



## مقالات پژوهشی:

- تحلیل استاتیکی پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانی چندلایه‌ی سه‌بعدی متقارن با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان زهرا محمدی، بهرام نواتی‌نا و عزیزالله اردشیر بهرستانی
- ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌یی در پناهگاه تعجیلی فرزاد امیری هنزا، محمد فیاض و محسن امی رعایا
- مدل نظری قراردادهای ساخت، بهره‌برداری و انتقال در محیط پیچیده (مطالعه‌ی چندموردی: قراردادهای مشارکت آزادراهی ایران) سیدمحمد مهدی میرمرزی و محمدحسین صبحیه
- ارزیابی نقش متغیرهای پنهان فردی در پذیرش سیاست‌های مدیریت تقاضا (نمونه‌ی موردی: طرح ترافیک زوج یا فرد در تهران) علیرضا ماهپور و سعیده سعیدی شهرپور
- شناسایی و تشخیص آسیب جدانشدگی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال آرمان مام عزیزی، محتشم خان‌احمدی و کامران نوبخت وکیلی
- توسعه‌ی روش بدون شبکه‌ی چندربعی برای آنالیز مسائل ادرکنش دینامیکی سد - مخزن - پی رضا بابایی، احسان جباری و مرتضی اسکندری قادی
- بررسی و مقایسه‌ی مؤثرترین روش‌های بهبود عملکرد پس از آتش ستون‌های فولادی کوتاه دارای نقص‌های افقی و قائم جلد مخدومی در میان، رضا رهگذر، محسن محمدی‌اده، امیر ساعدی داریان و کامبیز نورماشیری
- تحلیل قابلیت اعتماد قطعات چوبی مقاوم‌سازی شده با FRP سهیل پالتیزی، وهب توفیق

## ORIGINAL ARTICLES:

- Static Analysis of Axisymmetric 3-D Layered Transversely Isotropic Thick Cylindrical Shells by Displacement Potential Function  
Z. Mohammadi, B. Navayi Neya and A. Ardeshtir-Behrastaghi
- Evaluation of Textile Concrete Behavior in the Accelerated Shelter  
F. Amiri Hanza, M. Fayyaz and M. Aminoraya
- Theoretical Model of Built, Operate and Transfer Contracts in a Complex Environment Multi-Case Study: Iran Freeway Partnership Agreements  
S.M.M. Mirmoezi and M.H. Sobhiyah
- Investigating the Role of Latent Individual Components in the Acceptance of Demand Management Policies: Case Study of Tehran Odd-Even Policy  
A.R. Mahpour and S. Saeedi Shahdivar
- Debonding Damage Detection and Assessment in a CFST Composite Column Using Modal Dynamic Data  
A. Mamazizi, M. Khanahmadi and K. N. Vakil
- Development of the Multiquadric Mesh-Less Method for Analyzing the Dynamic Interaction of Dam-Reservoir-Foundation Problems  
R. Babaei, E. Jabbari and M. Eskandari-Ghadi
- Investigating and Comparing the Most Effective Methods to Improve Post-Fire Performance of Steel Short Columns with Vertical and Horizontal Defects  
H. Makhdooni Darman, R. Rahgozar, M. Mohammadzadeh, A. Saedi Daryan and K. Namashiri
- Reliability Analysis of FRP-Timber System  
S. Palizi and V. Toufigh

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

سردبیر: دکتر محسن قائمیان

سردبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی

مدیر اجرایی: پریسا مروتی

مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف‌خان

ویرایش: رزیتا رستخیز پادار

حروف‌چینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی

صفحه‌آرایی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیمیا آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

طراح لوگو: زنده‌یاد مرتضی ممیز

طرح روی جلد و ساختار صفحه‌آرایی: مصطفی اسداللهی

نظارت فنی و چاپ: پیمان فرگاهی

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۰۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

پست تصویری: ۶۶۰۱۲۹۸۳

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

سایت اسپرینگر: [www.globalsciencejournals.com](http://www.globalsciencejournals.com)

پست الکترونیکی: [pajouhesh@sharif.edu](mailto:pajouhesh@sharif.edu)

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

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بیتا آیتی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر همایون استکانچی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی پاک

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیررضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر حسین رحامی

دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران

دکتر فیاض رحیم زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیر صمیمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ناصر طالب بیدختی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

دکتر محسن قائمیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدجواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر حسن میرزابزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

دکتر علی نورزاد

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

دکتر جواد واشقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## هیأت تحریریه تخصصی

### • سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احمد ابریشم‌چی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانچی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افشار

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخوردار

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسنیمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حسن حاجی کاظمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سیدمحسن حائری

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا خوبی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیاپور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدمهدی زهرایی

دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدمهدی سعادت‌پور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان

دکتر ناصر طالب بیدختی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

## دکتر علی کاوه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمجدالدین میرمحمدحسینی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدشهاب الدین یثربی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

## هیأت مشاوران

دکتر فردین ازدری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر احمد آفتابی ثانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر ابراهیم افسر دیزج

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر مرتضی اسکندری قادی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر مجید پاسبانی خیاوی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر مجید پرچی جلال

