دوره‌ی ۲ – ۳۸
شماره‌ی ۴/۲
فصلنامه
زمستان
۱۴۰۱
۴/۲

مهندسی عمران شریف

مقالات پژوهشی:

- توسعه روشی ترکیبی از مدل‌سازی نیروی اجتماعی و شبیه‌سازی رویداد گسسته برای بهینه‌سازی راندمان تولید در ساخت‌وساز
  مهدی نعیمی‌راد و مجتبی مغربی
- تعیین توابع پتانسیل مسائل ترموالاستودینامیک برای محیط‌های مدرج تابعی همسانگرد جانبی
  سیاوش پناهی و بهرام نوائی‌نیا
- استخراج ویژگی مقاوم به نویز با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد
  سید امیرحسین اصفهانی، هاشم شریعتمدار و علیرضا انتظامی
- بررسی بارهای کمانشی تیرهای مدرج تابعی جدارنازک قوطی‌شکل تحت بارگذاری محوری
  وحید میرحاجی، رضا جهانگیری و علی نادری
- شناسایی و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از مشخصات مودال و شاخص تشخیصی مبتنی بر شکل‌های مود
  محتشم خان احمدی، مجید پورامینیان، حمید محمدی گرفمی و بهزاد دژکام
- تخمین عرض مؤثر دیوارهای برشی بتنی L– شکل با استفاده از روش رگرسیون‌گیری EPR
  هاتف عبدوس، علیرضا خالو و محمد طبیعی

یادداشت فنی:

- بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مسجدسلیمان)
  فرشته سلطانی افارانی و نوید خیاط
- ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌های ساخت از منظر ذی‌نفعان
  سید علیرضا فاطمی، اقبال شاکری و وحید شاه‌حسینی

مهندسی عمران شریف

Civil Engineering SHARIF

۴/۲
4.2

Civil Engineering

Sharif

Volume 38 - 2
Number 4.2
Quarterly
Winter
2023
4.2

ISSN 2676-4768

ARTICLES:

- Development of a Hybrid Method of Social Force Modeling and Discrete Event Simulation to Optimize Productivity of Construction
  M. Naeimirad and M. Maghrebi
- Potential Functions of Thermoelastodynamic Problems for Transversely Isotropic Functional Graded Materials
  S. Panahi and B. Navayi Neya
- Robust-to-Noise Feature Extraction Via Generalization of Correlation Relationship in the Frequency Domain
  S.A.H. Esfehani, H. Shariatmadar and A. Entezami
- Investigation of Buckling Behavior of Functionally Graded Thin-Walled Box Beams Under Axial Loading
  V. Mirhaji, R. Jahangiri and A. Naderi
- Damage Detection and Identification in a Column Under the Effect of Axial Load Using Modal Properties and Mode Shape-Based Detection Index
  M. Khanahmadi, M. Pouraminian, H. Mohammady Garfamy and B. Dezhkam
- Effective width Estimation of L-Shaped RC Shear Walls Using EPR Algorithm
  H. Abdoos, A. R. Khaloo and M. Tabiee

RESEARCH NOTES:

- Experimental Investigation of Strength and Microstructural Behavior Variations of Oil Contaminated Clay (Area: Masjedsoleyman)
  F. Soltani Afarani and N. Khayat
- Evaluation of Key Performance Indicators from the Perspective of Stakeholders in Construction Projects
  S.A. Fatemi, E.Shakeri and V. Shahhosseini

به نام خدا

مهندسی عمران

شریف

دوره‌ی ۲-۳۸
شماره‌ی ۴٫۲
زمستان
۱۴۰۱

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف
مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی
سردبیر: دکتر محسن قائمیان
سردبیرهیات‌تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی
مدیر اجرایی: پریسا مروتی
مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف‌خان

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار
حروف‌چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی
صفحه‌آرایی: غزل احمدی میرقائد
امور اجرایی: شیما آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا
طراح لوگو: زنده‌یاد مرتضی ممیز
طرح روی جلد و ساختار صفحه‌آرایی: مصطفی اسداللهی
نظارت فنّی 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 مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳-۶۶۰۰۵۴۱۹
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

هیأت تحریریه

دکتر بیتا آیتی
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
دکتر همایون استکانچی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر فرهاد بهنام فر
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر علی پاک
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر مسعود تجریشی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر وهب توفیق
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر حسن حاجی کاظمی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر امیررضا خویی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
دکتر محمد دلنواز
دانشکده فنی و مهندسی ، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی
دکتر حسین رحامی
دانشکده علوم مهندسی، 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 دبیرشهید رجایی
دکتر حسن میرزابزرگ
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
دکتر علی نورزاد
دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دکتر جواد واثقی امیری
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دکتر ابوالحسن وفائی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه‌ی تخصصی

• **سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی**
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احمد ابریشم‌چی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانچی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افشار
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه علم و صنعت ایران

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

دکتر حسین پورزاهدی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

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

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

دکتر حسن حاجی کاظمی
استاد دانشکده‌ی مهندسی ـ گروه مهندسی عمران ـ دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سیدمحسن حائری
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا خویی
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

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

دکتر سیدمهدی زهرایی
دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران ـ دانشگاه تهران

دکتر محمدمهدی سعادت‌پور
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه باهنرکرمان

دکتر ناصر طالب بیدختی
استاد دانشکده‌ی مهندسی ـ بخش مهندسی عمران ـ دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی
استاد دانشکده‌ی مهندسی ـ بخش مهندسی عمران ـ دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز
استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران ـ دانشگاه تهران

دکتر محمدتقی کاظمی
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه
استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمجدالدین میرمحمدحسینی
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدشهاب الدین یثربی
دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست ـ دانشگاه تربیت مدرس

هیأت مشاوران

دکتر هانی اربابی
دانشکده‌ی هنر و معماری ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر مرتضی اسکندری قادری
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر علیرضا باقری
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر حمید بایسته
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر حسین پرستش
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه علم و صنعت

دکتر محمد سیروس پاکباز
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه شهیدچمران اهواز

دکتر مجید پرجمی جلالی
دانشکده‌ی معماری ـ دانشگاه تهران

دکتر عباس حق‌الهی
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سید مهدی حسینیان
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه بوعلی‌سینا

دکتر حامد خضرزاده
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر امیرحسن رضایی فرعی
دانشکده‌ی فنی و مهندسی ـ دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر مصطفی رضوانی
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر غلامرضا زمانی اهری
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه ارومیه

دکتر یعقوب علیپوری
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر جعفر عسگری
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر مجید قلهکی
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ دانشگاه سمنان

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

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۳ **توسعه روشی ترکیبی از مدل‌سازی نیروی اجتماعی و شبیه‌سازی رویداد گسسته برای بهینه‌سازی راندمان تولید در ساخت‌وساز**
مهدی نعیمی‌راد و مجتبی مغربی

۱۵ **تعیین توابع پتانسیل مسائل ترموالاستودینامیک برای محیط‌های مدرج تابعی همسانگرد جانبی**
سیاوش پناهی و بهرام نوائی‌نیا

۲۵ **استخراج ویژگی مقاوم به نویز با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد**
سید امیرحسین اصفهانی، هاشم شریعتمدار و علیرضا انتظامی

۳۷ **بررسی بارهای کمانشی تیرهای مدرج تابعی جدارنازک قوطی‌شکل تحت بارگذاری محوری**
وحید میرحاجی، رضا جهانگیری و علی نادری

۵۳ **شناسایی و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از مشخصات مودال و شاخص تشخیصی مبتنی بر شکل‌های مود**
محتشم خان احمدی، مجید پورامینیان، حمید محمدی گرفمی و بهزاد دژکام

۶۳ **تخمین عرض مؤثر دیوارهای برشی بتنی L- شکل با استفاده از روش رگرسیون‌گیری EPR**
هاتف عبدوس، علیرضا خالو و محمد طبیعی

یادداشت فنّی:

۷۳ **بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مسجدسلیمان)**
فرشته سلطانی افارانی و نوید خیاط

۸۳ **ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌های ساخت از منظر ذی‌نفعان**
سید علیرضا فاطمی، اقبال شاکری و وحید شاه‌حسینی

ضمائم:

۱۰۰ **چکیده مقالات به انگلیسی**

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۳-۱۴، (پژوهشی)

Original Article

توسعه روشی ترکیبی از مدل‌سازی نیروی اجتماعی و شبیه‌سازی رویداد گسسته برای بهینه‌سازی راندمان تولید در ساخت‌وساز

مهدی نعیمی‌راد (کارشناسی ارشد)
مجتبی مغربی* (دانشیار)
گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

بهبود راندمان تولید با افزایش تعداد کارگران، رابطه‌ی مستقیم دارد؛ البته تا جایی که تعداد بیش از حد کارگران در محیط سبب ایجاد ازدحام و در نتیجه افت تولید نشود. در یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته[1] بررسی اثر ازدحام در راندمان تولید و اندرکنش افراد بر یکدیگر ممکن نیست. در پژوهش حاضر سعی شده است تا تأثیر مستقیم نیروی انسانی در راندمان تولید با مدل‌سازی توأم فرایند پردازش کار در سیستم و اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در یکدیگر بررسی شود. بدین منظور، چارچوبی توسعه داده شده است که شامل ترکیب دو مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی[2] است. نتایج به‌دست آمده به‌وضوح کاهش میزان اثر ازدحام نیروی انسانی را نشان می‌دهند. از خروجی‌های پژوهش حاضر می‌توان برای به‌دست آوردن میزان بهینه‌ی تعداد و ترکیب نیروی انسانی در هر فعالیت استفاده کرد.

واژگان کلیدی: راندمان تولید، محدودیت‌های فضایی، شبیه‌سازی رویداد گسسته، مدل‌سازی نیروی اجتماعی.

mahdi.naeimirad@mail.um.ac.ir
mojtabamaghrebi@um.ac.ir

۱. مقدمه

برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه‌ها براساس روابط میان فعالیت‌ها شکل می‌گیرد. به‌طوری که یک پروژه شامل عملیات بهم پیوسته و مرتبط است.[۱] برای تهیه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه نیاز به پیش‌بینی مدت انجام فعالیت‌هاست. روش‌های شبیه‌سازی به دلیل توانایی در پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها، همواره یکی از روش‌های مورد استفاده‌ی پژوهشگران بوده است.[۲و۳] هیچ‌کدام از روش‌های شبیه‌سازی فعالیت‌محور، تأثیر مستقیم اندرکنش انسان بر انسان و محیط بر انسان را بررسی نمی‌کنند. هدف نوشتار حاضر، بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد و محیط در راندمان تولید در شرایط ازدحام است. سیر پژوهشی مطالعات پیشین را می‌توان در سه بخش راندمان تولید و برنامه‌ریزی فضا، شبیه‌سازی تولید و مدل‌سازی نیروی اجتماعی (SFM)[3] بررسی کرد.

۱.۱. راندمان تولید و برنامه‌ریزی فضا

در تخمین راندمان تولید، درک ماهیت و میزان تأثیر پارامترهای فردی در بهره‌وری بسیار مهم است. مطابق یافته‌های موسلهی[4] و خان (۲۰۱۲)،[۴] یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید نیروی انسانی در ساخت‌وساز، تعداد افراد در تیم‌های کاری است. توماس و هورمان (۲۰۰۶)،[۵] نشان دادند که تعیین ساختار اکیپ‌های کاری می‌تواند یکی از اصول مورد مطالعه برای افزایش راندمان کاری باشد. بر این اساس، ایده‌ی افت تولید به دلیل محدودیت‌های فضایی توسط تابت و بلیوو[5] (۱۹۹۴)،[۶] ارائه شده است. از این‌رو، اهمیت برنامه‌ریزی فضای کارگاه برای جلوگیری از بروز ازدحام مشخص می‌شود که در ادامه، به بررسی مطالعات صورت گرفته در این زمینه پرداخته شده است.

هر پروژه‌ی ساختمانی به فضای کافی برای تأسیسات موقت، مسیرهای جابه‌جایی، تدارکات و کارگاه‌های مختلف نیاز دارد، تا فعالیت‌های ساختمانی را به شیوه‌یی ایمن و کارآمد انجام دهد. همچنین چیدمان تأسیسات در سطح کارگاه ساخت‌وساز، یک اصل مهم در برنامه‌ریزی کارگاه است.[۷] اثر برنامه‌ریزی فضا در راندمان فعالیت‌های ساختمانی توسط مالاسی[6] و داوود (۲۰۰۴)،[۸] بررسی شده است. ایشان با رویکرد تحلیل فضایی اجرا و توسعه‌ی یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای حل تداخل و تعارض بین فعالیت‌های ساخت‌وساز مشخص کردند که تداخل فضای کاری می‌تواند تا ۴۰٪ راندمان تولید را در ساخت‌وساز کاهش دهد. به منظور کاهش تداخل و تعارض میان فعالیت‌ها و حل مشکل چیدمان محوطه‌ی یک کارگاه ساخت‌وساز مدولار، چئونگ[7] و همکاران (۲۰۰۲)[۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، راه‌حلی ارائه کرده‌اند. برای کمینه‌سازی تعداد کل جابه‌جایی‌های مصالح و کاهش ازدحام در

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۷، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۷.
DOI:10.24200/J30.2022.60581.3111

کارگاه، نیز جانگ[8] و همکاران (۲۰۰۷)،[۱۰] از الگوریتم ژنتیک برای تعیین چیدمان مصالح ساختمانی در طبقات ساختمان‌های چندطبقه استفاده کرده‌اند.

به منظور کاهش تداخل میان فعالیت‌ها، سلطانی و همکاران (۲۰۰۲)،[۱۱] چارچوبی را برای پشتیبانی و تحلیل برنامه‌ریزی مسیر جابه‌جایی وسائط نقلیه و افراد در یک کارگاه ساخت‌وساز توسعه داده‌اند. پیش از این، برنامه‌ریزان طرح محیط کارگاه، هنگام درنظرگرفتن تخصیص مسیرها برای تدارکات، وسائط نقلیه و عوامل کارگاه، عمدتاً به تجربه‌ی خود متکی بودند. پیشرفت‌های فنّاوری اطلاعات می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری به برنامه‌ریزان پروژه از طریق فراهم کردن امکان درنظرگرفتن سناریوهای مختلف برای مسیریابی کمک کند.

همان‌طورکه اشاره شد، افزایش تعداد کارگران درکارگاه و محدودیت‌های فضایی، دو پارامتر مهم تأثیرگذار در تولید هستند؛ که به‌موجب آن، مطالعاتی در راستای برنامه‌ریزی فضا و مسیرهای جابه‌جایی افراد درکارگاه ارائه شده است. اما در پژوهش‌های موجود، تأثیر هم‌زمان دو عامل اخیر در جریان انتقال مصالح و راندمان تولید کاملاً بررسی نشده است. لذا، در نوشتار حاضر، ضمن درنظرگرفتن محدودیت‌های فضایی و افزایش تعداد نیروی انسانی، تأثیر توأم دو عامل اخیر در اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد و راندمان تولید یک فعالیت خاص ساختمانی بررسی شده است.

۲.۱. شبیه‌سازی تولید

شبیه‌سازی، روش‌های مختلفی دارد و اغلب روش‌های استفاده شده در بررسی تولید در پروژه‌های ساخت‌وساز شامل این موارد است:

- روش سیستم‌های پویا (SD)[9]؛
- مدل‌سازی عامل‌محور (ABM)[10]؛
- شبیه‌سازی رویداد گسسته (DES)[11].

روش سیستم‌های پویا،[۱۲] رویکردی از بالا به پایین دارد؛ به‌طوری که بر عوامل مؤثر در سیستم و روابط میان آن‌ها برای بررسی عملکرد کلی سیستم متمرکز می‌شود. از روش سیستم‌های پویا می‌توان برای مدل‌سازی کیفی و کمّی یک رخداد استفاده کرد؛ به گونه‌یی که مدل در حالت کیفی بر روابط میان عوامل در حلقه‌های نمودار تمرکز دارد و در حالت کمّی، روابط میان جریان و خروجی سیستم با معادلات ریاضی بیان می‌شوند. برخلاف روش سیستم‌های پویا، روش مدل‌سازی عامل‌محور، رویکردی پایین به بالا دارد و رفتار کلی سیستم، به‌دلیل اندرکنش میان عامل‌ها و محیط، براساس قوانین است. مزیت روش مدل‌سازی عامل‌محور نسبت به روش شبیه‌سازی رویداد گسسته، در مواردی است که تمرکز بر فرایندها نیست و بر یادگیری، انطباق و تأثیرگذاری عامل‌ها در سیستم تأکید شده است.[۱۳] ایده‌ی استفاده از روش مدل‌سازی مذکور در ساخت‌وساز، اولین بار توسط سانی و همکاران (۲۰۰۳)،[۱۴] ارائه شده است.

همان‌طورکه بیان شد، روش مدل‌سازی عامل‌محور و سیستم‌های پویا در مواردی که تمرکز بر فرایندها نیست و بر تعاملات عوامل درگیر در سیستم و تأثیر عوامل مختلف بر سیستم اشاره دارد، کارآمد هستند. پژوهش‌هایی که در ادامه بیان شده‌اند، چگونگی استفاده از روش اخیر را در ارزیابی راندمان تولید در فعالیت‌های ساخت‌وساز نشان می‌دهند. خانزادی و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۵] مدلی ترکیبی از روش مدل‌سازی عامل‌محور و سیستم‌های پویا برای پیش‌بینی و بهبود تولید نیروی انسانی به‌منظور پیش‌بینی ارزش بهره‌وری نیروی کار ارائه کرده‌اند. جبری و زائد[12] (۲۰۱۷)،[۱۶] از شبیه‌سازی عامل‌محور برای مدل‌سازی عملیات خاک‌برداری استفاده کردند و یک مدل خاک‌برداری چند عامل‌محور متشکل از عوامل هوشمند و سازگار را توسعه دادند.

واتکینز[13] و همکارانش (۲۰۰۹)،[۱۷] مسئله‌ی بررسی اثر ازدحام در راندمان تولید نیروی انسانی درکارگاه ساختمانی را با استفاده از روش مدل‌سازی عامل‌محور مطالعه و فضا را به‌صورت دوبُعدی شبکه‌بندی کردند و به هر عامل، سلول یا سلول‌هایی را اختصاص دادند. اگرچه در مدل ارائه شده‌ی ایشان، عامل‌ها امکان تصمیم‌گیری دارند، اما انتخاب‌های آن‌ها فقط میان چند گزینه محدود بوده است. همچنین با مدل‌سازی اندرکنش میان افراد در جابه‌جایی و اشغال فضا به روش شبکه‌بندی فضا، امکان انعطاف‌پذیری افراد در شرایط ازدحام و تأثیر اندرکنش‌های مذکور را در فرایند تولید در نظرگرفتند. بن‌آلون و ساکس[14] (۲۰۱۷)،[۱۸] با یک‌پارچه‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[15] و مدل‌سازی عامل‌محور، فضای یک کارگاه را به‌صورت مجازی مدل‌سازی کردند و در آن، درک، رفتار و تصمیم‌گیری عامل‌ها توسعه یافت. اما همچنان منطق مدل‌سازی فضای کارگاه، شبکه‌بندی و سلول‌ها اشغال شده بود که توانایی مدل‌سازی رفتار عامل‌ها در شرایط ازدحام و تداخل فعالیت‌ها را نداشت.

در سال ۲۰۱۰، روش مدل‌سازی چند عامل‌محور با عامل‌های خودمختار برای شبیه‌سازی ازدحام ترافیکی ماشین‌آلات ساختمانی و بررسی تأثیر آن در راندمان تولید، توسط کیم و کیم،[۱۹] توسعه داده شد. همچنین اندرکنش‌های میان ماشین‌آلات در شرایط ترافیکی به خوبی مدل‌سازی شد، اما فرایند تولید در سیستم مدل‌سازی جای داده نشد. روش اخیر، برای مدل‌سازی اندرکنش‌های میان ماشین‌آلات مناسب بود، ولی برای مدل‌سازی اندرکنش فیزیکی میان افراد به‌دلیل رفتار پیچیده‌ی آن‌ها مناسب نبود. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در روش مدل‌سازی عامل‌محور، ابزار ذکر شده برای مدل‌سازی فیزیکی و حرکتی افراد در محیط فیزیکی کارگاه، بهترین گزینه نبوده است.

روش شبیه‌سازی رویداد گسسته به مدل‌سازی فرایند انجام فعالیت‌ها براساس جریان منابع و بازیگران درون سیستم می‌پردازد. در مدل اشاره شده، بازیگران عناصری منفعل هستند که در طی جریان کار پردازش می‌شوند.[۲۰] اولین پژوهش قابل ذکر با استفاده از روش شبیه‌سازی رویداد گسسته در ساخت، شبکه‌ی عملیات چرخه‌یی (CYCLONE)[16] است.[۲۱] در سال ۱۹۹۶، شبیه‌سازی فرایندهای ساخت‌وساز بر مبنای وضعیت و منابع (STROBOSCOPE) که نسل جدیدی از سیستم‌های شبیه‌سازی ساخت‌وساز بر مبنای نمودار چرخه‌ی فعالیت‌هاست، توسط مارتینز[17]،[۲۲] توسعه یافت. در ادامه، نیز مدل SIMPHONY با تمرکز بر کنترل رفتارهای سیستم، توسط حجار و ابوریزک[18] (۱۹۹۹)،[۲۳] ارائه شد.

سیستم‌های مدل‌سازی جدیدتر، مانند SIMPHONY یا STROBOSCOPE، ویژگی‌های بسیاری را برای انعطاف‌پذیری بیشتر در مدل‌سازی ارائه کرده‌اند. به‌عنوان مثال، سیستم‌های اخیر، امکان برنامه‌نویسی توسط کاربر را برای ایجاد تغییراتی در مدل و اجزاء آن به منظور مدیریت مدل و دستیابی به نتایجی دقیق‌تر فراهم می‌کنند. روش مذکور، توانایی مدل‌سازی همه‌منظوره و ایجاد ابزارهای شبیه‌سازی برای هدفی خاص در صنعت را دارد و توسعه‌ی ابزارهای اخیر بر مدل‌سازی و قابلیت شبیه‌سازی بیشتر در مقایسه با ابزارهای قبلی تأکید دارد.[۲۴] در مواردی که برای ورودی‌های یک مدل شبیه‌سازی، به دانش غیردقیق، ذهنی، و زبانی نیاز باشد، در مدل‌سازی از منطق فازی استفاده می‌شود. لذا، صادقی و همکاران (۲۰۱۶)،[۲۵] با ادغام شبیه‌سازی رویداد گسسته و منطق فازی و ارائه‌ی رویکردی جدید در محاسبه‌ی زمان رویداد، قابلیت‌های روش شبیه‌سازی ذکر شده را بهبود بخشیدند.

بنی‌اسدی و همکاران (۲۰۱۸)،[۲۶] با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته، چارچوبی به منظور بهبود همزمان راندمان تولید و ایمنی کارگران درکارگاه ارائه کردند،

که می‌توانست ایمنی و بهره‌وری عملیات را به ترتیب ۳۸ و ۴ درصد بهبود بخشد. هو[19] و همکاران (۲۰۱۷)،[۲۷] چارچوبی برای برنامه‌ریزی و کنترل فضای کار و با هدف تعریف منطق مناسب و کنترل ازدحام هنگام عبور بسته‌های کاری از میان فضاهای کارگاه و همچنین تخصیص مؤثر منابع با استفاده از روش مدل‌سازی رویداد گسسته ارائه کردند. تقدس و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۸] یک رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی برای طراحی محیط کارگاه و برنامه‌ریزی چیدمان مصالح در کارگاه با درنظرگرفتن حالت پیوسته و گسسته‌ی پروژه ارائه کردند. در نوشتار حاضر، ویژگی‌های دینامیکی وضعیت پروژه و عملیات پروژه با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی، با ترکیب شبیه‌سازی پیوسته[20] و شبیه‌سازی رویداد گسسته، تحلیل و درنهایت مشخص شد که یک طرح چیدمان کارآمد برای محیط کارگاه با توجه به شرایط پروژه منجر به افزایش راندمان هزینه‌ها می‌شود.

۳.۱. مدل‌سازی نیروی اجتماعی

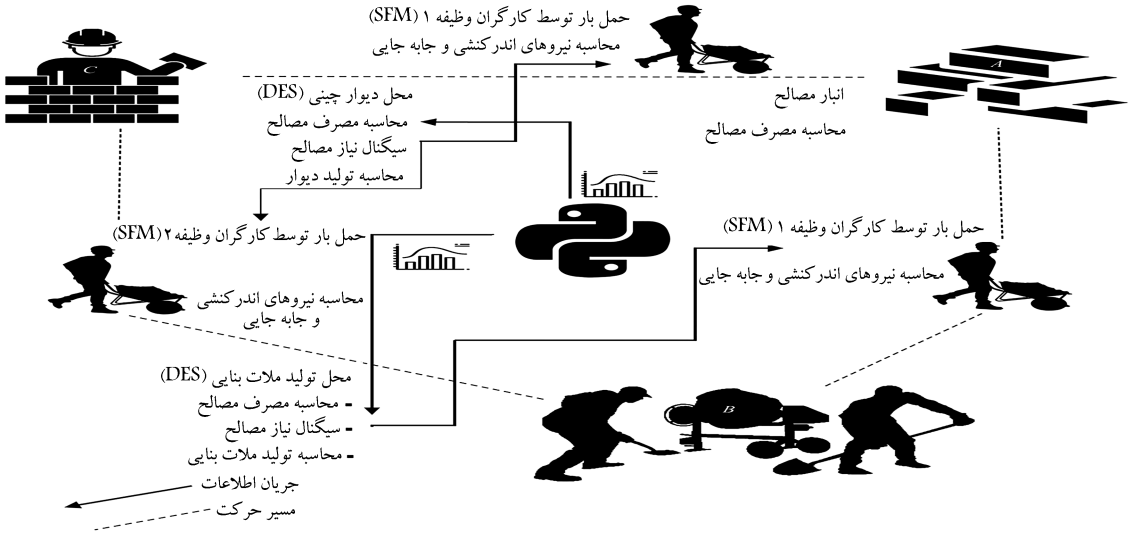
اندرکنش‌های فیزیکی بین افراد درکارگاه با توجه به محدودیت‌های فضایی موجود می‌تواند در راندمان تولید مؤثر باشد. برای مدل‌سازی حرکتی افراد، تاکنون از روش‌های اتوماتای سلولی[21]، مدل‌سازی نیروی اجتماعی، مدل‌های مبتنی بر سرعت[22]، مدل‌های پیوسته[23]، مدل‌های ترکیبی[24]، مدل‌های رفتاری[25] و مدل‌های شبکه[26] استفاده شده است. از میان روش‌های اشاره شده، روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل توانایی‌اش در توصیف تحرک افراد برای مورد مطالعاتی نوشتار حاضر که ارزیابی مؤثرتر راندمان تولید تحت اثر اندرکنش‌های میان افراد و محیط کارگاه است، مناسب‌تر است.

روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، اولین‌بار توسط هلبینگ و ملنار[27] (۱۹۹۵)،[۲۹] برای مدل‌سازی حرکت افراد در یک دالان براساس نیروهای جاذبه و دافعه‌یی که افراد به یکدیگر و محیط اطراف خود وارد می‌کنند، توسعه داده شد. امروزه روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل سادگی فرمول‌های ریاضی، مفهوم فیزیکی روشن و توانایی بالا در توصیف جابه‌جایی افراد تبدیل به یکی از پُر استفاده‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی حرکت در سیستم‌های شبیه‌سازی بر مبنای نیروهای اجتماعی شده است. برای مثال، از روش اخیر برای شبیه‌سازی رفتار عابران در خطوط عابر پیاده،[۳۰و۳۱] بهینه‌سازی تجهیزات ساختمان،[۳۲] شناسایی رفتارهای غیرطبیعی توده‌های جمعیت،[۳۳] شبیه‌سازی فرار اضطراری از کلاس در هنگام زلزله،[۳۴] آنالیز تخلیه‌ی دینامیکی خوابگاه‌ها،[۳۵و۳۶] و ایستگاه‌های مترو،[۳۷] و همچنین ارزیابی نتایج حمله‌ی تروریستی سارین،[۳۸] استفاده شده است. تاکنون در صنعت ساخت‌وساز نیز از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی برای شبیه‌سازی خروج اضطراری از کارگاه ساختمانی در شرایط آتش‌سوزی استفاده شده است.[۳۹] اما همان‌طور که گفته شد، تاکنون از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی برای شبیه‌سازی اندرکنش میان کارگران و محیط کارگاه به‌منظور بهینه‌سازی راندمان تولید در پروژه‌های ساختمانی استفاده نشده است.

روش‌هایی که در دو بخش پیشین معرفی شده‌اند، را می‌توان براساس ماهیت مسئله به تنهایی یا به‌صورت ترکیبی استفاده کرد. این روش‌ها را می‌توان با یکدیگر ترکیب کرد تا بدین ترتیب بتوان از مزایای چند روش استفاده کرد، به‌طوری که ضعف‌های آن‌ها کمتر شود.[۴۰] برای ترکیب مدل‌سازی‌ها، باید بهترین رویکرد برای هر یک از اجزاء مدل براساس مسئله‌یی‌که باید حل شود، انتخاب شود تا روش ترکیبی حاصل، نماینده‌ی دقیق‌تری از واقعیت باشد.[۴۱] روش‌های مدل‌سازی فرایند تولید که در مطالعات پیشین استفاده شده است، توانایی مشاهده‌ی تأثیر رفتار و اندرکنش‌های میان افراد را ندارند. بدین ترتیب همان‌طور که بیان شد، روش‌های شبیه‌سازی رویداد گسسته با تمرکز بر فرایندها و مدل‌سازی نیروی اجتماعی با تمرکز بر اندرکنش‌های فیزیکی میان افراد می‌توانند تأثیر ازدحام در فضای کارگاه در راندمان تولید را در نظر بگیرند. در پژوهش حاضر، با ارائه‌ی مدل ترکیبی شبیه‌سازی رویداد گسسته ـ مدل‌سازی نیروی اجتماعی، سعی شده است تا بهینه‌ترین تعداد و چیدمان برای اکیپ‌های کاری به‌دست آید.

۲. روش پژوهش

بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی در جریان انتقال بار در طی یک فرایند اجرایی در ساخت‌وساز، نیازمند توسعه‌ی بستری است که بتواند مدلی ترکیبی از دو ابزار شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی ارائه کند. در شکل ۱،



شکل ۱. فرایند یکپارچه‌سازی مدل‌سازی DES-SFM.

فرایند کار که شامل دو بخش اصلی است، مشاهده می‌شود. بخش اول، مربوط به شبیه‌سازی رویداد گسسته و بخش دوم، شامل مدل‌سازی نیروی اجتماعی است. تقسیم‌بندی مدل‌سازی به دو روش ذکر شده، براساس ماهیت هر فعالیت است. فعالیت‌هایی که به‌صورت ایستا انجام می‌شوند و نیازمند تردد در کارگاه نیستند، به روش شبیه‌سازی رویداد گسسته و فعالیت‌هایی که با جابه‌جایی بار و تردد در کارگاه انجام می‌شوند، به روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی شبیه‌سازی می‌شوند. بنابراین، با درنظر گرفتن روند دیوارچینی به عنوان یک مطالعه‌ی موردی، نوع هر یک از فعالیت‌های مربوط به فرایند اشاره شده مشخص شده است. بدین ترتیب مدلی با پایتون توسعه داده شده است که شامل روشی ترکیبی از شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی است.

۱.۲. مطالعه‌ی موردی

در بخش کنونی، با استفاده از یک نمونه‌ی واقعی، روش پیشنهادی آزمایش شده است. بدین منظور از داده‌های واقعی مربوط به عملیات دیوارچینی در پروژه‌ی احداث یک ساختمان مسکونی استفاده شده است. مدل‌سازی شبیه‌سازی رویداد گسسته را می‌توان در مدل ارزیابی کرد. روش مذکور قابل تعمیم به کل فرایندهای ساختمانی است؛ ولی همان‌طور که در کارهای مشابه برای نشان دادن عملکرد روش‌های پیشنهادی بر روی یک فعالیت متمرکز شده‌اند،[۴۲] در پژوهش حاضر نیز بر فعالیت دیوارچینی در یک پروژه تمرکز شده است.

پروژه‌ی منتخب، یک ساختمان با عملکرد مسکونی در ۸ طبقه و با مساحت ۱۵۶۵ مترمربع بوده است. مطابق شکل ۱، نقشه‌ی توسعه‌ی روش پژوهش نوشتار حاضر نشان داده شده است. بر این اساس، ابتدا فرایند کلی اجرای دیوارچینی از مرحله‌ی تأمین مصالح از محل ذخیره‌ی مصالح تا تکمیل دیوارهای داخلی طبقه‌ی موردنظر تعیین شده است، که شامل ۵ فعالیت بوده است:

۱. انتقال مصالح آب، ماسه و سیمان از محل انبار (A) به محل تولید ملات بنایی(B)؛

۲. انتقال بلوکه از محل انبار (A) به محل دیوار در حال اجرا (C)؛

۳. انتقال ملات تولید شده از محل تولید آن (B) به محل دیوار در حال اجرا (C)؛

۴. تولید ملات بنایی از اختلاط مصالح موردنیاز (در محل B)؛

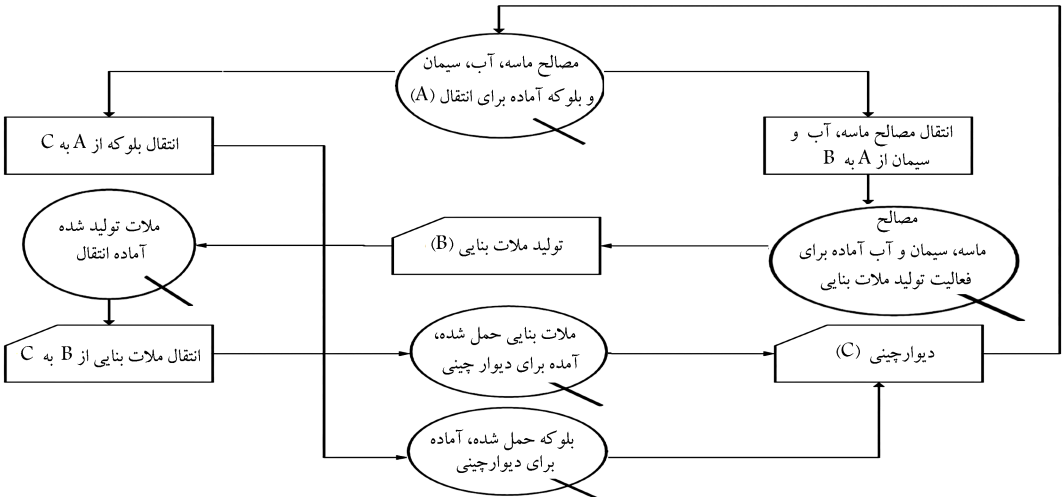
۵. دیوارچینی دیوارهای داخلی (در محل C).

فعالیت‌های ۱ و ۲ توسط یک گروه از کارگران حمل‌کننده‌ی بار صورت گرفته و فعالیت ۳، توسط گروه دیگری از کارگران حمل‌کننده‌ی بار انجام شده است. در گام اول، فضای کارگاه ساختمانی، مدل‌سازی شده است. در ادامه، مدل‌سازی محل فعالیت‌ها و موانع فیزیکی در کارگاه برای ثبت تأثیر اندرکنش‌های فیزیکی کارگران در یکدیگر و محیط صورت گرفته است. اندرکنش‌های اخیر، سرعت و جهت حرکت کارگران را تغییر می‌دادند. مکان افرادی که فعالیت آن‌ها، انتقال بار نبوده است، ثابت فرض شده است. در مدل‌سازی فضا، فرض بر این بوده است که محل فعالیت فردی که ملات بنایی را از مخلوط کردن مصالح تولید می‌کند، همواره ثابت باشد. یکی از دیگر نوآوری‌های نوشتار حاضر، امکان بررسی اثر پویایی محیط کارگاه در تولید است. به این صورت که محل دیوارچینی بسته به محل دیوار در حال ساخت، متغیر بوده است. واضح است که با پیشرفت پروژه در طول زمان، دیوارهای بیشتری در طبقه ساخته شده‌اند، بنابراین محل اجرای فعالیت دیوارچینی در کنار دیوار، در حال‌توسعه در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که با پیشرفت پروژه ضمن افزایش موانع در محیط کارگاه، محل فعالیت دیوارچینی نیز به‌صورت پویا تغییر کرده است. موانع تحرک کارگران در کارگاه، شامل: شفت‌ها، پرتگاه‌ها، دیوارهای تمام شده، و دیوار در حال‌توسعه بوده است. به‌روزرسانی دیوارهای طبقه در طول چرخه‌ی عمر پروژه به‌صورت در لحظه بوده است؛ بنابراین، در مدل‌سازی انجام شده، دو ویژگی کارگاه در طول پیشرفت پروژه تغییر می‌کرده است: ۱) محل فعالیت دیوارچینی و ۲) نقشه‌ی دیوارهای موجود.

۲.۲. شبیه‌سازی رویداد گسسته

همان‌طور که بیان شد، فعالیت‌های ۴ و ۵ به صورت ایستا در محل‌های (B) و (C) انجام و براساس روش شبیه‌سازی رویداد گسسته مدل‌سازی شده‌اند. مطابق شکل ۲، فرایند تولید از محل انبار مصالح (A) در طبقه آغاز و با انتقال مصالح به محل‌های مصرف پیگیری شده است.

بدین منظور، مصالح موردنیاز فعالیت‌های تولید ملات بنایی و دیوارچینی، توسط کارگران از محل (A) به محل‌های (B) و (C) انتقال یافته‌اند. با انتقال مصالح به محل موردنظر، آن‌ها در صف مصرف قرار گرفتند. فعالیت تولید ملات بنایی و دیوارچینی



شکل ۲. شبیه‌سازی رویداد گسسته.

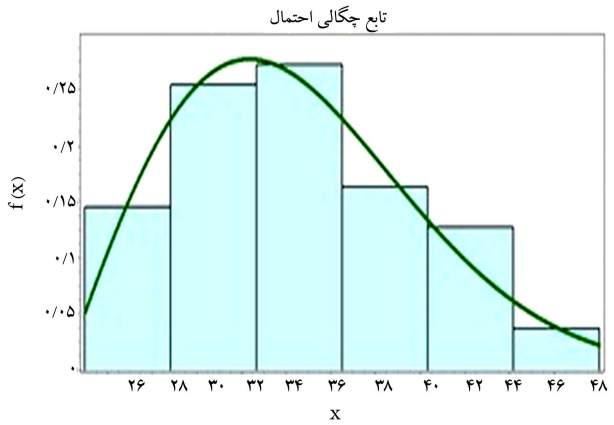
جدول ۱. نتایج آزمون مربع کای برای داده‌های آماری.

آزمون مربع کای					
آمار	تابع چگالی	پارامترها	p-value	آماره آزمون	مقدار بحرانی $a = ۰/۰۵$
تولید ملات ساختمانی	Gamma	$a = ۵۵۷/۰۶$ $\beta = ۰/۰۳۰$	۰/۶۶۵	$> ۳/۲۲$	۱۱/۰۷
دیوار چینی	Normal	$\sigma = ۴/۹۵۳$ $\mu = ۰/۳۷۴$	۰/۹۵۹	$> ۱/۰۳$	۱۱/۰۷
مصرف آب	Triangular	$m = ۷/۴$ $a = ۴/۱۲۸$ $b = ۹/۰۲۷$	۰/۹۹۴	$> ۰/۴۱$	۱۱/۰۷
مصرف ماسه	Weibull	$a = ۵/۷۸۰$ $\beta = ۳۲/۱۵$	۰/۹۹۲	$> ۰/۴۸$	۱۱/۰۷
مصرف سیمان	Weibull	$a = ۶/۴۱۲$ $\beta = ۶/۷۱۷۳$	۰/۷۷۱	$> ۲/۵۳$	۱۱/۰۷
مصرف بلوکه	Gamma	$a = ۳۳/۷۱۴$ $\beta = ۲/۱۰۲۷$	۰/۸۵۲	$> ۱/۹۷$	۱۱/۰۷
مصرف ملات	Lognormal	$\sigma = ۰/۱۵۷۹$ $\mu = ۳/۵۲۹۸$	۰/۸۵۵	$> ۱/۵۹$	۱۱/۰۷

هنگامی انجام شده است که تمامی مصالح موردنیاز به حد کافی در صف انتظار باشند. با اجرای فعالیت تولید ملات بنایی، به صف انتقال محصول از محل (B) به محل (C) افزوده شده است، تا جایی که ملات کافی جهت انتقال در دسترس باشد. در ادامه، ملات از محل (B) به محل (C) منتقل شده است. با انتقال مصالح موردنیاز فعالیت دیوارچینی، به صف‌های بلوکه و ملات آماده برای اجرای دیوارچینی افزوده شده است. در صورتی که صف‌های ملات و بلوکه به میزان کافی پر بودند، فعالیت دیوارچینی اجرا می‌شد.

مدل توسعه‌یافته با استفاده از داده‌های آماری و براساس توابع چگالی احتمال[۲۸]، فرایند تولید را شبیه‌سازی کرده است. برای این منظور، از داده‌های ثبت شده، نمودار ستونی فراوانی[۲۹] مدت هر فعالیت و مصرف هر مصالح به‌دست آمده است. ثبت زمانی هر فعالیت بدون درنظرگرفتن نرخ مصرف مصالح برای مدل کافی نیست. تا زمانی که تمام مصالح موردنیاز به حد کافی در محل کار وجود نداشته باشند، فعالیت انجام نمی‌شود؛ بنابراین، نه فقط داده‌های ثبت شده‌ی نرخ تولید در هر فعالیت موردنیاز است، بلکه مجموعه‌یی از داده‌ها در مورد نرخ مصرف مصالح در هر فعالیت نیز باید ثبت شود. به‌منظور توسعه‌ی توابع چگالی احتمال، از داده‌های ثبت شده در طول ۴ روز عملیات دیوارچینی در ساختمان موردنظر و در ماه شهریور و شرایط آب‌وهوایی مطلوب استفاده شده است. داده‌های ثبت شده، حاصل از ۳۷۰ چرخه‌ی اجرای کار براساس میزان خروجی هر فعالیت در ساعت و برای مصرف مصالح براساس میزان مصرف هر ماده در ساعت است. به طور مثال در شکل ۳، نمودار فراوانی ستونی مصرف ماسه مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر فرض شده است که میزان خروج مصالح از محل انبار با حضور کارگر حمل‌کننده در محل و در لحظه صورت می‌پذیرد؛ از این رو، نرخ زمانی برای آن منظور نشده است. در ادامه، داده‌های ثبت شده با درجه آزادی ۵ به روش مربع کای[۳۰] ارزیابی شده‌اند. براساس آزمون مربع کای، می‌توان به یک رتبه‌بندی از متناسب‌ترین توابع چگالی احتمال دست‌یافت و بهترین آن را برای هر سری از داده‌ها برگزید. به‌طور مثال، تابع Weibull، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، متناسب‌ترین



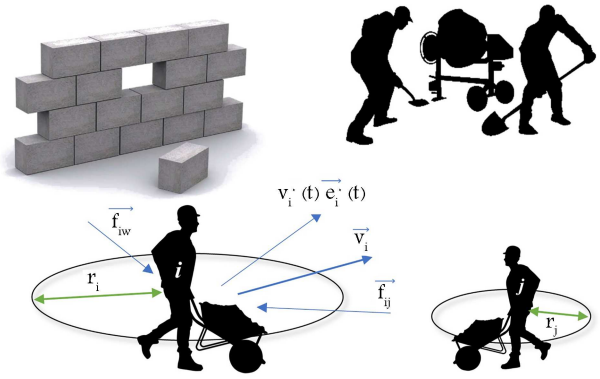
شکل ۳. نمودار فراوانی ستونی مصرف ماسه در فعالیت تولید ملات.

تابع برای نرخ مصرف ماسه است. در جدول ۱، نتایج آزمون مربع کای برای اطلاعات ثبت شده ارائه شده است.

مطابق جدول ۱، با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ ($\alpha = ۰/۵$) با توجه به اینکه آماره‌ی آزمون کمتر از مقدار بحرانی است، می‌توان نتیجه گرفت که فرض صفر رد می‌شود. همچنین براساس نمودار ستونی فراوانی از رکوردهای ثبت شده، مناسب‌ترین تابع چگالی احتمال براساس آزمون مربع کای برای همه‌ی داده‌های مربوط به فعالیت‌ها تعیین شده است. در مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته از توابع به‌دست‌آمده در جدول ۱ استفاده شده است.

۳.۲. مدل‌سازی نیروی اجتماعی

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در مطالعه‌ی حاضر، فرض بر این بوده است که محل دو فعالیت «تولید ملات بنایی» و «دیوارچینی» به صورت ثابت باشد و کارگران، وظیفه‌ی انتقال محصول هر فعالیت به فعالیت بعد از آن‌ها را بر عهده دارند.



شکل ۴. نمودار نیروهای وارد بر عامل.

همان‌طور که گفته شد، فرایند تولید مربوط به فعالیت‌های ایستا با روش شبیه‌سازی رویداد گسسته مدل‌سازی می‌شود. اما تفاوت رویکرد پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در مدل‌سازی انتقال بار بین فعالیت‌هاست. به طوری که در مطالعه‌ی حاضر، انتقال بار در فضا با مدل‌سازی فضا و حرکت کارگران در محیط مذکور به صورت هم‌زمان شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی حرکت کارگران در کارگاه و درنظر گرفتن تأثیر اندرکنش‌های فیزیکی در بهره‌وری، از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی استفاده شده است. بدین ترتیب، هر کارگر متحرک که مصالح را در کارگاه منتقل می‌کند، در مدل‌سازی نیروی اجتماعی به عنوان یک عامل[۳۱] معرفی می‌شود. در پژوهش حاضر، از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل توانایی آن در دقت شبیه‌سازی حرکتی نیروهای فعال در محیط و بررسی واقعی‌تر اندرکنش بین نیروها در محیط محدود کارگاه استفاده شده است. مطابق شکل ۴، هر یک از کارگرهای حمل‌کننده‌ی بار، تحت‌تأثیر نیروهای جاذبه و دافعه‌یی از محیط اطراف خود هستند، که شامل نیروی جاذبه‌ی مقصد و نیروهای دافعه از سوی دیوارها و دیگر افراد است. در رابطه‌ی ۱، چگونگی محاسبه‌ی برآیند نیروهای وارد بر هر عامل ارائه شده است.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i(t)\,\vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_{w} f_{iw} \qquad (۱)$$

که در آن:

$\vec{f}_{iw}$: نیروی دافعه‌ی وارد بر عامل i از سوی دیوار یا هر یک از موانع محیط؛

$\vec{f}_{ij}$: نیروی دافعه‌ی وارد بر عامل i از عاملی دیگر مانند j؛

$\vec{f}_i$: نیروی جاذبه‌ی مقصد عامل i؛

$\vec{v}_i$: سرعت لحظه‌یی عامل i؛

$\vec{e}_i$: بردار جهت حرکت عامل i به سوی مقصد؛

v_i : سرعت مطلوب عامل i؛

τ_i : زمان شتاب‌گیری عامل i؛

m_i : جرم عامل i؛

r_i : شعاع خصوصی عامل i؛

r_j : شعاع خصوصی عامل j؛

d_{ij} : فاصله‌ی عامل i از عامل دیگری مانند j.

مطابق شکل ۴، برآیند نیروهای وارد بر هر عامل در هر اجرای حلقه سراسری برنامه براساس برآیند نیروهای وارد بر آن مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. هلبینگ[۳۲] و همکاران (۲۰۰۰)،[۴۳] برای درنظرگرفتن جابه‌جایی و تحرک افراد، مدلی را پیشنهاد کردند (رابطه‌ی ۱) که از سه مؤلفه تشکیل شده است: مؤلفه‌ی اول، نیروی جاذبه‌ی هر عامل به مقصد را محاسبه می‌کند. جایی که عامل i با جرم (m_i) با سرعت دلخواه معین (ν_i) و در یک جهت معین $\vec{e}_i$ حرکت می‌کند و سرعت واقعی او تمایل دارد در هر زمان واکنش (τ_i) به سرعت دلخواه (ν_i) برسد. مؤلفه‌ی دوم، نیروی اندرکنش فیزیکی میان دو عامل i و (j) را محاسبه می‌کند این نیرو f_{ij} مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$f_{ij} = \left(A_i.e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} + k.g\left(r_{ij}-d_{ij}\right)\right)\vec{n}_{ij} + \kappa.g\left(r_{ij}-d_{ij}\right)\Delta\vec{\nu}^{t}_{ij}.\vec{t}_{ij} \qquad (۲)$$

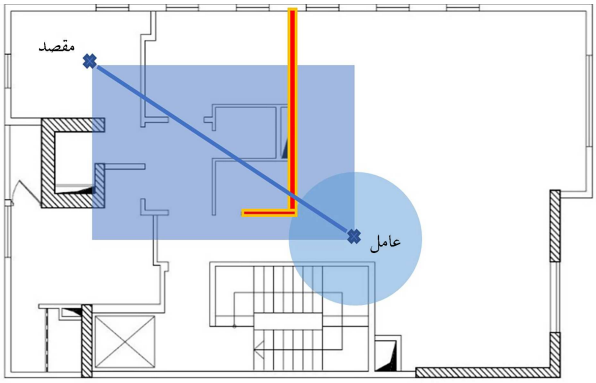
که در آن، $A_i.e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i}$ نماینده‌ی نیروی دافعه میان عامل i و j است. A_i و B_i دو پارامتر ثابت جهت اطمینان از کالیبره بودن مدل شبیه‌سازی هستند. $\vec{n}_{ij}$ بردار نرمال عامل i به سمت عامل j است. همچنین هنگامی که فاصله‌ی بین دو عامل(d_{ij}) کمتر از مجموع شعاع فضای خصوصی حول بدن هریک از آن‌ها (r_{ij}) باشد، مؤلفه‌های $k.g\left(r_{ij}-d_{ij}\right)$ و $\kappa.g\left(r_{ij}-d_{ij}\right)\Delta\vec{\nu}^{t}_{ij}.\vec{t}_{ij}$ به ترتیب نیروی فشردگی و نیروی اصطکاک لغزشی را بین افراد i وj محاسبه می‌کنند. تابع $g(x)$ درصورتی که کارگران به یکدیگر برخورد نکنند، صفر است؛ در غیر این صورت برابر با آرگومان x خواهد بود. $\Delta\vec{\nu}^{t}_{ij}$ و $\vec{t}_{ij}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی اختلاف سرعت مماسی و جهت مماسی هستند. مؤلفه‌ی سوم، نیروی اندرکنش میان عامل i و موانع محیط مانند دیوارها را از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌کند:

$$f_{iw} = \left(A_i.e^{(r_i-d_{iw})/B_i} + \kappa.g\left(r_i-d_{iw}\right)\right)\vec{n}_{iw} + \kappa.g\left(r_i-d_{iw}\right)\left(\vec{\nu}_i.\vec{t}_{iw}\right)\vec{t}_{iw} \qquad (۳)$$

که در آن، $A_i.e^{(r_i-d_{iw})/B_i}$ نماینده‌ی نیروی دافعه میان عاملi و دیوار w است. $\vec{n}_{iw}$ بردار نرمال عامل i به سمت دیوار w است. همچنین هنگامی که فاصله‌ی بین عامل و دیوار(d_{iw}) کمتر از شعاع خصوصی اطراف بدن عامل (r_i) باشد، مؤلفه‌های $k.g(r_i-d_{iw})$ و $\kappa.g(r_i-d_{iw})(\vec{\nu}_i.\vec{t}_{iw})\vec{t}_{iw}$ به ترتیب نیروی فشردگی و نیروی اصطکاک لغزشی را بین عامل و دیوار محاسبه می‌کنند. $\vec{t}_{iw}$ جهت مماسی است که از عامل i به دیوار w اشاره می‌کند.

مطابق شکل ۴، پیرامون هر فرد فضایی تحت عنوان فضای خصوصی قرار دارد. فضای خصوصی دایره‌یی است به شعاع r_i به‌دلیل جابه‌جایی‌های عامل در کارگاه، هر چه مانع محیطی یا فرد دیگری به مرز این محیط بیشتر نزدیک می‌شود، نیروی دافعه بیشتر می‌شود، تا بدین منظور از برخورد فیزیکی بین فرد با دیگران و یا موانع جلوگیری شود. با افزایش تعداد افراد، فضای بیشتری نسبت به فضای کارگاه اشغال می‌شود و اگر تعداد افراد محیط زیاد باشد، این موضوع باعث ازدحام می‌شود. همچنین با پیشرفت پروژه، موانع فیزیکی محیط به دلیل افزایش دیوارها افزایش می‌یابد که باعث افزایش اندرکنش‌های فیزیکی بین افراد و محیط می‌شود؛ بنابراین، در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، می‌توان تأثیر پیشرفت فیزیکی کار را در راندمان تولید در نظر گرفت.

در پژوهش حاضر، استفاده از روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی به دلیل تفاوت با کاربردهای متداول آن در مطالعات پیشین متفاوت است. در کاربردهای متداول روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی، مبدأ و مقصد حرکت عامل ثابت است و مسیر و سرعت حرکت عوامل از مبدأ به مقصد تحت تأثیر نیروهای جاذب و دافعه‌ی ایجاد شده توسط افراد دیگر و محیط تغییر می‌کند. اما در پژوهش حاضر، مدل با اعمال تغییراتی به ساخت‌وساز تطبیق داده شده است. تفاوت در مدل‌سازی



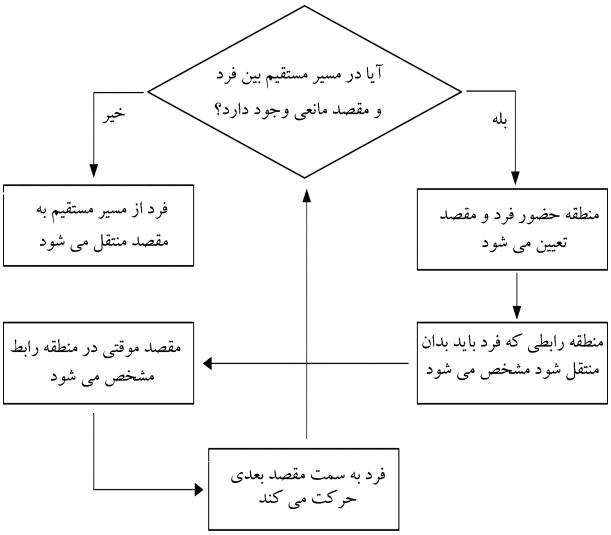
شکل ۵. مدل‌سازی کارگاه و نحوه‌ی مسیریابی عامل.

حرکت کارگران در یک محل ساخت‌وساز برای حمل بار از یک مکان به مکان دیگر با کاربردهای متداول روش مدل‌سازی نیروی اجتماعی شامل این موارد است:

- پیچیدگی بیشتر فضای مدل شده و مشخص نبودن جهت کلی حرکت عامل،
- بی‌ثباتی مبدأ و مقصد حرکت عامل‌ها در فضا به دلیل ثابت نبودن محل کار،
- بی‌ثباتی هندسه‌ی فضا و تغییر هندسه و موانع موجود در طول پیشرفت پروژه.

با توجه به تفاوت‌های ذکر شده، تغییراتی در الگوی اولیه‌ی مدل‌سازی نیروی اجتماعی اعمال شده است. همان‌طور که گفته شد، عوامل حمل بار در کارگاه به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول، کارگرانی هستند که مسیر بین «انبار مصالح» و دو فعالیت «تولید ملات بنایی» و «دیوارچینی» را طی می‌کنند و گروه دوم، کارگرانی هستند که بین محل «انبار مصالح» و «دیوارچینی» خدمت می‌کنند. فرض بر این است که محل «تولید ملات ساختمانی» و «انبار مصالح» ثابت است. اما محل «دیوارچینی» متغیر است. محل دیوارچینی در کنار دیوار در حال ساخت است. با پیشرفت پروژه، دیوارهای متفاوتی ساخته می‌شوند و مکان هر دیوار با دیوارهای دیگر متفاوت است. این بدان معناست که مقصد کارگرانی که مصالح را به محل دیوارچینی منتقل می‌کنند، ثابت نیست. بنابراین، افراد باید از مسیرهای مختلف جدید برای رسیدن به یک مقصد قدیمی استفاده کنند. با ساخت دیوارهای داخلی، دیوارهای بیشتری بین مبدأ و مقصد عامل وجود خواهد داشت. بنابراین، انتخاب مسیر مستقیم از مبدأ تا مقصد برای کارگر ممکن نیست. از این رو، یافتن مسیر به صورت در لحظه برای هر فرد ضروری است و مسیر انتخاب شده باید بهینه و شبیه انتخاب‌های انسانی باشد. هنگامی که یک کارگر می‌خواهد به مقصدی برسد، باید بداند که آیا مانعی بر سر راه مقصد وجود دارد یا خیر. برای این منظور، عامل در هر لحظه محیط خود را بررسی می‌کند تا تمام موانع و دیوارهای اطراف خود را در نظر بگیرد. بررسی تمام محیط کارگاه شبیه‌سازی شده، نیازمند محاسبات زیاد عددی است. در نوشتار حاضر، برای حل این موضوع در هر تیک فقط فضای اطراف هر عامل با شعاعی مشخص بررسی شده است. دایره‌ی مذکور، در واقع همان پارامتر فاصله‌ی اندرکنش است و مقدار آن با افزایش سرعت به صورت خطی افزایش می‌یابد. در بعضی مواقع فقط ربعی از شعاع حرکتی، که در جهت مقصد است، بررسی شده است (شکل ۵).

مطالعات شبیه‌سازی بدون محدودیت‌های ذکر شده نشان داد که تأثیر چندانی در دقت جواب ندارند و فقط منجر به پیچیدگی محاسبات خواهند شد. در مدل توسعه داده شده، همواره یک خط مستقیم بین عامل و مقصد وی ترسیم می‌شود. پس از آن، دو سناریو رخ می‌دهد: ۱) خط مذکور، هیچ تلاقی با موانع یا دیوارهای



شکل ۶. نمودار تصمیم‌گیری و مسیریابی عامل.

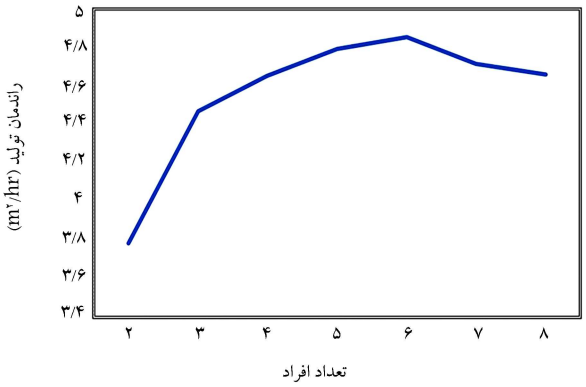
موجود در فضای بررسی‌شده ندارد. ۲) خط ذکر شده دست‌کم با یک مانع محیطی (دیوار)، تقاطع دارد. اگر اولین سناریو اتفاق بیفتد، راه مستقیم به مقصد به‌عنوان مسیر انتخاب می‌شود. اما، اگر سناریوی دوم اتفاق بیفتد، برای پیدا کردن بهترین مسیر، مطابق الگوریتم شکل ۶ عمل می‌شود. بدین منظور محیط کارگاه شبیه‌سازی شده براساس ماهیت محیط به تعدادی منطقه تقسیم می‌شود. در پژوهش حاضر، مبنای تقسیم فضاهای مستقل شامل اتاق‌ها و راهروها بوده است. در مطالعه‌ی موردی انتخاب شده، محیط کارگاه به ۱۷ منطقه، که شامل راهرو و اتاق بودند، تقسیم و برای دسترسی به اتاق‌ها از راهروها استفاده شده است. همه‌ی افراد همیشه از منطقه‌ی حضور و منطقه‌ی مقصد خود آگاه هستند. اگر منطقه‌ی حضور و منطقه‌ی مقصد یک کارگر برابر نباشد، کارگر باید با انتخاب مناطق واسطه به مقصد خود برسد.

مطابق الگوریتم شکل ۶، بسته به موقعیت هر کارگر و منطقه‌ی مقصد نهایی، منطقه‌ی بعدی که کارگر باید به آنجا منتقل شود، مشخص می‌شود. همچنین، با حرکت فرد بین مناطق، مقاصد موقت برای انتقال عامل از یک منطقه به منطقه‌ی دیگر در آستانه‌ی ورودی منطقه‌ی بعدی شکل می‌گیرد. هر کارگر به محض اینکه در بررسی محیط متوجه شود که دیگر هیچ مانعی بین او و مقصد نهایی وجود ندارد، بدون توجه به پروتکل حرکت بین مناطق، به سمت مقصد با مسیر مستقیم حرکت می‌کند.

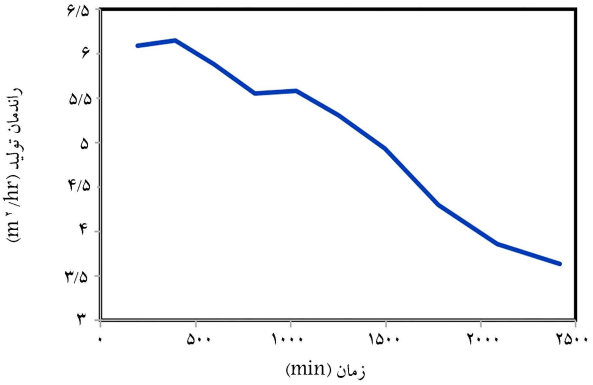
۳. نتایج

در بخش قبل، چگونگی مدل‌سازی یک کارگاه ساختمانی و همچنین اندرکنش‌های وارد بر افراد از محیط و دیگر افراد شرح داده شده است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی از مطالعه‌ی موردی برای پروژه‌ی ساختمانی در شهر مشهد و شرایط آب‌وهوایی مساعد استفاده شده است. به‌دلیل منحصربه‌فرد بودن عوامل مؤثر در راندمان تولید نیروی انسانی (مانند: هندسه‌ی فضای کارگاه، نوع کار، خصوصیات فردی کارگران و شرایط دمایی، آب‌وهوایی و ارتفاعی) در هر پروژه، در بهره‌مندی جامع از مدل، محدودیت وجود دارد. بدین ترتیب، جهت استفاده از مدل ارائه شده برای پیش‌بینی راندمان تولید در هر پروژه‌ی دیگری، باید مدل با شرایط خاص مطالعه‌ی موردی تطبیق داده شود.

بررسی اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در راندمان تولید با آزمایش



شکل ۷. روند تغییرات راندمان تولید با افزایش تعداد کارگران.



شکل ۸. روند تغییرات راندمان تولید طی پیشرفت کار.

سناریوهای مختلف بر روی مدل توسعه‌یافته امکان‌پذیر است. سناریوهای ارائه شده می‌توانند شامل استفاده از تعداد نیروهای مختلف در هر پست، استفاده از محل‌های مختلف برای انجام فعالیت‌های ایستا، و ترتیب و توالی مختلف دیوارها برای ساخت باشند. برای بررسی اثر تعداد و ترکیب افراد در اجرای یک فرایند ساختمانی با درنظرگرفتن محدودیت‌های محیط کارگاه، در مدل ایجاد شده، سناریوهای مرتبط شبیه‌سازی شده‌اند.

در ادامه، ۲۰ سناریو با استفاده از تعداد و چیدمان‌های مختلف کارگران برای اجرای کار، شبیه‌سازی شده‌اند. راندمان تولید متناظر با استفاده از تعداد و ترکیب‌های مختلف افراد برای انتقال بار بین محل انبار مصالح (A) و محل دیوارچینی (C) و محل تولید ملات بنایی(B)، همچنین بین محل تولید ملات بنایی (B) و محل دیوارچینی (C) در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر به‌دست آمده برای راندمان تولید هر سناریو بر حسب مترمربع اجرای دیوار بر ساعت است. به‌طور مثال، در سناریوی S۱، به‌ازاء استفاده از دو کارگر به‌طوری که در هر محل خدمت، یک کارگر فعالیت کند، راندمان تولید معادل ۳/۷۸ مترمربع بر ساعت به‌دست آمده است.

مطابق جدول ۲، مشاهده می‌شود هر چه تعداد کارگران افزایش یافته است، راندمان تولید بیشتر شده است؛ اما این روند تا جایی ادامه یافته است که تعداد بیشتر کارگران سبب افزایش اندرکنش‌های فیزیکی شده و این امر سبب کاهش راندمان تولید شده است. بدین ترتیب، راندمان تولید متناظر با سناریو S۱۱ و استفاده از ۶ نفر و با ترکیب ۴ نفر برای خدمت در مسیر بین منبع مصالح و محل تولید ملات بنایی و دیوارچینی و همچنین ۲ نفر برای خدمت در مسیر بین محل تولید ملات بنایی و محل دیوارچینی، بیشینه بوده و این ترکیب به‌عنوان ترکیب بهینه برگزیده شده است. برای درک راحت‌تر یافته‌ی اخیر، راندمان بهینه‌ی متناظر با تعداد مختلف کارگران در شکل ۷ مشاهده شود.

در حین اجرای پروژه، دیوارهای بیشتری در ساختمان ساخته می‌شوند که باعث افزایش تعداد موانع بر سر راه کارگران می‌شود. با افزایش موانع در محیط، اندرکنش‌های فیزیکی افزایش می‌یابد و کاهش راندمان تولید را به همراه دارد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، یکی از سناریوهای ذکر شده در جدول ۲ انتخاب شده است. براساس نتایج به دست آمده از میان سناریوهای بررسی شده، سناریوی S۴ گزینه‌ی مناسبی بوده است؛ چون طی اجرای مکرر سناریوی اخیر، کمترین نوسان‌ها مشاهده شده است. لازم به ذکر است هرکدام از سناریوهای دیگر نیز قابلیت بررسی دقیق‌تر را دارند. در سناریوی S۴ از ۴ کارگر برای جابه‌جایی مصالح در کارگاه با ترکیب ۲ نفر برای انتقال بار بین منبع مصالح و محل تولید ملات بنایی و محل دیوارچینی و همچنین ۲ نفر برای انتقال ملات از محل تولید به محل دیوارچینی استفاده شده است. در جدول ۳، حجم کار اجرایی پروژه به بسته‌های ۱۰ مترمربعی از دیوارچینی تقسیم شده است که در طول چرخه‌ی عمر پروژه و در بازه‌های زمانی اجرا شده‌اند.

مشاهده می‌شود که در حین اجرای پروژه، مدت زمان اجرای مقدار ثابتی از کار (۱۰ مترمربع)، با پیشرفت پروژه تغییر کرده و تغییر مذکور، روندی افزایشی داشته است. با پیشرفت کار و افزایش تعداد دیوارها و موانع ثابت، اندرکنش فیزیکی میان افراد و محیط بیشتر شده و میزان راندمان تولید اکیپ کاهش یافته است. این موضوع در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود. مدل‌های رایج شبیه‌سازی رویداد گسسته، قابلیت بررسی موانع و مدل‌سازی دقیق رفتار حرکتی نیروهای انسانی در محیط کاری را ندارند؛ ولی همان‌طورکه نشان داده شد، مدل پیشنهادی در نوشتار حاضر، این شانس را به مدیران پروژه می‌دهد تا شبیه‌سازی واقعی‌تری از فرایندهای کاری را داشته باشند.

۴. نتیجه‌گیری

تعداد افراد مشغول در کارگاه، تأثیر زیادی در راندمان تولید فعالیت‌های ساختمانی دارد. از طرفی، پیش‌بینی تأثیر تعداد و ترکیب افراد مشغول در اکیپ‌های کاری در راندمان تولید، پیچیدگی‌های زیادی دارد. پیش‌بینی و بهبود راندمان تولید با استفاده از روش‌های پیشین، به دلیل محدودیت‌های آن‌ها در بررسی اثر اندرکنش افراد حین جابه‌جایی بار در محیط کارگاه امکان‌پذیر نیست. موضوع دیگری که تاکنون دقیقاً بررسی نشده است، تأثیر تغییرات محیط کارگاه ناشی از تغییر موانع ثابت (دیوار) به دلیل پیشرفت پروژه در عملکرد نیروهای انسانی است.

در پژوهش حاضر سعی شده است که تأثیر مستقیم نیروی انسانی در راندمان تولید با مدل‌سازی توأم فرایند پردازش کار در سیستم و اثر اندرکنش‌های فیزیکی محیط و افراد در یکدیگر هنگام حمل بار در شرایط ازدحام ناشی از افزایش تعداد کارگران و محدودیت‌های محیط کارگاه بررسی شود. بدین منظور چارچوبی توسعه داده شده است که شامل ترکیب دو روش شبیه‌سازی رویداد گسسته و مدل‌سازی نیروی اجتماعی است. چارچوب توسعه داده شده این امکان را فراهم آورد تا بتوان یک یا چند فعالیت را دقیق‌تر شبیه‌سازی کرد. برای نشان‌دادن قابلیت‌های روش ارائه شده، مطالعه‌ی موردی واقعی انتخاب شد که مربوط به دیوارچینی در یک پروژه‌ی ساختمانی بوده است. ضمن پیاده‌سازی روش پیشنهادی در پروژه‌ی موردی، سعی شده است تا بهینه‌ترین تعداد افراد و ترکیب برای اکیپ کاری با درنظرگرفتن اثر اندرکنش‌های فیزیکی افراد حین حرکت در کارگاه به‌دست آید. درنهایت، ایده‌ی توسعه داده شده در نوشتار حاضر با داده‌های یک پروژه‌ی واقعی ارزیابی و به‌وضوح کاهش میزان تولید در اثر ازدحام نیروی انسانی مشاهده شده است. نتایج به‌دست

جدول ۲. نتایج سناریوهای مختلف برای تعداد و ترکیب‌های مختلف افراد در اکیپ کاری.

سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)	سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)
S۱	۲	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۱	۳/۷۸۲۷	S۱۰	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۴	۳/۷۲۳۰
S۲	۳	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۱	۴/۴۷۰۱۹	S۱۱	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۲	۴/۸۵۴۵
S۳	۳	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۲	۳/۶۰۹۳	S۱۲	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۴	۴/۱۴۵۴
S۴	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۲	۴/۶۵۴۲	S۱۳	۶	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۳	۳/۸۳۵۴
S۵	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۱	۴/۰۴۱۴	S۱۴	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۳	۴/۷۱۴۲
S۶	۴	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۱ ۳	۳/۶۴۲۴	S۱۵	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۳	۴/۴۷۱۴
S۷	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳ ۲	۴/۷۹۲۳	S۱۶	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۲	۳/۸۷۱۴
S۸	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۳	۴/۲۴۲۳	S۱۷	۷	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۲ ۵	۳/۶۷۱۴
S۹	۵	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۱	۳/۶۳۰۵	S۱۸	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۴ ۴	۴/۶۵۹۰

ادامه‌ی جدول ۲.

سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)	سناریو	تعداد افراد	محل خدمت	ترکیب افراد	راندمان تولید (m^2/hr)
S۱۹	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی	۵	۴/۱۹۰۳	S۲۰	۸	بین انبار و محل تولید ملات و دیوارچینی	۳	۴/۰۵۹۰
		بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۳				بین محل تولید ملات و دیوار در حال اجرا	۵	

جدول ۳. راندمان تولید طی پیشرفت پروژه به‌ازاء مقادیر یکسانی از پیشرفت کار.

ردیف	دیوارچینی (m^2)	زمان (min)	مدت (min)	راندمان تولید (m^2/hr)
۱	۱۰	۱۹۵	۱۹۷	۶/۰۹۱۳۷۰۶
۲	۲۰	۳۹۲	۱۹۵	۶/۱۵۳۸۴۶۲
۳	۳۰	۵۹۶	۲۰۴	۵/۸۸۲۳۵۲۹
۴	۴۰	۸۱۲	۲۱۶	۵/۵۵۵۵۵۶
۵	۵۰	۱۰۲۷	۲۱۵	۵/۵۸۱۳۹۵۳
۶	۶۰	۱۲۵۳	۲۲۶	۵/۳۰۹۷۳۴۵
۷	۷۰	۱۴۹۶	۲۴۳	۴/۹۳۸۲۷۱۶
۸	۸۰	۱۷۷۵	۲۷۹	۴/۳۰۱۰۷۵۳
۹	۹۰	۲۰۸۶	۳۱۱	۳/۸۵۸۵۲۰۹
۱۰	۱۰۰	۲۴۱۶	۳۳۰	۳/۶۳۶۳۶۳۶

آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش تعداد کارگران، راندمان تولید نیز افزایش می‌یابد؛ ولی این روند تا جایی ادامه می‌یابد که تعداد بیشتر کارگران سبب افزایش اندرکنش‌های فیزیکی شود، که درنهایت به کاهش راندمان تولید منتج می‌شود. همچنین راندمان تولید در طول مدت زمان اجرای پروژه تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند بنا به دلایل متعددی باشد؛ اما نتایج نشان می‌دهند که پیشرفت پروژه و به‌دنبال آن ایجاد موانع بیشتر در محیط، به‌خودی خود می‌توانند سبب کاهش راندمان تولید شوند. در مطالعات پیشین تولید در فعالیت‌های ساختمانی با تمرکز بر فرایند و آثار متقابل عامل‌ها ارزیابی شده است، اما به‌دلیل محدودیت‌های روش‌های پیشین، شناسایی رفتارهای حرکتی کارگران و حمل بار در یک کارگاه، تاکنون بررسی نشده بود.

لذا در پژوهش حاضر، ضمن ارائه‌ی رویکردی جدید، امکان مطالعه‌ی دقیق‌تر متغیرهای مؤثر در فرایندهای تولیدی در صنعت و به‌ویژه صنعت ساختمان فراهم شده است. ضمناً برای مطالعات آتی این موضوعات نیز پیشنهاد می‌شود:

- استفاده از روش ترکیبی ارائه شده برای مدل‌سازی تولید در فرایندهای صنعتی مشابه دیگر،
- استفاده از روش ترکیبی ارائه شده برای بررسی سناریوهای موازی‌کاری فعالیت‌ها،
- استفاده از روش ارائه شده برای تحلیل مبادله‌ی زمان ـ هزینه،
- استفاده از روش ارائه شده برای برنامه‌ریزی و طرح‌بندی محیط کارگاه.

