با سرعت $2/0$ میلی‌متر در هر دقیقه تا لحظه‌ی گسیختگی تحت بار قرار گرفتند. در دستگاه کشش یونیورسال، علاوه بر آزمون‌های کشش و فشار، آزمون‌های دیگری نیز مانند خمش، برش، قدرت اتصال و استحکام شکست انجام‌پذیر هستند. مطابق شکل‌های ۱۷ الی ۱۹، برای رسیدن به شرایط بارگذاری مورد نظر، باید فک‌های دستگاه و جهت قرارگیری نمونه‌ها متناسب با ۳ نوع بارگذاری: کششی، برشی و خمشی تنظیم شود.



شکل ۱۱. نمونه‌های آماده شده‌ی آزمون برش با ورق اصلی ۲۰ میلی‌متر.

۳. بررسی نتایج آزمایشگاهی

۳.۱.۳. بررسی نتایج نمونه‌های آزمون جوش تحت کشش

در بخش حاضر، نتایج ارزیابی مقاومت جوش تحت نیروی کششی بررسی شده است. تحت نیروی محوری کششی، مد خرابی غالب بر رفتار تمامی نمونه‌ها، مطابق



شکل ۱۶. نمونه‌ی آماده شده برای آزمون خمش.



شکل ۱۲. نمونه‌های آماده شده‌ی آزمون برش جوش با ورق اصلی ۱۰ میلی‌متر.



شکل ۱۷. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های کششی.



شکل ۱۳. ورق‌های با ضخامت ۱۲ میلی‌متر برای نمونه‌ی خمشی قبل از جوشکاری.



شکل ۱۴. آماده‌سازی نمونه‌های آزمون خمش برای جوشکاری با زدن پشت‌بند برای حفظ زاویه‌ی ۹۰ درجه بین قطعات فولادی.



شکل ۱۸. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های برشی.



شکل ۱۵. جوش‌کاری نمونه‌های آزمون خمش در حالت تخت.

جدول ۵. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۳ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکترود	مقاومت کششی (kg/cm^2)
A۱	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۱۵۱۱/۶۶
A۲	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۱۴۷۱/۶۶
B۱	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۸۵۱/۶۹
B۲	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۴۵۷/۸۷
C۱	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۳۶۰۶/۶۶
C۲	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۳۵۹۳/۳۳
D۱	اکسی استیلن با الکترود برنج	۲۲۵۴/۶۴
D۲	اکسی استیلن با الکترود برنج	۲۰۴۱/۳۶

جدول ۶. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۵ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکترود	مقاومت کششی (kg/cm^2)
A۱	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۹۵۴
A۲	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۱۱۷۲
B۱	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۷۸۵/۲۹
B۲	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۸۲۵/۳۸
C۱	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۳۴۰۲
C۲	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۳۵۳۳
D۱	اکسی استیلن با الکترود برنج	۲۶۱۸
D۲	اکسی استیلن با الکترود برنج	۲۴۶۰

جدول ۷. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۸ میلی‌متر.

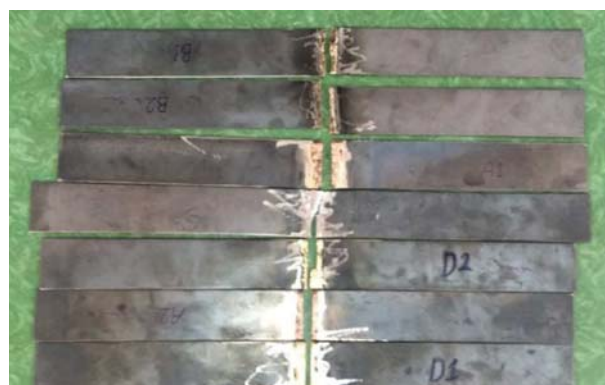
نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکترود	مقاومت کششی (kg/cm^2)
A۱	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۱۲۰۶/۱۵
A۲	اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز	۱۱۰۵/۳۰
B۱	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۱۰۲/۶۳
B۲	قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز	۲۳۱۰/۷۴
C۱	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۴۰۵۸/۹۴
C۲	قوس الکتریکی با الکترود فولادی	۴۰۸۲/۱۷
D۱	اکسی استیلن با الکترود برنج	۱۵۲۳/۴۱
D۲	اکسی استیلن با الکترود برنج	۱۹۸۳/۹۶

اکسی استیلن با الکترود برنجی، نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های با ضخامت ۵ میلی‌متر، مقاومت کششی کمتری را نشان داده‌اند (جدول‌های ۶ و ۷). از مشاهدات عینی می‌توان گفت که در ضخامت‌های بیشتر، نیاز به پیش‌گرمایش زیاد و افزایش قدرت مشعل وجود دارد و الکترود برنجی در حالت مذاب، بسیار سیال است و از محیط حوضچه خارج می‌شود. در این حالت تنظیم مذاب در خط جوش بسیار مشکل است، به طوری که در نمونه‌های برشی ۲۰ میلی‌متری، امکان جوشکاری و ساخت نمونه از بین رفته بود. در قطعات مذکور، به دلیل افزایش ضخامت قطعات و تسریع در انتقال حرارت، نیاز به افزایش بیش از حد پیش‌گرمایش و درجه مشعل بود و برنج مذاب، کاملاً روان بوده و از محیط خارج شده است. لذا در جدول ۸ ملاحظه می‌شود که جای مقاومت برشی نمونه‌های مذکور، خالی بوده و ساخت آنها ممکن نشده است.

در مورد جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز، مقاومت کششی در ضخامت ۸ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۵ میلی‌متر، به طور متوسط حدود ۲۱٪



شکل ۱۹. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های خمشی.



شکل ۲۰. تعدادی از نمونه‌های کششی بعد از انجام آزمایش (با انواع مختلف جوش).

شکل ۲۰ است. نتایج آزمایش کشش بر روی ورق‌ها با سه ضخامت مختلف در جدول‌های ۵ الی ۷ ارائه شده‌اند. نمونه‌های C (که با الکترود فولادی و به روش قوس الکتریکی جوشکاری شده‌اند)، مقاومت کششی بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند. و بعد از آن، جوش با قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز، مقاومت کششی بهتری نشان داده‌اند.

در جوشکاری اکسی استیلن مشاهده شد که استفاده از الکترود برنجی، نتایج بهتری نسبت به استفاده از الکترود فسفر برنز دارد. از طرفی، با تقریب قابل قبولی می‌توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکترود فولادی را در تمام ضخامت‌ها یکسان لحاظ و از تأثیر ضخامت در مقاومت جوش صرف‌نظر کرد. ولی ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی استیلن دارد.

تأثیر نوع فرایند جوشکاری در مقاومت کششی اتصال‌ها، بسیار بیشتر از تأثیر ضخامت نمونه‌ها بوده است. با اطمینان می‌توان گفت که از لحاظ مقاومت کششی، جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود فولادی نسبت به بقیه فرایندها، در رتبه اول قرار دارد. جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود فسفر برنز در رتبه دوم، جوشکاری اکسی استیلن با الکترود برنج در رتبه سوم و جوشکاری اکسی استیلن با الکترود فسفر برنز در رتبه چهارم قرار دارد. در هر کدام از فرایندها، در ضخامت‌های ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر، تفاوت‌هایی در مقاومت کششی (تنش نهایی گسیختگی) ملاحظه می‌شود. در بیشتر نمونه‌ها، اختلاف کم بوده یا با افزایش ضخامت، مقاومت افزایش یافته است. در دو مورد، کاهش قابل ملاحظه‌ای وجود دارد، که با توجه به بازرسی چشمی نمونه‌های آزمایش شده، توضیحات به این شرح داده می‌شود: در مورد جوش



شکل ۲۱. تشکیل ترک و رشد آن در روی خط جوش در نمونه ی برشی.



شکل ۲۲. نمونه ی برشی با جوش اکسی استیلن و الکترو د برنجی (بعد از انجام آزمون).



شکل ۲۳. یکی از نمونه های برشی با ضخامت ۱۰ میلی متر بعد از انجام آزمون.

گسترش ترک از عمق به سطح آن مطابق شکل ۲۱ گسیختگی نهایی رخ داده است.

۳.۳. بررسی نتایج نمونه های آزمون جوش تحت خمش

در شروع آزمایش خمشی، یکی از نمونه های خمشی تحت فشار له شده و جوش شکسته است و کیفیت آن بعد از مشاهده ی قسمت شکسته شده ی خط جوش با ذره بین بررسی شده است (شکل ۲۴).

برای له کردن نمونه های خمشی از فک های مخصوص استفاده شده است. بیشترین نیرو برای له کردن نمونه های خمشی با جوش قوس الکتریکی با الکترو د فولادی حاصل شده است. در این جا نیز الکترو د فسفر برنز با فرایند قوس الکتریکی در رتبه ی دوم قرار گرفته است.

با بررسی خط جوش های شکسته شده مشاهده شد که جوش قوس الکتریکی با الکترو د های فولادی و فسفر برنز به ترتیب در کیفیت اول و دوم قرار دارند. اما

جدول ۸. مقاومت برشی نمونه های آزمون برش با ورق اصلی به ضخامت ۲۰ میلی متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکترو د	مقاومت کششی (kg/cm^2)
A۱	اکسی استیلن با الکترو د فسفر برنز	۱۸۵۳/۶۴
A۲	اکسی استیلن با الکترو د فسفر برنز	۱۶۶۳
B۱	قوس الکتریکی با الکترو د فسفر برنز	۲۱۵۷/۸۱
B۲	قوس الکتریکی با الکترو د فسفر برنز	۲۰۹۴/۲۷
C۱	قوس الکتریکی با الکترو د فولادی	۵۵۵۱/۵۶
C۲	قوس الکتریکی با الکترو د فولادی	۶۰۰۸/۸۵
D۱	اکسی استیلن با الکترو د برنج	---
D۲	اکسی استیلن با الکترو د برنج	---

جدول ۹. مقاومت برشی نمونه های آزمون برش با ورق اصلی به ضخامت ۱۰ میلی متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکترو د	مقاومت کششی (kg/cm^2)
A۱	اکسی استیلن با الکترو د فسفر برنز	۲۱۱۵/۵۲
A۲	اکسی استیلن با الکترو د فسفر برنز	۲۱۲۰/۷۲
B۱	قوس الکتریکی با الکترو د فسفر برنز	۲۳۷۷/۵۰
B۲	قوس الکتریکی با الکترو د فسفر برنز	۲۱۶۸/۷۵
C۱	قوس الکتریکی با الکترو د فولادی	۴۳۴۰/۶۲
C۲	قوس الکتریکی با الکترو د فولادی	۴۰۹۰/۱۰
D۱	اکسی استیلن با الکترو د برنج	۱۴۱۷/۹۷
D۲	اکسی استیلن با الکترو د برنج	۱۶۵۱/۸۷

کاهش یافته است. با بررسی چشمی پس از آزمون نمونه ها، ملاحظه شد که در جوشکاری قوس الکتریکی با الکترو د فسفر برنز، حباب های بسیار ریزی در داخل فلز جوش به وجود آمده است، که مقدار آنها در نمونه های با ضخامت ۸ میلی متر خیلی بیشتر از نمونه های ۳ و ۵ میلی متر بوده است. احتمال داده می شود که با توجه به شرایط کارگاه و تجهیزات جوشکاری، تنظیم جریان ترانسفورماتور برای ضخامت ۸ میلی متر مناسب نبوده است. احتمالاً در ضخامت های بالاتر، شدت جریان بیشتری برای الکترو د فسفر برنز لازم است؛ در حالی که با همان موتور جوش، جوشکاری با الکترو د فولادی به راحتی و با سرعت و دقت بیشتری انجام شده است.

۲.۳. بررسی نتایج نمونه های آزمون جوش تحت برش

مطابق نتایج جدول های ۸ و ۹، مقاومت برشی جوش در نمونه های جوشکاری شده با الکترو د فولادی و فرایند جوشکاری با قوس الکتریکی با افزایش ضخامت افزایش یافته است. از طرفی، نمونه های اخیر، مقاومت برشی بیشتری نسبت به بقیه ی نمونه ها از خود نشان داده اند. بعد از آن نیز به ترتیب نمونه های B، A و D مقاومت برشی کمتری داشته اند.

جوشکاری با فرایند اکسی استیلن در ضخامت کمتر، بهتر عمل کرده و حتی جوش اکسی استیلن با برنج برای ضخامت ۲۰ میلی متر امکان پذیر نشده است. چون حرارت ایجاد شده توسط ورق های ضخیم از محل جوش انتقال پیدا کرده و حرارت کافی برای ایجاد حوضچه ی جوش فراهم نشده است. در شکل های ۲۱ الی ۲۳، مد خرابی غالب در نمونه های برشی مشاهده می شود. در تمامی مدل ها، لحظه ی رسیدن به حد نهایی مقاومت نمونه با ایجاد ترک در ریشه ی جوش شروع شده و با



شکل ۲۴. یکی از نمونه‌های خمشی در هنگام شروع آزمایش.

جوشکاری با فرایند اکسی استیلن و الکترودهای فسفر برنز و برنج، کیفیت پایینی دارند؛ به طوری که حباب‌های ریز در سطح شکسته‌ی جوش وجود دارند. احتمال دارد که ضخامت ۱۲ میلی‌متری مربوط به نمونه‌های اخیر باعث انتقال سریع حرارت مشعل از ناحیه‌ی جوش و موجب کاهش کیفیت جوش شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مقاومت جوش تحت دو فرایند جوشکاری مختلف (قوس الکتریکی و اکسی استیلن) با سه الکترودهای متفاوت (مقتول برنجی، برنزی و فولادی) و ۳ حالت بارگذاری کشش، برش و خمش بررسی شده است. در این راستا، ۲۴ نمونه‌ی کششی، ۱۴ نمونه‌ی برشی و ۸ نمونه‌ی خمشی در کارگاه ساخته و به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. خلاصه‌ی نتایج به این شرح است:

(۱) در همه‌ی نمونه‌ها، جوشکاری با قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی مقاومت بیشتری هم از لحاظ کشش و هم از لحاظ برش نشان داده است. همچنین از

لحاظ کیفیت جوش (با توجه به نمونه‌های خمشی پس از شکستن) ملاحظه شد که جوش با قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی کیفیت بالاتری دارد، زیرا خط جوش شکسته شده، یکنواخت و بدون حباب بوده است.