دانشکده‌ی معماری - دانشگاه تهران

دکتر محمدرضا چناقلو

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند

دکتر حامد خضرزاده

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر شاهین دبیریان

دانشکده‌ی هنر و معماری - دانشگاه اصفهان

دکتر مصطفی رضوانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر بهزاد شکسته‌بند

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی ارومیه

دکتر حمید صفاری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر پرویز قدوسی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت

دکتر مجید قلهکی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه سمنان

دکتر رضا کامکار

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهرکرد

دکتر مهدی کماسی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آیت‌اله بروجردی

دکتر رضا گلشن خواص

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت

دکتر امیر رضا ممدوحی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

## مطالب این شماره

### مقالات پژوهشی:

- ۳ تحلیل استاتیکی پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی چندلایه‌ی سه‌بُعدی متقارن با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان  
زهرامحمدی، بهرام نوائی‌نیا و عزیزالله اردشیر بهرستانی
- ۱۵ ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌یی در پناهگاه تعجیلی  
فرزاد امیری هتزا، محمد فیاض و محسن امی رعایا
- ۲۷ مدل نظری قراردادهای ساخت، بهره‌برداری و انتقال در محیط پیچیده (مطالعه‌ی چندموردی: قراردادهای مشارکت آزادراهی ایران)  
سیدمحمد مهدی میرمیزی و محمدحسین صبحیه
- ۴۱ ارزیابی نقش متغیرهای پنهان فردی در پذیرش سیاست‌های مدیریت تقاضا (نمونه‌ی موردی: طرح ترافیک زوج یا فرد در تهران)  
علیرضا ماهپور و سعیده سعیدی شهریور
- ۵۳ شناسایی و تشخیص آسیب جاشدگی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال  
آرمان مام عزیزی، محتشام خان احمدی و کامران نوبخت وکیلی
- ۶۵ توسعه‌ی روش بدون شبکه‌ی چندربعی برای آنالیز مسائل اندرکنش دینامیکی سد - مخزن - پی  
رضا بابایی، احسان جباری و مرتضی اسکندری قادی
- ۷۷ بررسی و مقایسه‌ی مؤثرترین روش‌های بهبود عملکرد پس از آتش ستون‌های فولادی کوتاه دارای نقص‌های افقی و قائم  
حامد مخدومی درمیان، رضا رهگذر، محسن محمدی زاده، امیر ساعدی داریان و کامبیز نرماشیری
- ۸۹ تحلیل قابلیت اعتماد قطعات چوبی مقاوم‌سازی شده با FRP  
سهیل پالیزی، وهب توفیق

### ضمائم:

- ۱۰۷ چکیده مقالات به انگلیسی



# تحلیل استاتیکی پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی چندلایه‌ی سه‌بُعدی متقارن با استفاده از توابع پتانسیل تغییر مکان

زهرا محمدی (دانشجوی دکتری)

بهرام نوائی‌نیا\* (استاد)

عزیزالله اردشیر بهرستانی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۳، ص. ۱۴-۳، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، روش تحلیلی ساده و مؤثر براساس تابع پتانسیل جابه‌جایی به منظور حل مسائل استاتیکی سه‌بُعدی پوسته‌ی استوانه‌یی ضخیم و چندلایه با مصالح کشسان خطی ایزوتروپ جانبی ارائه شده است. شرایط مرزی انتهایی پوسته از نوع تکیه‌گاه ساده انتخاب شده و پوسته تحت بارگذاری شعاعی متقارن محوری در سطوح داخلی و خارجی خود قرار گرفته است. معادلات کشسانی سه‌بُعدی به کمک تابع پتانسیل تغییر مکان ساده‌سازی شده و معادله‌ی دیفرانسیل جزئی مرتبه‌ی چهار بر حسب تابع پتانسیل را به‌وجود آورده‌اند. معادله‌ی حاکم به‌دست آمده به کمک روش جداسازی متغیرها و با ارضاء دقیق شرایط مرزی در دو انتها، تنش در سطوح داخلی و خارجی استوانه و نیز پیوستگی تنش و جابه‌جایی در فصل مشترک لایه‌ها حل و پس از تعیین تابع پتانسیل، کلیه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در هر نقطه از استوانه قابل محاسبه است. مقایسه‌ی نتایج با دیگر نتایج تحلیلی موجود، توافق بسیار خوب نتایج برای نسبت‌های ابعادی مختلف را نشان داده است. سپس تحلیل پارامتری صورت پذیرفته و اثر جنس، ضخامت و تعداد لایه‌ها بررسی شده است.

واژگان کلیدی: تابع پتانسیل جابه‌جایی، حل تحلیلی، مصالح ایزوتروپ جانبی، پوسته‌ی استوانه‌یی چندلایه.