پانوشت‌ها

1. discrete event simulation
2. social force modeling
3. social force modelling (SFM)
4. Moselhi
5. Thabet & Beliveau
6. Mallasi
7. Cheung
8. Jang
9. system dynamic
10. Agent-based modelling
11. discrete event simulation
12. Jabri & Zayed
13. Watkins
14. Ben-Alon & Sacks
15. building information modelling
16. cyclic operations network
17. Martinez
18. Hajjar & AbouRizk
19. Hu
20. continues simulation
21. cellular automata
22. velocity-based models
23. continuum models
24. hybrid models
25. behavioral models
26. network models
27. Helbing & Molnar
28. probability density function
29. histogram
30. Chi-squared test
31. agent
32. Helbing

منابع (References)

1. Halpin, D.W. and Riggs, L.S. "Planning and analysis of construction operations", John Wiley & Sons (1992).
2. Sadeghi, N., Robinson Fayek, A. and Gerami Seresht, N. "Queue performance measures in construction simulation models containing subjective uncertainty", *Automation in Construction*, **60**, pp. 1-11 (2015).

3. Abdelmegid, M.A., Gonzalez, V.A., Poshdar, M. "Barriers to adopting simulation modelling in construction industry", *Automation in Construction*, **111**, pp. 103046 (2020).
4. Moselhi, O. and. Khan, Z. "Significance ranking of parameters impacting construction labour productivity", *Construction Innovation*, **12**(3), pp. 272-296 (2012).
5. Randolph Thomas, H. and Horman, M.J. "Fundamental principles of workforce management", *Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(1), pp. 97-104 (2006).
6. Thabet, W.Y. and Beliveau, Y.J. "Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, **120**(1), pp. 96-116 (1994).
7. Liao, T.W., Egbelu, P.J., Sarker, B.R. and et al. "Metaheuristics for project and construction management - A state-of-the-art review", *Automation in Construction*, **20**(5), pp. 491-505 (2011).
8. Mallasi, Z. and Dawood, N. "Workspace competition: assignment, and quantification utilizing 4D visualization tools", *in Proceeding of Conference on Construction Application of Virtual Reality, ADETTI/ISCTE Lisbon*, pp. 13-22 (2004).
9. Cheung, S.-O., Tong, T. K.-L. and Tam, C.-M. "Site pre-cast yard layout arrangement through genetic algorithms", *Automation in Construction*, **11**(1), pp. 35-46 (2002).
10. Jang, H.-S., Lee, S. and Choi, S. "Optimization of floor-level construction material layout using genetic algorithms", *Automation in Construction*, **16**(4), pp. 531-545 (2007).
11. Soltani, A.R., Tawfik, H., Goulermas, J.Y. and et al. "Path planning in construction sites: Performance evaluation of the Dijkstra, A, and GA search algorithms", *Advanced Engineering Informatics*, **16**(4), pp. 291-303 (2002).
12. Kunc, M. "System dynamics: A soft and hard approach to modelling", *in 2017 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE*, pp. 597-606 (2017).
13. Siebers, P.-O., Macal, C., Garnett, J. and et al. "Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation", *J. of Simulation*, **4**, pp. 204-210 (2010).
14. Sawhney, A., Bashford, H., Walsh, K. and et al. "Agent-based modeling and simulation in construction", *Proceedings - Winter Simulation Conference*, **2**, pp. 1541-1547 (2003).
15. Khanzadi, M., Nasirzadeh, F., Mir, M. and et al. "Prediction and improvement of labor productivity using hybrid system dynamics and agent-based modeling approach", *Construction Innovation*, **18**(1), pp. 2-19 (2018).
16. Jabri, A. and Zayed, T. "Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations", *Automation in Construction*, **81**, pp. 210-223 (2017).
17. Watkins, M., Mukherjee, A., Onder, N. and et al. "Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(7), pp. 657-667 (2009).
18. Ben-Alon, L. and Sacks, R. "Simulating the behavior of trade crews in construction using agents and building information modeling", *Automation in Construction*, **74**, pp. 12-27 (2017).
19. Kim, K. and Kim, K.J. "Multi-agent-based simulation system for construction operations with congested flows", *Automation in Construction*, **19**(7), pp. 867-874 (2010).
20. Bokor, O., Florez, L., Osborne, A. and et al. "Overview of construction simulation approaches to model construction processes", *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, **11**(1), pp. 1853-1861 (2019).
21. Halpin, D.W. "An investigation of the use of simulation network for modeling construction operations", PhD Dissertation, Univ. of Illinois (1973).
22. Martinez, J "STROBOSCOPE-state and resource based simulation of construction processes", Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1996).
23. Hajjar, D. and AbouRizk, S. "Simphony: an environment for building special purpose construction simulation tools", *Presented at the Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation-a Bridge to the Future -, 2, Phoenix*, Arizona, USA, (1999).
24. AbouRizk, S. "Role of simulation in construction engineering and management", *Journal of Construction Engineering and Management*, **136**(10), pp. 1140-1153 (2010).
25. Sadeghi, N., Fayek Aminah, R. and Gerami Seresht, N. "A fuzzy discrete event simulation framework for construction applications: improving the simulation time advancement", *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**(12), pp. 04016071 (2016).
26. Baniassadi, F., Alvanchi, A. and Mostafavi, A. "A simulation-based framework for concurrent safety and productivity improvement in construction projects", *Engineering, Construction and Architectural Management*, **25**(11), pp. 1501-1515 (2018).
27. Hu, D., Mohamed, Y., Taghaddos, H. and et al. "A simulation-based method for effective workface planning of industrial construction projects", *Construction Management and Economics*, pp. 1-20 (2017).
28. Taghaddos, H., Heydari, M.H. and Asgari, A. "A hybrid simulation approach for site layout planning in construction projects", *Construction Innovation*, **21**(3), pp. 417-440 (2021).
29. Helbing, D. and Molnar, P. "Social force model for pedestrian dynamics", *Physical Review E*, **51**(5), pp. 4282-4286 (1995).
30. Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H. and et al. "Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk", *Transportation Research part C: Emerging Technologies*, **40**, pp. 143-159 (2014).
31. Zeng, W., Chen, P., Yu, G. and et al. "Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: A hybrid approach", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **80**, pp. 37-70 (2017).

32. Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A. and et al. "Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions", *Transportation Science*, **39**(1), pp. 1-24 (2005).
33. Mehran, R., Oyama, A. and Shah, M. "Abnormal crowd behavior detection using social force model", *in 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, pp. 935-942 (2009).
34. Li, M., Zhao, Y., He, L. and et al. "The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China", *Safety Science*, **79**, pp. 243-253 (2015).
35. Lei, M., Li, A., Gao, R. and et al. "Experimental study and numerical simulation of evacuation from a dormitory", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **391**(21), pp. 5189-5196 (2012).
36. Lei, W., Li, A. and Gao, R. "Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for a dormitory in China", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **392**(1), pp. 79-88 (2013).
37. Lei, W., Li, A., Gao, R. and et al. "Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **391**(22), pp. 5355-5365 (2012).
38. Ma, L., Chen, B., Qiu, S. and et al. "Agent-based modeling of emergency evacuation in a railway station square under sarin terrorist attack", *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, **8**(02), pp. 1750022 (2017).
39. Hosseini, O. and Maghrebi, M. "Risk of fire emergency evacuation in complex construction sites: Integration of 4D-BIM, social force modeling, and fire quantitative risk assessment", *Advanced Engineering Informatics*, **50**, pp. 101378 (2021).
40. Borshchev, A. and Filippov, A. "From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools", *in Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, 22: Citeseer* (2004).
41. Borshchev, A. "Multi-method modeling", *in Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World, IEEE Press*, pp. 4089-4100 (2013).
42. Dabirian, S., Moussazadeh, M., Khanzadi, M. and et al. "Predicting the effects of congestion on labour productivity in construction projects using agent-based modelling", *International Journal of Construction Management*, pp. 1-24 (2021).
43. Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. "Simulating dynamic features of escape panic", *Nature*, **407**, pp. 487-490 (2000).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۵-۲۴، (پژوهشی)

Original Article

تعیین توابع پتانسیل مسائل ترموالاستودینامیک برای محیط‌های مدرج تابعی همسانگرد جانبی

سیاوش پناهی (دانشجوی دکتری)
بهرام نوائی‌نیا * (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

یکی از مؤثرترین روش‌های حل مسائل سه‌بُعدی کشسانی، استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان است. در پژوهش حاضر، به معرفی توابع پتانسیل تغییرمکان برای حل مسائل ترموالاستودینامیک در محیط همسانگرد جانبی با مصالح مدرج تابعی پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا معادلات سینماتیک سه‌بُعدی و ترمودینامیک برای مصالح مدرج تابعی در محیط همسانگرد جانبی شده است، سپس با استفاده از روشی نظام‌مند در نحوه‌ی جداسازی معادلات، توابع پتانسیل تغییرمکان برای حل مسائل ترموالاستودینامیک در محیط مذکور به دست آمده است، که قابل استفاده در حل مسائل تیرها، صفحات، پوسته‌ها و محیط‌های بی‌نهایت و نیمه بی‌نهایت است. توابع پتانسیل حاصل، شامل دو تابع اسکالر F و χ است، که به ترتیب معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه‌های شش و دو هستند. در ادامه، برای راستی‌آزمایی پژوهش حاضر، میدان تغییرمکان ـ حرارت بر حسب توابع پتانسیل برای حالت خاص محیط همسانگرد مدرج تابعی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: مصالح مدرج تابعی، مصالح همسانگرد جانبی، توابع پتانسیل تغییرمکان، حل دقیق، مسائل ترموالاستودینامیک.

siavash.panahi88@yahoo.com
navayi@nit.ac.ir

۱. مقدمه

مصالح مدرج تابعی، گروه جدیدی از مصالح پیشرفته‌ی کامپوزیتی با خصوصیات متغیر در یک یا چند جهت هستند. خصوصیات مکانیکی مصالح مدرج تابعی، نظیر: ضریب پواسون، مدول یانگ (کشسانی)، چگالی و مدول برشی به‌تدریج و به‌صورت پیوسته بین دو سطح تغییر می‌کنند.[۱] تغییرات خواص کشسان مواد مدرج تابعی با توجه به کسر حجمی[۱] اجزاء متفاوت تشکیل‌دهنده به‌صورت توزیع توانی، نمایی و یا دیگر توابع تعریف شده توصیف می‌شوند.[۲] مصالح مدرج تابعی اغلب به‌صورت ترکیبی از سرامیک و فلز ساخته می‌شوند، که در آن مؤلفه‌ی فلزی استحکام و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و مؤلفه‌ی سرامیکی مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی را ایجاد می‌کند.[۳] به‌دلیل خواص مطلوب مصالح مدرج تابعی، این مصالح در زمینه‌های مختلف مهندسی، مانند: پزشکی، اپتیک، الکترونیک، هوا و فضا، کشتی‌سازی، مکانیک، عمران و سایر گروه‌های مهندسی که تحت تنش‌های حرارتی و پسماند زیاد قرار دارند، استفاده می‌شود. بنابراین، بررسی تحلیلی مسائل ترموکشسان برای محیط ناهمگن مدرج تابعی، اهمیت بسیار زیادی دارد.[۴]

تاکنون، مطالعات بسیاری در زمینه‌ی تحلیل مسائل ترموکشسان با استفاده از ترکیب تئوری‌های یک و دو بُعدی محیط‌های پیوسته و قانون دوم ترمودینامیک برای مصالح مدرج تابعی انجام شده است. برای نمونه، چن[۲] و همکاران (۲۰۱۸)،[۵] ارتعاش حرارتی تیرهای مدرج تابعی را برای شرایط مرزی مختلف با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالاتر تیر مطالعه کرده‌اند. تئوری مرتبه‌ی بالاتر با معرفی یک تابع تنش برشی عرضی جدید در راستای ضخامت تیر پیشنهاد شده است. ایشان مشخص کردند که با افزایش پارامتر ناهمگنی، بسامد طبیعی تیر کاهش می‌یابد. ترینه[۳] و همکاران (۲۰۱۶)،[۶] یک روش تحلیلی برای بررسی رفتار ارتعاشی و کمانشی تیرهای مدرج تابعی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی یکنواخت ارائه کرده‌اند. به‌منظور در نظر گرفتن آثار حرارتی، سه مدل توزیع حرارت در راستای ضخامت، شامل: یکنواخت، خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده است. ایشان آثار توزیع دما را در بسامدهای طبیعی بررسی کرده و دریافته‌اند که نتایج به دست آمده از حل وابسته به دما، به‌طور قابل توجهی از حل مستقل از دما به‌ویژه برای تیرهای عمیق کمتر است. واتاناساکولپونگ[۴] (۲۰۱۱)،[۷] با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی سوم، بار کمانش حرارتی بحرانی و بسامد ارتعاش آزاد حرارتی تیرهای مدرج تابعی را محاسبه کرد.

در زمینه‌ی تحلیل محیط‌های دوبُعدی می‌توان به مطالعه‌ی چاکراورتی و پرادان[۵] (۲۰۱۴)،[۸] اشاره کرد. ایشان در پژوهش خود به بررسی ارتعاش آزاد صفحات مدرج تابعی مستطیلی با توزیع نمایی در راستای ضخامت در محیط حرارتی پرداخته‌اند. سپس، معادلات حاکم تئوری کلاسیک صفحات را با استفاده از روش رایلی ـ ریتز مشخص کردند و دریافتند که پارامترهای بسامد با افزایش ضخامت صفحه، افزایش و با افزایش شیب، توزیع دما برای هر شرایط مرزی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۱۶.
DOI:10.24200/J30.2022.60646.3114

کاهش می‌یابد. علاوه‌بر این، بر اساس تئوری برشی مرتبه‌ی اول صفحات، ردی و چن[۶](۱۹۹۸)،[۹] پاسخ دینامیکی حرارتی صفحات مدرج تابعی را به دست آوردند. یانگ و شن[۷](۲۰۰۲)،[۱۰] نیز پاسخ تنش‌های اصلی را برای حالت ارتعاش آزاد و اجباری صفحات مدرج تابعی در محیط حرارتی ارائه کرده‌اند. پاسخ خمش ترموکشسان صفحات ساندویچی مدرج تابعی با بهره‌گیری از تئوری برشی مثلثاتی اصلاح شده توسط تونسی و همکاران (۲۰۱۳)،[۱۱] بیان شده است. اغلب کارهای مطالعاتی صورت‌گرفته در زمینه‌ی تحلیل مسائل ترموالاستودینامیک برای محیط‌های سه‌بُعدی ناهمگن به‌دلیل پیچیدگی معادلات حاصل، پژوهش‌گران به آن‌ها کمتر توجه کرده‌اند. روش توابع پتانسیل برای حل سه‌بُعدی مسائل مختلف تئوری ارتجاعی، یکی از کارآمدترین و مؤثرترین روش‌هاست. از اولین مطالعاتی که در زمینه‌ی معرفی توابع پتانسیل برای محیط‌های ناهسمان‌گرد صورت گرفته است، تابع پتانسیل لیخنیستکی[۸] است. لیخنیستکی (۱۹۶۲)، گروهی از توابع پتانسیل را جهت حل عمومی محیط‌هایی با خاصیت همسانگرد جانبی و تقارن محوری ارائه کرده است.[۱۲] هو[۹] و نوواکی[۱۰] نیز با استفاده از توابع پتانسیل به بررسی مسائل کلی همسانگرد جانبی در فضای سه بعدی پرداختند.[۱۳و۱۴] وانگ[۱۱](۱۹۹۸)، با ارزیابی مسائل کشسانی برای محیط نیمه بی‌نهایت همسانگرد جانبی، نشان داد که توابع پتانسیل لیخنیتسکی، هو و نوواکی، مجموعه‌یی کامل برای حل مسائل استاتیکی در محیط‌های همسانگرد جانبی هستند.[۱۵] اسکندری قادی (۲۰۰۵)، توابع پتانسیل ارائه شده توسط لیخنیتسکی، هو، و نوواکی را از حالت استاتیکی به دینامیکی گسترش داد.[۱۶] همچنین وی در مجموعه‌ی مطالعاتی،[۱۷-۲۰] با به‌کارگیری توابع پتانسیل پیشنهادی خود به تحلیل دینامیکی محیط‌های نیمه‌بی‌نهایت و بی‌نهایت همسانگرد جانبی پرداخته است. نعمت‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)،[۲۱] نیز با استفاده از توابع پتانسیل مذکور، تحلیل خمش صفحات ضخیم همسانگرد جانبی را تحت بار استاتیکی یکنواخت حل کردند. همچنین نوایی‌نیا (۲۰۱۴)،[۲۲] حل دقیق سه‌بُعدی ارتعاش آزاد صفحات همسانگرد مستطیلی ضخیم بر روی تکیه‌گاه ساده را با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان ارائه شده توسط اسکندری قادی تعیین کرده است. توابع پتانسیل اسکندری قادی برای تحلیل سه‌بُعدی کمانش، خمش و ارتعاش آزاد ورق‌های همسانگرد و همسانگرد جانبی نیز به‌صورت موفقیت‌آمیزی استفاده شده است.[۲۳-۲۶] در ادامه، اسکندری قادی و امیری هزاوه (۲۰۱۴)،[۲۷] تابع پتانسیل پیشنهادی اسکندری قادی (۲۰۰۵)،[۱۶] را برای محیط همسانگرد جانبی ناهمگن با توزیع نمایی در راستای ضخامت ارائه کرده‌اند. وفاخواه و نوایی‌نیا (۲۰۱۹)،[۲۸] نیز به بررسی خمش صفحات مستطیلی همسانگرد ناهمگن ضخیم با استفاده از توابع پتانسیل اسکندری قادی و امیری هزاوه (۲۰۱۴)،[۲۷] پرداخته‌اند. برای مسائل ترموالاستودینامیک در محیط همسانگرد نیز توابعی ارائه شده است، که معادلات درگیر شده‌ی حرارت را به معادلات مجزا تبدیل می‌کند.[۲۹و۳۰] فراتی و همکاران (۲۰۱۳)،[۳۱] توابع پتانسیل خود را برای بررسی مسائل ترموالاستودینامیک در محیط همسانگرد جانبی ارائه کرده‌اند. تابع پتانسیل پیشنهادی فراتی و همکاران، توسط اسکندری و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) برای بررسی مسائل مختلف ترموالاستودینامیک در محیط نیمه بی‌نهایت همسانگرد جانبی استفاده شده است.[۳۲-۳۵]

با توجه به اطلاعات موجود، تاکنون تابع پتانسیل تغییرمکان برای تحلیل مسائل ترموالاستودینامیک در محیط همسانگرد جانبی ناهمگن مدرج تابعی ارائه نشده است. در صورتی که فرض ناهمگن بودن مصالح ناهمسانگرد در یک فضای سه‌بُعدی در نظر گرفته شود، تحلیل مسئله، دشوار و طولانی خواهد شد. هدف از پژوهش حاضر، ارائه‌ی میدان جابه‌جایی و حرارت برای مسائل ترموالاستودینامیک در محیط همسانگرد جانبی است، که محور کشسان ماده، همان محور تقارن گرمایی است. همچنین در حالت خاص، راستی‌آزمایی لازم برای توابع پتانسیل به دست آمده انجام شده است.

۲. مصالح مدرج تابعی

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، مصالح مدرج تابعی، یک گروه جدید از مواد مرکب[۱۲] هستند، که در آن‌ها، ترکیب و ساختار ماده به‌تدریج تغییر می‌کند و در نتیجه، در خواص ماده نیز تغییرات تدریجی ایجاد می‌شود. به‌عبارت دیگر، ریزساختارهای تشکیل‌دهنده‌ی مواد مرکب در یک راستا به‌صورت پیوسته و تدریجی از یک ماده‌ی مشخص به سمت ماده‌یی کاملاً متفاوت میل می‌کنند. به‌عنوان نمونه، مدول کشسانی، چگالی و ضریب انبساط حرارتی در مواد مدرج تابعی، به‌صورت پیوسته از سطحی به سطح دیگر در حال تغییر است. به‌دلیل تغییرات پیوسته در خواص مواد مذکور، مشکل تغییرات ناگهانی خواص در سطح تماس مواد مرکب در مواد مدرج تابعی وجود ندارد و منجر به توزیع تنش پیوسته خواهد شد.[۳۶]

۱.۲. مدل‌های ریاضی توزیع مشخصات مواد مدرج تابعی

برای تحلیل محیط ناهمگن مدرج تابعی، باید چگونگی توزیع مشخصات ماده در آن تعیین شود. بدین منظور، مدل‌های ریاضی مختلفی توسط پژوهش‌گران برای توصیف تغییرات خصوصیات مواد مدرج تابعی مطرح شده است. در بیشتر مدل‌های ریاضی ذکر شده، فرض می‌شود که مشخصات ماده در یک جهت متغیر و در جهت‌های دیگر ثابت است. برای یک ماده‌ی مدرج تابعی، که بر پایه‌ی فلز و سرامیک تولید شده است، نحوه‌ی تغییر مشخصات دو فاز سرامیک و فلز توسط مدل‌های ریاضی مختلف بیان می‌شود. اگر حجم فاز سرامیک برابر با V_m و V_c حجم فاز فلزی در نظر گرفته شود، در نتیجه نسبت‌های حجمی دو فاز فلز f_m و سرامیک f_c به شکل روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند:[۲۶]

$$f_m = \frac{V_m}{V_c + V_m} \tag{۱}$$

$$f_c = \frac{V_c}{V_c + V_m} \tag{۲}$$

که در آن‌ها، مجموع نسبت‌های حجمی فلز و سرامیک برابر واحد خواهد بود. یکی از روابط معرفی مشخصات ماده‌ی مدرج تابعی در هر نقطه، وابسته به نسبت‌های حجمی فازهای تشکیل‌دهنده در آن نقطه است (مطابق رابطه‌ی ۳):[۳۶]

$$P_{eff} = P_c f_c + P_m f_m \tag{۳}$$

که در آن، P_m، P_c و P_{eff} به ترتیب مشخصه‌ی مورد بررسی برای فلز، سرامیک و مشخصه‌ی ماده در نقطه‌ی مورد نظر هستند. مدل‌های ریاضی مختلفی برای توصیف رابطه‌ی نسبت‌های حجمی فازهای تشکیل‌دهنده و مشخصات مواد تاکنون ارائه شده است، که در ادامه، چند مدل معروف برای بیان توزیع مشخصات مواد مدرج تابعی در راستای ضخامت، به‌اختصار معرفی شده‌اند.

- **مدل تابع توانی[۱۳]**

یکی از مدل‌های ساده و پرکاربرد برای مدل‌سازی محیط مدرج تابعی، مدل تابع توانی است. در مدل تابع توانی فرض می‌شود که سطح ماده در یک مرز از فلز

خالص و در سطح دیگر مرز از سرامیک خالص تشکیل شده است و نسبت حجمی ریزساختارهای تشکیل‌دهنده‌ی آن در راستای ضخامت به‌صورت توانی تغییر می‌کند. در نتیجه، رابطه‌ی مشخصات ماده‌ی مدرج تابعی در هر نقطه از ضخامت به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:[۱]

$$P(x_3) = P_m + (P_c - P_m) f_c \tag{۴}$$

که در آن، نسبت حجمی سرامیک مطابق رابطه‌ی ۵ در نظر گرفته می‌شود:

$$f_c = \left(\frac{x_3}{h}\right)^p \tag{۵}$$

که در آن، p و h به ترتیب معرف توان تابع توانی و ضخامت ماده هستند.[۱]

- **مدل تابع نمایی**[۱۴]

مدل تابع نمایی، یک مدل ایده‌آل برای تعریف مشخصات مواد مدرج تابعی محسوب می‌شود، که بیشتر برای تحلیل مسائل مکانیک شکست به‌کار می‌رود و در آن، تغییرات مشخصات در راستای ضخامت به‌صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:[۱]

$$P(x_3) = P_m e^{\left(\frac{x_3}{h}\right)\ln\left(\frac{P_c}{P_m}\right)} \tag{۶}$$

در تعریف اخیر فرض شده است که ماده از یک جنس مشخص در سطح $x_3 = 0$ به‌صورت نمائی خواص آن در ارتفاع تغییر می‌کند. آنچه در سایر مطالعات استفاده می‌شود، تغییرات خطی، نمایی و توانی است، که در پژوهش حاضر به دلیل کاربرد بیشتر تغییرات نمایی و همچنین پیشینه‌ی پژوهشی که توابع نمایی برای به دست آوردن توابع پتانسیل تغییرمکان داشته‌اند، از مدل تابع نمایی برای تعریف مشخصات مصالح مدرج تابعی استفاده شده است.

۳. روابط ترموالاستودینامیک محیط همسانگرد جانبی ناهمگن

اگر تغییرشکل‌های محیط، کوچک در نظر گرفته شوند، آن‌گاه روابط پایه‌ی تئوری ترموالاستودینامیک خطی برای محیط مدرج تابعی به‌صورت روابط ۷ الی ۱۰ بیان می‌شوند:[۳۱]

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ij,i}} + \mathbf{b_j} = \rho(x_3)\ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{j}} \tag{۷}$$

$$-div\mathbf{q} + \theta_0 \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{kl}} + \mathbf{r} = c\dot{\theta} \tag{۸}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ij}} = \mathbf{C_{ijkl}}(\mathbf{x_3})\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{kl}} + (\theta - \theta_0)\mathbf{M} \tag{۹}$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}\nabla\theta \tag{۱۰}$$

که در آن‌ها، div نماد دیورژانس و بالانویس (.) بیانگر مشتق تابع نسبت به زمان هستند. همچنین، $\mathbf{u_j}$ بردار تغییرمکان و $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ij}}$ تانسور تنش ترموکشسان هستند.[۲۹] همچنین، در رابطه‌ی ۷، $\rho(x_3)$ چگالی محیط و $\mathbf{b_j}$ بردار نیروهای حجمی هستند. $\mathbf{q}$ و $\mathbf{r}$ در رابطه‌ی ۸، به ترتیب بردار شار حرارتی و منبع گرمایی، θ درجه‌ی حرارت مطلق، c گرمای ویژه و $\mathbf{M}$ نیز تانسور مرتبه‌ی دوم تنش ـ درجه حرارت محیط هستند.[۳۱] تانسور مرتبه‌ی چهارم $\mathbf{C_{ijkl}}(\mathbf{x_3})$، تانسور ارتجاعی محیط است و از آن‌جایی که مواد همسانگرد جانبی دارای تقارن محوری هستند، ضرایب کشسان مستقل در تانسور تنش ـ کرنش محیط مدرج تابعی به شکل رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شوند. ضرایب مذکور، همچنین با فرض تغییرات مشخصات مواد مدرج تابعی در راستای x_3 ارائه شده‌اند.[۲۷] که در آن، ضرایب $C_{1111}(x_3)$، $C_{1122}(x_3)$، $C_{1133}(x_3)$، $C_{3333}(x_3)$ و $C_{2323}(x_3)$ ضرایب مستقل کشسان و $C_{1212}(x_3)$ ضریب وابسته است، که از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:[۲۷]

$$C_{1212}(x_3) = \frac{1}{2}\left(C_{1111}(x_3) - C_{1122}(x_3)\right) \tag{۱۲}$$

از آن‌جایی که انرژی کرنشی، مثبت ـ معین است، روابط ۱۳ برقرار است:[۲۷]

$$\begin{aligned} &C_{1111}(x_3) \geq |C_{1122}(x_3)|, C_{2323}(x_3) \geq 0 \\ &C_{1111}(x_3) \leq C_{3333}(x_3) - 2C_{1133}^2(x_3) \\ &+C_{3333}(x_3)C_{1212}(x_3) \geq 0 \end{aligned} \tag{۱۳}$$

با فرض محیط ناهمگن و در نظرگرفتن مدل ریاضی تابع نمایی برای بیان مشخصات مصالح مدرج تابعی، می‌توان $\mathbf{C_{ijkl}}(\mathbf{x_3})$ و $\rho(\mathbf{x_3})$ را به‌صورت رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ نوشت:[۲۷]

$$\mathbf{C_{ijkl}}(x_3) = \mathbf{C_{0ijkl}} e^{2\beta x_3} \tag{۱۴}$$

$$\rho(\mathbf{x_3}) = \rho_0 \mathbf{e}^{2\beta \mathbf{x_3}} \tag{۱۵}$$

که در آن‌ها، β ضریب درجه‌ی ناهمگنی مصالح مدرج تابعی است. همچنین، $C_{0ijkl} = C_{ijkl}(x_3 = 0)$ و $\rho_0 = \rho(x_3 = 0)$ به ترتیب ضرایب کشسان و چگالی ماده در سطح مبنا در نظرگرفته می‌شوند.

علاوه‌بر این، با فرض رفتار خطی برای محیط در رابطه‌ی ۹، رابطه‌ی کرنش‌ها بر اساس میدان تغییرمکان به شکل رابطه‌ی ۱۶ بیان می‌شود:[۳۱]

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{kl}} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T) \tag{۱۶}$$

که در آن، بالانویس T معرف عملگر ترانهاده و ∇ عملگر گرادیان است. پارامتر $\mathbf{K}$ در رابطه‌ی ۱۰، معرف تانسور رسانایی حرارتی است، که در حالت کلی به کرنش و

$$\mathbf{C_{ijkl}}(\mathbf{x_3}) = \begin{bmatrix} C_{1111}(x_3) & C_{1122}(x_3) & C_{1133}(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122}(x_3) & C_{1111}(x_3) & C_{1133}(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133}(x_3) & C_{1133}(x_3) & C_{3333}(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323}(x_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2323}(x_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212}(x_3) \end{bmatrix} \tag{۱۱}$$

درجه‌ی حرارت وابسته است. همچنین، تانسور رسانایی حرارتی $\mathbf{K}$ و تانسور تنش ـ درجه‌ی حرارت $\mathbf{M}$ برای محیط همسانگرد جانبی به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ در نظر گرفته می‌شود:[۲۹]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{k}_3 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{m}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{m}_3 \end{bmatrix} \tag{۱۷}$$

برای محاسبه‌ی معادلات حاکم حرکت بر حسب میدان تغییرمکان ـ درجه‌ی حرارت، ابتدا رابطه‌ی تنش ترموکشسان (رابطه‌ی ۹) در رابطه‌ی ۷ جایگذاری می‌شود و بدین ترتیب بسط سه معادله‌ی حرکت ترموالاستودینامیک به‌دست می‌آید. در ادامه، با قرار دادن رابطه‌ی هدایت گرمایی (رابطه‌ی ۱۰) در معادله‌ی انرژی (رابطه‌ی ۸)، معادله‌ی چهارم تعادل ترموالاستودینامیک نیز به دست می‌آید. معادلات مذکور را می‌توان بر حسب توابع u_1، u_2، u_3 به‌صورت روابط ۱۸ الی ۲۱ بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} &\left(\nabla_{12}^2 + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right) u_1 \\ &+ \left(\alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2}\right) u_2 + \left(\alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_1}\right) u_3 \\ &+ \left(m_1 \frac{\partial}{\partial x_1}\right) T = -\rho_0 \bar{b}_1 \end{aligned} \tag{۱۸}$$

$$\begin{aligned} &\left(\alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2}\right) u_1 + \left(\begin{array}{c} \nabla_{12}^2 + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \\ -\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \end{array}\right) u_2 \\ &+ \left(\alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} + 2\beta x_2 \frac{\partial}{\partial x_2}\right) u_3 + \left(m_1 \frac{\partial}{\partial x_2}\right) T = -\rho_0 \bar{b}_2 \end{aligned} \tag{۱۹}$$

$$\begin{aligned} &\left(\alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\beta(\alpha_3 - \alpha_2) \frac{\partial}{\partial x_1}\right) u_1 \\ &+ \left(\alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} + 2\beta(\alpha_3 - \alpha_2) \frac{\partial}{\partial x_2}\right) u_2 \\ &+ \left(\alpha_2 \nabla_{12}^2 + \alpha_4 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_4 \frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) u_3 \\ &+ \left(2\beta m_3 + m_3 \frac{\partial}{\partial x_3}\right) T = -\rho_0 \bar{b}_3 \end{aligned} \tag{۲۰}$$

$$\begin{aligned} &\left(m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial t}\right) u_1 + \left(m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial t}\right) u_2 \\ &+ \left(m_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial t}\right) u_3 + \left(\frac{k_1}{\theta_0} \left(\begin{array}{c} \nabla_{12}^2 + \frac{k_3}{k_1} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta \frac{k_3}{k_1} \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c_0}{k_1} \frac{\partial}{\partial t} \end{array}\right)\right) = -\frac{r_0}{\theta_0} \end{aligned} \tag{۲۱}$$

که در آن‌ها، پارامترهای α_1 تا α_4، m_1، m_3، k_1، k_3، c_0، r_0، ρ_0 و $\bar{b}$ به شکل رابطه‌ی ۲۲ در نظرگرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} &\alpha_1 = \tfrac{C_{1212}+C_{1122}}{C_{1212}}, \alpha_2 = \tfrac{C_{3232}}{C_{1212}}, \\ &\alpha_3 = \tfrac{C_{1132}+C_{2233}}{C_{1212}}, \alpha_4 = \tfrac{C_{3333}}{C_{1212}}, \\ &m_1 = \tfrac{\bar{m}_1}{C_{1212}}, m_3 = \tfrac{\bar{m}_3}{C_{1212}}, \\ &k_1 = \tfrac{\bar{k}_1}{C_{1212}}, k_3 = \tfrac{\bar{k}_3}{C_{1212}}, \\ &c_0 = \tfrac{c}{C_{1212}}, r_0 = \tfrac{r}{C_{1212}}, \\ &\rho_0 = \tfrac{\rho}{C_{1212}}, \bar{b} = \tfrac{b}{C_{1212}}. \end{aligned} \tag{۲۲}$$

از حل دستگاه ۴ معادله ۴ مجهول مطابق روابط ۱۸ الی ۲۱، مجهولات u_1، u_2، u_3 و T به دست می‌آیند. دستگاه مذکور را می‌توان به شکل ماتریسی (رابطه‌ی ۲۳) نیز نوشت:

$$\mathbf{DW} + \mathbf{b}' = 0 \tag{۲۳}$$

که در آن، $\mathbf{D}$، $\mathbf{W}$ و $\mathbf{b}'$ به ترتیب ماتریس عملگرهای دیفرانسیلی، بردار تغییرمکان ـ درجه حرارت و بردار نیروی حجمی هستند، که به‌صورت روابط ۲۴ تا ۲۶ بیان می‌شوند:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \tag{۲۴}$$

$$\mathbf{W} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ T]^T \tag{۲۵}$$

$$\mathbf{b}' = [\rho_0 \bar{b}_1 \ \rho_0 \bar{b}_2 \ \rho_0 \bar{b}_3 \ \frac{r_0}{\theta_0}]^T \tag{۲۶}$$

که درایه‌های ماتریس $\mathbf{D}$ به شکل روابط ۲۷ تا ۴۲ به‌دست می‌آیند:

$$D_{11} = (\nabla_{12}^2 + \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_3}) - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{۲۷}$$

$$D_{12} = \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \tag{۲۸}$$

$$D_{13} = \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \tag{۲۹}$$

$$D_{14} = m_1 \frac{\partial}{\partial x_1} \tag{۳۰}$$

$$D_{21} = \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \tag{۳۱}$$

$$D_{22} = \left(\nabla_{12}^2 + \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_3}\right) - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{۳۲}$$

$$D_{23} = \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} + 2\beta\alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \tag{۳۳}$$

$$D_{24} = m_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \tag{۳۴}$$

$$D_{31} = \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\beta\left(\alpha_3 - \alpha_2\right) \frac{\partial}{\partial x_1} \tag{۳۵}$$

$$D_{32} = \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} + 2\beta\left(\alpha_3 - \alpha_2\right) \frac{\partial}{\partial x_2} \tag{۳۶}$$

$$D_{33} = \left(\alpha_2 \nabla_{12}^2 + \alpha_4 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\alpha_4 \frac{\partial}{\partial x_3}\right) - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{۳۷}$$

$$D_{34} = 2\beta m_3 + m_3 \frac{\partial}{\partial x_3} \tag{۳۸}$$

$$D_{41} = m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial t} \tag{۳۹}$$

$$D_{42} = m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial t} \tag{۴۰}$$

$$D_{43} = m_3 \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial t} \tag{۴۱}$$

$$D_{44} = \frac{k_1}{\theta_0} \nabla_{12}^2 + \frac{k_3}{\theta_0} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + \frac{k_3}{\theta_0} 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c}{\theta_0} \frac{\partial}{\partial t} \tag{۴۲}$$

که در آن‌ها، ∇_{12}^2 برابر عملگر لاپلاس دوبُعدی در صفحه‌ی $x_1 x_2$ فرض شده است. با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی رابطه‌ی ۲۳، مجهولات مسئله یا همان بردار تغییرمکان ـ درجه حرارت قابل محاسبه می‌شوند.

۴. تابع پتانسیل

همان‌گونه که در بخش‌های قبل گفته شد، از حل ۴ معادله‌ی دیفرانسیل با مشتقات جزئی و درگیر شده‌ی تمامی مجهولات مسئله‌ی ترموالاستودینامیک در محیط ناهمگن همسانگرد جانبی، شامل اختلاف درجه حرارت و تغییرمکان به‌صورت توابعی بر حسب مکان و زمان به دست می‌آید. به‌علت پیچیدگی حل تحلیلی ۴ معادله‌ی دیفرانسیلی مذکور، روش توابع پتانسیل و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها در بخش حاضر بیان شده است، تا به وسیله‌ی آن، معادلات دیفرانسیل مستقل شوند و با حل آن‌ها، مجهولات مسئله‌ی ترموالاستودینامیک محاسبه شوند. در ادامه، توابع پتانسیل مختص مسائل ترموالاستودینامیک در محیط ناهمگن همسانگرد جانبی ارائه شده‌اند.

پاسخ معادله‌ی دیفرانسیل ۲۳ در حالت کلی، از مجموع پاسخ قسمت‌های همگن و ناهمگن به‌دست می‌آید، که قسمت همگن آن مطابق رابطه‌ی ۴۳ است:[۱۶]

$$\mathbf{DW} = 0 \tag{۴۳}$$

اگر $\mathbf{I}$ ماتریس واحد و $\mathbf{d}$ ترانهاده‌ی ماتریس کوفاکتور ماتریس $\mathbf{D}$ باشد، آنگاه با کمک گرفتن از جبر ماتریس‌ها می‌توان رابطه‌ی ۴۴ را نوشت:

$$\mathbf{Dd} = \det \mathbf{DI} \tag{۴۴}$$

که در آن، $det\mathbf{D}$ دترمینان ماتریس اپراتورهای دیفرانسیلی موجود است. با اثر دادن اپراتورهای رابطه‌ی ۴۴ در تابع برداری دلخواه و به اندازه‌ی کافی هموار $\mathbf{F}$، رابطه‌ی ۴۵ را خواهیم داشت:[۳۷]

$$\mathbf{DdF} = \det \mathbf{DIF} \tag{۴۵}$$

و اگر بردار تغییرمکان ـ درجه‌ی حرارت برحسب تابع $\mathbf{F}$ به‌صورت رابطه‌ی ۴۶ نوشته شود:

$$\mathbf{W} = \mathbf{dF} \tag{۴۶}$$

آنگاه برطبق رابطه‌های ۴۳ و ۴۵، برقراری رابطه‌ی ۴۷ لازم است:[۳۷]

$$\det \mathbf{DIF} = 0 \tag{۴۷}$$

با توجه به وجود ماتریس واحد در رابطه‌ی ۴۷، معادلات اشاره شده به صورت مستقل از هم هستند و از حل آن‌ها، تمام پارامترهای تابع $\mathbf{F}$ به دست می‌آیند. در این صورت با جایگذاری تابع $\mathbf{F}$ در رابطه‌ی ۴۶، مؤلفه‌های بردار تغییرمکان ـ درجه‌ی حرارت محاسبه می‌شوند. به‌منظور محاسبه‌ی تابع $\mathbf{F}$، در ابتدا باید دترمینان ماتریس اپراتورهای دیفرانسیلی محاسبه شود. دترمینان ماتریس اپراتور $\mathbf{D}$ بر حسب اپراتورهای موج، پارامتر ناهمگنی و انتقال حرارت به شکل رابطه‌ی ۴۸ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}\det \mathbf{D} = {} & \alpha_2 k_1 (1+\alpha_1) \square_0^{*2} \square_T^{*2} \\ & \left[\begin{array}{l} \square_1^{*2} \square_2^{*2} + 4\beta^2 \frac{(\alpha_3-\alpha_2)}{(1+\alpha_1)} \nabla_{12}^2 \\ +\delta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \end{array} \right] \\ & -\alpha_2 m_1^2 \square_0^{*2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\begin{array}{l} \left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{\alpha_2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \\ \left(\nabla_{12}^2 + \frac{m_3^2}{m_1^2} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{m_3^2}{m_1^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \\ +\delta_m \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \nabla_{12}^2 \end{array} \right]\end{aligned} \tag{۴۸}$$

که در آن، اپراتورهای $\square_0^{*2}$، $\square_1^{*2}$، $\square_2^{*2}$ و $\square_T^{*2}$ مطابق با روابط ۴۹ معرفی شده‌اند:

$$\begin{aligned}\square_0^{*2} &= \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{s_0^2 \partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{s_0^2 \partial x_3} - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ \square_1^{*2} &= \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{s_1^2 \partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{s_1^2 \partial x_3} - \frac{\rho_0}{(1+\alpha_1)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ \square_2^{*2} &= \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{s_2^2 \partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{s_2^2 \partial x_3} - \frac{\rho_0}{\alpha_2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ \square_T^{*2} &= \nabla_{12}^2 + \frac{k_3}{k_1} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{k_3}{k_1} \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c_0}{k_1} \frac{\partial}{\partial t}\end{aligned} \tag{۴۹}$$

که در آن، پارامتر S_i^2 بیان‌گر رفتار همسانگرد جانبی محیط و ریشه‌های معادله‌ی ۵۰ است، که ریشه‌های اخیر می‌توانند اعداد حقیقی مثبت یا مختلط باشند:[۲۱]

$$\left(\alpha_2 \alpha_4 s^2 + \left(\alpha_3^2 - \alpha_2^2 - (1+\alpha_1)\alpha_4 \right) s^2 + (1+\alpha_1)\alpha_2 \right) = 0 \tag{۵۰}$$

همچنین، ماتریس $\mathbf{d}$ که بیان‌گر ترانهاده‌ی کوفاکتور ماتریس $\mathbf{D}$ است، به‌صورت رابطه‌ی ۵۱ است:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \tag{۵۱}$$

اگر تمام مؤلفه‌های تابع $\mathbf{F}$ به غیر از مؤلفه‌ی سوم آن، صفر در نظر گرفته شوند، آنگاه فقط درایه‌های ستون سوم ماتریس $\mathbf{d}$ برای محاسبات موردنیاز است، که به‌صورت روابط ۵۲ تا ۵۵ بیان می‌شوند:

$$d_{13} = -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0} \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\beta \frac{k_1}{\theta_0} \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \square_T^{*2} \\ -m_1 m_3 \frac{\partial^3}{\partial x_1 \partial x_3 \partial t} \end{array} \right) \square_0^{*2} \tag{۵۲}$$

$$d_{23} = -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0} \alpha_3 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} + 2\beta \frac{k_1}{\theta_0} \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \right) \square_T^{*2} \\ -m_1 m_3 \frac{\partial^3}{\partial x_2 \partial x_3 \partial t} \end{array} \right) \square_0^{*2} \tag{۵۳}$$

$$d_{33} = \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0} \square_T^{*2} (1+\alpha_1)(\nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta \frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)} \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{(1+\alpha_1)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ -m_1 \nabla_{12}^2 \frac{\partial}{\partial t}) \end{array} \right) \square_0^{*2} \tag{۵۴}$$

$$d_{43} = -\left(\begin{array}{l} (\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3) \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial t} \\ \left(\begin{array}{l} \nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ -\frac{\rho_0 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ +2\beta \alpha_2 \frac{\partial}{\partial t} \left(m_3 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - m_1 \nabla_{12}^2 \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \square_0^{*2} \tag{۵۵}$$

به‌منظور کاهش مرتبه‌ی معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر تابع $\mathbf{F}$، روابط ۵۲ الی ۵۵ به‌گونه‌یی نوشته شده‌اند که بتوان از عملگر دیفرانسیلی $\square_0^{*2}$ فاکتور گرفت؛ که این امر به‌سادگی و درک بهتر مسئله کمک می‌کند.

۵. میدان تغییرمکان بر حسب تابع پتانسیل در محیط همسانگرد جانبی ناهمگن

با در نظرگرفتن تابع برداری $\mathbf{F}$ مطابق با رابطه ۵۶ و فرض این‌که $\mathbf{F}$ فقط در امتداد x_3 دارای مؤلفه باشد و همچنین با قراردادن آن در رابطه‌ی ۴۶، بردار تغییرمکان ـ درجه

حرارت بر حسب تابع پتانسیل به‌صورت ماتریسی (رابطه‌ی ۵۷) حاصل می‌شود:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{F} & 0 \end{bmatrix} \tag{۵۶}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{F} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{۵۷}$$

از آن‌جایی که عملگر دیفرانسیلی $\square_0^{*2}$ قابل فاکتورگیری از روابط ۴۸ و نیز ۵۲ تا ۵۵ است، تابع اختیاری $\mathbf{F}$ را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۵۸ در نظر گرفت:

$$\mathbf{F} = \square_0^{*2}\bar{\mathrm{F}} \tag{۵۸}$$

با استفاده از تابع پیشنهادی ۵۸، مؤلفه‌های میدان تغییرمکان ـ درجه حرارت برحسب تابع پتانسیل به‌صورت روابط ۵۹ به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}
u_1 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_2\frac{\partial}{\partial x_1}\right)\square_T^{*2} \\ -m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_1\partial x_3\partial t} \end{array}\right)F \\
u_2 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_2\frac{\partial}{\partial x_2}\right)\square_T^{*2} \\ -m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_2\partial x_3\partial t} \end{array}\right)F \\
u_3 &= \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0}\square_T^{*2}(1+\alpha_1)(\nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta\frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ -m_1\nabla_{12}^2\frac{\partial}{\partial t}) \end{array}\right)F \\
T &= -\left(\begin{array}{l} (\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)\frac{\partial^2}{\partial x_3\partial t} \\ \left(\begin{array}{l} \nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ -\frac{\rho_0 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ +2\beta\alpha_2\frac{\partial}{\partial t}\left(m_3\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - m_1\nabla_{12}^2\right) \end{array}\right) \end{array}\right)F
\end{aligned} \tag{۵۹}$$

با استفاده از روابط ۵۹، معادلات حاکم بر تابع پتانسیل F به معادله‌ی دیفرانسیل جزئی مرتبه‌ی ۶ کاهش می‌یابد و به شکل رابطه‌ی ۶۰ محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\alpha_2 k_1(1+\alpha_1)\square_T^{*2}\left[\begin{array}{l} \square_1^{*2}\square_2^{*2} + 4\beta^2\frac{(\alpha_2-\alpha_2)}{(1+\alpha_1)}\nabla_{12}^2 \\ +\delta\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}\right) \end{array}\right]F \\
&-\alpha_2 m_1^2\frac{\partial}{\partial t}\left[\begin{array}{l} \left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{\alpha_2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \\ \left(\nabla_{12}^2 + \frac{m_3^2}{m_1^2}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{m_3^2}{m_1^2}\frac{\partial}{\partial x_3}\right) \\ +\delta_m\left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}\right)\nabla_{12}^2 \end{array}\right]F = 0
\end{aligned} \tag{۶۰}$$

روابط ۵۹، جواب عمومی مسائل ترموالاستودینامیک برای مصالح مدرج تابعی در محیط همسانگرد جانبی است. با توجه به اینکه روابط فوق در شرط اضافه‌ی $\boldsymbol{e}_3 curl(\boldsymbol{u}) = 0$ صدق می‌کنند، می‌توان با اضافه کردن یک تابع پتانسیل دیگر، مانند χ به رابطه‌ی ۵۹، شرط اضافه‌ی اخیر را حذف کرد و شرایط لازم برای حل قسمت ناهمگن را نیز در صورت عدم حضور منبع حرارتی به‌صورت روابط ۶۱ مهیا کرد:[۱۶]

$$\begin{aligned}
u_1 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_2\frac{\partial}{\partial x_1}\right)\square_T^{*2} \\ -m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_1\partial x_3\partial t} \end{array}\right)F - \frac{\partial\chi}{\partial x_2} \\
u_2 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_2\frac{\partial}{\partial x_2}\right)\square_T^{*2} \\ -m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_2\partial x_3\partial t} \end{array}\right)F + \frac{\partial\chi}{\partial x_1} \\
u_3 &= \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0}\square_T^{*2}(1+\alpha_1)(\nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta\frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ -m_1\nabla_{12}^2\frac{\partial}{\partial t}) \end{array}\right)F \\
T &= -\left(\begin{array}{l} (\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)\frac{\partial^2}{\partial x_3\partial t} \\ \left(\begin{array}{l} \nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ -\frac{\rho_0 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{array}\right) \end{array}\right)F
\end{aligned} \tag{۶۱}$$

با استفاده از روابط اخیر و جایگذاری آن‌ها در معادلات تعادل روابط دیفرانسیلی حاکم بر توابع پتانسیل، F و χ به‌صورت روابط ۶۲ و ۶۳ محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}
&\alpha_2 k_1(1+\alpha_1)\square_T^{*2}\left[\begin{array}{l} \square_1^{*2}\square_2^{*2} + 4\beta^2\frac{(\alpha_2-\alpha_2)}{(1+\alpha_1)}\nabla_{12}^2 \\ +\delta\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}\right) \end{array}\right]F \\
&-\alpha_2 m_1^2\frac{\partial}{\partial t}\left[\begin{array}{l} \left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\rho_0}{\alpha_2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \\ \left(\nabla_{12}^2 + \frac{m_3^2}{m_1^2}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{m_3^2}{m_1^2}\frac{\partial}{\partial x_3}\right) \\ +\delta_m\left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}\right)\nabla_{12}^2 \end{array}\right]F = b_3
\end{aligned} \tag{۶۲}$$

$$\square_0^{*2}\chi(x_1, x_2, x_3, t) = \zeta(x_1, x_2, x_3, t) \tag{۶۳}$$

که در آن، تابع اسکالر $\zeta(x_1, x_2, x_3, t)$ مطابق رابطه‌ی ۶۴ به‌دست می‌آید:[۱۶]

$$\nabla \times (\mathrm{X}e_3) = b_1 e_1 + b_2 e_2 \tag{۶۴}$$

- **راستی‌آزمایی با حالت همگن**

در نهایت با صرف‌نظرکردن از پارامتر ناهمگنی از روابط میدان تغییرمکان ـ حرارت (رابطه‌ی ۶۱)، روابط توابع پتانسیل برای مسائل ترموالاستودینامیک همسانگرد جانبی به شکل روابط ۶۵ به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}
u_1 &= -\left(\left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3}\right)\square_T^{*2} - m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_1\partial x_3\partial t}\right)F - \frac{\partial\chi}{\partial x_2} \\
u_2 &= -\left(\left(\frac{k_1}{\theta_0}\alpha_3\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3}\right)\square_T^{*2} - m_1 m_3\frac{\partial^3}{\partial x_2\partial x_3\partial t}\right)F + \frac{\partial\chi}{\partial x_1} \\
u_3 &= \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0}\square_T^{*2}(1+\alpha_1)(\nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ -\frac{\rho_0}{(1+\alpha_1)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - m_1\nabla_{12}^2\frac{\partial}{\partial t}) \end{array}\right)F \\
T &= -\left(\begin{array}{l} (\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)\frac{\partial^2}{\partial x_3\partial t} \\ \left(\begin{array}{l} \nabla_{12}^2 + \frac{\alpha_2 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ -\frac{\rho_0 m_3}{(\alpha_1 m_3 - \alpha_3 m_1 + m_3)}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{array}\right) \end{array}\right)F
\end{aligned} \tag{۶۵}$$

که همان روابط توابع پتانسیل پیشنهادی اسکندری قادی و همکاران (۲۰۱۳)،[۳۱] هستند و در نتیجه درستی روند محاسبه تابع پتانسیل تأیید می‌شود.

$$\mathbf{C}_{\mathbf{ijkl}}(x_3) = \begin{bmatrix} \lambda(x_3)+2\mu(x_3) & \lambda(x_3) & \lambda(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(x_3) & \lambda(x_3)+2\mu(x_3) & \lambda(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(x_3) & \lambda(x_3) & \lambda(x_3)+2\mu(x_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu(x_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(x_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(x_3) \end{bmatrix} \tag{66}$$

۶. بازنویسی روابط برای محیط همسانگرد ناهمگن

از آن‌جایی که مواد ناهمگن همسانگرد، فقط دو ضریب کشسان مستقل در تانسور تنش ـ کرنش خود دارند، ضرایب کشسان محیط ناهمگن همسانگرد را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۶۶ ساده کرد، که در آن، پارامترهای $\lambda(x_3)$ و $\mu(x_3)$ ثابت‌های لامه هستند، که با توجه به ناهمگن بودن محیط و فرض توزیع نمایی مشخصات مواد در راستای (x_3) به‌صورت روابط ۶۷ و ۶۸ تعریف می‌شوند:

$$\lambda(x_3) = \lambda_0 e^{2\beta x_3} \tag{67}$$

$$\mu(x_3) = \mu_0 e^{2\beta x_3} \tag{68}$$

که در آن‌ها، λ_0 و μ_0 ثابت‌های لامه در سطح مبنا $(x_3 = 0)$ هستند.

با جایگذاری ضرایب کشسان رابطه‌ی ۶۶ در دستگاه معادلات حاکم ۱۸ تا ۲۱ و دانستن این موضوع که در حالت همسانگرد، پارامترهای k_3 و k_1 در تانسور رسانایی حرارتی $\mathbf{K}$ و همچنین پارامترهای m_2 و m_1 در تانسور تنش ـ درجه‌ی حرارت $\mathbf{M}$ با یکدیگر برابرند،[29] معادلات حاکم حرکت ترموکشسان برای محیط همسانگرد ناهمگن مدرج تابعی به شکل روابط ۶۹ الی ۷۲ حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} &\left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right)u_1 \\ &+\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_2}\right)u_2 \\ &+\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_1}\right)u_3 \\ &+\left(m_1\frac{\partial}{\partial x_1}\right)T = -\bar{\rho}_0\bar{b}_1 \end{aligned} \tag{69}$$

$$\begin{aligned} &\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_2}\right)u_1 \\ &+\left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right)u_2 \\ &+\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_2}\right)u_3 \\ &+\left(m_1\frac{\partial}{\partial x_2}\right)T = -\bar{\rho}_0\bar{b}_2 \end{aligned} \tag{70}$$

$$\begin{aligned} &\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\left(\frac{\lambda_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_1}\right)u_1 \\ &+\left(\left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\left(\frac{\lambda_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_2}\right)u_2 \\ &+\left(\begin{array}{c}\nabla_{12}^2 + \left(\frac{\lambda_0+2\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta\left(\frac{\lambda_0+2\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\end{array}\right)u_3 \\ &+\left(2\beta m_1 + m_1\frac{\partial}{\partial x_3}\right)T = -\bar{\rho}_0\bar{b}_3 \end{aligned} \tag{71}$$

$$\begin{aligned} &\left(m_1\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial t}\right)u_1 + \left(m_1\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial t}\right)u_2 + \left(m_1\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial t}\right)u_3 \\ &+\left(\frac{k_1}{\theta_0}\left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c_0}{k_1}\frac{\partial}{\partial t}\right)\right) = -\frac{r_0}{\theta_0} \end{aligned} \tag{72}$$

از طرفی دیگر، برای محیط همسانگرد ناهمگن، پارامترهای α_1 تا α_4، m_1، k_1، c_0، r_0، $\bar{\rho}_0$، $\bar{b}$ به‌صورت نرمال شده‌ی ضرایب کشسان و چگالی نسبت به ضریب μ_0 به شکل روابط ۷۳ بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} &\alpha_1 = \alpha_3 = \frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}, \\ &\alpha_2 = 1, \alpha_4 = \frac{\lambda_0+2\mu_0}{\mu_0}, \\ &k_1 = \frac{\bar{k}_1}{\mu_0}, m_1 = \frac{\bar{m}_1}{\mu_0}, \\ &c_0 = \frac{c}{\mu_0}, r_0 = \frac{r}{\mu_0}, \\ &\bar{\rho}_0 = \frac{\rho_0}{\mu_0}, \bar{b} = \frac{b}{\mu_0}. \end{aligned} \tag{73}$$

با جایگذاری ضرایب جدید اخیر در روابط ۶۹ تا ۷۲، در نهایت می‌توان ۴ معادله‌ی دیفرانسیل حرکت حرارتی را به شکل ماتریسی مشابه با رابطه‌ی ۲۳ بیان کرد؛ با این تفاوت که درایه‌های ماتریس عملگر دیفرانسیلی $\mathbf{D}$ مطابق با روابط ۷۴ تا ۸۹ تغییر می‌یابند:

$$D_{11} = (\nabla_{12}^2 + \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}) - \bar{\rho}_0\frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{74}$$

$$D_{12} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_2} \tag{75}$$

$$D_{13} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_1} \tag{76}$$

$$D_{14} = m_1\frac{\partial}{\partial x_1} \tag{77}$$

$$D_{21} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_2} \tag{78}$$

$$D_{22} = \left(\nabla_{12}^2 + \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_3}\right) - \bar{\rho}_0\frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{79}$$

$$D_{23} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\frac{\partial}{\partial x_2} \tag{80}$$

$$D_{24} = m_1\frac{\partial}{\partial x_2} \tag{81}$$

$$D_{31} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial x_3} + 2\beta\left(\frac{\lambda_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_1} \tag{82}$$

$$D_{32} = \left(\frac{\lambda_0+\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_2\partial x_3} + 2\beta\left(\frac{\lambda_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_2} \tag{83}$$

$$D_{33} = \left(\begin{array}{c}\nabla_{12}^2 + \left(\frac{\lambda_0+2\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \\ +2\beta\left(\frac{\lambda_0+2\mu_0}{\mu_0}\right)\frac{\partial}{\partial x_3}\end{array}\right) - \bar{\rho}_0\frac{\partial^2}{\partial t^2} \tag{84}$$

$$D_{34} = 2\beta m_1 + m_1\frac{\partial}{\partial x_3} \tag{85}$$

$$D_{41} = m_1\frac{\partial^2}{\partial x_1\partial t} \tag{86}$$

$$D_{42} = m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial t} \tag{87}$$

$$D_{43} = m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial t} \tag{88}$$

$$D_{44} = \frac{k_1}{\theta_0} \nabla_{12}^2 + \frac{k_1}{\theta_0} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + \frac{k_1}{\theta_0} 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c}{\theta_0} \frac{\partial}{\partial t} \tag{89}$$

با انجام محاسبات مربوط به تعیین توابع پتانسیل مشابه بخش چهارم نوشتار حاضر، در نهایت رابطه‌ی بردار تغییرمکان ـ درجه‌ی حرارت بر حسب توابع پتانسیل برای محیط همسانگرد مدرج تابعی ناهمگن به‌صورت روابط ۹۰ به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}
u_1 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0} \left(\frac{\lambda_0 + \mu_0}{\mu_0} \right) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ +2\beta \frac{k_1}{\theta_0} \frac{\partial}{\partial x_1} \end{array} \right) \square_T^2 \\ -m_1^2 \frac{\partial^3}{\partial x_1 \partial x_3 \partial t} \end{array} \right) F - \frac{\partial \chi}{\partial x_2} \\
u_2 &= -\left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0} \left(\frac{\lambda_0 + \mu_0}{\mu_0} \right) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} \\ +2\beta \frac{k_1}{\theta_0} \frac{\partial}{\partial x_2} \end{array} \right) \square_T^2 \\ -m_1^2 \frac{\partial^3}{\partial x_2 \partial x_3 \partial t} \end{array} \right) F + \frac{\partial \chi}{\partial x_1} \\
u_3 &= \left(\begin{array}{l} \frac{k_1}{\theta_0} \square_T^2 (\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \\ -\bar{\rho}_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - m_1 \nabla_{12}^2 \frac{\partial}{\partial t}) \end{array} \right) F \\
T &= -\left(\begin{array}{l} (m_1) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial t} \\ \left(\begin{array}{l} \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ +2\beta \frac{\partial}{\partial t} \left(m_1 \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - m_1 \nabla_{12}^2 \right) \end{array} \right) \end{array} \right) F
\end{aligned} \tag{90}$$

که در آن‌ها پارامتر $\square_T^2$ به شکل رابطه‌ی ۹۱ در نظرگرفته شده است:

$$\square_T^2 = \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{c_0}{k_1} \frac{\partial}{\partial t} \tag{91}$$

با استفاده از روابط اخیر، معادلات دیفرانسیل حاکم بر توابع F و χ نیز برای مسائل ترموالاستودینامیک دارای محیط همسانگرد مدرج تابعی ناهمگن به شکل روابط ۹۲ و ۹۳ به دست می‌آیند:

$$\left(\begin{array}{l} k_1 \left(\frac{\lambda_0 + 2\mu_0}{\mu_0} \right) \square_T^2 \left[\begin{array}{l} \square_1^2 \square_2^2 + 4\beta^2 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + 2\mu_0} \right) \nabla_{12}^2 \\ +\delta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \end{array} \right] \\ -m_1^2 \frac{\partial}{\partial t} \left[\begin{array}{l} \left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \\ \left(\nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \\ +\delta_m \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \nabla_{12}^2 \end{array} \right] \end{array} \right) F = b_3 \tag{92}$$

$$\square_2^2 \chi(x_1, x_2, x_3, t) = \zeta(x_1, x_2, x_3, t) \tag{93}$$

در روابط اخیر، پارامترهای $\square_i^2$ به‌صورت روابط ۹۴ معرفی می‌شوند:

$$\begin{aligned}
\square_1^2 &= \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\bar{\rho}_0}{(1 + \alpha_1)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\
\square_2^2 &= \nabla_{12}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\beta \frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\bar{\rho}_0}{\alpha_2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}
\end{aligned} \tag{94}$$

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مجموعه‌ی توابع پتانسیل تغییرمکان مسائل ترموالاستودینامیک برای مصالح مدرج تابعی در محیط همسانگرد جانبی، براساس روابط تعادل و قوانین ترمودینامیک با استفاده از یک روش نظام‌مند ارائه شده است. توابع پتانسیل به دست آمده، شامل: عملگرهای موج، انتقال حرارت و ترم‌های اضافی است، که هر یک دارای مفهوم فیزیکی و کاربردی مستقل هستند. همچنین در مرتب‌سازی عملگرها دقت شده است که مرتبه‌ی معادله‌ی دیفرانسیل حاکم کاهش یابد، که نهایتاً دو معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی شش و دو به دست آمده است. با حل معادلات دیفرانسیل مذکور و اعمال شرایط مرزی مربوط به هر مسئله، مجهولات بردار تغییرمکان ـ درجه حرارت، کرنش‌ها و تنش‌ها برای هر مسئله‌ی ترموالاستو دینامیک به دست خواهد آمد.

منابع (References)

1. Swaminathan, K., Naveenkumar, D., Zenkour, A. and et al. "Stress , vibration and buckling analyses of FGM plates-A state-of-the-art", *Composite Structures*, **120**, pp. 10-31 (2015).
2. Hosseini-Hashemi, S., Rokni Damavandi Taher, H., Akhavan, H. and et al."Free vibration of functionally graded rectangular plates using first-order shear deformation plate theory", *Applied Mathematical Modelling*, **34**(5), pp. 1276-1291 (2010).
3. Jha, D., Kant, T. and Singh, R. "A critical review of recent research on functionally graded plates", *Composite Structures*, **96**, pp. 833-849 (2013).
4. Thai, H.-T. and Kim, S.-E. "A review of theories for the modeling and analysis of functionally graded plates and

پانوشت‌ها

1. volume fractions
2. Chen
3. Trinh
4. Wattanasakulpong
5. Chakraverty & Pradhan
6. Reddy & Chin
7. Yang & Shen
8. Lekhnitskii
9. Hu
10. Nowacki
11. Wang
12. composite materials
13. power law function
14. exponential function

shells", *Composite Structures*, **128**(15), pp. 70-86 (2015).

5. Chen, Y., Jin, G., Zhang, C. and et al. "Thermal vibration of FGM beams with general boundary conditions using a higher order shear deformation theory", *Composites Part B*, **153**(15), pp. 376-386 (2018).
6. Trinh, L.C., Vo, T.P., Thai, H.-T. and et al. "An analytical method for the vibration and buckling of functionally graded beams under mechanical and thermal loads", *Composites Part B*, **100**(1), pp. 152-163 (2016).
7. Wattanasakulpong, N., Gangadhara Prusty, B. and Kelly, D.W. "Thermal buckling and elastic vibration of third-order shear deformable functionally graded beams", *International Journal of Mechanical Sciences*, **53**(9), pp. 734-743 (2011).
8. Chakraverty, S. and Pradhan, K. "Free vibration of exponential functionally graded rectangular plates with general boundary conditions", *Aerospace Science and Technology*, **36**, pp. 132-156 (2014).
9. Reddy, J.N. and Chin, C.D. "Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plated", *Journal of Thermal Stresses*, **21**(6), pp. 593-626 (1998).
10. Yang, J. and Shen, H.-S. "Vibration characteristics and transient response of shear-deformable functionally graded plated in termal environments", *Journal of Sound and Vibration*, **255**(3), pp. 579-602 (2002).
11. Tounsi, A., Sid Ahmed Houari, M., Benyoucef, S. and et al. "A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates", *Aerospace Science and Technology*, **24**(1), pp. 209-220 (2013).
12. Lekhnitskii, S.G. "The elastic equilibrium of a transversely isotropic layer and a thick plate Uprugoe ravnovesie transversal' no izotropnogo sloia i tolstoi plity: PMM vol.26, no.4, 1962, pp. 687-696", *J. of Applied Mathematics and Mechanics*, **26**(4), pp. 1026-1039 (1962).
13. Hu, H.-C. "On the three-dimensional problems of the theory of elasticity of a tranversely isotropic body", *Acta, Phys. Sin*, **9**(2), pp. 130-148 (1953).
14. Nowacki, W. "The stress function in three-dimeusionai problems concerning an elastic body characterized by transverse isotropy", *Applied Mechanics*, **2**(1), pp. 21-25 (1954).
15. Wang, W. and Sho, M. "On the general solutions of transversely isotropic elasticity", *Int. J. Solid and Structure*, **35**(25), pp. 3283-3297 (1998).
16. Eskandari-Ghadi, M. "A complete solution of the wave equations for transversely isotropic media", *Journal of Elasticity*, **81**, pp. 1-19 (2005).
17. Eskandari-Ghadi, M., Mirzapour, A. and Ardeshir-Behrestaghi, A. "Rocking vibration of a rigid circular disc in a transversely isotropic full-space", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, **35**(14), pp. 1587-1603 (2011).
18. Eskandari-Ghadi, M. and Ardeshir-Behrestaghi, A. "Forced vertical vibration of rigid circular disc buried in an arbitrary depth of a transversely isotropic half space", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(7), p. 547-560 (2010).
19. Eskandari-Ghadi, M., Pak, R.Y. and Ardeshir-Behrestaghi, A. "Transversely isotropic elastodynamic solution of a finite layer on an infinite subgrade under surface loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(12), pp. 986-1003 (2008).
20. Eskandari-Ghadi, M., Ardeshir-Behrestaghi, A. and Navayi Neya, B. "Mathematical analysis for an axissymmetric disc-shaped crack in transversely isotropic half-space", *International Journal of Mechanical Sciences*, **68**, pp. 171-179 (2013).
21. Nematzadeh, M., Eskandari-Ghadi, M. and Navayi Neya, B. "An analytical solution for transversely isotropic simply supported thick rectangular plates using displacement potential functions", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **46**(2), pp. 121-142 (2011).
22. Navayi Neya, B. "Exact solution of free vibration of thick rectangular isotropic plates on a simply supported using displacement potential functions", *Sharif Civil Engineering*, **30**(2), pp. 33-41 (In Persian) (2014).
23. Moslemi, A., Navayi Neya, B. and Vaseghi Amiri, J. "3-D elasticity buckling bolution for simply supported thick rectangular plates using displacement potential functions", *Applied Mathematical Modelling*, **40**(11-12), pp. 5717-5730 (2016).
24. Moslemi, A., Navayi Neya, B. and Vaseghi Amiri, J. "Benchmark solution for buckling of thick rectangular transversely isotropicplates under biaxial load", *International Journal of Mechanical Sciences*, 131-132, pp. 356-367 (2017).
25. Bakhshandeh, A., Navayi Neya, B. and Nateghi Babagi, P. "Benchmark solution for free vibration analysis of transversely isotropic thick rectangular plates", *Acta Mechanica*, **228**, pp. 3977-3995 (2017).
26. Samadi, Gh., Navayi Neya, B. and Nateghi Babagi, P. "Bending analysis of transversely isotropic thick rectangular plates on two-parameter elastic foundation", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **49**(3) pp.53-64 (2019).
27. Eskandari-Ghadi, M. and Amiri-Hezaveh, A. "Wave propagations in exponentially graded transversely isotropic half-space with potential function method", *Mechanics of Materials*, **68**, pp. 275-292 (2014).
28. Vafakhah, Z. and Navayi Neya, B. "An exact three dimensional solution for bending of thick rectangular FGM plate", *Composites Part B:Engineering*, **156**, pp. 72-87 (2019).
29. Carlson, D.E., *Linear Thermoelasticity*, In Linear Theories of Elasticity and Thermoelasticity, Verlag Berlin, Springer, pp. 298-345 (1973).
30. Zorski, H. "Singular solutions for thermoelastic media", *Bull. Asad. Polon. Sci*, **6**, pp. 331-339 (1958).
31. Forati, M., Eskandari-Ghadi, M. and Rahimian, M. "Thermo elstodynamic boundary value problems in transversely isotropic material with pontential functions", *Sharif Civil Engineering*, **29**(2), pp. 55-64 (In Persian) (2013).
32. Raoofian Naeen, M., Eskandari-Ghad, M., Ardalan, A. and et al. "Asymmetric motion of a transversely isotropic thermoelastic half-space under time-harmonic buried

source", *ZAMM- Z. Angew. Math. Phys*, **65**, pp. 1031-1051 (2014).

33. Raoofian Naeeni, M., Eskandari-Ghadi, M., Ardalan, A. and et al. "Transient response of a thermoelastic half-space to mechanical and thermal buried sources", *ZAMM - Z. Angew. Math. Mech*, **95**(4), pp. 354-376 (2015).

34. Raoofian Naeeni, M., Eskandari-Ghadi, M., Ardalan, A. and et al. "Coupled thermoviscoelastodynamic Green's functions for bi-material half-space", *ZAMM - Z. Angew. Math. Mech*, **95**(3), pp. 260-282 (2015).

35. Eskandari-Ghadi, M., Sture, S., Rahimian, M. and et al. "Thermoelastodynamics with scalar potential functions", *American Society of Civil Engineers*, **140**(1), pp. 74-81 (2014).