(۲) جوش فسفر برنز طی آزمایش‌های انجام شده هم از لحاظ جوشکاری با اکسی استیلن و هم جوشکاری با قوس الکتریکی در رتبه‌ی دوم قرار دارد. علت این که در کشتی‌سازی، صنایع دریایی و در پمپ‌ها از جوش برنزی استفاده می‌کنند، این است که در عین حال که مقاومت قابل قبولی دارد، از لحاظ دوام و پایداری و همچنین مقاومت در برابر عوامل شیمیایی و آب دریا نسبت به سایر جوش‌ها برتری دارد.

(۳) برای ضخامت‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر، جوشکاری با اکسی استیلن اصلاً توصیه نمی‌شود و جوشکاری اخیر فقط برای جوشکاری ورق‌های نازک به کار می‌رود. به دلیل این که به هیچ وجه هم از لحاظ زمانی و هم از نظر اقتصادی، برای جوشکاری قطعات ضخیم مناسب نیست و در ضخامت‌های بالاتر، که در اسکلت‌های فولادی به کار می‌روند، امکان‌پذیر نیست؛ زیرا به علت انتقال سریع حرارت از طریق قطعات اصلی فولادی، امکان جوشکاری صحیح با اکسی استیلن وجود ندارد.

(۴) در جوشکاری با اکسی استیلن، حتماً قطعات باید پیش‌گرمایش بیشتری داشته باشند.

(۵) در نمونه‌های با ضخامت کوچک‌تر، هر چهار نوع جوشکاری بررسی شده، کیفیت جوش بهتری داشته‌اند.

(۶) با تقریب قابل قبولی می‌توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی را در تمام ضخامت‌ها یکسان در نظر گرفت و از تأثیر ضخامت در مقاومت کششی جوش صرف‌نظر کرد.

(۷) ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی استیلن داشته است.

پانویس‌ها

1. heat affected zone
2. Haagensen
3. Zhang
4. Lin
5. Everett
6. Liao
7. Bodude & Momohjimoh
8. Switzer
9. Civjan
10. Cheng
11. tungsten inert gas
12. metal inert gas
13. Singh
14. Korzec
15. metal active gas

منابع (References)

1. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and et al. "Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding", *Materials and Design*, **32**(5), pp. 3036-3050 (2011).
2. Phanindra Reddy, M., Aldrin Sam William, S., Mohan Prashanth, M. and et al. "Assessment of mechanical properties of AISI 4140 and AISI 316 dissimilar weldments", *Procedia Engineering*, **75**, pp. 29-33 (2014).
3. Ahmadi, E. and Ebrahimi, A.R. "The effect of activating fluxes on 316L stainless steel weld joint characteristic in TIG welding using the taguchi method", *Advanced Materials and Processing*, **1**(1), pp. 55-62 (2013).

4. Haagensen, P.J., Statnikov, E.S. and Lopez-Martinez, L. "Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT)", **16**, pp.16-19 (2002).
5. Zhang, H.T., Feng, J.C., He, P. and et al. "Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process", *Materials Characterization*, **58**(7), pp. 588-592 (2007).
6. Lin, S.B., Song, J.L., Yang, C.L. and et al. "Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal", *Materials and Design*, **31**(5), pp. 2637-2642 (2010).
7. Criss, E.M. and Meyers, M.A. "Braze welding of cobalt with a silver-copper filler", *Journal of Materials Research and Technology*, **44**(1), pp.44-59 (2015).
8. Liao, F., Wang, W. and Chen, Y. "Ductile fracture prediction for welded steel connections under monotonic loading based on micromechanical fracture criteria", *Journal of Engineering Structures*, **94**, pp. 16-28 (2015).
9. Bodude, M. and Momohjimoh, I. "Studies on effects of welding parameters on the mechanical properties of welded low-carbon steel", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, **3**(03), pp. 142 (2015).
10. Switzner, N., Queiroz, V., Duerst, J. and et al. "Si-bronze to 304 stainless steel GTA weld fusion zone microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, **709**, pp. 55-64 (2018).
11. Civjan, S., Guihan, T. and Peterman, K. "Testing of oxyacetylene weld strength", *Journal of Constructional Steel Research*, **168**, pp. 910-921 (2020).
12. Cheng, Z., Liu, H., Huang, J. and et al. "MIG-TIG double-sided arc welding of copper-stainless steel using different filler metals", *Journal of Manufacturing Processes*, **55**, pp. 208-219 (2020).
13. Singh, R.P., Kumar, S., Dubey, S. and et al. "A review on working and applications of oxy-acetylene gas welding", *Materials Today: Proceedings*, **38**, pp. 34-39 (2021).
14. Korzec, I., Lusiak, T. and Bugaj, M. "Tests of selected mechanical properties of welded joints in rotorcraft", *Transactions on Aerospace Research*, **1**(262), pp. 64-74 (2021).
15. ASTM, INT. ASTM E8/E8M, "Standard Test methods for Tension Testing of Metallic Materials", pp. 1-27 (2016).
16. *Iranian Construction Welding Regulations*, Issue No. **228** (In persian).
17. Code-Steel, Structural Welding "AWS D1. 1/D1. 1M", *American Welding Society* (2020).

ارزیابی استاتیکی و چندمرحله‌ای مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌یی

علی‌نمایی کهل (دانشجوی دکتری)

علیرضا اردکانی* (دانشیار)

محمود حسنیو راد (دانشیار)

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

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۱۳۰-۱۲۱، (پژوهشی)

به منظور بررسی رفتار بیرون‌کششی استاتیکی و چندمرحله‌ای ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌یی، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به وسیله‌ی دستگاه بیرون‌کشش بزرگ‌مقیاس انجام شده است. آزمایش‌های بیرون‌کششی سرعت ثابت و چندمرحله‌یی به ترتیب برای بررسی رفتار استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی ژئوسل مدفون در خاک‌های دانه‌یی ترتیب داده شده است. مقاومت بیرون‌کشش نهایی به‌دست آمده از آزمایش بیرون‌کشش، شامل: مؤلفه‌های متفاوتی است که هر یک از آن‌ها توسط یک روش تئوری محاسبه شده است. در نهایت مشاهده شد که رفتار بار بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل‌ها به صورت سخت‌شونده بوده است که مقدار آن وابسته به مؤلفه‌ی مقاومت پاسیو و اصطکاکی بسیج شده است. همچنین مقاومت بیرون‌کشش نهایی پساسیکلی به‌دلیل شکسته یا ضعیف شدن برخی از قفل و بست‌ها بین دانه‌های مصالح پُرکننده و خاک اطراف در هنگام حرکت رفت و برگشتی فاز سیکلی، کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی بوده است.

واژگان کلیدی: ژئوسل، مقاومت بیرون‌کشش، خاک دانه‌یی، آزمایش استاتیکی، آزمایش چندمرحله‌یی.

namaeiali@yahoo.com
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

روش‌های مختلفی برای بهسازی مسائل ژئوتکنیکی ارائه می‌شود که شامل: استفاده از پی‌های عمیق، جایگزین خاک، پیش‌بارگذاری و زهکشی قائم، ستون‌های سنگی، اصلاح شیمیایی، تسلیح خاک و غیره می‌شود. در میان روش‌های مذکور، تسلیح خاک یکی از روش‌های مرسوم به حساب می‌آید. در مطالعات اولیه، از مفهوم مسلح کردن خاک توسط المان‌های فازی استفاده شده است. مسلح‌سازی توسط ژئوسل، یک المان سه‌بعدی، پلیمری و لانه زنبوری است که در چند دهه‌ی گذشته گسترش یافته است. ژئوسل‌ها به عنوان یک روش اقتصادی با نحوه‌ی اجرای ساده محسوب می‌شوند که توانایی به کارگیری در هر نوع شرایط آب و هوایی برای بهسازی پی‌ها، خاکریزها، جاده‌ها و دیوارهای حائل را دارند.^[۱-۳]

مکانیزم تسلیح ژئوسل‌ها به سه مؤلفه تقسیم می‌شود: الف) اثر برشی: اصطکاک بین دیواره‌ی سلول‌های ژئوسل و دانه‌های خاک مصالح پُرکننده که یک تنش برشی قائم در جدار سلول تشکیل می‌دهد و در مقابل بار قائم مقاومت می‌کند؛ ب) اثر مقاومت جانبی: اندرکنش مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با خاک بستر و جلوگیری از تغییرمکان جانبی ژئوسل توسط مقاومت پاسیو ایجاد شده در هر سلول، ج) توزیع بار در سطحی گسترده‌تر: این المان‌ها بار سطحی وارد شده را در عمق قرارگیری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2022.59660.3065

خود در سطح بیشتری توزیع می‌کنند و به‌دلیل صلبیت بالا، بخشی از تغییرشکل خمیری را تحمل می‌کنند.^[۴] این مکانیزم باعث می‌شود تا با کاهش تدریجی بار وارده، تغییرشکل دائمی کمتری در سطح تماس خاک و ژئوسل ایجاد شود و در نتیجه، ظرفیت باربری خاک زیرالمان افزایش یابد. مانجو و لانا^۱ (۲۰۱۳)، با استفاده از یک سری آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس اصلاح شده، مقاومت برشی بین ژئوسل با مصالح پُرکننده‌ی ماسه‌یی را بررسی کردند و دریافتند که در حضور ژئوسل، مقاومت برشی خاک بستر با مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل در اثر محصورشدگی ناشی از وجود ژئوسل افزایش می‌یابد که افزایش مقاومت برشی مذکور، خود را به صورت یک چسبندگی ظاهری در پوش‌های گسیختگی نشان داده است.^[۵] توکلی و مترجمی (۲۰۱۸)، رفتار اندرکنشی ماسه و شن مسلح شده با ژئوسل را توسط آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بررسی و پیشنهاد کردند تا از ژئوسل در تنش‌های قائم کم و با مصالح درشت‌دانه استفاده شود. ایشان نشان دادند که با افزایش اندازه‌ی ذرات، مقاومت سطح مشترک مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با مصالح پُرکننده بیشتر می‌شود، که این اثر افزایش به طور قابل توجهی از اثر افزایش تراکم خاک در مقاومت برشی سطح مشترک بیشتر بوده است. در نهایت، آن‌ها پیشنهاد کردند که نسبت بُعد سلول ژئوسل به اندازه‌ی متوسط دانه‌ها در حدود عدد ۴ باشد که این عدد بیشترین مقاومت برشی را ارائه داده است. همچنین ایشان یک چسبندگی ظاهری در پوش‌های گسیختگی مشاهده کردند که آن را ناشی از

استفاده شده است، تا سهم هر یک از مؤلفه‌های اخیر در مقاومت نهایی بیرون‌کشش ژئوسل در نظر گرفته شود.

۲. روش آزمایش

۲.۱. دستگاه آزمایش

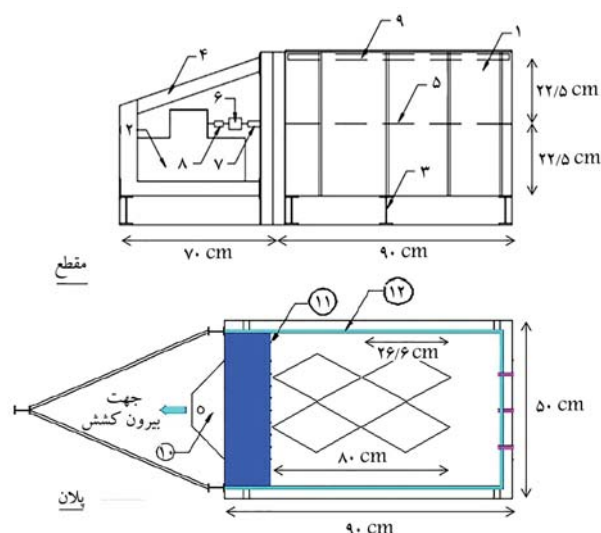
برای مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر از دستگاه بیرون‌کششی موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (فزون) استفاده شده است. جعبه‌ی دستگاه، ابعادی برابر $90 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر داشته و ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده‌ی جداره‌ها برابر ۱۵ میلی‌متر بوده است. عملکرد کنترل در دستگاه مذکور از نوع حلقه‌ی بسته بوده است. با استفاده از عملکرد الکترومکانیکی و سیستم‌های کنترل خودکار، نیروی موردنظر به مسلح‌کننده، که به‌طور کششی وارد شده است، با ظرفیت $2/5$ تن و با دقت $1/0 \pm$ محاسبه شده است. همچنین مقادیر تغییرمکان نمونه توسط جابه‌جایی‌سنج موجود بر روی عملکرد با ظرفیت ۷۵ میلی‌متر و با دقت $1/0 \pm$ گزارش شده است. عملکرد الکترومکانیکی مذکور، هم قابلیت اعمال بار به صورت کنترل تنش و هم به صورت کنترل کرنش را دارد. عملکرد دستگاه نیز توسط یک گیربکس، امکان اعمال نیروی رفت و برگشتی را به صورت سینوسی و کنترل تنش تا بسامد ۱۰۰ هرتز فراهم می‌سازد. نیروی قائم را نیز می‌توان توسط یک کیسه‌ی هوا موجود در بالای نمونه تا بیشینه‌ی ۷۵ کیلوپاسکال به نمونه‌ها اعمال کرد (شکل‌های ۱ و ۲).