## ۱. مقدمه

پوسته‌ها از عناصر سازه‌یی معمول در سازه‌های مهندسی، شامل: مخازن تحت فشار، لوله‌ها، سازه‌های نگهدارنده‌ی مایعات و دیگر سازه‌ها هستند<sup>[۱]</sup> تئوری‌های مختلفی برای تحلیل پوسته‌های ایزوتروپ و غیرایزوتروپ وجود دارند که تعدادی از آن‌ها برای پوسته‌های نازک توسعه یافته‌اند و براساس فرضیات سینماتیک کیرشهوف - لاو<sup>۱</sup>، که در آن خطوط مستقیم عمود به سطح میانی در پوسته تغییرشکل نیافته‌اند، بعد از تغییرشکل نیز مستقیم و عمود به سطح میانی باقی می‌مانند، بنا شده است.<sup>[۱]</sup> با استفاده از فرضیات لاو، تئوری‌های پوسته‌ی متفاوتی توسط پژوهشگران مختلف گسترش یافته است که تعدادی از آن‌ها حالت کلی‌تری از تئوری لاو هستند. تئوری‌های پوسته‌ی تیموشنکو<sup>۲</sup>، دانیل<sup>۳</sup>، ساندرس<sup>۴</sup>، فلاگ<sup>۵</sup> و ریسنر-نقدی<sup>۶</sup> برخی از تئوری‌های مذکور هستند. تئوری‌های پوسته در فرضیات روابط کرنش - جابه‌جایی با یکدیگر متفاوت هستند، برخی از آن‌ها به دلیل داشتن ترم‌های مرتبه‌ی بالا و یا تغییرشکل‌های برشی و کرنش شعاعی از بقیه دقیق‌تر هستند.<sup>[۲]</sup>

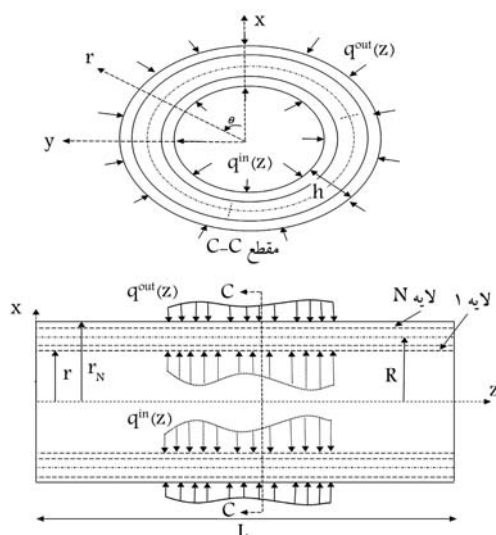
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۴، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59265.3039

آیینگار<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۲۷)،<sup>[۲]</sup> پوسته‌ی استوانه‌یی تحت بار فشاری یکنواخت را با به کارگیری تئوری کشسانی و با استفاده از تابع لاو و تئوری‌های کلاسیک تیموشنکو - دانیل و فلاگ که قابلیت کاربرد برای مسائل متقارن محوری در محیط ایزوتروپ را دارند، بررسی کرده‌اند. چاندراشخارا<sup>۸</sup> و همکاران (۱۹۸۲)،<sup>[۳]</sup> مسئله‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی با طول نامحدود تحت بار متقارن محوری را با استفاده از تابع تنش لختیستکی حل کرده‌اند. در ادامه، چاندراشخارا و کومار<sup>۹</sup> (۱۹۹۳)،<sup>[۵]</sup> حل دقیقی برای پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی با طول محدود تحت بار متقارن محوری با استفاده از روش تابع جابه‌جایی ارائه شده توسط الیبوت<sup>۱۰</sup> توسعه داده‌اند. شیانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)،<sup>[۶]</sup> تحلیل کشسان سیلندر چندلایه‌ی توخالی دو بُعدی با مصالح ایزوتروپ را براساس حل لایه در حالت کرنش مسطح مطالعه کردند. تعدادی از مشهورترین توابع در مسائل استاتیکی تابع لایه<sup>۱۲</sup> و توابع لاو برای محیط ایزوتروپ، لختیستکی - هو - نوواکی<sup>۱۳</sup> و الیبوت برای محیط ایزوتروپ جانبی هستند. تابع پتانسیل لختیستکی - هو - نوواکی برای مصالح ایزوتروپ جانبی که در آن محور z عمود بر صفحه‌ی ایزوتروپی فرض می‌شود، استفاده می‌شود.<sup>[۷]</sup>

mohamadi.zahraa@gmail.com  
navayi@nit.ac.ir  
ardeshir@ustmb.ac.ir



شکل ۱. الف) پوسته‌ی استوانه‌یی چندلایه با خواص ایزوتروپ جانبی تحت بار شعاعی متقارن محوری، ب) مقطع عرضی پوسته‌ی استوانه‌یی چندلایه.

### ۳. معادلات حاکم

قانون هوک تعمیم‌یافته برای مصالح ایزوتروپ جانبی در سیستم مختصات استوانه‌یی به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود: [۱۰]

$$\begin{aligned}\sigma_{rr,i} &= A_{11,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{12,i} \frac{u_i}{r} + A_{13,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{\theta\theta,i} &= A_{12,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{11,i} \frac{u_i}{r} + A_{13,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{zz,i} &= A_{13,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{12,i} \frac{u_i}{r} + A_{33,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{rz,i} &= A_{23,i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial r} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن،  $u_i$  و  $w_i$  به ترتیب مؤلفه‌های تغییر مکان در جهت‌های  $r$  و  $z$  همچنین  $\sigma_{rr,i}$ ،  $\sigma_{\theta\theta,i}$ ،  $\sigma_{zz,i}$  و  $\sigma_{rz,i}$  مؤلفه‌های تانسور تنش هستند. ضرایب  $A_{11,i}$ ،  $A_{12,i}$ ،  $A_{13,i}$ ،  $A_{23,i}$ ،  $A_{33,i}$  و  $A_{\theta\theta,i}$  ثابت‌های کشسانی مصالح ایزوتروپ جانبی لایه‌ی  $i$ ام هستند که برای توصیف خواص کشسان مصالح مورد نیاز هستند. ثابت‌های مذکور به ثابت‌های مهندسی  $E_i$ ،  $\nu_i$ ،  $E_i'$ ،  $\nu_i'$  و  $G_i'$  مرتبط هستند: [۱۰]