36. Shiota, I. and Miyamoto, Y. "Functionally graded materials", Netherlands: Elsevier (1996).

37. Rahimian, M. and Eskandari-Ghadi, M. "Mechanics of continuous media", *Tehran, University of Tehran Press* (In Persian) (2005).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۲۵-۳۶، (پژوهشی)

Original Article

استخراج ویژگی مقاوم به نویز با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد

سید امیرحسین اصفهانی (دانشجوی دکتری)
هاشم شریعتمدار* (استاد)
علیرضا انتظامی (دانشجوی پسا دکتری)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

شناسایی آسیب در سیگنال‌های با ابعاد بالا، بسیار پیچیده و زمان‌بر است. در صورتی که سیگنال‌های مذکور تحت تأثیر تحریکات نویزی خارجی قرار گرفته باشند، استفاده از آن‌ها موجب بروز عدم قطعیت در ویژگی‌های استخراج شده از آسیب می‌شود. در نوشتار حاضر، با استفاده از تحلیل سری زمانی، تابع مشخصه‌ی سیگنال محاسبه شده است. سپس با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد، یک ویژگی حساس به آسیب که مقداری مختلط است، استخراج شده است. با محاسبه‌ی زاویه‌ی ویژگی به دست آمده، آسیب سازه قابل تشخیص است. همچنین، مکان آسیب با مطالعه‌ی بخش حقیقی ویژگی به راحتی تعیین می‌شود. به‌منظور ارزیابی توانایی‌های ویژگی نوین در شناسایی آسیب، یک سازه‌ی واقعی همچون پل S۱۰۱ آزمایش شده است. نتایج به دست آمده در بخش‌های تشخیص و تعیین مکان آسیب با نتایج به دست آمده توسط پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی پایش سلامت مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده، توانایی‌های ویژگی استخراج شده را در حل چالش‌های شناسایی آسیب، یعنی داده‌های حجیم و تحریک‌های نویزی خارجی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ها، ویژگی حساس به آسیب، تابع مشخصه‌ی بسامدی، ضریب همبستگی، نویز.

esfehani@mail.um.ac.ir
shariatmadar@um.ac.ir
alireza.entezami@polimi.it

۱. مقدمه

پایش سلامت، یک فرایند پرکاربرد در تعیین وضعیت سلامت سازه‌های عمرانی است؛ که در آن، شناسایی آسیب از طریق اندازه‌گیری ارتعاش‌های بخش‌های مختلف سازه انجام می‌گیرد.[۱] آسیب به هرگونه تغییرات در ویژگی‌های ساختاری سازه اطلاق می‌شود، که تأثیری نامطلوب در عملکرد آن داشته باشد.[۲و۳] روش‌های شناسایی آسیب به دو بخش کلی پایه‌ی مدل و پایه‌ی داده دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های پایه‌ی مدل، نیاز به یک مدل المان محدود از سازه‌ی مورد بررسی است.[۴] در حالی که در روش‌های پایه‌ی داده، شناسایی آسیب بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از سازه انجام می‌پذیرد.[۵و۶] در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران زیادی به روش‌های پایه‌ی داده معطوف شده است.[۷-۱۰]

پردازش سیگنال، اولین بخش از یک روش پایه‌ی داده است، که در آن سیگنال خام پاسخ پردازش می‌شود و اطلاعاتی ارزشمند، که نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های ذاتی سازه است، به دست می‌آید. یکی از روش‌های پرکاربرد و مؤثر در پردازش سیگنال‌های سازه، روش تحلیل سری زمانی است.[۱۱] با استفاده از تحلیل سری زمانی، یک مدل خطی و نامتغیر با زمان برای سیگنال سازه به دست می‌آید، که در بردارنده‌ی ویژگی‌های ذاتی و دینامیکی سازه‌ی مورد پایش است. سادگی پیاده‌سازی و حساسیت بخش‌های مختلف مدل به آسیب، از مزایای روش پردازش سیگنال مذکور است.[۱۲] از طریق روش تحلیل سری زمانی، مدل‌های مختلفی برای یک سیگنال به دست می‌آید، که پرکاربردترین آن‌ها، عبارت‌اند از: مدل رگرسیون خودکار ۱(AR)، مدل رگرسیون خودکار با محرک خروجی ۲(ARX)، مدل رگرسیون خودکار با میانگین متحرک ۳(ARMA) و مدل رگرسیون خودکار با میانگین متحرک و محرک خروجی ۴(ARMAX). پس از آن‌که مدل مناسب برای یک سیگنال تعیین شد، پارامترهای مدل و باقیمانده‌ی آن که در بردارنده‌ی ویژگی‌های دینامیکی سیگنال مرتبط هستند، محاسبه می‌شوند.[۱۳] انتظامی و همکاران (۲۰۱۹)، با بهره‌گیری از روش تحلیل سری زمانی، سیگنال‌های پاسخ سازه را پردازش کردند و با استفاده از باقیمانده‌های مدل، یک روش شناسایی آسیب ارائه کردند.[۱۴] انتظامی و شریعتمدار (۲۰۱۸)، با استخراج پارامترهای مدل از سازه‌های سالم و آسیب دیده و همچنین مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، مکان آسیب را تعیین کردند و شدت خسارت وارده را تخمین زدند.[۷] رضایی‌پژند و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از فیلترهای پایین‌گذر، روشی برای تعیین بهینه‌ی مراتب مدل سری زمانی ارائه کردند و دریافتند که بهره‌گیری از فیلترهای پایین‌گذر، مرتبه‌های مدل سری زمانی را کاهش می‌دهد و این موجب کاهش ابعاد مدل سری زمانی می‌شود.[۱۵]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۱۶.
DOI:10.24200/J30.2022.60471.3105

پس از آن‌که داده‌های خام اولیه پردازش شدند، ویژگی‌هایی استخراج می‌شوند که وضعیت سلامتی یک سیستم را نشان می‌دهند[۲] که باید به آسیب موجود در سازه حساس باشند.[۱۶] ویژگی‌های حساس به آسیب در سه حوزه‌ی: زمان، بسامد و زمان ـ بسامد استخراج می‌شوند.[۱۷و۱۸] از باقیمانده‌ی مدل‌های سری زمانی می‌توان به‌عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برد. جلالی‌فر و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی با استفاده از مدل سری زمانی AR-ARX، به استخراج باقیمانده‌ی مدل به‌عنوان یک ویژگی حساس به آسیب پرداختند و روشی را برای تشخیص آسیب و تعیین مکان آن ابداع کردند.[۱۹] رضوی و همکاران (۲۰۲۱)، چگالی طیف توانی به دست آمده از باقیمانده‌ی مدل سری زمانی را به‌عنوان ویژگی حساس به آسیب معرفی کردند.[۲۰] باقری و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از تبدیل پیوسته‌ی موجک و تبدیل هیلبرت به استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب پرداختند.[۲۱] پژوهشگران متعددی از الگوریتم‌های آماری برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برده‌اند.[۲۲و۲۳] آلوس و کیوری[۵](۲۰۲۱)، ۱۹ شاخص آماری شامل: قله، انرژی، عامل شکل، عامل کرست،[۶] مرتبه‌های مختلف از ممان‌های آماری و ... را به عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب استفاده کرده‌اند.[۲۴] موسوی و همکاران (۲۰۲۱)، از آماره‌هایی چون آنتروپی و کشیدگی برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برده‌اند.[۲۵] یکی از پرکاربردترین روش‌های استخراج ویژگی، که نشان‌دهنده‌ی میزان شباهت میان الگوهای رفتاری یک سازه است، ضریب همبستگی است.[۲۶و۲۷] هوال و امنزتر[۷](۲۰۱۵)، برای فائق آمدن بر مشکلات استخراج پارامترهای مودال سازه، از جمله سختی و پیچیدگی محاسبه‌ی آن‌ها و نیز حساسیت پایین پارامترهای مذکور به آسیب‌های محلی از محاسبه‌ی همبستگی متقابل میان دو سیگنال استفاده کردند.[۲۸] هوآ[۸] و همکاران (۲۰۲۲)، از ضریب همبستگی به‌عنوان یک ویژگی حساس به آسیب برای تعیین مکان آسیب در سازه استفاده کردند.[۲۹] فنگ و چن[۹](۲۰۲۰)، نیز با محاسبه‌ی ضریب همبستگی سیگنال‌ها به تعیین مکان آسیب در سازه پرداختند.[۳۰] یانگ[۱۰] و همکاران (۲۰۰۷)، رابطه‌ی همبستگی میان دو سیگنال زمانی را در حوزه‌ی بسامد تعمیم دادند.[۳۱] با توجه به رابطه‌سازی آن‌ها، ضریب همبستگی محاسبه شده میان دو سیگنال زمانی، به اندازه‌ی هر یک از سیگنال‌ها و اختلاف فاز آن‌ها در حوزه‌ی بسامد مرتبط است. با اینکه ویژگی استخراج شده به آسیب سازه حساس است، اما نویز موجود در سیگنال‌های پاسخ باعث انحراف ویژگی مذکور از مقدار دقیق آن می‌شود؛ که منجر به تصمیم‌گیری‌های اشتباه در شناسایی آسیب سازه می‌شود.

یکی از چالش‌های موجود که روش‌های شناسایی آسیب با آن درگیر هستند، حجم بالای داده‌های اندازه‌گیری شده است، که نه فقط موجب پیچیده شدن الگوی به دست آمده از رفتار سازه می‌شود، بلکه کاهش سرعت و کیفیت عملکرد روش‌های شناسایی آسیب را به دنبال دارد.[۳۲] برای کاهش ابعاد داده‌ها، پاولوپلو[۱۱] و همکاران (۲۰۱۶)، از تحلیل مؤلفه‌ی ذاتی غیرخطی (NPCA) [۱۲] بهره گرفته‌اند.[۳۳] با اینکه روش پیشنهاد شده درکاهش ابعاد داده توانمند بوده است، اما از نظر اجرایی، محاسبات سنگین و پیچیده‌یی را در بر داشته است. ماتیلاینن[۱۳] و همکاران (۲۰۱۷)، بر اساس سری‌های زمانی چندمتغیره و استفاده از روش‌های رگرسیون وارون ورقه شده (SIR) [۱۴] و جداسازی کور منبع (BSS) [۱۵] روشی را برای کاهش ابعاد داده‌های چندکاناله معرفی کرده‌اند.[۳۴] دُران-رُزال[۱۶] و همکاران (۲۰۱۸)، با انتخابی بهینه از قطعه‌های سیگنال پاسخ به معرفی روشی برای کاهش ابعاده داده پرداختند و برای انتخاب بهینه‌ی قطعه‌های سیگنال از روش بهینه‌سازی تپه‌های مرجانی (CRO) [۱۷] استفاده کردند.[۳۵]

از طرفی دیگر، اگر پاسخ‌های سازه تحت تأثیر منابع محرک نویزی به دست آمده باشند، ویژگی‌های استخراج شده از آن‌ها، عدم قطعیت بالایی دارند؛ در این صورت، بهره‌گیری از داده‌های مذکور موجب کاهش اطمینان از نتایج شناسایی آسیب می‌شود.[۳۶] در چنین شرایطی، بسیار حیاتی است که ویژگی‌های به دست آمده از پاسخ‌های سازه به آسیب حساس باشند و به‌طور هم‌زمان به نویز موجود در بار، حساسیتی از خود نشان ندهند. راوری و کارکاترا[۱۸](۲۰۱۲)، بر پایه‌ی تبدیل هیلبرت ـ هوآنگ (HHT)،[۱۹] یک الگوریتم نوین برای شناسایی آسیب در شرایط نویزی ارائه داده‌اند.[۳۷] در شیوه‌ی آن‌ها، سیگنال پاسخ به‌وسیله‌ی روش HHT پردازش و مکان آسیب با بررسی اولین مود بسامدی از سیگنال تعیین می‌شود. انتظامی و شریعتمدار (۲۰۱۹)، برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب در شرایط نویزی از یک الگوریتم ترکیبی بر پایه‌ی تحلیل سری زمانی و تجزیه‌ی مودهای تجربی استفاده کرده‌اند.[۸] بر اساس پایش سلامت به‌وسیله‌ی امواج هدایت شونده، یو[۲۰] و علی‌آبادی (۲۰۲۰)، یک روش سلسله‌مراتبی چندسطحی را برای شناسایی آسیب در شرایط نویزی و عدم قطعیت ارائه کردند، تا آثار عدم قطعیت در نتایج شناسایی آسیب با بهینه‌یابی مکان حسگرها و نیز تعیین آستانه‌های بهینه برای شاخص‌های آسیب حذف و از تشخیص‌های اشتباه جلوگیری شود.[۳۸]

در نوشتار حاضر، یک الگوریتم استخراج ویژگی نوین ارائه شده است، که توانایی مقابله با چالش‌های موجود در پایش سلامت سازه‌ها را دارد. در ابتدا، با بهره‌گیری از روش مؤثر تحلیل سری زمانی، پارامترهای مدل و باقیمانده‌ی آن برای هر سیگنال پاسخ به‌دست آمده است. با کنارگذاشتن باقیمانده‌ی مدل، که حاوی آثار نویز منبع محرک است، آثار منفی نویز ورودی از نتایج شناسایی آسیب حذف شده‌اند. به‌صورت هم‌زمان، استخراج پارامترهای مدل از سیگنال پاسخ، موجب انتقال داده‌های اولیه به فضایی با ابعاد پایین شده است. با استفاده از پارامترهای مذکور، که حاوی خواص ذاتی و دینامیکی سازه هستند، تابع مشخصه‌ی سیگنال در حوزه‌ی بسامد به دست آمده است. با تعمیم رابطه‌ی ضریب همبستگی در حوزه‌ی بسامد، یک ویژگی مختلط و دوبُعدی، که به آسیب سازه حساس است، استخراج شده است. توانایی‌های ویژگی استخراج شده در تشخیص و تعیین مکان آسیب با آزمایش یک سازه‌ی معیار واقعی، همچون سازه‌ی پل S۱۰۱،[۳۹] ارزیابی شده است. قابل توجه است که بارهای وارد آمده به سازه‌ی مذکور، از نوع تحریک‌های نویزی خارجی بوده‌اند. به‌منظور نمایشی دقیق‌تر از برتری‌های روش پژوهش حاضر در شناسایی آسیب سازه، نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی پایش سلامت، یعنی روش پراوین[۲۱](۲۰۲۱)،[۴۰] و پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)،[۲۴] مقایسه شده‌اند. مقایسه‌های انجام گرفته، به خوبی توانمندی‌های روش پیشنهادی نوشتار حاضر را بر دیگر روش‌ها نشان می‌دهد. علاوه‌بر آن، نتایج به دست آمده از سازه‌ی پل بیانگر آن هستند که ویژگی استخراج شده، توانایی تشخیص وضعیت دقیق سازه و تعیین مکان درست آسیب را دارد.

۲. پردازش سیگنال

۱.۲. تبدیل Z

تبدیل Z، یک عملیات خطی است که به‌واسطه‌ی آن، یک سیگنال گسسته‌ی زمانی به یک فضای پیوسته‌ی بسامدی انتقال می‌یابد.[۴۱] رابطه‌ی انتقال از طریق تبدیل Z

برای سیگنال زمانی $u(t)$، که در آن، t نشان‌دهنده‌ی زمان نمونه‌هاست، مطابق رابطه‌ی ۱ است:

$$u(z) = \mathcal{Z}\{u(t)\} = \sum_{t=0}^{\infty} u(t) z^{-t} \quad (1)$$

که در آن، z متغیر بسامدی و یک مقدار مختلط و $\mathcal{Z}\{.\}$ نماینده‌ی عملگر تبدیل Z هستند. در پژوهش حاضر، $u(z)$ انتقال یافته‌ی متغیر $u(t)$ تحت تبدیل Z است. در صورتی که تابع $u(z)$ موجود باشد، متغیر زمانی $u(t)$ با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$u(t) = \mathcal{Z}^{-1}\{u(z)\} = \frac{1}{2\pi j} \oint_c u(z) \times z^{t-1} dz \quad (2)$$

که در آن، j نشان دهنده‌ی یک مقدار موهومی و برابر $\sqrt{-1}$ است. عبارت $\oint_c(.)$ نیز عملگر انتگرال‌گیری بر روی مسیر بسته‌ی c است. در صورتی که مسیر بسته‌ی c، یک دایره به شعاع ۱ در صفحه‌ی مختلط باشد ($z = 1e^{jw} \forall \omega \in [-\pi, \pi]$)، رابطه‌ی ۲ به شکل رابطه‌ی ۳ بازنویسی می‌شود:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u\left(e^{j\omega}\right) \times e^{(j\omega t)} d\omega \quad (3)$$

که در آن، ω متغیر بسامدی و مقداری حقیقی است.

۲.۲. تحلیل سری زمانی و تابع مشخصه‌ی سیگنال

تحلیل سری زمانی، یک ابزار آماری قدرتمند است که به منظور مدل‌سازی سیگنال‌های پاسخ سازه استفاده می‌شود و توانایی استخراج ویژگی‌های ذاتی و دینامیکی سیگنال پاسخ را دارد.[۱۲] در صورتی که سیگنال زمانی ایستا و خطی باشد، یکی از ۴ مدل AR، ARX، ARMA و ARMAX برای سیگنال مورد بررسی انتخاب می‌شود؛ که نحوه‌ی انتخاب آن به ذات و خواص آماری سیگنال بستگی دارد. در صورت معین بودن داده‌های منبع محرک، از روش‌های ARX و ARMAX استفاده می‌شود. در غیر این‌صورت، اگر سازه تحت بارهای نامشخص خارجی قرار گرفته و فقط پاسخ خروجی سازه موجود باشد، یکی از دو مدل AR و ARMA استفاده می‌شود. روابط مدل‌سازی سیگنال پاسخ $x(t)$ تحت مدل‌های AR و ARMA به ترتیب در روابط ۴ و ۵ ارائه شده‌اند:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{p} \phi_i x(t-i) + e(t) \quad (4)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{p} \phi_i x(t-i) + \sum_{k=1}^{r} \theta_k e(t-k) + e(t) \quad (5)$$

که در آن‌ها، پارامترهای p و r به ترتیب مراتب بخش‌های AR و MA [۲۲] از مدل‌های AR و ARMA هستند و نیز باقیمانده‌ی مدل‌های ذکر شده است. $e(t)$ نشان‌دهنده‌ی میزان اختلاف مقدار واقعی سیگنال $x(t)$ از مقدار تخمینی آن است، که توسط هر یک از رابطه‌های ۴ و ۵ قابل دستیابی است. بردارهای $\Phi = [\phi_1, \ldots, \phi_p]$ و $\Theta = [\theta_1, \ldots, \theta_r]$ نیز به ترتیب حاوی ضرایب بخش‌های AR و MA از مدل‌های ارائه شده هستند. به‌منظور اجرای روش تحلیل سری زمانی، باید نوع مدل و مقادیر بهینه‌ی مراتب آن (p و یا r) تعیین شوند. در نوشتار حاضر، از روش ارائه شده توسط انتظامی و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۴] برای تعیین مدل مناسب سری زمانی و انتخاب بهینه‌ی پارامترهای آن استفاده شده است. پس از محاسبه‌ی پارامترهای بخش AR از مدل‌های سری زمانی، تابع مشخصه‌ی سیگنال $x(t)$ توسط رابطه‌ی ۶ در حوزه‌ی بسامد به دست می‌آید:

$$x_c(\omega) = \frac{1}{\left(1 - \sum_{i=1}^{p} \phi_i e^{-ij\omega}\right)} \quad (6)$$

۳. استخراج ویژگی

در بخش ۱.۳، نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب همبستگی میان دو متغیر x_c و y_c در حوزه‌ی زمان ($x_c(t)$ و $y_c(t)$) ارائه شده است. از آن‌جایی که متغیرهای x_c و y_c به ترتیب توابع مشخصه‌ی سیگنال‌های $x(t)$ و $y(t)$ هستند و مقدار آن‌ها در حوزه‌ی بسامد وجود دارد (مطابق رابطه‌ی ۶)، امکان محاسبه‌ی مستقیم ضریب همبستگی در حوزه‌ی زمان وجود ندارد. در بخش ۲.۳، با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد، راه‌حلی برای مسئله‌ی حاضر ارائه شده است. در بخش ۳.۳، نحوه‌ی استخراج ویژگی نوین، که یک مقدار مختلط و دوبُعدی است، معرفی شده است. ویژگی به دست آمده نه فقط میزان همبستگی دو متغیر را نشان می‌دهد، بلکه شدت ناهمبستگی آن‌ها را نیز تعیین می‌کند. در نهایت، در بخش ۴.۳ به ارائه‌ی روشی برای محاسبه‌ی ویژگی نوین در حضور عدم قطعیت آزمایش‌های مختلف پرداخته شده است.

۱.۳. ضریب همبستگی در حوزه‌ی زمان

ضریب همبستگی، یک شاخص آماری است که نشان دهنده‌ی ارتباط خطی میان دو متغیر است. بازه‌ی تغییرات ضریب همبستگی برابر $[-1, +1]$ است. مقدار $+1$، بیانگر بیشترین مقدار همبستگی میان دو متغیر است؛ به نحوی که افزایش و یا کاهش در مقدار یکی از متغیرها، نشان‌دهنده‌ی افزایش و یا کاهش در مقدار متغیر دوم است. در صورتی که مقدار ضریب همبستگی -1 باشد، دو متغیر دارای بیشترین همبستگی ولی در جهت عکس یکدیگر هستند؛ به گونه‌یی که افزایش در مقدار یک متغیر، موجب کاهش مقدار در متغیر دوم می‌شود. رابطه‌ی ضریب همبستگی میان متغیرهای $x_c(t)$ و $y_c(t)$ به شکل رابطه‌ی ۷ است:

$$corr_{xy} = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} (x_c(t) - \bar{x}_c)(y_c(t) - \bar{y}_c)}{\sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} (x_c(t) - \bar{x}_c)^2} \sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} (y_c(t) - \bar{y}_c)^2}} \quad (7)$$

که در آن، $corr_{xy}$ ضریب همبستگی میان متغیرهای زمانی x_c و y_c است و $\bar{x}_c$ و $\bar{y}_c$ نیز میانگین‌های دو متغیر اخیر هستند.

۲.۳. محاسبه‌ی ضریب همبستگی با استفاده از اطلاعات حوزه‌ی بسامد

با توجه به رابطه‌ی ۷، برای محاسبه‌ی ضریب همبستگی میان دو متغیر x_c و y_c، به فرم زمانی دو متغیر ذکر شده نیاز است و در صورتی که فقط اطلاعات بسامدی آن‌ها در دسترس باشد، نمی‌توان به‌صورت مستقیم ضریب همبستگی را محاسبه کرد. با این حال، امکان محاسبه‌ی ضریب همبستگی با استفاده از اطلاعات بسامدی متغیرها وجود دارد. برای این کار، عبارت‌های موجود در معادله‌ی ۷، باید به حوزه‌ی بسامد انتقال یابند. برای سادگی در محاسبات، از دو معادله‌ی ۸ و ۹ استفاده می‌شود:

$$\tilde{x}(t) = x_c(t) - \bar{x}_c \quad (8)$$

$$\tilde{y}(t) = y_c(t) - \bar{y}_c \quad (9)$$

با جایگذاری برابری‌های روابط اخیر در رابطه‌ی ۷، فرم ساده‌تری از آن مطابق رابطه‌ی ۱۰ ارائه شده است:

$$corr_{xy} = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}(t)\,\tilde{y}(t)}{\sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}^2(t)}\sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{y}^2(t)}} \qquad (10)$$

در صورتی که به جای هر یک از عبارت‌های به‌کاررفته در معادله‌ی ۱۰، (عبارت‌های: $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}(t)\tilde{y}(t)$، $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}^2(t)$ و $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{y}^2(t)$)، از معادل بسامدی آن‌ها استفاده شود، یک ارتباط میان ضریب همبستگی و اطلاعات بسامدی متغیرهای $\tilde{x}(t)$ و $\tilde{y}(t)$ برقرار می‌شود. به دلیل شباهت میان عبارت‌های ذکر شده، فقط نحوه‌ی محاسبه‌ی معادل بسامدی برای عبارت $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}(t)\tilde{y}(t)$ ارائه شده است. معادل‌های بسامدی دو عبارت دیگر به‌صورت مشابه قابل دستیابی هستند. برای محاسبه‌ی معادل عبارت $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}(t)\tilde{y}(t)$ در حوزه‌ی بسامد، باید تبدیل Z عبارت $\tilde{x}(t)\tilde{y}(t)$ به دست آید. این تبدیل با توجه به رابطه‌ی ۱، به شکل رابطه‌ی ۱۱ نوشته می‌شود:

$$\tilde{w}(z) = \mathcal{Z}\{\tilde{x}(t)\,\tilde{y}(t)\} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} (\tilde{x}(t)\,\tilde{y}(t))\, z^{-t} \qquad (11)$$

جواب جامع تبدیل ذکر شده در رابطه‌ی ۱۱، با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:[۴۱]

$$\tilde{w}(z) = \mathcal{Z}\{\tilde{x}(t)\,\tilde{y}(t)\} = \frac{1}{2\pi j}\oint_c \tilde{x}(v)\,\tilde{y}\left(\frac{z}{v}\right) v^{-1} dv \qquad (12)$$

که در آن، v متغیر داخلی انتگرال است و منحنی بسته‌ی c، دایره‌یی به شعاع ۱ است، که مرکز آن مبدأ مختصات است. با جایگذاری عبارت‌های $z = e^{j\omega'}$ و $v = e^{j\omega}$ در انتگرال اخیر، رابطه‌ی ۱۲ به شکل رابطه‌ی ۱۳ بسط داده می‌شود. ω و ω' نیز متغیرهای بسامدی هستند.

$$\begin{aligned}\tilde{w}\left(e^{j\omega'}\right) &= \tfrac{1}{2\pi j}\int_{-\pi}^{\pi} \tilde{x}\left(e^{j\omega}\right)\tilde{y}\left(e^{j(\omega'-\omega)}\right) e^{-j\omega} \times j e^{j\omega} d\omega \\ &= \tfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \tilde{x}\left(e^{j\omega}\right)\tilde{y}\left(e^{j(\omega'-\omega)}\right) d\omega\end{aligned} \qquad (13)$$

برای سادگی، به جای عبارت‌های $\bar{x}(e^{j\omega})$ و $\bar{y}(e^{j(\omega'-\omega)})$ به ترتیب از عبارت‌های $x(\omega)$ و $y(\omega'-\omega)$ و نیز به جای عبارت $\tilde{w}(e^{j\omega'})$ از عبارت $w(\omega')$ استفاده شده است. در نتیجه‌ی جایگذاری‌های ذکر شده، رابطه‌ی ۱۳ به شکل رابطه‌ی ۱۴ در می‌آید:

$$w(\omega') = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\, y(\omega'-\omega)\, d\omega \qquad (14)$$

که در آن با میل دادن ω' به سمت مقدار صفر، رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\lim_{\omega'\to 0} w(\omega') &= \lim_{\omega'\to 0} \tfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\, y(\omega'-\omega)\, d\omega \\ &= \tfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\, y(-\omega)\, d\omega = \tfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\, y^*(\omega)\, d\omega\end{aligned} \qquad (15)$$

که در آن، $(.)^*$ عملگر مزدوج است. به‌دلیل رابطه‌ی میان ω' و z ($z = e^{j\omega'}$)، در صورتی که ω' به سمت صفر میل داده شود، مقدار z نیز به سمت ۱ حرکت خواهد کرد. در نتیجه، به دلیل ارتباط میان $\tilde{w}(z)$ و $w(\omega')$ ($w(\omega') = \tilde{w}(z)_{z=e^{j\omega'}}$)، رابطه‌ی ۱۶، به دست می‌آید:

$$\lim_{z\to 1} \tilde{w}(z) = \lim_{\omega'\to 0} w(\omega') \qquad (16)$$

با توجه به روابط ۱۱ و ۱۵ و نیز با توجه به برابری اخیر در رابطه‌ی ۱۶، رابطه‌ی ۱۷ نتیجه می‌شود:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}(t)\,\tilde{y}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\,\overset{*}{y}(\omega)\, d\omega \qquad (17)$$

که مطابق آن، مجموع مقادیر حاصل‌ضرب دو متغیر در حوزه‌ی زمان، با انتگرال حاصل‌ضرب یک تابع در مزدوج دیگری در حوزه‌ی بسامد ($(x(\omega) \times (y)^*(\omega))$ ارتباط دارد. مشابه رابطه‌ی ۱۷، برای عبارت‌های $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}^2(t)$ و $\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{y}2(t)$ نیز برابری‌هایی به شکل روابط ۱۸ و ۱۹ ارائه شده‌اند:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{x}^2(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\,\overset{*}{x}(\omega)\, d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega)|^2 d\omega \qquad (18)$$

$$\sum_{t=0}^{\infty} \tilde{y}^2(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} y(\omega)\,\overset{*}{y}(\omega)\, d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega)|^2 d\omega \qquad (19)$$

که در آن‌ها، $|.|$ بیانگر اندازه‌ی آرگومان است. ذکر این نکته الزامی است که با توجه به روابط اخیر و این مورد که توابع مشخصه‌ی $x_c(\omega)$ و $y_c(\omega)$، انتقال‌یافته‌ی توابع $x_c(t)$ و $y_c(t)$ به حوزه‌ی بسامد هستند، می‌توان روابط ۲۰ و ۲۱ را میان توابع $x(\omega)$ و $x_c(\omega)$ و نیز توابع $y(\omega)$ و $y_c(\omega)$ برقرار کرد:[۴۱]

$$x(\omega) = \begin{cases} x_c(\omega) & \omega \neq 0 \\ 0 & \omega = 0 \end{cases} \qquad (20)$$

$$y(\omega) = \begin{cases} y_c(\omega) & \omega \neq 0 \\ 0 & \omega = 0 \end{cases} \qquad (21)$$

با جایگذاری رابطه‌های ۱۷ الی ۱۹ در رابطه‌ی ۱۰، معادله‌ی ضریب همبستگی در حوزه‌ی بسامد مطابق رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید:

$$corr_{xy} = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega)\, y^*(\omega)\, d\omega}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}} \qquad (22)$$

که در آن، ω_x و ω_y همچون ω متغیر بسامدی هستند و فقط برای عدم تشابه با متغیر ω استفاده شده‌اند. عبارت‌های مخرج را می‌توان به داخل انتگرال هدایت کرد (رابطه‌ی ۲۳):

$$corr_{xy} = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}}\,\frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}}\, d\omega \qquad (23)$$

که در آن، عبارت‌های $\frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}}$ و $\frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}}$ به‌صورت اندازه و فاز در حوزه‌ی بسامد، مطابق روابط ۲۴ و ۲۵، بیان می‌شوند:

$$\frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}} = a_x(\omega)\, e^{j\phi_x(\omega)} \qquad (24)$$

$$\frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}} = a_y(\omega)\, e^{-j\phi_y(\omega)} \qquad (25)$$

که در آن‌ها، $a_x(\omega)$ و $a_y(\omega)$، اندازه‌ی عبارت‌های سمت چپ روابط ۲۴ و ۲۵ هستند. $\phi_x(\omega)$ $\phi_y(\omega)$ نیز فاز عبارت‌های اخیر هستند. بنابراین، رابطه‌ی ۲۳ به شکل رابطه‌ی ۲۶ قابل بازنویسی است:

$$\begin{aligned}corr_{xy} &= \int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega)\, e^{j\phi_x(\omega)} a_y(\omega)\, e^{-j\phi_y(\omega)} d\omega \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega)\, a_y(\omega)\, e^{j(\phi_x(\omega)-\phi_y(\omega))} d\omega\end{aligned} \qquad (26)$$

رابطه‌ی ۲۶، نشان‌دهنده‌ی معادله‌ی ضریب همبستگی میان متغیرهای x_c و y_c در حوزه‌ی بسامد است و در آن، مقدار ضریب همبستگی نه فقط به اندازه‌ی دو متغیر x_c و y_c در حوزه‌ی بسامد وابسته است، بلکه به اختلاف فاز میان آن دو نیز بستگی دارد.

۳.۳. استخراج ویژگی نوین

در روابط پیشین، با فرض حقیقی بودن توابع $\tilde{x}(t)$ و $\tilde{y}(t)$، می‌توان نتیجه گرفت که توابع $a_x(\omega)$ و $a_y(\omega)$ بر روی محور ω، زوج و توابع $\phi_x(\omega)$ و $\phi_y(\omega)$، نیز فرد هستند.[۴۱] در نتیجه، انتگرال موجود در رابطه‌ی ۲۶ به شکل رابطه‌ی ۲۷ تجزیه می‌شود:

$$\begin{aligned} corr_{xy} &= \int_{-\pi}^{0} a_x(\omega)\, a_y(\omega)\, e^{j(\phi_x(\omega)-\phi_y(\omega))} d\omega \\ &+ \int_{0}^{\pi} a_x(\omega)\, a_y(\omega)\, e^{j(\phi_x(\omega)-\phi_y(\omega))} d\omega \end{aligned} \tag{۲۷}$$

که در آن، حاصل انتگرال مرتبط با بخش منفی محور ω برابر مزدوج حاصل انتگرال در بخش مثبت محور ω است. به همین دلیل، فقط بخش حقیقی باقی می‌ماند، و بخش موهومی آن صفر می‌شود. بخش‌های حقیقی و موهومی هر یک از انتگرال‌های موجود در رابطه‌ی ۲۷ در روابط ۲۸ و ۲۹ ارائه شده‌اند:

$$\int_{-\pi}^{0} a_x(\omega)\, a_y(\omega)\, e^{j(\phi_x(\omega)-\phi_y(\omega))} d\omega = \alpha_{xy} - j\beta_{xy} \tag{۲۸}$$

$$\int_{0}^{\pi} a_x(\omega)\, a_y(\omega)\, e^{j(\phi_x(\omega)-\phi_y(\omega))} d\omega = \alpha_{xy} + j\beta_{xy} \tag{۲۹}$$

که در آن، α_{xy} و β_{xy} به ترتیب با بخش‌های حقیقی و موهومی هر یک از انتگرال‌های بالا در ارتباط هستند. ویژگی نوین، که با ρ_{xy} نمایش داده می‌شود، با استفاده از دو مقدار ذکر شده قابل استخراج است (رابطه‌ی ۳۰):

$$\rho_{xy} = 2\alpha_{xy} + 2j \times \beta_{xy} \tag{۳۰}$$

با توجه به روابط ۲۷ الی ۳۰، به راحتی می‌توان دریافت که بخش حقیقی ویژگی ρ_{xy}، همان ضریب همبستگی میان متغیرهای x_c و y_c است؛ به‌عبارت دیگر، $corr_{xy} = 2\alpha_{xy}$. با این حال، بخش موهومی ویژگی مذکور ($2\beta_{xy}$)، اطلاعات جدیدی را از ارتباط دو متغیر x_c و y_c با یکدیگر در اختیار قرار می‌دهد. اگر دو متغیر x_c و y_c در حوزه‌ی زمان، ضریبی ثابت و مثبت از یکدیگر باشند ($y_c(t) = ax_c(t)$ و $a > 0$) ، آن‌گاه فازهای دو متغیر در حوزه‌ی بسامد ($\phi_x(\omega)$ و $\phi_y(\omega)$) با یکدیگر برابر خواهند بود و اختلاف آن‌ها برابر صفر می‌شود. در نتیجه، بخش موهومی ویژگی نوین ($2\beta_{xy}$) حذف می‌شود و بخش حقیقی که ضریب همبستگی را نشان می‌دهد، برابر ۱ (همبستگی کامل) می‌شود. در وضعیتی دیگر، اگر دو متغیر x_c و y_c ناهمبسته‌ی کامل ($corr_{xy} = 0$) باشند، آنگاه ویژگی ρ_{xy} یک عدد کاملاً موهومی خواهد بود. برای سادگی بیشتر، در مطالعه‌ی حاضر، بخش‌های حقیقی و موهومی ویژگی نوین (ρ) به ترتیب با α و β نمایش داده شده‌اند.

۴.۳. تعیین نرمال‌ترین آزمایش

به‌دلیل عدم قطعیت‌هایی که در شرایط اندازه‌گیری بر سیگنال‌های ثبت شده اعمال می‌شوند، ویژگی‌های استخراج شده از مقدار حقیقی خود انحراف پیدا می‌کنند؛ که برای رفع آن، ویژگی‌های حساس به آسیب با استفاده از آزمایشی به دست می‌آیند که کمترین انحراف را با توجه عدم قطعیت‌های موجود داشته باشند. به آزمایش اشاره شده، نرمال‌ترین آزمایش موجود گفته می‌شود. برای تعیین نرمال‌ترین آزمایش در سازه‌ی سالم، ماتریس $X = [x_1, \ldots, x_{NT}]$، که حاوی آزمایش‌های مختلف از سیگنال پاسخ سازه (x) است، در نظر گرفته می‌شود. x_i که در آن i شمارنده‌ی آزمایش‌های موجود است، یک متغیر عمودی است، که نمونه‌های زمانی سیگنال پاسخ سازه در آزمایش iاُم را در خود جای داده است. تعداد آزمایش‌های انجام شده برابر NT است. مقدار ویژگی $\rho_{x_i x_j}$ برای هر دو سیگنال موجود در ماتریس X ($i, j = 1, 2, \ldots, NT$) به دست می‌آید. با استفاده از رابطه‌ی ۳۱، میزان انحراف ویژگی‌های به دست آمده، که نسبت به سیگنال x_i محاسبه شده‌اند، مشخص می‌شود:

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^{NT} \left|\phi_{x_i x_j}\right|^2 \tag{۳۱}$$

که در آن، ϕ_{x_i,x_j} زاویه‌ی ویژگی ρ_{x_i,x_j} است. شماره‌ی آزمایشی از ماتریس X، که کمترین مقدار را در خروجی تابع $F(.)$ به دست دهد، با i_{norm} مشخص و به‌عنوان شماره‌ی نرمال‌ترین آزمایش در نظر گرفته می‌شود. از این پس، ویژگی ρ فقط نسبت به نرمال‌ترین آزمایش موجود در حالت سالم از سازه‌ی مورد پایش محاسبه می‌شود.

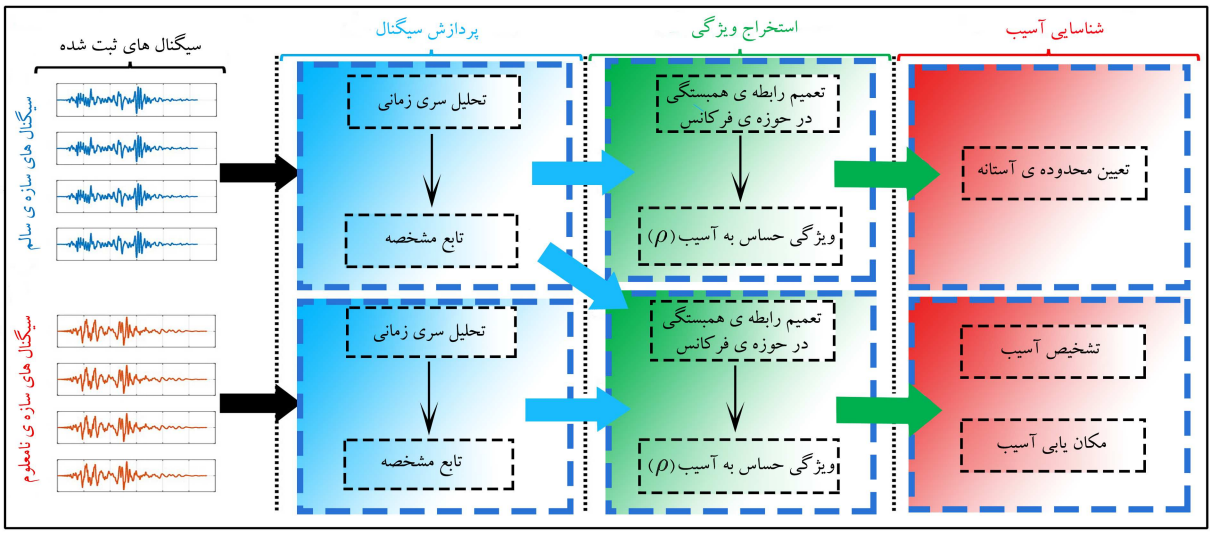
۴. الگوریتم پیشنهادی شناسایی آسیب

در بخش کنونی، بر پایه‌ی روش‌های یادگیری بدون نظارت و با استفاده از ویژگی نوین استخراج شده (ρ)، به اجرای سطوح مختلف شناسایی آسیب پرداخته شده است (شکل ۱). مطابق این شکل، با استفاده از تحلیل سری زمانی، توابع مشخصه‌ی بسامدی برای سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از سازه‌ی سالم به دست می‌آیند. سپس، با استفاده از توابع به دست آمده، ویژگی‌های حساس به آسیب محاسبه می‌شوند. با بهره‌گیری از ویژگی‌های استخراج شده از سازه‌ی سالم، یک محدوده‌ی آستانه، که نشان‌دهنده‌ی رفتار سازه در حالت سالم است، به دست می‌آید.

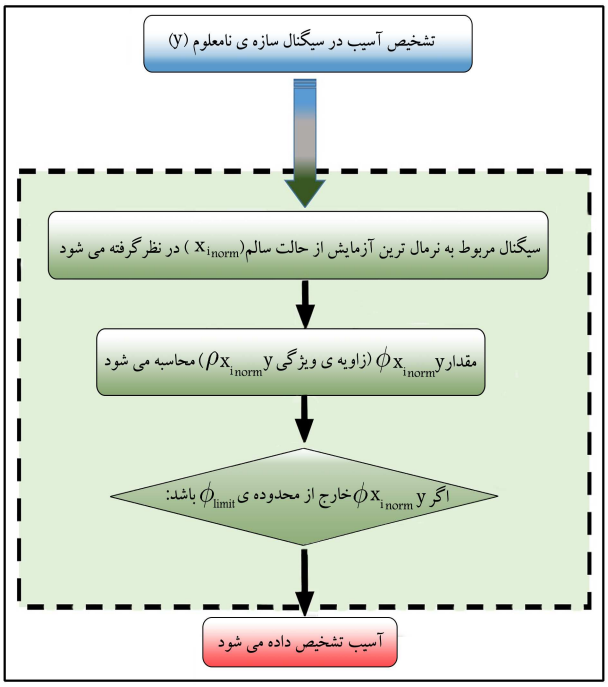
برای بررسی وضعیت یک سازه‌ی نامعلوم، توابع مشخصه برای سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از آن سازه محاسبه می‌شوند. سپس، با استفاده از توابع مشخصه‌ی سازه در دو حالت سالم و نامعلوم، ویژگی‌های حساس به آسیب برای سازه‌ی نامعلوم به‌دست می‌آیند. در این‌جا، با مقایسه‌ی ویژگی‌های استخراج شده از سازه‌ی نامعلوم و آستانه‌یی که برای سازه‌ی سالم تعیین شده است، وجود آسیب و مکان آن تعیین می‌شود. در ادامه، ابتدا روش مورد استفاده برای تشخیص وجود آسیب در سازه و پس از آن، توضیحات مکان‌یابی آسیب بر اساس ویژگی استخراج شده ارائه شده است.

۱.۴. تشخیص آسیب با استفاده از زاویه‌ی ویژگی $\rho(\phi)$

هنگامی که آسیبی به سازه وارد شود، خواص بسامدی پاسخ از جمله فاز آن تغییر می‌یابد و تغییر فاز سیگنال موجب تغییر در زاویه‌ی ویژگی $\rho(\phi)$ می‌شود. یکی از راه‌های قابل اطمینان در تشخیص آسیب، تعیین آستانه‌یی است که سلامتی سازه را در وضعیت‌های گوناگون نشان می‌دهد و بر اساس تغییرات ϕ در سازه‌ی سالم مشخص می‌شود. برای تعیین آستانه‌ی سلامتی، مقدار ϕ برای تمام آزمایش‌های موجود از سازه‌ی سالم نسبت به نرمال‌ترین آزمایش از حالت سالم محاسبه می‌شود. در این صورت، یک محدوده برای تغییر ϕ، که با ϕ_{limit} نمایش داده می‌شود، به دست می‌آید. در صورتی که آسیبی به سازه وارد شود، مقدار ϕ از آستانه‌ی سلامتی خارج



شکل ۱. فلوچارت اجرایی روش آسیب‌شناسی پیشنهادی.



شکل ۲. فلوچارت تشخیص آسیب در سیگنال‌های ثبت شده از یک حسگر خاص.

می‌شود. درنتیجه، وجود آسیب درسازه تشخیص داده می‌شود. درشکل ۲، فلوچارت تشخیص آسیب با استفاده از سیگنال ثبت شده توسط یک حسگر مشاهده می‌شود.

در صورتی که تعداد حسگرهای سازه بیشتر از ۱ باشد، عملیات تشخیص آسیب برای هر حسگر به‌صورت جداگانه اجرا می‌شود. به‌دلیل محلی بودن ویژگی آسیب، اگر آسیب در یک حسگر تشخیص داده شود، سازه‌ی بررسی شده، آسیب دیده قلمداد می‌شود.

۲.۴. تعیین مکان آسیب با استفاده از بخش حقیقی ویژگی $\rho(\alpha)$

به‌دلیل خواص محلی آسیب، مقدار ویژگی استخراج شده از سیگنال مکان آسیب،

شکل ۳. نمای کناری پل S۱۰۱ در حین اجرای آزمایش‌های آسیب‌شناسی.[۳۹]

تغییر بیشتری را نسبت به ویژگی‌های استخراج شده از دیگر بخش‌های سازه دارد.[۸] در بخش کنونی، از مقدار حقیقی ویژگی $\rho(\alpha)$ که نشان دهنده‌ی ضریب همبستگی میان سیگنال‌های سازه‌ی آسیب دیده و سازه‌ی سالم است، برای مکان‌یابی آسیب استفاده می‌شود. در مکان آسیب، مقدار α عددی منفی خواهد بود. بنابراین هر حسگری که بخش حقیقی ویژگی ρ برای آن منفی باشد، مکان آسیب شناخته می‌شود.

۵. سازه‌ی مطالعاتی: پل S۱۰۱

در بخش حاضر، یک سازه‌ی مقیاس کامل واقعی (پل S۱۰۱) مطالعه شده است، تا قابلیت اطمینان و توانمندی‌های روش نوین درشناسایی آسیب سازه‌های دنیای واقعی ارزیابی شود. پل S۱۰۱، که یک سازه‌ی بتنی پیش‌تنیده است، دراوایل سال ۱۹۶۰ بر روی یک بزرگراه ۴ ـ خطه در اتریش احداث شده است.[۳۹] پل S۱۰۱، از یک قاب سه بخشی تشکیل شده است، که بخش میانی آن به طول ۳۲m و دو بخش کناره‌ی آن به طول ۱۲m هستند و پهنای عرضی آن نیز برابر ۷٫۲m است. نمای کناری پل S۱۰۱، در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

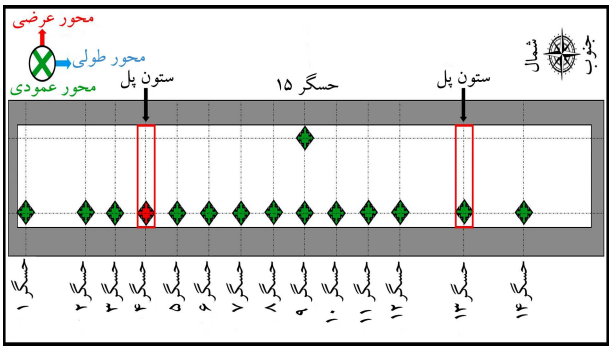
به‌منظور بررسی رفتار سازه در وضعیت آسیب‌دیدگی، چند آزمایش آسیب‌زای

جدول ۱. مراحل مختلف از سناریوی آسیب‌زای اول و ویژگی‌های هر مرحله.[۳۹و۴۳]

مرحله	شرح عملیات	اثر اجرای عملیات در سازه
A	شروع عملیات برش ستون	هیچ‌گونه اثری از رخداد ترک و یا افزایش ترک‌های موجود مشاهده نشد.
B	انتهای عملیات برش ستون (برش یک قطعه از ستون به ضخامت ۵ cm)	ایجاد یک مفصل (درجه آزادی) اضافه دقیقاً در بالای محل فونداسیون
C	گام اول از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان ۱ cm پایین آورده شد. سر و صدای ملایم توسط پل ایجاد شد.
D	گام دوم از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان ۲ cm پایین آورده شد. یک نشست ۲۱ mm در وسط پل مشاهده شده است.
E	گام سوم از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان تقریباً ۳ cm پایین آورده شده است. در این حالت سختی ستون به حد کشسانی بحرانی رسید و ترک‌های افقی در ستون مجاور مشاهده شد.
F	جاسازی صفحات فولادی	-
G	بازگرداندن ستون به وضعیت اولیه و ترمیم آن	ترمیم شدن ترک‌های بوجود آمده

پیش‌رونده توسط یک شرکت اتریشی به نام VCE، طی روزهای دهم تا دوازدهم ماه دسامبر ۲۰۰۸ انجام شده است. به‌صورت کلی، آزمایش‌های آسیب‌زا در دو مرحله انجام شده‌اند: در مرحله‌ی اول، یکی از ۴ ستون سازه تحت یک آسیب جدی قرارگرفته و در محل اتصال پایه به زمین، یک بریدگی عرضی ایجاد شده است. در این سناریوی آسیب‌زا، که از اطلاعات آن در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است، یکی از چهار ستون پل به‌صورت عرضی و از پایه‌ی ستون برش خورده و سپس ستون پایین آورده شده است. با اجرای سناریوی اخیر، یک تغییر اساسی در سیستم جهانی پل اعمال شده است؛ چرا که یک مفصل (درجه آزادی) اضافه درست بالای فونداسیون پل در محل بریدگی ایجاد شده است. در آغاز عملیات اخیر، با یک برش اولیه، ستون از پایه‌ی متصل به زمین و سپس، در برش دوم، یک قطعه از ستون به ضخامت ۵cm جدا شده است. پس از آن، ستون طی سه گام متوالی به میزان ۳cm (در هرگام به میزان ۱cm) پایین آورده شده است. در طی اجرای مراحل، از یک جک هیدرولیک استفاده شده است، تا سختی سازه از حد کشسانی خود خارج نشود و اتصال‌های پل، پارگی پیدا نکنند. پس از اجرای سناریوی آسیب‌زای اول، ستون آسیب‌دیده به وضعیت اولیه‌ی خود برگشت و با استفاده از صفحات فولادی محافظ در جای خود استوار و ترمیم شده است. در جدول ۱، اطلاعات مربوط به سناریوی آسیب‌زای اول از سازه‌ی پل S۱۰۱ ارائه شده است.

مطابق گزارش ارائه شده توسط شرکت VCE، در انتهای مراحل A و B، اثر قابل توجهی از آسیب در سازه و نیز پاسخ‌های آن مشاهده نشده است.[۴۲] همچنین، نتایج پژوهش‌های انجام گرفته،[۳۹و۴۳] نشان می‌دهند که شاخص آسیب برای دو مرحله‌ی A و B، نزدیک به وضعیت سالم از سازه است. با این حال، پس از اجرای مرحله‌ی C، یک صدای ملایم از پایین آمدن عرشه‌ی پل تولید شد. در نتیجه، می‌توان شدت آسیب وارده به سازه را در مرحله‌ی C، پایین در نظر گرفت. پس از مرحله‌ی D، یک نشست ۲۱ mm در وسط پل، که نشان‌دهنده‌ی واکنش درونی پل است، مشاهده شد. از این رو، می‌توان گفت که در مرحله‌ی D، یک آسیب با شدت متوسط به سازه اعمال شده است.



شکل ۴. شماتیک نمای قرارگیری حسگرها بر روی عرشه‌ی پل.[۴۳]

پس از پایین آوردن ستون در مرحله‌ی E، پل به حد کشسانی بحرانی خود نزدیک شده است. همچنین، ترک‌های افقی در ستون مجاور ایجاد شده است. به‌دلیل جلوگیری از پارگی اتصال‌های المان‌های پل، از پایین آوردن ستون به میزان بیشتر صرف‌نظر شد. بنابراین، می‌توان گفت که آسیب وارده به حد نهایی رسیده و سازه تحت آسیب با شدت بالا قرارگرفته است. در مراحل F و G، ستون به وضعیت اولیه‌اش برگردانده و با استفاده از صفحات فولادی، استوار و ترمیم شد.

برای اندازه‌گیری شتاب بخش‌های مختلف سازه، از یک سیستم اندازه‌گیری BRIMOS®، که شامل یک شبکه‌ی دائمی از حسگرهای شتاب‌سنج بوده است،[۴۳] استفاده و شتاب سازه در ۱۵ مکان مختلف و در سه محور طولی، عرضی و عمود بر سازه‌ی پل اندازه‌گیری شده است. شماتیک مکان قرارگیری حسگرها در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، سیگنال‌های مکان آسیب توسط حسگر ۴ اندازه‌گیری شده‌اند. بسامد اندازه‌گیری و مدت زمان ثبت سیگنال برای همه‌ی حسگرها یکسان و به ترتیب برابر ۵۰۰ Hz و ۳۳۰s بوده است. در مجموع، ۷۱۴ فایل داده، که هر یک حاوی ۴۵ سیگنال با تعداد نمونه‌های ۱۶۵۰۰۰ بوده‌اند، جمع‌آوری و ذخیره شده‌اند. تغییر شرایط محیطی پل به‌دلیل زمان فصل اجرای عملیات‌ها و نیز ابری بودن روزهای آزمایش بسیار ناچیز و به طورکلی، در طول اجرای آزمایش‌ها،

جدول ۲. سناریوهای مختلف برای حالت‌های سالم و آسیب دیده از پل S۱۰۱ .[۴۳]

سناریو	توضیح	وضعیت
الف	قبل از شروع عملیات آسیب‌زا	سازه‌ی سالم
ب	مرحله‌ی C از جدول ۱	آسیب با شدت پایین
ج	مرحله‌ی D از جدول ۱	آسیب با شدت متوسط
د	مرحله‌ی E از جدول ۱	آسیب با شدت بالا
هـ	مرحله‌ی G از جدول ۱	سازه‌ی سالم

یک شرایط ثابت بر سازه‌ی پل حاکم بوده است. علاوه‌بر نویز شرایط اندازه‌گیری، که جزء جدا نشدنی از هر آزمایش است، دو منبع نویزی دیگر در پاسخ‌های سازه تأثیرگذار بوده‌اند. هنگام اجرای عملیات‌ها، جاده در یکی از دو طرف پل باز بوده و بنابراین، سیگنال‌های پاسخ شتاب سازه تحت تأثیر بارهای دینامیکی ناگهانی و مزاحم، همچون ترافیک ماشین‌آلات سنگین قرار گرفته‌اند. علاوه‌بر آن، در نزدیکی طرف دیگر جاده که بسته بود، عملیات‌های ساخت و ساز جریان داشته است. از این رو، اغتشاش‌های مختلفی بر روی پاسخ‌های شتاب اعمال شده‌اند.

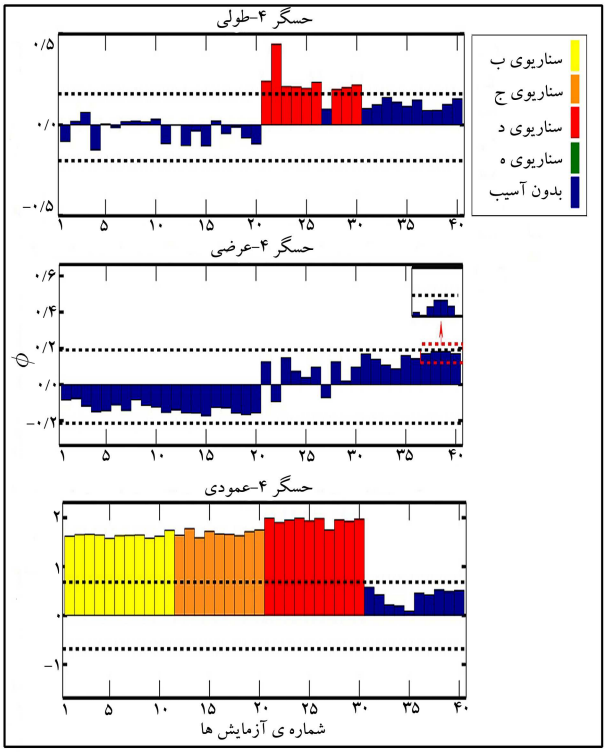
برای ارزیابی عملکرد روش شناسایی آسیب پیشنهادی، با استفاده از اطلاعات سازه‌ی سالم و همچنین مراحل ارائه شده در جدول ۱، پنج سناریوی مختلف برای حالت‌های سالم و آسیب دیده از سازه‌ی پل انتخاب شده‌اند، که اطلاعات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مطابق جدول ۲، سناریوی الف مربوط به حالت سازه قبل از اجرای عملیات آسیب‌زای اول است. از سناریوی الف، به‌عنوان حالت عادی و سالم از سازه‌ی پل و از سیگنال‌های آن برای تعیین آستانه‌ی سلامتی سازه (ϕ_{limit}) استفاده می‌شود. تعداد آزمایش‌های استفاده شده در سناریوی الف برابر ۵۰ است. سناریوهای ب، ج و د نیز به ترتیب مراحل C، D و E از جدول ۱ هستند؛ که در آن‌ها، ستون پل پایین آورده می‌شود. در سناریوهای اخیر، شدت آسیب رفته‌رفته افزایش می‌یابد. سناریوی هـ نیز مرحله‌ی G از جدول ۱ است. وضعیت سازه در سناریوی هـ، سالم است. از سناریوهای ب تا هـ، به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی در تعیین وضعیت دقیق سازه‌ی پل استفاده می‌شود. تعداد آزمایش‌های بررسی شده در هر یک از سناریوهای مذکور برابر ۱۰ است. قابل توجه است که اطلاعات دینامیکی سازه‌ی پل، که شامل سیگنال‌های زمانی ثبت شده از سازه است، از طریق نوشتارهای دوهلر[۲۳] و همکاران (۲۰۱۴)،[۳۹] و هیل[۲۴] و همکاران (۲۰۱۱)،[۴۳] قابل دسترسی است.

۱.۵. نتایج تشخیص آسیب

برای تشخیص آسیب در سازه‌ی پل S۱۰۱، مقدار ϕ (زاویه‌ی ویژگی ρ) برای سناریوهای مختلف آسیب برای حسگر ۴ در جهت‌های طولی، عرضی و عمودی محاسبه شده است (شکل ۵). خطوط سیاه‌رنگ در هر نمودار بیانگر حدود بالا و پایین آستانه‌ی ϕ_{limit} برای هر یک از حسگرها هستند. مقادیر بازه‌های ϕ_{limit} برای حسگر ۴ در محورهای طولی، عرضی و عمودی به ترتیب برابر [۰٫۱۷۱, ۰٫۱۹۶−]، [۰٫۲۱۴, ۰٫۱۹۱−] و [۰٫۶۸۳, ۰٫۶۸۱−] هستند. دلایل تفاوت در مقادیر بازه‌های مذکور آن است که رفتار مودی سازه در حسگرهای مختلف و در محورهای طولی، عرضی و عمودی با یکدیگر متفاوت است. در نتیجه، شدت انحراف‌هایی که به‌دلایل گوناگون، اعم از تغییرات دمایی جزئی، اغتشاش‌های خارجی و نویز اندازه‌گیری بر پاسخ مودهای مختلف از سازه اعمال می‌شود، متفاوت است.

با توجه به شکل ۵، در سناریوهای ب، ج و د، مقادیر ϕ برای حسگر ۴- عمودی

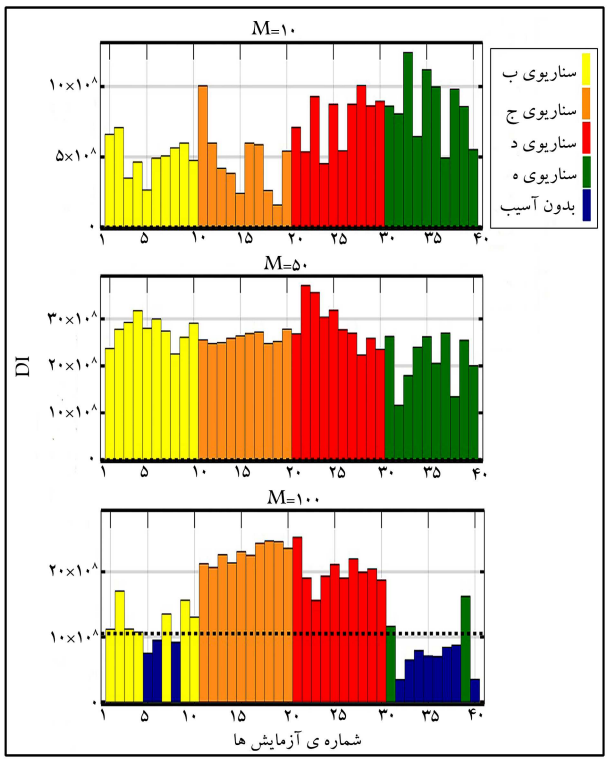


شکل ۵. نتایج تشخیص آسیب در پل S۱۰۱ با استفاده از روش پیشنهادی.

از حد بالای ϕ_{limit} خارج شده است. در نتیجه، آسیب موجود در سه سناریوی ذکر شده، تشخیص داده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در نمودارهای مربوط به حسگرهای ۴- طولی و ۴- عرضی، می‌توان مشاهده کرد که در دو حسگر اخیر، آسیب تأثیر کمی در مقدار ϕ داشته است؛ به گونه‌یی که در آزمایش‌های سناریوهای ب و ج، مقدار ϕ در بازه‌ی ϕ_{limit} قرار گرفته است. با این حال، در سناریوی د، که شدت آسیب بالاست، مقدار ϕ در حسگر ۴- طولی از محدوده‌ی آستانه خارج شده است. این موضوع نشان می‌دهد که آسیب رخداده، مودهای عمودی پل را بیشتر از مودهای طولی و عرضی تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آن‌جایی که آسیب در سازه‌ی پل S۱۰۱ با برش مقطعی یکی از ستون‌ها رخ داده است، کاملاً روشن است که اثر آن در پاسخ مودهای عمودی بیشتر از پاسخ مودهای طولی و عرضی مشاهده شده است.

در رابطه با سناریوی هـ، که سازه در وضعیت تعمیر شده و سالم قرار دارد، هیچ‌گونه آسیبی توسط حسگرهای ۴- طولی، عرضی و عمودی تشخیص داده نشده است. مطابق نتایج به دست آمده برای سناریوی هـ در شکل ۵، برای هر سه حسگر، مقدار ϕ در داخل آستانه‌ی سلامتی (ϕ_{limit}) قرار گرفته است. بنابراین، روش پیشنهادی به خوبی توانسته است وضعیت دقیق سازه‌ی پل S۱۰۱ را در وضعیت‌های آسیب دیده و سالم تشخیص دهد.

برای مقایسه‌ی توانمندی‌های روش پیشنهادی در تشخیص آسیب، نتایج تشخیص آسیب برای سناریوهای ب تا هـ توسط روش پراوین (۲۰۲۱) نیز محاسبه شده است. در روش پراوین، ضرایب کپسترال بسامدی مِل (MFCC)[۲۵] از سیگنال‌های مختلف سازه به دست می‌آید و با بررسی آستانه‌ی تعیین شده توسط حالت سالم از سازه (Γ)، آسیب تشخیص داده می‌شود.[۴۰] در استخراج ضرایب MFCC، لازم است که اندازه‌ی قاب زمانی سیگنال (M) مشخص شود. به‌منظور بررسی کامل نتایج تشخیص آسیب توسط روش پراوین، از مقادیر مختلف پارامتر M برابر



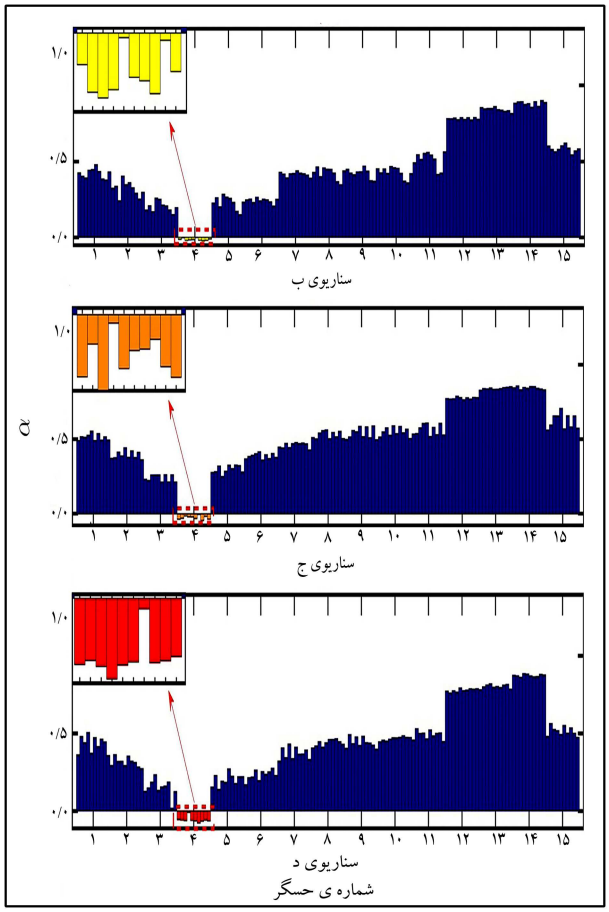
شکل ۶. نتایج تشخیص آسیب با استفاده از مقادیر مختلف برای پارامتر M.

با ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ استفاده شده است. مقدار آستانه‌ی سلامتی Γ، که به ازاء مقادیر مختلف پارامتر M به دست آمده است، به ترتیب برابر ۳۲٫۸، ۷۰٫۲ و ۱۰۵۲۱۵۸۴۰۱٫۲ بوده است. نتایج تشخیص آسیب توسط روش پراوین در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

نتایج ارائه شده برای پارامتر M برابر با ۱۰ و ۵۰ نشان می‌دهند که روش پراوین به خوبی می‌تواند آسیب سناریوهای ب، ج و د را تشخیص دهد. با این حال، افزایش مقدار M منجر به عدم توانایی روش در تشخیص آسیب‌های با شدت پایین می‌شود؛ به‌طوری که به ازاء $M = ۱۰۰$، در برخی از آزمایش‌های سناریوی ب، همچون آزمایش‌های شماره‌ی ۵، ۶ و ۸، آسیب سازه قابل تشخیص نیست. در رابطه با سناریوی هـ، افزایش مقدار پارامتر M موجب بهبود نتایج در شناسایی وضعیت سازه در سناریوی هـ شده است؛ با این حال، حتی به ازاء $M = ۱۰۰$، همچنان در برخی آزمایش‌های سناریوی هـ، سازه به اشتباه، آسیب دیده تشخیص داده شده است. این در حالی است که سازه‌ی پل S۱۰۱ در سناریوی هـ تعمیر شده و آسیبی به سازه وارد نشده است.

۲.۵. نتایج مکان‌یابی آسیب

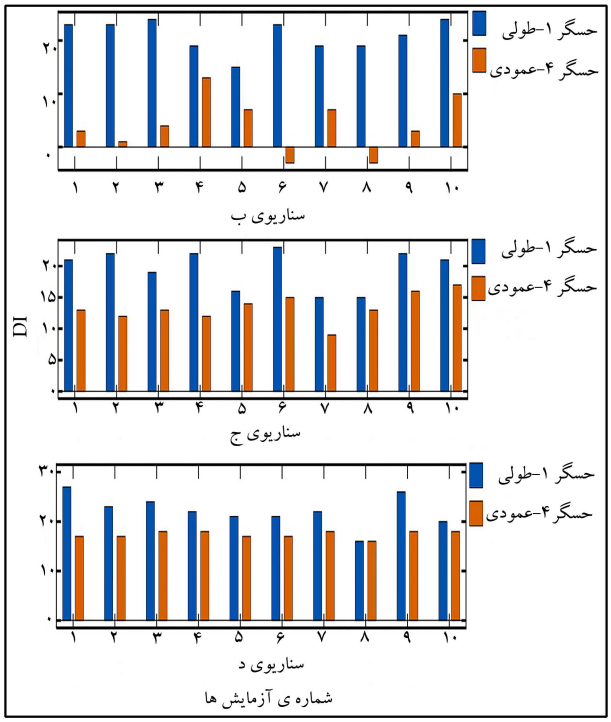
برای تعیین مکان آسیب در سازه‌ی پل، بخش حقیقی ویژگی $\rho(\alpha)$، که برای حسگرهای مختلف به دست می‌آید، بررسی می‌شود. مقدار α برای حسگرهای مختلف در سناریوهای آسیب‌دیدگی (ب، ج و د) به دست آمده و در شکل ۷ نمایش داده شده است. به دلیل اثر بسزای آسیب در مودهای عمودی سازه، فقط نتایج به دست آمده از حسگرهای محور عمودی نشان داده شده‌اند. مقدار α برای حسگرهای طولی و عرضی در تمامی آزمایش‌های سناریوهای ب، ج و د مثبت بوده و به همین منظور از آوردن آن‌ها در شکل ۷ پرهیز شده است. مطابق نتایج شکل ۷، در هر یک از سناریوهای آسیب، مقدار α فقط برای حسگر ۴ منفی



شکل ۷. مقدار α برای آزمایش‌های گوناگون از سناریوهای آسیب در حسگرهای مختلف.

شده است و در حسگرهای دیگر مقدار α مثبت بوده است. این موضوع بیانگر آن است که در سناریوهای گوناگون، مکان آسیب در سازه‌ی پل فقط حسگر ۴ است.

به‌عنوان مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی نویسندگان پژوهش حاضر با پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)،[۲۴] مقادیر شاخص آسیب (DI) برای آزمایش‌های سناریوهای ب، ج و د به دست آمده‌اند. در پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، مقدار شاخص آسیب بر اساس ۱۹ ویژگی آماری، مانند: انرژی، عامل شکل، عامل کِرست و ... که از سیگنال پاسخ سازه استخراج شده‌اند، محاسبه شده است. در روش حاضر، هر حسگری که بیشترین مقدار شاخص آسیب را داشته باشد، به‌عنوان محتمل‌ترین مکان آسیب انتخاب می‌شود. همان‌طورکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص مکان آسیب برای حسگرهای ۱- طولی و ۴- عمودی محاسبه شده است؛ که مطابق آن، با توجه نتایج به دست آمده در سناریوهای مختلف، مقدار DI برای حسگر ۱- طولی بیشتر از مقدار مربوط به حسگر ۴- عمودی است. بنابراین در آزمایش‌های مختلف، حسگر ۱- طولی با احتمال بالاتری مکان آسیب است. این در حالی است که با توجه به شکل ۴، حسگر ۱ در مکان دوری از آسیب و حسگر ۴، نزدیک‌ترین مکان را به محل وقوع آسیب داشته‌اند. از مقایسه‌ی نتایج به دست‌آمده توسط روش پیشنهادی در پژوهش حاضر و روش آلوس و کیوری، توانمندی روش پیشنهادی در تعیین مکان آسیب برای سازه‌ی واقعی پل S۱۰۱ به اثبات می‌رسد.



شکل ۸. مقادیر DI برای حسگرهای ۱- طولی و ۴- عمودی در سناریوهای مختلف.

۶. بحث بر نتایج

آزمایش‌های انجام شده در سازه‌ی پل نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، عملکردی مقاوم در برابر تحریک‌های ناگهانی خارجی دارد؛ به‌گونه‌یی که می‌تواند آسیب سازه را در شرایطی که سازه تحت بارهای ناگهانی، همچون ترافیک و ساخت و سازهای انسانی قرارگرفته است، به خوبی تشخیص دهد. با توجه به نتایج روش پیشنهادی در شکل ۵، تشخیص وجود آسیب در سناریوهای آسیب دیده (ب، ج و د) فقط با بررسی حسگر ۴- عمودی امکان‌پذیر است، و نیازی به بررسی نتایج حسگرهای دیگر نیست. این در حالی است که در شیوه‌ی پراوین، از اطلاعات همه‌ی حسگرها در تشخیص آسیب استفاده می‌شود. بنابراین، بی‌نیازی به اطلاعات همه‌ی حسگرها، یکی از برتری‌های روش پیشنهادی نوشتار حاضر بر روش پراوین است. علاوه‌بر آن، با توجه به نتایج شکل ۶، روش پراوین به ازاء هیچ مقداری از پارامتر M توانایی تعیین وضعیت درست از سازه‌ی پل را ندارد. نتایج به دست آمده برای مقادیر $M = ۱۰$ و $M = ۵۰$ نشان می‌دهند که در سناریوی هـ، سازه‌ی پل به اشتباه آسیب دیده تشخیص داده شده است؛ در حالی که پل S۱۰۱ در سناریوی هـ تعمیر شده و سازه در وضعیتی سالم قرار داشته است. اگر مقدار M افزایش یابد ($M = ۱۰۰$)، این نوع خطای تشخیص کاهش می‌یابد؛ با این‌حال خطای بزرگ‌تری رخ می‌دهد. به‌گونه‌یی که در برخی آزمایش‌های سناریوی ب، که سازه در وضعیتی آسیب دیده قرار داشته است، آسیب قابل تشخیص نبوده است.

تعیین مکان آسیب در روش پیشنهادی حاضر به راحتی انجام می‌پذیرد. در صورت آسیب‌دیدگی سازه، بخش حقیقی ویژگی استخراج شده از سیگنال مرتبط با مکان آسیب (α)، مقداری منفی است. با این حال، در روش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، ویژگی‌های حساس به آسیب از سیگنال‌های آغشته به نویز استخراج می‌شوند. نویز موجود در سیگنال‌ها موجب می‌شود که ویژگی‌های به دست آمده، علاوه بر آنکه به آسیب حساس باشند، به نویز نیز از خود حساسیت نشان دهند. در این صورت، اثر منفی نویز پاسخ در نتایج شناسایی آسیب مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۸، مقدار شاخص DI در حسگر ۱، نیز که از مکان آسیب دور است، بیشتر از مقدار به دست آمده برای حسگر ۴ است. به عبارت دیگر، حسگر ۱ با احتمال بیشتری نسبت به حسگر ۴ مکان آسیب است. در مقایسه با روش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، ویژگی نوین ρ، حساسیت کمتری به نویز موجود در پاسخ سیگنال دارد. این برتری به دلیل حذف آثار نویز منبع از تابع مشخصه‌ی سیگنال پاسخ است. از مقایسه‌ی نتایج شکل‌های ۷ و ۸، می‌توان دریافت که شیوه‌ی پیشنهادی نوشتار حاضر، در مکان‌یابی آسیب با دقت بیشتری عمل می‌کند و عملکرد درستی در مکان‌یابی دقیق آسیب دارد.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک روش استخراج ویژگی با قابلیت اطمینان بالا در برابر نویز و عدم قطعیت ارائه شده است، که نوآوری‌های آن عبارت‌اند از:

- با محاسبه‌ی تابع مشخصه‌ی بسامدی، ویژگی‌های ذاتی و دینامیکی سازه از نویز پاسخ جدا می‌شوند؛
- با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد، یک ویژگی دوبُعدی با مقداری مختلط (ρ) به دست می‌آید، که به‌صورت هم‌زمان میزان همبستگی و ناهمبستگی دو متغیر را نشان می‌دهد. علاوه‌بر آن، ویژگی استخراج شده به آسیب سازه بسیار حساس است.
- با بررسی ابعاد مختلف از ویژگی استخراج شده، سطوح مختلف آسیب شناسایی می‌شوند. با بررسی زاویه‌ی $\rho(\phi)$، وجود آسیب در سازه تشخیص داده می‌شود. همچنین، مکان آسیب با بررسی بخش حقیقی $\rho(\alpha)$ به راحتی تعیین می‌شود؛
- قابلیت اطمینان و توانمندی‌های ویژگی پیشنهادی در شناسایی آسیب سازه‌های عمرانی با بررسی یک سازه‌ی معیار واقعی (سازه‌ی پل S۱۰۱) ارزیابی شده است. دستاوردهای سطوح مختلف از شناسایی آسیب در سازه‌ی پل S۱۰۱، توانایی بالای روش پیشنهادی را در رابطه با بررسی وضعیت سازه‌های واقعی نشان می‌دهند. همچنین به منظور نشان دادن برتری‌های روش شناسایی آسیب پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی پایش سلامت، یعنی روش‌های پراوین (۲۰۲۱) و آلوس و کیوری (۲۰۲۱) مقایسه شده‌اند. آزمایش‌های انجام گرفته، برتری روش پیشنهادی را بر روش‌های ذکر شده در تشخیص آسیب سازه‌یی و تعیین مکان آن نشان می‌دهند.