۲.۲. مصالح خاکی و ژئوسل

جهت انجام مطالعه‌ی حاضر، از ماسه‌ی سیلیسی که در صنعت ریخته‌گری و سند بلاست استفاده می‌شود، استفاده شده است. ماسه از شرکت صنایع ریخته‌گری در کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی تهیه شده است. همچنین از دو نوع شن شکسته‌ی سیلیسی با ابعاد دانه‌های متفاوت برای بررسی رفتار بیرون‌کششی در شن‌ها استفاده شده است. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی،

محصورشکنندگی ژئوسل دانستند. در کنار مطالعات اخیر برش مستقیم، مطالعاتی هم توسط آزمایش بیرون‌کشش جهت بررسی مقاومت بیرون‌کشش و مکانیزم تسلیح ژئوسل‌ها انجام داده‌اند. [۶] بیابانی و همکاران (۲۰۱۶)، مقاومت بیرون‌کشش بالاست خطوط ریلی مسلح شده با ژئوسل را توسط یک دستگاه ابداعی بررسی کردند و نشان دادند که رفتار المان ژئوسل وابسته به مکانیزم بارگذاری، ضریب اصطکاک و سختی ژئوسل است. همچنین نشان دادند که مقاومت پاسیو بسیج شده در سول‌های ژئوسل، زمانی که تحت بار بیرون‌کشش قرار می‌گیرند، بیشتر از مقاومت پاسیو بسیج شده در آزمایش برش مستقیم است، که به دلیل فعال شدن مکانیزم‌های متفاوت تسلیح ژئوسل در هر کدام از آزمایش‌های مذکور است. [۷] ایسیک و گورباز (۲۰۲۰)، رفتار بیرون‌کشش ژئوسل‌ها را در یک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده توسط دستگاه بیرون‌کشش اصلاح شده بررسی کردند. هدف مطالعه‌ی ایشان تعیین تأثیر ابعاد، تعداد سول‌ها، آرایش سول‌ها و سختی ژئوسل در مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل بوده است. همچنین در نهایت یک روش تحلیلی برای محاسبه‌ی اثر محصورشدگی ارائه کردند و دریافتند که با افزایش طول ژئوسل و سختی آن، مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل افزایش می‌یابد. هر چند افزایش سختی به شدت وابسته به ضخامت، عرض و تنش قائم وارد شده است. همچنین مشاهده کردند که فقط با افزایش تعداد سول‌ها به ۳ عدد در طول ژئوسل، افزایش مقاومت بیرون‌کشش افزایش می‌یابد. [۸]

فخاریان و پیلان (۲۰۲۱)، نیز مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌های معمولی و تقویت‌شده را در یک خاک ماسه‌یی ارزیابی کردند و دریافتند که هر دو مقاومت بیرون‌کشش نهایی و سختی ژئوسل‌های تقویت شده به مقدار قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های معمولی بوده است. علاوه بر این، آن‌ها سه مدل فیزیکی برای بررسی ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک مسلح شده با ژئوسل معمولی و تقویت شده طراحی کردند. نتایج بار - نشست مدل‌های فیزیکی مذکور حاکی از برتری ژئوسل‌های تقویت‌شده در بهسازی ظرفیت باربری پی‌ها در قیاس با ژئوسل‌های معمولی بود. [۹] جمع‌بندی مطالعات اخیر نشان داد که در سال‌های گذشته، رفتار استاتیکی ژئوسل‌ها به‌صورت محدود مطالعه شده است، ولی همچنان اثر پارامترها در مقاومت بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل مشاهده نشده است. یکی از پارامترهای مذکور، اندازه‌ی ذرات دانه‌های خاک است، که می‌تواند در مکانیزم‌های تسلیح ژئوسل مثل مقاومت جانبی و اثر برشی تأثیر بسزایی داشته باشد. از طرفی دیگر، تمام مطالعات اخیر، مقاومت بیرون‌کشش و رفتار اندرکنشی ژئوسل‌ها را تحت بارهای استاتیکی ارزیابی کرده‌اند؛ ولی از آنجا که یک سازه می‌تواند در طول عمر خود تحت تأثیر بارهای چندمرحله‌ی قرار گیرد، رفتار بیرون‌کشش سیکلی و پساسیکلی ژئوسل‌ها همچنان باید مورد بحث قرار گیرد. با توجه به اینکه مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در طراحی و استفاده از آن‌ها در پروژه‌های خاک مسلح، اهمیت ویژه‌ی دارد، مطالعه‌ی حاضر می‌تواند کمک شایانی در این زمینه کند. بنابراین جنبه‌ی نوآوری مطالعه‌ی حاضر به این صورت خلاصه شده است: (۱) بررسی رفتار استاتیکی بیرون‌کششی ژئوسل‌های ساخت داخل کشور در خاک‌های دانه‌یی با در نظر گرفتن اثر اندازه‌ی دانه‌ها توسط دستگاه بیرون‌کششی، (۲) بررسی رفتار سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌های مذکور. برای دستیابی به اهداف اشاره شده در مطالعه‌ی حاضر: (۱) هجده آزمایش استاتیکی بیرون‌کشش ژئوسل‌های موجود در بازار ایران با ابعاد استفاده‌شده در پروژه‌ی عملی با در نظر گرفتن اثر اندازه‌ی ذرات سه خاک ماسه‌یی و شنی انجام شده است، (۲) شش آزمایش چند مرحله‌ی بیرون‌کشش بر روی ژئوسل‌ها در خاک‌های ذکر شده انجام شد تا رفتار سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها بررسی شود. (۳) همچنین از یک روش تئوری برای محاسبه‌ی هر کدام از مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل



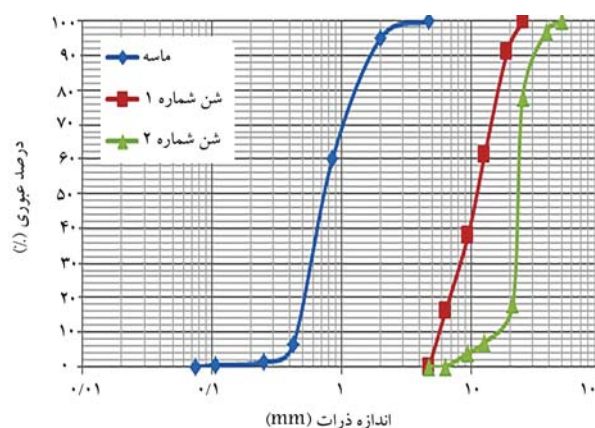
شکل ۱. شکل شماتیک دستگاه شامل: (۱) دستگاه بیرون‌کشش؛ (۲) عملکرد؛ (۳) بستر دستگاه؛ (۴) قاب عکس‌العمل؛ (۵) ژئوسل؛ (۶) نیروسنج؛ (۷) گیره؛ (۸) جابه‌جایی‌سنج؛ (۹) کیسه‌ی هوا؛ (۱۰) گیره؛ (۱۱) غلاف فلزی؛ (۱۲) صفحات شیشه‌یی.



شکل ۲. دستگاه بیرون کشش استفاده شده ی مصالح خاکی و ژئوسل.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکی آزمایش شده.

پارامتر	SP	GP۱	GP۲
G_s	۲/۶۵	۲/۸۶	۲/۷
D_r (%)	۷۰	۷۰	۷۰
$\gamma_{dm \max}$ (ton/m^3)	۱/۲۶	۲/۱۴	۲/۲۴
$\gamma_{dm \min}$ (ton/m^3)	۱/۳۷	۱/۹۲	۲/۰۶
γ_d (ton/m^3)	۲/۱۸	۲/۰۸	۱/۵۴
Φ (درجه)	۳۷/۸	۴۲/۲	۴۵/۶



شکل ۳. دانه بندی مصالح خاکی.

شامل: دانه بندی و برش مستقیم انجام شده است. با توجه به دانه بندی و بر اساس طبقه بندی متحد، شن و ماسه ها به ترتیب در رده های GP و SP طبقه بندی می شوند. خاک های مذکور در بسیاری از مطالعات پیشین نیز برای مدل سازی فیزیکی دیوار حائل مسلح شده با ژئوسل و یا ارزیابی آزمایش بیرون کشش ژئوسل استفاده شده است.^[۱۱،۱۰] همچنین دانه بندی خاک های اشاره شده بر اساس استاندارد NCMA به گونه یی تعیین می شوند که برای خاکریز خاک مسلح، مناسب باشند. در جدول ۱، مشخصات مصالح خاکی آزمایش شده ارائه شده اند.

مقادیر اخیر با استفاده از یک سری آزمون های پایه، شامل: برش مستقیم کوچک مقیاس برای محاسبه ی زاویه ی اصطکاک، آزمایش های بیشینه و کمینه ی وزن مخصوص و آزمایش توده ی ویژه به دست آمده اند. در شکل ۳، نیز دانه بندی مصالح خاکی آزمایش شده مشاهده می شود. در مطالعه ی حاضر، برای سهولت نمادها،

جدول ۲. مشخصات ژئوسل استفاده شده.

پارامتر	مقدار
ابعاد هر سلول (mm × mm)	۲۶۰ × ۲۱۰
ارتفاع (mm)	۱۰۰،۵۰
مقاومت کششی نهایی در جهت طولی برای ژئوسل با دو ارتفاع مختلف (kN/m)	۶/۴، ۳/۴
مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی برای ژئوسل با دو ارتفاع مختلف (kN/m)	۲/۶، ۱/۵
مقاومت برشی در محل گره (kN)	۳/۱۶، ۱/۸۲
کرنش گسیختگی (%)	۱۰۰

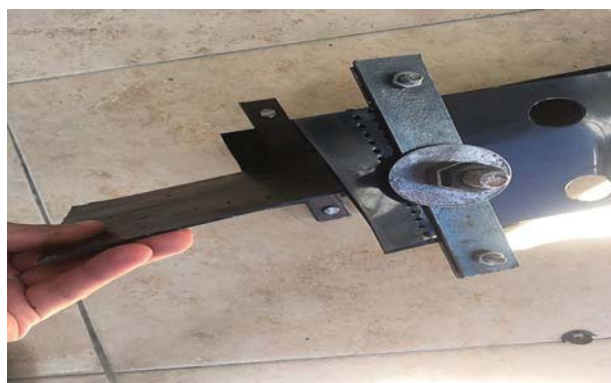
مصالح ماسه یی با نام SP، شن با اندازه ی ذرات ریز با نام GP۱ و شن با اندازه ی درشت تر با نام GP۲ استفاده شده است. ژئوسنتتیک های استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع ژئوسل هستند که توسط شرکت انرژی عناصر آینده ی ژئوساخت در بازار عرضه می شوند. ژئوسل های مذکور از نوارهای پلی اتیلن با ضخامت ۱/۵۲ میلی متر، که در محل گره توسط جوش حرارتی به یکدیگر متصل شده اند، ساخته شده اند. مشخصات مکانیکی و هندسی ژئوسل استفاده شده که توسط سازنده بررسی شده است، در جدول ۲ ارائه شده است. در مطالعه ی حاضر، از ژئوسل های موجود در بازار ایران استفاده شده است. ابعاد سلول های ژئوسل مطابق پروژه های انجام شده در کشور انتخاب شده است، تا بتوان از نتایج مطالعه ی حاضر در پروژه های عملی نیز استفاده کرد.

۳.۲. نمونه سازی

ابتدا وزن های مخصوص بیشینه و کمینه ی سه خاک بدانه بندی شده توسط ارتفاع و استانداردهای ASTM D۴۲۵۳ و ASTM D۴۲۵۴ محاسبه شده است.^[۱۲،۱۳] برای رسیدن به چگالی نسبی ۷۰٪ برای هر کدام از مصالح خاکی، مقدار وزن مورد نیاز برای رسیدن به چگالی نسبی مورد نظر بر اساس وزن مخصوص های بیشینه و کمینه ی هر کدام از خاک ها محاسبه و در سطل های ۲۰ کیلوگرمی به صورت بارش خشک ریخته شده است. همچنین بر اساس نتایج آزمایش های اخیر مشخص شد که برای رسیدن به چگالی نسبی ۷۰٪، باید ارتفاع هر لایه از SP، GP۱ و GP۲ به ترتیب برابر ۲/۵، ۲ و ۲ سانتی متر باشد. بر این اساس، مصالح خاکی هر سطل درون دستگاه ریخته و توسط ویراتور متراکم شدند تا به ارتفاع محاسبه شده برای یک لایه ی ۲۰ کیلوگرمی برسند. برای اطمینان از چگالی نسبی هر لایه ی ماسه، یک آزمایش مخروط ماسه یی صورت پذیرفته است. در لایه های شنی نیز با تکرار روند



شکل ۵. گیره‌ی طراحی شده و متصل شده به ژئوسل.



شکل ۶. محل اتصال گیره و ژئوسل.



شکل ۷. اتصال گیره به جک هیدرولیک.



شکل ۸. ژئوسل پر شده از مصالح دانه‌یی.

آخر کیسه‌ی هوا بر روی نمونه جهت اعمال سربار قرار گرفت و درب دستگاه قبل از اعمال فشار توسط ۶ پیچ فولادی بسته شد.

برای مطالعه‌ی رفتار بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل از شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت استفاده شده است. در شرایط مذکور، نیروی بیرون‌کشش به شکل جابه‌جایی



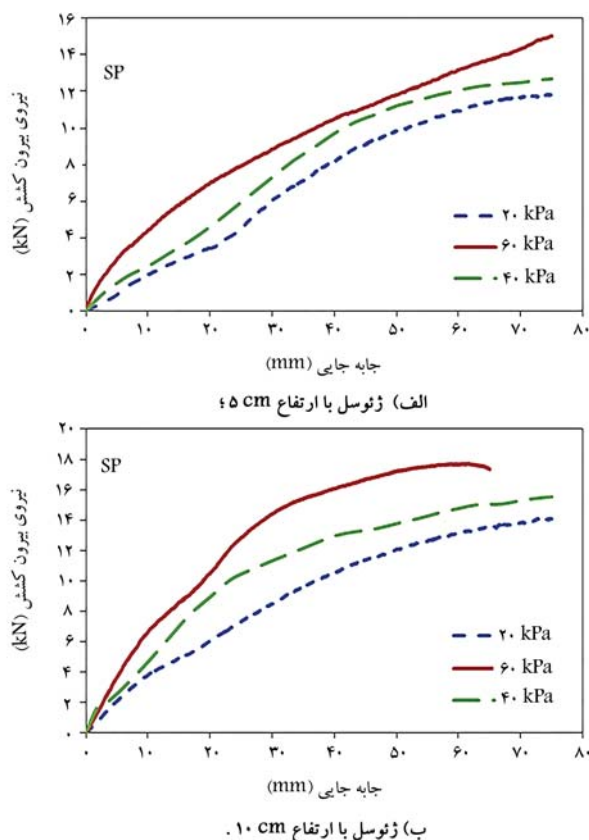
شکل ۴. قرارگیری ژئوسل روی نیمه‌ی پایینی مصالح خاکی.