$$\begin{aligned}A_{11,i} &= \frac{E_i \left( 1 - \frac{E_i'}{E_i} \nu_i'^2 \right)}{(1 + \nu_i) \left( 1 - \nu_i - 2 \frac{E_i'}{E_i} \nu_i'^2 \right)} \\ A_{12,i} &= \frac{E_i \nu_i'}{1 - \nu_i - 2 \frac{E_i'}{E_i} \nu_i'^2}, \quad A_{23,i} = G_i' \\ A_{33,i} &= \frac{E_i' (1 - \nu_i)}{1 - \nu_i - 2 \frac{E_i'}{E_i} \nu_i'^2}, \\ A_{13,i} &= A_{11,i} - 2 A_{\theta\theta,i}, \quad A_{\theta\theta,i} = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}\end{aligned}\quad (2)$$

که در آن‌ها،  $E_i$  و  $E_i'$  به ترتیب معرف مدول یانگ در صفحه‌ی ایزوتروپی و در جهت عمود بر آن،  $\nu_i$  و  $\nu_i'$  به ترتیب معرف نسبت بواسون در صفحه‌ی ایزوتروپی و در جهت عمود بر آن و  $G_i'$  مدول برشی در صفحه‌ی عمود بر صفحه‌ی ایزوتروپی هستند. معادلات حرکت بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی در محیط ایزوتروپ جانبی و

اسکندری قادی (۲۰۰۵)، [۸] توابع پتانسیل لخنیتسکی - هو - نوواکی را از مسائل کشسان استاتیک به کشسان دینامیک توسعه داد. ایشان مسائل استاتیکی (۲۰۰۹)، [۹] و دینامیکی (۲۰۰۸-۲۰۱۰) [۱۲-۱۰] مختلف را برای نیم‌فضا و فضای ایزوتروپ جانبی با استفاده از روش تابع پتانسیل معرفی شده در نوشتاری در سال ۲۰۰۵، [۸] حل کردند. نعمت‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)، [۱۳] توابع پتانسیل لخنیتسکی - هو - نوواکی را با موفقیت برای تحلیل صفحات ایزوتروپ جانبی نازک، نسبتاً ضخیم و ضخیم تحت بار استاتیکی دلخواه استفاده کردند. نوآنی‌نیا و همکاران (۲۰۱۷)، راه حل سه‌بعدی برای صفحات مستطیلی ضخیم تحت بار متحرک [۱۴] و حل سه‌بعدی دقیقی برای خمش صفحات مستطیلی ضخیم FGM [۱۵] با استفاده از توابع پتانسیل توسعه داده شده در نوشتار اسکندری قادی (۲۰۰۵) [۸] ارائه داده‌اند. چندین کار مرتبط در زمینه تحلیل سه‌بعدی ارتعاش آزاد و کماتش صفحات مستطیلی توسط نوآنی‌نیا و همکاران انجام شده است. [۱۶-۱۹]

در حالی که مطالعات متعددی برای تحلیل سه‌بعدی ورق، فضا و نیم‌فضا با استفاده از تابع پتانسیل ارائه شده است؛ فقط تعداد محدودی مطالعه در ادبیات مربوط به تحلیل سه‌بعدی پوسته‌ی استوانه‌یی جدار ضخیم چندلایه‌ی ایزوتروپ و ایزوتروپ جانبی بدون فرضیات ساده‌سازی برای توزیع تنش و کرنش در راستای ضخامت وجود دارد. در نوشتار حاضر، با استفاده از تابع پتانسیل لخنیتسکی - هو - نوواکی و تئوری کشسانی سه‌بعدی، پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی تک‌لایه و چندلایه تحت بارگذاری متقارن محوری تجزیه و تحلیل شده است. برای این منظور، با استفاده از معادلات کشسانی سه‌بعدی و تابع پتانسیل جابه‌جایی [۹] معادله‌ی دیفرانسیل حاکم پاره‌یی مرتبه‌ی چهار به دست آمده است که به روش جداسازی متغیرها حل و براساس آن پاسخ‌های مسئله، شامل: جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در هر نقطه از پوسته‌ی مورد بررسی به دست آمده است. برخلاف سایر پژوهش‌ها، یکی از مزیت‌های روش ارائه شده در پژوهش حاضر این است که نتایج حاصل بدون هرگونه محدودیتی در ضخامت پوسته و با اعمال دقیق شرایط مرزی قابل استفاده است. علاوه بر آن، تحلیل حاضر به سیلندر چندلایه در راستای ضخامت با اعمال شرایط مرزی مناسب در سطوح بین لایه‌ها قابل تعمیم است. مقایسه‌ی نتایج با دیگر نتایج تحلیلی موجود تطابق عالی نتایج روش ارائه شده را نشان می‌دهد. در ادامه، همچنین انواع مختلف مصالح و تعدادی مسائل عملی برای پوسته‌ی استوانه‌یی تک‌لایه و چندلایه تحت بار استاتیکی تعریف شده و تأثیر پارامترهای مختلف، نظیر میزان غیرایزوتروپی و ناهمگنی پوسته و همچنین نسبت ابعادی در توزیع تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها بررسی شده‌اند.