پانوشت‌ها

1. auto regressive
2. auto regressive with eXogenous input
3. auto regressive moving average
4. auto regressive moving average with eXogenous input
5. Alves& Cury
6. crest
7. Hoell & Omenzetter
8. Hua
9. Fang & Chen

10. Yang
11. Pavlopoulou
12. nonlinear principal component analysis
13. Matilainen
14. sliced inverse regression
15. blind source separation
16. Duran& rosal
17. Coral Reef Optimization
18. Roveri & Carcaterra
19. hilbert-huang transform
20. Yue
21. Prawin
22. moving average
23. Döhler
24. Hille
25. mel-frequency cepstral coefficient

منابع (References)

1. Ghodrati Amiri, G., Talebzadeh, M.,Talebi, M. and et al. "Damage assessment in connections of moment resistant frames using Hilbert-Huang transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), pp. 3-11 (2016).
2. Entezami, A. "Structural health monitoring by time series analysis and statistical distance measures", Springer (2021).
3. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(2.2), pp. 131-147 (2021).
4. Giahi, A.M., Asgari Marnani, J., Ahmadi, H. and et al. "Investigating the effect of intensity and location of damage on modal characteristics in concrete arch dams", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(3.2), pp. 93-104 (2021).
5. Ghannadi, P. and Kourehli, S.S. "Data-driven method of damage detection using sparse sensors installation by SEREPa", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **9**(4), pp. 459-475 (2019).
6. Zhang, Z. and Sun, C. "Structural damage identification via physics-guided machine learning: a methodology integrating pattern recognition with finite element model updating", *Structural Health Monitoring*, **20**(4), pp. 1675-1688 (2021).
7. Entezami, A. and Shariatmadar, H. "An unsupervised learning approach by novel damage indices in structural health monitoring for damage localization and quantification", *Structural Health Monitoring*, **17**(2), pp. 325-345 (2018).
8. Entezami, A. and Shariatmadar, H. "Damage localization under ambient excitations and non-stationary vibration signals by a new hybrid algorithm for feature extraction and multivariate distance correlation methods", *Structural Health Monitoring*, **18**(2), pp. 347-375 (2019).
9. Svendsen, B.T., Frøseth, G.T., Øiseth, O. and et al. "A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **12**(1), pp. 101-115 (2021).
10. Darvishan, E. and Ghodrati Amiri, G. "Damage detection of structures using wavelet packet analysis and dimensionality reduction", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35.2**(1.2), pp. 85-91 (2019).
11. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Karamodin, A. "Improving feature extraction via time series modeling for structural health monitoring based on unsupervised learning methods", *Scientia Iranica*, **27**(3), pp. 1001-1018 (2020).
12. Guo, H. and Wang, Z. "Experimental study of transmission tower damage detection using time series model", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **711**(3), p.012069 (2020).
13. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Mariani, S. "Early damage assessment in large-scale structures by innovative statistical pattern recognition methods based on time series modeling and novelty detection", *Advances in Engineering Software*, **150**, p.102923 (2020).
14. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Karamodin, A. "Data-driven damage diagnosis under environmental and operational variability by novel statistical pattern recognition methods", *Structural Health Monitoring*, **18**(5-6), pp. 1416-1443 (2019).
15. Rezaiee-Pajand, M., Entezami, A. and Shariatmadar, H. "An iterative order determination method for time-series modeling in structural health monitoring", *Advances in Structural Engineering*, **21**(2), pp. 300-314 (2018).
16. Amezquita-Sanchez, J.P. and Adeli, H. "Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **23**(1), pp. 1-15 (2016).
17. Hoell, S. and Omenzetter, P. "Improved damage detectability in a wind turbine blade by optimal selection of vibration signal correlation coefficients", *Structural Health Monitoring*, **15**(6), pp. 685-705 (2016).
18. Yu, Y., Wang, C., Gu, X. and et al. "A novel deep learning-based method for damage identification of smart building structures", *Structural Health Monitoring*, **18**(1), pp. 143-163 (2019).
19. Jalalifar, F., Shahabian Moghadam, F. and Esfahani, M.R. "Application of random decrement technique and bhattacharyya measure to damage detection under environmental and operational variability", *Modares Civil Engineering Journal*, **20**(6), pp. 115-126 (In Persian) (2020).
20. Razavi, B.S., Mahmoudkelayeh, M.R. and Razavi, S.S. "Damage identification under ambient vibration and unpredictable signal nature", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **11**(5), pp. 1253-1273 (2021).
21. Bagheri, A., Rizzo, P. and Li, K. "Ultrasonic imaging algorithm for the health monitoring of pipes", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **7**(1), pp. 99-121 (2017).
22. Vinay, V., Kumar, G.V. and Kumar., K.P. "Bearing fault component identification using information gain and machine learning algorithms", In Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015, 9437, pp. 162-169 (2015).

23. Zhu, X. and Rizzo, P. "Sensor array for the health monitoring of truss structures by means of guided ultrasonic waves", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **4**(3), pp. 221-234 (2014).

24. Alves, V. and Cury, A. "A fast and efficient feature extraction methodology for structural damage localization based on raw acceleration measurements", *Structural Control and Health Monitoring*, **28**(7), p.e2748 (2021).

25. Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F. and et al. "Structural damage detection method based on the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise: a model steel truss bridge case study", *Structural Health Monitoring*, **21**(3), pp.887-912 (2021).

26. Pérez, M.A., Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J.A. and et al. "High-velocity ice impact damage quantification in composite laminates using a frequency domain-based correlation approach", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **147**, p.107124 (2021).

27. Shang, Z., Sun, L., Xia, Y. and et al. "Vibration-based damage detection for bridges by deep convolutional denoising autoencoder", *Structural Health Monitoring*, **20**(4), pp. 1880-1903 (2021).

28. Hoell, S. and Omenzetter, P. "Damage detection in wind turbine blades based on time series correlations", *In 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Torino, Italy, pp. 1-10 (2015).

29. Hua, J., Zhang, H., Miao, Y. and et al. "Modified minimum variance imaging of lamb waves for damage localization in aluminum plates and composite laminates", *NDT & E International*, **125**, p.102574 (2022).

30. Fang, S.E. and Chen, S. "Model-free damage localization of structures using wavelet based grey relational analysis", *Smart Materials and Structures*, **29**(8), p.085046 (2020).

31. Yang, Z., Yu, Z. and Sun, H. "On the cross-correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(7), pp. 2918-2932 (2007).

32. Khoa, N.L., Zhang, B., Wang, Y. and et al. "Robust dimensionality reduction and damage detection approaches in structural health monitoring", *Structural Health Monitoring*, **13**(4), pp. 406-417 (2014).

33. Pavlopoulou, S., Worden, K. and Soutis, C. "Novelty detection and dimension reduction via guided ultrasonic waves: damage monitoring of scarf repairs in composite laminates", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **27**(4), pp. 549-566 (2016).

34. Matilainen, M., Croux, C., Nordhausen, K. and et al. "Supervised dimension reduction for multivariate time series", *Econometrics and Statistics*, **4**, pp. 57-69 (2017).

35. Duran-Rosal, A.M., Gutierrez, P.A., Salcedo-Sanz, S. and et al. "A statistically-driven coral reef optimization algorithm for optimal size reduction of time series", *Applied Soft Computing*, **63**, pp. 139-153 (2018).

36. Entezami, A., Sarmadi, H., Salar, M. and et al. "A novel data-driven method for structural health monitoring under ambient vibration and high-dimensional features by robust multidimensional scaling", Structural Health Monitoring (2020).

37. Roveri, N. and Carcaterra, A. "Damage detection in structures under traveling loads by hilbert-huang transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 128-144 (2012).

38. Yue, N. and Aliabadi, M. "Hierarchical approach for uncertainty quantification and reliability assessment of guided wave-based structural health monitoring", Structural Health Monitoring (2020).

39. Döhler, M., Hille, F., Mevel, L. and et al. "Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 bridge", *Engineering Structures*, **69**, pp. 183-193 (2014).

40. Prawin, J. "Breathing crack damage diagnostic strategy using improved MFCC features", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **32**(20), pp. 2437-2462 (2021).

41. Ghosh, S. "Signals and systems", Pearson Education India (2005).

42. VCE. "Progressive damage test S101 flyover reibersdorf (draft)", Tech. Report 08/2308 (2009).

43. Hille, F., Döhler, M., Mevel, L. and et al. "Subspace based damage detection methods on a prestressed concrete bridge", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*, EURODYN, pp. 2304-2310 (2011).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۳۷-۵۱، (پژوهشی)

Original Article

بررسی بارهای کمانشی تیرهای مدرج تابعی جدارنازک قوطی‌شکل تحت بارگذاری محوری

وحید میرحاجی * **(استادیار)**
رضا جهانگیری (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سلماس
علی نادری (کارشناس ارشد)
گروه مهندسی عمران، مؤسسه‌ی آموزش عالی غیرانتفاعی آئین کمال، ارومیه

در پژوهش حاضر، با دخالت دادن اثر ناهمگنی ساختاری از طریق مدل توزیع توانی، اثر تخلخل و اثر تاب‌خوردگی اعضاء مقاطع عرضی با استفاده از فرضیات تیر ولاسوف و با به‌کارگیری اصل هامیلتون، معادلات حاکم بر تعادل استاتیکی تیر جدارنازک قوطی‌شکل مدرج تابعی متخلخل در معرض بارگذاری محوری به‌دست آمده است. سپس با استفاده از روش المان محدود، معادله‌ی مشخصه‌ی مقدار ویژه‌ی حاکم بر مسئله‌ی کمانش تحت شرایط مرزی چندگانه به‌دست آمده است. در ادامه، با راستی‌آزمایی مدل عددی به‌دست آمده و استخراج منحنی‌های مشخصه، تأثیر پارامترهای مختلف مسئله، اعم از: نسبت منظر تیر، شاخص کسر حجمی اختلاط، نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی به فلزی اعضا، نسبت مدول مواد متشکله‌ی هسته و شاخص تخلخل در مقدار بار بحرانی کمانش تجزیه و تحلیل جامع شده است. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که پارامترهای مختلف مسئله به‌ویژه شاخص تخلخل و شاخص اختلاط توانی مواد متشکله، در تعیین محدوده‌ی کمانش نقش اساسی دارند.

واژگان کلیدی: تیر جدارنازک، تیر تابعی قوطی‌شکل، روش المان محدود، شاخص کسر حجمی اختلاط، بار بحرانی کمانش.

vahid.mirhaji@iau.ac.ir
r_jahangiri@tabrizu.ac.ir
naderi.alii76@yahoo.com

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری بر روی ساخت صفحاتی انجام شده است که خواص مطلوبی، اعم از: صلبیت خمشی زیاد، وزن مخصوص پایین، مشخصات استاتیکی، دینامیکی مطلوب و مقاومت بالا و نیز کاربردهای گوناگونی در شاخه‌های مهندسی عمران سازه در ساخت اجزاء سازه‌های دریایی، سازه‌های مکانیکی و ادوات سازه‌های فضایی، اجزاء سازه‌های راکتورهای هسته‌یی و کوره‌های حرارتی و اتومبیل‌ها و ... دارند.[۱] همچنین مواد مدرج تابعی (FGM)[۱] در پزشکی (ساخت ایمپلنت دندان‌پزشکی) و فناوری مرتبط با نور و الکترونیک (نظیر پوشش محافظ روی پره‌های توربین در موتور توربین گاز) و غیره به‌کار می‌روند.[۲] هنگامی که سازه‌هایی نظیر بدنه‌ی شاتل‌های فضایی، در معرض محیط‌های حرارتی با دماهای بالا قرار می‌گیرند، وجود تغییرات ناگهانی در خواص فیزیکی مصالح از یک لایه به لایه‌ی دیگر، منجر به تمرکز شدید تنش محلی، تورق و جداشدگی بین لایه‌ها می‌شود. اما با انتقال تدریجی خواص از یک لایه به لایه‌ی دیگر، تمرکز تنش به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد. تعداد زیادی از مطالعات مربوط به کاربردهای مواد مدرج تابعی برای اعضاء سازه‌یی منتشر شده است. مواد FGM، نوع جدیدی از مواد هستند که در سال ۱۹۸۴ در آزمایشگاه ملی هوا و فضای ژاپن[۲] معرفی شده‌اند که ترکیب‌های آن به منظور تغییر مداوم درون ماده خصوصاً در راستای ضخامت، طراحی شده‌اند.[۳و۴] برتری مواد FGM را می‌توان در نقش سپرگونه‌ی مصالح حاضر در برابر دماهای بالا تلقی کرد، به گونه‌یی که استحکام کششی قوی‌تری فراهم می‌آورد و تمرکز یا پله‌های تنش را کاهش می‌دهد و مصالح را کاراتر می‌سازد؛ در نتیجه، احتمال شکست ماده کاهش می‌یابد.[۵] مزیت اصلی مواد FGM نسبت به کامپوزیت‌های سنتی آن است که پدیده‌ی ترک‌خوردگی و لایه‌لایه‌شدگی و تمرکز تنش می‌تواند متوقف شود، چون هیچ مرز داخلی در مواد FGM وجود ندارد. چندین روش برای تولید مواد مدرج تابعی وجود دارد؛ مانند روش‌های: متالورژی پودری[۶]، رسوب‌سازی با بخار، نفوذ چند مرحله‌یی ترتیبی، یکپارچه‌سازی بدون فشار و سنتز خود تکثیرشونده در دمای بالا.[۷] با این‌حال، در فرایند آماده‌سازی مواد مدرج تابعی، ممکن است در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۱۹.
DOI:10.24200/J30.2022.60499.3108

داخل مواد به‌علت چند مشکل فنی، تخلخل و ریزمنفذ رخ دهد. در روش نفوذ چندمرحله‌یی، نفوذ مواد ثانویه به قسمت میانی بسیار دشوار است، در حالی که نفوذ آن‌ها به قسمت‌های بالایی و پایینی آسان‌تر است؛ در نتیجه، تخلخل عمدتاً در منطقه‌ی میانی مواد FGM اتفاق می‌افتد. روش‌های دیگر در این زمینه، شکل‌دهی خالص مهندسی شده با لیزر (LENS)[۳][۸] روش پودر مخلوط توسط گریز از مرکز[۹]، روش‌های نمونه‌سازی/تولید سریع تطبیقی (RP/M)[۱۰] و ... هستند.

مطالعات در مورد رفتار مکانیکی مواد FGM، موضوع داغی در سال‌های اخیر بوده است. لی[۴] (۲۰۰۸)،[۱۱] خمش استاتیکی، انتشار امواج خمشی و ارتعاش آزاد تیرهای FG را با استفاده از تئوری‌های تیموشنکو و اویلر ـ برنولی بررسی کرده است. کادولی[۵] و همکاران (۲۰۰۸)،[۱۲] رفتار خمشی تیرها را براساس یک نظریه‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالاتر استفاده از فرمولاسیون المان محدود مطالعه کرده‌اند. لو[۶] و همکاران (۲۰۰۸)،[۱۳] با تمرکز بر تیرهای مدرج تابعی دوبُعدی، روش کشسان نیمه‌تحلیلی برای تیرهای مدرج تابعی دوبُعدی را بسط داده و از روش مربعات تفاضلی مبتنی بر فضای حالت برای به‌دست آوردن تغییرشکل خمش و گرمایی استفاده کرده‌اند. ژائو[۷] و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۴] یک راه‌حل کشسان دقیق برای تیرهای مدرج تابعی دوبُعدی در معرض بارهای جانبی اختیاری با شرایط مرزی اختیاری براساس آنالیزی پیچیده به‌دست آورده‌اند. وانگ و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۵] ارتعاش آزاد تیرهای مدرج تابعی دوبُعدی بر پایه‌ی نظریه‌ی تیر برنولی ـ اویلر را بررسی کردند. متعاقباً، شمشک[۸] و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۶] تحلیل کمانش تیرهای تیموشنکو ساخته شده از مواد مدرج تابعی دوبُعدی را با ملاحظه‌ی شرایط مرزی مختلف و روش ریتز بررسی کرده‌اند.

لی و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۷] رفتار خمش غیرخطی دوبُعدی تیرهای مدرج دوبُعدی را با استفاده از نظریه‌ی تیر اویلر ـ برنولی و روش مربعات تفاضلی تعمیم یافته (GDQM)[۹] مطالعه کرده‌اند. علاوه‌بر این، برخی پژوهشگران بر روی مشخصات خمشی،[۱۸و۱۹] ارتعاش آزاد،[۲۰-۲۲] و کمانش،[۲۳] دو جهتی میکرو ـ نانو تیرهای مدرج تابعی متمرکز شده‌اند. لی و همکاران (۲۰۱۰)،[۲۴] الگوریتمی را براساس روش مربعات تفاضلی برای تحلیل ترموکشسان صفحات با مواد مدرج تابعی دوجهته (BFG)[۱۰] توسعه داده‌اند. نعمت ـ علا[۱۱] و همکاران (۲۰۰۹)،[۲۵] از یک مدل المان محدود سه‌بُعدی برای بررسی بسیار دقیق عددی رفتار الاستوخمیری مواد FGM طی بارگذاری حرارتی استفاده کرده‌اند. چند سال بعد، ارتعاش آزاد یک پوسته‌ی استوانه‌یی دوبُعدی با مواد مدرج تابعی توسط ابراهیمی و نجفی‌زاده (۲۰۱۴)،[۲۶] آنالیز شد. ساتوری[۱۲] و همکاران (۲۰۱۵)،[۲۷] مطالعاتی را در مورد تحلیل رفتار کمانش کشسان پوسته‌ی استوانه‌یی دوبُعدی تقویت شده توسط سخت‌کننده‌های محوری تحت ترکیب بارهای فشار محوری و گسترده‌ی عرضی یکنواخت با استفاده از روش مربعات تفاضلی (DQM) بر عهده گرفتند. یک مطالعه‌ی دقیق در مورد پاسخ‌های کمانش غیرخطی و پس از کمانش صفحات مدرج تابعی سخت شده با ویژگی‌های هندسی مختلف در محیط‌های حرارتی توسط تاکزالا[۱۳] و همکاران (۲۰۱۷)، تهیه شد.[۲۸] اخیراً یک روش تحلیلی به منظور بررسی رفتار کمانشی در قطعات پوسته با مواد مدرج تابعی سخت شده توسط تعدادی از سخت‌کننده‌ها در محیط‌های حرارتی، توسط وونگ و و دوک[۱۴] (۲۰۱۸)، گسترش یافته است.[۲۹]

لی (۲۰۰۸)،[۱۱] اینرسی دورانی و تغییرشکل برشی در مطالعه‌ی رفتارهای استاتیکی و دینامیکی تیر مستطیلی را با مواد FGM در نظر گرفت. طبق مطالعات ذکر شده، نویسندگان نشان داده‌اند که مواد FGM، بسته به نوع یک طرح خاص، مفید یا زیان‌آور هستند. ملاحظه شد که هسته‌ی FGM می‌تواند آسیب ناشی از ضربه در سازه‌ها را کاهش دهد و یا از آن جلوگیری به‌عمل آورد و منجر به کاهش چشم‌گیر وزن شود. محرابیان و گل‌مکانی (۲۰۱۵)،[۳۰] به آثار عمق سخت‌کننده همراه با شرایط مرزی مختلف در پاسخ استاتیکی صفحات متورق حلقوی پرداختند. گل‌مکانی و امامی (۲۰۱۶)،[۳۱] نیز رفتارهای کمانشی و تغییرشکل‌های بزرگ یک حلقه‌ی مدرج تابعی را ـ که به صورت دایره‌یی سخت شده‌اند ـ براساس روش DR بررسی کرده‌اند.

با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل در نوشتارهای ذکر شده، رفتار مکانیکی ساختارهای BFG به مقدار زیادی به توزیع کسر حجمی مواد وابسته است. با وجود این، پروفیل مادی ساختارهای BFG معمولاً توسط یک تابع ریاضی مشخص، مانند قانون‌های توانی یا نمایی توضیح داده می‌شود. ظاهراً چنین ترکیب موادی نمی‌تواند در مسائل عملی بهینه‌سازی شود. بنابراین بهینه‌سازی توزیع مواد در ساختارهای BFG برای به دست آوردن عملکرد مکانیکی مطلوب سازه ضروری است. در مطالعه‌یی دیگر، حسین و مولانی (۲۰۱۸)،[۳۲] به منظور بهینه‌سازی پانل‌های مدرج تابعی دوبُعدی در برابر مقاومت کمانشی از روش بسط چندجمله‌یی استفاده کرده‌اند.

تام ترونگ[۱۵] و همکارانش (۲۰۱۹)،[۳۳] نیز به بهینه‌سازی توزیع ساختاری ـ هندسی مواد متشکله‌ی تابعی در تیر تیموشنکو در معرض بارگذاری استاتیکی پرداخته و نشان داده‌اند که در تیرهای با شرایط مرزی گیردار، باید ترکیب سرامیکی بهینه عمدتاً به لبه‌های گیردار و همچنین سطوح فوقانی و تحتانی اختصاص یابد. شرایط مرزی و محدودیت حجمی سرامیک، همانند نسبت ابعادی (L/H)، اثر قابل توجهی در رفتار مکانیکی تیرهای BFG دارند. نگوین[۱۶]

و همکاران (۲۰۱۶)،[۳۴] بهینه‌سازی تیرهای کامپوزیتی با مقطع نادوانی جدارنازک را برای بیشینه‌سازی گشتاور بحرانی کمانش و بسامد اساسی با عرض بال، ارتفاع جان، و زاویه‌ی فیبر ـ که به صورت همزمان به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند ـ فرمول‌بندی کرده‌اند. علاوه بر این، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک میکرو، نرخ همگرایی سریع‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک کلاسیک نشان داده است. نگوین و لی (۲۰۱۷)،[۳۵] از یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای بررسی کمانش جانبی و خمشی پیچشی تیرهای مدرج تابعی با مقطع I شکل استفاده کرده‌اند که در آن پارامترهای توزیع هندسی و مواد، به عنوان متغیرهای طراحی منظور شده‌اند. پارامترهای هندسی و مصالح، نقش پرنفوذی بر روی کمانش تیرهای مدرج تابعی خصوصاً در تیرهای کوتاه‌تر دارند. همچنین آن‌ها نشان دادند که ضخامت پوشش سرامیکی بال و شاخص توزیع توانی خواص (متناظر با مقادیر پایین)، نقش به‌سزایی در تعیین بار بحرانی متناظر با کمانش بازی می‌کنند. فی[۱۷] و همکارانش (۲۰۲۲)،[۳۶] نیز با بررسی چگونگی بهینه‌سازی مسئله‌ی کمانش و ارتعاش‌های تیرهای جدارنازک باز با توزیع تدریجی خواص در راستای جان و بال، به این نتیجه رسیدند که ظرفیت کمانش بهینه‌ی تیرهای مذکور مستقل از شکل‌های خاص یا ساختار هندسی است. همچنین مطالعه‌ی اخیر نشان داد که بهینه‌سازی توزیع مواد مدرج تابعی می‌تواند به‌طور مؤثر در بهبود ارتعاش‌ها و کمانش تیرهای دارای دیواره‌ی نازک استفاده شود.

نگوین و همکارانش (۲۰۱۸)،[۳۷] نیز با بررسی مسئله‌ی کمانش و ارتعاش‌های خمشی ـ پیچشی تیرهای جدارنازک مدرج تابعی دوجهته دریافتند که ناپایداری کمانشی در تیرهای طویل در مود خمشی و در تیرهای کوتاه‌تر در مود پیچشی رخ می‌دهد. لی و همکارانش (۲۰۱۹)،[۳۸] با استفاده از به‌روزترین تئوری تغییرشکل‌های برشی و روش GDQM، رفتار پس از کمانش تیرهای معیوب مدرج تابعی دوجهته را با تخلخل ساختاری بررسی کردند و نشان دادند که سختی تیر تابعی دوجهته براساس مدل تنش مسطح از سختی مدل کرنش مسطح کمتر است.

با نگاهی به مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که تاکنون رفتار کمانشی تیرهای ساندویچی تابعی جدارنازک بسته به‌ویژه قوطی‌شکل با ساختار ناهمگن، تحت بارگذاری‌های استاتیکی محوری / عرضی به صورت جامع تجزیه و تحلیل نشده است. لذا، در پژوهش حاضر، کمانش تیرهای ذکر شده، مطالعه و بررسی شده است. در این راستا فرض شده است که خواص مکانیکی تیر تابعی به صورت پیوسته با توزیع توانی در راستای ضخامت مقطع تیر با تبعیت از قانون اختلاط خطی کسر حجمی مواد، تغییر می‌یابد.[۳۹و۴۰] سپس با دخالت دادن اثر تاب‌خوردگی اعضاء مقطع عرضی در فرمول‌بندی مسئله با استفاده از فرضیات تیر ولاسوف[۱۸]، [۴۱] و به‌کارگیری تئوری تیر کلاسیک و با استفاده از اصل همیلتون (اصل کار مجازی)، معادلات حاکم بر کمانش تیر استخراج و بار بحرانی کمانش متناظر با تیر ساندویچی‌شکل مدرج تابعی جدارنازک تحت اثر بارگذاری با استفاده از روش حل مقادیر ویژه برای حالت‌های تکیه‌گاهی: الف) دو سر ساده (SS)[۱۹]، ب) یک‌سرگیردار ـ یک‌سر آزاد (CF)[۲۰] و ج) یک‌سر گیردار ـ یک‌سر ساده (CS)[۲۱] استخراج و نتایج حاصل، مقایسه و آنالیز کیفی و کمّی شده‌اند.

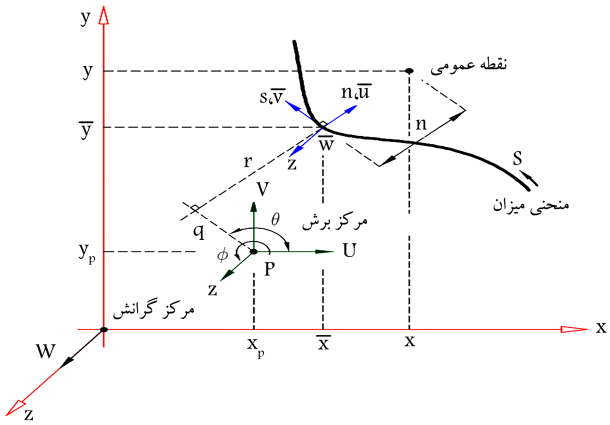
۲. فرمول‌بندی و استخراج معادلات

۱.۲. سینماتیک تغییرشکل مقطع عرضی

به منظور استخراج یک مدل عمومی جهت توصیف چگونگی تغییرشکل مقاطع عرضی تیر جدارنازک در حین بارگذاری، سه نوع دستگاه مختصات متعامد دکارتی (x, y, z) برای سیستم کلی، دستگاه مختصات متعامد (n, s, z) محلی (واقع بر قسمت‌های صفحه، مانند تیر اعم از بال و جان) و دستگاه مختصات محیطی فرض شده است. مطابق شکل ۱، محورهای x و y در صفحه‌ی مقطع عرضی تیر واقع شده‌اند، در حالی که محور z عمود بر مقطع عرضی و به موازات راستای طولی تیر در نظر گرفته شده است. محور n عمود بر سطح میانی هر یک از قسمت‌های صفحه، مانند تیر و محور s، مماس بر سطح میانی بوده و همواره در طول محیط منحنی تراز مشخصه‌ی مقطع عرضی حرکت داده شده است. نقطه‌ی P با عنوان مبدأ قطب یا مرکز برش شناخته می‌شود.[۴۱]

در راستای استخراج معادلات حاکم بر مدل تحلیلی تیر جدارنازک هدفمند FG، این فرضیات منظور شده است:

- مؤلفه‌های کرنش مسئله‌ی کوچک و تغییرات آن‌ها در محدوده‌ی خطی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. دستگاه مختصات واقع بر مقطع عرضی تیر جدارنازک باز.

- تیر، جدارنازک است و رفتار مصالح آن در محدوده‌ی کشسان یا خطی تغییر می‌کند.
- منحنی محیطی مقطع عرضی تیر در صفحه‌ی خود تغییرشکل نمی‌دهد.
- به سبب کوچک بودن مؤلفه‌ی کرنش برشی واقع بر سطح میانی و تنش‌های نرمال مماس بر منحنی، می‌توان از اثر آن‌ها صرف‌نظر کرد ($\bar{\gamma}_{zs} = ۱$).
- فرضیات کیرشهف[۲۲] برای هر کدام از بخش‌های مقطع عرضی صادق است.
- آثار کمانش محلی و اعوجاجی در مدل‌سازی مسئله دخالت داده نمی‌شود.

مطابق شکل ۱، مختصات هر نقطه‌ی دلخواه در مقطع عرضی بر حسب موقعیت مرکز برش را می‌توان با رابطه‌ی (۱ الف و ب) بیان کرد:

$$x = x_s + (r + n)\sin\theta - q\cos\theta \qquad (۱\text{الف})$$

$$y = y_s - (r + n)\cos\theta - q\sin\theta \qquad (۱\text{ب})$$

که در آن‌ها، q فاصله‌ی بین قطب P تا محل تلاقی راستای مماسی s گذرنده از P با راستای عمودی n است. مطابق شکل ۱، می‌توان مؤلفه‌های جابه‌جایی هر نقطه‌یی روی مقطع عرضی را بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی نقاط واقع بر کانتور محیطی ـ میانی مقطع را از رابطه‌ی ۲ به‌دست آورد:[۳۵-۵۷]

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{bmatrix} - n \begin{bmatrix} ۰ \\ \bar{u}_{,s} \\ \bar{u}_{,z} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

با فرض کوچک بودن مؤلفه‌های کرنش و با صرف‌نظر از آثار کمانش موضعی، می‌توان مؤلفه‌های جابه‌جایی $\bar{u}$ و $\bar{v}$ نقاط روی کانتور میانی ـ محیطی، بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی U و V، قطب P (مرکز برش) و زاویه‌ی دوران مقطع Φ حول محور گذرنده از قطب را به‌صورت رابطه‌ی (۳ الف و ب) بیان کرد:

$$\bar{u}(s, z) = U(z)\sin\theta(s) - V(z)\cos\theta(s) - \Phi(z)q(s) \qquad (۳\text{الف})$$

$$\bar{v}(s, z) = U(z)\cos\theta(s) + V(z)\sin\theta(s) + \Phi(z)q(s) \qquad (۳\text{ب})$$

با استفاده از مطالعات صورت گرفته توسط فونگ وو و لی[۲۳] (۲۰۰۷)، مختصات قطاعی (ω) یا تابع اعوجاج از رابطه‌ی (۴ الف و ب) به‌دست می‌آیند:[۴۲]

$$\omega(s) = \int_{s_o}^{s} \left[r(s) - \frac{F(s)}{t(s)} \right] ds \qquad (۴\text{الف})$$

$$\oint_i \frac{F(s)}{t(s)} ds = ۲A_i, \qquad i = ۱, \ldots, n \qquad (۴\text{ب})$$

که در آن، A_i معرف سطح مقطع احاطه شده توسط کانتور iاُم است. همچنین $t(s)$ بیانگر ضخامت در راستای محیط مقطع قوطی‌شکل است. با توجه به روابط اخیر، فرم صریح $F(s)$، یعنی جریان برش محیطی سنت و نانت[۲۴] برای مقطع قوطی‌شکل مطابق رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:[۴۲]

$$F = \frac{۲A_m}{\oint \frac{ds}{t(s)}} = \frac{۲b_۱b_۲}{b_۱(\frac{۱}{t_۱} + \frac{۱}{t_۳}) + b_۲(\frac{۱}{t_۲} + \frac{۱}{t_۴})} \qquad (۵)$$

با توجه به فرضیات ولاسوف، کرنش برشی نقاط واقع بر منحنی میانی به صورت رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$\bar{\gamma}_{sz} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial s} = ۰ \qquad (۶)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳ب) و با انتگرال‌گیری نسبت به s در راستای محیطی از نقطه‌ی مبدأ تا نقطه‌یی دلخواه روی کانتور محیطی می‌توان مؤلفه‌ی جابه‌جایی $\bar{w}$ را به صورت رابطه‌ی ۷ استخراج کرد:

$$\bar{w}(s,z) = W(z)\sin\theta(s) - \frac{dU}{dz}x(s) - \frac{dV}{dz}y(s) - \frac{\partial\Phi(z)}{\partial z}\omega(s) \tag{۷}$$

در ادامه، مؤلفه‌های کرنش خطی به صورت رابطه‌ی ۸ معرفی شده‌اند:[۴۳]

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^{\circ} + (x + n\sin\theta)\kappa_y + (y - n\cos\theta)\kappa_x + (\omega - nq)\kappa_\omega$$
$$\gamma_{sz} = n\kappa_{sz} \tag{۸}$$

که در آن، $\varepsilon_z^{\circ} = W_{,z}$، $\kappa_y = -V_{,zz}$، $\kappa_x = -U_{,zz}$، $\kappa_\omega = -\Phi_{,zz}$ و $\kappa_{zs} = ۲\Phi_{,z}$ و به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کرنش محوری، انحناها در راستاهای x و y، انحناء ناشی از تاب‌خوردگی و انحناء پیچشی هستند. با استفاده از معادله‌های ۲ و ۸، می‌توان رابطه‌ی متشکله‌ی حاکم بر تنش ـ کرنش تیر مدرج تابعی را به‌صورت رابطه‌ی ۹ نوشت:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_z\\ \sigma_{zs}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}E(n) & \circ\\ \circ & G(n)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_z\\ \gamma_{zs}\end{Bmatrix} \tag{۹}$$

که در آن $E(n)$ و $G(n)$ به ترتیب بیانگر مدول کشسانی و مدول برشی مقطع به فاصله‌ی n از محور هندسی هرکدام از لایه‌های مقطع هستند.

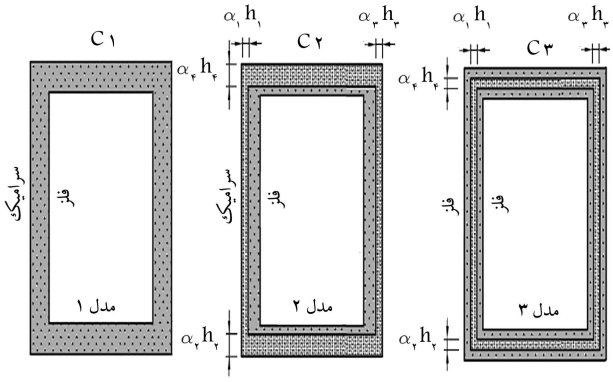
۲.۲. مدل‌سازی خواص مقطع هدفمند دو فازه‌ی تابعی متخلخل

در شکل ۲، مقطع عرضی تیر قوطی‌شکل جدارنازک بسته با ساختار ناهمگن دو فازه‌ی مدرج تابعی FG مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، اجزاء مقطع (بال و جان) از اختلاط دو جزء فلزی و سرامیکی با سه مدل متنوع ساخته شده‌اند.

فرض شده است که توزیع خواص بال و جان تیر FG مذکور در راستای ضخامت و در حضور شاخص تخلخل از قانون اختلاط خطی کسر حجمی مواد تبعیت می‌کند و از رابطه‌ی ۱۰ به‌دست می‌آید:[۴۲]

$$E(n) = E_c V_c(n) + E_m V_m(n) - \rho\frac{E_c + E_m}{۲} \tag{۱۰}$$

که در آن، E_c و E_m به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مدول کشسانی خالص سرامیکی و فلزی و ρ معرف شاخص تخلخل هستند. همین‌طور V_c و V_m نیز نشان‌دهنده‌ی کسر



شکل ۲. مدل‌های مختلف نیمرخ تیر با مقطع عرضی قوطی‌شکل.

حجمی اختلاط جزءهای سرامیکی و فلزی هستند، به‌طوری که در هر سطحی از ضخامت ناحیه‌ی مدرج تابعی تیر ساندویچی‌شکل تابعی، رابطه‌ی ۱۱ برقرار است:

$$V_c(n) + V_m(n) = ۱ \tag{۱۱}$$

با استفاده از قانون توزیع توانی ساده، می‌توان کسر حجمی جزء سرامیکی را به صورت رابطه‌ی ۱۲ نوشت:[۴۲]

$$V_c(n) = \left(\frac{۱}{۲} + \frac{n}{h}\right)^p, \qquad \circ \le p < \infty \tag{۱۲}$$

که در آن، p چگونگی توزیع مواد در ضخامت لایه‌ی هدفمند تابعی را توصیف می‌کند (شکل ۳). مطابق شکل ۳ و با توجه به رابطه‌ی ۸ مشاهده می‌شود که برای مقادیر کوچک‌تر از شاخص اختلاط، درصد سهم ترکیب جزء سرامیکی در مقایسه با جزء فلزی بیشتر است و بالعکس.

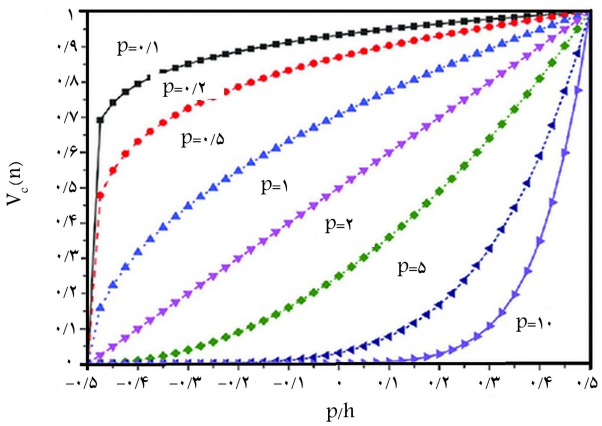
از آنجایی که در تجزیه و تحلیل تیر جدارنازک با مدل حاضر، اثر نسبت پواسون در مقایسه با اثر مدول یانگ ناچیز است، از این رو به‌منظور سادگی فرض شده است که مقدار نسبت پواسون ثابت است. از طرفی دیگر، به منظور سادگی فرض شده است که خواص مصالح فقط در راستای ضخامت بخش‌های مقطع عرضی صورت می‌گیرد و مدول کشسان اعضاء جان و بال در راستای ضخامت از خواص خالص فلزی در $n = -h/۲$ به خواص خالص سرامیکی $n = +h/۲$ براساس توزیع توانی تغییر می‌یابد. با توجه به توضیحات موردنیاز در مورد ساختار ناهمگن هدفمند تابعی در پژوهش حاضر، خواص مواد مدرج تابعی با اجزاء فلزی و سرامیکی و کسر حجمی فاز سرامیکی در راستای ضخامت، مدل‌های A (تک‌لایه‌یی تابعی)، مدل B (دولایه‌یی) و مدل C (سه‌لایه‌یی) به صورت روابط ۱۳ الی ۱۵ تعریف می‌شوند:[۴۳]

نوع **A**

$$V_c = \left(\frac{۱}{۲} + \frac{n}{h}\right)^p, \qquad -\frac{h}{۲} \le n \le +\frac{h}{۲} \tag{۱۳}$$

نوع **B**

$$V_c = \begin{cases}\left(\frac{۱}{۲} + \frac{n}{h}\right)^p, & -\circ/۵h \le n \le (\circ/۵ - \alpha)h\\ ۱ & (\circ/۵ - \alpha)h \le n \le \circ/۵h\end{cases} \tag{۱۴}$$



شکل ۳. توزیع کسرحجمی در امتداد ضخامت لایه‌ی تابعی جان و بال مقطع قوطی‌شکل.

نوع C

$$V_c = \begin{cases} \left(\frac{-|n|+0/5h}{0/5(1-\alpha)h}\right)^p, & +0/5\alpha h \le n \le +0/5h \\ 1, & -0/5\alpha h \le n \le 0/5h \\ \left(\frac{-|n|+0/5h}{0/5(1-\alpha)h}\right)^p, & -0/5h \le n \le 0/5\alpha h \end{cases} \quad (15)$$

که با استفاده از آن‌ها می‌توان ماتریس‌های منتجه‌ی سختی محوری A_{11}، سختی همبستگی(جفت‌شدگی) محوری ـ خمشی B_{11} و سختی خمشی D_{11} مقطع عرضی تیر را با انتگرال‌گیری در راستای ضخامت اعضاء بال و جان از روابط ۱۶ به‌دست آورد:

$$A_{11} = \int_s E(n)\mathrm{d}n$$
$$B_{11} = \int_s nE(n)\mathrm{d}n$$
$$D_{11} = \int_s n^2 E(n)\mathrm{d}n$$
$$D_{66} = \int_s n^2 G(n)\mathrm{d}n \quad (16)$$

۳.۲. انرژی کرنشی و معادلات متشکله

فونگ وو و لی (۲۰۱۵)،[۴۴] با به‌کارگیری اصل کار مجازی (اصل همیلتون)، انرژی پتانسیل ذخیره‌شونده در سیستم در فرم ضعیف را با دخالت دادن اثر بار محوری خارج، استخراج کرده و معادلات حاکم بر مسئله‌ی کمانش تیر را بر حسب منتجه‌های نیروی محوری و لنگری به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ ارائه داده‌اند، که در آن‌ها N_z، M_x، M_y، M_ω و M_t به‌ترتیب بیانگر منتجه‌های نیروی محوری، گشتاورهای خمشی در راستاهای x و y، گشتاور اعوجاجی (تاب‌دهنده)، و گشتاور پیچشی هستند. در رابطه‌ی ۱۸، نیز فرم فشرده‌ی ماتریسی منتجه‌های نیروی محوری و لنگری بر حسب مؤلفه‌های کرنش تعمیم‌یافته و اجزاء سختی تیر (E_{ij}) ارائه شده است.[۴۳]

$$\frac{\partial N_z}{\partial z} = 0$$
$$\frac{\partial^2 M_y}{\partial z^2} + P^\circ(U'' + y_s\Phi'') = 0$$
$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial z^2} + P^\circ(V'' - x_s\Phi'') = 0$$
$$\frac{\partial^2 M_\omega}{\partial z^2} + 2\frac{\partial M_t}{\partial z} + P^\circ(\frac{I_p}{A}\Phi'' + y_sU'' - x_sV'') = 0 \quad (17)$$

$$\begin{Bmatrix} N_z \\ M_y \\ M_x \\ M_\omega \\ M_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & 0 \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_z^\circ \\ \kappa_y \\ \kappa_x \\ \kappa_\omega \\ \kappa_{zs} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

که در آن‌ها، E_{11} بیانگر سختی محوری، E_{22} و E_{33} بیانگر سختی خمشی، E_{44} معرف سختی اعوجاجی، E_{55} معادل سختی پیچشی تیر جدارنازک با ساختار کامپوزیتی هستند. به‌طورکلی، E_{ij}ها نشان‌دهنده‌ی اجزاء ماتریس سختی تیر هستند که از مجموعه‌ی روابط ۱۹ به‌دست می‌آیند. همچنین ε_z°، κ_y، κ_x، κ_ω، κ_{ss} پارامترهای به ترتیب معرف کرنش محوری، انحناء دو محوری در امتدادهای y و x، انحناء پیچشی حول مرکز برش و انحناء پیچ‌خوردگی (تابیدگی) در مقطع تیر حاضر هستند. در روابط اخیر، P° بار محوری و x_s و y_s مختصات مرکز برش سطح مقطع تیر جدارنازک، و I_p بیانگر ممان اینرسی سطح حول محور هستند. امتدادها و زوایا مطابق شکل ۱ تعریف می‌شوند. توضیح اینکه، نوآوری اول پژوهش حاضر، یعنی اثر تخلخل و نوآوری دوم، ساندویچی بودن مقطع عرضی با هسته‌ی تابعی از طریق ضرایب سختی مذکور به داخل مسئله منعکس شده‌اند.

$$E_{11} = \int_s A_{11}ds$$
$$E_{12} = \int_s (A_{11}x + B_{11}sin\theta)ds$$
$$E_{13} = \int_s (A_{11}y - B_{11}cos\theta)ds$$
$$E_{14} = \int_s (A_{11}\omega - B_{11}q)ds$$
$$E_{15} = \int_s (A_{16}\frac{F}{2t} + B_{16})ds$$
$$E_{22} = \int_s (A_{11}x^2 + 2xB_{11} + D_{11}sin^2\theta)ds$$
$$E_{23} = \int_s (A_{11}xy - B11(x\,cos\theta - y\,sin\theta) - \frac{1}{2}D_{11}sin2\theta)ds$$
$$E_{24} = \int_s (A_{11}x\omega - B_{11}(xq - \omega sin\theta) - D_{11}q\,sin\theta)ds$$
$$E_{25} = \int_s (A_{16}x + B_{16}(x + \frac{F}{2t}sin\theta) + D_{16}sin\theta)ds$$
$$E_{33} = \int_s (A_{11}y^2 - 2B_{11}y\,cos\theta + D_{11}cos^2\theta)ds$$
$$E_{34} = \int_s (A_{11}y\,\omega - B_{11}(yq + \omega cos\theta) + D_{11}qcos\theta)ds$$
$$E_{35} = \int_s (A_{16}\frac{F}{2t}y + B_{16}(y - \frac{F}{2t}cos\theta) - D_{16}cos\theta)ds$$
$$E_{44} = \int_s (A_{11}\omega^2 - 2B_{11}\omega q + D_{11}q^2)ds$$
$$E_{45} = \int_s (A_{16}\frac{F}{2t}\omega + B_{16}(\omega - \frac{Fq}{2t}) - D_{16}q)ds$$
$$E_{55} = \int_s (A_{66}\frac{F^2}{4t^2} + 2B_{66}\frac{F}{t} + D_{66})ds \quad (19)$$

با جایگذاری معادلات ماتریسی رابطه‌ی ۱۸ در روابط شرایط مرزی (رابطه‌ی ۱۷) مستخرج از اصل همیلتون، فرم صریح معادلات حاکم بر کمانش بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی به‌صورت رابطه‌ی ۲۰ خلاصه شده‌اند:

$$E_{11}W_{,zz} - E_{12}U_{,zzz} - E_{13}V_{,zzz} - E_{14}\Phi_{,zzz} + 2E_{15}\Phi_{,zz} = 0$$
$$E_{12}W_{,zzz} - E_{22}U_{,zzzz} - E_{23}V_{,zzzz} - E_{24}\Phi_{,zzzz} + 2E_{25}\Phi_{,zzz}$$
$$+P^\circ(U_{,zz} + y_s\Phi_{,zz}) = 0$$
$$E_{13}W_{,zzz} - E_{23}U_{,zzzz} - E_{33}V_{,zzzz} - E_{34}\Phi_{,zzzz}$$
$$+2E_{35}\Phi_{,zzz} + P^\circ(V_{,zz} - x_s\Phi_{,zz}) = 0$$
$$E_{14}W_{,zzz} + 2E_{15}W_{,zz} - E_{24}U_{,zzzz} - 2E_{25}U_{,zzz}$$
$$-E_{34}V_{,zzzz} - 2E_{35}V_{,zzz} - E_{44}\Phi_{,zzzz} + 4E_{55}\Phi_{,zz}$$
$$+P^\circ(\frac{I_p}{A}\Phi_{,zz} + y_sU_{,zz} - x_sV_{,zz}) \quad (20)$$

مجموعه‌ی معادلات ۲۰، بیانگر فرم عمومی معادلات حاکم بر مسئله‌ی ناپایداری

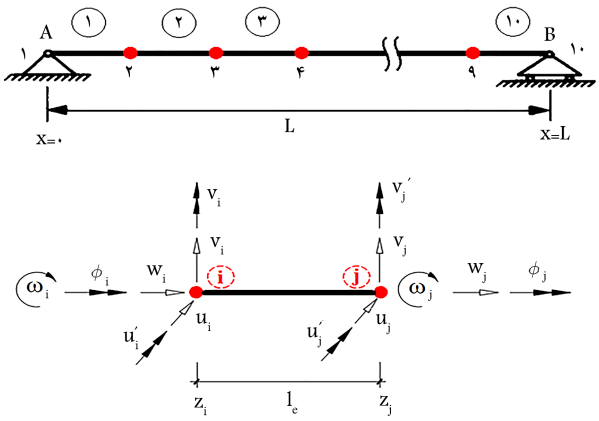
استاتیکی است، به نحوی که در آن مؤلفه‌های تغییرمکان نسبت به هم همبسته هستند. تحت شرایط خاص و فرض وجود تقارن هندسی و برقراری تقارن در توزیع خواص لایه‌ها نسبت به محورهای x و y منجر به $x_s = y_s = 0$ و انطباق مراکز برش و هندسی سطح بر روی هم می‌شود؛ که در نتیجه، معادله‌های دوم و سوم در مجموعه‌ی معادلات ۲۰ که متناظر با مودهای کمانش خمشی حول محورهای x و y هستند، مستقل از هم و مستقل از مود کمانش محوری (معادله‌ی اول) و مود پیچشی (معادله‌ی چهارم) می‌شوند. حال آنکه تحت مفروضات ذکرشده و مطابق رابطه‌ی ۲۱، همبستگی شدیدی بین معادله‌های اول و چهارم به وجود می‌آید که به عنوان مود کمانش پیوندی شناخته می‌شود، که در برگیرنده‌ی آثار توأمان مود تغییرمکان محوری و مود پیچشی مقطع جدارنازک است:

$$
\begin{aligned}
&E_{11}W_{,zz} - E_{12}\Phi_{,zzz} = 0\\
&E_{22}U_{,zzzz} + P^{0}U_{,zz} = 0\\
&-E_{33}V_{,zzzz} + P^{0}V_{,zz} = 0\\
&E_{12}W_{,zzz} - E_{44}F_{,zzzz} + 4E_{55}\Phi_{,zz} + P^{0}\frac{I_p}{A}\Phi_{,zz} = 0
\end{aligned}
\qquad (21)
$$

زیرا برخلاف مقطع قوطی‌شکل باکس، مانند جدار ضخیم، وقتی مقطع جدار نازک قوطی‌شکل تحت نیروی محوری P^{0} قرار می‌گیرد، به دلیل همبستگی مذکور بین مود تغییرمکان محوری و مود پیچشی مقطع، اثر آن از طریق تابع اعوجاج به‌داخل معادلات تعادل استاتیکی منعکس می‌شود. لذا تحت مفروضات مذکور، کمانش ایجاد شده ماهیت متفاوتی نسبت به کمانش محوری مقاطع توپُر یا جدار ضخیم خواهد داشت؛ که تحت شرایط اشاره شده با به‌کارگیری روش المان محدود و پیامد آن با استخراج ماتریس‌های سختی سیستم و با حل معادله‌ی مشخصه‌ی حاکم برکمانش، می‌توان کوچک‌ترین نیروی بحرانی متناظر با وضعیت کمانش را که مشتمل بر تلفیقی از مودهای محوری و پیچشی است، به‌عنوان ظرفیت کمانش مقطع جدارنازک بسته به‌دست آورد.

۴.۲. فرمول‌بندی مسئله به روش المان محدود

در ادامه، با تقسیم‌بندی تیر در راستای محوری به چند المان مشابه (شکل ۴) و با به کارگیری روش المان محدود، می‌توان مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی نقاط داخل هر کدام از المان‌ها را با استفاده از توابع درون‌یابی خطی لاگرانژی Ψ_j و توابع درون‌یابی



شکل ۴. شکل شماتیک هندسی المان‌های تیر در راستای طولی.

چندجمله‌یی (مکعبی‌شکل) هرمیتی Ψ_j ، بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی گره‌های ابتدایی و انتهایی مطابق مجموعه‌ی روابط ۲۲ و ۲۳ بیان کرد:

$$
\begin{aligned}
&W(z) = W_1\Psi_1(z) + W_2\Psi_2(z)\\
&U(z) = u_1\Psi_1(z) + u_{1,z}\Psi_2(z) + u_2\Psi_3(z) + u_{2,z}\Psi_4(z)\\
&V(z) = v_1\Psi_1(z) + v_{1,z}\Psi_2(z) + v_2\Psi_3(z) + v_{2,z}\Psi_4(z)\\
&\phi(z) = \phi_1\Psi_1(z) + \phi_{1,z}\Psi_2(z) + \phi_2\Psi_3(z) + \phi_{2,z}\Psi_4(z)
\end{aligned}
\qquad (22)
$$

$$
\begin{aligned}
&\psi_1(z) = 2z^3/l_e^3 - 3z^2/l_e^2 + 1\\
&\psi_2(z) = z^3/l_e^2 - 2z^2/l_e + z\\
&\psi_3(z) = -2z^3/l_e^3 + 3z^2/l_e^2\\
&\psi_4(z) = z^2/l_e^2 - z^2/l_e
\end{aligned}
\qquad (23)
$$

نوع شرایط مرزی سه‌گانه‌ی هندسی حاکم بر جابه‌جایی‌ها و دوران لبه‌های ابتدایی و انتهایی تیر را می‌توان به این صورت در نظر گرفت:

- شرایط مرزی دو سر ساده (SS) :

$$x = 0 : u = v = w = \phi = 0; x = L : u = v = \phi = 0$$

- شرایط مرزی یکسر گیردار یکسر ساده (CS):

$$\text{Clamped edge} : x = 0 : u = v = w = \phi = 0; u' = v' = \phi' = 0$$

$$\text{Simply Suported edge} : x = L : u = v = \phi = 0$$

- شرایط مرزی یکسر گیردار یکسر آزاد (CF):

$$\text{Clampededge} : x = 0 : u = v = w = \phi = 0; u' = v' = \phi' = 0$$

$$\text{Free edge} : \quad x = L : None...$$

با جایگذاری جابه‌جایی‌های نقاط در معادله‌ی انتگرالی مستخرج از اصل همیلتون (فرم ضعیف شده)، فرم صریح معادله‌ی جابه‌جایی گره‌ها به‌دست می‌آید.[۴۱] از طرف دیگر، به‌علت ماهیت غیروابسته‌ی δw_I، δu_i، δv_i و $\delta\phi_i$ در معادله‌ی انتگرالی با فرم ضعیف شده، می‌توان با صفر قرار دادن ضرایب هرکدام از کمیت‌های ذکر شده، مدل المان محدود هرکدام از المان‌ها را در قالب مسئله‌ی مقدار مشخصه‌ی تعمیم‌یافته، مطابق رابطه‌ی ۲۴ توصیف کرد:

$$(K - \lambda G) \times \Delta = 0 \qquad (24)$$

که در آن، رابطه‌ی ۲۵ به‌دست می‌آید:

$$
\begin{aligned}
\Delta = \{&w_1\ w_2\ u_1\ u_1'\ u_2\ u_2'\ v_1 \ldots\\
&\ldots v_1'\ v_2\ v_2'\ \phi_1\ \phi_1'\ \phi_2\ \phi_2'\}^T
\end{aligned}
\qquad (25)
$$

که در آن، Δ بردار ویژه‌ی جابه‌جایی‌های گره‌یی متناظر با مقدار ویژه‌ی مرتبط برای $\lambda = P_{cr}$ هستند. همچنین، K و G نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی ماتریس سختی المان و ماتریس سختی هندسی هستند که به تفصیل توسط نگوین و همکاران (۲۰۱۶) ارائه شده‌اند.[۴۱] در حالت کلی، اگر تغییرات خواص از جمله مدول یانگ فقط در راستای ضخامت اعضاء مقطع تابعی (بال و جان)

اتفاق بیفتد، اعضاء ماتریس سختی و هندسی به فرم روابط ۲۶ و ۲۷ خواهند بود:

$$K=\begin{bmatrix}[K_{IJ}^{11}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{12}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{13}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{14}]_{[2\times 4]}\\ \vdots & [K_{IJ}^{22}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{23}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{24}]_{[2\times 4]}\\ \vdots & \cdots & [K_{IJ}^{33}]_{[2\times 4]} & [K_{IJ}^{34}]_{[2\times 4]}\\ sym. & \cdots & \cdots & [K_{IJ}^{44}]_{[2\times 4]}\end{bmatrix} \quad (26)$$

$$G=\begin{bmatrix}[0]_{2\times 2} & [0]_{[2\times 4]} & [0]_{[2\times 4]} & [0]_{[2\times 4]}\\ \vdots & [G_{IJ}^{22}]_{[2\times 4]} & [0]_{[2\times 4]} & [G_{ij}^{24}]_{[2\times 4]}\\ \vdots & \cdots & [G_{IJ}^{33}]_{[2\times 4]} & [G_{IJ}^{34}]_{[2\times 4]}\\ sym. & \cdots & \cdots & [G_{IJ}^{44}]_{[2\times 4]}\end{bmatrix} \quad (27)$$

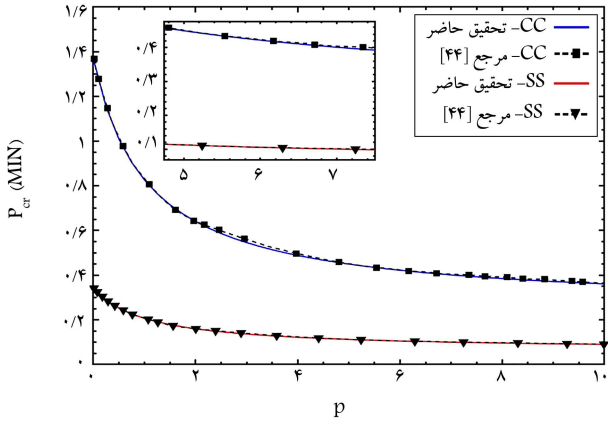
۳. مدل‌سازی عددی

۱.۳. راستی‌آزمایی کمانش

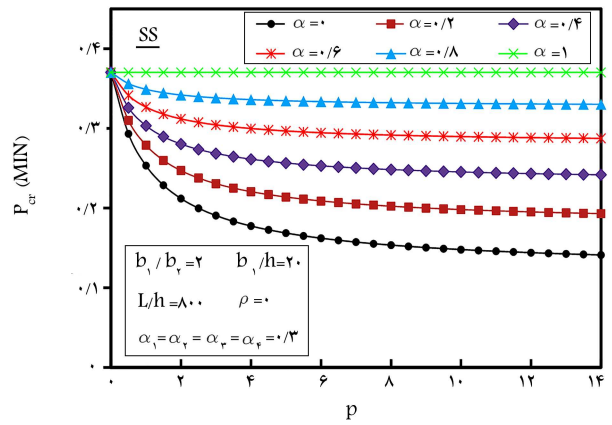
به منظور راستی‌آزمایی نتایج مدل حاضر، مشابه نوشتار لانک و همکارانش (۲۰۱۵)،[۴۴] فرض شده است که تیر قوطی‌شکل مدرج تابعی تک‌لایه با نسبت ابعاد $b_1/h=20$، $b_2/h=40$ و $L/h=1600$ ساخته شده از دو جزء سرامیکی با مشخصات مکانیکی $E_c=380\ Gpa$ و $v_c=0/3$ و جزء حجمی فلزی با $E_m=\nu_0 GPa$ و $\nu_m=0/3$ تحت تأثیر بار محوری قرار دارد. در این راستا، مطابق مرجع[۴۴] فرض شده است که شرایط مرزی حاکم بر لبه‌های تیر از دو نوع: الف) دوسرگیردار (CC)، ب) دو سر ساده‌ی نامتحرک (SS) است. در شکل ۵، مقایسه‌ی کمّی نتایج مستخرج از پژوهش حاضر با نتایج مرجع اخیر،[۴۴] برای تغییرات ظرفیت کمانش در برابر پارامتر شاخص کسر اختلاط حجمی برای دو حالت از شرایط مرزی اخیر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج حاصل از مدل حاضر، انطباق بسیار خوبی با نتایج متناظر به‌دست آمده در پژوهش لانک و همکارانش[۴۴] دارد.

۲.۳. تیر مدرج تابعی جدارنازک تحت بارگذاری محوری

تیر جدارنازک با مقطع عرضی مستطیلی بسته با ضخامت جدار h و ابعاد وسط تا وسط جدار ($b_1\times b_2$) تحت شرایط مرزی تکیه‌گاهی ساده فرض شده است. همچنین، با توجه به مقطع مفروض، ضخامت جدار به‌طور یکنواخت معادل $h=5mm$، $b_2=20h$ و $b_1=40h$ فرض شده است. نسبت L/b_2 نیز معادل نسبت منظر تیر معرفی شده است. ضمناً فرض شده است که مقاطع عرضی تیر اعم از جان و بال، ساندویچی‌شکل (کامپوزیتی یا چندلایه‌یی) هستند، به نحوی که لایه‌ی هدفمند تابعی آن از ترکیب ریزساختاری فازهای فلزی سرامیکی (Al/Al_2O_3) ساخته شده است؛ به‌طوری که در لایه‌های مذکور، انتقال خواص مواد از یک فاز به فاز دیگر به‌صورت تدریجی و پیوسته اتفاق می‌افتد. در این راستا، فرض شده است که مدول کشسان جزء سرامیکی (Al_2O_3) برابر $E_c=320/7GPa$ و جزء فلزی (Al) برابر $E_m=105/69\,GPa$ است. همچنین برای سادگی فرض شده است که نسبت پواسون هر دو جزء مساوی و برابر $\nu=0/3$ است. از طرف دیگر فرض شده است که α_1 و α_2 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نسبت ضخامت لایه‌های همگن سرامیکی بال‌های فوقانی و تحتانی مقاطع هستند و α_3 نیز معادل نسبت ضخامت



شکل ۵. تغییرات برای دو حالت مختلف از شرایط مرزی.



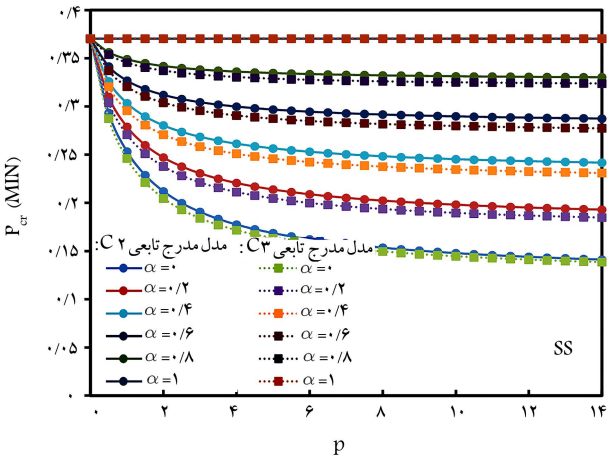
شکل ۶. تغییرات بار محوری بحرانی کمانش در برابر شاخص توانی اختلاط برای αهای متفاوت.

لایه‌ی سرامیکی جان است. ضمناً نسبت منظر تیر برابر $L/b_3=40$ در نظر گرفته شده است. سه مقطع عرضی از توزیع مواد در راستای جدار مقطع تیر، به‌صورت تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه با هسته‌ی سرامیکی خالص، با عناوین A، B و C ارائه شده و خواص مصالح در لایه‌ی تابعی، به‌صورت تدریجی به خواص سرامیکی در فصل مشترک لایه‌ها گرایش یافته است. مطابق شکل ۲، مقطع عرضی تیر هدفمند تابعی قوطی‌شکل که معرف ساختار هندسی و چگونگی توزیع خواص لایه‌های همگن و تابعی مقطع عرضی تیر با مقطع قوطی‌شکل است، با عناوین C۱، C۲ و C۳ معرفی شده است.

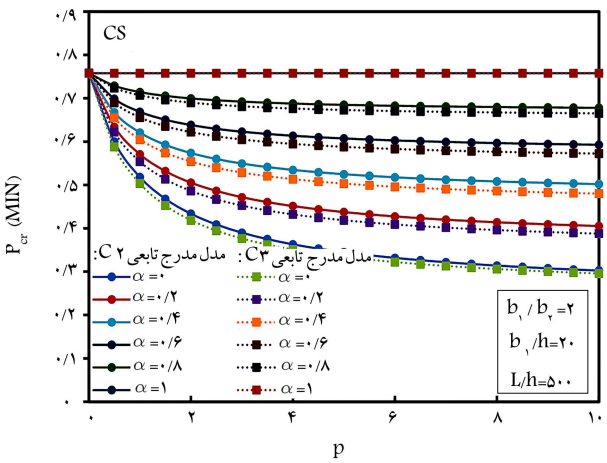
۴. تحلیل عددی

۱.۴. اثر نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی در بار بحرانی کمانش در تیر دو سر ساده (SS)

در ابتدا مسئله‌ی کمانش تیر جدارنازک بسته‌ی قوطی‌شکل، در معرض بار محوری تیر ارائه شده در مدل C۲ (شکل ۲) بررسی شده است. در این راستا فرض شده است که نسبت ضخامت لایه‌های سرامیکی بال‌ها و هسته‌ی سرامیکی جان تیر یکسان و برابر $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\alpha$ بوده است. در شکل ۶، نمودار تغییرات نیروی بحرانی کمانش در برابر تغییرات شاخص توانی اختلاط، برای ۶ مقدار مختلف از نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی (α) ملاحظه می‌شود؛ که مطابق آن،



شکل ۷. تغییرات $P_{cr} - p$ در تیر با مدل‌های C۳ و C۲ به ازاء مقادیر مختلف α.



شکل ۸. تغییرات $P_{cr} - p$ در تیر با مدل‌های CS به ازاء مقادیر مختلف α.

برای هر مقدار خاص از نسبت ضخامت سرامیکی، با افزایش p و به تبع آن به علت کاهش سهم جزء سرامیکی، مقدار بار بحرانی متناظر با کمانش نیز به صورت پیوسته کاهش یافته است؛ به طوری که با افزایش شاخص توانی اختلاط، بار بحرانی متناظر با کمانش عرضی، به یک مقدار حدی خاصی میل کرده و در آن تثبیت شده است. زیرا بزرگ‌تر بودن مدول کشسان جزء سرامیکی در مقایسه با جزء فلزی سبب می‌شود که در pهای کوچک‌تر (متناظر با سهم سرامیکی بیشتر)، بار محوری جهت ایجاد کمانش عرضی بیشتری لازم باشد. به‌عبارت دیگر، بالا رفتن مقدار شاخص اختلاط، اثر ناپایدارکننده دارد؛ به‌طوری که در شاخص‌های بزرگ‌تر، سهم جزء فلزی با مدول کشسان کوچک‌تر، کمتر شده و کمانش عرضی در بارهای کوچک‌تری اتفاق افتاده است. از طرف دیگر، در نمودار مذکور به‌خوبی مشاهده می‌شود که افزایش نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی در جان و بال مقطع (α)، سبب شده است که سهم مشارکت جزء سرامیکی در تحمل مقاومتی مقطع، در مقایسه با سهم جزء فلزی افزایش یافته است. در نتیجه، افزایش سهم جزء سرامیکی موجب افزایش سختی تیر شده و کمانش عرضی در بارهای محوری بزرگ‌تر رخ داده است.

علاوه بر این، مقدار لنگر بحرانی مستقل از مقدار شاخص توانی اختلاط است. در شکل ۷، منحنی‌های مشخصه‌ی بار بحرانی کمانش در برابر تغییرات شاخص توانی اختلاط، برای دو مدل مختلف از مقطع عرضی جدارنازک بسته: الف) مدل C۲ و ب) مدل C۳، به ازاء شش مقدار α مقایسه شده است. با توجه به شکل اخیر، برای تمامی مقادیر α، با افزایش شاخص توانی اختلاط، کمانش در بارگذاری‌های پایین‌تر اتفاق افتاده و بار و لنگر بحرانی تا تثبیت شدن در یک مقدار خاصی کاهش یافته است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل برای مدل‌های دولایه‌یی (مدل C۲) و سه‌لایه‌یی (مدل C۳)، معلوم می‌شود که برای تمام مقادیر α و p، کمانش مقطع با توزیع خواص سه‌لایه‌یی (ساندویچی‌شکل)، در مقایسه با دو لایه‌یی (مدل C۲)، در بارهای پایین‌تری اتفاق افتاده است.

۲.۴. اثر نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی در P_{cr} در تیر تحت شرایط مرزی CS

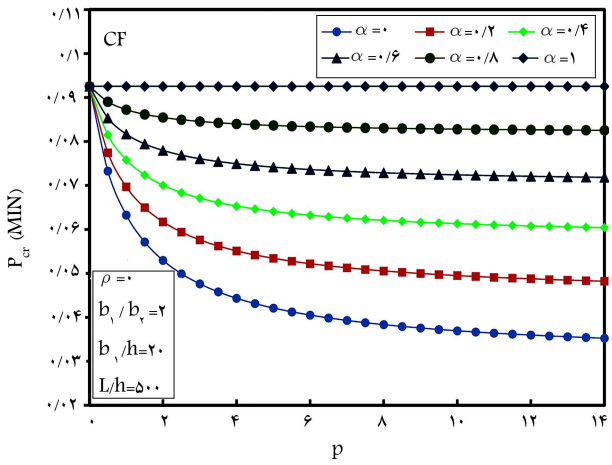
در این راستا، در شکل ۸، منحنی‌های مشخصه‌ی بار بحرانی کمانش در برابر تغییرات شاخص توانی اختلاط، برای دو مدل مختلف از مقطع عرضی جدارنازک بسته: الف) مدل C۲ و ب) مدل C۳، به ازاء شش مقدار α و تحت شرایط مرزی تکیه‌گاهی CS نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، برای تمامی مقادیر α، با افزایش شاخص توانی اختلاط، کمانش در بارهای کوچک‌تر اتفاق افتاده است؛ به نحوی که در تمامی حالت‌ها با ادامه‌ی افزایش شاخص توانی اختلاط به سمت خواص فلزی، بار بحرانی تا تثبیت شدن در یک مقدار خاصی، کاهش روند کاهشی داشته است. از طرف دیگر، مقایسه‌ی نتایج حاصل برای مدل‌های دولایه‌یی (C۲) و سه‌لایه‌یی (C۳)، نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که به ازاء مشخصات هندسی یکسان و هر مقدار خاص از α، کمانش مقطع با توزیع خواص سه‌لایه‌یی در مقایسه با خواص دولایه‌یی در بارهای پایین‌تری اتفاق افتاده است. دلیل آن نیز به بیشتر بودن کسر حجمی اختلاط جزء سرامیکی در مدل C۲ در C۳ مقایسه با مدل است. از طرف دیگر، افزایش نسبت α سبب افزایش سهم مشارکت جزء سرامیکی در تحمل مقاومتی مقطع در مقایسه با سهم جزء فلزی شده است؛ زیرا مقادیر بزرگ‌تر α متناظر با بزرگ‌تر بودن نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی جان و بال و به تبع آن افزایش کسر حجمی سرامیکی است. در نتیجه، پیامد افزایش کسر جزء سرامیکی، افزایش سختی کمانشی تیر است که باعث می‌شود دامنه‌ی تحمل بار کمانشی مقطع بهبود یابد. همچنین مطابق شکل اخیر، در هر دو مدل، منحنی متناظر با $\alpha = ۱$ بیانگر سرامیکی شدن کل مقطع است که در شرایط ذکر شده، تیر بیشینه‌ی مقدار سختی متناظر با بیشترین بار بحرانی را خواهد داشت.

۳.۴. اثر نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی در کمانش با شرایط مرزی CF

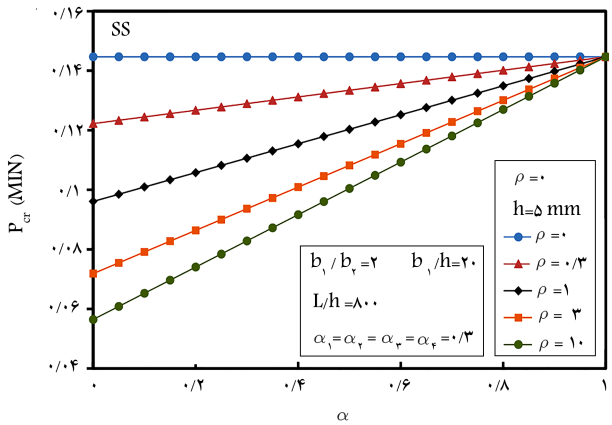
در شکل ۹، تغییرات بار بحرانی کمانش در برابر تغییرات شاخص توانی اختلاط در مقادیر مختلف α در تیر یک‌سرگیردار ـ یک‌سر آزاد با مقطع دولایه (C۲)، مشاهده می‌شود که مطابق آن، مشابه حالت‌های قبلی، با افزایش شاخص توانی اختلاط، مقدار بار کمانش به علت کاهش سختی ناشی از کاهش سهم جزء سرامیکی کاهش یافته است. همچنین از شکل اخیر می‌توان دریافت که افزایش نسبت ضخامت سرامیکی اثر پایدارکننده دارد؛ زیرا طبق شکل اخیر، با افزایش α، سختی تیر نیز افزایش یافته و کمانش تیر در مقادیر بزرگ‌تری از بار وارده اتفاق افتاده است.

۴.۴. اثر نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی در ظرفیت کمانشی

در بخش حاضر، اثر نسبت ضخامت سرامیکی $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$، در ظرفیت کمانش تیر دو سرساده، با مدل نوع C۳ بررسی شده است. در شکل ۱۰، منحنی‌های تغییرات ظرفیت کمانشی در برابر نسبت ضخامت سرامیکی، برای پنج



شکل ۹. تغییرات $P_{cr} - p$ در تیر دو لایه‌یی یکسر گیردار ـ یکسر آزاد به ازای مقادیر مختلف α.



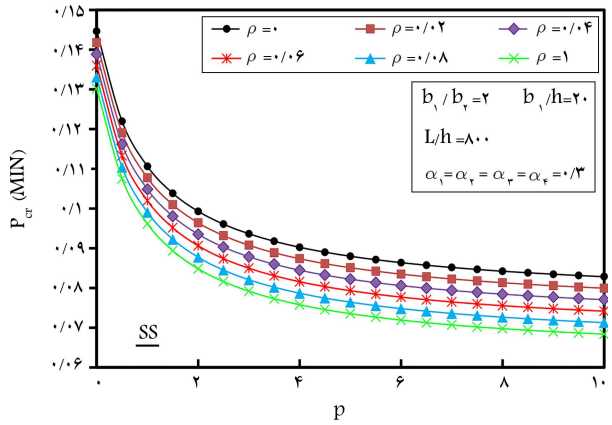
شکل ۱۰. تغییرات ظرفیت کمانشی مدل نوع C۳ در برابر α به ازاء مقادیر مختلف p.

مقدار از شاخص توانی مشاهده می‌شود که مطابق آن برای تمامی مقادیر شاخص توانی اختلاط، با افزایش نسبت ضخامت سرامیکی، ظرفیت کمانشی به علت بالا رفتن سختی کل افزایش یافته است. مطابق شکل مذکور، در محدوده‌ی $0 \leq \alpha_2 \leq 1$ با بزرگ‌تر شدن شاخص توانی اختلاط از $p = 0$ به سمت $p = 10$، ظرفیت کمانشی به‌علت کاهش سختی در نتیجه‌ی کاهش کسر حجمی سرامیکی در کل مقطع، کاهش یافته است.

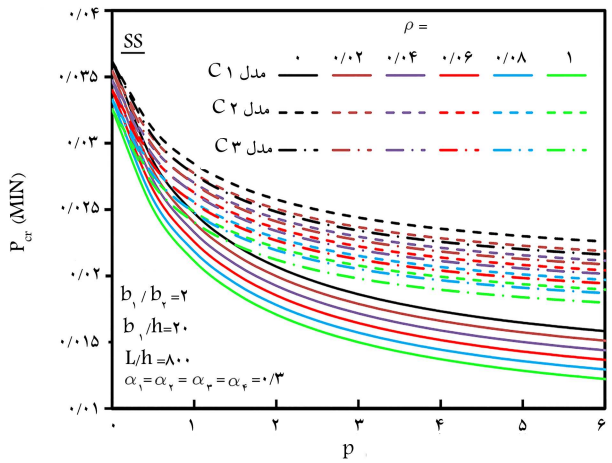
۵.۴. اثر شاخص تخلخل در بار بحرانی با شرایط مرزی SS

در شکل ۱۱، تغییرات دامنه‌ی بار بحرانی متناظر با کمانش در برابر شش مقدار مختلف از شاخص تخلخل ρ مشاهده می‌شود که مطابق آن، برای هر مقدار خاصی از تخلخل (ρ)، با افزایش شاخص توانی (p)، مقدار بار بحرانی کمانش به علت کاهش سطح مقطع عرضی ناشی از تخلخل کاهش یافته است. با ادامه‌ی افزایش P دامنه‌ی بار بحرانی متناظر با کمانش، در یک مقدار حدی خاص وابسته به شاخص تخلخل مرتبط تثبیت شده است. همچنین با توجه به شکل اخیر پیداست که با کاهش سختی تیر، کمانش تیر در مقادیر کوچک‌تری از دامنه‌ی بار وارده اتفاق افتاده است.