و بیره و اطمینان از رسیدن به ارتفاع موردنظر برای هر لایه، از چگالی نسبی ۷۰٪ کنترل صورت گرفته است. در نهایت آزمایش به این ترتیب تکمیل شده است:

- ابتدا نیمه‌ی پایین دستگاه از ۷ لایه‌ی SP، ۹ لایه‌ی GP۱ و ۱۰ لایه‌ی GP۲ پر شد. سپس با رسیدن به ارتفاع نیمه‌ی دستگاه، یک لایه‌ی ژئوسل با طول ۸۰ و عرض ۴۰ سانتی‌متر بر روی مصالح خاکی به صورت افقی قرار گرفت (شکل ۴). ابعاد ذکر شده طبق استاندارد ASTM D۶۷۰۶ که دست‌کم نسبت طول به عرض ژئوسنتتیک را مساوی ۲ توصیه می‌کند، انتخاب شده است.^[۱۴] همچنین برای کاهش آثار مرزی، از یک فاصله‌ی ۷۵ میلی‌متری از کناره‌های ژئوسل تا دیواره‌های دستگاه استفاده شده است.

- از آنجایی که ژئوسل‌ها، یک هندسه‌ی سه‌بُعدی دارند، از گیره‌های ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی جهت اتصال به جک هیدرولیکی برای این آزمایش نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین یک گیره‌ی جدید طراحی شد تا ژئوسل را به جک هیدرولیکی دستگاه متصل کند. گیره‌ی جدید در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، که شامل یک ورق آهنی با ضخامت ۲/۵ میلی‌متری است که به یک لوله‌ی ۱۲ میلی‌متری جوش داده شده است. هر دو بال ژئوسل در قسمت جلویی به گیره‌ی اشاره شده توسط یک پیچ ۱۰ میلی‌متری متصل شده است. برای جلوگیری از پارگی ژئوسل در قسمت اتصال در هنگام آزمایش به علت تمرکز تنش، دو صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر هر دو طرف هر بال را ثابت کرده است. در نهایت مشابه شکل ۷، قسمت جلویی گیره‌ی مذکور سوراخ شد تا به جک هیدرولیکی متصل شود. برای آنکه ژئوسل از فاصله‌ی بین دو غلاف فولادی دستگاه عبور کند و به صورت آزادانه بتواند در آن قسمت جابه‌جا شود، ارتفاع ژئوسل‌ها در ۱۰ سانتی‌متر جلویی آن‌ها به ۴ سانتی‌متر کاهش داده شد. همچنین دو سیم غیرکشسان به نیمه‌ی سلول‌های ردیف اول و آخر ژئوسل و همچنین انتهای ژئوسل متصل شده است. سیم‌های مذکور با عبور از دیواره‌ی پشتی دستگاه به وزنه‌های جابه‌جایی سنج متصل شده‌اند.

- پس از قرار دادن ژئوسل، حجم هر سلول محاسبه شده است (به ترتیب ۳۶۰ و ۱۸۰۰ سانتی‌مترمکعب در ژئوسل‌هایی با ارتفاع ۱۰ و ۵ سانتی‌متر) و در وزن مخصوص در چگالی نسبی ۷۰٪ ضرب شد تا وزن مصالح خاکی موردنیاز در هر سلول محاسبه شود. سپس وزن محاسبه شده‌ی مذکور برای مصالح ماسه‌یی و شنی درون هر سلول ریخته و سپس و بیره شد تا این میزان مصالح خاکی، کاملاً یک سلول را پر کند (شکل ۸). سپس نیمه‌ی بالایی دستگاه مشابه نیمه‌ی پایین در ۷ لایه‌ی SP، ۹ لایه‌ی GP۱ و ۱۰ لایه‌ی GP۲ پر شده است. در



شکل ۹. رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل در ماسه.

رفتار سخت‌شونده با رفتار بار بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی که به یک مقدار بیشینه‌ی مشخص می‌رسند و سپس نیروی بیرون‌کشش به دلیل از دست دادن مقاومت اندرکنشی بین خاک و ژئوسنتتیک کاهش می‌یابد، در تضاد است. در ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی مذکور، نقطه‌ی بیشینه بیانگر مقاومت بیرون‌کشش است.^[۱۸-۱۶] بنابراین برخلاف ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی مثل ژئوگرید که مکانیزم اصطکاکی مقاومت بیرون‌کشش را کنترل می‌کند، در ژئوسل‌ها مقدار مقاومت پاسیو فعال‌شده در هر سلول ژئوسل، تعیین‌کننده‌ی مقاومت بیرون‌کشش نهایی است که همین امر باعث می‌شود تا به نقطه‌ی بیشینه در رفتار بار - جابه‌جایی خود نرسند.

در نمودارهای شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که مقدار مقاومت نهایی بیرون‌کشش وابسته به نیروی پاسیو فعال‌شده در هر سلول ژئوسل است و با افزایش ارتفاع ژئوسل، مقاومت نهایی بیرون‌کشش افزایش یافته است. برای مثال، ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی‌متر به ترتیب به مقاومت نهایی ۱۱/۸ و ۱۲/۶ کیلو نیوتن تحت سربارهای ۲۰ و ۴۰ کیلو پاسکال رسیده است. در حالی که تحت سربار ثابت، در ژئوسل با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، نیروی بیرون‌کشش نهایی حدود ۲۰٪ افزایش یافته و به مقادیر ۱۴ و ۱۵/۵ کیلو نیوتن رسیده است. در ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی‌متر تحت سربار ۶۰ کیلو پاسکال، می‌توان مشاهده کرد که یک مقدار ثابت تا جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر به دست نیامده است. لذا می‌توان عنوان کرد که تمام مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل بسیج نشده و جابه‌جایی بیشتری لازم است تا تمام مقاومت فعال شود و به شرایط پایدار دست یابد. در ژئوسل‌ها با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تحت فشار ۶۰ کیلو پاسکال نیز یک پارگی در جابه‌جایی ۶۵ میلی‌متر در اتصال بین ژئوسل و گیره رخ داده است که نشان می‌دهد مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل از مقاومت کششی نوارهای ژئوسل در محل

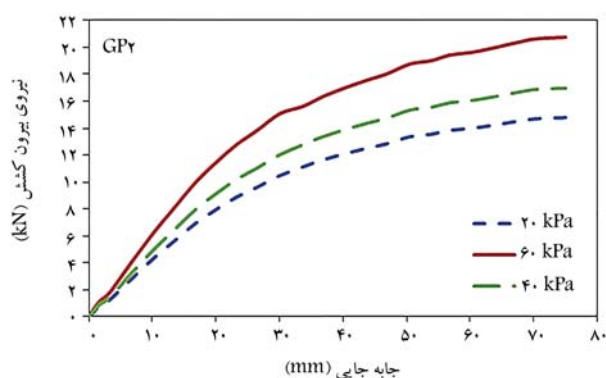
کنترل توسط سیستم کنترل حلقه‌ی بسته به نمونه اعمال شده است. طبق استاندارد آزمایش، ژئوسل می‌بایست با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بیرون کشیده شود تا گسیخته شود و یا جابه‌جایی جلویی نمونه به ۷۵ میلی‌متر برسد. در مطالعه‌ی حاضر، از سربارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال برای بررسی رفتار استاتیکی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها استفاده شده است. همچنین رفتار چندمرحله‌ی ژئوسل‌ها با استفاده از آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌ی بررسی شده است.^[۱۴] در مرحله‌ی اول، ژئوسل با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه و تا رسیدن به نیروی بیرون‌کشش تحت تنش سربارهای ۲۰ و ۶۰ کیلو پاسکال موردنظر جابه‌جا می‌شود. موراجی و کاردیل (۲۰۰۹)، نشان دادند که در ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی، فاز سیکلی بین ۲/۴ تا ۰/۴ بیشینه‌ی نیروی بیرون‌کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت آغاز می‌شود و پس از مقدار مذکور، فاز پس‌اسیکلی کاملاً تشکیل نخواهد شد.^[۱۵] بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، نیروی برابر ۳/۰ بیشینه‌ی نیروی بیرون‌کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت انتخاب شد تا فاز سیکلی آغاز شود. پس از رسیدن به نیروی بیرون‌کشش مشخص‌شده، یک نیروی کششی چندمرحله‌ی با بسامدهای ۱/۰ هرتز و تحت دامنه‌های تنش ۴/۰، بیشینه‌ی نیروی بیرون‌کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت در حالت کنترل بار به ازاء ۱۰ سیکل بر نمونه اعمال شد. پس از این مرحله، آزمایش مجدداً تحت شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه و مشابه مرحله‌ی اول ادامه یافت، تا اینکه نمونه‌ی ژئوسل به جابه‌جایی جلویی ۷۵ میلی‌متر رسید، و گسیختگی بیرون‌کششی و یا گسیختگی کششی رخ داد.

۳. نتایج و بحث

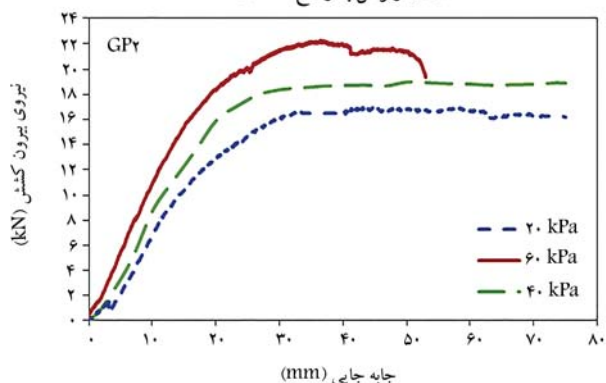
۳.۱. رفتار استاتیکی

در شکل ۹، رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل‌ها در خاک ماسه‌ی تحت سربارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال برای دو ژئوسل با ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمونه‌هایی که تحت فشار سربارهای ۲۰ و ۴۰ کیلو پاسکال قرار گرفته‌اند، یک رفتار سخت‌شونده دارند. نیروی بیرون‌کشش در نمونه‌های مذکور تا زمانی که به یک مقدار بیشینه برسد، افزایش یافته و سپس به سمت یک مقدار ثابت با همان نیرو ادامه داده است، تا به جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر برسد. به‌طور کلی، می‌توان گفت گسیختگی بیرون‌کشش در ژئوسل‌ها زمانی رخ می‌دهد که تمام مقاومت پاسیو در هر سلول ژئوسل بسیج شده باشد و در مقابل نیروی بیرون‌کشش مشارکت کند. این مشارکت در جابه‌جایی‌های اولیه، وقتی ردیف‌های اولیه‌ی سلول‌های ژئوسل فعال می‌شوند، باعث می‌شود تا نیروی بیرون‌کشش به صورت ناگهانی افزایش یابد.

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، مکانیزم تسلیخ ژئوسل‌ها به سه مؤلفه‌ی: (الف) اثر برشی، (ب) اثر مقاومت جانبی و (ج) توزیع بار در سطحی گسترده‌تر، تقسیم می‌شوند.^[۴] زمانی که نیروی بیرون‌کشش به ژئوسل اعمال می‌شود، مؤلفه‌ی اول به دلیل ایجاد نیروی اصطکاکی در جداره‌های المان ژئوسل و خاک فعال می‌شود. همچنین، مؤلفه‌ی دوم نیز به دلیل ایجاد نیروی پاسیو توسط مصالح خاکی موجود در هر سلول ژئوسل فعال خواهد شد. نیروی بیرون‌کشش در ژئوسل‌ها که ترکیبی از مؤلفه‌ی دوم است، پس از آن به یک مقدار پایدار می‌رسد، در شرایطی که کل سلول‌های ژئوسل فعال شده‌اند و ژئوسل دیگر مقاومتی برای بسیج کردن در مقابل نیروی خارجی ندارد و گسیختگی بیرون‌کشش در ژئوسل‌ها رخ می‌دهد. این

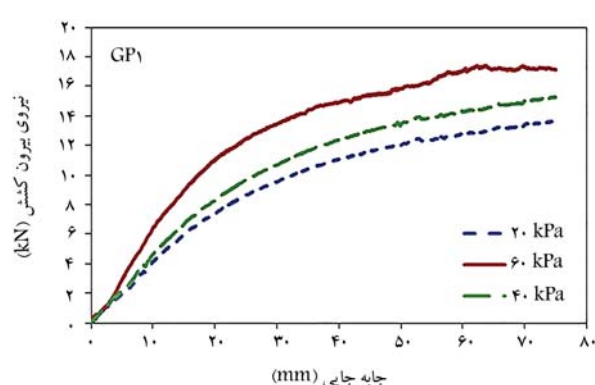


الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm

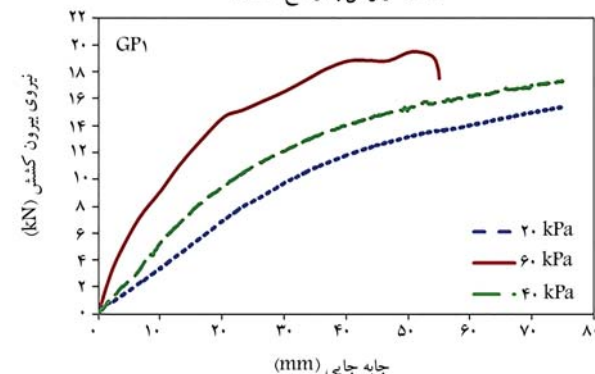


ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۱. رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل در GP2.

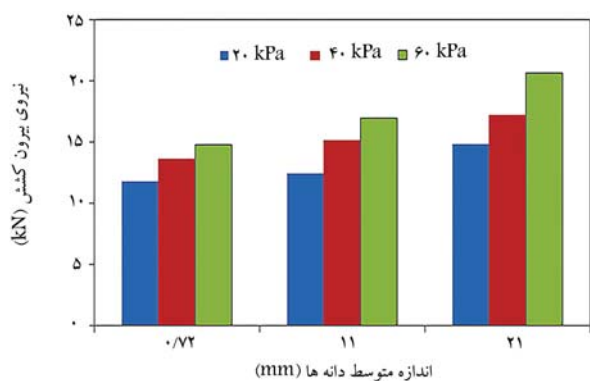


الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm

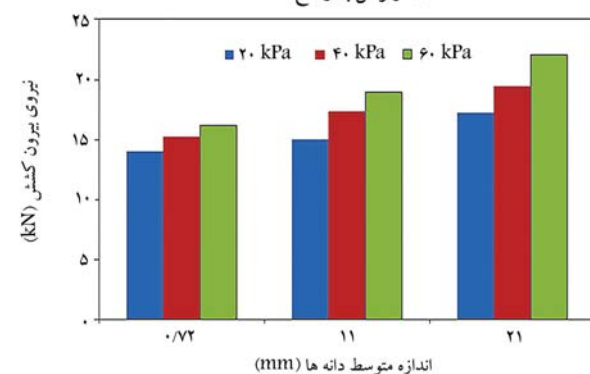


ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۰. رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل در GP1.



الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm



ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۲. نیروی بیرون‌کشش نهایی ژئوسل‌ها در برابر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها.

اتصال بیشتر بوده و بار خارجی باعث ایجاد پارگی در آن ناحیه شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، رفتار بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مصالح شنی مشاهده می‌شود، که ژئوسل‌ها یک رفتار سخت‌شونده مشابه رفتار در خاک ماسه‌یی از خود نشان داده‌اند. نیروی بیرون‌کشش افزایش یافته است، اما نرخ این رفتار تا زمانی که به جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر برسد، کاهش یافته است. مشابه خاک ماسه‌یی، در خاک‌های GP1 و GP2، یک پارگی در ژئوسل با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تحت سربار ۶۰ کیلوپاسکال در جابه‌جایی‌های ۵۵ و ۵۰ میلی‌متر رخ داده است. می‌توان مشاهده کرد جابه‌جایی که در آن پارگی رخ داده است، در مقایسه با خاک ماسه‌یی کاهش یافته است. همچنین در GP2 می‌توان مشاهده کرد که در جابه‌جایی حدود ۴۰ میلی‌متر، نیروی بیرون‌کشش دچار یک افت شده است که آن نقطه را می‌توان لحظه‌ی شروع پارگی دانست که پس از آن بار با یک مقدار ثابت ادامه یافته است تا اینکه در جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر به طور کلی افت کرده و پارگی کامل رخ داده است. شایان ذکر است پارگی‌های مذکور در محل اتصال رخ داده است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندازه‌ی ذرات، نیروی پاسیو بیشتری در هر سلول ژئوسل بسیج می‌شود. به طور کلی در مقیاس بین دانه‌یی و طبق اصول مکانیک خاک، با افزایش اندازه‌ی ذرات، وزن دانه‌ها بیشتر می‌شود و در تماس با یکدیگر، تنش بیشتری به یکدیگر وارد می‌کنند. از سوی دیگر، مقاومت کششی ژئوسل در محل اتصال ثابت باقی می‌ماند و با بیشتر شدن نیروی بیرون‌کشش از مقاومت کششی ژئوسل، پارگی در ژئوسل در محل اتصال رخ می‌دهد.

برای بررسی بهتر اثر اندازه‌ی ذرات، در شکل ۱۲، مقدار نهایی نیروی بیرون‌کشش در مقابل اندازه‌ی متوسط دانه‌ها مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نیروی بیرون‌کشش برای ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی‌متر تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال GP1 و GP2 به

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده‌ی هر کدام از مؤلفه‌های بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل.

خاک	ارتفاع ژئوسل (cm)	تنش قائم (kPa)	$\sum f_p (kN)$	$f_s (kN)$
ماسه	۵	۲۰	۸/۸۷	۲/۹۳
ماسه	۵	۴۰	۹/۲	۳/۳
ماسه	۵	۶۰	در این آزمایش چون رفتار بیرون کشش به سمت یک مقدار ثابت میل نکرده، محاسبه مؤلفه‌های بیرون کشش میسر نیست	
ماسه	۱۰	۲۰	۹/۹۴	۴/۰۶
ماسه	۱۰	۴۰	۱۰/۵۶	۴/۰۴
ماسه	۱۰	۶۰	۱۲/۲	۵
GP ۱	۵	۲۰	۹/۱	۴/۶
GP ۱	۵	۴۰	۹/۵	۵/۷
GP ۱	۵	۶۰	۱۱/۲	۶/۱
GP ۱	۱۰	۲۰	۱۰/۴	۴/۹
GP ۱	۱۰	۴۰	۱۱/۳	۶
GP ۱	۱۰	۶۰	۱۳/۱	۶/۴
GP ۲	۵	۲۰	۹/۶	۵/۲
GP ۲	۵	۴۰	۱۰/۷	۶/۳
GP ۲	۵	۶۰	۱۳/۶	۷/۱

ژئوسل برابر ۱، برای ردیف دوم برابر ۷/۰° و برای ردیف‌های بعدی برابر ۳/۰° است. مقاومت نهایی به‌دست آمده از هر آزمایش به‌دست آمده و مؤلفه‌ی پاسیو طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه و مطابق رابطه‌ی ۱، مؤلفه‌ی اصطکاکی نیز بررسی شده است. نتایج محاسبات اخیر در جدول ۳ ارائه شده است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مطابق انتظار، مقاومت پاسیو بسیج شده، نقش مؤثری در مقاومت نهایی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مقایسه با مؤلفه‌ی اصطکاکی ایجاد کرده است. مؤلفه‌ی اصطکاکی بین ۲۵ تا ۳۵ درصد از مقاومت نهایی بیرون‌کشش را در خاک‌های ماسه‌یی و شنی دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ارتفاع ژئوسل، مقاومت پاسیو بیشتری در سلول‌ها ایجاد شده است، که تأثیر آن از افزایش اندازه‌ی ذرات بیشتر بوده است. به طور مثال، مقاومت پاسیو در مصالح ماسه‌یی با افزایش ارتفاع، از ۸/۸۷ به ۱۰/۴۴ کیلونیوتن افزایش یافته است؛ در حالی که این مقدار با افزایش اندازه‌ی ذرات، از ۸/۸۷ به ۹/۱ کیلونیوتن رسیده است. شایان ذکر است که برخلاف مکانیک خاک پایه، که نیروی پاسیو با توان ۲ ارتفاع رابطه دارد و افزایش ارتفاع تأثیر بسزایی در افزایش نیروی پاسیو دارد، در روش ذکر شده، تئوری تغییر ارتفاع فقط در پارامتر A_p مؤثر است. بنابراین تأثیر آن کمتر از روش‌های محاسباتی مکانیک خاک پایه خواهد بود. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع ژئوسل، مؤلفه‌ی اصطکاکی نیز افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان افزایش اصطکاکی در دو طرف لایه‌ی ژئوسل دانست.

ترتیب برابر ۱۳/۷ و ۱۵/۳ کیلونیوتن بوده است که به نسبت آزمایش مشابه تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال در خاک ماسه‌یی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش اندازه‌ی ذرات و نیز افزایش وزن مخصوص در یک چگالی نسبی ثابت، باعث افزایش نیروی پاسیو بسیج شده‌ی بیشتری در هر سلول ژئوسل می‌شود. اگرچه باید توجه داشت که بخشی از مقاومت ذکرشده‌ی بیرون‌کشش نهایی ناشی از اصطکاکی دانه‌های خاکی مصالح پُرکننده با دیواره‌های ژئوسل است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، اصطکاکی بین دانه‌های پُرکننده و خاک بالا و پایین لایه‌ی ژئوسل در مطالعات پیشین بررسی و نشان داده شده است که با بهبود اندرکنش بین مصالح پُرکننده و خاک اطراف، مؤلفه‌ی اصطکاکی افزایش می‌یابد. برای اندازه‌گیری سهم هر یک از مکانیزم‌های تسلیح ژئوسل از رابطه‌ی ۱ استفاده شده و مقاومت نهایی بیرون‌کشش (P) برابر مجموع مؤلفه‌ی افقی اصطکاکی بین ذرات (f_s) و مقاومت پاسیو بسیج شده در هر سلول ($\sum f_p$) است:

$$P = \sum f_s + \sum f_p \quad (1)$$

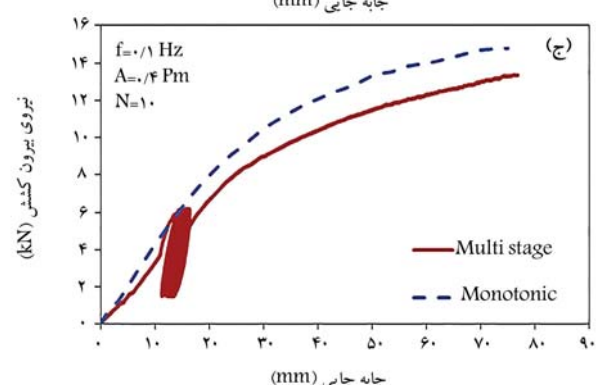
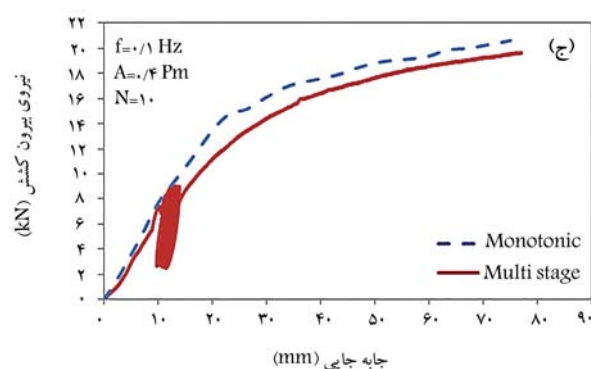
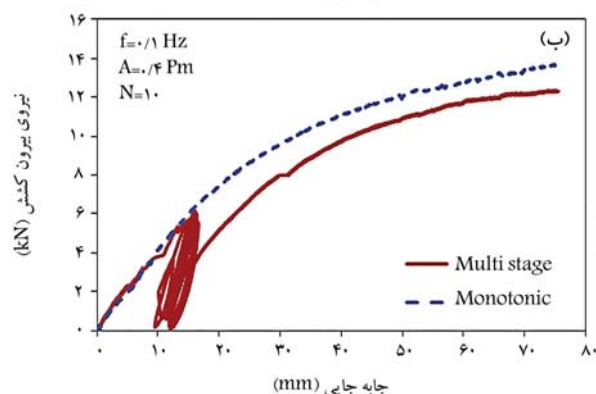
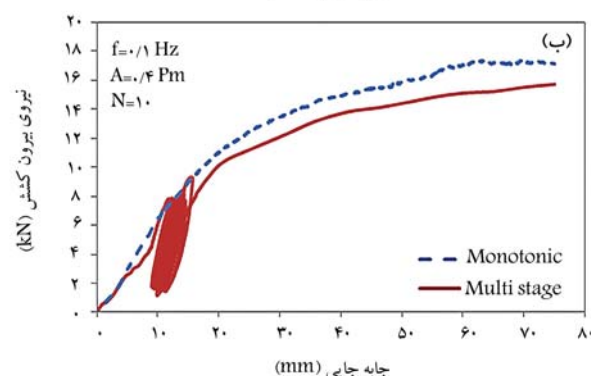
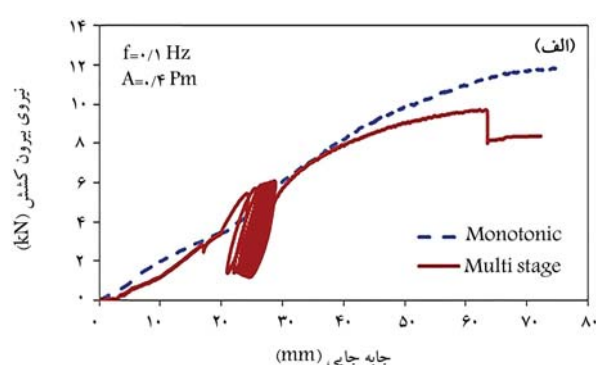
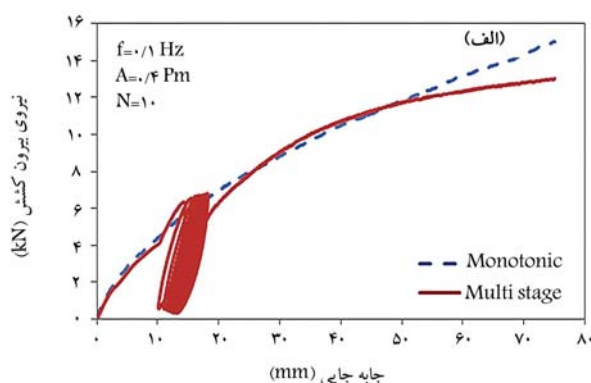
ایسیک و گورباز^۲ (۲۰۲۰)، یک روش تئوری برای محاسبه‌ی مقاومت پاسیو بسیج شده در هر سلول مطابق رابطه‌ی ۲ بیان کرده‌اند:

$$f_p = A_p \cdot K_P \cdot \sigma_v \cdot \alpha_p \cdot m_p \quad (2)$$

که در آن، σ_v تنش قائم، K_P ضریب فشار جانبی قائم، A_p مساحت مؤثر سلول که به صورت عرضی در مقابل مصالح پُرکننده قرار می‌گیرد و برابر ارتفاع ژئوسل ضرب در دو تا بعد ژئوسل (۲۶/۶ سانتی‌متر) است، α_p ضریب تصحیح مساحت مشارکت‌کننده در مقاومت پاسیو که مساوی ۳۳/۰° در تمام آزمایش‌ها فرض می‌شود و m_p ضریب بسیج‌کننده‌ی مقاومت پاسیو است که برای ردیف‌های اول سلول‌های

۲.۳. رفتار چندمرحله‌یی (استاتیکی، سیکیلی و پساوسیکیلی)

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب رفتار چندمرحله‌یی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مصالح ماسه‌یی و شنی تحت سربارهای ۲۰ و ۶۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها، ژئوسل‌ها در تمامی آزمایش‌ها به مقاومت نهایی کمتری نسبت به



شکل ۱۴. نتایج آزمایش چندمرحله‌ای تحت سربار ۶۰ کیلوپاسکال.

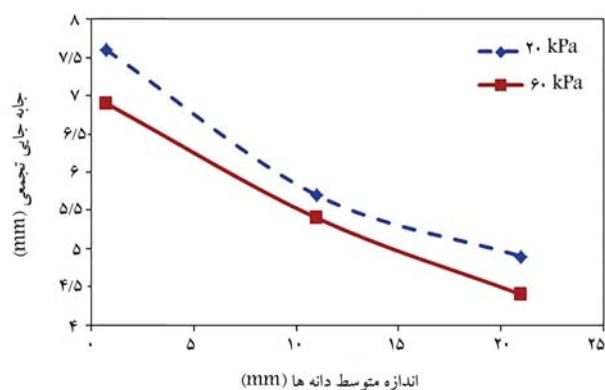
شکل ۱۳. نتایج آزمایش چند مرحله‌ای تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال.