### ۲. بیان مسئله

پوسته‌ی استوانه‌یی با طول  $L$  متشکل از  $N$  لایه با خصوصیات مصالح ایزوتروپ جانبی کشسان خطی در نظر گرفته شده است. سیلندر استوانه‌یی دارای شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده در دو انتهای پوسته بوده و بار شعاعی متقارن محوری در سطوح داخلی و خارجی پوسته اعمال شده است. ضخامت هر لایه و ضخامت کل پوسته به ترتیب به صورت  $h = \sum_{i=1}^N h_i$  و  $h_i (i = 1, 2, \dots, N)$  تعریف شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مسئله در سیستم مختصات استوانه‌یی  $(r, \theta, z)$  است که در آن محور  $z$  عمود بر صفحه‌ی ایزوتروپی، موازی مرز لایه‌ها و محور تقارن رفتاری لایه‌ها فرض شده است.

استوانه را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشت:

$$\begin{aligned} u_i(r, z) &= \sigma_{zz,i}(r, z) = 0, \quad \text{at } z = 0, L \quad r_0 \leq r \leq r_N \\ \sigma_{rz,i}(r_0, z) &= \sigma_{rz,N}(r_N, z) = 0, \quad 0 < z < L \\ \sigma_{rr,i}(r_0, z) &= -q^{in}(z), \quad 0 \leq z \leq L \\ \sigma_{rr,N}(r_N, z) &= -q^{out}(z), \quad 0 \leq z \leq L \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن،  $q^{out}$  و  $q^{in}$  به ترتیب بارگسترده در سطوح داخلی و خارجی هستند. همچنین شرایط مرزی جابه‌جایی و تنش در سطح مشترک بین لایه‌های  $i$  و  $i+1$  به صورت رابطه‌ی ۱۱ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} u_{i+1}(r_i, z) - u_i(r_i, z) &= 0, \\ w_{i+1}(r_i, z) - w_i(r_i, z) &= 0, \\ \sigma_{rz,i+1}(r_i, z) - \sigma_{rz,i}(r_i, z) &= 0, \\ \sigma_{rr,i+1}(r_i, z) - \sigma_{rr,i}(r_i, z) &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن، برای  $0 < z < L$  و  $i = 1, 2, \dots, N$  برقرار است و همچنین  $\sigma_{rz,i}$  و  $\sigma_{rr,i}$  مؤلفه‌های تانسور تنش هستند.

## ۵. حل معادله‌ی حاکم

برای حل معادله‌ی ۷، از روش جداسازی متغیرها استفاده می‌شود. بدین منظور تابع پتانسیل  $F_i$  به صورت رابطه‌ی ۱۲ فرض می‌شود:

$$F_i(r, z) = R_i(r) Z_i(z) \quad (12)$$

که در آن،  $R_i(r)$  و  $Z_i(z)$  توابع مجهول هستند. با توجه به شرایط مرزی مسئله در جهت طولی استوانه و براساس رابطه‌ی ۵، تابع ۱۳ برای  $F_i$  قابل قبول است:

$$F_i(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} R_{m,i}(r) \cos \gamma_m z \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه‌ی ۱۳ در معادله‌ی حاکم، معادله‌ی دیفرانسیل مستقل بر حسب  $r$  به صورت رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 R_{m,i}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d R_{m,i}}{dr} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 R_{m,i}}{dr^2} \\ - \gamma_m^2 \left( \frac{1}{s_{1,i}^2} + \frac{1}{s_{2,i}^2} \right) \frac{d^2 R_{m,i}}{dr^2} + \frac{1}{r^2} \frac{d R_{m,i}}{dr} \\ - \frac{\gamma_m^2}{r} \left( \frac{1}{s_{1,i}^2} + \frac{1}{s_{2,i}^2} \right) \frac{d R_{m,i}}{dr} + \frac{\gamma_m^2}{s_{1,i}^2 s_{2,i}^2} R_{m,i} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

معادله‌ی دیفرانسیل حاصل دارای ۴ پاسخ مستقل است که با حل آن، رابطه‌ی (۱۵ الف و ب) برای  $R_{m,i}$  به دست می‌آید:

اگر:  $s_{2,i} \neq s_{1,i}$

$$\begin{aligned} R_{m,i} = c_{1,i} I(0, \gamma_m r / s_{1,i}) + c_{2,i} K(0, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ + c_{3,i} I(0, \gamma_m r / s_{2,i}) + c_{4,i} K(0, \gamma_m r / s_{2,i}) \end{aligned} \quad (15 \text{ الف})$$