همچنین منحنی‌های مشخصه‌ی ظرفیت باربری کمانشی در برابر شاخص توانی، برای سه مدل مختلف از مقطع: الف) تک‌لایه‌یی (C۱)، ب) دولایه‌یی (C۲)، و ج)



شکل ۱۱. تغییرات $P_{cr} - \rho$، تیر سه‌لایه‌یی با شرایط SS.



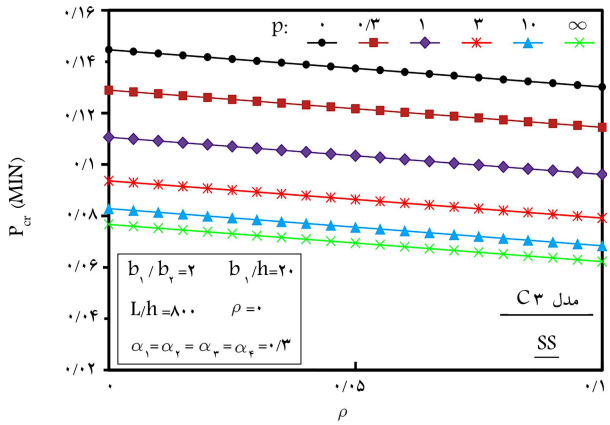
شکل ۱۲. تغییرات $P_{cr} - \rho$، سه مدل تیر با مقادیر مختلف شاخص تخلخل در مدل‌های C۳، C۲، C۱ در حالت SS.

سه‌لایه‌یی (C۳)، به ازاء شش مقدار مختلف از شاخص تخلخل تحت شرایط مرزی تکیه‌گاهی SS در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود؛ که با توجه به آن، برای تمامی مقادیر تخلخل، با افزایش شاخص توانی، ظرفیت کمانشی نیز کاهش یافته است که دلیل آن ناشی از کاهش سختی‌های کل و خالص مقطع است.

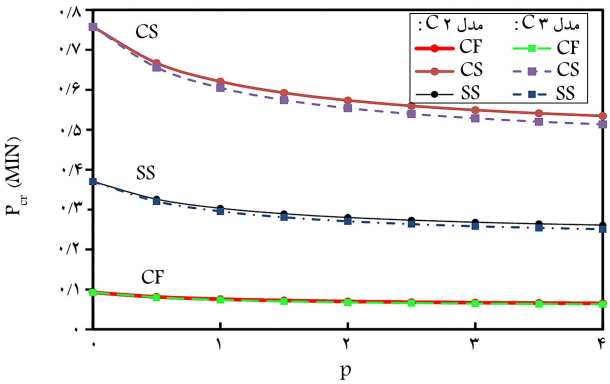
با ادامه‌ی افزایش p شاخص توانی از سمت خواص خالص سرامیکی به سمت خواص فلزی، ظرفیت باربری کمانشی تا تثبیت شدن در یک مقدار خاصی کاهش یافته است. از طرف دیگر، مقایسه‌ی نتایج حاصل برای سه مدل ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که در هر مقدار خاصی از شاخص تخلخل، ظرفیت باربری تیر با مدل مقطع عرضی دولایه‌یی بیشتر از ظرفیت باربری مدل‌های تک‌لایه و مدل ساندویچی سه‌لایه است؛ که به دلیل بیشتر بودن کسر حجمی جزء سرامیکی مدل C۲، در مقایسه با دو مدل دیگر است.

۶.۴. اثر شاخص تخلخل در ظرفیت کمانش

در شکل ۱۳، منحنی‌های تغییرات ظرفیت کمانشی در برابر تغییرات شاخص تخلخل، برای پنج مقدار p در مدل C۳ مشاهده می‌شود؛ که برای تمامی مقادیر p، با افزایش ρ، ظرفیت کمانشی به‌علت کاهش سختی کاهش یافته است. همچنین با افزایش شاخص توانی از $p = 0$ (مقطع سرامیکی خالص) به سمت $p \to \infty$ (مقطع فلزی خالص)، ظرفیت کمانشی به‌علت کاهش سختی کاهش یافته است.



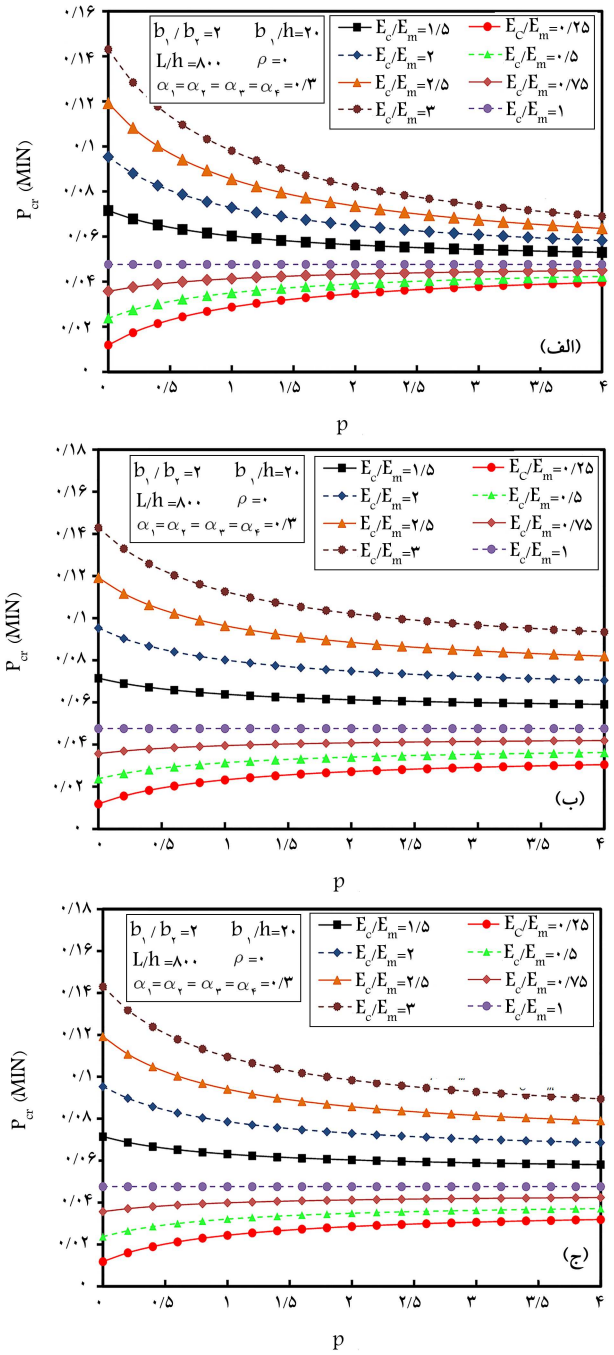
شکل ۱۳. تغییرات $P_{cr} - \rho$، به ازای تخلخل یکنواخت و شش مقدار از p در مدل C۳.



شکل ۱۴. تغییرات $P^{cr} - \rho$ برای حالات مختلف تکیه‌گاهی و پروفیل عرضی.

۷.۴. اثر شرایط مرزی تکیه‌گاهی در ظرفیت باربری کمانشی

در شکل ۱۴، منحنی‌های مشخصه‌ی بارکمانشی در برابر شاخص توانی اختلاط، برای دو مدل مختلف از توزیع خواص: الف) مدل C۲ و ب) مدل C۳ و برای سه حالت مختلف از شرایط مرزی حاکم بر لبه‌های تیر: الف) دو سر ساده، ب) یک‌سر ساده ـ یک‌سر گیردار و ج) یک‌سر گیردار ـ یک‌سر آزاد، برای مقدار خاص $\alpha_i = ۰/۴$ ترسیم و مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل اخیر پیداست که در تمامی حالت‌ها، با افزایش شاخص توانی اختلاط، از سمت خواص سرامیکی ($p = ۰$) به سمت خواص فلزی ($p \to \infty$)، مقدار بار بحرانی متناظر با حالت کمانش تا تثبیت شدن در یک مقدار خاصی کاهش یافته است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل برای مدل‌های دولایه‌یی (مدل C۲) و سه‌لایه‌یی (مدل C۳) پیداست که برای هر سه حالت مختلف از شرایط تکیه‌گاهی، آستانه‌ی تحمل کمانشی مقطع سه‌لایه‌یی، در مقایسه با مقطع دولایه‌یی کمتر بوده است. از طرف دیگر، همچنان‌که انتظار می‌رود با افزایش درجه‌ی قیود تکیه‌گاهی حاکم بر دو سر تیر از حالت یک‌سر گیردار ـ یک‌سر آزاد به سمت یک‌سر گیردار ـ یک‌سر ساده، سختی تیر افزایش و ظرفیت باربری کمانشی مقطع نیز بهبود یافته است. به‌عبارت دیگر، برای هر مقدار خاصی از شاخص توانی اختلاط و به علت افزایش درجه‌ی قیود تکیه‌گاهی، ظرفیت کمانشی تیر یک‌سر ساده ـ یک‌سر گیردار بیشتر از دو حالت دیگر است. ضمناً مطابق شکل اخیر پیداست که ظرفیت باربری کمانشی تیر دو سر ساده در مقایسه با تیر یک‌سر گیردار ـ یک‌سر آزاد بیشتر است.



شکل ۱۵. تغییرات $P_{cr} - \rho$ به ازاء نسبت مدول مواد متشکله در مدل‌های تک، دو و سه‌لایه.

۸.۴. اثر نسبت مدول مواد در ظرفیت باربری کمانشی

در بخش کنونی، اثر نسبت مدول کشسانی مواد متشکله ($r = E_c/E_m$) در ظرفیت باربری بحرانی کمانش تیر دو سر ساده‌ی جدارنازک بسته‌ی قوطی‌شکل، با مدل‌های نوع C۱، C۲ و C۳ بررسی شده است. در این راستا فرض شده است که نسبت ضخامت لایه‌های سرامیکی در مدل‌های C۲ و C۳ برابر $\alpha_i = ۰/۳$ است. برای این منظور در شکل ۱۵ (الف الی ج)، تغییرات ظرفیت کمانشی بحرانی تیر در برابر شاخص توانی اختلاط، برای مدل‌های نوع C۱، C۲ و C۳ متناظر با شش

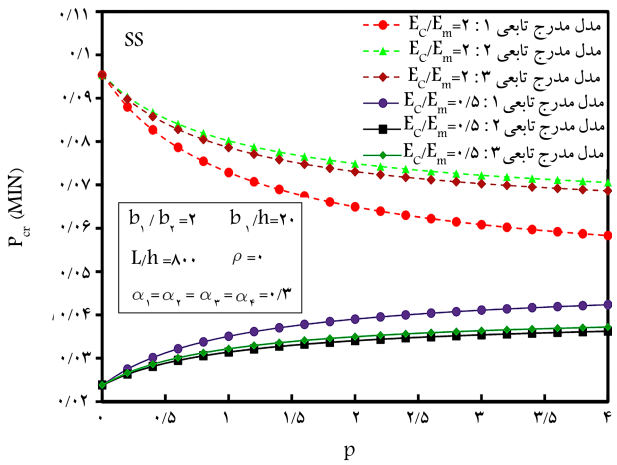
مقدار مختلف از نسبت مدول مواد متشکله در تیر دو سر ساده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، برای نسبت مدول‌های مواد متشکله $E_c/E_m < ۱$، با افزایش شاخص توانی اختلاط، ظرفیت کمانشی به‌علت افزایش سختی ناشی از افزایش کسر حجمی جزء سرامیکی تا تثبیت‌شدن در مقدار خاصی افزایش یافته است. از طرف دیگر، مطابق نمودارها به‌خوبی مشاهده می‌شود که برای نسبت مدول‌های مواد متشکله $(E_c/E_m > ۱)$ با افزایش شاخص توانی اختلاط، ظرفیت کمانشی به‌علت کاهش سختی ناشی از کوچک‌تر شدن کسر حجمی جزء سرامیکی تا تثبیت شدن در مقدار خاصی کاهش یافته است.

شایان ذکر است که در نمودارهای اخیر، منحنی $E_c/E_m = ۱$ متناظر با همگن شدن کل مقطع است؛ به‌نحوی که تحت شرایط خاص ذکر شده، مقدار ظرفیت باربری کمانشی مستقل از مقدار شاخص توانی اختلاط بوده و ثابت مانده است. از طرف دیگر، با توجه به این نمودارها به خوبی مشاهده می‌شود که به ازاء جمیع مقادیر از شاخص توانی اختلاط در محدوده‌ی داده شده‌ی $p \in [۰, \infty]$ با افزایش نسبت مدول مواد متشکله در محدوده‌ی $۰/۲۵ < E_c/E_m < ۳$ ظرفیت باربری کمانشی مقطع افزایش یافته است.

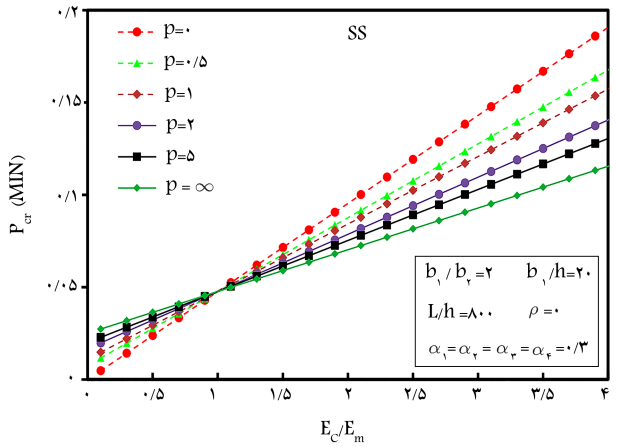
از طرف دیگر در شکل ۱۶، منحنی‌های مشخصه‌ی ظرفیت کمانشی در برابر شاخص توانی اختلاط، برای سه مدل اخیر (C۱، C۲ و C۳) دو مقدار مختلف از نسبت مدول مواد $(E_c/E_m = ۰/۵, ۲)$ با شرایط مرزی SS مشاهده می‌شوند. با مقایسه‌ی منحنی‌های متناظر با مقدار $E_c/E_m = ۰/۵$، ظرفیت باربری تیری با مقطع عرضی C۲، کمتر از ظرفیت باربری مدل C۱ و مدل ساندویچی C۳ است. این امر به دلیل پایین بودن کسر حجمی جزء سرامیکی مدل C۲، در مقایسه با دو مدل دیگر است. همچنین برای $E_c/E_m = ۰/۵$، چون مدل تک‌لایه‌ی C۱ همانند دو مدل دیگر، در برگیرنده‌ی لایه‌ی همگن سرامیکی (در اینجا جنس ضعیف‌تر) نیست، لذا ظرفیت باربری مدل در مقایسه با دو مدل دیگر (به علت بالاتر بودن سختی ناشی از جنس قوی‌تر E_c/E_m) بیشتر است.

علاوه بر این، برای $E_c/E_m = ۲$، چون مدل تک‌لایه‌ی C۱ در مقایسه با دو مدل دیگر، لایه‌ی همگن سرامیکی (در اینجا جنس قوی‌تر) ندارد، لذا ظرفیت باربری مدل در مقایسه با دو مدل دیگر (به علت پایین بودن سختی) کوچک‌تر است. در حالت کلی، با توجه به شکل اخیر مشخص است که ظرفیت باربری کمانشی مدل سه‌لایه‌یی برای دو مقدار داده شده از نسبت مدول مواد، مابین نتایج حاصل برای مدل‌های تک‌لایه و دولایه قرار گرفته است که به مقدار کسر حجمی اختلاط جزء سرامیکی در مدل‌ها بستگی دارد.

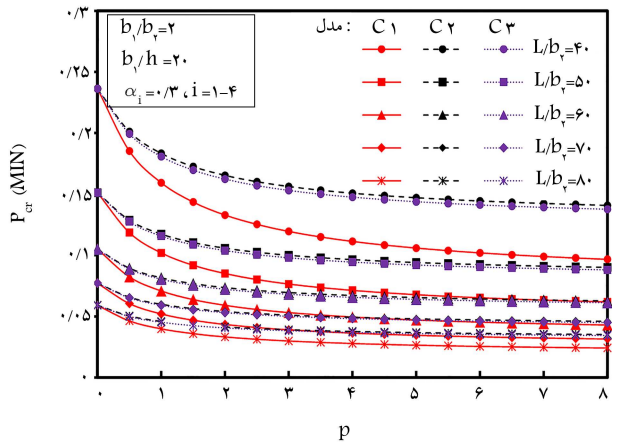
در شکل ۱۷، منحنی‌های تغییرات ظرفیت کمانشی تیر در برابر نسبت مدول کشسانی مواد متشکله E_c/E_m، برای شش مقدار شاخص توانی اختلاط مواد مشاهده می‌شوند. نمودارهای اخیر برای تیرهای دو سر ساده، با مدل نوع C۳ و با فرض نسبت ضخامت لایه‌های سرامیکی معادل $\alpha_i = ۰/۳$ ترسیم شده‌اند. مطابق شکل مذکور، به وضوح ملاحظه می‌شود که در محدوده‌ی $E_c/E_m < ۱$ با افزایش شاخص توانی اختلاط، ظرفیت کمانشی به‌علت افزایش سختی تا تثبیت شدن در مقدار خاصی افزایش یافته است. همچنین پیداست که در محدوده‌ی $E_c/E_m > ۱$، با افزایش شاخص توانی اختلاط از $p = ۱$ به $p \to \infty$، ظرفیت کمانشی به علت کاهش سختی تا تثبیت شدن در مقدار خاصی کاهش می‌یابد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که در حالت $E_c/E_c = ۱$ ساختار مقطع، همگن شده و در این حالت همچنانچه انتظار می‌رود ظرفیت کمانشی در محدوده‌ی $۰/۲۵ \leq E_c/E_m \leq ۳$ دارای مقدار ثابتی خواهد بود.



شکل ۱۶. ظرفیت باربری در مدل‌های (C۱، C۲ و C۳) متناظر با دو مقدار مختلف از نسبت مدول مواد (E_c/E_m).



شکل ۱۷. تغییرات ظرفیت باربری در مدل C۳ متناظر با نسبت مدول مواد (E_c/E_m) به ازاء شاخص‌های توانی.



شکل ۱۸. تغییرات بارکمانشی در برابر شاخص توانی برای مقادیر مختلف نسبت منظر تیر تحت شرایط مرزی CS.

۹.۴. اثر نسبت منظر تیر در ظرفیت کمانشی

در شکل ۱۸، منحنی‌های مشخصه‌ی ظرفیت کمانشی در برابر شاخص توانی اختلاط برای سه مدل مختلف از مقطع (C۱، C۲ و C۳)، به ازاء پنج مقدار از نسبت منظر

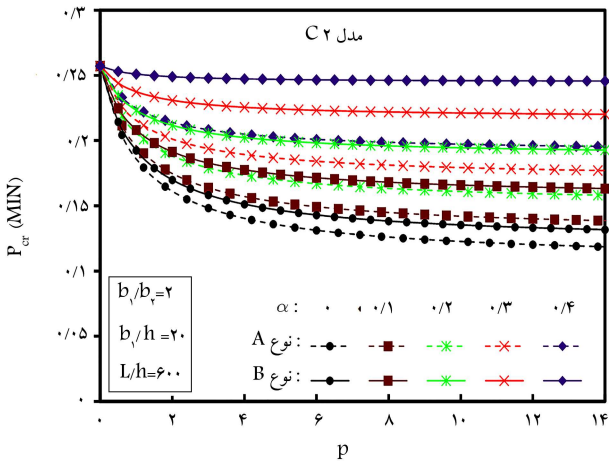
تیر L/b_2، برای شرایط مرزی تکیه‌گاهی CS ملاحظه می‌شوند؛ که مطابق آن، در هر سه مدل از پروفیل عرضی و به ازاء تمامی مقادیر نسبت منظر تیر، با تغییر خواص سرامیکی به سمت خواص فلزی به‌واسطه‌ی افزایش شاخص توانی اختلاط، ظرفیت کمانشی کاهش یافته است. از طرف دیگر، در نمودارهای موردنظر، مقایسه‌ی نتایج حاصل برای سه مدل ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که در هر مقدار خاصی از نسبت منظر L/b_2، ظرفیت کمانشی تیر با مدل مقطع C۲، بیشتر از ظرفیت کمانشی مدل‌های C۱ و C۳ است. زیرا کسر حجمی سرامیکی مدل C۲، در مقایسه با دو مدل دیگر بیشتر است. ضمناً چون در مدل C۱ مشابه دو مدل دیگر، لایه‌ی سرامیکی خالص وجود ندارد؛ در نتیجه، ظرفیت کمانشی مدل C۱ (به علت پایین‌تر بودن سختی کل) کمتر از دو مدل دیگر است. همچنین مطابق نمودار مذکور مشاهده می‌شود که در هر سه مدل اشاره شده، نتیجه‌ی افزایش نسبت منظر تیر (طویل شدن تیر)، کاهش ظرفیت باربری کمانشی است. مشابه همین رفتار در تیر با مشخصات حاضر، در تیر با شرایط مرزی SS و CF نیز مشاهده شده است.

۱۰.۴. اثر نسبت ضخامت سرامیکی جان و بال مقطع در ظرفیت کمانشی

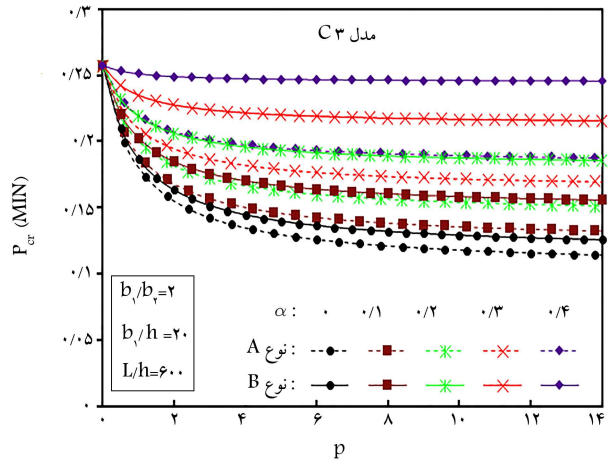
برای بررسی اثر تفاوت ضخامت لایه‌ی سرامیکی جان و بال مقطع در ظرفیت کمانشی، دو نوع شکل مقطع عرضی مدل C۲ (مطابق شکل ۲) ملاحظه می‌شود. در نوع A، ضخامت جان‌های مقطع دو برابر ضخامت بال‌ها ($\alpha_1 = 2\alpha_2$) و در نوع B، ضخامت بال‌های مقطع دو برابر ضخامت جان‌های ($\alpha_2 = 2\alpha_1$) منظور شده است. در این راستا، در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، تغییرات ظرفیت کمانشی در برابر شاخص توانی اختلاط، متناظر با مقطع دولایه‌یی مدل C۲ و C۳ برای ترکیب‌های A و B برای پنج مقدار از نسبت ضخامت لایه‌ی سرامیکی (α) به‌تصویر کشیده شده است. مطابق شکل‌های مذکور، برای تمامی مقادیر، با افزایش شاخص توانی اختلاط، ظرفیت باربری کمانشی تا تثبیت شدن در مقدار خاصی کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل‌های اخیر، به‌خوبی مشاهده می‌شود که به ازاء تمامی مقادیر α، تأثیر ضخامت لایه‌ی سرامیکی جان در مقایسه‌ی ضخامت لایه‌ی سرامیکی بال حائز اهمیت بالاست؛ به‌نحوی که با مقایسه‌ی شکل‌های اخیر پیداست که ظرفیت کمانشی تیر دولایه با مقطع عرضی نوع A، بزرگ‌تر از ظرفیت کمانشی نوع B است. از طرفی، با توجه به شکل‌های ذکر شده می‌توان دریافت که افزایش نسبت ضخامت سرامیکی اثر پایدارکننده دارد، به‌طوری که با افزایش α، سختی تیر نیز به سبب افزایش سهم جزء سرامیکی افزایش یافته و به تبع آن کمانش تیر در مقادیر بزرگ‌تری از بار وارده اتفاق افتاده است. نوع رفتار تیر با پروفیل‌های C۲ و C۳ تطابق بسیار بالایی با هم دارد و تفاوت جزئی در مقادیر ملاحظه می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش عددی المان محدود مسئله‌ی کمانش اعضاء جدارنازک با نیمرخ قوطی‌شکل تحت شرایط مرزی تکیه‌گاهی متنوع ارائه شده است. در این راستا، با استفاده از اصل کار مجازی، انرژی پتانسیل کلی سیستم کشسان با احتساب اثرکار بار محوری خارجی وارده به مرکز برش مقطع عرضی تیر، معادلات دیفرانسیل جفت‌شده شده‌ی مرتبه‌ی چهارم حاکم بر مسئله‌ی ناپایداری کمانش استخراج و از روی معادلات مذکور نشان داده شد که مودهای خمشی به صورت مستقل رفتار می‌کنند؛ حال آنکه همبستگی شدیدی بین مود کمانش محوری و



شکل ۱۹. تغییرات بارکمانشی در برابر شاخص توانی به ازاء مقادیر α در شرایط مرزی SS در مقطع دولایه‌یی (C۲).



شکل ۲۰. تغییرات بارکمانشی در برابر شاخص توانی به ازاء مقادیر α در شرایط مرزی SS در مقطع سه‌لایه‌یی (C۳).

پیچشی ایجاد می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش اجزاء محدود، ماتریس‌های سختی کل تیر استخراج و نهایتاً با حل مسئله‌ی مقدار ویژه‌ی حاکم نشان داده شد که:

الف) با افزایش شاخص اختلاط از سمت خواص خالص سرامیکی به سمت خواص فلزی، ظرفیت باربری کمانشی تا تثبیت شدن در یک مقدار خاصی همواره به‌صورت پیوسته کاهش یافته است.

ب) به ازاء جمیع مقادیر شاخص اختلاط، با افزایش شاخص تخلخل، ظرفیت کمانشی به علت کاهش سختی ناشی از کاهش سطح در ابعاد میکروسکوپیک کاهش یافته است.

ج) با افزایش درجه‌ی قیود تکیه‌گاهی، ظرفیت کمانشی تیر افزایش یافته است.

د) تحت تمامی شرایط مرزی ارائه‌شده، افزایش نسبت منظر تیر، سبب کاهش ظرفیت باربری کمانشی شده است.

ه) نشان داده شد که تغییرات ضخامت لایه‌ی سرامیکی جان در مقایسه با ضخامت لایه‌ی سرامیکی بال در ظرفیت کمانشی چشمگیرتر بوده است.

و) افزایش نسبت ضخامت سرامیکی اثر پایدارکننده دارد، زیرا افزایش آن سبب افزایش سختی تیر و نیز وقوع کمانش تیر در مقادیر بزرگ‌تری از بار وارده می‌شود.

پانوشت‌ها

1. functionally graded material (FGM)
2. national aerospace laboratory of Japan
3. laser engineered net shaping (LENS)
4. Li
5. Kadoli
6. Lu
7. Zhao
8. simsek
9. generalized differential quadrature method (GDQM)
10. Bi-directional functionally graded (BFG)
11. Nemat-Alla
12. Satouri
13. Taczala
14. Voung and Duc
15. Truong
16. Nguyen
17. Phi
18. Vlasov
19. simply supported
20. clamped-free ended
21. clamped-simple supported
22. Kirchhoff
23. Phuong Vo & Lee
24. Saint-Venant

منابع (References)

1. Van Do, T., Nguyen, D.K., Duc, N.D. and et al. "Analysis of bi-directional functionally graded plates by FEM and a new third-order shear deformation plate theory", *Thin-Walled Struct*, **119**, pp. 687-699 (2017).
2. Mahamood, R.-M., Akinlabi, E.-T., Shukla, M. and et al. "Functionally graded material: an overview", International Association of Engineers (IAENG) (2012).
3. Tu, T.M., Quoc, T.H. and Van Long, N. "Vibration analysis of functionally graded plates using the eight-unknown higher order shear deformation theory in thermal envi-ronments", *Aerosp. Sci. Technol*, **84**, pp. 698-711 (2019).
4. Duc, N.D. and Quan, T.Q. "Nonlinear stability analysis of double-curved shallow fgm panels on elastic foundations in thermal environments", *Mech. Compos. Mater*, **48**(4), pp. 435-448 (2012).
5. Nguyen, T.-T., Thang, P.T. and Lee, J. "Flexural-torsional stability of thin-walled func-tionally graded open-section beams," *Thin-Walled Struct*, **110**, pp. 88-96 (2017).
6. Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H. "Processing techniques for functionally grad-ed materials", *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater*, **362**(1-2), pp. 81-106 (2003).
7. Wang, Y.Q. and Zu, J.W. "Vibration characteristics of moving sigmoid functionally graded plates containing porosities", *Int. J. Mech. Mater. Des*, **14**(4), pp. 473-489 (2018).
8. Liu, W. and DuPont, J.N. "Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by La-ser Engineered Net Shaping", *Scr. Mater*, **48**(9), pp. 1337-1342 (2003).
9. Watanabe, Y., Inaguma, Y., Sato, H. and et al. "A novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: The centrifugal mixed-powder method", *Materials (Basel)*, **2**(4), pp. 2510-2525 (2009).
10. Jin, G.Q. and Li, W.D. "Adaptive rapid prototyping/manufacturing for functionally graded material-based biomedical models", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, **65**(1-4), pp. 97-113 (2013).
11. Li, X.-F. "A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functional-ly graded Timoshenko and Euler-Bernoulli beams", *J. Sound Vib*, **318**(4-5) pp. 1210-1229 (2008).
12. Kadoli, R., Akhtar, K. and Ganesan, N. "Static analysis of functionally graded beams using higher order shear deformation theory", *Appl. Math. Model*, **32**(12), pp. 2509-2525 (2008).
13. Lu, C.F., Chen, W.Q., Xu, R.Q. and et al. "Semi-analytical elasticity solutions for bi-directional functionally graded beams", *Int. J. Solids Struct*, **45**(1), pp. 258-275 (2008).
14. Zhao, L., Zhu, J. and Wen, X.D. "Exact analysis of bi-directional functionally graded beams with arbitrary boundary conditions via the symplectic approach", *Struct. Eng. Mech*, **59**(1), pp. 101-122 (2016).
15. Wang, Z.-H., Wang, X.-H., Xu, G.-D. and et al. "Free vibration of two-directional functionally graded beams", *Compos. Struct*, **135**, pp. 191-198 (2016).
16. Simsek, M. "Buckling of Timoshenko beams composed of two-dimensional functional-ly graded material (2D-FGM) having different boundary conditions", *Compos. Struct*, **149**, pp. 304-314 (2016).
17. Li, L., Li, X. and Hu, Y "Nonlinear bending of a two-dimensionally functionally grad-ed beam", *Compos. Struct*, **184**, pp. 1049-1061 (2018).
18. 18. Nejad, M.Z. and Hadi, A. "Eringen's non-local elasticity theory for bending analysis of bi-directional functionally graded Euler-Bernoulli nano-beams", *Int. J. Eng. Sci*, **106**, pp. 1-9 (2016).
19. Karamanli, A. and Vo, T.P. "Size dependent bending analysis of two directional func-tionally graded microbeams via a quasi-3D theory and finite element method", *Compos. B. Eng*, **144**, pp. 171-183 (2018).
20. Nejad, M.Z. and Hadi, A. "Non-local analysis of free vibration of bi-directional func-tionally graded Euler-Bernoulli nano-beams", *Int. J. Eng. Sci*, **105**, pp. 1-11 (2016).
21. Shafiei, N., Mirjavadi, S.S., Mohasel Afshari, B. and et al. "Vibra-tion of two-dimensional imperfect functionally graded (2D-FG) porous nano-/micro-beams", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*, **322**, pp. 615-632 (2017).
22. Trinh, L.C., Vo, T.P., Thai, H.-T. and et al. "Size-dependent vibration of bi-directional functionally graded microbeams with arbitrary boundary conditions", *Compos. B Eng*, **134**, pp. 225-245 (2018).

23. Nejad, M.Z., Hadi, A. and Rastgoo, A. "Buckling analysis of arbitrary two-directional functionally graded Euler-Bernoulli nano-beams based on nonlocal elasticity theory", *Int. J. Eng. Sci*, **103**, pp. 1-10 (2016).

24. Li, L. and Xiaohui, R. "Stiffened plate bending analysis in terms of refined triangular laminated plate element", *Compos. Struct*, **92**(12), pp. 2936-2945 (2010).

25. Nemat-Alla, M., Ahmed, K.I.E. and Hassab-Allah, I. "Elastic–plastic analysis of two-dimensional functionally graded materials under thermal loading", *Int. J. Solids Struct*, **46**(14-15), pp. 2774-2786 (2009).

26. Ebrahimi, M.J. and Najafizadeh, M.M. "Free vibration analysis of two-dimensional functionally graded cylindrical shells", *Appl. Math. Model*, **38**(1), pp. 308-324 (2014).

27. Satouri, S., Kargarnovin, M.H., Allahkarami, F. and et al, "Application of third order shear deformation theory in buckling analysis of 2D-functionally graded cylindrical shell reinforced by axial stiffeners", *Compos. B Eng*, **79**, pp. 236-253 (2015).

28. Taczala, M., Buczkowski, R. and Kleiber, M. "Nonlinear buckling and post-buckling response of stiffened FGM plates in thermal environments", *Compos. B Eng*, **109**, pp. 238-247 (2017).

29. Vuong, P.M. and Duc, N.D. "Nonlinear response and buckling analysis of eccentrically stiffened FGM toroidal shell segments in thermal environment", *Aerosp. Sci. Technol*, **79**, pp. 383-398 (2018).

30. Mehrabian, M. and Golmakani, M.E. "Nonlinear bending analysis of radial-stiffened annular laminated sector plates with dynamic relaxation method", *Comput. Math. Appl*, **69**(10), pp. 1272-1302 (2015).

31. Golmakani, M.E. and Emami, M. "Buckling and large deflection behaviors of radially functionally graded ring-stiffened circular plates with various boundary conditions", *Appl. Math. Mech*, **37**(9), pp. 1131-1152 (2016).

32. Hussein, O.S. and Mulani, S.B. "Optimization of in-plane functionally graded panels for buckling strength: Unstiffened, stiffened panels, and panels with cutouts", *Thin-Walled Struct*, **122**, pp. 173-181 (2018).

33. Truong, T.T., Nguyen-Thoi, T. and Lee, J. "Isogeometric size optimization of bi-directional functionally graded beams under static loads", *Compos. Struct*, **227**, pp. 111259 (2019).

34. Nguyen, H.X., Lee, J. and et al. "Vibration and lateral buckling optimisa-tion of thin-walled laminated composite channel-section beams", *Compos. Struct*, **143**, pp. 84-92 (2016).

35. Nguyen, T.-T. and Lee, J. "Optimal design of thin-walled functionally graded beams for buckling problems", *Compos. Struct*, **179**, pp. 459-467 (2017).

36. Phi, L.T.M., Nguyen, T.-T., Kang, J. and et al. "Vibration and buckling optimization of thin-walled functionally graded open-section beams", *Thin-Walled Struct*, **170**, pp. 108586 (2022).

37. Nguyen, T.-T. and Lee, J. "Flexural-torsional vibration and buckling of thin-walled bi-directional functionally graded beams", *Compos. B Eng*, **154**, pp. 351-362 (2018).

38. Lei, J., He, Y., Li, Z. and et al. "Postbuckling analysis of bi-directional functionally graded imperfect beams based on a novel third-order shear deformation theory", *Compos. Struct*, **209**, pp. 811-829 (2019).

39. Reddy, J.N. "Analysis of functionally graded plates", *Int. J. Numer Meth Engng*, **47**, pp. 663-684 (2000).

40. Nguyen, T.-T., Kim, N.-I. and Lee, J. "Free vibration of thin-walled functionally grad-ed open-section beams", *Compos. B. Eng*, **95**, pp. 105-116 (2016).

41. Nguyen, T.-T. Thang, P.T. and Lee, J. "Lateral buckling analysis of thin-walled func-tionally graded open-section beams", *Composite Structures*, **160**, pp. 952-963 (Jan., 2017).

42. Vo, T.P. and Lee, J. "Flexural-torsional behavior of thin-walled closed-section com-posite box beams", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1774-1782 (Aug., 2007).

43. Nguyen, T.-T., Kim, N.-I. and Lee, J. "Analysis of thin-walled open-section beams with functionally graded materials", *Composite Structures*, **138**, pp. 75-83 (Mar., 2016).

44. Lanc, D., Vo, T.-P., Turkalj, G. and Lee, J. "Buckling analysis of thin-walled func-tionally graded sandwich box beams", Thin-Walled Structures, 86, pp. 148-156 (2015).

45. Kim, D.-M., Choi, S., Jang, G.-W. and et al. "Buckling analysis of thin-walled box beams under arbitrary loads with general boundary conditions using higher-order beam theory", *J. Mech. Sci. Technol*, **33**(5), pp. 2289-2305 (2019).

46. Vo, T.-P. and Lee, J. "Interaction curves for vibration and buckling of thin-walled composite box beams under axial loads and end moments", *Appl. Math. Model*, **34**(10), pp. 3142-3157 (2010).

47. Asadi, A., Sheikh, A.H. and Thomsen, O.T. "Buckling behaviour of thin-walled lami-nated composite beams having open and closed sections subjected to axial and end mo-ment loading", *Thin-Walled Struct*, **141**, pp. 85-96 (2019).

48. 48. Kim, N.-I. and Lee, J. "Theory of thin-walled functionally graded sandwich beams with single and double-cell sections", *Compos. Struct*, **157**, pp. 141-154 (2016).

49. Vo, T.-P. and Lee, J. "Geometrically nonlinear theory of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory", *Int. J. Mech. Sci*, **52**(1), pp. 65-74 (2010).

50. Kim, N.-I. and Lee, J. "Divergence and flutter behavior of Beck×s type of laminated box beams", *Int. J. Mech. Sci*, **84**, pp. 91-101 (2014).

51. Kuehn, T., Pasternak, H. and Mittelstedt, C. "Local buckling of shear-deformable lam-inated composite beams with arbitrary cross-sections using discrete plate analysis", *Compos. Struct*, **113**, pp. 236-248 (2014).

52. Sheikh, A.H.; Asadi, A. and Thomsen, O.T. "Vibration of thin-walled laminated com-posite beams having open and closed sections", *Compos. Struct*, **134**, pp. 209-215 (2015).

53. Shin, D., Choi, S., Jang, G.-W. and et al. "Higher-order beam theory for static and vibration analysis of composite thin-walled box beam", *Compos. Struct*, **206**, pp. 140-154 (2018).

54. Kim, N.-I. and Lee, J. "Exact solutions for coupled analysis of thin-walled functionally graded beams with non-symmetric single- and double-cells", *Appl. Math. Model*, **60**, pp. 661-680 (2018).

55. Choi, S. and Kim, Y.-Y. "Higher-order beam bending theory for static, free vibration, and buckling analysis of thin-walled rectangular hollow section beams", *Comput. Struct*, **248**, pp.1-32 106494 (2021).

56. Choi, S. and Kim, Y.-Y. "Higher-order Vlasov torsion theory for thin-walled box beams", *Int. J. Mech. Sci*, **195**, pp.1-35 106231 (2021).

57. Gokhan Gunay, M. and Timarci, T. "Static analysis of thin-walled laminated composite closed-section beams with variable stiffness", *Compos. Struct*, **182**, pp. 67-78 (2017).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۵۳-۶۲، (پژوهشی)

Original Article

شناسایی و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از مشخصات مودال و شاخص تشخیصی مبتنی بر شکل‌های مود

محتشم خان احمدی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج

مجید پورامینیان * (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامسر

حمید محمدی گرفمی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

بهزاد دژکام (کارشناس ارشد و عضو هیئت علمی)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

پایش سلامت سازه‌ها از ضروریات اولیه‌ی نگهداری سازه و تأمین ایمنی ساکنان آن است. با شناسایی به موقع المان‌های آسیب‌دیده می‌توان تا حد ممکن از وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد. ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌های ساختمانی و پل‌ها هستند، که آسیب در آنها می‌تواند بیش از سایر المان‌ها، سلامت کلی سازه را با مشکل مواجه سازد. در نوشتار حاضر، با هدف تعیین موقعیت آسیب ستون تحت اثر بار محوری بر اساس شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای مود پیشنهاد و کارایی آن در تعیین موقعیت آسیب ستون بررسی شده است. نتایج نشان دادند که شاخص پیشنهادی به موقعیت آسیب حساس است و با ایجاد بیشینه‌های نسبی در منطقه‌ی آسیب، موقعیت آسیب با خطای کمتر از ۱٪ قابل شناسایی است. همچنین، علی‌رغم این‌که مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد اثرگذار است، تأثیری بر مقادیر شاخص تشخیصی آسیب ندارد.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه، ایمنی سازه، شناسایی آسیب ستون، بار محوری، شاخص تشخیصی انحنای مود.

mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir
majid.pouraminian@iau.ac.ir
h.garfamy@semnan.ac.ir
b.dezhkam@velayat.ac.ir

۱. مقدمه

سازه‌های مهندسی شرایط بارگذاری و محیطی متعددی را تجربه می‌کنند. با فرسوده شدن المان‌ها در برخی موقعیت‌ها و تشدید میزان خسارت آنها تحت اثر عواملی، همچون: زلزله، بهره‌برداری بیش از ظرفیت طراحی اعضا، انفجار و تغییرات دمایی، سلامت کلی سازه با مشکل مواجه می‌شود. لذا پایش و ارزیابی سلامتی سازه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده و مطالعات ارزشمندی در ارتباط با سلامتی سازه‌ها و اعضاء آن‌ها صورت گرفته است.

در یک تقسیم‌بندی کلی، پایش سلامتی در سازه‌ها شامل ۴ مرحله است، که عبارت‌اند از: ۱- آیا در سازه آسیب وجود دارد یا خیر؟؛ ۲- اگر سازه آسیب دیده است، موقعیت آسیب کجاست؟؛ ۳- مقدار خسارت در موقعیت آسیب چگونه محاسبه شود؟ و ۴- برآورد عمر باقی‌مانده‌ی سازه‌ی محتمل آسیب.

در حوزه‌ی تشخیص و پایش سلامتی سازه، آسیب عبارت از هرگونه تغییر در خواص ماده یا هندسه‌ی سازه است، که می‌تواند عملکرد کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهد و تغییراتی در پاسخ‌های سازه به وجود آورد. با فرض این‌که آسیب در سازه باعث اختلال در پاسخ‌های سازه در موقعیت‌های آسیب می‌شود، تاکنون نوشتارهای علمی ارزشمندی منتشر شده است.

پاندی[1] و همکاران (۱۹۹۱)،[1] از انحنای شکل مود برای تعیین موقعیت آسیب یک تیرکنسولی و یک تیر دو سر مفصل استفاده کردند و نشان دادند که انحنای شکل مود نسبت به آسیب‌های وارده حساس است. یام[2] و همکاران (۲۰۰۲)،[2] یک شاخص آسیب مبتنی بر انحنای شکل مود ارائه کردند و کارایی آن را در شناسایی آسیب صفحه‌ی آلومینیومی ترک‌خورده نشان دادند. ساهو و مایتی[3] (۲۰۰۷)،[3] برای ارزیابی سلامت سازه از الگوریتم ژنتیک عصبی، بر اساس این حقیقت که آسیب تأثیر قابل توجهی در رفتار استاتیکی سازه دارد، استفاده کردند. شی[4] و همکاران (۲۰۰۹)،[4] برای شناسایی آسیب، شاخص انرژی کرنشی مودال را بررسی کردند و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۲۳، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲۷.
DOI:10.24200/J30.2022.60873.3129

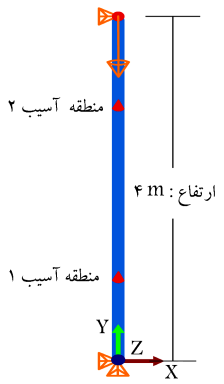
نشان دادند که با استفاده از شاخص مذکور می‌توان آسیب در شاه‌تیرها و عرشه‌ی پل‌ها را شناسایی کرد. روری و کارکاترا[5] (۲۰۱۲)،[5] از روش تجزیه‌ی تجربی مود (EMD) [6] برای شناسایی آسیب سازه‌ی پل تحت بارهای عبوری استفاده کردند و موفق شدند با استخراج پالس‌ها در بسامد مود اول، آسیب را شناسایی کنند. در پژوهش دیگری، باوو[7] و همکاران (۲۰۱۳)،[6] یک روش تشخیصی چندمرحله‌یی بر اساس EMD پیشنهاد دادند. ایشان با محاسبه‌ی بسامد لحظه‌یی سیگنال‌های ارتعاشی موفق به شناسایی آسیب شدند. ژو[8] و همکاران (۲۰۱۳)،[7] روشی بر مبنای انحنای نرمی پیشنهاد دادند که در آن تأثیر تفاوت طول المان‌های مجاور در نظرگرفته شده بود. آنها نشان دادند که روش مذکور قابلیت شناسایی آسیب سازه را دارد. قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۶)،[8] با پردازش شتاب پاسخ ارتعاش آزاد سازه با استفاده از تبدیل هیلبرت - هوآنگ، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود سازه را تخمین زدند و با مقایسه‌ی انحنای شکل‌های مود محاسباتی به شناسایی آسیب سازه پرداختند. سان و رن[9] (۲۰۱۶)،[9] با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل آسیب لرزه‌یی[10] در سد بتنی وزنی پرداختند و یک شاخص آسیب کلی[11] پیشنهاد دادند و با استفاده از آن توانستند درجه‌ی خسارت کلی[12] سد را تحت فعالیت‌های لرزه‌یی ایجاد شده تشخیص دهند. نوبهاری و همکاران (۲۰۱۷)،[10] یک الگوریتم جستجوی موقعیت با استفاده از اکوی صدا برای شناسایی آسیب سازه ارائه دادند و از یک تابع هدف که در برگیرنده‌ی تغییرات بسامدهای طبیعی بود، استفاده کردند. یانگ[13] و همکاران (۲۰۱۷)،[11] با استفاده از یک روش ساده‌ی مبتنی بر طیف فوریه، انحنای شکل مودها را محاسبه کردند و بر اساس انحنای شکل مود به شناسایی آسیب در تیرها پرداختند. یانگ و ایادیجی[14] (۲۰۱۷)،[12] به شناسایی خرابی صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال[15] پرداختند و نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح بسامد مودال می‌شود و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل خرابی را مشخص کرد. درویشان (۲۰۱۹)،[13] برای تشخیص آسیب سازه‌ی پل کابلی با استفاده از تحلیل دامنه‌ی بسامد و خوشه‌بندی داده‌ها، یک شاخص خسارت با محاسبه‌ی فاصله‌ی اقلیدسی مراکز خوشه‌ها ارائه داد و دریافت که شاخص پیشنهادی می‌تواند با دقت مناسبی حالت‌های سالم و آسیب را از یکدیگر تفکیک کند. لیو[16] و همکاران (۲۰۲۰)،[14] یک روش پایش آسیب آنلاین[17] با استفاده از فیلتر موج فضایی[18] بر اساس همخوانی بسامد[19] برای سازه‌ها ارائه دادند و توانستند وضعیت سلامتی سازه را ارزیابی کنند. یونسی و همکاران (۲۰۱۹ و ۲۰۲۱)،[15و16] بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب ستون‌های فولادی پُرشده با بتن (CFST) [20] پرداختند و موفق شدند محل جداشدگی بتن از جداره‌ی فولادی را شناسایی کنند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،[17] با به کارگیری تبدیل موجک و تعریف یک سیگنال ورودی بر مبنای شکل مود به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداختند و مقادیر اوج در سیگنال‌های خروجی، محل‌های آسیب را نشان داد. ایشان در پژوهش دیگری (۲۰۲۱)،[18] نیز به شناسایی آسیب در صفحات فولادی پرداختند و نشان دادند که اغتشاش‌های ضرایب موجک تولید شده‌ی حالت‌های آسیب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی حالت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب چشمگیر است. همچنین، آنها با استفاده از روشی مبتنی بر موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته‌ی پانلی و کامپوزیت چندلایه شدند[19 و 20] و نیز با استفاده از پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی به شناسایی آسیب در تیرها پرداختند و نشان دادند که از تحلیل هر دو نوع پیوسته و گسسته‌ی تبدیلات موجک، می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد.[21-23] ایشان در ادامه‌ی مطالعات خود نیز با معرفی یک شاخص آسیب بر مبنای ضرایب موجک موفق به شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب در تیرها شدند.[24] حنطه[21] و همکاران (۲۰۲۱)،[25 و 26] بر مبنای استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود به شناسایی آسیب در یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی پرداختند. محل آسیب با ایجاد جهش نسبی بیشینه‌یی و کمینه‌یی در ضرایب موجک شناسایی شد. مام عزیزی و همکاران (۲۰۲۲)،[27] به مطالعه‌ی اثر جداشدگی بتن از فولاد در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و نشان دادند که با ایجاد جداشدگی، مقدار بسامد در تمامی مودها کاهش می‌یابد. آنها شاخصی بر مبنای ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی شکل‌های مود پیشنهاد دادند و حساسیت آن را به موقعیت‌های جداشدگی و شدت‌های مختلف آسیب نشان دادند. بخشی و موسوی (۲۰۲۲)،[28 و 29] بر پایه‌ی یادگیری عمیق به شناسایی ترک در سازه‌های با مصالح بنایی و اعضاء بتنی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های پردازش تصویر، دقت بالایی دارد. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۳)،[30] با تعریف یک سیگنال ورودی و به کارگیری تبدیل موجک پیوسته به شناسایی منطقه‌ی جداشدگی در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و دریافتند که در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری از ضرایب موجک به محدوده‌ی آسیب وجود دارد؛ با این حال در مقیاس‌های بالاتر، منطقه‌ی آسیب با وضوح مناسب‌تری قابل شناسایی است.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که به شناسایی آسیب در عضو ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از ویژگی‌های انحنایی شکل‌های مود ارتعاشی پرداخته نشده است. از طرفی، عضو ستون تحت اثر بار محوری قرار دارد و بار محوری در داده‌های دینامیکی مودال اثرگذار است؛ بنابراین، نویسندگان نوشتار حاضر، بر مبنای استفاده از شیب و انحنای شکل‌های مود ارتعاشی به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداخته‌اند.

۲. مدل‌سازی ستون تحت اثر بار محوری

ستونی با مقطع مربعی توپُر به طول ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴ متر، مشخصات مکانیکی مدول کشسانی 2×10^5 مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۳ با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی، تحت اثر بار محوری با در نظر گرفتن وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۱، D۲ و D۳ در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس[22] با استفاده از المان Wire-Beam مدل‌سازی شده است (شکل ۱).

برای اعتماد به مدل‌سازی نرم‌افزاری، مقدار بار بحرانی مودهای کمانشی ستون با ابعاد مش مختلف در نرم‌افزار اجزاء محدود محاسبه و با مقدار تئوری نظیرشان



شکل ۱. ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و موقعیت‌های آسیب.

جدول ۱. بار محوری بحرانی تئوری و مدل اجزاء محدود ستون سالم (نیوتن).

شماره‌ی مود	بار بحرانی کمانشی محوری (نیوتن)		درصد اختلاف
	تئوری	FEM	
۱	$۱/۰۳ \times ۱۰^{۶}$	$۱/۰۳ \times ۱۰^{۶}$	صفر
۲	$۴/۱۱ \times ۱۰^{۶}$	$۴/۰۹ \times ۱۰^{۶}$	۰/۴۸۷
۳	$۹/۲۵ \times ۱۰^{۶}$	$۹/۱۶ \times ۱۰^{۶}$	۰/۹۷۳
۴	$۱/۶۵ \times ۱۰^{۷}$	$۱/۶۱ \times ۱۰^{۷}$	۲/۴۲۴

جدول ۲. مشخصات آسیب در ستون تحت اثر بار محوری.

نام آسیب	تعداد آسیب	ناحیه‌ی آسیب (متر)	مرکز آسیب (متر)	شدت آسیب (٪)
D۱	۱	۰/۱-۹۶/۰۴	۱	۳۰
D۲	۱	۲/۳-۹۶/۰۴	۳	۲۰
D۳	۲	۰/۱-۹۶/۰۴	۱	۳۰
		۲/۳-۹۶/۰۴	۳	۲۰

جدول ۳. اثر شدت آسیب بر مقدار بار بحرانی (نیوتن).

شدت آسیب (٪)	بارکمانشی بحرانی ($\times ۱۰^{۶}$)		
صفر	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۱۸
۱۰	۱/۰۲۴۶	۱/۰۲۴۶	۱/۰۱۹۵
۲۰	۱/۰۲۱۸	۱/۰۲۱۸	۱/۰۱۶۷
۳۰	۱/۰۱۸۱	۱/۰۱۸۱	۱/۰۱۳۱
۴۰	۱/۰۱۳۲	۱/۰۱۳۲	۱/۰۰۸۳
۵۰	۱/۰۰۶۴	۱/۰۰۶۴	۱/۰۰۱۵
۶۰	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۱۵
۷۰	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۴۷
۸۰	۰/۹۴۵۵	۰/۹۴۵۵	۰/۹۴۱۵
۹۰	۰/۸۴۹۱	۰/۸۴۹۱	۰/۸۴۶۲

برای وضعیت سالم ستون مقایسه شده است. نتایج نشان داد که ابعاد مش به طول ۸ سانتی‌متر برای ادامه‌ی پژوهش مناسب است (جدول ۱).

مقدار تئوری بارکمانشی بحرانی مود اول مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

$$P_{cr} = \frac{\pi^{۲} \times ۲۰۰۰۰۰ \times ۱۰^{-۴}}{۴^{۲} \times ۱۲} \approx ۱/۰۳ \times ۱۰^{۶} N \qquad (۱)$$

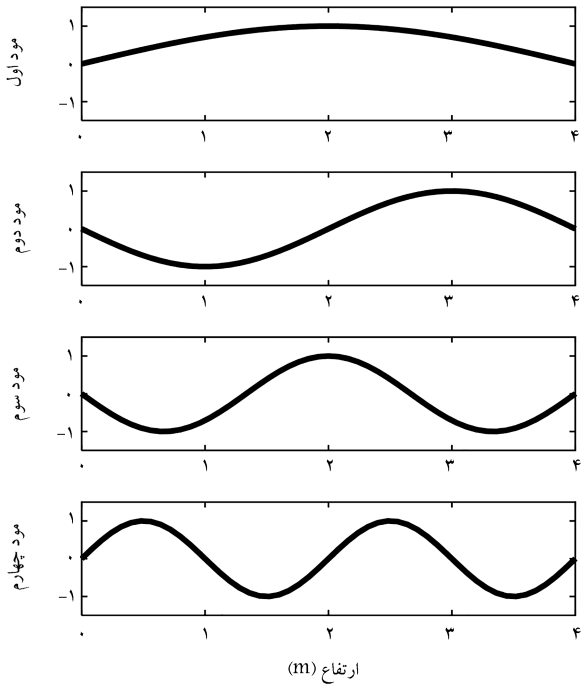
در جدول ۲، مشخصات آسیب ارائه شده است. مدول کشسانی ناحیه‌ی آسیب مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است:

$$E_d = ٪\,(۱۰۰ - d)\, E_u \qquad (۲)$$

که در آن، E_u و E_d به ترتیب مدول کشسانی نواحی سالم و آسیب و d شدت آسیب است.

۳. بررسی اثر شدت آسیب بر بار محوری بحرانی

در جدول ۳، مقادیر بار بحرانی ستون با وضعیت‌های آسیب D۱ تا D۳ ارائه شده است؛ که مطابق آن، با افزایش شدت آسیب، مقدار بار بحرانی کاهش یافته و این دلیلی بر اهمیت و ضرورت پایش سلامتی ستون تحت اثر بار محوری بوده است. در



شکل ۲. شکل‌های مود وضعیت سالم ستون تحت اثر بار محوری.

اثر آسیب، ظرفیت باربری محوری ستون کاهش می‌یابد و ممکن است ستون تحت اثر بار محوری کمتر از ظرفیت تعریف شده، دچارکمانش و در نتیجه ناپایداری شود.

شدت آسیب منطقه‌ی آسیب ۲ برای وضعیت D۳ برابر ۲۰٪ مد نظر است. بار بحرانی وضعیت آسیب D۳ با شدت‌های آسیب ۳۰ و ۲۰ درصد در مناطق آسیب ۱ و ۲ به عنوان بار بحرانی بدترین وضعیت آسیب انتخاب شده است. در نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، در صورتی که شدت آسیب مناطق آسیب ۱ و ۲ به ترتیب از ۳۰ و ۲۰ درصد بیشتر نشود، ستون پایداری خود را حفظ می‌کند.

۴. اثر بار محوری بر مقادیر بسامد

در شکل ۲، شکل‌های مود ارتعاشی ستون تحت اثر بار محوری مشاهده می‌شود.

تحلیل بسامدی ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار محوری بحرانی (بار بحرانی وضعیت آسیب D۳) برای وضعیت‌های بدون آسیب و با آسیب انجام شده و مقادیر بسامدی نظیر شکل‌های مود سالم و آسیب D۱ (به عنوان نمونه) در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مقدار بسامد مودها در هر دو وضعیت سالم و آسیب با افزایش بار محوری کاهش یافته است. همچنین، در تمامی نسبت‌های باری، بسامد وضعیت آسیب از بسامد وضعیت سالم کمتر بوده است.

۵. شناسایی آسیب

فرض اساسی در تشخیص و تعیین موقعیت آسیب این است که در اثر آسیب، پاسخ‌های سازه در موقعیت‌های خسارت، دچار اختلال و بی‌نظمی می‌شود. در بیشتر اوقات، بی‌نظمی‌های رخ داده در پاسخ‌ها با بررسی‌های چشمی قابل شناسایی و تشخیص نیست؛ بنابراین، لازم است روش‌های پردازشی ارائه شود، که اغلب آنها به پیشنهاد شاخص شناسایی می‌انجامد. در نوشتار حاضر، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی به این شرح پیشنهاد و کارایی آن در شناسایی و تعیین موقعیت‌های مختلف آسیب در ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی بررسی شده است.

جدول ۴. اثر نسبت‌های مختلف بار بر مقادیر بسامد ستون سالم (Hz).

P/P_{cr}	بسامد طبیعی (Hz)			
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
صفر	۱۴/۲۹۱	۵۶/۹۹۲	۱۲۷/۶۰	۲۲۵/۳۰
۰/۱	۱۳/۵۶۹	۵۶/۲۸۶	۱۲۶/۹۰	۲۲۴/۶۰
۰/۲	۱۲/۸۰۶	۵۵/۵۷۲	۱۲۶/۲۰	۲۲۳/۹۱
۰/۳	۱۱/۹۹۴	۵۴/۸۴۸	۱۲۵/۴۹	۲۲۳/۲۲
۰/۴	۱۱/۱۲۳	۵۴/۱۱۴	۱۲۴/۷۸	۲۲۲/۵۲
۰/۵	۱۰/۱۷۸	۵۳/۳۷۱	۱۲۴/۰۷	۲۲۱/۸۲
۰/۶	۹/۱۳۶۰	۵۲/۶۱۶	۱۲۳/۳۵	۲۲۱/۱۱
۰/۷	۷/۹۵۸۰	۵۱/۸۵۰	۱۲۲/۶۲	۲۲۰/۴۱
۰/۸	۶/۵۷۱۹	۵۱/۰۷۳	۱۲۱/۹۰	۲۱۹/۷۰
۰/۹	۴/۸۰۰۷	۵۰/۲۸۴	۱۲۱/۱۷	۲۱۸/۹۹

جدول ۵. اثر نسبت‌های مختلف بار بر مقادیر بسامد ستون با آسیب D۱ (Hz).

P/P_{cr}	بسامد طبیعی (Hz)			
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
صفر	۱۴/۲۳۰	۵۶/۵۱۶	۱۲۷/۰۷	۲۲۵/۲۴
۰/۱	۱۳/۵۰۴	۵۵/۸۰۴	۱۲۶/۳۷	۲۲۴/۵۵
۰/۲	۱۲/۷۳۸	۵۵/۰۸۴	۱۲۵/۶۶	۲۲۳/۸۶
۰/۳	۱۱/۹۲۱	۵۴/۳۵۳	۱۲۴/۹۵	۲۲۳/۱۶
۰/۴	۱۱/۰۴۵	۵۳/۶۱۲	۱۲۴/۲۴	۲۲۲/۴۶
۰/۵	۱۰/۰۹۲	۵۲/۸۶۱	۱۲۳/۵۲	۲۲۱/۷۶
۰/۶	۹/۰۴۰۰	۵۲/۰۹۹	۱۲۲/۸۰	۲۲۱/۰۶
۰/۷	۷/۸۴۷۵	۵۱/۳۲۶	۱۲۲/۰۷	۲۲۰/۳۶
۰/۸	۶/۴۳۷۶	۵۰/۵۴۰	۱۲۱/۳۴	۲۱۹/۶۵
۰/۹	۴/۶۱۴۹	۴۹/۷۴۳	۱۲۰/۶۱	۲۱۸/۹۴

شاخص تشخیصی مود i اُم در موقعیت j، ذیلاً با رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$DI_{i,j} = \left| \left(\kappa^u_{i,j} - \kappa^d_{i,j}\right)\left(\phi^d_{i,j} \times \phi^d_{i,j}\right) + \left(\theta^u_{i,j} - \theta^d_{i,j}\right)^2 \times \phi^u_{i,j} \right| \quad (۳)$$

که در آن، $\phi^u_{i,j}$ و $\phi^d_{i,j}$ مقدار شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود i اُم در موقعیت j اُم است. همچنین، $\theta^u_{i,j}$ و $\theta^d_{i,j}$ مقدار شیب شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود i اُم در موقعیت j اُم است، که مطابق روابط ۴ و ۵ تعریف می‌شوند:

$$\theta^u_{i,j} = \left(\phi^u_{i,j+1} - \phi^u_{i,j-1}\right)/(x_{j+1} - x_{j-1}) \quad (۴)$$

$$\theta^d_{i,j} = \left(\phi^d_{i,j+1} - \phi^d_{i,j-1}\right)/(x_{j+1} - x_{j-1}) \quad (۵)$$

همچنین در رابطه‌ی ۳، پارامترهای $k^u_{i,j}$ و $k^d_{i,j}$ به ترتیب مقدار انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود i اُم در موقعیت jاُم است و مطابق روابط ۶ و ۷ تعریف می‌شوند:

$$\kappa^u_{i,j} = 4\left(\phi^u_{i,j-1} - 2\phi^u_{i,j} + \phi^u_{i,j+1}\right)/(x_{j+1} - x_{j-1})^2 \quad (۶)$$

$$\kappa^d_{i,j} = 4\left(\phi^d_{i,j-1} - 2\phi^d_{i,j} + \phi^d_{i,j+1}\right)/(x_{j+1} - x_{j-1})^2 \quad (۷)$$

نرمال شده‌ی بردار شاخص‌های تشخیصی مود i اُم نیز مطابق رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$DI_i = max\left\{0,\ \frac{[DI_{i,j}] - 1.5\mu_{[DI_{i,j}]}}{\max[DI_{i,j}] - \min[DI_{i,j}]}\right\} \quad (۸)$$

که در آن، $\mu_{[DI_{i,j}]}$ مقدار متوسط بردار شاخص‌های شناسایی آسیب مود i اُم است و ذیلاً مطابق رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود:

$$\mu_{[DI_{i,j}]} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} DI_{i,j} \quad (۹)$$

محاسبات بردار شاخص‌های تشخیصی DI_i با انجام کدنویسی در محیط متلب[۲۳] (۲۰۲۱a) برای وضعیت‌های مختلف آسیب انجام شده است. نتایج نموداری در شکل‌های ۳ الی ۵، برای وضعیت‌های آسیب ستون تحت اثر بار محوری $0/5P_{cr}$ مقادیر بیشینه‌ی نسبی رخ داده در موقعیت‌های آسیب (که با رنگ قرمز مشخص شده است) مشاهده می‌شوند.

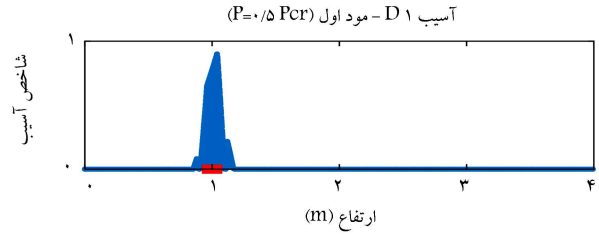
در جدول ۶، درصد خطای شناسایی بر اساس مقدار بیشینه‌ی نسبی رخ داده در نمودارها و مرکز ناحیه‌ی آسیب محاسبه شده است (رابطه‌ی ۱۰):

$$e = \% \left(\frac{100}{h}\left|z\left(DI_{i,\max}\right) - z\left(D\right)\right|\right) \quad (۱۰)$$

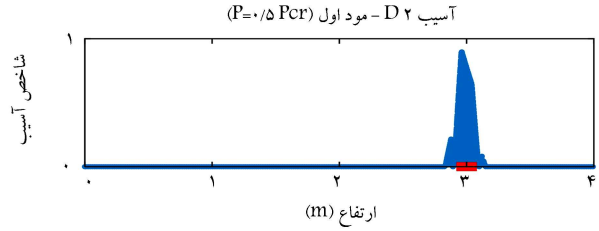
که در آن، $z(DI_{i,max})$ و $z(D)$ به ترتیب موقعیت مکانی بیشترین مقدار شاخص‌های شناسایی آسیب (در منطقه‌ی آسیب) و موقعیت مکانی مرکز واقعی آسیب و h ارتفاع ستون (برابر با ۴ متر) و e درصد خطای شناسایی محاسبه شده است. بیشترین مقدار خطای شناسایی ۱٪ بوده است، که خطای ناچیزی است.

۱.۵. اثر سایر نسبت‌های باری بر بردار شاخص‌های شناسایی

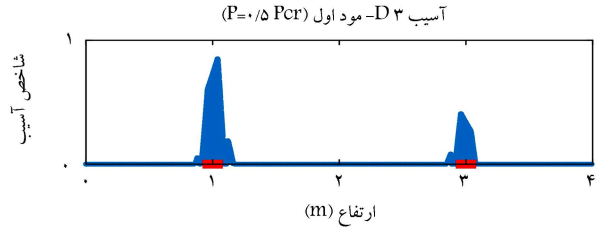
بررسی‌ها برای دیگر نسبت‌های باری نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که نسبت‌های باری مختلف، کمترین تأثیر را بر مقدار شاخص‌های شناسایی آسیب



الف) D ۱؛

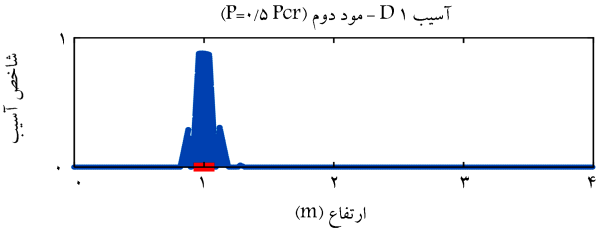


ب) D ۲؛

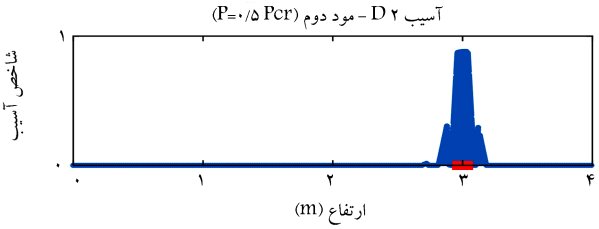


ج) D ۳ ستون تحت اثر بار محوری Pcr ۰/۵.

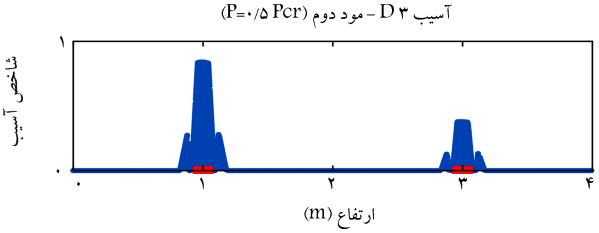
شکل ۳. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود اول حالت آسیب.



الف) D ۱؛

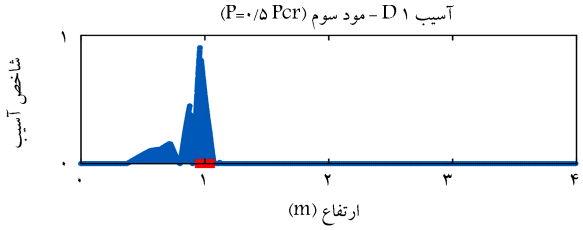


ب) D ۲؛

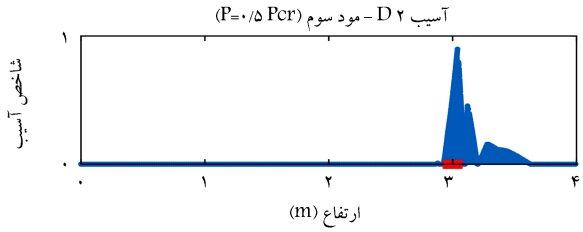


ج) D ۳ ستون تحت اثر بار محوری Pcr ۰/۵.

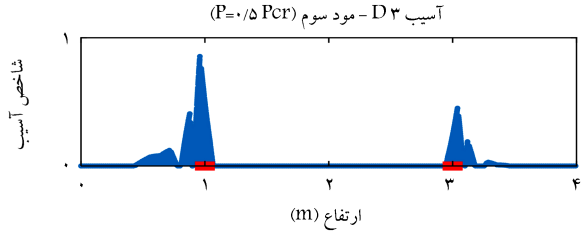
شکل ۴. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود دوم حالت آسیب.



الف) D ۱؛



ب) D ۲؛



ج) D ۳ ستون تحت اثر بار محوری Pcr ۰/۵.

شکل ۵. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود سوم حالت آسیب.

دارند؛ به طوری که می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. به عنوان مثال، نتایج نموداری مود اول برای وضعیت آسیب D۳ مربوط به $۰/۱P_{cr}$، $۰/۵P_{cr}$ و $۰/۹P_{cr}$ در شکل ۶ مشاهده می‌شود. دلیل ناچیز بودن اثر بار محوری بر شاخص شناسایی آسیب با استفاده از معیار همبستگی مودال (MAC) [۲۴]، که مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود،[۳۱ و ۳۲] بررسی شده است:

$$MAC_{i,j} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{n}\left(\phi_{i,k}^{u,P_1} \times \phi_{j,k}^{u,P_2}\right)\right)^2}{\left(\sum_{k=1}^{n}\left(\phi_{i,k}^{u,P_1}\right)^2\right)\left(\sum_{k=1}^{n}\left(\phi_{j,k}^{u,P_2}\right)^2\right)} \qquad (۱۱)$$

که در آن، $\phi_{i,k}^{u,P_1}$ و $\phi_{j,k}^{u,P_2}$ به ترتیب شکل‌های مود i و j اُم سالم تحت اثر بار محوری P_1 و P_2 در موقعیت k هستند. همچنین مقادیر MAC، همواره بین صفر و ۱ قراردارد (رابطه‌ی ۱۲):

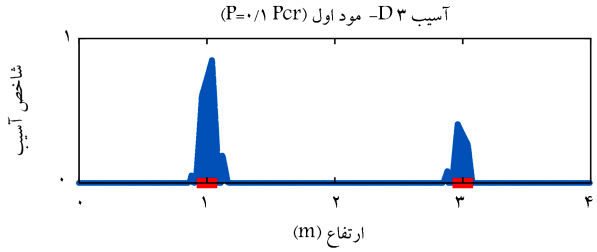
$$LMAC = -log\left(MAC\right) \geq 0 \qquad (۱۲)$$

مقادیر LMAC برای حالتی که $P_1 = 0$ و P_2 برابر با $۰/۱P_{cr}$ تا $۰/۵P_{cr}$ است، که در جدول‌های ۷ الی ۱۱ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که درایه‌های قطری LMAC برابر با صفر هستند. محاسبات تا ۱۰ رقم اعشار انجام شده و همچنان، مقدار صفر برای درایه‌های قطری به دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که ماتریس‌های LMAC با دقت ۳ رقم اعشار متقارن هستند؛ یعنی، اثر بار محوری بر جابه‌جایی نسبی درجه‌های آزادی شکل‌های مود ارتعاشی، بسیار ناچیز است.

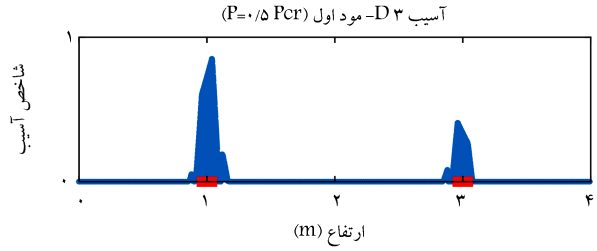
دقت‌های محاسباتی با دست‌کم ۴ رقم اعشار نشان می‌دهند که ماتریس‌های LMAC کاملاً متقارن نیستند و در نتیجه، مقادیر درایه‌های قطری بسیار نزدیک به

جدول ۶. مقادیر درصد خطای شناسایی موقعیت‌های آسیب بر اساس بیشینه‌های نسبی و مراکز آسیب.