نیروی بیرون‌کشش نمودارهای مذکور نشان می‌دهند که در آزمایش چندمرحله‌ای در ماسه، مقاومت نهایی بیرون‌کشش به‌دست آمده در آزمایش با نرخ ثابت تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال، ۱۵٪ کاهش یافته است. این میزان کاهش تحت فشار سربار ثابت، برای GP۱ و GP۲ به ترتیب برابر ۱۱ و ۹ درصد بوده است. به‌دلیل مقاومت برشی بیشتر، مصالح درشت‌دانه‌تر با مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با افزایش اندازه‌ی ذرات قفل و بست بین دانه‌ها در شرایط یکسان بارگذاری سیکلی سخت‌تر شکسته و ضعیف می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فشار سربار، اختلاف بین مقاومت نهایی به‌دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت و آزمایش چندمرحله‌ای، کاهش و مقاومت به‌دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت تحت فشار ۶۰ کیلوپاسکال نیز به ترتیب ۱۳، ۱۰، و ۵ درصد در ماسه، GP۱ و GP۲ کاهش یافته است؛ که نشان می‌دهد با افزایش سربار در یک مصالح خاکی مشخص، اندرکنش بین ژئوسل و خاک اطراف، سخت‌تر و در فاز سیکلی قفل و بست بین ذرات، کمتر شکسته شده است. علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد که در شکل ۱۴ الف، آزمایش با نرخ ثابت به سمت یک مقدار ثابت میل نکرده و کل نیروی بیرون‌کشش تا جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر بسیج

مقاومت نهایی به‌دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت (استاتیکی) رسیده‌اند. که می‌تواند به دلیل حرکت رفت و برگشتی نیرو در هنگام فاز سیکلی باشد که باعث شکسته و یا تضعیف شدن برخی از قفل و بست‌های بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با لایه‌های خاکی بالا و پایین ژئوسل شود که در نتیجه‌ی این شکسته و یا تضعیف شدن قفل و بست بین دانه‌ها، ژئوسل‌ها به مقاومت نهایی کمتری در فاز پس‌اسیکلی نسبت به مقاومت نهایی به‌دست آمده از آزمایش نرخ ثابت رسیده‌اند. در شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود که بار بیرون‌کشش در جابه‌جایی ۶۳ میلی‌متر، دچار یک افت شده است. سپس بار بیرون‌کشش در ادامه تا رسیدن به جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر با نیروی حدود ۸ کیلونیوتن ادامه یافته است. این نیروی ۸ کیلونیوتنی تقریباً برابر مؤلفه‌ی پاسیو محاسبه‌شده در جدول ۳ است. دلیل این امر می‌تواند کاهش مقاومت اصطکاکی در سطح مشترک مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و لایه‌های بالا و پایین ژئوسل باشد که در اثر شکسته شدن قفل و بست مصالح دانه‌ی در سطح مشترک ژئوسل با لایه‌های بالا و پایینی خود ایجاد شده است. در نهایت پس از رسیدن به جابه‌جایی ۶۳ میلی‌متر، فقط مؤلفه‌ی پاسیو به طور مؤثر در برابر نیروی بیرون‌کشش مشارکت کرده است.

جدول ۴. مقادیر محاسبه شده‌ی هر کدام از مؤلفه‌های بیرون‌کشش ژئوسل در آزمایش چند مرحله‌یی.

خاک	ارتفاع ژئوسل (cm)	تنش قائم (kPa)	$\sum f_p (kN)$	$f_s (kN)$
ماسه	۵	۲۰	۸/۸۷	۰/۲۳
ماسه	۵	۶۰	۹/۲	۲/۸
GP۱	۵	۲۰	۹/۱	۳/۶
GP۱	۵	۶۰	۱۱/۲	۴/۵۳
GP۲	۵	۲۰	۹/۶	۳/۷۲
GP۲	۵	۶۰	۱۳/۶	۵/۹۵



شکل ۱۵. تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها در جابه‌جایی تجمعی ایجاد شده.

است، جابه‌جایی دانه‌ها روی یکدیگر نیازمند نیروی بیرون‌کشش بیشتری است و در شرایط بارگذاری یکسان، جابه‌جایی تجمعی با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها و فشار سربار کمتر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، رفتار استاتیکی و چندمرحله‌یی بیرون‌کشش ژئوسل با استفاده از یک سری آزمایش‌های بیرون‌کشش بررسی شده و رفتارهای استاتیکی، سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها بررسی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوسل‌های موجود در بازار ایران استفاده شده است. ابعاد سلول‌های ژئوسل مطابق پروژه‌های انجام شده در کشور انتخاب شده است، تا بتوان از نتایج مطالعه‌ی حاضر در پروژه‌های عملی نیز استفاده کرد. با توجه به اینکه مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در طراحی و استفاده از آن‌ها در پروژه‌های خاک مسلح، اهمیت ویژه‌ی دارد؛ مطالعه‌ی حاضر می‌تواند کمک شایانی در این زمینه کند. اگرچه بررسی این موضوع با در نظر گرفتن همه‌ی آثار ممکن، مثل آثار مقیاس، نیازمند مطالعات بیشتری در این زمینه است. در نهایت بر طبق مطالعه‌ی حاضر، این نتایج به‌دست آمده است:

- ژئوسل‌ها دارای یک رفتار بیرون‌کشش سخت‌شونده هستند و مقاومت بیرون‌کشش در مراحل اولیه‌ی اعمال بار بیرون‌کشش با نرخ زیاد افزایش می‌یابد. دلیل این امر فعال شدن نیروی پاسیو درون سلول‌های ردیف اول ژئوسل است. به‌تدریج، نیروی بیرون‌کشش به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند که به دلیل فعال شدن نیروی پاسیو و مقاومت اصطکاکی بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با خاک اطراف در سلول‌های دیگر ژئوسل است. گسیختگی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها را می‌توان در لحظه‌یی عنوان کرد که ژئوسل تمام مؤلفه‌های مقاوم خود را در برابر نیروی بیرون‌کشش فعال کرده و دیگر ظرفیتی برای بسیج کردن نداشته و نمودار بار - جابه‌جایی ژئوسل به یک مقدار ثابت رسیده است.
- مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها با افزایش اندازه‌ی ذرات خاک به دلیل ایجاد نیروی پاسیو بیشتر و همین‌طور اصطکاک بیشتر با خاک اطراف، افزایش یافته است. روش تئوری نشان داد که سهم مقاومت پاسیو در مقاومت نهایی بیرون‌کشش بین ۶۵ تا ۷۵ درصد و مابقی آن، مربوط به مؤلفه‌ی اصطکاکی ایجادشده بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف است.

نشده است؛ در حالی که در آزمایش چندمرحله‌یی، نمودار به سمت شرایط پایدار میل کرده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش مقاومت اصطکاکی در هنگام اعمال تنش سیکلی دانست، که باعث شده است ظرفیت بیرون‌کشش ژئوسل کاهش یابد و نمونه به شرایط پایدار برسد.

برای بررسی اثر نیروی چندمرحله‌یی در مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل، مقادیر مؤلفه‌ی اصطکاکی و مقاومت پاسیو در انتهای هر آزمایش طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جدول‌های ۴ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که روش تئوری استفاده شده، مؤلفه‌ی پاسیو یکسانی برای هر دو آزمایش با نرخ ثابت و چندمرحله‌یی ارائه داده و فقط مؤلفه‌ی اصطکاکی تغییر کرده است. اگرچه اعمال نیروی چندمرحله‌یی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مؤلفه‌ی اصطکاکی داشته باشد، ولی این نیرو در چگالی نسبی مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل نیز تأثیرگذار است که می‌تواند موجب تغییر در مؤلفه‌ی پاسیو نیز بشود؛ که تغییر مذکور در روش تئوری استفاده شده ملاحظه نمی‌شود و مقادیر نیروی پاسیو یکسانی ارائه کرده است.

برای بررسی اثر نیروی چندمرحله‌یی در مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل، مقادیر مؤلفه‌ی اصطکاکی و مقاومت پاسیو در انتهای هر آزمایش طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جدول‌های ۴ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که روش تئوری استفاده شده، مؤلفه‌ی پاسیو یکسانی برای هر دو آزمایش با نرخ ثابت و چندمرحله‌یی ارائه داده و فقط مؤلفه‌ی اصطکاکی تغییر کرده است. اگرچه اعمال نیروی چندمرحله‌یی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مؤلفه‌ی اصطکاکی داشته باشد، ولی این نیرو در چگالی نسبی مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل نیز تأثیرگذار است که می‌تواند موجب تغییر در مؤلفه‌ی پاسیو نیز بشود که تغییر مذکور در روش تئوری استفاده شده ملاحظه نمی‌شود و مقادیر نیروی پاسیو یکسانی ارائه کرده است.

همچنین اندازه‌ی ذرات، جابه‌جایی تجمعی در انتهای فاز سیکلی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی تجمعی در هنگام فاز سیکلی با افزایش اندازه‌ی ذرات و فشار سربار کاهش یافته است. جابه‌جایی تجمعی مذکور در ماسه‌ی تحت فشار سربار ۲۰ کیلوپاسکال و با دامنه‌ی ۴۰ درصد، ۷/۶ میلی‌متر بوده و با افزایش فشار سربار به ۶۰ کیلوپاسکال، به ۶/۹ میلی‌متر کاهش یافته است. در حالی که شرایط بارگذاری یکسان بوده است، جابه‌جایی تجمعی ۷/۶ میلی‌متری در ماسه‌ها به ۵/۷ و ۴/۹ میلی‌متر در GP۱ و GP۲ رسیده است؛ که نشان می‌دهد در هنگام فاز سیکلی، چون با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها و فشار سربار، مقاومت برشی در سطح تماس مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف بیشتر شده

• میزان کاهش مقاومت پساسیقلی وابسته به اندازه‌ی ذرات خاک است. هر چه اندازه‌ی ذرات افزایش یافته است، قفل و بست بین دانه‌های خاک، بیشتر شده و در نتیجه مقاومت کمتری در هنگام اعمال تنش سیقلی از بین رفته و نهایتاً مقاومت نهایی بیرون‌کشش در فاز پساسیقلی به مقاومت به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت نزدیک‌تر شده است. همچنین اندازه‌ی ذرات، جابه‌جایی تجمعی ایجاد شده در هنگام اعمال بار سیقلی را تحت تأثیر قرار داده و با از بین رفتن بیشتر اصطکاک بین ذرات، قابلیت جابه‌جا شدن ژئوسل را افزایش داده است.

• در آزمایش چندهرچه‌ای مشاهده شد که مقاومت نهایی پساسیقلی از مقاومت نهایی به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت کمتر است و نتیجه گرفته شد که حرکت رفت و برگشتی نیروی بیرون‌کشش در هنگام فاز سیقلی باعث می‌شود که برخی از قفل و بست‌های بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف شکسته یا تضعیف شوند، که در نتیجه‌ی آن، مقاومت نهایی در فاز پساسیقلی کمتر خواهد شد. روش تئوری نشان داد که اگرچه اعمال نیروی چندهرچه‌ای می‌تواند در مؤلفه‌ی پاسیو مؤثر باشد، اما تأثیر آن در روش تئوریک اخیر مشاهده نمی‌شود.

پانوشته‌ها

1. Latha Manju &
2. Isik & Gurbaz

منابع (References)

1. Sridharan, A. "Bearing capacity improvement", G.V. Rao and G.V.V.S. Raju Engineering with Geosynthetics, Tata McGraw-Hill, New Dehli, pp. 175-196 (1990).
2. Bush, D.I., Jenner, C.G. and Bassett, R.H. "The design and construction of geocell foundation mattress supporting embankments over soft ground", *Geotext and Geomembr*, **9**(1), pp. 83-98 (1990).
3. Shiekh, I.R. and Shah, M.Y. "Experimental study on geocell reinforced base over dredged soil using static plate load", *International Journal of Pavement Research and Technology*, **13**, pp. 286-295 (2020).
4. Zhao, M.H., Zhang, L., Zou, X.J. and et al. "Research progress in two-direction composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles", *Chinese Journal of Highway and Transport*, **22**(1), pp. 1-10 (2009).
5. Manju, G.S. and Latha, M.G. "Interfacial friction properties of geocell reinforced sand", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **2**(1), pp. 25-31 (2013).
6. Tavakoli, G.T.M. and Motarjemi, F. "Interfacial properties of geocell reinforced granular soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(4), pp. 384-395 (2018).
7. Biabani, M.M., Indraratna, B. and Ngo, N.T. "Modeling of geocell reinforced sub ballast subjected to cyclic loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 489-503 (2016).
8. Isik, A. and Gurbaz, A. "Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils", *Geotext. Geomembr*, **48**(1), pp. 71-81 (2020).
9. Fakharian, K. and Pilban, A. "Pullout tests on diagonally enhanced geocells embedded in sand to improve load-deformation response subjected to significant planar tensile loads", *Geotextiles and Geomembranes*, (Article In Press) (2021).
10. Chen, R.H. and Chiu, Y.M. "Model tests of geocell retaining structures", *Geotextiles and Geomembrane*, **26**(1), pp. 56-70 (2008).
11. Latha, M.G. and Manju, G.S. "Seismic response of geocell retaining walls through shaking table tests", *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*, **2**(7), pp. 1-15 (2016).
12. ASTM D4253., *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibration Table*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2016).
13. ASTM D4254., *Standard Test mMethods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soil and Calculation of Relative Density*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2006).
14. ASTM D6706., "Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2001).
15. Moraci, N. and Cardile, G. "Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**, pp. 475-487 (2009).
16. Moraci, N. and Recalcatti, P. "Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(4), pp. 220-242 (2006).
17. Razzazan, S., Keshavarz, A. and Mosallanezhad, M. "Pullout behavior of polymeric strip in compacted dry granular soil under cyclic tensile load conditions", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10**(5), pp. 968-976 (2018).
18. Mahigir, A., Ardakani, A. and Hassanlourad, M. "Comparison between monotonic, cyclic and post cyclic pullout behavior of a PET geogrid embedded in clean sand and clayey sand", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **7**(10), pp. 1-15 (2021).

* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش های اصلی و زیربخش ها، نتیجه گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه -- با احتساب شکل و نمودار -- باشد.

* کلیه عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون های ۸/۵ سانتی متری آراسته می شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی متر با ضخامت کادر Apx و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا پسوند JPG یا Tif امکان پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه های لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با فرمت جنرال (عدد معمولی) ارائه شود (طبق شکل های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه منابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه ای (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forecasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, 4(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preformation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

راهنمای نگارش مقالات مجله علمی و پژوهشی

شریف

مجله علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه های پژوهش های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه ای مفید است. چاپ مقالات در مجله شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه های علمی و فنی بوده و در مجله دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه ای دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته علمی و فنی باشند.

M. Hassanlou Rad

hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

**Faculty of Technical and Engineering
Imam Khomeini International University
DOI:10.24200/J30.2022.59660.3065**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 121-130, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 January 2022; received in revised form 12 March 2022; accepted 15 March 2022.

Abstract

Geocell mattresses are one type of three-dimensional honeycomb soil reinforcements that is manufactured from polyethylene sheets using ultrasonically welded joints. This type of geosynthetics is commonly used to stabilize geotechnical problems in which the pullout failure is likely to occur. The present study has been conducted to evaluate the pullout behavior of a geocell by considering the effect of soil grain size. A series of 18 monotonic and 24 multistage geocell pullout tests were performed in sandy and gravelly soil. The obtained geocell pullout loads were divided into two components: passive and frictional resistance. A previously made theoretical approach was used to measure the mobilized frictional

and passive resistance components to evaluate the contribution of each mechanism. The results obtained from monotonic geocell pullout tests showed that the geocells exhibited hardening pullout behavior and the pullout failure occurred when the geocell material did not have any more pullout capacity to resist external load. Increases in the geocell height and soil grain size had significant effects on the passive component and it was seen that the contribution of geocell height developed passive resistance higher than the soil grain size. Furthermore, the multistage test results indicated that for removal of the geocell, the ultimate post-cyclic pullout load was less than the monotonic pullout load. This was the result of a reciprocating motion from loading caused by the interlock between the geocell infill soil and the surrounding material, which weakened and broke during the cyclic phase. As the coarseness of the soil increased, the interfacial strength increased. The theoretical approach did not single out the passive component between monotonic and multistage tests and the obtained passive resistance values were the same in these calculations. However, the cyclic loading could affect this component. Also, the soil particle size had a significant effect on the cumulative displacement during the cyclic phase.

Key Words: Geocell, pullout behavior, coarse grained soil, static test, dynamic test.

Abstract

Based on the past experience of engineers, welded connections usually do not perform well during earthquakes. Nevertheless, welding is used in all prequalified moment connections in chapter 10 of the National Building Code of Iran and as a result, there is a need for a fully-bolted prequalified moment connection for use in intermediate moment frames (IMF) and special moment frames (SMF). Thus, in this paper, a novel type of fully-bolted connection was investigated using T-shaped sections and web angles. First, the finite element model of the connection was developed in Abaqus software and validated with respect to experimental results. Next, using the concepts of Eurocode 3, section 1-8, a method for calculating the stiffness and strength of the connection was presented and was validated with the help of several experimental tests and finite element modeling. The results confirmed the proper performance of this method in predicting the stiffness of the connection. Since finite element modeling and experimental tests require a lot of cost and time, the proposed method can be a good option for engineers. Next, with the aim of parametric study on the connection, a large number of connections were designed based on capacity. Based on the component method, the connections stiffness was calculated using supervised machine learning techniques and multiple linear regression learning algorithm. Next, using the data obtained from the design and component method, a parametric study was performed on the connection and a simple formula was presented to calculate the initial stiffness of the connection. The results of this study show excellent regression performance in predicting connection stiffness. In addition, according to the obtained formula, the depth of the beam and diameter of the bolts connecting the T-shape flanges to the column flange have the most impact on the connection stiffness. Finally, the studied connection was classified according to its rigidity. The results showed that the studied connection acted as a fully-restrained connection and can be used in IMF and SMF systems.

Key Words: Component method, finite element, machine learning, bolted connection, T-shape sections, initial stiffness.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OXY-ACETYLENE WELDING AND ARC WELDING WITH STEEL, BRASS, AND BRONZE ELECTRODES

B. Shervani Tabar(corresponding author)

b.shervani@azaruniv.ac.ir

S. Enteghami Mayan

Shahab.ss349@yahoo.com

A. Sadeghi

a.sadeghi@azaruniv.ac.ir

Faculty of Engineering

Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz

DOI:10.24200/J30.2022.59572.3061

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 111-119, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 29 December 2021; received in revised form 12 March 2022; accepted 25 April 2022.

Abstract

To consider the importance of avoiding corrosion of weld metal under various environmental conditions, the investigation into the efficiency of different welding methods with different types of electrodes will be inevitable. In this paper, the strength and compatibility of various welding methods were experimentally investigated considering four welding types, including arc welding with phosphor bronze electrode, arc welding with steel electrode, oxy-acetylene welding with bronze electrode, and oxy-acetylene welding with brass electrode. In this regard, first, the material properties of the base metal were determined by tensile testing and then, the behaviors of 46 test samples were examined under three loading conditions of tensile, shear, and bending. Investigation of the experimental results showed that with an acceptable approximation, the strength of arc welding with steel electrode could be considered the same at all thicknesses and the effect of thickness on the tensile strength of the weld could be ignored. While the plate thickness has a remarkable effect on the quality of the oxy-acetylene welding. Also, the results of experiments showed that arc welding with steel electrodes in different types of samples had higher strength than other three types of welding. Then, the strength of arc welding with phosphor bronze electrode was in the second grade.

Key Words: Oxy-acetylene welding, arc welding, bronze electrode, steel electrode, brass electrode.

EVALUATION OF THE STATIC AND MULTISTAGE GEOCELL PULLOUT BEHAVIOR IN COARSE GRAINED SOIL

A. Namaei-Kohal

namaeiali@yahoo.com

A.R. Ardakani(corresponding author)

a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

model for prediction of different crack types and different imaging conditions.

Key Words: Structural health monitoring, deep learning, computer vision, machine learning, crack detection.

ESTIMATION OF THE PEAK RESPONSE OF NONLINEAR SYSTEMS UNDER THE EFFECT OF NEAR-FIELD DESIGN SPECTRUM USING EQUIVALENT LINEARIZATION METHODS

M.R. Salimi(corresponding author)

mr.salimi@uok.ac.ir

M. Baizidi

mehran21day@gmail.com

K. Nobakht Vakili

k.vakili@uok.ac.ir

A. Yazdani

a.yazdani@uok.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

University of Kurdistan

DOI:10.2400/J30.2022.59600.3063

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 89-98, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 1 January 2022; received in revised form 18 April 2022; accepted 15 May 2022.

Abstract

One of the important issues in performance-based earthquake engineering is the accurate estimation of the response statistics of nonlinear systems under seismic excitation. In this study, the near-field effects contained in the building design regulations against earthquakes (Standard No. 2800, fourth edition) are investigated on the nonlinear response of single degree of freedom systems with bilinear hysteretic restoring force characteristics. Near-field effects are presented in the Standard No. 2800 as spectral correction factor "N" in different seismicity regions. In this study, the site is located in a very high-seismicity zone and the ground type is considered as type II. Second- and third-order linearization methods are used to estimate the response of nonlinear systems. These methods are applied to derive equivalent linear properties. To achieve research goals, it is necessary to represent the input excitation as a quasi-stationary stochastic process compatible with target elastic design spectrum. In this regard, an effective numerical method in the field of random vibrations was used to determine

the response spectrum compatible power spectra. After calculating the equivalent parameters related to linearization methods, random vibration theory and time history analysis approaches within the linear range were used to calculate the response of equivalent linear systems. In order to validate the results, the response values obtained from equivalent linearization methods for both approaches were compared with the results of nonlinear time history analysis (NTHA). For this purpose, 250 artificial non-stationary records compatible with two modes of the target spectrum were used to provide reasonable estimates of the peak response of the bilinear hysteretic systems. Artificial records were generated using simulation methods in the field of random vibrations by considering specified envelope functions and power spectral density. According to the results of this study, the second-order linearization method has insufficient accuracy in estimating the response of nonlinear systems under severe excitation. As the natural period of the systems increases, the discrepancy between the results of the equivalent linear system and the results of NTHA increases. Moreover, the good agreement between the third-order linearization results and the results of NTHA indicates the high efficiency of this method in estimating the response of nonlinear systems under the near field excitation.

Key Words: Random vibration, near-field effect, equivalent linearization method, power spectrum, bilinear hysteretic .

NUMERICAL STUDY OF A NOVEL BOLTED MOMENT CONNECTION FOR THE BEAM TO COLUMN CONNECTION USING T-SHAPES AND WEB ANGLE SECTIONS

M. Darrehzereshki

m.darrehzereshki@ut.ac.ir

A.R. Ghiami Azad(corresponding author)

rghiami@ut.ac.ir

M. Ghassemieh

m.ghassemieh@ut.ac.ir

School of Civil Engineering

College of Engineering

University of Tehran

DOI:10.24200/J30.2022.59751.3069

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 99-110, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 5 February 2022; received in revised form 6 April 2022; accepted 15 April 2022.

- Received 15 December 2021; received in revised form 23 February 2022; accepted 12 April 2022.

Abstract

Nowadays, the issue of internet taxis and, in the general definition of the cooperative economy, has become an essential issue in people's daily lives. Internet taxis effectively affect the choice of daily travel, as they can even be considered a separate mode of transportation. Initially, this system was assumed to reduce the use of private cars, which would reduce traffic, but it was not felt over time in the public, and in the past literature, that has been generally addressed. There were different opinions. The study details the effect of these two modes of transportation, internet taxis, and private cars. This research has been done by designing the data collection process through a questionnaire designed and compiled for this purpose by gathering data. The questionnaire was designed in four sections, and after gathering the questionnaires, which were done online, 681 individuals answered the questionnaire, and after validating those responses, 598 data was used for modeling. A discrete logit model was used to investigate the effect of internet taxis on people's use of private cars. The results show that most people use their personal vehicles more than internet taxis after the advent of it. Another result of this research is that people with less dependence on their private cars use their vehicles more after the appearance of internet taxis. Furthermore, People with a Ph.D. use their vehicles less than others after the advent of Internet taxis. The results also showed that by changing the level of education of individuals from diploma, bachelor, and master's to Ph.D., the probability of choosing internet taxis increases, and the probability of selecting a personal car decreases. This indicates the effect of education on internet taxi choice.

This study helps managers and policymakers to determine and amend the rules according to the presented results and study the type of attitudes of individuals and their impact on the choice of travel method and the impact of internet taxis as an alternative to private vehicles on the car dependency. This study determines the characteristics of people who tend to reduce their car dependency by introducing an alternative method and encouraging them to use an alternative mode of transportation. This helps policymakers make the necessary choices, and thus, it results in a sustainable system.

Key Words: Internet taxis, car dependency, designing the data collection process.

CRACK DETECTION IN CONCRETE MEMBERS USING

ENCODER-DECODER MODELS BASED ON DEEP LEARNING

M. Mousavi

mohammad.mousavi@sharif.edu

A. Bakhshi (corresponding author)

bakhshi@sharif.edu

Dept. of Civil Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J30.2022.59496.3055

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 79-88, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 18 december 2021; received in revised form 6 April 2022; accepted 12 April 2022.

Abstract

Concrete is one of the major materials used in modern structures. Concrete members are used as the main structural parts of various infrastructures such as dams, tunnels, bridges, and skyscrapers. However, this wide application requires some accurate and efficient inspection system during the structure's life. Cracks are classified as the earliest symptoms of degradation in concrete members. Although manual inspection is a common method in structural health monitoring and crack detection in civil engineering structures, serious limitations caused by implementing human resources degraded the efficiency of the proposed method. In recent years, many studies tried to automate the inspection of these structures by using different sensors such as Ultrasonic and Piezo-electric sensors, seeming to be costly and insufficient in some cases. With recent development in computer vision techniques, especially deep-learning-based methods, there is an opportunity for researchers to come with autonomous visual inspection systems for structural health monitoring of concrete members. This study proposes a deep-learning-based model for automatic crack detection on the concrete surface. The proposed model is an encoder-decoder model that uses ResNet101, a well-known convolutional neural network, as the encoder and the U-Net's expansion path as the decoder. To minimize the training time and maximize the accuracy, we use transfer learning in our approach. The dataset implemented for this study includes 458 images of the cracked surface of concrete members which come with corresponding segmentation label masks. Data augmentation techniques strongly increased the robustness of the proposed model encountering different imaging conditions and noises. The proposed model was trained using the backpropagation algorithm and it achieved 99.39% precision and 84.99% recall, which led to a 91.38% F1 score on the unseen test dataset. The accuracy and speed of the present model outperform the existing methods and different crack types composing the dataset help generalize the

© Sharif University of Technology

- Received 12 December 2021; received in revised form 12 February 2022; accepted 12 March 2022.

Abstract

Coarse particle motion behavior plays a crucial role in sediment and hydraulic engineering, though its physics is still not fully understood. Disregarding the inherently stochastic nature of the sediment transport leads to various equations for bedload transport which are now being challenged due to their poor results. By applying sensors, like accelerometers and gyroscopes, particle transport physics could be carried out in a more scrutinized approach. In this study, an instrumented synthetic particle ("so-called" the smart particle) was designed and applied (with different densities) in sets of laboratory experiments that covered a hydraulics domain between low transport regime (near- and above-threshold) and higher transport regime (above threshold with a relatively high Reynolds number) conditions. Using the instrumented particle (smart-particle) could bring opportunities to learn more about the physics of the bed particle transport in rivers for different regimes and could bring data in hand for instantaneous particle changes throughout time (near 0.004 seconds used for data sampling). Therefore, the kinetic energy as a parameter that delivers the behavior of particle energy interaction between the exposed particle and its surroundings (flow and the bed particles) was chosen to be studied. Since the dynamic features of the particle in transport are stochastic, the probability distribution functions, which could describe the particle behavior, were selected (Weibull, Lognormal, Normal, and Gamma distributions). In this case, it was shown that the Weibull distribution best described the particle kinetic energy in lower transport regimes, while for a higher transport regime, the Log-normal distribution worked better. Furthermore, the energy signals of the particle moving throughout the flume for different transport regimes were derived, and it was shown that the average energy gain and loss of the particle decreased exponentially as the particle Reynolds number increased. The presented results here could also be applied in similar hydraulic conditions in eco-hydraulic topics, specifically macro-plastic movement as bedload in river courses and the Aeolian research.