در غیاب نیروی حجمی برای هر لایه از پوسته‌ی چندلایه به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ بیان می‌شوند: [۱۰]

$$\begin{aligned} A_{11,i} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial r} - \frac{u_i}{r^2} \right) + (A_{12,i} + A_{22,i}) \frac{\partial^2 w_i}{\partial r \partial z} \\ + A_{22,i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_{22,i} \left( \frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_i}{\partial r} \right) + (A_{12,i} + A_{22,i}) \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \\ + A_{22,i} \frac{\partial^2 w_i}{\partial z^2} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

معادلات اخیر، معرف دستگاه معادلات درگیر با مشتق‌های جزئی هستند، که برای حل آن‌ها از روش توابع پتانسیل استفاده می‌شود. برای این منظور، مؤلفه‌های بردار تغییرمکان در دستگاه مختصات استوانه‌یی بر حسب تابع پتانسیل  $F_i$  که توسط لختی‌سکی - هو - نوواکی معرفی شده است، به صورت رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} u_i(r, z) &= -\alpha_{2,i} \frac{\partial^2 F_i}{\partial r \partial z} \\ w_i(r, z) &= (1 + \alpha_{1,i}) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \beta_i \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) F_i \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن، مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \alpha_{1,i} &= \frac{A_{\phi\phi,i} + A_{12,i}}{A_{\phi\phi,i}}, \quad \alpha_{2,i} = \frac{A_{22,i}}{A_{\phi\phi,i}}, \\ \alpha_{2,i} &= \frac{A_{22,i} + A_{12,i}}{A_{\phi\phi,i}}, \quad \beta_i = \frac{\alpha_{2,i}}{1 + \alpha_{1,i}}, \end{aligned} \quad (6)$$

با قرار دادن روابط ۵ در معادله‌های ۳ و ۴، معادله‌ی حاکم بر تابع پتانسیل  $F_i$  برای هر یک از لایه‌ها به صورت رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$(\pi_{1,i}, \pi_{2,i}) F_i(r, z) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

که در آن،  $\pi_{j,i}$  از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\pi_{j,i} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{s_{j,i}^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad j = 1, 2 \quad (8)$$

در واقع پارامترهای  $s_{1,j}$ ،  $s_{2,j}$  ریشه‌های معادله‌ی ۹ هستند که در حالت کلی می‌توانند مقادیر حقیقی یا مختلط باشند، اما موهومی خالص نیستند.

$$\begin{aligned} A_{22,i} A_{22,i} s_i^2 + \left( A_{12,i} + 2 A_{12,i} A_{22,i} - A_{11,i} A_{22,i} \right) s_i^2 \\ + A_{11,i} A_{22,i} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

## ۴. شرایط مرزی

در پژوهش حاضر، پوسته‌ی استوانه‌یی دارای شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده بوده و همچنین پوسته تحت بارگذاری شعاعی در سطوح داخل و خارج قرار گرفته است؛ لذا شرایط مرزی در دو انتهای پوسته و نیز در سطوح داخلی و خارجی پوسته‌ی

اگر:  $s_{r,i} = s_{\lambda,i}$ 

## ۶. ارضاء شرایط مرزی و پیوستگی

تابع بارگذاری شعاعی پوسته  $q(z)$  می‌تواند به شکل بسط سری فوریه در جهت  $z$  مطابق رابطه‌ی ۲۴ توصیف شود:

$$q(z) = \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{q}_m = \sum_{m=1}^{\infty} q_m \sin \frac{m\pi z}{L}$$

$$q_m = \frac{2}{L} \int_0^L q(z) \sin \frac{m\pi z}{L} dz \quad (24)$$

که در آن،  $q_m$  ضریب بارگذاری در فضای فوریه است. در ادامه، به منظور راحتی در نوشتن معادله‌ها و اعمال شرایط مرزی، بردار  $x_i$  به صورت رابطه‌ی ۲۵ تعریف شده است:

$$x_i = \{U_{m,i}(r, z) W_{m,i}(r, z) S_{rr, m,i}(r, z) S_{rr, m,i}(r, z)\}^T \quad (25)$$

که در آن، بالانویس  $T$  معرف ترانواده است. بنابراین بردار  $x_i$  در سطوح داخلی و خارجی پوسته مطابق با شرایط مرزی (رابطه‌ی ۱۰) به صورت رابطه‌های ۲۶ و ۲۷ نوشته می‌شوند:

$$x_{\lambda}^{in} = \{U_{m,\lambda}(r_{\lambda}, z) W_{m,\lambda}(r_{\lambda}, z) - \tilde{q}^{in}\}^T \quad (26)$$

$$x_N^{out} = \{U_{m,N}(r_N, z) W_{m,N}(r_N, z) - \tilde{q}^{out}\}^T \quad (27)$$

رابطه‌ی ۲۵ که شامل مؤلفه‌های جابه‌جایی و تنش است، را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲۸ بیان کرد:

$$x_i = M_i(r, z) \{c_{\lambda,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i}\}^T \quad (28)$$