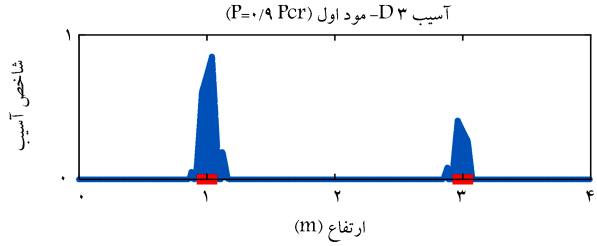
حالت آسیب	مرکز آسیب (متر)	مقدار بیشینه‌ی شاخص شناسایی			مرکز شناسایی شده‌ی آسیب			خطای شناسایی (٪)		
		مود اول	مود دوم	مود سوم	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود اول	مود دوم	مود سوم
D۱	۱	۰/۹۰۲۵	۰/۸۸۲۵	۰/۹۰۴۵	۱/۰۳۹۴	۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۰۲	۰/۹۸۵۵	۰/۴۰۶۹	۰/۹۹۵۳
D۲	۳	۰/۹۰۲۵	۰/۸۸۲۰	۰/۹۰۳۹	۲/۹۶۰۶	۳/۰۱۳۹	۳/۰۳۹۸	۰/۹۸۵۵	۰/۳۴۸۱	۰/۹۹۵۳
D۳	۱	۰/۸۵۳۰	۰/۸۴۰۳	۰/۸۵۹۵	۱/۰۳۹۴	۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۰۲	۰/۹۸۵۵	۰/۴۰۶۹	۰/۹۹۵۳
	۳	۰/۴۰۸۵	۰/۳۷۸۷	۰/۴۵۴۱	۲/۹۶۰۶	۳/۰۱۳۹	۳/۰۳۹۸	۰/۹۸۵۵	۰/۳۴۸۱	۰/۹۹۵۳



الف) Pcr ۰/۱؛



ب) Pcr ۰/۵؛



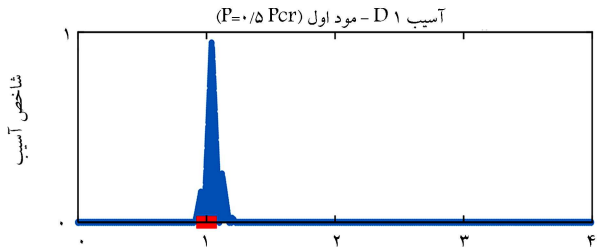
ج) Pcr ۰/۹.

شکل ۶. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود اول حالت آسیب D۳ برای بار محوری.

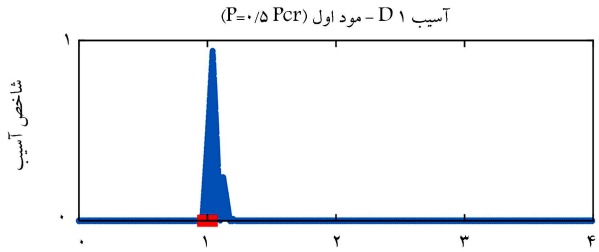
صفر هستند. از مقایسه‌ی جدول‌های ۷ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که ماتریس‌های محاسباتی LMAC با دقت ۳ رقم اعشار برابر هستند؛ لذا، علی‌رغم تأثیر مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد، آثار بار بر شکل‌های مود ارتعاشی بسیار ناچیز است.

۲.۵. بررسی اثر مقطع در شاخص‌های شناسایی

شناسایی آسیب ستون با مقاطع مربعی توخالی و دایره‌یی تحت اثر بار محوری برای وضعیت آسیب D۱ در مودهای مختلف انجام شده است. نتایج نموداری نشان می‌دهند که مقدار بیشینه‌ی نسبی در موقعیت آسیب اتفاق افتاده است. به



الف) مربع تو خالی؛



ب) دایره یی.

شکل ۷. نمودار شاخص تشخیصی مود اول ستون با آسیب D۱ تحت اثر بار محوری $0/5P_{cr}$ و مقطع.

عنوان مثال، در شکل ۷، نتیجه‌ی نموداری برای مود اول مشاهده می‌شود، که مطابق آن، جهش در نمودار شاخص‌های شناسایی آسیب در موقعیت آسیب اتفاق افتاده است.

۳.۵. بررسی اثر شدت آسیب بر شاخص‌های شناسایی

برای بررسی تأثیر میزان شدت آسیب یک موقعیت محتمل آسیب بر شاخص‌های تشخیصی موقعیت‌های مختلف آسیب لازم است که رابطه‌ی ۸ به شکل رابطه‌ی ۱۳ تعریف شود:

$$DI_i = max\left\{0,\ [DI_{i,j}] - 1/5\mu_{[DI_{i,j}]}\right\} \qquad (13)$$

در این صورت می‌توان تأثیر شدت آسیب را بر بردار شاخص‌های تشخیصی بررسی کرد.

بررسی‌ها با استفاده از شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود ارتعاشی اول برای وضعیت آسیب D۳ با تعریف مقادیر شدت آسیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در موقعیت ۱

جدول ۷. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری $P_1 = 0$ و $P_2 = 0/1P_{cr}$.

LMAC		شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری	۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۰۱۰۶	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۴۷۹
	۲	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۳۷۳۲	۱۳/۶۹۹۸
	۳	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۲۵۶۰
	۴	۱۴/۰۱۰۶	۱۴/۸۴۱۲	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۹۶۹۱
	۵	۱۵/۲۶۰۰	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۷۲۲۴	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۸
	۶	۱۴/۰۴۷۹	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۹۶۹۱	۱۷/۶۷۲۶	۰/۰۰۰۰

جدول ۸. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری $P_1 = 0$ و $P_2 = 0/2P_{cr}$.

LMAC		شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری	۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۰۱۰۶	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۴۷۹
	۲	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۳۷۳۲	۱۳/۶۹۹۸
	۳	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۲۵۶۰
	۴	۱۴/۰۱۰۶	۱۴/۸۴۱۲	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۹۶۹۱
	۵	۱۵/۲۶۰۰	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۹
	۶	۱۴/۰۴۷۹	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۹۶۹۱	۱۷/۶۷۲۶	۰/۰۰۰۰

جدول ۹. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری $P_1 = 0$ و $P_2 = 0/3P_{cr}$.

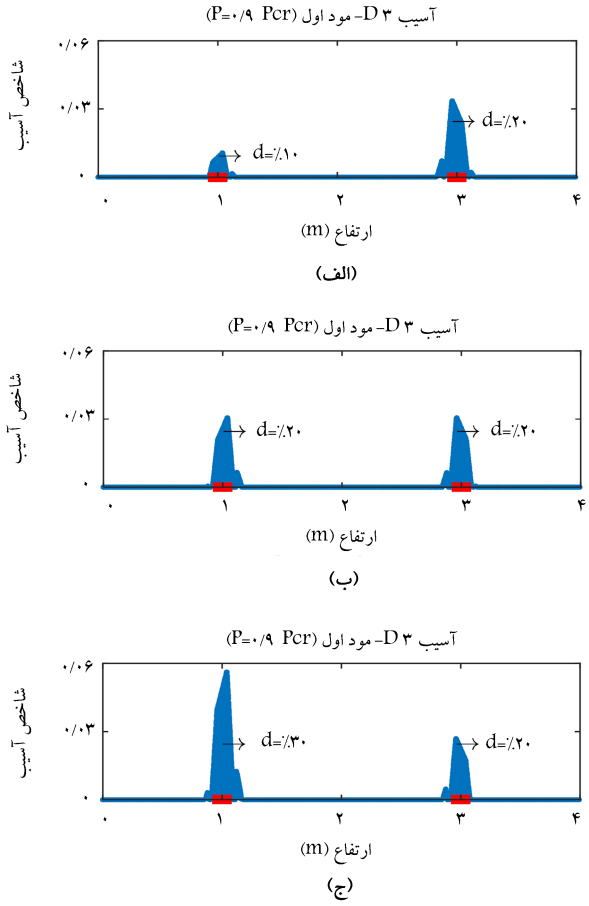
LMAC		شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری	۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۰۱۰۶	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۴۷۹
	۲	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۳۷۳۲	۱۳/۶۹۹۸
	۳	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۲۵۶۰
	۴	۱۴/۰۱۰۶	۱۴/۸۴۱۲	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۹۶۹۱
	۵	۱۵/۲۶۰۰	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۳۰
	۶	۱۴/۰۴۷۹	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۹۶۹۱	۱۷/۶۷۲۶	۰/۰۰۰۰

جدول ۱۰. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری $P_1 = 0$ و $P_2 = 0/4P_{cr}$.

LMAC		شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری	۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۰۱۰۶	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۴۷۹
	۲	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۳۷۳۲	۱۳/۶۹۹۸
	۳	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۷۲۲۲۳	۱۴/۲۵۶۰
	۴	۱۴/۰۱۰۶	۱۴/۸۴۱۲	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۹۶۹۱
	۵	۱۵/۲۶۰۰	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۳۱
	۶	۱۴/۰۴۷۹	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۹۶۹۱	۱۷/۶۷۲۵	۰/۰۰۰۰

جدول ۱۱. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری $P_1 = 0$ و $P_2 = 0/5P_{cr}$.

LMAC		شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری	۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۰۱۰۶	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۴۷۹
	۲	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۳۷۳۲	۱۳/۶۹۹۸
	۳	۱۳/۸۷۳۰	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۲۵۶۰
	۴	۱۴/۰۱۰۶	۱۴/۸۴۱۲	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳	۱۴/۹۶۹۱
	۵	۱۵/۲۶۰۰	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۷۲۲۴	۱۶/۸۶۳۴	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۳۲
	۶	۱۴/۰۴۷۹	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۹۶۹۱	۱۷/۶۷۲۵	۰/۰۰۰۰



شکل ۸. نمودار شاخص‌های تشخیصی حالت آسیب D۳ با شدت‌های آسیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در موقعیت ۱ و شدت آسیب ۲۰ درصد در موقعیت ۲.

و مقدار شدت آسیب ثابت ۲۰ درصد در موقعیت ۲ انجام شده است. در جدول ۱۲، بیشینه‌ی مقدار شاخص‌های تشخیصی موقعیت‌های آسیب محاسبه و در شکل ۸، نمودار شاخص‌های تشخیصی به دست آمده از رابطه‌ی ۱۳ ارائه شده است:

مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی با افزایش شدت آسیب موقعیت ۱ افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی حساس بودن شاخص‌های تشخیصی به شدت آسیب موقعیت ۱ است. این در حالی است که با افزایش شدت آسیب در موقعیت ۱، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیص آسیب در موقعیت ۲ کاهش یافته و این شدت کاهش مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت

جدول ۱۲. مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت‌های مختلف آسیب.

نام آسیب	بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیص آسیب در موقعیت آسیب	
	۱ (مرکز آسیب برابر ۱ متر)	۲ (مرکز آسیب برابر با ۳ متر)
D۳-۱۰-۲۰	۰/۰۱۰۶۴۹۳	۰/۰۳۳۵۶۷۶
D۳-۲۰-۲۰	۰/۰۳۰۵۹۰۴	۰/۰۳۰۵۹۰۳
D۳-۳۰-۲۰	۰/۰۵۶۲۴۳۷	۰/۰۲۶۹۳۳۱

۲، از شدت افزایش مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت ۱ کمتر بوده است. همچنین، مشاهده می‌شود در صورتی که شدت آسیب در هر دو موقعیت آسیب برابر باشد، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی یکسانی در موقعیت‌های آسیب ایجاد می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

ارزیابی سلامتی از ضروریات اولیه‌ی نگهداری سازه و تأمین ایمنی است. با شناسایی به موقع اعضاء آسیب‌دیده و ترمیم آنها می‌توان تا حد امکان از وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد. همواره ارزیابی سلامتی در سازه‌ها با عنوان پایش سلامت سازه در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا مورد توجه بوده است. در یک تقسیم‌بندی کلی، پایش سلامتی بر مبنای پاسخ‌های ارتعاشی سازه، شامل چهار مرحله است: در مرحله‌ی اول، به مسئله‌ی وجود آسیب در سازه پرداخته می‌شود. در صورتی که وجود آسیب در سازه تأیید شود، در مرحله‌ی دوم، به تعیین موقعیت آسیب پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی سوم، به تعیین مقدار آسیب از نظر شدت، عمق و یا سطح خسارت پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی چهارم، که کامل‌ترین سطح مطالعه‌ی پایش سلامت سازه است، به تخمین طول عمر سازه‌ی محتمل آسیب پرداخته می‌شود.

در نوشتار حاضر، با هدف تعیین موقعیت آسیب در ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف بار محوری بحرانی، شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی پیشنهاد و کارایی آن در تعیین موقعیت آسیب بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

۱- بردار شاخص‌های تشخیصی به موقعیت آسیب، حساس است و موقعیت آسیب با ایجاد بیشینه‌های نسبی در منطقه‌ی آسیب با خطای کمتر از ۱٪ قابل شناسایی است.

۲- علی‌رغم این‌که مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد اثرگذار است، اما تأثیری بر مقادیر شاخص تشخیصی آسیب ندارد. این موضوع با محاسبه‌ی ماتریس‌های

معیار همبستگی مودال بررسی شده است. تقارنی بودن ماتریس‌های LMAC تا دقت سه رقم اعشار نشان داد که بار محوری، کمترین تأثیر را بر جابه‌جایی درجه‌های آزادی (شکل‌های مود ارتعاشی) دارد.

۳- شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با مقاطع مربعی توپر، مربعی توخالی و دایره‌یی انجام شد. نتایج نموداری نشان داد که بردار شاخص‌های تشخیصی برای تعیین موقعیت آسیب ستون تحت اثر بار محوری با مقطع دلخواه، کارآمد و قابل اعتماد است.

علاوه بر موارد بالا، بررسی اثر مقدار شدت آسیب در روند شناسایی و تشخیص آسیب نشان داد که:

۴- با افزایش شدت آسیب در موقعیت آسیب ۱، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت‌های آسیب ۱ و ۲ به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

۵- با افزایش مقدار شدت آسیب در موقعیت آسیب ۱، شدت افزایش بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی موقعیت آسیب ۱ از شدت کاهش بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی موقعیت آسیب ۲ قابل ملاحظه‌تر است.

۶- در صورتی که مقدار شدت آسیب در دو موقعیت آسیب ۱ و ۲ برابر باشد، آن‌گاه مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی یکسانی در موقعیت‌های آسیب ۱ و ۲ ایجاد می‌شود؛ به عبارتی، موقعیت‌های آسیب با هم‌سطحی مناسب‌تری از مقادیر شاخص‌های تشخیصی قابل شناسایی است.

همچنین، از بررسی‌های انجام شده در نوشتار حاضر، این نتایج به دست آمده است:

۷- در تمامی مودها در اثر آسیب و تحت اثر بار محوری یکسان، بسامد وضعیت سالم با بسامد وضعیت آسیب اختلاف داشته و اختلاف مذکور با افزایش شدت آسیب، افزایش یافته است.

۸- مقدار بسامد در تمامی مودها برای هر دو وضعیت اولیه (سالم) و ثانویه (محتمل آسیب) با افزایش مقدار بار محوری کاهش یافته است.

در پایان، روش پیشنهادی به عنوان روشی کارآمد در شناسایی موقعیت‌های آسیب در المان‌های تیرمانند (با و یا بدون اثر بار محوری) پیشنهاد می‌شود. البته برای شناسایی موقعیت‌های آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی گیردار ـ آزاد توصیه نمی‌شود.

پانوشت‌ها

1. Panedy
2. Yam
3. Sahoo & Maity
4. Shih
5. Roveri & Carcaterra
6. empirical mode decomposition (EMD)
7. Bao
8. Xu
9. Sun & Ren
10. seismic damage analysis
11. global damage index
12. overall damage degree
13. Yang
14. Yang & Oyadiji
15. modal frequency surface
16. Liu
17. online damage monitoring
18. spatial-wavenumber filter
19. frequency aliasing
20. concrete filled-steel tube
21. Hanteh
22. ABAQUS
23. MATLAB
24. modal assurance criterion (MAC)

منابع (References)

1. Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, **145**(2), pp. 321-332 (1991).
2. Yam, L., Li, Y. and Wong, W.O. "Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches", *Engineering Structures*, **24**(11), pp. 1465-1475 (2002).
3. Sahoo, B. and Maity, D. "Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, **7**(1), pp. 89-104 (2007).
4. Shih, H.W., Thambiratnam, D. and Chan, T. "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach", *Journal of Sound and Vibration*, **323**(3-5), pp. 645-661 (2009).
5. Roveri, N. and Carcaterra, A. "Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert–Huang transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 128-144 (2012).
6. Bao, C., Hao, H. and Li, Z.-X. "Multi-stage identification scheme for detecting damage in structures under ambient excitations", *Smart Materials and Structures*, **22**(4), pp.1-22 (2013).
7. Xu, X.F., Zhang, F. and Zhu, W.X. "Damage detection of continuous box girder based on modal flexibility curvature method", *Advanced Materials Research*, **671-674**, pp. 1016-1020 (2013).
8. Amiri, G., Talebi, M., Talebi, M. and et al. "Damage assessment in connections of moment resistant frames using hilbert-huang transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), pp. 3-11 (2016).
9. Sun, D. and Ren, Q. "Seismic damage analysis of concrete gravity dam based on wavelet transform", *Shock and Vibration*, **2016**(9), pp. 1-8 (2016).
10. Nobahari, M., Ghasemi, M.R. and Shabakhty, N. "A novel heuristic search algorithm for optimization with

application to structural damage identification", *Smart Structural Systems*, **19**(4), pp. 449-461 (2017).

11. Yang, Z.-B., Radzienski, M., Kudela, P. and et al. "Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **84**, pp. 763-781 (2017).
12. Yang, C. and Oyadiji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Computers & Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
13. Darvishan, E. "Damage detection of cable-stayed bridges using frequency domain analysis and clustering", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **51**(4), pp. 767-780 (2019).
14. Liu, B., Liu, T., Zhao, J. and et al. "Frequency aliasing-based spatial-wavenumber filter for online damage monitoring", *Shock and Vibration*, **2020**, pp. 1-10 (2020).
15. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", *Magazine of Civil Engineering*, **85**(1), pp. 136-145 (2019).
16. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Active interface debonding detection of a concrete filled tube (CFT) column by modal parameters and continuous wavelet transform (CWT) technique", *Structural Monitoring and Maintenance*, **8**(1), pp. 69-90 (2021).
17. Khanahmadi, M., Gholhaki, M. and Rezayfar, O. "Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data", *Journal of Modeling in Engineering*, **18**(63), pp. 51-64 (2021).
18. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(5), pp. 198-214 (2021).
19. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(8), pp. 289-309 (2021).
20. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalebahman, A. and et al. "Damage detection in iaminated composite plates using wavelet analysis analytical method", *Journal of Vibration and Sound*, **10**(20), pp. 144-156 (2022).
21. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(9), pp. 166-183 (2021).
22. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Rezaifar, O. and et al. "Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis", *Civil Infrastructure Researches*, **8**(2) (2023).
23. Rezaifar, O., Gholhaki, M., Khanahmadi, M. and et al. "A review of structural health monitoring and damage detection using wavelet transform: the case study of damage detection in cantilever beams", *Journal of Vibration and Sound*, **11**(21), pp.157-171 (2022).
24. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Wavelet-based damage detection of steel beam-structures", *Journal of Structure & Steel*, **15**(33), pp. 15-27 (2021).
25. Hanteh, M. and Rezaifar, O. "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
26. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast full panel building based on experimental results and wavelet analysis", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **11**(4), pp. 1013-1036 (2021).
27. Mamazizi, A., Khanahmadi, M., and Nobakht Vakili, K. "Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(3.1), pp.53-63, (In Persian) (2022).
28. Bakhshi, A. and Mousavi, M. "Crack detection in masonry structures using computer vision based on deep learning", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(2.1), pp. 99-108 (2022).
29. Bakhshi, A. and Mousavi, M. "Crack detection in concrete members using encoder-decoder models based on deep learning", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(2.2), pp. 79-88, (In Persian) (2022).
30. Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using wavelet analysis analytical method", *Modares Civil Engineering Journal*, **22**(1), pp. 129-142 (2023).
31. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. "Dynamic behavior of 3D-panel single-story system using shaking table testing", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337 (2008).
32. Kabir, M.Z. and Rezaifar, O. "Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system", *Structures*, **20**, pp. 411-424 (2019).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۶۳-۷۱، (پژوهشی)

Original Article

تخمین عرض مؤثر دیوارهای برشی بتنی L- شکل با استفاده از روش رگرسیون‌گیری EPR

هاتف عبدوس (دانشجوی دکتری)
علیرضا خالو * (استاد)
محمد طبیعی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

عرض مؤثر به عنوان پارامتری مهم در تعیین عملکرد دیوارهای برشی بتنی با مقطع غیرمستطیلی محسوب می‌شود. بر اساس ضوابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها و پژوهش‌های موجود در ادبیات فنی، مقادیری توصیه شده است که مستقل از چگونگی عملکرد دیوار، مقداری ثابت را به عنوان عرض مؤثر مقاطع در نظر می‌گیرد و ناکارآمدی آنها در بیشتر موارد محرز شده است. در مطالعه‌ی حاضر، ۴۲ دیوار برشی با مقطع L- شکل تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار گرفته و به صورت عددی ارزیابی شده‌اند. ساخت هندسه‌ی نمونه‌ها در برنامه‌ی FlashLab انجام شده و تحلیل مقاطع در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. سپس توزیع تغییرشکل و کرنش محوری حاکم بر مقاطع مذکور، تعیین و در گام بعد با استفاده از روش رگرسیون‌گیری چندجمله‌یی تکاملی EPR، روابطی کاربردی جهت تخمین عرض مؤثر در دیوارهای L- شکل کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر ارائه شده است. در انتها، دقت روابط پیشنهادی با مقادیر عرض مؤثر حاصل از ضوابط آیین‌نامه‌های بین‌المللی مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: دیوار برشی بتنی L- شکل، عرض مؤثر، تأخیر برشی، مدل اجزاء محدود، رگرسیون‌گیری چندجمله‌یی تکاملی (EPR).

abdoos_hatef@yahoo.com
khaloo@sharif.edu
m.tabiee75@chmail.ir

۱. مقدمه

امروزه از دیوارهای برشی بتنی با مقاطع غیرمستطیلی I-، T-، L-، Z-، Y- و U- شکل در ساخت سازه‌ها استفاده می‌شود، که موقعیت قرارگیری آنها بر مبنای ملاحظات سازه‌یی و معماری است. بر اساس هندسه‌ی دیوارهای برشی بتنی ذکر شده، علاوه بر بارگذاری‌های برشی و خمشی، متناظر با موقعیت مرکز برش مقطع می‌توانند در معرض بارگذاری پیچشی نیز قرار گیرند. همچنین، در محدوده‌ی محل اتصال بال به جان در مقاطع غیرمستطیلی اخیر، تغییرشکل‌های اعوجاجی منجر به بیشتر شدن مقادیر تنش و کرنش در نواحی اشاره شده می‌شوند، که به تبع آن کمتر شدن سختی و ظرفیت باربری مقطع را به همراه خواهد داشت. پدیده‌ی اخیر، تأخیر برشی[۱]،[۱] نام دارد، که به غیرخطی شدن توزیع کرنش در مقطع منجر می‌شود و تحلیل و طراحی مقاطع غیرمستطیلی را دشوار خواهد کرد.[۲ و ۳]

اولین مطالعات صورت گرفته پیرامون این موضوع، به صورت تحلیلی و بر روی تیرهای بتنی با مقطع غیرمستطیلی انجام شده است، که فقط در ناحیه‌ی کشسان معتبر هستند.[۴-۷] عمده‌ی مطالعات موجود در ادبیات فنی با محوریت تأخیر برشی پیرامون تیرهای با مقطع جعبه‌یی،[۸ و ۹] مقطع پل‌ها[۱۰] و نیز دیوارهای برشی بالدار،[۱۱ و ۱۲] است. همچنین، چگونگی تأثیر و اهمیت آن در عملکرد دیوارهای غیرمستطیلی در نوشتار مروری خالو و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۳] گردآوری شده است.

پالرمو[۲] و همکاران (۲۰۰۷)،[۱۴] عملکرد دیوارهای برشی با مقاطع L-، T- و H- شکل را به صورت عددی ارزیابی کردند و دریافتند که ضوابط مطرح شده در آیین‌نامه‌ها در تعیین عرض مؤثر دیوار کارآمد نیست و نیز اختلاف قابل‌توجهی در مقدار عرض مؤثر مقطع، در حالتی که بال مقطع تحت فشار قرار دارد، با حالتی که تحت کشش است، مشاهده می‌شود. همچنین، خیرالدین و مرتضایی (۲۰۰۷)،[۱۵] با استفاده از روش اجزاء محدود، پارامترهای طول و ارتفاع دیوار و نیز بار محوری وارده و تغییرمکان جانبی نسبی آن را به عنوان پارامترهای مؤثر در عرض مؤثر دیوارهای برشی بالدار معرفی کردند.

در مطالعات آزمایشگاهی بروگن[۳] و همکاران،[۱۶ و ۱۷] بر روی دیوارهای T- شکل، به تأثیر قابل‌توجه تأخیر برشی پیش از وقوع تسلیم‌شدگی آرماتورهای فولادی مقطع و نیز توزیع یکنواخت آرماتورهای طولی نسبت به حالتی که آرماتورها در المان‌های مرزی متمرکز باشند، اشاره و مشخص شده است که افزایش جابه‌جایی ناحیه‌ی فوقانی دیوار، در تغییر عرض مؤثر بال مقطع نقش داشته است. بنابراین، در نظرگرفتن تأخیر برشی در عملکرد دیوارهای برشی بالدار نه فقط از منظر طراحی حالت حدی، بلکه از نظر سطح بهره‌برداری نیز می‌تواند حائز اهمیت باشد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۲۹، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲.
DOI:10.24200/J30.2022.60850.3125

شی و ونگ[۴] (۲۰۱۶)،[۱۸] با استفاده از اصل کمینه‌ی انرژی پتانسیل توانستند بر مبنای تغییرشکل اعوجاجی مرتبه‌ی سوم برای تأخیر برشی، عرض مؤثر دیوار با مقطع T- شکل را در حالت کشسان و بر اساس رابطه‌ی ۱ ارزیابی کنند:

$$b_{eff} = \frac{\int_{-b}^{b} \sigma_x \mathrm{d}y}{\sigma_{\max}} \qquad (۱)$$

که در آن، σ_x تنش محوری در بال مقطع و σ_{max} بیشینه‌ی مقدار آن است. همچنین، در مطالعه‌ی اخیر به این موضوع اشاره شده است که در طی فرایند بارگذاری، ابتدا مقدار عرض مؤثر بال مقطع ثابت است و پس از ترک‌خوردگی در مقطع تا وقوع تسلیم‌شدگی، مقدار آن به صورت موضعی کاهش می‌یابد. سپس با افزایش بار و بازتوزیع تنش‌ها، عرض مؤثر افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار بیشینه با شیب نسبتاً کمی از مقدار آن کاسته می‌شود.

ژنگ و لی[۵] (۲۰۱۷)،[۱۱] با ارزیابی تأثیر تأخیر برشی در عملکرد دیوارهای برشی بالدار ترک‌خورده، به اثر فزاینده‌ی افزایش ضخامت بال مقطع و بار محوری وارده به سازه در شدت وقوع تأخیر برشی و نیز اثر کاهنده‌ی جابه‌جایی تراز فوقانی و طول دیوار اشاره کردند و دریافتند که صرف‌نظر کردن از تأخیر برشی، می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌یی در مقادیر نیروی کششی و لنگر خمشی وارده به پای دیوار داشته باشد.

همچنین، آثار تأخیر برشی در مقادیر توزیع تغییرشکل و تنش محوری در دیوارهای برشی بتنی با مقطع T- شکل توسط لیو[۶] و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۹] بررسی شده است. نی و کائو[۷] (۲۰۱۸)،[۲۰] با در نظر گرفتن تأخیر برشی در عملکرد تیرها و دیوارهای برشی بتنی با مقطع I- شکل، عرض مؤثر این مقاطع را بر اساس تغییرشکل اعوجاجی تابع درجه‌ی دوم تخمین زدند. هالت[۸] (۲۰۱۹)،[۲۱] نیز توزیع تنش و کرنش محوری دیوارهای برشی بتنی U- شکل (C- شکل) را بر اساس مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار VecTor۳ ارزیابی و سپس ضابطه‌یی جهت تخمین عرض مؤثر در دیوارهای مذکور پیشنهاد کرد، که دقت مطلوبی داشت. در سال ۲۰۲۰ و در پژوهشی جامع، لو و لی[۹]،[۲۲] روابطی کاربردی و با دقت قابل قبول برای برآورد عرض مؤثر در دیوارهای برشی با مقطع T- شکل ارائه کردند.

خالو و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۳] با بررسی توابع چندجمله‌یی با درجه‌های مختلف برای تغییرشکل اعوجاجی تأخیر برشی در یک مقطع I- شکل با بال‌های نامتقارن، چندجمله‌یی مرتبه‌ی دوم را به عنوان مناسب‌ترین توزیع برای تغییرشکل اعوجاجی متأثر از تأخیر برشی معرفی کردند. بر اساس نتایج پژوهش دیگری از خالو و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۴] اثر ضریب پواسون بتن، ضخامت بال و ارتفاع مقطع در محاسبات مربوط به عرض مؤثر در دیوارهای برشی بالدار، ناچیز و تأثیر بار محوری و بارهای جانبی وارده به سازه قابل توجه بوده است. همچنین ایشان در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۲،[۲۵] با توسعه‌ی برنامه‌ی FlashLab، مطالعات عددی گسترده‌یی با محوریت بررسی تأثیر پدیده‌ی تأخیر برشی در عملکرد دیوارهای برشی بتنی بالدار را ارائه کردند. ژنگ و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۶] نیز روابطی نیمه‌تجربی را پیشنهاد دادند، که در آن مشارکت بال فشاری دیوارهای برشی بالدار در سطوح مختلفی از بارگذاری جانبی چرخه‌یی مد نظر قرار گرفته است. همچنین، نتایج مطالعه‌ی ایشان نشان داد که توزیع غیرخطی کرنش‌های محوری فشاری، مربوط به در نظر گرفتن آثار تأخیر برشی و تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی است.

لذا در پژوهش حاضر، رفتار دیوارهای برشی بتنی L- شکل تحت بارگذاری چرخه‌یی و با در نظر گرفتن آثار ناشی از پدیده‌ی تأخیر برشی ارزیابی شده است. سپس با انجام مطالعات پارامتری بر روی مدل‌های عددی و بر اساس توزیع کرنش و جابه‌جایی محوری حاصل، روابطی کاربردی به منظور تخمین عرض مؤثر مقاطع L- شکل پیشنهاد شده است. اهداف پژوهش حاضر را می‌توان در قالب این موارد به طور خلاصه مطرح کرد:

- مدل‌سازی عددی دیوارهای برشی بتنی L- شکل با بال نابرابر؛
- انجام مطالعات پارامتریک؛
- ارائه‌ی روابط کاربردی با استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌یی تکاملی (EPR) [۱۰] برای تخمین دقیق‌تر عرض مؤثر در دیوارهای برشی بتنی L- شکل؛
- مقایسه‌ی روابط پیشنهادی با ضوابط توصیه شده توسط آیین‌نامه‌های بین‌المللی.

گفتنی است که راهبرد اخیر را می‌توان برای انواع مقاطع بالدار، بالاخص مقاطع پرکاربردی چون مقاطع T- شکل، U- شکل و نیز مقاطع صلیبی پیاده‌سازی کرد.

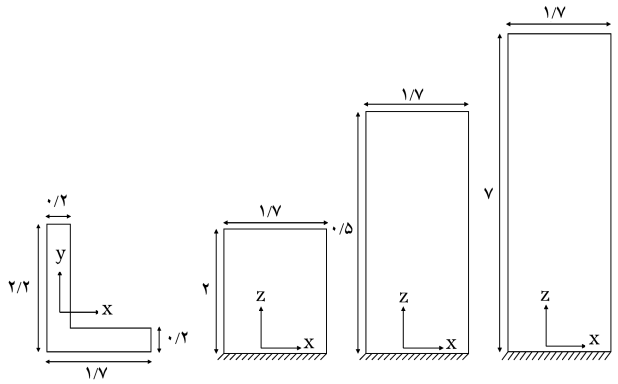
۲. مدل‌سازی دیوارهای L- شکل

۱.۲. مدل‌سازی اجزاء محدود

با توجه به این مهم که مدل‌سازی با استفاده از روش اجزاء محدود در بررسی عملکرد مقاطع غیرمستطیلی و نیز بررسی پدیده‌ی تأخیر برشی،[۱۴،۲۵-۲۷] دقت قابل قبولی دارد؛ لذا در بخش کنونی، دیوارهای برشی بتنی با مقطع L- شکل در برنامه‌ی FlashLab ساخته شده و سپس تحلیل عددی آنها در چارچوب نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. در این راستا، ابتدا ۴۲ دیوار برشی با هندسه‌ی نمایش داده شده در شکل ۱، طراحی و سپس بارگذاری چرخه‌یی مطابق شکل ۲ به دیوارها اعمال شده است. لازم به ذکر است که انتخاب ابعاد دیوارها به گونه‌یی صورت گرفته است که: اولاً نمونه‌های شبیه‌سازی شده در بردارنده‌ی انواع دیوارهای کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر باشند و ثانیاً، ابعاد انتخابی، قرابت قابل‌قبولی با دیوارهای L- شکل اجرا شده در سازه‌های گوناگون داشته باشند.

خلاصه‌ی مدل‌های رفتاری استفاده شده جهت مدل‌سازی مصالح فولادی و بتنی دیوارهای L- شکل در جدول ۱ ارائه شده است. در فرایند مدل‌سازی عددی، رفتار مصالح فولادی در فشار و کشش متقارن در نظر گرفته شده است.

با توجه به کارایی مطلوب مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده‌ی خمیری (CDP) [۱۱] در بارگذاری چرخه‌یی وارده به المان‌های سازه‌یی بتنی، از مدل رفتاری ذکر شده استفاده و پارامترهای آن در جدول ۲ ارائه شده است.



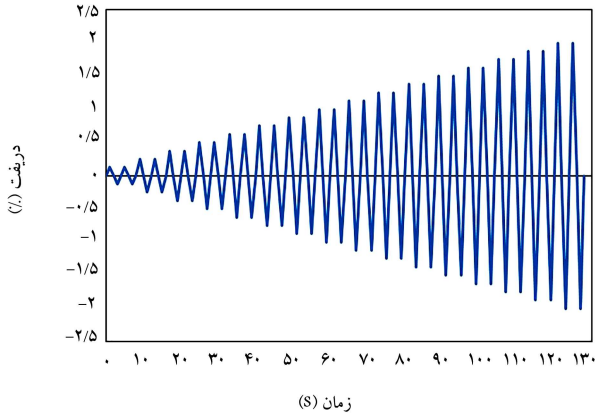
شکل ۱. مشخصات هندسی دیوارهای L- شکل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود (ابعاد بر حسب متر هستند).

جدول ۱. مدل‌های رفتاری مصالح در فرایند مدل‌سازی عددی.

نوع مصالح	مدل رفتاری	مرجع
آرماتورهای طولی	سه‌خطی	[۲۸]
آرماتورهای عرضی	سه‌خطی	[۲۸]
بتن فشاری	کنت و پارک	[۲۹ و ۳۰]
بتن کششی	دوخطی	[۳۰]

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده‌ی خمیری.

زاویه‌ی اتساع	خروج از مرکزیت سطح پتانسیل خمیری	نسبت تنش تسلیم دوجهته به یک‌جهته	شکل سطح تسلیم	پارامتر ویسکوخمیری
۳۰/۵°	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۰۱



شکل ۲. بارگذاری چرخه‌یی وارده به دیوارهای برشی L- شکل.

جدول ۳. مشخصات مصالح فولادی.

قطر آرماتور (میلی‌متر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)
۱۴	۳۰۰	۴۰۰	۲۱۰
۲۰	۴۰۰	۶۰۰	۲۱۰

جدول ۴. مشخصات مصالح بتنی.

نوع بتن	مقاومت مشخصه (مگاپاسکال)	تنش کششی (مگاپاسکال)	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)
C۳۰	۳۰	۳	۲۶

مشخصات مکانیکی مصالح فولادی و بتنی به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، ضرایب پواسون بتن و فولاد به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۳۰ و پوشش بتن و طول ناحیه‌ی محصور به ترتیب ۴۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بوده است.

لازم به ذکر است که شرح کامل راستی‌آزمایی شبیه‌سازی عددی برنامه‌ی FlashLab برای مقاطع L- شکل بر اساس مطالعات آزمایشگاهی جیاکسینگ[۱۲] (۲۰۲۱)،[۳۱] و در نوشتار خالو و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۵] ارائه شده است.

۳. رگرسیون چندجمله‌یی تکاملی (EPR)

روش رگرسیون چندجمله‌یی تکاملی (EPR)، یک روش ترکیبی است که از ادغام روش‌های رگرسیون عددی مرسوم و الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود و مبتنی بر شبه چندجمله‌یی‌هایی است که یک سیستم فیزیکی واقعی را توصیف می‌کنند.[۳۲] یک سیستم با خروجی y، که وابسته به مجموعه‌یی از متغیرهای ورودی $\mathbf{X}$ و پارامتر $\boldsymbol{\theta}$ باشد، می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف شود:[۳۳]

$$y = F(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) \tag{۲}$$

که در آن، F یک تابع در فضای m- بُعدی و m تعداد متغیرهای مستقل ورودی است. در ابتدا، از یک روش تکاملی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای جستجوی ساختارهای مدل مناسب استفاده شده است، سپس از یک مرحله‌ی رگرسیون خطی عبور شده است تا ثابت‌های مدل بر اساس تابع مجموع مربعات خطا بهینه و محاسبه شوند. رابطه‌ی ۳، فرمول‌بندی روش مذکور را در حالت کلی نشان می‌دهد:

$$y = \sum_{i=1}^{m} F(X, f(X), a_i) + a_0 \tag{۳}$$

که در آن، y بردار تخمین متغیر وابسته در فرایند رگرسیون‌گیری، F تابع حاصل از فرایند بهینه‌سازی، f تابع تعریف شده توسط کاربر، $\mathbf{X}$ ماتریس متغیرهای مستقل، a_i ضرایب ثابت و a_0 ضریب ثابت هستند. اولین گام در تشخیص ساختار مدل، تبدیل رابطه‌ی ۳ به رابطه‌ی برداری ۴ است:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y}_{N\times 1}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{Z}) &= [\boldsymbol{I}_{N\times 1} \;\; \boldsymbol{I}^j_{N\times m}][a_0 \;\; a_1 \;\; \dots \;\; a_m]^T \\ &= \boldsymbol{Z}_{N\times d}\boldsymbol{\theta}^T_{d\times 1} \end{aligned} \tag{۴}$$

که در آن، $\boldsymbol{Y}_{N\times 1}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{Z})$ بردار تخمین کمینه‌ی مربعات با N مقدار هدف، $\boldsymbol{\theta}_{1\times d}$ برداری متشکل از d=m+1 پارامتر a_i، a_0 و $\boldsymbol{\theta}^T$ بردار ترانهاده و $\boldsymbol{Z}_{Nsd}$ برداری متشکل از ماتریس واحد برای ضریب a_0 و m بردار از متغیرهای $\boldsymbol{Z}^j$ هستند. همچنین، لازم به ذکر است که تابع بهینه‌سازی در فرایند رگرسیون‌گیری بر مبنای کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا مقید شده است، و مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{SSE} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_a - y_p)^2}{N} \tag{۵}$$

که در آن، y_a مقدار هدف و y_p برآورد مدل است. جستجو برای دست‌یابی به بهترین شکل از توابع چندجمله‌یی بر اساس الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و فرایند رگرسیون‌گیری هنگامی خاتمه می‌یابد که تعداد بیشینه‌ی داده‌های تولیدی، بیشینه‌ی تعداد جملات در تابع ریاضی هدف و یا یک مقدار مشخص از خطا حاصل شود.

در فرایند ساخت مدل‌های مبتنی بر چندجمله‌یی‌های تکاملی، تعدادی قید جهت کنترل مدل‌های خروجی مد نظر قرار می‌گیرد. در این فرایند، این امکان وجود دارد که مدل‌های متفاوتی حاصل شود که در سناریوهای مختلف می‌توانند اطلاعات متمایزی به همراه داشته باشند. بر اساس رگرسیون‌گیری به روش تکاملی، فرایند با یک مقدار میانگین ثابت از مقادیر خروجی آغاز می‌شود. با افزایش تکامل در هر چرخه، به تدریج پارامترهای بیشتری جهت دست‌یابی به رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل مشارکت خواهند داشت. در شکل ۳، الگوریتم روش EPR مشاهده می‌شود.

میزان دقت در هر مرحله از فرایند اخیر بر اساس ضریب R تعیین می‌شود:

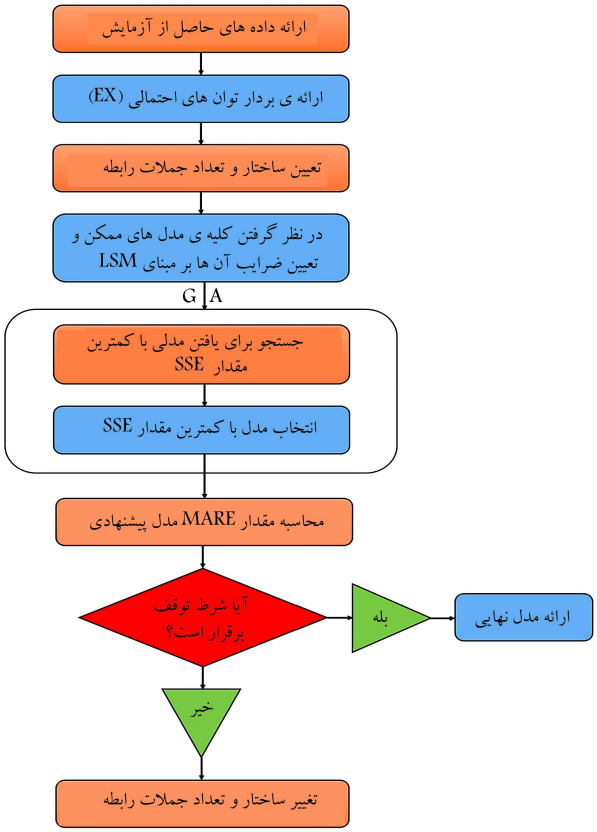
$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_a - y_p)^2}{\sum_{i=1}^{N} (y_a - \bar{y}_a)^2}} \qquad (6)$$

که در آن، $\bar{y}_a$ میانگین مقادیر هدف و N تعداد داده‌هایی است که بر مبنای آن، محاسبه‌ی ضریب R انجام می‌شود. اگر برازش مدل، قابل‌قبول نباشد و یا با معیارهای پذیرش انطباق نداشته باشد، مدل موجود تکامل می‌یابد تا مدل جدید حاصل شود.

۴. تخمین عرض مؤثر در دیوارهای L- شکل

۱.۴. ضوابط آیین‌نامه‌ها در تخمین عرض مؤثر

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، تأخیر برشی می‌تواند منجر به کاهش سختی و افزایش تنش و کرنش در مقطع المان سازه‌یی شود، که معمولاً تأثیر آن به



شکل ۳. الگوریتم روش رگرسیون چندجمله‌یی تکاملی EPR.[۳۳]

صورت ضریب تمرکز تنش[۳۴ و ۳۵] و یا ضریب کاهش در عرض مؤثر مقطع،[۳، ۳۶ و ۳۷] لحاظ می‌شود. از میان دو ضریب مطروحه، ضریب کاهشی که در محاسبه‌ی عرض مؤثر بال منظور می‌شود، کاربردی‌تر است، که در مراجع مختلف به این موضوع اشاره شده است.[۳۸]

به منظور تسهیل در ارزیابی عملکرد دیوارهای L- شکل، مفهوم عرض مؤثر[۱۳] مطرح شده است، که در آن، بخشی از بال یا جان مقطع در معرض تنشی با شدت ثابت قرار دارد و آرماتورهای طولی ناحیه‌ی اخیر جهت مقابله با لنگر خمشی وارده به مقطع مشارکت دارند.[۱۱]

ری[۱۴] (۱۹۹۵)،[۳۹] عرض مؤثر مقطع را عمود بر جهت بارگذاری اعمال شده در نظر گرفته است، که مقدار آن بر مبنای توزیع کرنش و با استفاده از معادله‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$b_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i w_i}{\varepsilon_{\max}} \qquad (7)$$

که در آن، ε_i کرنش محوری المان فشاری در بتن، w_i عرض المان و نیز ε_{max} بیشینه‌ی کرنش المان فشاری در طول مقطع دیوار هستند.

در این بین، آیین‌نامه‌های مختلف، مقادیر متفاوتی را به عنوان تخمینی از عرض مؤثر دیوار مطرح کرده‌اند. به عنوان مثال، آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸،[۴۰] یک چهارم ارتفاع دیوار را تخمینی از عرض مؤثر دیوار پیشنهاد داده و آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا)،[۴۱] نیز همین مقدار را جهت محاسبه‌ی عرض مؤثر مقاطع بالدار توصیه کرده است. در برخی از پژوهش‌ها به ناکارآمدی مقدار اخیر در تخمین عرض مؤثر اشاره شده است، که متأثر از وقوع تأخیر برشی است.[۱۱، ۱۷، ۲۱ و ۴۲] این موضوع برای مقادیر پیشنهادی سایر آیین‌نامه‌های طراحی نیز صادق است. از همین رو، در طی سال‌ها، مطالعات و پژوهش‌های گسترده‌یی به منظور ارزیابی دقیق‌تر و ساده‌تر آثار تأخیر برشی و تعیین عرض مؤثر در دیوارهای با مقطع غیرمستطیلی انجام شده است.

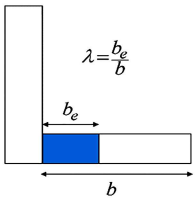
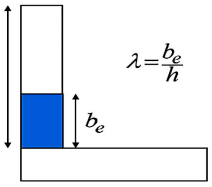
از سوی دیگر، آیین‌نامه‌ی CEN [۱۵] برای دیوارهای غیرمستطیلی که از به هم پیوستن چند دیوار مستطیلی به وجود آمده‌اند، کمترین مقدار از بین: الف) طول بال مقطع، ب) نصف فاصله میان دو جان مجاور و ج) یک‌چهارم ارتفاع دیوار را به عنوان عرض مؤثر در نظر گرفته است.[۴۳] در حالی که در آیین‌نامه‌ی UBC [۱۶]،[۴۴] عرض مؤثر تا بیشینه‌ی ۱۰٪ ارتفاع دیوار لحاظ شده است. همچنین بعضاً در فرایند طراحی، از عرض مؤثر پیشنهاد شده برای تیرها در آیین‌نامه‌ی BS [۱۷]،[۴۵] جهت محاسبه‌ی عرض مؤثر در دیوارها استفاده می‌شود، که جزئیات مربوط به آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

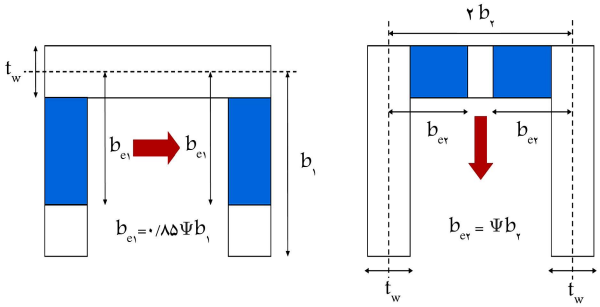
در این ضابطه، نخست ضریب بی‌بُعدی به نام ψ مطابق جدول ۵، بر مبنای مقدار b/H تعریف شده است، که در آن، H ارتفاع مقطع است و سپس از حاصل‌ضرب مقدار ψ در طول بال، عرض مؤثر مقطع برآورد می‌شود.[۳۹ و ۴۵]

جدول ۵. مقادیر ضریب عرض مؤثر در آیین‌نامه‌ی BS.[۴۵]

b/H	ψ
۰	۱
۰/۰۵	۰/۸۲
۰/۱	۰/۶۸
۰/۲	۰/۵۲
۰/۴	۰/۳۵

جدول ۶. تعیین رابطه‌ی رگرسیونی پارامتر بی‌بعد λ جهت محاسبه‌ی عرض موثر در دیوارهای L- شکل.

نوع دیوار		نمایش هندسی مقطع	شماره رابطه	روابط متناظر جهت محاسبهٔ پارامتر بی‌بعد λ	R
بال کوچک مقطع	کوتاه		(۹)	$۰٫۲۹۹۶۵ + ۲٫۷۹۳۷\Pi_۱ - ۳۸۱٫۸۸\Pi_۱\Pi_۲ + ۱۲۹۶۸\Pi_۱\Pi_۲^۲$	۰٫۸۷
	رفتار ترکیبی		(۱۰)	$۰٫۲۴۸۸۴ + ۴۵٫۰۸۹\Pi_۲ + ۲۰٫۶۳۳\Pi_۱^۲ - ۶۴۳٫۶۴\Pi_۱\Pi_۲$	۰٫۸۹
	لاغر		(۱۱)	$۰٫۱۹۱۸۱ + ۳٫۶۷۱۶\Pi_۱ + ۲۰٫۶۱۸\Pi_۲ - ۱۲۳٫۴۸\Pi_۱\Pi_۲$	۰٫۸۵
بال بزرگ مقطع	کوتاه		(۱۲)	$۰٫۲۰۲۲۱ + ۲٫۵۳۹\Pi_۱ + ۵٫۶۳۰۷\Pi_۱ - ۱۹۹٫۳۴\Pi_۱\Pi_۲$	۰٫۹۱
	رفتار ترکیبی		(۱۳)	$-۰٫۰۷۶۶۵۲ + ۵٫۷۴۳۹\Pi_۱ + ۹۲٫۸۲۸\Pi_۲ - ۷۶۹٫۷۴\Pi_۱\Pi_۲$	۰٫۸۵
	لاغر		(۱۴)	$۰٫۱۱۷۳۱ + ۴٫۸۷۶۵\Pi_۱ + ۶۰٫۸۱۲\Pi_۲ - ۷۷۲٫۴\Pi_۱\Pi_۲$	۰٫۹۱



شکل ۴. محاسبه‌ی عرض مؤثر بال و جان در آیین‌نامه‌ی BS.[۴۵]

لازم به ذکر است که ضرایب پیشنهادی جدول ۵ برای تیرهای طره‌یی تحت بار گسترده‌ی یکنواخت بوده و اثر بار محوری در آن لحاظ نشده است، که این موضوع می‌تواند دقت ضرایب پیشنهادی برای محاسبه‌ی عرض مؤثر دیوارهای برشی را تحت‌الشعاع قرار دهد.

همان‌طور که اشاره شد، بیشتر روابط پیشنهاد شده جهت تخمین عرض مؤثر در مقاطع غیرمستطیلی، ارتفاع دیوار را به عنوان پارامتر تعیین‌کننده معرفی کرده‌اند. در حالی که بر اساس مطالعات خالو و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۴] دو پارامتر نسبت بار محوری (ALR) [۱۸] و تغییرمکان جانبی نسبی[۱۹] به عنوان کمیت‌های تعیین‌کننده در مقدار عرض مؤثر مقاطع بالدار مطرح هستند. در نظر نگرفتن پارامترهای تأثیرگذار و کافی در روابط مذکور، سبب بروز ابهاماتی می‌شود. به عنوان مثال، نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که رابطه‌ی پیشنهادی در آیین‌نامه‌ی UBC، مقادیر بسیار اندکی را برای عرض مؤثر مقطع در نظر گرفته است و طراحی بر مبنای آن غیراقتصادی خواهد بود. در مقابل، روابط آیین‌نامه‌های ACI-۳۱۸ و CEN نیز در مواردی عرض مؤثر مقطع را بیشتر از آنچه هست، ارائه می‌دهند و استفاده از ضوابط مذکور در طراحی، غیرمحافظه‌کارانه خواهد بود.

با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان نتیجه گرفت که کارایی رابطه‌ی ارائه شده برای عرض مؤثر بر مبنای آیین‌نامه‌ی BS، با توجه به لحاظ کردن دو پارامتر اساسی طول بال و ارتفاع دیوار، در قیاس با روابط دیگر عملکرد بهتری دارد. همچنین روابطی که در سال‌های اخیر به عنوان جایگزین برای تعیین عرض مؤثر ارائه شده‌اند، بعضاً فرم کلی ضابطه‌ی اخیر را الگو قرار داده و روابطی را مشابه آن پیشنهاد کرده‌اند.[۲۱]

۲.۴. ارائه‌ی روابط پیشنهادی در تخمین عرض مؤثر

در بخش حاضر با استفاده از رگرسیون‌گیری به روش EPR، پس از تعیین توزیع کرنش‌های محوری حاصل از شبیه‌سازی عددی، ۴۲ نمونه دیوار برشی بتنی با مقطع L- شکل و با بال‌های نابرابر، روابطی کاربردی به منظور برآورد عرض مؤثر در بال و جان مقاطع L- شکل ارائه و در بخش آتی با مقادیر پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی مقایسه شده‌اند. در ادامه، روابط جداگانه‌یی برای عرض مؤثر دیوارهای کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر به تفکیک پیشنهاد شده است. با توجه به مطالعه‌ی تحلیلی انجام گرفته پیرامون مقدار عرض مؤثر مقطع، پارامتر بی‌بُعد λ به منظور ارائه‌ی روابطی جهت محاسبه‌ی عرض مؤثر معرفی شده است.

همچنین، با توجه به نتایج مطالعات خالو و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۴] که مقدار بار محوری وارده و جابه‌جایی جانبی نسبی سازه را به عنوان پارامترهای مهم در رفتار دیوارهای برشی بالدار مطرح کرده‌اند، کمیت‌های اخیر به عنوان پارامتر بی‌بُعد در روابط رگرسیونی پیشنهادی استفاده می‌شوند رابطه‌ی ۸:

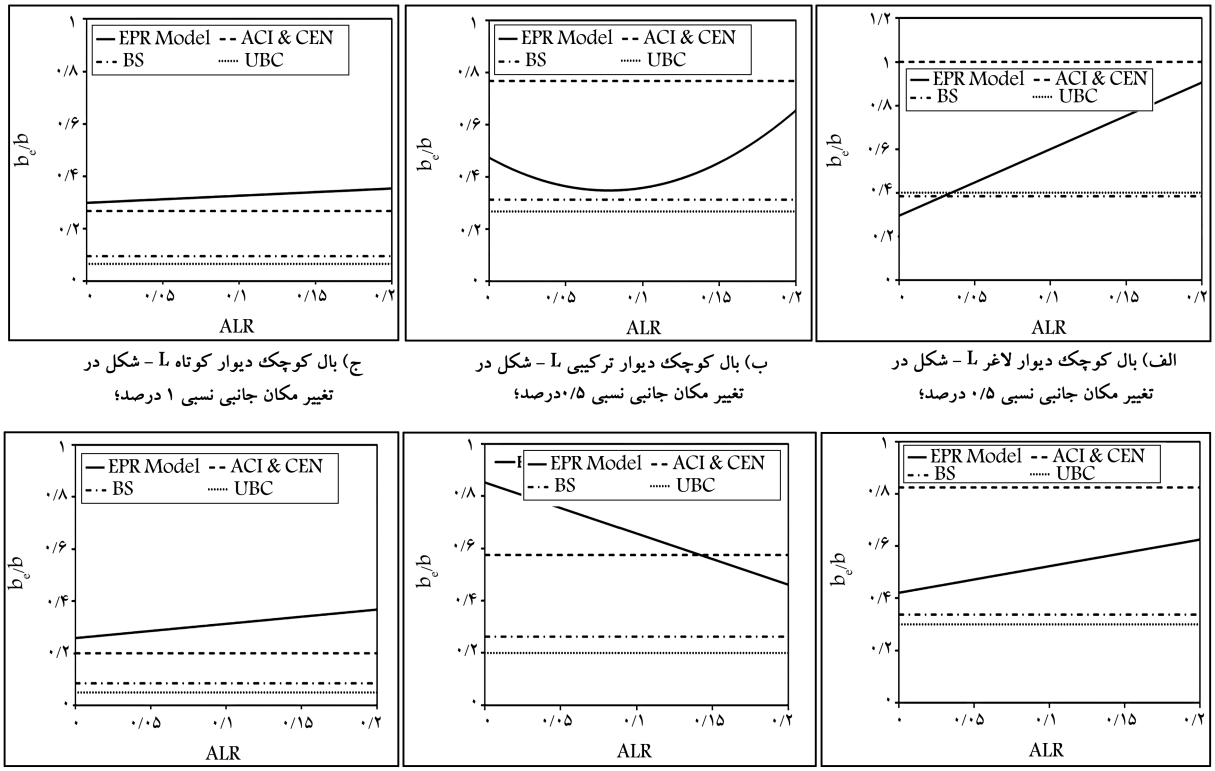
$$\Pi_۱ = \mathrm{ALR} = \frac{N}{f'_c A_g} \quad ; \quad \Pi_۲ = \mathrm{Drift} = U_L/H \qquad (۸)$$

جهت سنجش دقت یک مدل رگرسیونی دو رویکرد وجود دارد: رویکرد اول، استفاده از داده‌های به کار رفته در فرایند ساخت مدل جهت بررسی دقت روابط حاصل است؛ و رویکرد دوم، استفاده از داده‌هایی کاملاً مجزا از داده‌های به کار رفته در مدل به منظور برآورد دقت مدل به دست آمده است. اکنون در جهت ارزیابی کارایی روابط فوق برای عرض مؤثر دیوارهای با مقطع L- شکل، از طریق رویکرد اول، در جدول ۶، مقادیر ضرایب تعیین (R) برای هر یک از روابط پیشنهادی برای دیوارهای کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که برای روابط متناظر با عرض مؤثر مقطع، توان بیشینه و بیشترین مقدار تعداد جملات به ترتیب مقادیر ۲ و ۴ لحاظ شده است.

۵. شرح و تفسیر نتایج

۱.۵. مقایسه‌ی روابط پیشنهادی با ضوابط آیین‌نامه‌ها

به منظور مقایسه‌ی بهتر مقادیر عرض مؤثر حاصل شده از طریق روابط پیشنهادی با ضوابط آیین‌نامه‌یی در شکل‌های ۵ و ۶، نمودارهای تغییرات عرض مؤثر به ازاء



الف) بال کوچک دیوار لاغر L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۵ درصد؛

ب) بال کوچک دیوار ترکیبی L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۵درصد؛

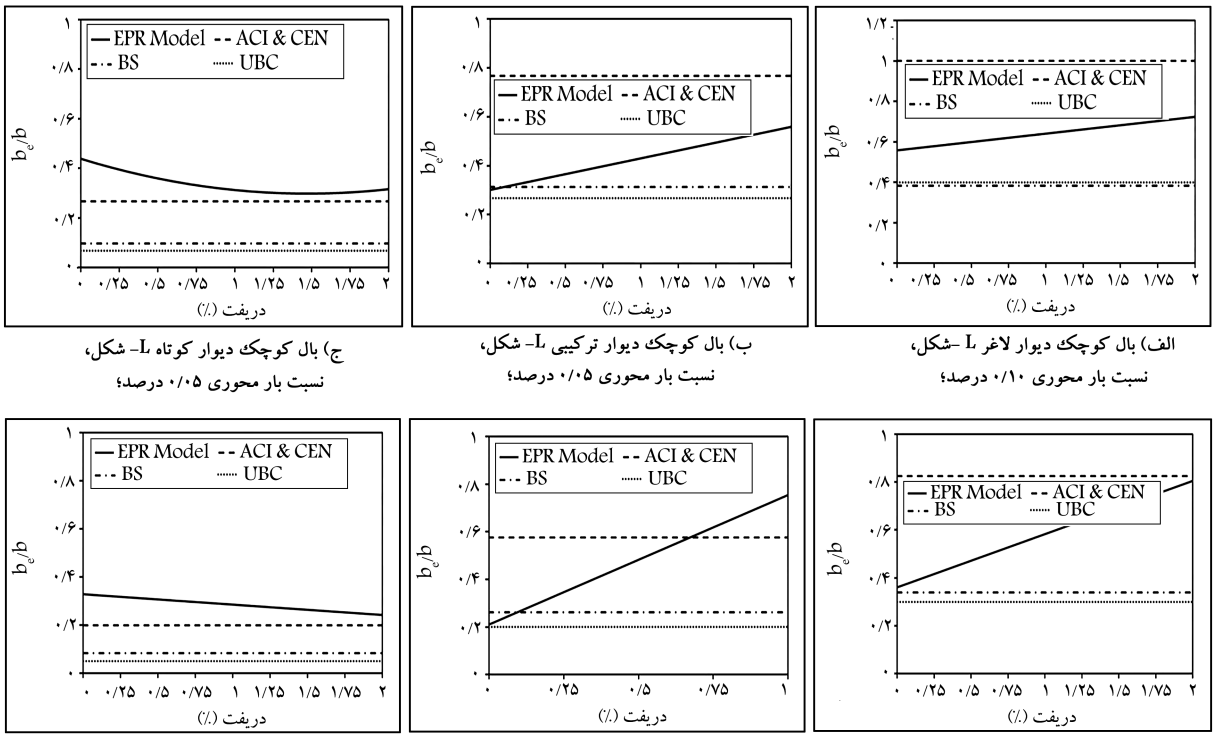
ج) بال کوچک دیوار کوتاه L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۱ درصد؛

د) بال بزرگ دیوار لاغر L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۵ درصد؛

ه) بال بزرگ دیوار ترکیبی L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۱ درصد؛

و) بال بزرگ دیوار کوتاه L – شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۱ درصد.

شکل ۵. تغییرات عرض مؤثر در دیوارهای با مقطع L- شکل با تغییرات نسبت بار محوری (ALR).



الف) بال کوچک دیوار لاغر L –شکل، نسبت بار محوری ۰/۱۰ درصد؛

ب) بال کوچک دیوار ترکیبی L– شکل، نسبت بار محوری ۰/۰۵ درصد؛

ج) بال کوچک دیوار کوتاه L– شکل، نسبت بار محوری ۰/۰۵ درصد؛

د) بال بزرگ دیوار لاغر L – شکل، نسبت بار محوری ۰/۰۵ درصد؛

ه) بال بزرگ دیوار ترکیبی L – شکل، نسبت بار محوری ۰/۰۵ درصد؛

و) بال بزرگ دیوار کوتاه L – شکل، نسبت با رمحوری ۵/۰ درصد.

شکل ۶. تغییرات عرض مؤثر در دیوارهای با مقطع L- شکل با تغییرات درصد تغییرمکان جانبی نسبی سازه (Drift).

جدول ۷. نسبت میانگین خطای نسبی روابط پیشنهادی به میانگین خطای نسبی ضوابط مطرح شده در آیین‌نامه‌ها.

شماره‌ی رابطه	ACI [۴۰]	CEN [۴۳]	UBC [۴۴]	BS [۴۵]
(۹)	۱/۵۶	۱/۵۶	۰/۶۷	۰۵۹
(۱۰)	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۷۲
(۱۱)	۱/۹۴	۱/۹۴	۰/۵۹	۰/۶۰
(۱۲)	۲/۴۳	۲/۴۳	۰/۷۰	۰/۵۴
(۱۳)	۰/۸۰	۰/۸۰	۱/۹۶	۵/۷۸
(۱۴)	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۹۳	۱/۴۵

افزایش بار محوری و تغییرمکان جانبی نسبی ترسیم و نمایش داده شده‌اند. همان طورکه در بخش قبل اشاره شد، روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها، ضوابطی ساده و بر اساس ضریبی از ارتفاع دیوار یا عرض مقطع هستند. به عبارت دیگر، آثار ناشی از بار محوری و تغییرمکان جانبی نسبی در محاسبه‌ی آنها لحاظ نمی‌شود. لذا چگونگی تغییرات عرض مؤثر با پارامترهای ذکر شده به صورت یک خط افقی خواهد بود.

۲.۵. سنجش کارایی روابط پیشنهادی

حال به منظور بررسی کارایی روابط پیشنهادی جهت تخمین عرض مؤثر دیوارهای با مقطع L- شکل از رویکرد دوم، که در بخش قبل تعریف شده است، استفاده و ۲۰٪ از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی به صورت جداگانه به روابط به دست آمده به همراه روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های: ACI، CEN، UBC و BS ارائه شده است. همچنین میانگین قدرمطلق درصد اختلاف مقادیر تخمینی برای عرض مؤثر با مقادیر واقعی نظیر، برای هرکدام محاسبه و سپس نسبت مقادیر روابط پیشنهادی به مقدار نظیر ضوابط آیین‌نامه‌ها تعیین و در جدول ۷ ارائه شده است. اگر نسبت مذکورکمتر از ۱ باشد، نشان از دقت بیشتر روابط پیشنهادی در قیاس با ضوابط آیین‌نامه‌ها دارد.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، بیشتر اعداد جدول ۷ کمتر از ۱ هستند، که حاکی از دقت مطلوب و برتری ضوابط پیشنهادی در برآورد عرض مؤثر مقطع در دیوارهای غیرمستطیلی با مقطع L- شکل است. همچنین در جهت تصدیق نتایج پژوهش‌های انجام شده پیرامون کارایی ضوابط آیین‌نامه‌های مختلف در برآورد عرض مؤثر، در صورتی که نتایج به دست آمده از مدل EPR به عنوان تقریبی از مقادیر واقعی عرض مؤثر تلقی شود، آن‌گاه به‌خوبی ملاحظه می‌شود که عرض مؤثر پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CEN در بسیاری از موارد بیشتر از مقدار واقعی است و در مقابل، عرض مؤثر پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌ی UBC، عمدتاً به طور قابل‌ملاحظه‌یی کمتر از مقدار حقیقی آن است، که منجر به طراحی غیراقتصادی می‌شود. در این بین همان‌طورکه پیش‌تر نیز اشاره شد، ضوابط آیین‌نامه‌ی BS، مقادیر منطقی‌تری از عرض مؤثر را ارائه می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، روابطی کاربردی و مهندسی جهت ارزیابی عرض مؤثر در دیوارهای برشی بتنی با مقطع L- شکل پیشنهاد شده است که مبتنی بر روش رگرسیون‌گیری چندجمله‌یی تکاملی (EPR) است. ابتدا، ۴۲ دیوار برشی بتنی L- شکل با بال‌های نابرابر به عنوان نماینده‌یی از دیوارهای با عملکرد برشی، برشی ـ خمشی و خمشی در برنامه‌ی FlashLab ساخته و سپس مطالعات عددی آنها در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. نتایج مدل‌سازی عددی در قالب تعیین توزیع جابه‌جایی و کرنش محوری تحت بارگذاری چرخه‌یی وارده به دیوارها بوده است، که در آن آثار پدیده‌ی تأخیر برشی لحاظ شده است. با استفاده از روش رگرسیون‌گیری EPR و با تعریف پارامتر بی‌بُعد λ، روابطی جهت تخمین عرض مؤثر در دیوارهای L- شکل ارائه و سنجش کارایی آنها بر اساس محاسبه‌ی ضریب تعیین R صورت گرفته است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود مقدار آن در بازه‌ی ۰/۸۵ تا ۰/۹۱ قرار دارد، که گواه بر دقت نتایج به دست آمده است. در انتها و به ازاء سطوح مختلف از نسبت بار محوری وارده و نیز درصد جابه‌جایی جانبی نسبی، مقادیر عرض مؤثر پیشنهادی از روابط رگرسیونی، با مقادیر حاصل از آیین‌نامه‌های بین‌المللی معتبر مقایسه شده است. برخلاف ضوابط آیین‌نامه‌ها که مقدار ثابتی را به عنوان عرض مؤثر توصیه می‌کنند، روابط پیشنهادی متأثر از نسبت بار محوری وارده به دیوار و نیز درصد جابه‌جایی جانبی نسبی آن است و ارزیابی دقیق‌تری از عرض مؤثر را در دیوارهای برشی بتنی L- شکل به همراه خواهد داشت. گفتنی است به منظور مقایسه‌ی دقت روابط مطرح شده، خطای ناشی از برآورد عرض مؤثر برای مجموعه‌یی شامل ۲۰٪ از داده‌ها، که در تهیه‌ی روابط ارائه شده به کار نرفته بودند، تعیین و نسبت مقادیر آن محاسبه شده است، که به‌خوبی دقت مطلوب روابط پیشنهادی و نیز رابطه‌ی آیین‌نامه‌ی BS را در تعیین عرض مؤثر در قیاس با سایر ضوابط موجود مشخص کرده است.

لازم به ذکر است که علی‌رغم کمتربودن دقت ضوابط آیین‌نامه‌ها در برآورد عرض مؤثر مقاطع L- شکل، با توجه به سهولت در به کارگیری آنها، توصیه می‌شود که در مراحل اولیه‌ی طراحی و به منظور دست‌یابی به برآوردی از ابعاد، از روابط پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های معتبر طراحی سازه‌های بتنی استفاده شود و سپس در مراحل بعدی، جهت تحلیل دقیق‌تر سازه‌ی دیوار به کمک برنامه‌های رایانه‌یی، روابط ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر به کار گرفته شود.

پانوشت‌ها

1. shear-lag
2. Palermo
3. Brueggen
4. Shi & Wang
5. Zhang & Li
6. Liu
7. Ni & Cao
8. Hoult
9. Lu & Li
10. evolutionary polynomial regression

11. concrete damage plasticity
12. Jiaxing
13. effective width
14. Ray
15. european seismic design code
16. uniform building code
17. british standard
18. axial load ratio
19. drift

منابع (References)

1. Hassan, M. and El-Tawil, Sh. "Tension flange effective width in reinforced concrete shear walls",*Structural Journal*,**100**(3), pp. 349-356 (2003).
2. Zhang, Y.-H. and Lin, L.-X. "Shear lag analysis of thin-walled box girders based on a new generalized displacement", *Engineering Structures*, **61**, pp. 73-83 (2014).
3. Castro, J.M., Elghazouli, A.Y. and Izzuddin, B.A. "Assessment of effective slab widths in composite beams", *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(10), pp. 1317-1327 (2007).
4. Reissner, E. "Analysis of shear lag in box beams by the principle of minimum potential energy", *Quarterly of Applied Aathematics*, **4**(3), pp. 268-278 (1946).
5. Kuzmanović, B.O. and Graham, H.J. "Shear lag in box girders", *Journal of the Structural Division*, **107**(9), pp. 1701-1712 (1981).
6. Dezi, L. and Mentrasti, L. "Nonuniform bending-stress distribution (shear lag)", *Journal of Structural Engineering*, **111**(12), pp. 2675-2690 (1985).
7. Song, Q.-G. and Scordelis, A.C. "Shear-lag analysis of T-, I-, and box beams", *Journal of Structural Engineering*, **116**(5), pp. 1290-1305 (1990).
8. Cambronero-Barrientos, F., Diaz-del-Valle, J. and Martinez-Martinez, J.-A. "Beam element for thin-walled beams with torsion, distortion, and shear lag", *Engineering Structures*, **143**, pp. 571-588 (2017).
9. Argyridi, A.K. and Sapountzakis, E.J. "Advanced analysis of arbitrarily shaped axially loaded beams including axial warping and distortion", *Thin-Walled Structures*, **134**, pp. 127-147 (2019).
10. Gara, F., Ranzi, G. and Leoni, G. "Simplified method of analysis accounting for shear-lag effects in composite bridge decks", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(10), pp. 1684-1697 (2011).
11. Zhang, Zh. and Li, B. "Shear lag effect in tension flange of RC walls with flanged sections", *Engineering Structures*, **143**, pp. 64-76 (2017).
12. Luo, D., Zhang, Zh. and Li, B. "The effects of shear deformation in non-rectangular steel reinforced concrete structural walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **169**, 106043 (2020).
13. Khaloo, A.R., Tabiee, M. and Abdoos, H. "Shear lag effect on non-rectangular RC shear walls: a review of the literature", *7th international Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, Tehran, Iran, p. 11 (In Persian) (2011).
14. Palermo, D., Abdulridha, A. and Charette, M. "Flange participation for seismic design of reinforced concrete shear walls", *Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Canada (2007).
15. Kheyroddin, A. and Mortezaei, A. "Investigation of influential variables in flange effective width of reinforced concrete shear walls", *9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Canada (2007).
16. Brueggen, B.L. "Performance of T-shaped reinforced concrete structural walls under multi-directional loading", *Diss.* University of Minnesota (2009).
17. Brueggen, B.L., Catherine E.F. and Sri, S. "T-shaped RC structural walls subjected to multidirectional loading: test results and design recommendations", *Journal of Structural Engineering*, **143**(7), 04017040 (2017).
18. Shi, Q.-X. and Wang, B. "Simplified calculation of effective flange width for shear walls with flange", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **25**(12), pp. 558-577 (2016).
19. Liu, C., Wei, X., Wu, H. and et al. "Research on shear lag effect of t-shaped short-leg shear wall", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **61**(3), pp. 602-610 (2017).
20. Ni, X. and Cao, Sh. "Shear lag analysis of I-shaped structural members", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **27**(10), e1471 (2018).
21. Hoult, R.D. "Shear lag effects in reinforced concrete C-shaped walls", *Journal of Structural Engineering*, **145**(3), 04018270 (2019).
22. Lu, N. and Li, W. "Analytical study on the effective flange width for T-shaped shear Walls", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **64**(1), pp. 253-264 (2020).
23. Khaloo, A.R., Tabiee, M. and Abdoos, H. "Analytical study of distribution of shear lag-induced stress in non-rectangular reinforced concrete shear walls", *12th International Congress on Civil Engineering*, Mashhad, Iran, P. 8 (In Persian) (2021).
24. Khaloo, A.R., Abdoos, H. and Tabiee, M. "A novel approach to the parametric study on the effective flange width of non-rectangular reinforced concrete shear walls", *Journal of Concrete Structures and Materials*, **6**(1), pp. 138-161 (2021).
25. Khaloo, A., Tabiee, M. and Abdoos, H. "A numerical laboratory for simulation of flanged reinforced concrete shear walls", *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, **6**(3), pp. 92-102 (2022).
26. Zhang, Zh., Luo, D. and Li,B. "Strain nonlinearity and shear lag effect in compressive flange of reinforced concrete structural walls", *ACI Structural Journal*, **118**(3), pp. 199-208 (2021).
27. Arnott, Ke. "Shear wall analysis- new modelling, same answers", *Structural Engineer*, **83**(3), pp. 20-22 (2005).
28. Park, R. and Paulay Th. "Reinforced concrete structure" *In John Wiley & sons, Department of Civil Engineering, University of Canterbury*, Christchurch, pp.1-784, New Zealand (1991).
29. Kent, D.Ch. and Park, R. "Flexural members with confined concrete", *Journal of the Structural Division*, **97**(7), pp. 1969-1990 (1971).