Key Words: Sediment transport, smart-particle, stochastic behavior of particle motion, transport dynamics.

MODELING FACTORS AFFECTING UTILITY TO USE INTERNET TAXI UNDER COVID-19

A. Kheiri

asef_kheyri@modares.ac.ir

A.R. Mamdoohi(corresponding author)

armamdoohi@modares.ac.ir

**Faculty of Civil and Environmental Engineering
Tarbiat Modares University**

DOI:10.24200/J30.2022.59510.3057

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 55-66, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 December 2021; received in revised form 9 April 2022; accepted 25 April 2022.

Abstract

Given the continuity of Covid-19, the urban transportation system has undergone remarkable changes. Besides, increased risks related to crowded places together with social distancing measures in public and shared transportation probably affect the usual choices of vehicles by passengers. In the present article, by using questionnaire design and online questionnaire in Tehran, attempts have been made to estimate the use of internet taxis by people during the pandemic. To this end, in order to specify the factors affecting the use of internet taxis, ordered and dual logit models were established using 233 data obtained from online inquiries and based on the amount of use and changes in using them before and after Covid-19. The results indicate that Covid-19 pandemic has had a negative effect on the use of internet taxis. Increasing the petrol prices and the lack of parking places at the destination have positively encouraged the use of internet taxis. Moreover, people who own a car use internet taxi less than those who do not. The number of these people not using internet taxis has been also reduced after the pandemic.

Key Words: Covid-19, ride hailing, travel demand, ordered logit model, binary logit model.

BEHAVIORAL MODELING OF THE IMPACT OF INTERNET TAXIS ON THE CAR DEPENDENCY

S.R. Esmailzadeh

e_seyyedreza@modares.ac.ir

A.R. Mamdoohi(corresponding author)

armamdoohi@modares.ac.ir

**Faculty of Civil and Environmental Engineering
Tarbiat Modares University**

DOI:10.24200/J30.2022.59516.3058

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 67-77, Original Article

© Sharif University of Technology

Moreover, the evaluation of the related seismic resilience for all the studied structures proved that the diagrid systems had a great ability to resist a specific limit of damage. It is demonstrated that implementing triangular patterns in the external framed panels of the seismic-resistant skeleton would decrease the estimated amount for the qualified deterioration effects in structures after a strong earthquake. In this regard, upon increasing the skeletal angles of inclined elements, the effect of diagonal configuration on controlling the occurrence probability of higher performance limit states would be effectively decreased. This research results indicate that the geometric pattern of diagrid elements is able to increase the value of the skeletal hard resilience component and relatively exceed the capability of structural stability against near-field ground motions.

Key Words: Diagrid structure, fragility curve, incremental dynamic analysis, seismic resilience, robustness.

EVALUATION OF BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL WITH IRREGULAR OPENING DUE TO NEAR-FAULT EARTHQUAKE

A. Arabzadeh(corresponding author)

arabzade@modares.ac.ir

A.P. Gholamrezaie

amirpooya.gh95@gmail.com

Faculty of Civil and Environmental

Tarbiat Modares University

DOI:10.24200/J30.2022.59070.3023

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 29-41, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 6 November 2021; received in revised form 8 February 2022; accepted 12 March 2022.

Abstract

The increasing need for tall buildings seems to be more prominent than ever with the growth of urbanization and the reduction of urban space. The seismic performance of tall buildings against earthquake and wind forces is known as their main feature. Therefore, these structures should benefit from sufficient strength and rigidity against these forces. Shear wall is recognized as one of the solutions for the stability of the structures against earthquake and wind forces. In this paper, two 5- and 10-story buildings were designed in ETABS software, and shear walls were modeled in Abaqus software to gain a comprehensive understanding of the behavior

of shear walls with irregular openings under near-fault earthquakes. The examined structure is built in the city of Tehran with high seismicity. The height of the stories is 3.2 m in both models. The soil type, the design basic acceleration, and the importance factor of the structure were set at types II, 0.35, and 1, respectively. The structure has a system in two directions (medium reinforced concrete bending frame + special reinforced concrete shear wall). The response modification coefficient, deflection amplification factor, and over strength factor are equal to 6.5, 5, and 2.5, respectively. Aguda and Arabzadeh laboratory models were then used for validation. The results of changing the position parameters and the dimensions of openings revealed that the base shear, relative displacement, and absorbed energy increased for both models by increasing the horizontal distance between the two openings. The 10-story model showed more reduction in the base shear than the 5-story model upon creating an opening at the wall base. The base shear of the 5-story model increased by eliminating the opening on the first story, but it barely affected the 10-story model. In the largest opening area, the base shear exhibited a much smaller decrease in the sample with different opening widths than that with different opening heights.

Key Words: Shear wall, irregular opening, near-fault, base shear.

SMART-PARTICLE APPLICATION FOR DESCRIBING THE PROBABILISTIC PARTICLE TRANSPORT DYNAMICS ABOVE THRESHOLD CONDITIONS

H. Farhadi

farhadi.edu@gmail.com;mailto:shsh70@yahoo.com

K. Esmaili (corresponding author)

esmaili@um.ac.ir

Dept. of Water Science and Engineering

Ferdowsi University of Mashhad

M. Valyrakis

manousos.valyrakis@glasgow.ac.uk

School of Engineering

University of Glasgow, United Kingdom

A. Zahiri

zahiri.areza@gmail.com

Dept. of Water Engineering

Gorgan University of agricultural sciences and natural resources, Gorgan

DOI:10.24200/J30.2022.59457.3050

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 43-53, Original Article

by gender (girl and boy) and time position (before and after the Covid-19 virus epidemic) showed that the parameter of the goodness of fit (McFadden) for all models is greater than 0.16 and less than 0.27. In other words, the independent variables in these models can significantly show the changes in the dependent variable. The results showed that the characteristics of the student household, the parents' travel mode on work trips, and the perception of the distance between home and school affect the utility of choosing active travel modes before the Covid-19 virus epidemic. Also, the perceptual variables of the student parents towards the Covid-19 virus epidemic were significant only in the model for boys. Moreover, having a large family is the only variable with a positive effect on the choice of active travel modes and increases the probability of choosing active travel modes by up to 20%. Also, having more than two passenger cars at home has the most negative effect on the dependent variable and reduces the probability of choosing active travel methods by 31%.

Key Words: Active travel mode, gender, Covid19 pandemic, logit model.

SEISMIC RESILIENCE ANALYSIS OF HIGH-RISE DIAGRID STRUCTURES WITH VARIOUS SKELETAL CONFIGURATIONS BASED ON ROBUSTNESS CRITERION

M. Roshani

mahyar_roshani@yahoo.com

A. Meshkat-Dini (corresponding author)

meshkat@khu.ac.ir

A. Massumi

massumi@khu.ac.ir

Faculty of Engineering

Kharazmi University

DOI:10.24200/J30.2022.58867.3012

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 15-28, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 September 2021; received in revised form 18 January 2022; accepted 12 March 2022.

Abstract

Evaluation of the fragility characteristic and its related parameters is an efficient method to assess the seismic performance of structures subjected to earthquake tremors. The probability of exceeding limit state criteria for structural performance associated with a conceptual lemma is usually considered and numerically

illustrated as a function of seismic intensity to be used in preparing the fragility curves. By implementing a statistical distribution for preparing the fragility curves, the evaluation process of the vulnerability of structures and its related probable collapse estimation will be available. The concept of resilience is introduced as the ability of structures to reduce the probability of any exceeding performance level over control time. The resilience criterion is an important concept in conjunction with various disaster management processes, in which the structural capability to sustain skeletal stability is determined during strong ground motions. Based on comprehensive researches, there are essential factors that must be considered to establish an effective implementation for the seismic resilience lemma. The aforementioned essential factors are entitled as robustness, resourcefulness, redundancy, and rapidity.

In this paper, the conceptualization of the structural resilience was assessed for three studied diagrid structural systems. Moreover, there is a basic studied model comprising a full bundled tube skeleton which has been used for performing all numerical comparisons among the seismic response parameters. The effect of the geometrical configuration of the perimeter diagonal beam-column elements on the seismic resilience lemma was evaluated through numerical explanations due to the released fragility curves. The three studied 24-story diagrid structures were considered with uniform geometric configurations and internal bundled flexural cellules, which form a hybrid resistant skeleton. The uniform diagonal angles for diagrid models were considered 49°, 67°, and 74° respectively. Several nonlinear time history (NTHA) and incremental dynamic analyses (IDA) were performed on the four studied 24-story structural models under near-field ground motions with various directivity effects. The probability of the exceeding performance limit states for the studied structures was calculated based on the FEMA provisions. The assumed performance levels in preparing fragility curves included the immediate occupancy (IO), the life safety (LS), the collapse prevention (CP), and the probabilistic global instability (GI) indices. Also, the robustness of seismic resilience for the studied structures was determined according to the proposed formulation of the damage function as reported by MCEER.

The results obtained from conducting nonlinear time history and incremental dynamic analyses indicate that the assumed geometric pattern for the perimeter inclined elements would relatively reduce the maximum inter-story drift and increase the collapse capacity of the diagrid structures. In addition, the definition of large angles for diagonal elements can increase the probability of the seismic performance levels to be higher than the L.S. criterion. The values of the robustness parameter for the studied diagrid structures with skeletal angles of 49°, 67°, 74° and also the studied bundled tube model were obtained as 95.9, 91.7, 88.6, and 85.1, respectively.

Abstracts of Papers in English

EVALUATION THE EFFECTS OF THE COVID-19 PANDEMIC ON CHOOSING ACTIVE TRAVEL MODES

M. H. Mirnaseri

naserihadi1996@gmail.com

Faculty of Civil Engineering

**Architecture and Art, Islamic Azad University
Science and Research Branch**

M. H. Dehnad (corresponding author)

m.dehnad@qom.ac.ir

Faculty of Engineering

University of Qom

A. Naderan

naderan@srbiau.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

**Architecture and Art, Islamic Azad University
Science and Research Branch**

DOI:10.24200/J30.2022.58413.2976

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 2.2, Page 3-14, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 4 July 2021; received in revised form 6 April 2022; accepted 15 May 2022.

Abstract

Due to simplicity, economy, and the positive effects on traffic parameters and characteristics related to personal and social health, active travel modes can play an important role in intra-city movements. However, with the outbreak of the Covid-19 virus, people's travel mode choice behavior changed. In other words, some people have changed their travel modes due to concerns about being infected with the virus, which can lead to a change in their travel modes in the long term. As one of the most vulnerable groups in the Covid-19 virus epidemic, students, with a significant share of their travels in intra-city movements, should be given more attention. Therefore, it is necessary to examine how the behavior of students' active travel choices will change as a result of the Covid-19 virus epidemic. To do this, a sample of 267 boys and 546 girls was used based on a study-based questionnaire in Qom in 1399. The results of logit models (choosing and not choosing active travel modes)

Civil Engineering

The logo of Sharif University of Technology, featuring the word "Sharif" in a bold, stylized, black font.

Summer
2022

Editor-in-Chief: Mohsen Ghaemian

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, “**Sharif**” publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN

Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983

Web: <http://journal.sharif.ir/> [http:// www. globalsciencejournals.com](http://www.globalsciencejournals.com)

E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

- 3 **EVALUATION THE EFFECTS OF THE COVID-19 PANDEMIC ON CHOOSING ACTIVE TRAVEL MODES**
M.H. Mirnaseri, M.H. Dehnad and A. Naderan
- 15 **SEISMIC RESILIENCE ANALYSIS OF HIGH-RISE DIAGRID STRUCTURES WITH VARIOUS SKELETAL CONFIGURATIONS BASED ON ROBUSTNESS CRITERION**
M. Roshani, A. Meshkat-Dini and A. Massumi
- 29 **EVALUATION OF BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL WITH IRREGULAR OPENING DUE TO NEAR-FAULT EARTHQUAKE**
A. Arabzadeh and A.P. Gholamrezaie
- 43 **SMART-PARTICLE APPLICATION FOR DESCRIBING THE PROBABILISTIC PARTICLE TRANSPORT DYNAMICS ABOVE THRESHOLD CONDITIONS**
H. Farhadi, K. Esmaili, M. Valyrakis and A. Zahiri
- 55 **MODELING FACTORS AFFECTING UTILITY TO USE INTERNET TAXI UNDER COVID-19**
A. Kheiri and A.R. Mamdoohi
- 67 **BEHAVIORAL MODELING OF THE IMPACT OF INTERNET TAXIS ON THE CAR DEPENDENCY**
S.R. Esmailzadeh and A.R. Mamdoohi
- 79 **CRACK DETECTION IN CONCRETE MEMBERS USING ENCODER-DECODER MODELS BASED ON DEEP LEARNING**
M. Mousavi and A. Bakhshi
- 89 **ESTIMATION OF THE PEAK RESPONSE OF NONLINEAR SYSTEMS UNDER THE EFFECT OF NEAR-FIELD DESIGN SPECTRUM USING EQUIVALENT LINEARIZATION METHODS**
M.R. Salimi, M. Baizidi, K. Nobakht Vakili and A. Yazdani
- 99 **NUMERICAL STUDY OF A NOVEL BOLTED MOMENT CONNECTION FOR THE BEAM TO COLUMN CONNECTION USING T-SHAPES AND WEB ANGLE SECTIONS**
M. Darrehzereshki, A.R. Ghiami Azad and M. Ghassemieh
- 111 **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OXY-ACETYLENE WELDING AND ARC WELDING WITH STEEL, BRASS, AND BRONZE ELECTRODES**
B. Shervani Tabar, S. Enteghami Mayan and A. Sadeghi
- 121 **EVALUATION OF THE STATIC AND MULTISTAGE GEOCELL PULLOUT BEHAVIOR IN COARSE GRAINED SOIL**
A. Namaei-Kohal, A.R. Ardakani and M. Hassanlou Rad

APPENDIX

- 139 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**