که در آن،  $i = 1, 2, \dots, N$  و  $M_i(r, z)$  ماتریسی  $4 \times 4$  است که اعضاء آن از روابط ۱۸ الی ۲۳ قابل استخراج است. بنابراین، بردار  $x_i$  در  $(i = 1, 2, \dots, N)$  در سطوح داخلی و خارجی لایه‌ی  $i$  به صورت رابطه‌های ۲۹ و ۳۰ بیان می‌شود:

$$x_i^{in} = M_i(r_{i-1}, z) \{c_{\lambda,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i}\}^T \quad (29)$$

$$x_i^{out} = M_i(r_i, z) \{c_{\lambda,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i}\}^T \quad (30)$$

از رابطه‌ی ۳۰، بردار مجهولات  $\{c_{\lambda,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i}\}^T$  به صورت رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید:

$$\{c_{\lambda,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i} \quad c_{r,i}\}^T = M_i^{-1}(r_i, z) x_i^{out} \quad (31)$$

با جایگذاری ضرایب مجهول اخیر در رابطه‌ی ۲۹،  $x_i^{in}$  به صورت رابطه‌ی ۳۲ به دست می‌آید:

$$x_i^{in} = M_i(r_{i-1}, z) M_i^{-1}(r_i, z) x_i^{out} \quad (32)$$

اگر ماتریس  $T_i$  به صورت رابطه‌ی ۳۳ تعریف شود:

$$T_i = M_i(r_{i-1}, z) M_i^{-1}(r_i, z), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (33)$$

بنابراین رابطه‌ی ۳۲ به صورت رابطه‌ی ۳۴ بیان می‌شود:

$$x_i^{in} = T_i x_i^{out} \quad (34)$$

$$R_{m,i} = c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} r I(1, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} r K(1, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه‌ی ۱۵ در معادله‌ی ۱۳، رابطه‌ی ۱۶ (الف و ب) برای تابع پتانسیل  $F_i$  به دست می‌آید:

اگر:  $s_{r,i} \neq s_{\lambda,i}$ 

$$F_i(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \cos \gamma_m z (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{r,i}) + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{r,i})) \quad (16 \text{ الف})$$

اگر:  $s_{r,i} = s_{\lambda,i}$ 

$$F_i(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \cos \gamma_m z (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} r I(1, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{r,i} r K(1, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \quad (16 \text{ ب})$$

که در آن‌ها،  $c_{\lambda,i}$ ،  $c_{r,i}$ ،  $c_{r,i}$ ،  $c_{r,i}$ ،  $c_{\lambda,i}$  و  $\gamma_m$  ثابت‌های مجهول هستند که با اعمال شرایط مرزی تعیین می‌شوند و  $I(p, \gamma_m r / s_{j,i})$  و  $K(p, \gamma_m r / s_{j,i})$  به اِزاء  $j = 0, 1, 2$  به ترتیب توابع بسل اصلاح شده‌ی نوع اول و دوم از مرتبه‌ی  $p$  هستند. با جایگذاری رابطه‌ی ۱۶ در رابطه‌ی ۵ و ارضاء شرط مرزی اول (رابطه‌ی ۱۰)، رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$u_i(r_i, L) = 0 \rightarrow \gamma_m = \frac{m\pi}{L}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

با توجه به رابطه‌ی اخیر، ضریب  $\gamma_m$  با تغییر مقدار پارامتر  $m$  (اعداد طبیعی)، مقادیر متفاوتی دارد. مطابق با رابطه‌ی ۱۶ و با جایگذاری در معادله‌های ۵ و ۱، مؤلفه‌های جابه‌جایی و تنش به صورت رابطه‌های ۱۸ الی ۲۳ به دست می‌آیند:

$$u_i = \sum_{m=1}^{\infty} U_{m,i}(r, z) \quad (18)$$

$$w_i = \sum_{m=1}^{\infty} W_{m,i}(r, z) \quad (19)$$

$$\sigma_{rr,i} = \sum_{m=1}^{\infty} S_{rr, m,i}(r, z) \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta\theta,i} = \sum_{m=1}^{\infty} S_{\theta\theta, m,i}(r, z) \quad (21)$$

$$\sigma_{zz,i} = \sum_{m=1}^{\infty} S_{zz, m,i}(r, z) \quad (22)$$

$$\sigma_{rz,i} = \sum_{m=1}^{\infty} S_{rz, m,i}(r, z) \quad (23)$$

که در آن‌ها، ضرایب  $S_{\theta\theta, m,i}(r, z)$ ،  $S_{rr, m,i}(r, z)$ ،  $W_{m,i}(r, z)$ ،  $U_{m,i}(r, z)$ ،  $S_{rz, m,i}(r, z)$  و  $S_{zz, m,i}(r, z)$  روابطی هستند که در پیوست ارائه شده‌اند.