30. Barth, K.E. and Wu, H. "Efficient nonlinear finite element modeling of slab on steel stringer bridges", *Finite Elements in Analysis and Design*, **42**(14-15), pp. 1304-1313 (2006).

31. Jiaxing, M. "Experimental and analytical investigations on seismic behavior of non-rectangular reinforced concrete squat walls", *Doctoral thesis, Nanyang Technological University*, Singapore (2017).

32. Giustolisi, O. and Savic, D.A. "Advances in data-driven analyses and modelling using EPR-MOGA", *Journal of Hydroinformatics*, **11**(3-4), pp. 225-236 (2009).

33. Ahangar-Asr, A., Faramarzi, A., Mottaghifard, N. and et al. "Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression", *Computers & Geosciences*, **37**(11), pp. 1860-1869 (2011).

34. Lertsima, Ch., Chaisomphob, T., Yamaguchi, E. and et al. "Deflection of simply supported box girder including effect of shear lag", *Computers & Structures*, **84**(1-2), pp. 11-18 (2005).

35. Sa-nguanmanasak, J., Chaisomphob, T. and Yamaguchi, E. "Stress concentration due to shear lag in continuous box girders", *Engineering Structures*, **29**(7), pp. 1414-1421 (2007).

36. Amadio, C. and Fragiacomo, M. "Effective width evaluation for steel–concrete composite beams", *Journal of Constructional Steel Research*, **58**(3), pp. 373-388 (2002).

37. Lin, Zhi. and Zhao, J. "Revisit of AASHTO effective flange-width provisions for box girders", *Journal of Bridge Engineering*, **16**(6), pp. 881-889 (2011).

38. He, X., Xiang, Y., Qiu, X. and et al. "Shear lag including axial balance of box beams by finite segment model", *Journal of Constructional Steel Research*, **189**, 107043 (2022).

39. Ray, S.S. "Reinforced concrete: analysis and design", *Cambridge University Press* (1995).

40. A.C.I.C. 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard", *Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*, in: American Concrete Institute (2019).

41. *Iranian Concrete Code of Practice (ABA)*, "Planning and management organization", PN, 120 (2001).

42. Waugh, J.D. "Nonlinear analysis of T-shaped concrete walls subjected to multi-directional displacements", *Iowa State University* (2009).

43. E. CEN, 8, "Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for building", *Br. Stand. Institute*, London, UK. (2004).

44. *Uniform Building Code International council of Building Officials*, "ICBO (International Council of Building Officials)", Whittier, CA, (1994).

45. B.S. BS5400, Steel, "Concrete and composite bridges, Part 5, Code of practice for design of composite bridges", *Br. Stand. Institution*, London (1979).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۷۳-۸۱، (یادداشت فنّی)

Research Note

بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مسجدسلیمان)

فرشته سلطانی افارانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
نوید خیاط* (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

مطالعه‌ی رفتار مکانیکی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با توجه به نفت‌خیز بودن کشور ایران، اهمیت بالایی دارد. در پژوهش حاضر، فرایند تثبیت از طریق افزودن آهک به خاک رسی (CH) آلوده به نفت واقع در استان خوزستان بررسی شده است. در این راستا، ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌یی خاک آلوده به مقادیر ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد نفت و تثبیت شده با آهک به میزان‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی ساخته شده و در سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز، تحت آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و آنالیز ریزساختاری قرار گرفته‌اند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزودن آهک به میزان ۶٪، مقاومت تک‌محوری بیشترین افزایش (۴۱۶/۶٪) را داشته است. همچنین با افزایش سن عمل‌آوری، با صورت پذیرفتن واکنش‌های پوزولانیک و تبادل کاتیونی میان کانی‌های خاک رسی با آهک، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نرخ افزایشی داشته است.

واژگان کلیدی: تک‌محوری، ریزساختار، مقاومت خاک رس آلوده به نفت، تثبیت، آهک.

fereshteh.soltani2021@gmail.com
khayat@iauahvaz.ac.ir

۱. مقدمه

از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک سومین جزء اصلی محیط زیست برای بشر تلقی می‌شود. خاک‌ها بستر اصلی رشد گیاهان هستند و همچنین پایگاه جامعه‌ی انسانی را نیز تشکیل می‌دهند. از طرفی، برخلاف آلودگی آب و هوا، که به سادگی قابل تعیین است، آلودگی خاک‌ها به مواد شیمیایی و سمی به آسانی قابل اندازه‌گیری و مشاهده نیست.[۱] برخی از انواع آلودگی‌ها عبارت‌اند از: آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی، که خود شامل آلودگی به: نفت، بنزین، گازوئیل و انواع سوخت‌های فسیلی و ... هستند،[۲] که موجب تغییر در پارامترهای مقاومتی و رفتار مهندسی خاک‌ها می‌شوند.[۳]

پرتلینا[۱] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴] در پژوهش خود دریافته‌اند که افزایش میزان آلودگی خاک‌ها به مواد نفتی، موجب کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک (MDD)[۲] و کاهش رطوبت بهینه‌ی (OMC) [۳] خاک رسی شده است. اوجوری[۴] و همکاران (۲۰۱۸)،[۵] نیز طبق مشاهده‌های خود در پژوهشی بیان کردند که رفتار ژئوتکنیکی خاک، از قبیل: مقاومت تک‌محوری (UCS)،[۵] چسبندگی[۶] و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک آلوده به نفت در مقایسه با خاک‌های بدون آلودگی کمتر بوده است.[۶-۱۰]

بدین ترتیب با توجه به مروری بر مطالعات پیشین، وجود آلاینده‌های نفتی در خاک باعث تضعیف خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها شده است. لذا برای کاهش خطرهای احتمالی، راهکارهایی از قبیل تثبیت برای بهبود خصوصیات خاک‌ها ارائه شده است. تثبیت خاک روشی است که با هدف بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها جهت پیش‌بینی و بهبود ساختار خاک‌های گوناگون برای پروژه‌های مهندسی معرفی شده است.[۱۱-۱۳] از راه‌های موجود، استفاده از افزودنی‌ها در تثبیت خاک برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی و همچنین افزایش مقاومت تک‌محوری و یا بهبود مقاومت در برابر نیروهای محیطی است. زیتی[۷] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۴] و پام[۸] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۵] در پژوهش‌های خود به بررسی تأثیر افزودنی در مقاومت تک‌محوری پرداخته‌اند.[۱۶و۱۷]

برخی از افزودنی‌های مذکور، عبارت‌اند از: آهک، گچ، خاکستر چوب، خاکستر بادی، خاکستر پوسته‌ی برنج، قیر و سیمان و ...، که کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی، مقاومت و آثار سودمند دیگری را در خاک موجب می‌شوند.[۱۸-۲۲]

یکی از روش‌های رایج وکم‌هزینه جهت بهبود روابط خصوصیات خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، عمل تثبیت آن توسط آهک است. اضافه کردن آهک به خاک باعث به وجود آمدن واکنش‌هایی می‌شود که این واکنش‌ها درکوتاه‌مدت و بلندمدت باعث بهبود ویژگی‌هایی، از قبیل: کاهش حد روانی، شاخص خمیری، کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک، کاهش تورم، افزایش رطوبت بهینه، افزایش تراکم خاک،

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۲۷، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۱۶.
DOI:10.24200/J30.2022.60763.3123

و افزایش مقاومت تک‌محوری خاک می‌شود. روشنگر و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۳] به بررسی اثر تثبیت آهک پرداختند و نشان دادند که افزودن آهک می‌تواند باعث بهبود رفتار خاک رسی شود.[۲۴-۲۹]

آهک‌هایی که معمولاً برای پایدار کردن خاک‌های ریزدانه استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: آهک زنده (زودگیرا)، آهک دولومیتی، آهک آبی، آهک نیمه‌آبی و آهک هیدراته.[۹] در این میان، آهک هیدراته از ترکیب آهک زنده با آب ساخته شده است و ساختار شیمیایی آن با جذب هیدروژن از اکسیدکلسیم به هیدروکسیدکلسیم تبدیل می‌شود. آهک هیدراته با نام‌هایی نظیر: آهک مرده، آهک آب‌دیده، آهک شکفته و هیدروکسیدکلسیم نیز شناخته می‌شود. همچنین آهک یکی از افزودنی‌هایی است که با توجه به توانایی ایجاد واکنش‌های پوزولانی و همچنین تبادل کاتیونی بین ذرات و تشکیل ژل آلومینیم سیلیکات باعث منسجم شدن ذرات ناپایدار و پراکنده‌ی موجود در سطح خاک ریزدانه می‌شود و از طرفی با توجه قیمت به نسبت ارزان و فراوانی آن می‌تواند با صرف هزینه‌ی کم موجب بهبود خصوصیات خاک شود.[۲۱و۳۰]

امروزه در میان آلاینده‌های موجود در خاک، آلودگی خاک به آلاینده‌های نفتی، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر است. با توجه به تولید انبوه و روزافزون هیدروکربن‌های نفتی و وجود چاه‌ها و پالایشگاه‌های متعدد در نواحی مختلف استان خوزستان، از جمله منطقه‌ی مسجد سلیمان، مسئله‌ی جلوگیری از آسیب رساندن و نشت آلودگی‌های نفتی به زیرساخت‌ها، اهمیت خاصی دارد. به دنبال این آلودگی‌ها در پیرامون تأسیسات و چاه‌های نفتی در زمان بهره‌برداری از مناطق ذکر شده، نیاز به خاک‌برداری و تعویض خاک منطقه احساس می‌شود. این مسئله از طرفی موجب آسیب رساندن به محیط زیست می‌شود و صرفه‌ی اقتصادی نیز ندارد. بنابراین انتخاب روش مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت جهت استفاده از آن‌ها مستلزم بررسی بیشتر است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون تعدادی پژوهش بر روی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و تثبیت آن‌ها با استفاده از آهک صورت پذیرفته است؛ اما در پژوهش حاضر به بررسی تغییرات رفتار مقاومتی و آنالیز ریزساختاری (SEM, XRD) خاک‌های آلوده‌ی رسی با حالت خمیری بالا در منطقه‌ی مسجدسلیمان، که مخازن و تأسیسات نفتی متعددی دارد، از طریق افزودن آهک در درصدهای مختلف به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده در سن‌های عمل‌آوری مختلف پرداخته شده است. همچنین در پژوهش حاضر تلاش بر این بوده است که با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، درصد بهینه‌ی آهک برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت پیش‌بینی شود.

۲. مصالح مصرفی

۱.۲. خاک رس

خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، خاک تهیه شده از معادن نزدیک چاه‌های نفت شهرستان مسجدسلیمان[۱۰] از توابع استان خوزستان بوده است، که پس از خشک کردن در گرم‌خانه از الک نمره‌ی ۸ عبور داده شده است. بر اساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، شاخص خمیری خاک (PI)،[۱۱] عدد ۲۶٫۵ به دست آمده است، که در نهایت خاک مذکور به‌عنوان خاک رس با حالت خمیری بالا و با نام CH مطابق با سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)[۱۲] طبقه‌بندی شده است. همچنین پس از انجام آزمایش چگالی ویژه مطابق با استاندارد ۱۰ − ASTM D ۸۵۴،[۳۱] شاخص توده‌ی ویژه (Gs) برابر با ۲٫۵۹ شده است.

جدول ۱. آنالیز آهک مصرفی.

ترکیب شیمیایی	میزان (٪)
Cao	۷۲٫۰۴
Cl	۰٫۲۰۳
SiO_2	۰٫۹۵۴
MgO	۰٫۶۴۱
SrO	۰٫۳۰۵
Al_2O_3	۰٫۳۰۱
Fe_2O_3	۰٫۲۴
Na_2O	۰٫۱۳۴
K_2O	۰٫۱۱۰
P_2O_5	۰٫۰۳۵
Total	۹۹٫۹۷
$CaOH_2$	۹۲٫۱

۲.۲. آهک

آهک استفاده شده در پژوهش حاضر از نوعی آهک هیدراته (متشکل از ترکیب آهک زنده با آب)،[۱۴و۳۲] که از کارخانه‌ی برادران اخوان واقع در استان قم تهیه و آنالیز ترکیب‌های شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. آهک مصرفی، ساختاری بلوری بی‌رنگ داشته و ظاهر آن به شکل پودری و به رنگ سفید بوده است، که به منظور اختلاط بهتر و ایجاد واکنش با خاک رس از الک نمره‌ی ۶۰ عبور داده شده و به میزان‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی با خاک مخلوط شده است.[۳۳]

۳.۲. نفت

به منظور تعیین درصدهای نفت مصرفی پژوهش حاضر، چند نمونه خاک از سایت‌های مختلف آلوده به نفت تهیه و به وسیله دستگاه سوکسوله[۱۳] آزمایش شده‌اند، که با توجه به غلظت مشاهده شده در نتایج، مقادیر ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد حجمی میزان آلودگی به نفت در پژوهش حاضر انتخاب شده‌اند.[۳۴و۳۵] نفت خام سنگین تهیه و مرحله‌ی اول پالایش بر روی آن انجام شده است، به‌طوری که CO_2، گوگرد و آب نمک از آن گرفته شده و پس از انتقال به آزمایشگاه، به‌طور مصنوعی و اختلاط با دست، با خاک مخلوط شده است.

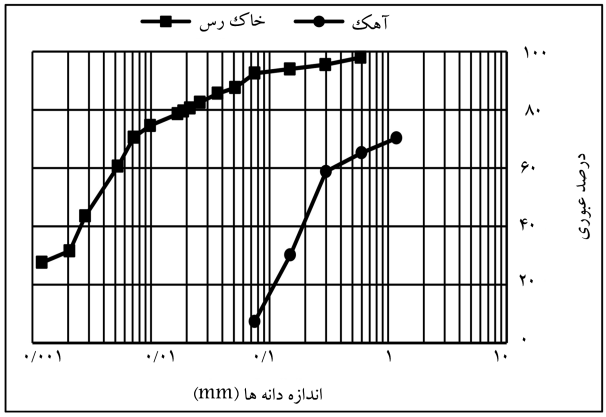
۳. آزمایش‌ها

۱.۳. آزمایش‌های شناسایی فیزیکی خاک

ابتدا خصوصیات مکانیکی و مقاومتی نمونه‌ی خاک خالص و سپس خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و نفت آزمایش شده‌اند. به منظور تعیین نوع خاک از نظر دانه‌بندی، آزمایش دانه‌بندی با الک مطابق با استاندارد ۶۳ − ASTMD۴۲۲،[۳۶] (شکل ۱) و تعیین حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTMD۴۳۱۸[۳۷] (جدول ۲) و وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی هر مخلوط نیز با آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D۱۵۵۷،[۳۸] صورت پذیرفته‌اند.

جدول ۲. نتیجه‌ی آزمایش حدود اتربرگ.

نوع خاک	سیستم دسته‌بندی یونیفاید	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری
Clay	CH	۵۴/۳	۲۷/۸	۲۶/۵



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک و آهک.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک.

EC(dS/m)	pH(٪)	CL(٪)	SO_3(٪)
۱/۵	۷/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳

۲.۳. آزمایش‌های شیمیایی خاک

هدف از انجام آزمایش‌های انجام شده، مشخص کردن پارامترهایی از قبیل، اسیدیته (pH) مطابق با استاندارد ASTMD۴۹۷۲،[۳۹] کلر (CL) مطابق با استاندارد ASTMD۱۴۱۱،[۴۰] هدایت الکتریکی (Ec) و سولفات (So_3) خاک مطابق با استاندارد BS۱۳۷۷،[۴۱] بوده است، که با استفاده از دستگاه‌های pH متر، هدایت‌سنج[۱۴] و سانتریفیوژ[۱۵] خاک اندازه‌گیری شده‌اند (جدول ۳).

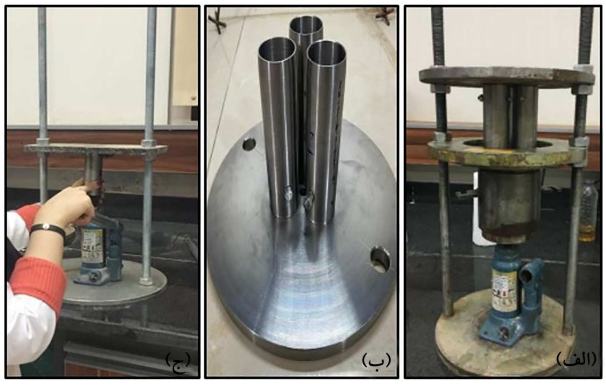
۳.۳. آزمایش‌های ریزساختاری

همچنین به‌منظور تشخیص ساختار شیمیایی و نوع کانی‌های رسی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) [۱۶] با بزرگ‌نمایی (۵ Kx) با هدف بررسی آنالیزمورفولوژی نانوساختارها و ترکیبات شیمیایی خاک بر روی نمونه‌های مکعبی صورت پذیرفته و آنالیز طیف‌سنج پراش اشعه‌ی ایکس(XRD)[۱۷] مطابق با استاندارد BS EN ۱۳۹۲۵ – ۲[۴۲] با هدف بررسی ساختار بلوری مواد بر روی خاک عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ انجام شده است. همچنین آنالیز اخیر جهت مشاهده‌ی ساختار و شناسایی فازهای ذرات عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ به‌کار می‌رود و نقطه‌ی اوج[۱۸] عناصر تشکیل‌دهنده را مشخص می‌سازد.

۴.۳. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D۲۱۶۶[۴۳] صورت پذیرفته است. به منظور انجام آزمایش تک‌محوری خاک بر روی ۱۴۴ نمونه‌ی موردنظر، ابتدا برای آماده‌سازی خاک موردنظر، خاک عبوری از الک شماره‌ی ۸ را ابتدا با آهک به‌صورت پودری و به میزان‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد مخلوط کرده

شکل ۲. الف) اختلاط خاک با نفت، ب) اختلاط خاک آلوده با رطوبت بهینه.



شکل ۳. الف) قرارگیری قالب تراکم بر روی جک هیدرولیکی؛ ب) استوانه‌ی نمونه‌گیر ۳ تایی؛ ج) خارج کردن نمونه از قالب.

و سپس ترکیب حاصل با میزان‌های ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد نفت مخلوط شده و درون ۲ کیسه‌ی نایلونی قرارگرفته و برای مدت ۱ هفته در محیط آزمایشگاه (دمای ۲۵ درجه) نگهداری شده‌اند. سپس به هر نمونه، مقادیر رطوبت بهینه‌ی (آب مقطر) تعیین شده از آزمایش تراکم، اضافه و با کمک دست ۲۰ دقیقه ورز داده شد تا مخلوط همگن و یکنواختی حاصل شود و کلوخه‌های ریز در خاک باقی نماند و مخلوط حالت خمیری به خود بگیرد؛[۴۴] سپس مخلوط حاصل درون ۲ لایه‌ی کیسه‌ی نایلونی قرارگرفته[۴۵] و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شده‌اند، تا رطوبت به‌طورکاملاً یکنواخت به همه‌ی نقاط خاک منتقل شود. این کار به دلیل زمان‌بر بودن فرایند جذب رطوبت توسط ذرات رس و نفوذپذیری پایین آنها صورت گرفته است (شکل ۲).

پس از گذشت ۲۴ ساعت، مخلوط خاک ترکیب شده، از کیسه‌های نایلونی خارج و جهت متراکم شدن در داخل قالب تراکم طی ۳ مرحله و هر لایه ۲۵ ضربه به کمک چکش استاندارد کوبیده شده است. سپس بر روی جک هیدرولیکی قرار گرفته است (شکل ۳ الف) و با کمک دستگاه نمونه‌گیر ۳ تایی (شکل ۳ ب)، که متشکل از استوانه‌های آهنی به ارتفاع ۷۶ و قطر ۳۸ میلی‌متر است، نمونه‌گیری انجام شده است (شکل ۳ ج) و ابعاد آن‌ها با کولیس به‌درستی اندازه‌گیری و به خوبی با چند لایه پوشش سلفونی بسته شده‌اند.

در پژوهش حاضر، ۴۸ عدد مخلوط با مقادیر مختلف آهک و نفت تهیه شده

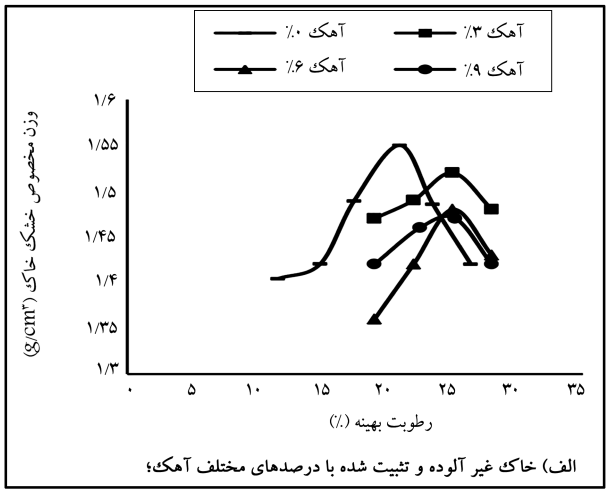
و با توجه به لزوم ۳ بار تکرارپذیری آزمایش، ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌یی در سن‌های عمل‌آوری[۱۹] ۱، ۱۴ و ۲۸ روز،[۴۶] با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفته‌اند. از طرفی، سرعت کرنش دستگاه به گونه‌یی تنظیم شده است که زمان رسیدن به گسیختگی نمونه (مشاهده‌ی ترک بر سطح نمونه) از حدود ۱۵ دقیقه بیشتر نشود و بارگذاری تا ۱۵٪ میزان کرنش ادامه یابد و تنش‌های[۲۰] اعمال شده روی نمونه قرائت شوند.

۴. نتیجه‌گیری و بحث

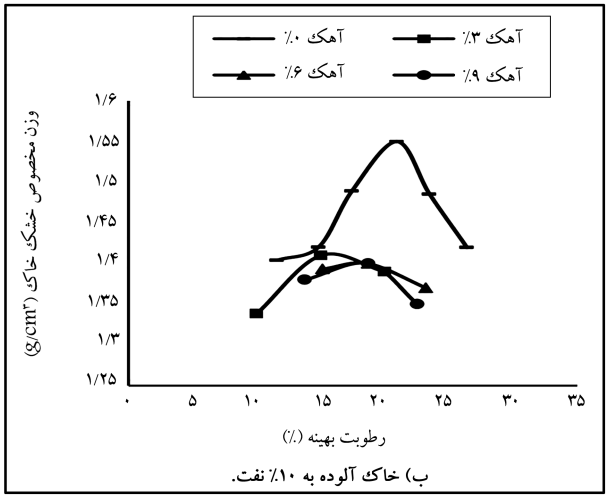
۱.۴. نتایج و نمودارهای به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش‌های تراکم استاندارد مطابق با استاندارد بر روی خاک‌های غیرآلوده و آلوده به نفت همراه با درصدهای مختلف آهک انجام شده است، که نتایج آن‌ها در شکل (۴ الف و ب) مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد، با افزایش میزان آلودگی نفتی به میزان ۱۰٪ به خاک، مقادیر رطوبت بهینه (OMC) کاهش یافته‌اند (شکل ۵ الف). همچنین با سوابق مشابه، ناصحی و همکاران (۱۵ ۲۰) دریافتند که افزایش میزان آلودگی نفتی در خاک‌های ریزدانه‌ی رسی موجب کاهش در مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه شده است (شکل ۵ ب).[۳۴،۴۷و۴۷]



الف) خاک غیر آلوده و تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک؛

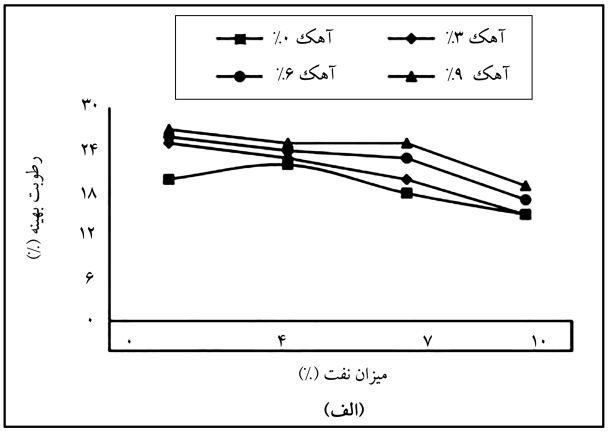


ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت.

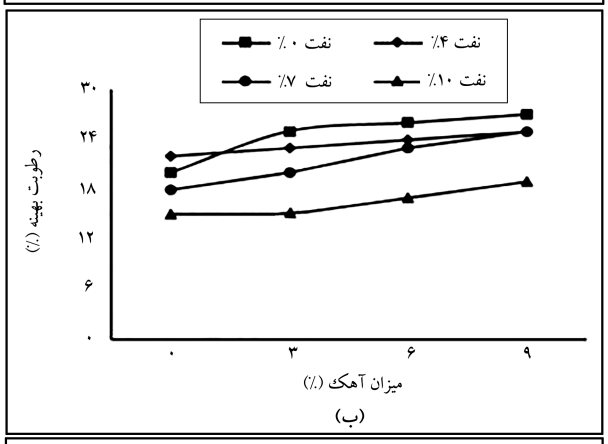
شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد.

دلیل تغییرات به وجود آمده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که تبدیل آهک زنده به آهک شکفته همراه با تغییر وزن مخصوص آن انجام می‌شود؛ به گونه‌یی که پس از شکفته شدن، حجم آن افزایش و وزن مخصوص آن به حدود ۲٫۱ تا ۲٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافته است. افزایش حجم آهک زنده در اثر جذب آب از یک طرف، میزان ذرات در واحد حجم را کاهش داده و از طرف دیگر، وزن مخصوص خود آهک نیز کمتر شده و باعث کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی (MDD) نمونه‌ها شده است.

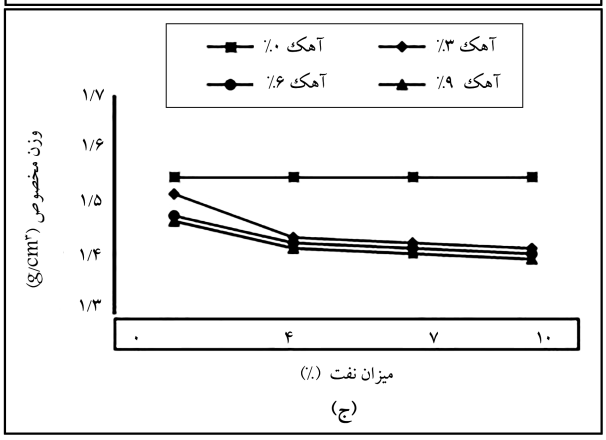
از طرفی، با افزایش میزان آهک به دلیل این‌که ذرات آن بسیار ریز بوده و



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. الف) نمودار تغییرات رطوبت بهینه‌ی نمونه‌های آلوده به نفت؛ ب) نمودار تغییرات رطوبت بهینه‌ی نمونه‌های تثبیت شده با آهک؛ ج) نمودار تغییرات وزن مخصوص نمونه‌های آلوده به نفت.

توانسته‌اند به خوبی خلل و فرج بین دانه‌های خاک را پر کنند، سبب افزایش میزان رطوبت بهینه‌ی خاک شده است (شکل ۵ ج) با توجه به پژوهش مشابه، عبدی و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کرده‌اند که با افزودن آهک به میزان خاک، مقادیر رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش یافته‌اند.[۲۰و۲۶]

۲.۴. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها

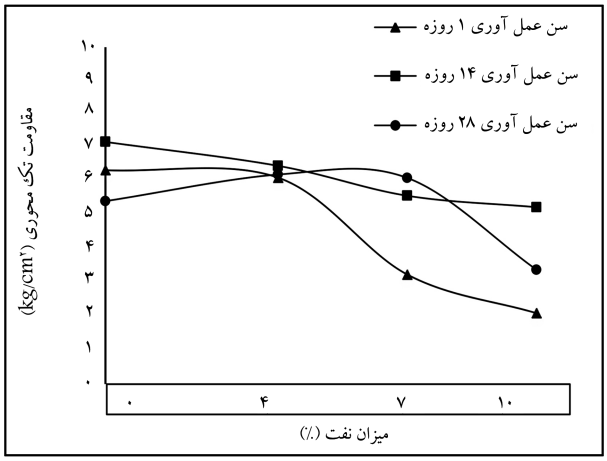
با بررسی نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و مقایسه‌ی منحنی‌های تنش ـ کرنش حاصل از آزمایش مقاومت تک‌محوری می‌توان دریافت که به‌طورکلی آلودگی خاک به نفت باعث کاهش قابل توجهی در مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها در سن‌های عمل‌آوری مختلف شده است (شکل ۶)؛ به طوری‌که مقاومت نمونه‌هایی که آلودگی نفتی ۱۰٪ داشته‌اند، نسبت به مقاومت نمونه‌هایی که آلودگی ۰، ۴ و ۷ درصد نفتی داشته‌اند، کمتر بوده است.

مقاومت نمونه‌های بدون آلودگی نفتی و آهک در سن عمل‌آوری ۱ روزه برابر با ۳٫۳۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است و این در حالی است که مقاومت نمونه‌های آلوده به نفت ۱۰٪ در همان شرایط یکسان برابر با ۲٫۱۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است (شکل ۷). با توجه به بررسی نتایج به دست آمده، این روند کاهشی مقاومت، با افزایش میزان آلودگی به میزان ۶۰٫۶ درصدی مشاهده شده است.

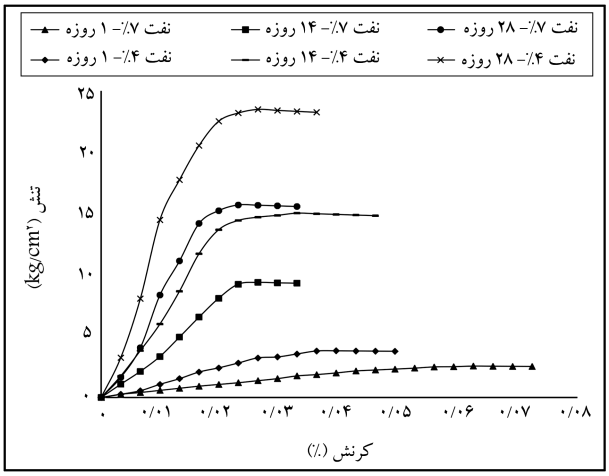
همچنین مقاومت تک‌محوری نمونه‌ی آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۹٪ برابر با ۳٫۲۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است؛ در حالی که مقاومت تک‌محوری نمونه‌ی آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت شده با همان میزان آهک، برابر با ۳٫۸۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است (شکل ۸)، که روند کاهش مقاومت به میزان ۱۶٫۱۵٪ بوده است.[۵و۳۱]

همچنین افزایش قابل توجهی در مقادیر مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با بالا رفتن سن عمل‌آوری نمونه‌ها مشاهده شده است (شکل ۹). به طور مثال، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۹٪ در سن‌های عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب برابر با ۹٫۳۹ و ۱۵٫۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است. همچنین روند افزایش برای نمونه‌های آلوده به نفت ۴ و ۷ درصد مشاهده شده است (شکل ۱۰). بدین ترتیب افزایش ۶۸٫۷ درصدی در مقاومت نمونه‌ها رخ داده است، که حاکی از آن است که شرایط واکنش خاک و آهک در دمای اتاق فراهم بوده است.[۱۵و۲۹]

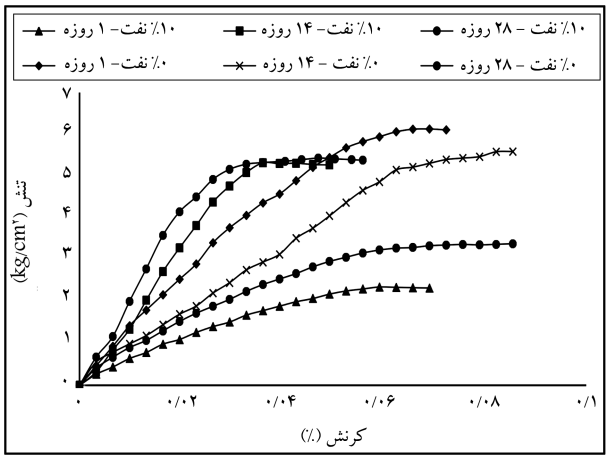
با توجه به بررسی نتایج ارائه شده‌ی بیشینه‌ی مقاومت به دست آمده در پژوهش حاضر، مقاومت نمونه‌های آلوده به نفت ۷٪ بوده است، که با مقایسه‌ی



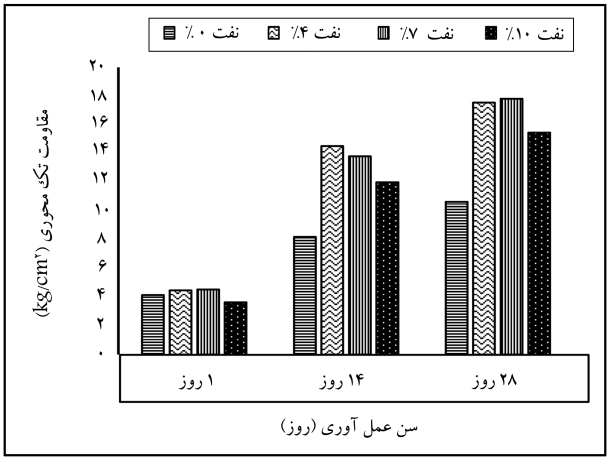
شکل ۶. نمودار تأثیر آلودگی نفتی در مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در سن‌های عمل‌آوری مختلف.



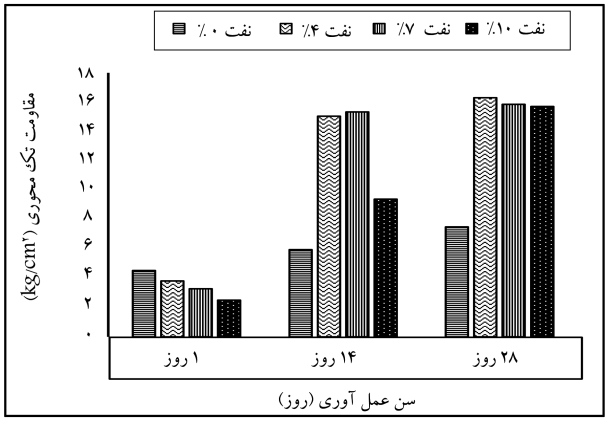
شکل ۸. نمودار تنش ـ کرنش نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۹٪ و آلوده به ۴ و ۷ درصد نفت.



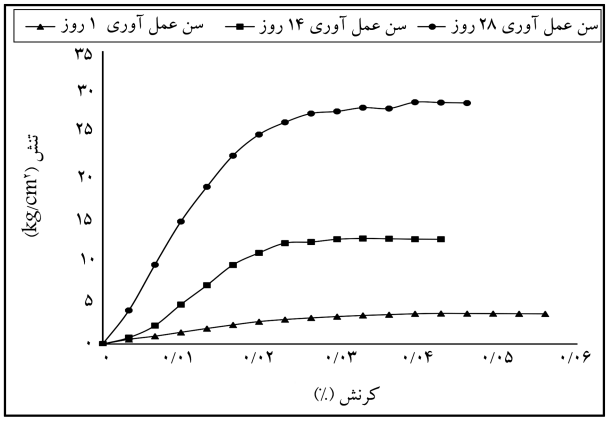
شکل ۷. نمودار تنش ـ کرنش نمونه خاک آلوده به ۰ و ۱۰ درصد نفت در سن‌های عمل‌آوری مختلف.



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی سن عمل‌آوری با مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک ۳٪.



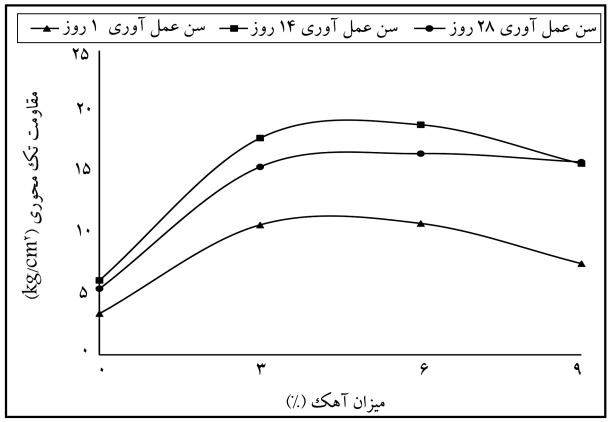
شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ی سن عمل‌آوری با مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک ۹٪.



شکل ۱۱. نمودار تنش ـ کرنش نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪.

سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز مقادیر مقاومت تک‌محوری برابر با ۳٫۶۶، ۱۲٫۶۲ و ۱۸٫۹۱ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده‌اند (شکل ۱۱)، که حاکی از افزایش ۴۱۶٫۶ درصدی مقاومت در سن عمل‌آوری ۲۸ روز بوده است. با بررسی‌های بیشتر و با مقایسه‌ی میزان آهک افزوده شده مشخص شده است که نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۶٪ در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۳ و ۹ درصد، مقاومت تک‌محوری بیشتری داشته‌اند. از طرفی، با افزودن آهک تا ۹٪ وزنی به نمونه‌های رسی آلوده به ۷٪ نفت، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاهش ۳۷۸٫۹ درصدی در سن عمل‌آوری ۲۸ روز داشته‌اند (شکل ۱۲).[۲۸و۲۰،۳]

به بیان دیگر، دلیل این نتایج را می‌توان به این صورت بیان کرد که با پیشرفت واکنش تبادل یونی، ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک مجتمع و با تغییر بافت خاک به بافت دانه‌یی، موجب اصلاح مقاومت خاک شده است. در سن‌های عمل‌آوری بیشتر، با پیشرفت واکنش‌های یونی، pH افزایش یافته و باعث حل شدن سیلیکا و آلومینای خاک و شروع واکنش‌های پوزولانی شده است. این واکنش بین آب، آهک و مواد سیلیس و آلومین‌دار خاک صورت گرفته و باعث تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته[۲۱] و آلومینات کلسیم هیدراته[۲۲] شده است. این ترکیبات با منسجم و سیمانی کردن ذرات تشکیل دهنده‌ی خاک، باعث افزایش مقاومت خاک شده‌اند. همچنین اضافه کردن آهک موجب افزایش غلظت یون‌های فلزی در خاک شده است، که به نوبه‌ی خود موجب تشکیل ترکیب‌های هیدروکربنی پایدار با فلز



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی میزان آهک و مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها.

شده است؛ و به این ترتیب باعث کاهش میزان آلودگی خاک به مواد نفتی شده است.[۲۶و۴]

۳.۴. نتایج آنالیز ریزساختار

با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، بیشترین مقاومت به دست آمده مربوط به نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ بوده است به همین دلیل، به‌منظور مقایسه‌ی نتایج، آزمایش‌های آنالیز ریزساختار بر روی نمونه‌ی خاک آلوده و نمونه‌ی خاک آلوده‌ی تثبیت شده با آهک در سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز صورت پذیرفته‌اند.

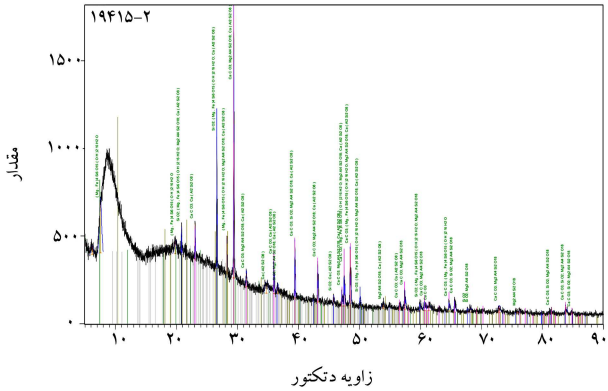
۱.۳.۴. نتایج طیف‌سنج پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)

با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز XRD، نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت با سن عمل‌آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، کلسیت[۲۳] ($CaCO_3$)، کوارتز[۲۴] (SiO_2)، سپیولیت[۲۵] ($(Mg, Fe)_3Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$) کوردیوریت[۲۶] ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) و آنورتیت[۲۷] ($CaAl_2Si_2O_8$) هستند. با توجه به طیف مذکور، بالاترین پیک در مقایسه با سایر کانی‌ها مربوط به کوردیوریت است (شکل ۱۳ الف) و نتایج آنالیز XRD نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ با سن عمل‌آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، کلسیت ($CaCO_3$)، کوارتز (SiO_2)، سپیولیت ($(Mg, Fe)_3Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$) و پلی گورسکیت ($MgAlSi_2O_{10}(OH) \cdot 4H_2O$) هستند، که بالاترین پیک در مقایسه با سایر کانی‌ها مربوط به کلسیت است (شکل ۱۳ ب).

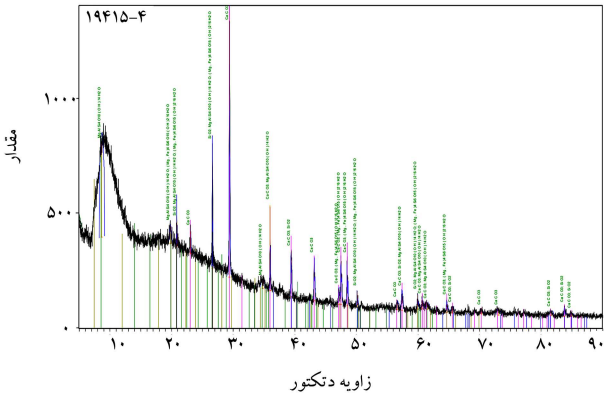
با مقایسه‌ی نتایج، ساختار کانی‌های موجود در هر دو ترکیب خاک آلوده‌ی تثبیت نشده و تثبیت شده با آهک، نسبتاً مشابه بوده‌اند. تفاوت اصلی در ترکیب‌های کانی‌های تشکیل‌دهنده به هنگام افزودن آهک رخ داده است، زیرا این امر موجب شروع واکنش‌های پوزولانیک و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده است، که به دنبال آن افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آلوده و تثبیت شده با آهک است.[۷]

۲.۳.۴. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی (FE – SEM)

مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خاک رس آلوده به نفت ۷٪ دارای ساختار ورقه‌یی و ناپیوسته است و حفره‌های خالی و متخلخل بین ذرات خاک مشاهده می‌شود، که همین امر نیز موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است (شکل ۱۴ الف). با مقایسه‌ی تصاویر نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۶٪ می‌توان

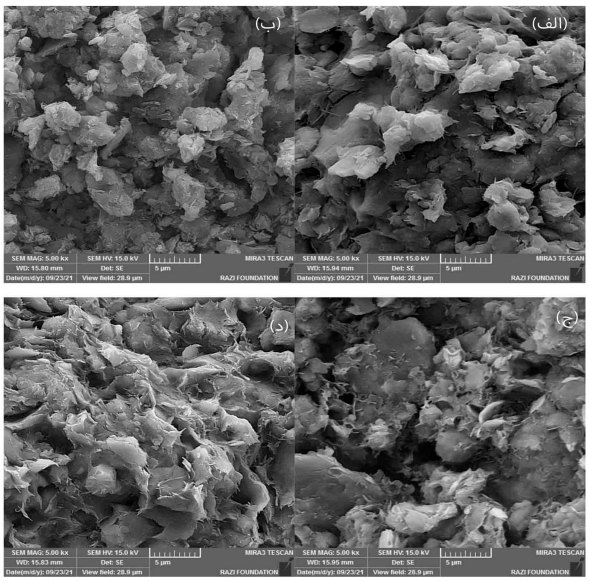


الف) نمونه ی خاک آلوده به ۷٪ نفت با سن عمل آوری ۲۸ روز؛



ب) نمونه خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ با سن عمل آوری ۲۸ روز.

شکل ۱۳. نتایج طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس.



الف) در سن عمل آوری ۲۰ روز و همچنین خاک آلوده به ۷٪ نفت تثبیت شده با ۶ ٪ آهک در سن های عمل آوری؛

ب) ۱ روز؛ ج) ۱۴ روز؛ د) ۲۸ روز.

شکل ۱۴. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های خاک آلوده به ۷٪ نفت.

دریافت که افزودن آهک ۶٪ به دلیل توانایی بر تبادل کاتیونی با ذرات خاک، منجر به کاهش ساختار فولکوله‌ی خاک شده و ذرات دارای پیوستگی و ساختار منسجم‌تری مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۱۴ ب، ج و د).[۶] همچنین با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با آهک در سن‌های عمل‌آوری ۱ و ۲۸ روز (شکل‌های ۱۴ ب و د)، مشاهده می‌شود که با سپری شدن سن عمل‌آوری واکنش‌های پوزولانیک در خاک به بیشترین حد خود رسیده و همچنین خاصیت سیمانی شدن ذرات آهک به‌عنوان ماده‌ی تثبیت کننده در خاک بیشتر شده است؛ که همین امر نیز موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده در سن عمل‌آوری ۲۸ روز شده است.[۲۹،۲۲،۲]

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت در منطقه‌ی خوزستان پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا اختلاط خاک با آهک به میزان‌های ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی و آلودگی نفتی به میزان‌های ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد جهت میکس ۴۸ عدد نمونه‌ی خاک به منظور ساخت ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌یی به‌دلیل ۳ بار تکرارپذیری آزمایش صورت پذیرفته است، که با سپری شدن سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز، تحت آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که:

- نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد نمونه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش میزان آلودگی نفتی در خاک، کاهش ۴۴٫۴ درصدی میزان رطوبت بهینه در خاک ایجاد شده است؛
- نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد نشان می‌دهند که با افزایش میزان آهک در خاک، به دلیل ریز بودن ذرات آهک و توانایی پرکردن خلل و فرج بین ذرات خاک، وزن مخصوص آهک افزایش یافته و موجب افزایش میزان رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه شده است؛
- مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در سن عمل‌آوری ۲۸ روز نسبت به سن‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روز، افزایش ۶۷٫۸ درصدی داشته است؛ که حاکی از عملکرد و واکنش مناسب کانی‌های خاک رسی با آهک در طی زمان بوده است؛
- با افزودن آهک تا میزان ۶٪ وزنی به نمونه‌های خاک آلوده به ۷٪ نفت، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها ۴۱۶٫۶٪ افزایش یافته‌اند، که بیشینه‌ی مقاومت تک‌محوری به دست آمده در پژوهش حاضر است. از طرفی، با افزودن آهک تا میزان ۹٪ وزنی، مقاومت نمونه‌های خاک آلوده به نفت، کاهشی ۳۷٫۷ درصدی داشته‌اند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن آهک تا میزان ۹٪ وزنی به نمونه‌ها، نه فقط موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نشده است، بلکه کاهش مقاومت تک‌محوری در نمونه‌ها نیز رخ داده است؛
- نتایج آنالیز ریزساختاری نشان می‌دهند که خاک رس آلوده به نفت ۷٪، دارای ساختار ورقه‌یی و ناپیوسته بوده و حفره‌های خالی و متخلخل بین ذرات خاک مشاهده شده‌اند. این در حالی است که در نمونه‌های آلوده و تثبیت‌شده با آهک ۶٪، کاهش تخلخل و حفره‌های خالی در نمونه رؤیت شده است، که این نیز خود دلیلی بر توانایی آهک بر توان تبادل کاتیونی با ذرات خاک و همچنین رخ دادن واکنش‌های پوزولانیک در طی زمان است، که موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها شده است.

۱٫۵ سانت ۰٫۰۰۹ سانت

پانوشت‌ها

1. portelina
2. maximom dry density
3. optimom moisture content
4. Ojury
5. unconfined compressive strength
6. cohesion
7. Zeety
8. Pham
9. Hydrate Lime
10. Masjedsoleyman
11. plastisity index
12. unified soil classification system
13. soshlet extractor
14. Ec meter
15. centerfuge
16. SEM
17. XRD
18. peak
19. curing day
20. stress
21. CSH
22. CAH
23. calcite
24. quartz
25. sepiolite
26. cordierite
27. Anorthite

منابع (References)

1. Ostovar, M., Ghiassi, R., Mehdizadeh, M. and et al. "Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **30**(1), pp. 58-73 (2020).
2. Sobhani Nezhad, R., Nasehi, A., Uromeihy, A. and et al. "Utilization of nanosilica and hydrated lime to improve the unconfined compressive strength (UCS) of gas oil contaminated clay", *Geotech. Geol. Eng.-Springer Nature Switzerland*, **39**, pp. 2633-2651 (2021).
3. Mohammadi, M. and Moharamzade Sarey, K. "Evaluation of lime efficiency on improvement of contaminated soils with petroleum products in Tabriz refinery", *Journal of Civil Modarres*, **52** (in Persian) (2015).
4. Portelinha, F., Correia, N., Mendes, I. and et al. "Geotechnical properties and microstructure of a diesel contaminated lateritic soil treated with lime", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **30**(7), pp. 838-861 (2021).
5. Ojuri, O. and Oluwatuy, O. "Compacted sawdust ash-lime stabilised soil-based hydraulic barriers for waste containmen", College of Science and Engineering, Landmark University, Omu-Aran, Nigeria (2018).
6. Shahidi, M., Farokhi, F. and Asefi, F. "Laboratory study of the effect of adding nanoparticles-clay on improving the strength properties of diesel-contaminated clay sand soil", *Civil Journal of Amirkabir*, **51**(6), (In Persian) (2018).
7. Nasehi, A., Uromeihy, A., Nikudel, M. and et al. "Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils", *Geotech. Geol. Eng.-Springer International Publishing*, **34**, pp. 333-345 (2015).
8. Talebzadeh, I. and Hajiani Boushehrian, A. "Laboratory modeling of oil contamination propagation effect on subgrade reaction modulus of fine grained sand", *Shairf Journal of Civil Engineering, Article in Press* (In Persian) (2019).
9. Zomorodian, S.M.A. and Rahimi Haghighi, V.R. "Assessment of geotechnical characteristic of bentonite clay contaminated by gasoline", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **2**(33), pp. 77-82 (In Persian) (2018).
10. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. and et al. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite", *Engineering Geology*, **166**, pp. 11-16 (2013).
11. Nasiri, H., Khayat, N. and Mirzababaei, M. "Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product", *Transportation Geotechnics*, **28**, 100531 (2021).
12. Bakhshizade, A., Khayat, N. and Horpibulsuk, S. "Surface stabilization of clay using sodium alginate", *Case Studies in Construction Materials* , **16**, e01006 (2022).
13. Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. and et al. "Sludge ash/ hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil", *Journal of Hazardous Materials*, **145**(1), pp. 58-64 (2007).
14. Zeety, M., Abdullah, Y., Al-Adhami. M. and et al. "Compressive strength of stabilised granitic residual soil using mixture of pineapple fibre-hydrated lime", *Sustainability*, **14**(7), 3826 (2022).
15. Pham, V., Erwin, O., Dominic E. and et al. "Effects of binder types and other significant variables on the unconfined compressive strength of chemical-stabilized clayey soil using gene-expression programming", *Neural Computing and Applications*, **34**, pp. 9103-9121 (2022).
16. Tastan, E.O., Edil, T.B., Benson, C.H. and et al. "Stabilization of organic soils with fly ash", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(9), pp. 819-833 (2011).
17. Saride, S., Puppala, A.J. and Chikyala, S.R. "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays", *Applied Clay Science*, **85**, pp. 39-45 (2013).
18. Daryaee, M. and Kashefipour, S.M. "Investigation of the effect of adding soft sand and lime on strength properties of clay soils", *Journal of Water and Soil*, **25**(2), pp. 230-239 (In Persian) (2011).
19. Oluremi, J.R. and Adedokun, S.I. "Valorization of spent engine oil contaminated lateritic soil with high calcium waste wood ash", *Journal of Eng. Research*, **7**(1) (March, 2019).
20. Muntohar, A. and Hantoro, G. "Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade", Civil Engineer, Soil Mechanics Laboratory Department of Civil Engineering, Muhammadiyah University of Yogyakarta, Indonesia (2000).
21. Maubec, N., Deneele, D. and Ouvrard, G. "Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material", *Applied Clay Science*, **137**, pp. 107-114 (2016).

22. Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazzieri, F. and et al. "Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour", *Applied Clay Science*, **99**, pp. 100-109 (2014).

23. Roshangar, K., Alami, M. and Hoshyar, Y. "Laboratory study of the effect of lime on the process of self-healing and divergence of clay soils", *Civil Journal of Amirkabir*, **62**(6) pp. 1360-1370 (In Persian) (2020).

24. Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. "Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content", *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**(5), pp. 105-113 (2009).

25. Sajadian, M. and Barkhordari, K. "Investigating the effect of the type of lime and mixing to the improvement of swelling soils", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **4**(2), pp. 141-146 (In Persian) (2017).

26. Abdi. M.R., Mirzaeifar. B.H., Rafieinia. C.M. and et al. "Lime stabilized clay reinforced with geogrids", *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, **3**(1), pp. 63-72 (In Persian) (2016).

27. Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**(1), pp. 160-167 (2019).

28. Kumar Jha, A. and Sivapullaiah, P. "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil", *Engineering Geology*, **198**, pp. 53-64 (2015).

29. Mardan, S., Gitipour, S. and Abdoli, M. "Purification of contaminated soil with petroleum compounds using solidification method and stabilization (case study: industrial town, salafchegan)", *Journal of Ecology*, **43**(2), pp. 233-250 (In Persian) (2017).

30. Mazaher, A. and Nourzad, A. "Investigation of the effect of adding nanoclay and lime on mechanical properties and self-healing of fine-grained soils", *Journal of Ecology*, **14**(2), (In Persian) (2020).

31. ASTM D854, "Standard test method for specific gravity of soils", American Society of Testing Materials (2010).

32. Oluwapelumi, O. and Oluwatuyi, O. "Strength characteristics of lead and hydrocarbon contaminated lateritic soils stabilized with lime-rice husk ash", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **19**(Z2), pp. 10027-10042 (2014).

33. Baldovino, A., Moreira, E., Teixeira, W. and et al. "Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in curitiba, Brazil", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10**(1), pp. 188-194 (2017).

34. Kermani, M. and Ebadi, T. "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **21**(5), pp. 655-671 (2012).

35. Akinwumi, I., Maiyaki, U., Adubi, S. and et al. "Effects of waste engine oil contamination on the plasticity, strength and permeability of lateritic clay", *Internationa Journal of Scinific & Technology Resech*, **3**(9), pp. 331-335 (2014).

36. ASTM D422-63. "Standard test method for particle-size analysis of soils", American Society of Testing Materials (2002).

37. ASTM D4318. "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", American Society of Testing Materials (2006).

38. ASTM D698. "Standard test method for laboratory compaction characteristic", American Society of Testing Materials (2000).

39. ASTM D4972. "Standard test metod for pH of soils", American Society of Testing Materials (2001).

40. ASTM D1411, "Standard test methods for water-soluble chlorides present as admixtures in graded aggregate road mixes", American Society of Testing Materials (2004).

41. BS 1377. "Methods of test for soils for civil engineering purposes, part 3, chemical and electro-chemical tests", Determination of the Sulphate Content of Soil and Ground water Reagents (1990).

42. BS EN 13925-2. "Non-destractive testin. X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials procedures",(2002).

43. ASTM D2166. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils", American Society of Testing Materials (2000).

44. Ghare, S., Yazdani, K. and Besharat, V. "Laboratory study of the effect of clay and silica nanoparticles on the behavior of silty-clay soils", *Civil Journal of Amirkabir*, **53**(11), pp. 4723-4742 (In Persian) (2022).

45. Liu. C. and Evett, J.B., *Soil Properties: Testing, Measurement and Evaluation*, Prentice-Hall Inc, (1984).

46. Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**(1), pp. 160-167 (2019).

47. Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M. "Effect of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, **89**(3-4), pp. 220-229 (2007).

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۸۳-۹۳، (یادداشت فنّی)

Research Note

ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌های ساخت از منظر ذی‌نفعان

سید علیرضا فاطمی (دانشجوی دکتری)
اقبال شاکری * (استادیار)
وحید شاه‌حسینی (استادیار)
دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

در پژوهش حاضر، با تمرکز بر ذی‌نفعان کلیدی و قراردادی پروژه (کارفرما، پیمانکار، مدیریت طرح و مشاور)، یک پژوهش اکتشافی در حوزه‌ی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه صورت گرفته و رویکردهای ایشان در حوزه‌ی مذکور تحلیل شده است. ابتدا با بررسی ادبیات و پیشینه‌ی پژوهش، فضای گفتمان حوزه‌ی شاخص‌های کلیدی عملکرد شناسایی شده است. سپس با شناسایی اولویت‌ها، اختلاف‌ها و اشتراک‌های کارفرمایان، مشاوران، پیمانکاران و مدیریت طرح‌ها نسبت به شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه، رویکردهای متفاوت آنان با استفاده از روش Q سنجش شده است. نتایج نشان می‌دهند دیدگاه ذی‌نفعان در یک دسته از شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه با یکدیگر مشترک نبوده و در دسته‌یی دیگر از شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه به یکدیگر نزدیک بوده است. نتایج نشان‌می‌دهند شاخص‌های مربوط به ۵ حوزه‌ی زمان، کیفیت، ایمنی، هزینه و تدارکات، مورد توافق ذی‌نفعان بوده و باید مدیران پروژه توجه ویژه‌یی به آنها داشته باشند و رویکردهای ذی‌نفعان را در طول پروژه رصد کنند.

fatemiseyed@aut.ac.ir
eshakeri@aut.ac.ir
shahhosseini@aut.ac.ir

واژگان کلیدی: شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه، روش‌شناسی Q، ذی‌نفعان.

۱. مقدمه

در پروژه‌های ساخت‌وساز، ذی‌نفعان علاوه بر این‌که تعریف خاص خود را از موفقیت یا عدم موفقیت پروژه دارند، نقش کلیدی و مهمی نیز در موفقیت پروژه دارند. بنابراین، برای مدیریت صحیح پروژه، باید دیدگاه تمامی ذی‌نفعان را به خوبی تحلیل کرد. شاخص‌ها و معیارهای ذی‌نفعان مختلف از موفقیت پروژه براساس نظام ارزیابی آنها هستند. شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) [۱]، که مجموعه‌یی از اطلاعات پروژه هستند، ابزار مناسبی برای سنجش و ارزیابی میزان تطابق عملکرد پروژه با اهداف و برنامه‌ریزی‌های اولیه در فازهای مختلف است. شاخص کلیدی عملکرد اگر به درستی تعریف شود و به راحتی قابل درک باشد، می‌تواند در مراحل مختلف پروژه، مشکلات اساسی پروژه را آشکار سازد و مدیر پروژه موفق به اتخاذ تدابیر اصلاحی می‌شود. تعارض منافع و نگرش‌های متفاوت ذی‌نفعان پروژه به شاخص‌های کلیدی عملکرد، می‌تواند منجر به اتخاذ تدابیر نادرست مدیر پروژه نسبت به شاخص‌های کلیدی عملکرد شود.

علی‌رغم پژوهش‌های مختلفی که در حوزه‌ی شاخص‌های کلیدی عملکرد انجام شده است، یک توافق کلی از سنجش عملکرد در پروژه وجود ندارد.[۱] از طرفی، ملاک‌ها و معیارهای متفاوت ذی‌نفعان مختلف نیز مزید بر علت هستند و تفاوت چشمگیر بین آنها می‌تواند به تعارض منافع تبدیل شود. لذا باید شاخص‌های کلیدی عملکرد و موفقیت پروژه از منظر ذی‌نفعان کلیدی پروژه ارزیابی و با یک روش صحیح تحلیل شود، تا با درک رویکردهای متفاوت ذی‌نفعان، به مدیران پروژه در جهت اتخاذ تصمیم‌های بهتر در قبال شاخص‌های کلیدی عملکرد و اصلاح روند پروژه کمک شود. ارائه‌ی چارچوبی برای ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه از منظر ذی‌نفعان کلیدی پروژه و درک تعارض‌ها یا تشابه‌های موجود در دیدگاه‌های ذی‌نفعان و ارزیابی‌تأثیر تفاوت‌های اخیر در عملکرد پروژه، از اهداف پژوهش حاضر هستند. در پژوهش حاضر، ذی‌نفعان پروژه‌های ساخت‌وساز مسکونی و تجاری با نظام انجام سه‌عاملی و چهارعاملی انتخاب شده‌اند.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه‌ی پژوهش

شاخص کلیدی عملکرد، تصویر روشنی از آنچه در پروژه می‌گذرد، را ارائه می‌دهد. در یک پروژه‌ی موفق، مدیریت مؤثر و به موقع اطلاعات برای اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه، نیازمند شاخص‌های کلیدی عملکرد است.[۲] تَکیم[۲] و همکاران (۲۰۰۲)، شاخص کلیدی عملکرد را این‌چنین تعریف کرده‌اند: «شواهد و مدارک قابل‌اندازه‌گیری هستند که مشخص می‌کنند یک تلاش برنامه‌ریزی شده به نتایج مطلوب دست

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۲۰، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۷.
DOI:10.24200/J30.2022.60658.3115

یافته است یا خیر.» اگر شاخص‌ها را بتوان با کمی دقت و بدون ابهام اندازه‌گیری کرد، شاخص‌های مذکور، معیارهای عملکرد نامیده می‌شوند.[۳] دیوید پارمنتر[۳] (۲۰۱۵)، شاخص‌های کلیدی عملکرد را بیان‌گر مجموعه‌یی از سنجه‌ها می‌داند که تمرکز آنها بر روی جنبه‌هایی از عملکرد سازمانی است که برای موفقیت حال و آینده‌ی سازمان از مهم‌ترین موارد هستند.[۴] هدف نهایی یک شاخص کلیدی عملکرد، شناسایی کارهایی است که باید برای بهبود عملکرد سازمان و حفظ راهبرد در مسیر اصلی خود انجام شود. اگر اندازه‌گیری‌های عملکرد در بازه‌های زمانی کوتاه انجام شوند، تیم مدیریت پروژه می‌تواند به سرعت واکنش نشان دهد، تا اشتباه‌ها را تصحیح کند. باید توجه داشت که انتخاب و سپس پی‌گیری شاخصی که نمی‌توان آن را کنترل کرد، هدر دادن زمان است.[۲] کرزنر[۴] (۲۰۱۷)،[۲] مسئولیت و پاسخگویی، توانمندسازی، زمان محور بودن، تمرکز بر نقاط کلیدی، قابل درک بودن و دقیق بودن را شش ویژگی اصلی شاخص‌های کلیدی عملکرد بیان کرده است.

در مجموع تعاریف ارائه شده می‌توان گفت شاخص کلیدی عملکرد، معیاری قابل اندازه‌گیری و متمرکز بر نقاط کلیدی موفقیت پروژه است که عملکرد پروژه را از جنبه‌های مختلف، در زمان‌های مختلف به صورت دقیق و غیرقابل تفسیر برای مدیران پروژه می‌سنجد.

برای مدت زمان بسیاری، مثلث آهنین «زمان، هزینه و کیفیت»، برای ارزیابی عملکرد موفقیت پروژه‌های عمرانی به کار می‌رفتند.[۵] در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با موفقیت پروژه در سال‌های گذشته، از جمله پژوهش هاتاش[۵] (۱۹۹۷)،[۶] معیارهای زمان، هزینه و کیفیت به عنوان معیارهای اساسی موفقیت پروژه معرفی شده است. رانکین[۶] و همکاران (۲۰۰۸)،[۷] ۸ شاخص کلیدی عملکرد را: هزینه، زمان، کیفیت، ایمنی، محیط‌زیست، توسعه‌ی پایدار، خلاقیت و محدوده‌ی پروژه تعریف کرده‌اند. پارک[۷] (۲۰۰۹)،[۸] علاوه بر ارائه‌ی شاخص‌هایی در ۸ حوزه، ۱۰ معیار برتر برای هر حوزه را بر اساس نظرات ذی‌نفعان (شامل: کارفرما، پیمانکار و پیمانکار جزء) شناسایی و تأکید کرده است که ارزیابی عملکرد پروژه باید در طول پروژه و در تمامی فازها انجام شود.

لئون[۸] و همکاران (۲۰۱۷)،[۹] طی مطالعاتی که انجام دادند، ادعا کردند شاخص‌های کلیدی یکسانی برای عملکرد پروژه‌های مختلف نمی‌توان تعیین کرد. اهداف، اولویت‌ها، راهبردها و شرایط بازار در پروژه‌های مختلف یکسان نیست و این موضوع عامل تفاوت شاخص‌ها خواهد بود. همچنین ایشان، ۸ شاخص کلیدی از دیدگاه پیمانکار را در حوزه‌های: هزینه، زمان، کیفیت، سودآوری، ایمنی، محیط‌زیست، رضایت مشتری و رضایت کارفرما تعیین کردند؛ که ۶ شاخص از نوع کمّی و ۲ شاخص دیگر از نوع کیفی بوده است.

سبط و طوسی (۲۰۱۸)،[۱۰] با هدف جمع‌آوری مجموعه‌یی از شاخص‌های اطلاعاتی مناسب برای تدوین چارچوب داشبورد جامع مدیریت پروژه در سیستم پیمانکاری، شاخص‌های کلیدی عملکرد را به‌گونه‌یی جمع‌آوری کرده‌اند که نشان‌دهنده‌ی عملکرد پروژه در همه‌ی جوانب باشد. ایشان با استفاده از نظر متخصصان و با استفاده از آزمون اولویت‌بندی فریدمن و آزمون همبستگی اسپیرمن، شاخص‌ها را در ۱۰ حوزه‌ی دانش مدیریت پروژه اولویت‌بندی کرده‌اند؛ که در بین آنها، شاخص‌های کارایی (نسبت واقعیت به برنامه‌ریزی) زمان‌بندی، کارایی هزینه و فراوانی عدم انطباق‌های ثبت شده در پروژه، شاخص‌های منتخب حوزه‌های زمان، هزینه و کیفیت بوده‌اند. فنایی و همکاران (۲۰۱۹)، [۱۱] نیز پژوهش‌هایی را با هدف پیشنهاد یک چارچوب جدید برای اندازه‌گیری ۶ شاخص کلیدی عملکرد و پیش‌بینی آنها با استفاده از روش عصبی ـ فازی انجام داده‌اند. ایشان با بررسی ۲۰ شاخص، مهم‌ترین شاخص‌های کلیدی عملکرد را در ۶ حوزه‌ی: هزینه، زمان، کیفیت، ایمنی، رضایت کارفرما و رضایت تیم پروژه معرفی کرده‌اند.

اینگل[۹] و همکاران (۲۰۲۰)، طی پژوهشی در کشور هند، در مورد حوزه‌های عملکردی مؤثر در صنعت ساخت‌وساز هند، ۱۰ حوزه‌ی عملکردی شامل: ارتباط با مشتری، ایمنی، برنامه، هزینه، کیفیت، بهره‌وری، مالی، ارتباطات و همکاری، محیط‌زیست و رضایت ذی‌نفعان و ۲۸ عامل زیرمجموعه‌ی آنها را با استفاده از پرسش‌نامه، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و مدل‌سازی معادله‌های ساختاری شناسایی کردند و دریافتند که حوزه‌های سنتی مالی به مانند گذشته در عملکرد پروژه‌ها تأثیرگذار اصلی نیستند.[۱۲] مرادی و همکاران (۲۰۲۱)، ابتدا بر اساس مطالعات پیشین، تعدادی از عوامل مؤثر در عملکرد پروژه را شناسایی و سپس آنها را با استفاده از پرسش‌نامه رتبه‌بندی کردند. ایمنی، محیط‌زیست، هزینه، سودآوری، برنامه‌ریزی، بهره‌وری، کیفیت، رضایت مشتری و رضایت تیم کاری از جمله مهم‌ترین عوامل شناسایی شده بوده‌اند.[۱۳]

هی[۱۰] و همکاران (۲۰۲۱)، شاخص‌های کلیدی مؤثر در کلان‌پروژه‌ها را از نگاه مالکان، پیمانکاران و طراحان در کشور چین بررسی کرده‌اند. شاخص‌ها در ۵ حوزه‌ی: کارایی پروژه، رضایت سهام‌داران کلیدی، اهداف راهبردی سازمان، نوآوری و توسعه‌ی صنعت ساخت‌وساز و تأثیر همه‌جانبه در جامعه و نیز با استفاده از مجموعه‌های فازی، ۹ عامل اصلی از میان ۲۳ عامل شناسایی شده‌اند، که شامل: رعایت مشخصات فنی، برآورده کردن اهداف ایمنی، برآورده کردن اهداف طراحی، ارائه‌ی خدمات مورد نیاز عموم، رضایت مالک، رضایت دولت، بهبود نام تجاری، افزایش غرور و اعتماد ملی مردم و ارائه‌ی مزایای اجتماعی ـ اقتصادی به جامعه بوده‌اند. نویسندگان در نوشتار مذکور، به محدود بودن کاربرد نتایج به کشور چین اشاره کرده‌اند.[۱۴]

با بررسی مطالعات پیشین، بی‌توجهی به نظام انجام پروژه در شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های کلیدی عملکرد، عدم نگاه جامع به تمامی حوزه‌های دانش مدیریت پروژه در انتخاب شاخص‌ها، بی‌توجهی به شاخص‌های زیرمجموعه‌ی حوزه‌های اصلی، بی‌توجهی به رویکرد ذی‌نفعان مختلف و درک تفاوت‌ها و تشابه‌های آنها و عدم استخراج و تحلیل دیدگاه‌های مختلف گروه‌های ذی‌نفع از جمله ضعف‌های موجود در پژوهش‌های پیشین بوده‌اند. در پژوهش حاضر، با انتخاب روش صحیح شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌های ساختمانی، نقاط ضعف اشاره شده پوشش داده شده‌اند.

۳. روش پژوهش

در پژوهش حاضر، برای شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه برای توجه به دیدگاه‌های ذی‌نفعان مختلف از «روش پژوهش Q» استفاده شده است. روش‌شناسی Q، روشی است که پژوهشگر را قادر می‌سازد تا در ابتدا، رویکردها و دیدگاه‌های حرفه‌یی فردی ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) را شناسایی و بر این اساس، ذی‌نفعان را گروه‌بندی کند.[۱۵] هدف اصلی روش Q، آشکار ساختن الگوهای فکری افرادی است که در موفقیت پروژه، ذی‌نفع هستند. بنابراین، انتخاب مشارکت‌کنندگان از طریق روش‌های نمونه‌گیری احتمالی صورت نمی‌گیرد، بلکه نمونه‌ی افراد به طور هدفمند انتخاب می‌شود. ویژگی‌های بیان شده، روش‌شناسی مذکور را به روش‌های پژوهش کیفی نزدیک می‌کند. با این وجود، روش‌شناسی Q، بُعد کمّی نیز دارد؛ زیرا از روش‌های آماری تحلیل عاملی برای دسته‌بندی افراد کمک می‌گیرد.[۱۶] تفاوت اصلی روش Q با سایر روش‌های پژوهش در علوم اجتماعی در این امر است که روش‌شناسی Q به جای متغیرها، افراد را تحلیل می‌کند.[۱۷] بر اساس فلسفه‌ی روش‌شناسی Q،

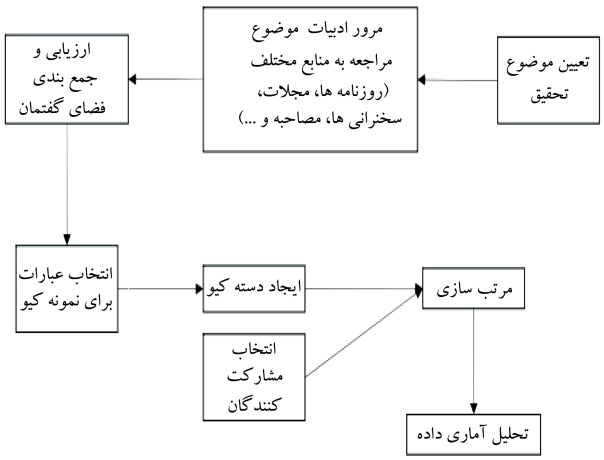
ذهنیت‌های تک‌فردی نیز به‌تنهایی اهمیت دارند و فقط به ذهنیت‌های پرطرفدار توجه نمی‌شود.

در مقیاس لیکرتی، هنگامی که پاسخ‌دهنده در حال بررسی یک شاخص یا معیار (عبارت) است، توجهی به سایر عبارت‌ها ندارد و فقط نظر خود را نسبت به آن شاخص یا معیار بیان می‌کند. اما پاسخ‌دهنده‌یی را در نظر بگیرید که با هر ۴ عبارت موافق است، ولی هنگامی که آنها را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد، موافقت او نسبت به اهمیت تأثیر هرکدام به یک میزان نیست. در روش مرتب‌سازی که در روش Q به کار می‌رود، مشارکت‌کننده طی یک فرایند مقایسه‌یی، شاخص‌ها را همان طور مرتب می‌کند که در ذهنیت خود دارد.[۱۶] فرایند روش پژوهش با روش Q در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۱.۳. تعیین موضوع (فضای گفتمان)

معمولاً موضوعی (در پژوهش حاضر، شاخص کلیدی عملکرد) که برای ارزیابی با روش Q انتخاب می‌شود، به گونه‌یی است که نسبت به آن در جامعه‌ی هدف، دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد. برای شناسایی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌ها از پیشینه‌های پژوهش، که در دو دهه‌ی اخیر به شناسایی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه پرداخته‌اند، استفاده و بیشتر نوشتارهای مهم در حوزه‌ی ذکر شده، بررسی شده‌اند. از آن‌جایی که شاخص‌های مختلف معرفی شده در نوشتارهای ذکر شده، عموماً با رجوع به خبرگان استخراج شده‌اند، به صورت بالقوه محسوس و قابل فهم هستند.

با توجه به شکل ۱، در مرحله‌ی انتخاب، شاخص‌هایی که فقط در ۱ یا ۲ پژوهش استفاده شده بودند، حذف شده‌اند. معروف بودن شاخص‌ها، در نظر گرفتن شرایط مشارکت‌کنندگان، طولانی نبودن، عدم پیچیدگی تعریف شاخص و استفاده از عبارت‌های مأنوس از جمله ملاحظات با اهمیت در انتخاب عبارت‌های شاخص‌ها هستند. تعداد شاخص‌های استخراج شده از مطالعات پیشین به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که از طرفی بتوانند محدوده‌ی خوبی از فعالیت‌های پروژه را پوشش دهند و از طرفی دیگر، نیز تعدد آنها، ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) را سر در گم و خسته نکند. مکون و توماس[۱۱] (۲۰۱۳)،[۱۵] تعدادی بین ۳۰ تا ۱۰۰ شاخص (عبارت) را برای تعداد نمونه در روش Q پیشنهاد کرده‌اند. کرلینجر[۱۲] (۲۰۱۱)،[۱۸] معتقد است تعداد مناسب عبارت‌ها جهت اعتبار آماری یافته‌ها، بین ۶۰ تا ۹۰ شاخص (عبارت) است. دانر[۱۳] (۲۰۰۱)،[۱۹] ضمن آن‌که معتقد است هیچ ملاک

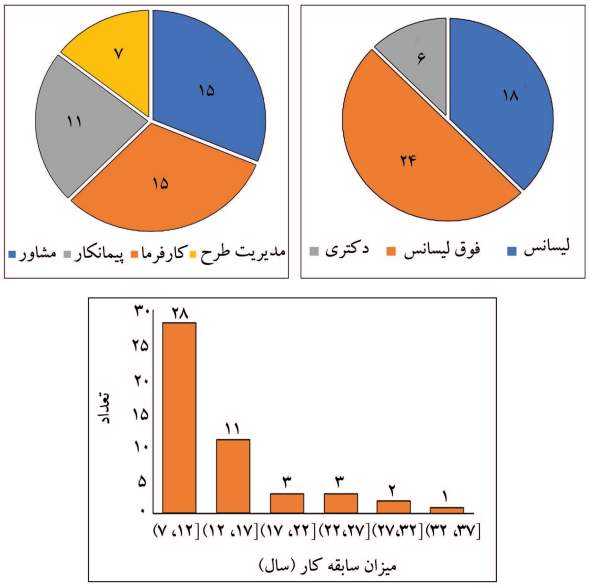


شکل ۱. مراحل انجام روش Q.

قطعی برای تعداد شاخص (عبارت) وجود ندارد، به تعداد بین ۲۰ تا ۶۰ عبارت اشاره می‌کند. در پژوهش حاضر، شاخص‌های استخراج شده از مطالعات پیشین، ویرایش و بازبینی شده‌اند؛ به طوری که یک شیوه‌ی نگارش داشته باشند، برای مشارکت‌کنندگان در نظرسنجی روشن و بدون ابهام باشند و به مقاصد ضمنی و پنهان شاخص‌ها (عبارت) نیز توجه شود.[۱۶] نهایتاً، ۳۳ شاخص پس از پالایش اولیه انتخاب و سپس در ۱۰ حوزه‌ی‌دانش مدیریت پروژه دسته‌بندی و در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۲.۳. جامعه‌ی آماری ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان)

مفهوم تعمیم‌پذیری در مطالعه‌ی Q با مطالعات کیفی رایج کاملاً متفاوت است. روش Q در پی آن است که الگوهای ذهنی مختلف ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) را کشف کند و برای کشف یک الگو، وجود فقط یک فرد با الگوی خاص کافی است. به عبارت دیگر، روش Q دنبال کشف میزان توزیع افراد در الگوهای ذهنی مختلف برای اثبات ادعای وجود آنها در ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) نیست. بنابراین نمونه‌ی افراد به صورت هدفمند و غیراحتمالی انتخاب شدند و تعداد آنها مد نظر نبوده است. در روش Q، مانند مطالعات کیفی، به نمونه‌های بزرگ نیازی نیست. نمونه‌ی افراد باید آشکارگر ذهنیت‌های متفاوت باشد، نه معرف توزیع آنها. در پژوهش حاضر، با اتخاذ رویکرد نمونه‌گیری هدفمند، تلاش شده است تا ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) از پروژه‌های متفاوت، شرکت‌های متفاوت با تنوع نگرشی متفاوت نسبت به شاخص‌های کلیدی عملکرد داشته باشند، تا نیاز اصلی روش Q تأمین شود. بدین منظور ۴۸ نفر از خبرگان حوزه‌ی ساخت، که تأمین‌کننده‌ی شرایط ذکر شده بودند، به عنوان ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) از ۴ گروه: کارفرمایان، مشاوران، پیمانکاران و مدیران طرح در پژوهش حاضر انتخاب و منطبق با روش Q، شاخص‌های کلیدی عملکرد از نگاه آنان ارزیابی شده است. اطلاعات آماری مربوط به شرکت‌کنندگان در شکل ۲ مشاهده می‌شود. تمامی مشارکت‌کنندگان، دست‌کم ۷ سال سابقه‌ی کاری داشته و تحصیلات ۵ آنان نیز لیسانس و بالاتر از مقطع لیسانس بوده است.



شکل ۲. اطلاعات مشارکت‌کنندگان (ذینفعان) در روش Q.

جدول ۱. شاخص‌های کلیدی عملکرد.

ردیف	حوزه	شاخص	توضیحات
۱	زمان‌بندی	راندمان زمان‌بندی و شاخص عملکرد زمان باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	نسبت زمان پیش‌بینی شده به زمان محقق شده
۲		نرخ روزهایی که برای رسیدن به برنامه زمانی، اضافه‌کاری انجام شده، کمینه شود.	
۳		تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت بپذیرد.	
۴		زمان‌بندی پروژه در مقایسه با متوسط زمان‌بندی پروژه‌های مشابه همواره در وضعیت مطلوب‌تری قرار بگیرد.	
۵	هزینه	راندمان هزینه و شاخص عملکرد هزینه باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	نسبت هزینه پیش‌بینی شده به هزینه‌ی محقق شده
۶		هزینه پروژه در مقایسه با متوسط هزینه پروژه‌های مشابه همواره در وضعیت مطلوب‌تری قرار بگیرد.	
۷		مدیریت جریان نقدینگی به گونه‌یی باشد که شاخص عملکرد سودآوری همواره در محدوده مطلوب قرار گیرد.	تمامی درآمد پرداخت شده یا پرداخت نشده به هزینه واقعی انجام شده
۸		قابلیت رقابت در بازار با توجه به میزان هزینه عملیاتی و سودآوری پیش‌بینی شده قابل توجه باشد.	
۹	کیفیت	تعداد عدم انطباق‌های ثبت شده اعم از جزئی یا قابل‌توجه به کمینه ممکن برسد.	
۱۰		فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه (نسبت به هزینه کل پروژه) ناشی از آن به کمینه ممکن برسد.	
۱۱		فراوانی دوباره‌کاری‌ها و تأخیر زمانی (نسبت به مدت‌زمان کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد.	
۱۲	ذی‌نفعان	رضایت ذی‌نفعان کلیدی پروژه و انتظارات آنان همواره در تصمیمات مورد توجه باشد.	
۱۳	ایمنی	نرخ حوادث به کمینه‌ی ممکن رسیده و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.	نرخ حوادث اوشا
۱۴		تعداد جلسات آموزش ایمنی مناسب بوده و تجهیزات ایمنی تأمین شود.	
۱۵		هزینه حوادث پیش آمده نسبت به کل هزینه پیش‌بینی شده به کمینه‌ی ممکن برسد.	
۱۶		زمان از دست رفته ناشی از حوادث نسبت به کل زمان پیش‌بینی شده پروژه به کمینه‌ی ممکن برسد.	
۱۷	دعاوی	میزان اختلافات ناشی از عدم شفافیت قرارداد به کمینه برسد.	
۱۸		میزان برگزاری جلسات حل اختلاف به کمینه برسد.	
۱۹		میزان اختلافات ناشی از تغییرات مدنظر کارفرما به کمینه برسد.	
۲۰		میزان اختلافات ناشی از عدم رعایت مشخصات فنی توسط تیم اجرایی به کمینه برسد.	
۲۱	محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار	نسبت تولید زباله بازیافتی به کل زباله‌ها به میزان مطلوبی افزایش پیدا کند.	
۲۲		میزان استفاده از مصالح تجدیدپذیر سریع یا مصالح بازیافتی به بشینه برسد.	
۲۳		استفاده مؤثر از منابع و مصالح سازگار با محیط‌زیست در پروژه به بیشینه برسد.	
۲۴		میزان تولید کربن دی‌اکسید پروژه به کمینه ممکن برسد.	
۲۵	نیروی انسانی	همکاری و هم‌افزایی تیم‌های کاری، به بیشینه برسد.	
۲۶		بهره‌وری مدیریت به بیشینه برسد.	نسبت درآمد به تعداد کارکنان مدیریت
۲۷		بهره‌وری کارگران به بیشینه برسد.	نسبت درآمد به زمان کاری کارگران
۲۸	تدارکات	استفاده مؤثر و بهینه از منابع همراه با کاهش نرخ پرت مصالح	
۲۹		کارکرد ماشین‌آلات کنترل شده و کمینه شود.	میزان کار انجام شده در واحد زمان
۳۰		انحراف ماشین‌آلات از زمان و هزینه پیش‌بینی شده کمینه شود.	

ادامه‌ی جدول ۱.

۳۱	مدیریت ریسک	با مدیریت و پیش‌بینی ریسک، هزینه ناشی از رویدادهای پیش‌بینی نشده کمینه شود.
۳۲		با مدیریت و پیش‌بینی ریسک، زمان ناشی از رویدادهای پیش‌بینی نشده کمینه شود.
۳۳		نرخ رویدادهای پیش‌بینی نشده کمینه شود.

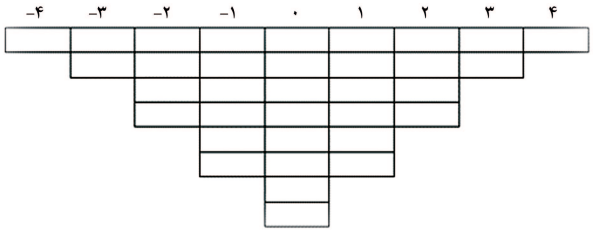
جدول ۲. نحوه‌ی توزیع شاخص‌های Q.

درجه تأثیر شاخص	+۴	+۳	+۲	+۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴
تعداد شاخص	۱	۲	۴	۶	۷	۶	۴	۲	۱
مجموع اولویت‌ها (تجمعی)	۱	۳	۷	۱۳	۲۰	۲۶	۳۰	۳۲	۳۳

۳.۳. روش جمع‌آوری اطلاعات

در پژوهش حاضر، ۳۳ شاخص (عبارت) انتخاب شده‌ی نهایی به روش خاصی دسته‌بندی شده‌اند. هر شاخص بر روی یک کارت جدا نوشته شده و ۳۳ کارت به صورت به هم ریخته (بدون ترتیب خاصی) در اختیار پرسش‌شوندگان قرار گرفته است. توجه شده است که غیر از عبارت‌های کارت‌ها، بین آنها هیچ تمایز دیگری که به ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) جهت‌دهی کند، وجود نداشته باشد. در روش مذکور از ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) خواسته شده است تا با درجه‌بندی تأثیر شاخص‌های (عبارت‌های) کلیدی عملکرد موفقیت پروژه (از ۴- به عنوان بسیار کم اثر تا ۴+ به عنوان بسیار پُر اثر) آنان را مانند جدول ۲ و شکل ۳ دسته‌بندی کنند.[۱۶]

بر این اساس ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) باید فقط یک شاخص را در دسته‌ی ۴+ و ۴- و فقط دو شاخص را در دسته ۳+ و ۳- و به همین شکل تا انتها فقط ۷ شاخص را در دسته‌ی صفر قرار دهند. برخی معتقدند این توزیع اجباری باعث می‌شود مشارکت‌کنندگان قادر نباشند عقیده‌ی خود را به همان صورتی که مدنظرشان است، بیان کنند. با وجود این، مطالعات نشان داده‌اند که تعداد و نوع دیدگاه‌ها بر اساس چگونگی توزیع تغییر نمی‌کند.[۲۰] عده‌یی معتقدند که از نظر روانی، هنگامی که ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) با شاخص‌های مورد سؤال روبه‌رو می‌شوند، معمولاً تعداد عبارت‌هایی که با آن به شدت موافق یا مخالف هستند، در مقایسه با سایر عبارت‌ها کم است و در مقابل، تعداد عبارت‌هایی که نسبت به آن خنثی هستند، بیشتر است. بنابراین، توزیع عبارت‌ها، شباهت زیادی به توزیع نرمال دارد (شکل ۳ و جدول ۲) ساختار یکسان دسته‌بندی شاخص‌ها برای تمام ذی‌نفعان (پرسش‌شوندگان) نوعی مزیت است، زیرا تمام آنان از نوعی دستورالعمل کاملاً مشابه در مرتب‌سازی شاخص‌ها پیروی می‌کنند. در حالتی که فرد مجبور است فقط با یک عبارت به صورت کامل موافق باشد، تمرکز بیشتری را بر تمام عبارت‌ها انجام می‌دهد تا عبارت منحصر به فردی را انتخاب کند. ولی زمانی که محدودیتی وجود ندارد، فرد می‌تواند با بیش از یک عبارت کاملاً موافق باشد و یا اصلاً هیچ عبارتی را در جایگاه مذکور قرار ندهد.[۱۶]



شکل ۳. نحوه‌ی توزیع شاخص‌های Q.

۴.۳. روایی و پایایی

در بررسی روایی، پژوهشگر با این سؤال روبه‌رو است که آیا شاخص‌های نهایی شده، واقعاً همان چیزی را اندازه می‌گیرند که برای سنجش آن تدوین شده‌اند یا خیر. با توجه به ویژگی‌های کیفی روش Q، فارغ از این‌که هر یک از شاخص‌ها دقیقاً چه چیزی را می‌سنجند، مجموعه‌ی شاخص‌های اولویت‌بندی شده، نشان‌دهنده‌ی دیدگاه فرد پرسش‌شونده خواهند بود. آنچه می‌تواند درباره‌ی روش Q مطرح شود، جامعیت شاخص‌ها در روش Q است. پژوهشگر باید به این سؤال پاسخ دهد که آیا عبارت‌های جمع‌آوری شده، چنان وسعتی دارند که بتوانند ذهنیت‌های مختلف را نمایان کنند یا خیر.[۱۶] در پژوهش حاضر، با توجه به مطالعه‌ی تعداد قابل توجهی از مطالعات پیشین و تأیید خبرگان حوزه‌ی ذکر شده، شاخص‌ها نهایی شده، وسعت مناسبی داشته‌اند.

۵.۳. روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

تحلیل عاملی، اصلی‌ترین روش برای تحلیل ماتریس داده‌های Q است. تحلیل عاملی Q [۱۴]، مؤید این مطلب است که در روش Q، افراد به جای متغیرها، دسته‌بندی می‌شوند. تحلیل عاملی، مجموعه‌ی افراد پرسش‌شونده را به چند دسته تقسیم می‌کند، که اساس آن، همبستگی بین متغیرهای موجود یعنی شاخص‌هاست. در تحلیل عاملی، مؤلفه‌یی به نام بار عاملی[۱۵] تعریف می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی میزان تعلق ذهنیت هر یک از افراد پرسش‌شونده به هر یک از دیدگاه‌های استخراج شده بر مبنای همبستگی نتایج است. به عنوان مثال، ممکن است تعداد افرادی که در یک دیدگاه قرار گرفته‌اند، میزان تعلق متفاوتی نسبت به آن دیدگاه داشته باشند. بنابراین هر یک از افراد با این‌که نهایتاً تحت یکی از دیدگاه‌ها قرار می‌گیرند، ولی میزان متفاوتی از تعلق را نسبت به دیدگاه‌های دیگر خواهند داشت.

فرایند تحلیل عاملی Q، به صورت کلی شامل دو مرحله‌ی استخراج دیدگاه‌ها به صورت خودکار توسط نرم‌افزار و سپس چرخش آنها به صورت دستی در نرم‌افزار است. چرخش دیدگاه‌ها، به منظور تفسیرپذیری آنها انجام می‌شود. از بُعد نظری به تعداد تمامی افراد مصاحبه‌شونده می‌توان دیدگاه و ذهنیت استخراج کرد؛ اما عملاً به دلیل وجود ذهنیت‌های مشابه، ممکن است تعدادی از افراد تحت یک دیدگاه دسته‌بندی شوند. اساسی‌ترین معیار برای مهم دانستن یک دیدگاه، تفسیرپذیر بودن آن است. منظور از تفسیرپذیری این است که پژوهشگر بتواند بر اساس نتایج به دست آمده، ذهنیت افراد تحت یک دیدگاه را شناسایی و آن را معنی و تفسیر کند. علاوه بر معیار تفسیرپذیری، معیارهای کمّی نیز برای ارزیابی مهم بودن یک دیدگاه استفاده می‌شوند. قدرمطلق بار عاملی تعلق گرفته به یک فرد از نظر روش Q، باید از $\frac{۲/۵۸}{\sqrt{n}}$ بزرگ‌تر باشد، که در آن، n تعداد شاخص‌هاست؛ که در پژوهش حاضر، ۳۳

QSORT	دیدگاه ۱	دیدگاه ۲	دیدگاه ۳
مدیر طرح شماره ۱	۰/۴۴۹۶ X	−۰/۲۸۱۴	−۰/۰۴۸۲
مدیر طرح شماره ۲	۰/۴۴۳۷ X	−۰/۱۸۰۸	۰/۲۰۶۶
مدیر طرح شماره ۳	۰/۲۴۷۵	−۰/۲۸۰۱	−۰/۷۶۱۷ X
مدیر طرح شماره ۴	۰/۳۱۷۲	−۰/۵۳۲۸ X	۰/۰۸۴۴
مدیر طرح شماره ۵	۰/۸۳۲۳ X	۰/۲۹۷۰	۰/۰۹۰۶
مدیر طرح شماره ۶	۰/۷۹۹۷ X	۰/۱۴۴۹	۰/۳۵۶۲
مدیر طرح شماره ۷	۰/۸۰۱۳ X	۰/۲۵۳۸	۰/۰۶۰۰

شکل ۴. نتایج مربوط به تحلیل عاملی (استخراج دیدگاه‌ها) مدیریت طرح.

مورد بوده است. بنابراین حاصل عبارت $\frac{۲/۵۸}{\sqrt{۳۳}}$ برابر با ۰/۴۴ خواهد بود. عدد اخیر، کمینه‌ی بار عاملی مورد قبول برای تفسیرپذیر بودن یک دیدگاه است. در پژوهش حاضر، اطلاعات امتیازدهی به ۳۳ شاخص توسط هر دسته از کارفرمایان، مشاوران، پیمانکاران و مدیران طرح به صورت جداگانه وارد نرم‌افزار تخصصی تحلیل عاملی Q، یعنی PQ Method شده و با ایجاد ۳۰ چرخش بین دیدگاه‌های مختلف، یک جواب بهینه به دست آمده و سپس چرخش جواب‌ها به صورت دستی انجام شده است. نتایج مربوط به گروه مدیریت طرح در شکل ۴ مشاهده می‌شود. قرار گرفتن علامت X در مقابل هر کدام از اعداد افراد، نشان‌دهنده‌ی تعلق و میزان تعلق هر فرد به آن دیدگاه (Q Sort) است. در پایان تحلیل، نرم‌افزار یک امتیاز عاملی[۱۶] برای هر شاخص (عبارت) جهت مقایسه‌ی شاخص‌ها (عبارت‌ها) محاسبه می‌کند.

به عنوان مثال، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۴ برای ۷ مدیرطرح مشارکت‌کننده در پژوهش حاضر، ۳ دیدگاه (Q Sort) شناسایی شده است، که مدیریت طرح‌های ۱، ۲، ۵، ۶ و ۷ به دیدگاه اول، مدیریت طرح ۴ به دیدگاه دوم و مدیریت طرح ۳ به دیدگاه سوم تعلق داشته‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، ممکن است برای یک نفر هم یک دیدگاه استخراج شود و تعداد افراد، ملاکی برای استخراج دیدگاه نیستند.

ذیل هرکدام از دیدگاه‌های شناسایی شده، برای امتیاز عاملی هر شاخص کلیدی عملکرد یک Z-score به دست آمده است. امتیاز عاملی هر شاخص کلیدی عملکرد با S مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$Z = \frac{S-\mu}{\sigma}$$

$$\mu = Mean \quad , \sigma = Standard\ Deviation \qquad (۱)$$

که در آن، μ میانگین و σ انحراف استاندارد هستند. در هر کدام از دیدگاه‌هایی که برای گروه‌های ذی‌نفع (کارفرمایان، مشاوران، پیمانکاران و مدیران طرح) استخراج می‌شوند، نرم‌افزار Q بر اساس رابطه‌ی ۱، شاخص‌ها را به ترتیب از ۱ تا ۳۳ مطابق جدول ۲ و شکل ۳ مرتب می‌کند. در پژوهش حاضر، برای تحلیل هر دیدگاه در هر یک از گروه‌های ذی‌نفع، ۷ اولویت اول (منطبق بر شکل ۳ وجدول ۲)، که دارای امتیازهای ۴+، ۳+ و ۲+ هستند و ۱۳ اولویت اول شاخص‌ها (مطابق شکل ۳ و جدول ۲)، که دارای امتیازهای ۴+، ۳+، ۲+ و ۱+ هستند، بررسی شده‌اند. سپس شاخص‌هایی که در ۷ اولویت اصلی دیدگاه‌های مختلف قرار دارند، بررسی و شاخص‌هایی که بیشترین توافق را داشته‌اند، تحلیل شده‌اند. بررسی ۱۳ اولویت اصلی نیز برای جامع‌تر شدن تحلیل و جلوگیری از دیده نشدن بعضی از اولویت‌هایی است که با اهمیت بوده‌اند، ولی در ۷ اولویت جایگاهی نداشته‌اند. کم اهمیت‌ترین شاخص‌های کلیدی عملکرد نیز با توجه به رتبه‌های انتهایی هر دیدگاه (۴ـ) تحلیل شده‌اند.

۴. پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

در بخش کنونی، به تحلیل شاخص‌های کلیدی عملکرد و دیدگاه‌های شناسایی شده از منظر ذی‌نفعان به صورت جداگانه پرداخته شده است.

۱.۴. تحلیل دیدگاه‌های استخراج شده‌ی گروه کارفرما

در پژوهش حاضر، ۱۵ نفر از مصاحبه‌شوندگان کارفرما بودند و در نهایت، برای آنان ۴ نوع دیدگاه مجزا به دست آمد. با بررسی نهایی نتایج مشخص شد یکی از دیدگاه‌های به دست آمده از نظر کمّی، قابلیت تفسیرپذیری نداشته و بنابراین، نتایج مربوط به آن حذف شده است (تعلق دیدگاه اخیر به هیچ دسته‌یی معنادار نبوده و بیش از ۰/۴۴ نبوده است.) در نهایت ۳ دیدگاه، تحلیل و بررسی شده‌اند.

- **تحلیل دیدگاه اول:** در دیدگاه اول، اولویت‌های اصلی شاخص‌های کلیدی از منظر کارفرمایان در حوزه‌های «کیفیت»، «ایمنی » و «زمان» تعریف شده‌اند. در دیدگاه اول، شاخص «فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه‌ی (نسبت به هزینه‌ی کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد»، برتر بوده است، که یکی از شاخص‌های حوزه‌ی کیفیت است. در دیدگاه اول، کارفرمایان توجه ویژه‌یی به شاخص‌های حوزه‌ی اقتصادی نداشته و تمرکز خود را بر روی کیفیت و زمان پروژه قرار داده‌اند. البته باید توجه داشت که بی‌توجهی به شاخص‌های اقتصادی می‌تواند معلول نوع قرارداد نظام اجرای کارفرما با دیگر عوامل یا دولتی بودن آن باشد.
- **تحلیل دیدگاه دوم:** در دیدگاه دوم، اولویت‌های اصلی شاخص‌های کلیدی از منظر کارفرمایان در حوزه‌های «هزینه»، «زمان» ، «تدارکات» و «کیفیت» تعریف شده‌اند. شاخص «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.» به عنوان شاخص برتر در دیدگاه دوم، مطرح شده است. در نظر داشتن استفاده‌ی مؤثر از منابع در کنار شاخص‌های مربوط به هزینه، کیفیت و زمان، نشان‌دهنده‌ی بالا بودن اهمیت مسائل اقتصادی برای این دسته از کارفرمایان است.
- **تحلیل دیدگاه سوم:** در دیدگاه سوم، مانند دیدگاه‌های دیگر، یکی از اصلی‌ترین حوزه‌ها، حوزه‌ی «زمان» است. علاوه بر این، حوزه‌ی مباحث مربوط به «نیروی انسانی»، «تدارکات» و «محیط‌زیست» نیز جزء اولویت‌های کارفرما هستند. در دیدگاه سوم، شاخص «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.» برتر بوده است. فقط این دسته از کارفرمایان بودند که توجه ویژه‌یی به شاخص‌های محیط‌زیستی داشته و مباحث مربوط به مدیریت نیروی انسانی نیز برای آنها، جایگاه ویژه‌یی داشته است.

در مجموع، در دیدگاه‌های سه‌گانه‌ی اخیر کارفرمایان، شاخص‌های کلیدی عملکرد در حوزه‌های «کیفیت»، «زمان» و «نیروی انسانی»، بالاترین اولویت و شاخص‌های حوزه‌های «ایمنی»، «هزینه» و «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار» کمترین اهمیت را داشته‌اند. در جدول ۳، شاخص‌هایی که بیشترین تکرار را در میان ۷ و ۱۳ اولویت اصلی ۳ دیدگاه مطرح شده برای کارفرما داشته‌اند، ارائه شده‌اند.

۲.۴. تحلیل دیدگاه‌های استخراج شده‌ی گروه مشاور

در پژوهش حاضر، ۱۵ نفر از مصاحبه‌شوندگان مشاور بودند و در نهایت برای آنها، ۴ نوع دیدگاه مجزا به دست آمده است. ۷۳٪ از مشاوران، دارای نوع نگاه مشترکی بودند، که در دیدگاه اول منعکس شده است.

جدول ۳. شاخص‌های کلیدی عملکرد پرتکرار در دیدگاه کارفرمایان.

تعداد	حوزه	شاخص	شماره
شاخص‌های پرتکرار در ۷ اولویت دیدگاه‌های کارفرمایان			
۲	زمان‌بندی	تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.	۳
۲	نیروی انسانی	بهره‌وری مدیریت به میزان بیشینه برسد.	۲۶
۲	تدارکات	استفاده‌ی مؤثر و بهینه از منابع همراه با کاهش نرخ پرت مصالح	۲۸
شاخص‌های پر تکرار در ۱۳ اولویت دیدگاه‌های کارفرمایان			
۳	زمان‌بندی	تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.	۳
۳	نیروی انسانی	بهره‌وری کارگران به میزان بیشینه برسد.	۲۷

جدول ۴. شاخص‌های کلیدی عملکرد از دیدگاه مشاوران.

تعداد	حوزه	شاخص	شماره
شاخص‌ها پرتکرار در ۷ اولویت دیدگاه‌های مشاوران			
۳	کیفیت	فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه (نسبت به هزینه‌ی کل پروژه) ناشی از آن به میزان کمینه‌ی ممکن برسد.	۱۰
۳	ایمنی	نرخ حوادث به میزان کمینه‌ی ممکن برسد و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.	۱۳
۲	ایمنی	تعداد جلسات آموزش ایمنی مناسب باشد و تجهیزات ایمنی تأمین شود.	۱۴
۲	تدارکات	استفاده‌ی مؤثر و بهینه از منابع همراه با کاهش نرخ پرت مصالح	۲۸
شاخص‌های پرتکرار در ۱۳ اولویت دیدگاه‌های مشاوران			
۳	زمان‌بندی	راندمان زمان‌بندی و شاخص عملکرد زمان باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	۱
۴	زمان‌بندی	تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.	۳
۳	کفیت	فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه (نسبت به هزینه‌ی کل پروژه) ناشی از آن به میزان کمینه‌ی ممکن برسد.	۱۰
۴	ایمنی	نرخ حوادث به میزان کمینه‌ی ممکن برسد و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.	۱۳
۳	ایمنی	تعداد جلسات آموزش ایمنی مناسب باشد و تجهیزات ایمنی تأمین شود.	۱۴
۳	تدارکات	استفاده‌ی مؤثر و بهینه از منابع همراه با کاهش نرخ پرت مصالح	۲۸

- **تحلیل دیدگاه اول:** در دیدگاه اول، اولویت اصلی شاخص‌های کلیدی از نقطه نظر مشاوران، شاخص‌های حوزه‌های «زمان» و «کیفیت» بوده‌اند. شاخص برتر مدنظر این دسته از مشاوران نیز مانند بعضی از کارفرمایان، شاخص «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.»، بوده است؛ که نشان‌دهنده‌ی اهمیت توجه به تأمین مالی به موقع پروژه برای رسیدن پروژه به اهداف خود است.

- **تحلیل دیدگاه دوم:** در دیدگاه دوم، اولویت اصلی شاخص‌های کلیدی از منظر مشاوران، شاخص‌های حوزه‌های «محیط‌زیست»، «ایمنی» و «ریسک» بوده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دیدگاه دوم با دیدگاه اول کاملاً متفاوت بوده و مسائلی فارغ از مثلث زمان، کیفیت و هزینه، مورد توجه دیدگاه دوم قرار داشته است. نکته‌ی جالب توجه دیدگاه دوم این است که شاخص «میزان استفاده از مصالح تجدیدپذیر سریع یا مصالح بازیافتی به میزان بیشینه برسد.»، شاخص برتر بوده است و این در حالی است که شاخص مذکور، در دیدگاه‌های دیگران، اهمیت ویژه‌یی نداشته است.

- **تحلیل دیدگاه سوم:** در دیدگاه سوم، اولویت اصلی شاخص‌های کلیدی از نقطه‌نظر مشاوران، شاخص‌های حوزه‌های «هزینه»، «ایمنی» و «کیفیت» بوده است. در دیدگاه سوم مانند دیدگاه اول، تأکید ویژه‌یی بر کیفیت شده است؛ اما اولویت اصلی دیدگاه سوم درکنار کیفیت برخلاف دیدگاه اول، هزینه بوده است. به طوری که شاخص برتر دیدگاه سوم («هزینه‌ی پروژه در مقایسه با متوسط هزینه‌ی پروژه‌های مشابه همواره در وضعیت مطلوب‌تری قرار بگیرد»)، نیز در حوزه‌ی هزینه، دسته‌بندی شده است.

- **تحلیل دیدگاه چهارم:** در دیدگاه چهارم نیز مانند دیدگاه دوم، توجه ویژه‌یی به شاخص‌های کلیدی از منظر مشاوران به حوزه‌های «زمان» و «ایمنی» شده است. علاوه بر دو حوزه‌ی اخیر، توجه ویژه‌ی این دسته از مشاوران به حوزه‌ی «تدارکات» نیز قابل توجه بوده است. این نکته نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن رویکرد اخیر به ابعاد اجرایی پروژه‌هاست. در دیدگاه چهارم، شاخص «همکاری و هم‌افزایی تیم‌های کاری، به میزان بیشینه برسد.»، نیز به عنوان شاخص برتر معرفی شده است.

در مجموع دیدگاه‌های چهارگانه‌ی مشاوران به شاخص‌های کلیدی عملکرد، شاخص‌های حوزه‌های «زمان»، «کیفیت» ، «ایمنی» و «هزینه» دارای بالاترین اولویت و شاخص‌های حوزه‌های «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار»، «دعاوی»، و «تدارکات» کمترین اهمیت را داشته‌اند. در جدول ۴، شاخص‌هایی که بیشترین تکرار را درمیان ۷ و ۱۳ اولویت اصلی ۴ دیدگاه مطرح شده برای مشاوران داشته‌اند، ارائه شده‌اند.

۳.۴. تحلیل دیدگاه‌های استخراج شده گروه پیمانکار

در پژوهش حاضر، ۱۱ نفر از مصاحبه‌شوندگان، پیمانکار بودند و در نهایت برای

جدول ۵. شاخص‌های کلیدی عملکرد از دیدگاه پیمانکاران.

شاخص‌های پرتکرار در ۷ اولویت دیدگاه‌های مشاوران			
تعداد	حوزه	شاخص	شماره
۲	هزینه	هزینه‌ی پروژه در مقایسه با متوسط هزینه‌ی پروژه‌های مشابه، همواره در وضعیت مطلوب‌تری قرار بگیرید.	۶
۲	تدارکات	کارکرد ماشین‌آلات کنترل و بیشینه شود.	۲۹
۲	تدارکات	انحراف ماشین‌آلات از زمان و هزینه‌ی پیش‌بینی شده، کمینه شود.	۳۰

جدول ۶. شاخص‌های کلیدی عملکرد از دیدگاه مدیریت طرح.

شاخص‌های پرتکرار در ۷ اولویت دیدگاه‌های مشاوران			
تعداد	حوزه	شاخص	شماره
۲	زمان	راندمان زمان‌بندی و شاخص عملکرد زمان باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	۱
۲	ذی‌نفعان	رضایت ذی‌نفعان کلیدی پروژه و انتظارات آنان همواره در تصمیمات مورد توجه باشد.	۱۲
۲	هزینه	راندمان هزینه و شاخص عملکرد هزینه باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	۵
شاخص‌های پرتکرار در ۱۳ اولویت دیدگاه‌های مدیریت طرح			
۳	زمان	تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.	۳
۳	ایمنی	نرخ حوادث به میزان کمینه‌ی ممکن برسد و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.	۱۳

آنان ۳ نوع دیدگاه مجزا به دست آمده است. ۹۰٪ از پیمانکاران دارای نوعی دیدگاه مشترک بودند، که در رویکرد اول منعکس شده است.

- **تحلیل دیدگاه اول:** در پژوهش حاضر، تمامی پیمانکاران به جز یک پیمانکار، در قالب دیدگاه اول می‌گنجند. در دیدگاه اول، اولویت اصلی شاخص‌های کلیدی از نقطه‌نظر پیمانکاران، شاخص‌های حوزه‌های «هزینه»، «زمان»، «کیفیت» و «نیروی انسانی» بوده‌اند. اهمیت بحث‌های اقتصادی به وضوح در اولویت‌های مذکور مشاهده می‌شود. بالا بودن اهمیت بهره‌وری نیروی انسانی در دیدگاه اول، نشان‌دهنده‌ی اهمیت روزافزون حوزه‌ی اخیر در پروژه‌های عمرانی است. در دیدگاه اول، شاخص «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.» به عنوان شاخص برتر در نظر گرفته شده است.
- **تحلیل دیدگاه دوم:** در دیدگاه دوم، شاخص‌های کلیدی عملکرد متفاوتی نسبت به دیدگاه اول در اولویت قرار گرفته‌اند. قرارگرفتن شاخص‌های حوزه‌های «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار» و «ریسک» در کنار شاخص‌های «زمان» در رأس اولویت‌های دیدگاه دوم، جالب توجه است. البته اولویت‌دارترین شاخص در دیدگاه دوم، «نرخ روزهایی که برای رسیدن به برنامه‌ی زمانی، اضافه‌کاری انجام شده است، کمینه شود.» بوده است که جزء شاخص‌های حوزه‌ی زمان طبقه‌بندی می‌شود.

در مجموع دیدگاه‌های دوگانه‌ی پیمانکاران، شاخص‌های کلیدی عملکرد در حوزه‌های «زمان»، «هزینه» و «تدارکات»، بالاترین اولویت و شاخص‌های کلیدی عملکرد در حوزه‌های «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار»، «دعاوی» و «ایمنی» کمترین اهمیت را دارند. در جدول ۵، شاخص‌هایی که بیشترین تکرار را در میان ۱۳ اولویت اصلی ۲ دیدگاه مطرح شده برای پیمانکاران داشته‌اند، ارائه شده‌اند.

۴.۴. تحلیل دیدگاه‌های استخراج شده‌ی گروه مدیریت طرح

در پژوهش حاضر، ۷ نفر از مصاحبه‌شوندگان، مدیر طرح بوده و در نهایت برای آنان ۳ نوع دیدگاه مجزا به دست آمده است. ۷۱٪ از مدیران طرح، نوعی دیدگاه مشترک داشتند، که در رویکرد اول منعکس شده است.

- **تحلیل دیدگاه اول:** در دیدگاه اول از منظر مدیران طرح، شاخص‌های کلیدی عملکرد مربوط به حوزه‌ی «زمان»، «نیروی انسانی» و «هزینه»، اهمیت ویژه‌یی داشته‌اند. نتایج دیدگاه اول، به جمع‌بندی دیدگاه کارفرمایان و دیدگاه اول پیمانکاران نزدیک بوده است. در دیدگاه اخیر، شاخص «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.»، شاخص برتر بوده و قرارگرفتن شاخص‌های مربوط به مدیریت زمان در اولویت‌های دوم و سوم نیز حاکی از اهمیت ویژه‌ی حوزه‌ی مذکور در دیدگاه مدیریت طرح است.
- **تحلیل دیدگاه دوم:** در دیدگاه دوم از منظر مدیران طرح، شاخص‌های کلیدی عملکرد مربوط به حوزه‌ی «زمان»، «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار» و «ریسک» در اولویت قرار گرفته‌اند. دیدگاه حاضر نیز نزدیک به دیدگاه دوم پیمانکاران است و به نوعی یک رویکرد نوین به شمار می‌آید. در دیدگاه اخیر، شاخص «نرخ روزهایی که برای رسیدن به برنامه‌ی زمانی، اضافه‌کاری انجام شده است، کمینه شود.» به عنوان شاخص برتر در نظر گرفته شده است.
- **تحلیل دیدگاه سوم:** در دیدگاه سوم نیز حوزه‌ی «زمان»، اهمیت ویژه‌یی دارد. در دیدگاه سوم، علاوه بر زمان، تأکید زیادی بر حوزه‌ی «ایمنی» شده است، که در بین رویکردهای دیگر منحصربه‌فرد به نظر می‌رسد. تأکید بر ایمنی از آن‌جایی مشخص می‌شود که شاخص برتر دیدگاه حاضر، «نرخ حوادث به میزان کمینه‌ی ممکن برسد و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.» معرفی شده است.

در مجموع، دیدگاه‌های سه‌گانه‌ی مدیریت طرح شاخص‌های حوزه‌های «زمان»، «نیروی انسانی» و «ایمنی»، بالاترین اولویت و شاخص‌های حوزه‌های «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار»، «دعاوی» و «ریسک» کمترین اهمیت را داشته‌اند. در جدول ۶، شاخص‌هایی که بیشترین تکرار را در میان ۷ و ۱۳ اولویت اصلی ۳ دیدگاه مطرح شده برای مدیریت طرح داشته‌اند، ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، فقط دیدگاه مدیریت طرح است که اهمیت ویژه‌یی برای حوزه‌ی مدیریت ذی‌نفعان قائل شده و شاخص

مربوط به حوزه‌ی مذکور، یکی از پرتکرارترین شاخص‌های دیدگاه‌های مدیریت طرح بوده است.

۵.۴. بحث و بررسی شاخص‌های مشترک

شاخص‌های حوزه‌ی زمان، پرتکرارترین و با اهمیت‌ترین شاخص‌هایی بودند که بسیاری از ذی‌نفعان بر روی آن توافق داشتند. در هر سه دیدگاه کارفرمایی، دیدگاه اول و چهارم مشاوران، تمام دیدگاه‌های پیمانکاری و تمام دیدگاه‌های مدیریت طرح، حوزه‌ی «زمان» را به عنوان یکی از حوزه‌های اصلی ارزیابی شاخص عملکرد پروژه مدنظر خود اعلام کرده‌اند و شاخص شماره‌ی ۳، یعنی «تأخیری در تأمین مالی پروژه نباید صورت پذیرد.»، در اولویت اول بوده است. توافق جمعی ذی‌نفعان نشان می‌دهد که می‌توان از دغدغه‌های مربوط به تأخیر زمانی پروژه به عنوان یک زبان مشترک با تمامی ذی‌نفعان استفاده کرد، که باید برنامه‌ریزی و کنترل آن مورد توجه ویژه‌ی مدیر پروژه قرار گیرد.

دیدگاه‌های اول و دوم کارفرما، دیدگاه‌های اول و سوم مشاور و دیدگاه اول پیمانکار توجه ویژه‌یی به کیفیت پروژه داشته‌اند و شاخص‌های «فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه (نسبت به هزینه‌ی کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد.» و «فراوانی دوباره‌کاری‌ها و تأخیر زمانی (نسبت به مدت زمان کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد.»، از پرتکرارترین شاخص‌های اصلی در دیدگاه‌های مختلف بوده‌اند. فقط مدیریت طرح بوده است که توجه کمتری به حوزه‌ی اخیر داشته است؛ که یکی از دلایل پیش‌آمد نتیجه‌ی اخیر این است که مشارکت‌کنندگان مدیریت طرح در پژوهش حاضر، توجه به شاخص‌های دیگر حوزه‌ها، مانند «نیروی انسانی» و «ایمنی» را ضامن کیفیت پروژه می‌دانستند.

شاخص‌های حوزه‌ی ایمنی نیز یکی از آن دسته شاخص‌هایی بودند که با توجه به موافقت دیدگاه اول کارفرما، دیدگاه‌های دوم، سوم و چهارم مشاور و دیدگاه سوم مدیریت طرح، مورد موافقت طیف بزرگی از ذی‌نفعان بوده‌اند. شاخص «نرخ حوادث به کمینه‌ی ممکن برسد و نسبت به پروژه‌های مشابه کمتر باشد.» از پرطرفدارترین شاخص‌های حوزه‌ی ایمنی بوده است. نکته‌ی جالب توجه، اختلاف‌نظر قابل‌توجه پیمانکار با دیگر ذی‌نفعان در حوزه‌ی ایمنی است. با این‌که حوزه‌ی ایمنی، مورد توجه دیدگاه‌های مختلف ذی‌نفعان قرار گرفته است، اما شاخص‌های حوزه‌ی ایمنی از کم‌اهمیت‌ترین شاخص‌ها برای پیمانکاران بوده است. این در حالی است که ضامن اصلی رعایت اصول ایمنی در کارگاه‌های عمرانی، پیمانکاران هستند و بی‌توجهی آنان به حوزه‌ی ایمنی، تلاش‌های ذی‌نفعان دیگر را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

شاخص‌های مربوط به مدیریت هزینه، مورد توجه دیدگاه‌هایی، از جمله: دیدگاه دوم کارفرما، دیدگاه سوم مشاور و دیدگاه اول پیمانکار و مدیریت طرح بوده‌اند. شاخص «راندمان هزینه و شاخص عملکرد هزینه باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.» شاخص برتر در حوزه‌ی شاخص‌های مدیریت هزینه بوده است. شاخص هزینه نیز مانند شاخص ایمنی، مورد توافق تمامی ذی‌نفعان نبوده است. این مسئله از آن‌جایی واضح‌تر می‌شود که شاخص‌های هزینه از جمله کم‌اهمیت‌ترین شاخص‌های مورد توجه کارفرمایان بوده است. البته باید توجه داشت که در پژوهش حاضر، عموم کارفرمایان جزء کارفرمایان دولتی یا خصوصی بوده‌اند، که این موضوع دلیل مناسبی برای کم‌اهمیت بودن شاخص‌های هزینه و پراهمیت بودن شاخص‌های زمان از منظر کارفرمایان مذکور بوده است. این در حالی است که شاخص‌های مورد توجه پیمانکاران عموماً ناظر به هزینه بوده است و همین عامل می‌تواند موجب ایجاد افتراق در پروژه‌های دولتی باشد. در این زمینه، دیدگاه مشاوران نیز به دیدگاه پیمانکار نزدیک بوده است؛ زیرا مشاوران نیز آثار سوء بی‌توجهی به تأمین بودجه‌ی پروژه در زمان مشخص را در پروژه‌های مختلف مشاهده کرده‌اند.

عدم توجه به بعضی از حوزه‌ها نیز مورد توافق نسبی تمامی ذی‌نفعان قرارگرفته است. هر چند به حوزه‌ی «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار» در بعضی دیدگاه‌ها توجه شده است؛ اما در عموم دیدگاه‌های ذی‌نفعان به عنوان کم‌اهمیت‌ترین موضوع معرفی شده است. باید توجه داشت که شاید این موضوع با توجه به مشکلات جدی در بدیهیات مدیریت پروژه، نتیجه‌ی طبیعی دیدگاه‌های متخصصان عملیاتی درکشورهای در حال توسعه باشد. شاخص‌های حوزه‌ی «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار»، جایگاه ویژه‌تری در بین مشاوران نسبت به دیگران داشته است. یکی دیگر از حوزه‌های کم‌اهمیت از منظر عموم ذی‌نفعان، حوزه‌ی مدیریت دعاوی است. همان‌طور که در جمع‌بندی دیدگاه‌های مختلف مشاهده می‌شود، به جز کارفرما، تمامی ذی‌نفعان دیگر، حوزه‌ی دعاوی و شاخص‌های مربوط به آن را بسیارکم‌اهمیت ارزیابی کرده‌اند. این نکته شاید از پذیرش دعاوی به عنوان یک واقعیت با اثرپذیری پایین، نشأت گرفته باشد. به همین جهت ذی‌نفعان مختلف، حوزه‌ی «محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار» را شاخص خوبی برای ارزیابی عملکرد پروژه ندانسته‌اند. در مجموع دیدگاه‌های مختلف و با توجه به جایگاه شاخص‌های کلیدی عملکرد در دیدگاه‌های مختلف ذی‌نفعان، شاخص‌های جدول ۷ به ترتیب بیشترین توافق را با اولویت اول و اولویت آخر داشته‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بر خلاف تمامی پژوهش‌های انجام شده‌ی حوزه‌ی ذکر شده، فقط به اولویت‌بندی شاخص‌های کلیدی عملکرد پرداخته نشده و الگویی برای شناسایی و تحلیل نگرش‌های متفاوت ذی‌نفعان کلیدی و درک تعارض‌ها و تشابه‌های موجود با روش Q معرفی شده است. شناخت رویکردهای متفاوت ذی‌نفعان که ممکن است در طول زمان نیز تغییر یابد، اهمیت فراوانی دارد. لذا مدیران پروژه باید به صورت دائم از رویکرد ذی‌نفعان، ارزیابی دقیقی داشته باشند.

در مجموع به نظر می‌رسد در پروژه‌های ساخت‌وساز، شاخص‌های کلیدی عملکرد حوزه‌های: زمان، کیفیت، ایمنی و هزینه، اهمیت بالایی دارند و می‌توانند دغدغه‌های بسیاری از ذی‌نفعان را پوشش دهند. درکنار شاخص‌های اخیر، توجه نسبتاً بالای ذی‌نفعان به حوزه‌ی منابع انسانی نیز قابل توجه است.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که شاخص‌های کلیدی عملکرد حوزه‌ی زمان با اهمیت‌ترین شاخص‌ها هستند و تأکید تمام ذی‌نفعان بر نبود تأخیر در تأمین مالی پروژه، قابل توجه است؛ که نشان‌دهنده‌ی اهمیت آن در عدم ایجاد تأخیر در پروژه و ایجاد رضایت عمومی ذی‌نفعان است. یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد مورد تأکید عموم ذی‌نفعان، میزان دوباره‌کاری‌های ایجاد شده در پروژه بوده است، که هم موجب ایجاد هزینه و هم موجب تأخیر در انجام پروژه خواهند شد. بی‌توجهی عموم ذی‌نفعان به حوزه‌ی محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار می‌تواند حاکی از عقب‌ماندگی فرهنگی در صنعت ساخت‌وساز باشد. مدیریت دعاوی نیز از حوزه‌هایی است که فقط مورد توجه مدیران طرح بوده است و باید برای جلوگیری از هزینه‌های ناشی از ایجاد دعاوی، توجه بیشتری به آن جلب شود.

جدول ۷. شاخص‌های کلیدی عملکرد مورد توافق تمام ذی‌نفعان.

۷ اولویت مورد توافق		
ردیف	شاخص	شماره
۱	تأخیری در تأمین تامین مالی پروژه نباید صورت بپذیرد.	۳
۲	فراوانی دوباره‌کاری‌ها و افزایش هزینه (نسبت به هزینه کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد.	۱۰
۳	راندمان هزینه و شاخص عملکرد هزینه باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	۵
۴	فراوانی دوباره‌کاری‌ها و تأخیر زمانی (نسبت به مدت‌زمان کل پروژه) ناشی از آن به کمینه‌ی ممکن برسد.	۱۱
۵	جلسات آموزش ایمنی به کارگران با نظم برگزار شده و تجهیزات ایمنی تأمین شود.	۱۴
۶	راندمان زمان‌بندی و شاخص عملکرد زمان باید همواره در محدوده‌یی مشخص قرار بگیرد.	۱
۷	استفاده مؤثر و بهینه از منابع همراه با کاهش نرخ پرت مصالح	۲۸
۷ اولویت آخر مورد توافق		
ردیف	عبارت	شماره
۱	میزان تولید کربن دی‌اکسید پروژه به کمینه‌ی ممکن برسد.	۲۴
۲	میزان استفاده از مصالح تجدیدپذیر سریع یا مصالح بازیافتی به بیشینه برسد.	۲۲
۳	نرخ روزهایی که برای رسیدن به برنامه زمانی، اضافه‌کاری انجام شده، کمینه شود.	۲
۴	نسبت تولید زباله بازیافتی به کل زباله‌ها به میزان مطلوبی افزایش پیدا کند.	۲۱
۵	میزان برگزاری جلسات حل اختلاف به کمینه برسد.	۱۸
۶	انحراف ماشین‌آلات از زمان و هزینه پیش‌بینی شده کمینه شود.	۳۰
۷	نرخ رویدادهای پیش‌بینی نشده کمینه شود.	۳۳

در سال‌های اخیر، توجه به بحث ایمنی در صنعت ساخت‌وساز کشور، افزایش چشمگیری داشته و در پژوهش حاضر نیز کنترل نرخ حوادث از شاخص‌های کلیدی عملکرد اصلی مورد تأکید بوده است. نکته‌ی جالب توجه، عدم اولویت حوزه‌ی ایمنی برای مجریان اصلی آن، یعنی پیمانکاران، بوده است. از طرفی، توجه به شاخص‌های کلیدی عملکرد حوزه‌ی هزینه، یکی از دغدغه‌های اصلی پیمانکاران بوده است، در حالی که کارفرمایان توجه کمتری به آن داشته‌اند.

داشبورد مدیریت پروژه با توجه به نتایج دیدگاه‌های مختلف در پژوهش حاضر به صورت بهینه، قابل طراحی است. داشبورد مدیریت پروژه‌ی کاربردی باید با تعداد کمی از شاخص‌های کلیدی عملکرد، که تأثیر به‌سزایی در موفقیت پروژه دارند، طراحی شود. شاخص‌های اولویت‌دار معرفی شده که مورد توافق تمامی ذی‌نفعان بوده‌اند، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی عملکرد پروژه هستند.

در پژوهش‌های آتی می‌توان ارزیابی رویکرد ذی‌نفعان در پروژه‌هایی با نظام انجام متفاوت، مانند نظام انجام دوعاملی و یک‌پارچه‌ی پروژه یا در پروژه‌هایی با جنس متفاوت، مانند پروژه‌های راه‌سازی با فنّاوری‌هایی مانند نظریه‌ی بازی‌ها در قالب یک مدل ریاضی بررسی شود و مبتنی بر مدل‌های به دست آمده، پیشنهادهایی جهت رفع مشکلات و اختلاف نظرهای ذی‌نفعان در پروژه‌های عمرانی ارائه شود.

پانوشت‌ها

1. key performance indicators
2. Takim
3. Parmenter
4. Kerzner
5. Hatush
6. Rankin
7. Park
8. Leon
9. Ingle
10. He
11. McKeown & Thomas
12. Kerlinger
13. Donner
14. Q-factor qnalysis
15. factor loading
16. factor score

منابع (References)

1. Ogunlana, S.O. "Beyond the 'iron triangle': Stakeholder perception of key performance indicators (KPIs) for large-scale public sector development projects", *International Journal of Project Management*, **28**(3), pp. 228-236 (2010).

2. Kerzner, H. "Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance", *John Wiley & Sons* (2017).

3. Takim, R. and Akintoye, A. "Performance indicators for successful construction project performance", *18th Annual ARCOM Conference*, pp. 545-555 (2002).
4. Parmenter, D. "Key performance indicators: developing, implementing, and using winning KPIs", *John Wiley & Sons* (2015).
5. Chan, A.P., Scott, D. and Lam, E.W. "Framework of success criteria for design/build projects", *Journal of Management in Engineering*, **18**(3), pp. 120-128 (2002).
6. Hatush, Z. and Skitmore, M. "Evaluating contractor prequalification data: selection criteria and project success factors", *Construction Management and Economics*, **15**(2), pp. 129-147 (1997).
7. Rankin, J., Fayek, A.R., Meade, G. end et al. "Initial metrics and pilot program results for measuring the performance of the Canadian construction industry", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **35**(9), pp. 894-907 (2008).
8. Park, S.H. "Whole life performance assessment: critical success factors", *Journal of Construction Engineering and Management*, **135**(11), pp. 1146-1161 (2009).
9. Leon, H., Osman, H., Georgy, M. and et al. "System dynamics approach for forecasting performance of construction projects", *Journal of Management in Engineering*, **34**(1) (2017).
10. Sebt, M.H., Adli, A. and Naghash Toosi, H. "Integrated framework for project performance evaluation from the viewpoint of construction industry contractors", *Sharif Civil Engineering*, **33**(2), pp. 83-95 (in persian) (2018).
11. Fanaei, S.S., Moselhi, O. and Alkass, S. "Performance prediction of construction projects using soft computing methods", *Canadian Journal of Civil Engineering(ja)*, **46**(3) (2018).
12. Ingle, P.V. and Mahesh, G. "Construction project performance areas for Indian construction projects", *International Journal of Construction Management*, **22**(18), pp. 1-12 (2020).
13. Moradi, S., Ansari, R. and Taherkhani, R. "A systematic analysis of construction performance management: key performance indicators from 2000 to 2020", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **46**, pp. 1-17 (2021).
14. He, Q., Wang, T., Chan, A.P. and et al. "Developing a list of key performance indictors for benchmarking the success of construction megaprojects", *Journal of Construction Engineering and Management*, **147**(2) (2021).
15. McKeown, B. and Thomas, D.B. "Q methodology", *Sage publications* (2013).
16. Khoshgooyan Fard, A. "Q methodology", *Broadcasting Research Center of the Islamic Republic of Iran*, (in Persian) (2007).
17. Boros, S. "Q-methodology: applications and implications", *Invited lecture at the Research Colloquium of the Department of Organizational Studies*, Tilburg University (2006).
18. Kerlinger, F.N. "Foundations of behavioral research, 1986", *New York, NY: Holt* (2011).
19. Donner, J.C. "Using Q-sorts in participatory processes: An introduction to the methodology", *Social Development Papers*, **36**, pp. 24-49 (2001).
20. Cottle, C.E. and McKeown, B. "The forced-free distinction in Q technique: A note on unused categories in the Q sort continuum", *Operant Subjectivity*, **3**(2), pp.58-63 (1980).

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

شریف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌یی مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه‌یی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته‌ی علمی و فنی باشند.

مشخصات مقالات ارسالی:

* مقاله به‌صورت دوستونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاما فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله http://journal.sharif.ir به دفتر مجله ارسال شود.
* ضمن معرفی نویسنده مسؤول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.
* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.
* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها، نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه ــ با احتساب شکل و نمودار ــ باشد.
* کلیه‌ی عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل‌ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون‌های ۸/۵ سانتی‌متری آراسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی‌متر با ضخامت کادر ۸px و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 با پسوند JPG یا Tif امکان‌پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می‌باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه‌ی لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل‌های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است **اعداد** تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با **فرمت جنرال (عدد معمولی)** ارائه شود **(طبق شکل های نمونه)** و از آوردن **اعداد** به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه‌ی منابع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [ ] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, **4**(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preforation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

© Sharif University of Technology

- Received 11 July 2022; received in revised form 12 October 2022; accepted 29 October 2022.

Abstract

In this research, according to the existing gaps and research objectives, at first, a review of the literature on the subject and research background in the field of key performance indicators has been done. According to the results of the research background, a list of frequent indicators was obtained. In the rest of the research, using Q method and related software as well as questionnaires (48 questionnaires completed by 4 groups of stakeholders including employers, contractors, consultants, and project managers) were analyzed by factor analysis. Though this research has been done in the field of residential, office, and commercial buildings, the overall research process can be implemented in all projects and identify the views of different stakeholders. By identifying the different views of stakeholders, their serious similarities and differences were identified and conflicting views analyzed.

The evaluation results show that there are many similarities between the views of one of the identified factors in one stakeholder group, with another factor in another stakeholder group. For instance, the second view of the contractor and the second view of the project manager or the first view of the employer and the third view of the project management are very close.

Generally, the key performance indicators including time, quality, safety, and cost and procurement of construction projects seem to be of great importance and can cover the concerns of many stakeholders. Time and quality indicators were present in the priorities of the first views of all stakeholders.

Finally, the practical project management dashboard should be designed with a small number of metrics that have a significant impact on project success. The results of this research and the introduced priority indicators that were agreed upon by all stakeholders (Like time and quality) can be appropriate indicators for evaluating the performance of the project.

Key Words: Key performance indicators, Q methodology, stakeholders.

performance of L-shaped RC shear walls. The numerical results including the axial strain and displacement distributions have been attained for 42 L-shaped RC shear walls with three different aspect ratios, at which the shear-lag effects have been taken into consideration. In addition, on the basis of the evolutionary polynomial regression (EPR) analyses, applicable formulations have been established to be utilized for the initial estimation of the effective width of the L-shaped sections. The effectiveness of the proposed expressions has been examined by assessing the R-factor of the estimations. On account of the average R-factor of 0.88, the capability of the proposed expressions has been ascertained in assessing the effective width of L-shaped sections. Moreover, in order to further highlight the unavoidable effects of level of axial loading and drift values on the variation of the effective width, different curves have been presented. Furthermore, calculation of the Mean Absolute Relative Error (MARE) index demonstrates that uniform distribution can well estimate the effective width of L-shaped RC walls.

Key Words: L-shaped RC shear wall, effective width, shear-lag, FE simulation, EPR analysis.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STRENGTH AND MICROSTRUCTURAL BEHAVIOR VARIATIONS OF OIL CONTAMINATED CLAY (AREA: MASJEDSOLEYMAN)

F. Soltani Afarani
fereshteh.soltani2021@gmail.com
N. Khayat(corresponding author)
khayat@iauahvaz.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Ahvaz Branch, Islamic Azad University
DOI:10.24200/J30.2022.60763.3123

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 73-81, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 19 July 2022; received in revised form 18 September 2022; accepted 8 October 2022.

Abstract

Global oil production exceeds two million tons per year, contaminating the soil around oil facilities. Consequently, the soil's geotechnical properties are modified. Since Iran is an oil-rich country with numerous refineries and oil extraction facilities, it is crucial to study the mechanical behavior of contaminated clay soils. This study examines the stabilization of oil-contaminated clay (CH) soils in the Masjedsoleyman contaminated clay soils by adding lime. To this end, laboratory tests were conducted to determine the chemical properties, Atterberg limits, standard compaction, and unconfined compressive strength (UCS) of the soil and conduct a microstructural analysis. As a result, 144 contaminated soil samples (76 mm in height and 38 mm in diameter) containing 0, 4, 7, and 10and 9microstructural analyses after 1, 14, and 28 curing days. The results of the standard compaction test revealed that the optimum moisture content (OMC) of samples with greater oil contamination decreased by 44.4dry density (MDD) increased. The unconfined compressive tests indicated that adding 6other cases. As curing time increased for lime-stabilized samples, the unconfined compressive strength of the samples improved due to the cementation of lime particles with clay soil. The microstructural analysis results demonstrated that the 7discontinuous structure and numerous porous spaces between soil particles. However, longer curing times reduced the porosity and cavities in samples stabilized with different lime percentages. This confirmed the high cation exchange capacity of lime and the presence of pozzolanic reactions, which increased the unconfined compressive strength of the samples. Overall, this study demonstrates the efficacy of adding lime in stabilizing the contaminated clay and the potential use of stabilized contaminated clay as an alternative construction material and practice in the environmental protection of sites.

Key Words: Unconfined compressive strength, microstructural analysis, oil-contaminated clay, stabilization, lime.

EVALUATION OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FROM THE PERSPECTIVE OF STAKEHOLDERS IN CONSTRUCTION PROJECTS

S.A. Fatemi
fatemiseyed@aut.ac.ir
E. Shakeri(corresponding author)
eshakeri@aut.ac.ir
V. Shahhosseini
shahhosseini@aut.ac.ir
Faculty of Civil Engineering and Environment
Amirkabir University of Technology
DOI:10.24200/J30.2022.60658.3115

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 83-93, Research Note

DAMAGE DETECTION AND IDENTIFICATION IN A COLUMN UNDER THE EFFECT OF AXIAL LOAD USING MODAL PROPERTIES AND MODE SHAPE-BASED DETECTION INDEX

M. Khanahmadi
mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
University of Kurdistan, Sanandaj
M. Pouraminian(corresponding author)
majid.pouraminian@iau.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
Ramsar Branch, Islamic Azad University
H. Mohammady Garfamy
h.garfamy@semnan.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
Semnan University
B. Dezhkam
b.dezhkam@velayat.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
University of Velayat, Iranshahr
DOI:10.24200/J30.2022.60873.3129

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 53-62, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 3 August 2022; received in revised form 15 October 2022; accepted 19 October 2022.

Abstract

From the past until now, monitoring the health of structures and identifying different locations of damage to their elements have always been one of the basic requirements of maintaining structures and ensuring the safety of residents. Damage is defined as any modification to the shape or material characteristics of a structure that could impair its overall performance. Irreversible damages to structures can be avoided by promptly identifying, repairing, and replacing any damaged components in early stages. Damage to columns, one of the most vital elements of building structures and bridges, can pose serious concerns about the overall health of the structures compared to damage to other elements. This study proposes a detection index based on the slope and curvature of the mode and explores its usefulness in identifying distinct sites of column damage under axial load. The preliminary findings of this research revealed that as the axial load increases, the value of the natural frequency of all modes drops in both healthy and damaged conditions. Considering that the given columns may buckle and become unstable under the impact of axial load less than the design axial load due to damage, this underlines the necessity of addressing the problem of damage detection in columns under this load. The results also demonstrate that the frequency values of healthy and damaged conditions are different due to damage. Damage detection using the suggested index indicates that it is sensitive to the position of the damage, and that by establishing relative maxima in the damaged area, it is possible to recognize the location of the damage with an error less than one percent. In addition, the findings demonstrated that while the amount of axial load affects frequency values, it does not have any effect on the values of the damage detection index.

Key Words: Structural health monitoring, structural safety, column damage detection, axial load, mode curvature detection index.

EFFECTIVE WIDTH ESTIMATION OF L-SHAPED RC SHEAR WALLS USING EPR ALGORITHM

H. Abdoos
abdoos_hatef@yahoo.com
A.R. Khaloo(corresponding author)
khaloo@sharif.edu
M. Tabiee
m.tabiee75@chmail.ir
Faculty of Civil Engineering
Sharif University of Technology
DOI:10.24200/J30.2022.60850.3125

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 63-71, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 16 August 2022; received in revised form 20 September 2022; accepted 24 September 2022.

Abstract

Effective width is known as an important parameter in the analysis and design of non-rectangular Reinforced Concrete (RC) shear walls. Current design codes, i.e., ACI, CEN, UBC, and BS, propose a constant value for the effective width calculation of flanged sections, which proved to be conservative and ineffective in some cases. Of the conventional non-rectangular RC shear walls, the L-shaped sections have rarely been investigated in the technical literature. As the L-shaped RC shear walls can extensively be employed for structural and architectural reasons, a reliable assessment of the effective width of L-shaped sections is essential. Therefore, this paper attempts to propose applicable formulations for the effective width estimation of L-shaped RC shear walls. In that regard, a number of numerical investigations involving finite element analyses have been conducted in the ABAQUS software in order to evaluate the cyclic

worse case, if the signal is measured under noisy ambient loads, the extracted features lead to unreliable results in damage diagnosis. In this study, a robust feature extraction method is presented by using time series analysis and correlation relationship generalized in the frequency domain. At first, a time-series model of the response signal is obtained, and the parameters of the model containing inherent and dynamic characteristics of the signal are separated from the model residual, which is influenced by the noise of ambient loads. Upon measuring the model parameters, the high-dimensional signal is transferred to a space with a lower value in size, and the issues due to high-dimensional data are addressed. By using the obtained parameters, the characteristic function of the signal is calculated in the frequency domain. By utilizing a generalized correlation coefficient relationship in the frequency domain, a 2D damage-sensitive feature being a complex value can be extracted from the characteristic function. Structural damage is detected by investigating the angle of the feature extracted. Moreover, by attending to the real part of the feature, the location of damage can be identified. To investigate the abilities of the new feature in damage diagnosis tasks, a real-world structure, S101 Bridge, is examined. To demonstrate the advantages of the new feature in structural damage diagnosis, the outcomes of this study in different levels of damage diagnosis, i.e., damage detection and damage localization, are compared to some state-of-the-art techniques in the field of Structural Health Monitoring (SHM). The achievements of this study clearly show the abilities of the proposed feature for damage diagnosis of real-world structures, especially in the case of high-dimensional data and noisy ambient excitations. Moreover, in comparison to other techniques, the proposed damage diagnosis algorithm in this paper can detect and localize structural damage with more accuracy.

Key Words: Structural health monitoring, damage-sensitive feature, frequency-domain characteristic function, correlation coefficient, noise.

INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF FUNCTIONALLY GRADED THIN-WALLED BOX BEAMS UNDER AXIAL LOADING

V. Mirhaji(corresponding author)
vahid.mirhaji@iau.ac.ir
R. Jahangiri
r_jahangiri@tabrizu.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Salmas Branch, Islamic Azad University
A. Naderi
naderi.alii76@yahoo.com
Dept. of Civil Engineering, Institute of Higher Education Aine Kamal, Urmia
DOI:10.24200/J30.2022.60499.3108

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 37-51, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 July 2022; received in revised form 22 September 2022; accepted 11 October 2022.

Abstract

Recently, the growing needs of the engineering community for smart structures have led to targeted material technology gradually replacing conventional homogeneous and laminated composite materials. Among the sandwich-shaped structures with targeted core, the thin walled closed beam of sandwich box (with functionally graded core), due to having desirable properties such as high flexural stiffness, low density, desirable static and dynamic properties likewise high strength against mechanical loads and stresses have received much attention.

In some specific applications, components of modern structures, such as thin walled functionally graded beams with a closed box geometry, are subjected to axial or concentrated or wide transverse loads. Under these conditions, the choice of loading parameters may lead to lateral or axial buckling, which results in irrecoverable damage to the structure. Buckling of an axially loaded thin-walled functionally Graded sandwich box beam in presence of structural non-homogeneity is studied.

In this study, taking into account the effects of the structural heterogeneity (via power law distribution), porosity and effect of the cross-sections warping by means of Vlasov's beam assumptions and applying the Hamilton's principal the governing equations of the Buckling instability of the thin-walled functionally graded sandwich box porous beam were derived. Then the finite element method was developed to formulate the problem. In following, for the case of various boundary conditions, the related governing eigenvalue problem was derived and solved numerically. The validity of the results was accomplished by comparing the results with those of the literature. In following beside by providing the characteristic buckling curves, the effect of different parameters of the problem, including the beam aspect ratio, mixing volume fraction index, porosity index, core component modulus ratio and ceramic layer thickness on the buckling load were investigated comprehensively. It was observed that different parameters, especially the mixing index and structural porosity index has a considerable influence in determining the buckling boundary.

Key Words: Thin-walled beam, functionally graded box beam, finite element method, mixing volume fraction index, critical buckling force.

the social force modeling method. The proposed hybrid model allows one or more activities to be simulated more accurately. The approach used in this paper is evaluated based on the data from a real project. The results clearly show the reduction in productivity due to overcrowding. The outputs of this work can be used to obtain the optimal number of workers in an activity. The model proposed in this paper gives project managers the chance to have more realistic simulations of work processes.

Key Words: Productivity, spatial constraints, discrete event simulation, social force modeling.

POTENTIAL FUNCTIONS OF THERMOELASTODYNAMIC PROBLEMS FOR TRANSVERSELY ISOTROPIC FUNCTIONAL GRADED MATERIALS

S. Panahi
siavash.panahi88@yahoo.com
B. Navayi Neya(corresponding author)
navayi@nit.ac.ir
Faculty of Civil Engineering
Babol Noshirvani University of Technology
DOI:10.24200/J30.2022.60646.3114

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 15-24, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 11 July 2022; received in revised form 21 September 2022; accepted 8 October 2022.

Abstract
Functionally graded materials are the novel class of advanced composite structures with variable properties in one or more directions. The mechanical properties of Functionally Graded Materials (FGM) such as Poisson's ratio, Young's modulus of elasticity, material density and shear modulus of elasticity undergo changes gradually and continuously between two surfaces in a predetermined manner. FGM structures are often made of a combination of ceramics and metals in which the metal component provides strength and fracture resistance while ceramic component provides thermal resistance. Due to desirable properties, FGM materials are used in various fields of engineering such as optics, electronics, space vehicles, shipbuilding, mechanical, biomechanical and other engineering structures subjected to high thermal and residual stresses. Therefore, the analytical study of thermoelastodynamic problems is of great importance for the functionally graded media. The use of potential functions to analyze three-dimensional elastic problems is one of the most effective methods. This method facilitates solving three-dimensional elastic problems by uncoupling the set of governing differential equations or at least simplifying them. In the present study, the displacement potential functions for solving thermoelastodynamic problems in the transversely isotropic media with functionally graded materials are introduced. For this purpose, first, the three-dimensional kinematic and thermodynamic equations for the functionally graded materials in the transversely isotropic materials are written and then using a systematic method to separate the equations, the displacement potential functions to solve thermoelastodynamic problems are obtained, which can be used further to solve problems of beams, plates, shells, and infinite and semi-infinite media. The obtained potential functions include two scalar functions F and$\mathcal{X}$; the scalar function F satisfies the sixth-order partial differential equation while the $\mathcal{X}$-scalar function satisfies the second-order partial differential equation. In addition, in the present study, the thermal potential functions for the specific state of the isotropic functional graded media are presented.

Key Words: Functional graded materials, transversely isotropic materials, displacement potential functions, exact solution, thermoelastodynamic.

ROBUST-TO-NOISE FEATURE EXTRACTION VIA GENERALIZATION OF CORRELATION RELATIONSHIP IN THE FREQUENCY DOMAIN

S.A.H. Esfehani
esfehani@mail.um.ac.ir
H. Shariatmadar(corresponding author)
shariatmadar@um.ac.ir
A. Entezami
alireza.entezami@polimi.it
Faculty of Civil Engineering
Ferdowsi University, Mashhad
DOI:10.24200/J30.2022.60471.3105

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 25-36, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 13 July 2022; received in revised form 22 September 2022; accepted 8 October 2022.

Abstract
Damage diagnosis of a high-dimensional structural signal is a complicated and time-consuming task. In the

Abstracts of Papers in English

DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD OF SOCIAL FORCE MODELING AND DISCRETE EVENT SIMULATION TO OPTIMIZE PRODUCTIVITY OF CONSTRUCTION

M. Naeimirad
mahdi.naeimirad@mail.um.ac.ir
M. Maghrebi(corresponding author)
mojtabamaghrebi@um.ac.ir
Dept. of Civil Engineering
Ferdowsi University of Mashhad
DOI:10.24200/J30.2022.60581.3111

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.2, Page 3-14, Original Article
© Sharif University of Technology

- Received 18 June 2022; received in revised form 29 August 2022; accepted 29 October 2022.

Abstract
Optimizing productivity of construction has always been a challenge for project managers and planners. In previous studies, it has been pointed out that productivity is directly related to the number of workers unless the excessive number of workers in the workshop causes congestion. Discrete event simulation is one of the mathematical modeling methods used by researchers to study productivity in construction. Discrete event simulation models the operations considering the flow of resources and the state of entities within the system. In this model, the entities are passive elements that are processed during the work process. Due to the nature of the entities in a discrete event simulation model, it is not possible to investigate the effect of physical interaction of individuals on productivity using this method alone. Social Force Modeling has a great ability to model the movement of people and physical interaction between people and the environment. This study tries to investigate the direct impact of manpower on productivity by modeling the work process and the effect of physical interactions of workers due to the increase in the number of workers and workshop spatial constraints. For this purpose, a hybrid model has been developed that includes a combination of two models. In the first model, the discrete event simulation method is used to simulate the work process. In the second model, the movement and physical interaction of workers are modeled using

Civil Engineering

Sharif

4.2

Winter
2023

Editor-in-Chief: Mohsen Ghaemian

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical7 analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, **"Sharif"** publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN
Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983
Web: http://journal.sharif.ir/ http:// www. globalsciencejournals.com
E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

3 **DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD OF SOCIAL FORCE MODELING AND DISCRETE EVENT SIMULATION TO OPTIMIZE PRODUCTIVITY OF CONSTRUCTION**
M. Naeimirad and M. Maghrebi

15 **POTENTIAL FUNCTIONS OF THERMOELASTODYNAMIC PROBLEMS FOR TRANSVERSELY ISOTROPIC FUNCTIONAL GRADED MATERIALS**
S. Panahi and B. Navayi Neya

25 **ROBUST-TO-NOISE FEATURE EXTRACTION VIA GENERALIZATION OF CORRELATION RELATIONSHIP IN THE FREQUENCY DOMAIN**
S.A.H. Esfehani, H. Shariatmadar and A. Entezami

37 **INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF FUNCTIONALLY GRADED THIN-WALLED BOX BEAMS UNDER AXIAL LOADING**
V. Mirhaji, R. Jahangiri and A. Naderi

53 **DAMAGE DETECTION AND IDENTIFICATION IN A COLUMN UNDER THE EFFECT OF AXIAL LOAD USING MODAL PROPERTIES AND MODE SHAPE-BASED DETECTION INDEX**
M. Khanahmadi, M. Pouraminian, H. Mohammady Garfamy and B. Dezhkam

63 **EFFECTIVE WIDTH ESTIMATION OF L-SHAPED RC SHEAR WALLS USING EPR ALGORITHM**
H. Abdoos, A.R. Khaloo and M. Tabiee

RESEARCH NOTES:

73 **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STRENGTH AND MICROSTRUCTURAL BEHAVIOR VARIATIONS OF OIL CONTAMINATED CLAY (AREA: MASJEDSOLEYMAN)**
F. Soltani Afarani and N. Khayat

83 **EVALUATION OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FROM THE PERSPECTIVE OF STAKEHOLDERS IN CONSTRUCTION PROJECTS**
S.A. Fatemi, E.Shakeri and V. Shahhosseini

APPENDIX

100 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**