همچنین شرایط پیوستگی در مرز لایه‌ها مطابق با معادلات ۱۱ به صورت رابطه‌ی ۳۵ بیان می‌شود:

$$x_i^{out} = x_{i+1}^{in} \quad (35)$$

در نتیجه رابطه‌ی ۳۴ به صورت رابطه‌ی ۳۶ گسترش می‌یابد:

$$x_1^{in} = T_1 x_1^{out} = T_1 x_2^{in} = \dots = T_1 \dots T_N x_N^{out} \quad (36)$$

با جایگذاری  $x_1^{in}$  و  $x_N^{out}$  از روابط ۲۶ و ۳۰ در رابطه‌ی ۳۶، رابطه‌ی ۳۷ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \left\{ U_{m,1}(r_0, z) W_{m,1}(r_0, z) - \tilde{q}^{in} \right\}^T \\ &= \underline{T_1 \dots T_N M_N(r_N, z)} \begin{Bmatrix} c_{1,N} & c_{2,N} & c_{3,N} & c_{4,N} \end{Bmatrix}^T \end{aligned} \quad (37)$$

اگر ماتریس  $G(z)$  به صورت رابطه‌ی ۳۸ تعریف شود:

$$G(z) = T_1 \dots T_N \bar{M}_N \quad (38)$$

که در آن،  $\bar{M}_N$  مطابق رابطه‌ی ۳۹ تعیین می‌شود:

$$\bar{M}_N = M_N(r_N, z) \quad (39)$$

بنابراین معادله‌ی ۳۷ به صورت رابطه‌ی ۴۰ بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{1,N} \\ c_{2,N} \\ c_{3,N} \\ c_{4,N} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{m,1}(r_0, z) \\ W_{m,1}(r_0, z) \\ 0 \\ -\tilde{q}^{in} \end{Bmatrix} \quad (40)$$

همچنین با تلفیق روابط ۲۷ و ۳۰، رابطه‌ی ۴۱ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} x_N^{out} &= \{ U_{m,N}(r_N, z) W_{m,N}(r_N, z) - \tilde{q}^{out} \}^T \\ &= \bar{M}_N \{ c_{1,N} \ c_{2,N} \ c_{3,N} \ c_{4,N} \}^T \end{aligned} \quad (41)$$

که می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۴۲ نیز بیان شود:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{N,11} & \bar{M}_{N,12} & \bar{M}_{N,13} & \bar{M}_{N,14} \\ \bar{M}_{N,21} & \bar{M}_{N,22} & \bar{M}_{N,23} & \bar{M}_{N,24} \\ \bar{M}_{N,31} & \bar{M}_{N,32} & \bar{M}_{N,33} & \bar{M}_{N,34} \\ \bar{M}_{N,41} & \bar{M}_{N,42} & \bar{M}_{N,43} & \bar{M}_{N,44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{1,N} \\ c_{2,N} \\ c_{3,N} \\ c_{4,N} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{m,N}(r_N, z) \\ W_{m,N}(r_N, z) \\ 0 \\ -\tilde{q}^{out} \end{Bmatrix} \quad (42)$$

بنابراین معادلات ۴۳ به فرم ماتریس از روابط ۴۰ و ۴۲ به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \\ \bar{M}_{N,31} & \bar{M}_{N,32} & \bar{M}_{N,33} & \bar{M}_{N,34} \\ \bar{M}_{N,41} & \bar{M}_{N,42} & \bar{M}_{N,43} & \bar{M}_{N,44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_{1,N} \\ c_{2,N} \\ c_{3,N} \\ c_{4,N} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\tilde{q}^{in} \\ 0 \\ -\tilde{q}^{out} \end{Bmatrix} \quad (43)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۴۳ می‌توان ضرایب مجهول لایه‌ی آخر از پوسته‌ی استوانه‌یی چندلایه را به دست آورد و سپس به کمک رابطه‌ی بازگشتی ۴۴ که از رابطه‌ی پیوستگی ۳۵ به دست آمده است، ثابت‌های مجهول لایه‌های دیگر از پوسته‌ی چندلایه نیز تعیین می‌شوند.

$$\begin{aligned} \{ c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i} \}^T &= M_i^{-1}(r_i, z) M_{i+1}(r_{i+1}, z) \\ &\quad \{ c_{1,i+1} \ c_{2,i+1} \ c_{3,i+1} \ c_{4,i+1} \}^T \end{aligned} \quad (44)$$

که در آن،  $i = 1, \dots, N-1$  با جایگذاری ضرایب مجهول در معادله‌های ۱۸ الی ۲۳، مؤلفه‌های جابه‌جایی و تنش پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروپ جانبی ناهمگن با شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، به منظور حل معادله‌ها از نرم‌افزار Mathematica ۱۱/۱ استفاده شده است.

## ۷. نتایج عددی

### ۷.۱. راستی آزمایی

به منظور راستی‌آزمایی روابط به دست آمده در پژوهش حاضر و نیز کنترل محاسبات، نتایج عددی حاصل از روش استفاده شده در پژوهش حاضر، با نتایج منتشر شده در نوشتار چاندراشکارا و همکاران (۱۹۹۳)<sup>[۵]</sup> برای پوسته‌ی استوانه‌یی تک‌لایه و سه‌لایه با مصالح ایزوتروپ جانبی تعریف شده در نوشتار اخیر و تحت بارگذاری سینوسی متقارن محوری در سطح خارجی با شدت  $q$  مقایسه شده است. در بخش حاضر، به منظور مقایسه‌ی نتایج از رابطه‌ی ۴۵ برای بی‌بعدکردن مؤلفه‌ی جابه‌جایی و تنش استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{100 \times 10^{-6}}{q_0 h \left( \frac{R}{h} \right)^2}, \\ (\bar{\sigma}_{ZZ}, \bar{\sigma}_{\theta\theta}) &= \frac{1}{q_0 \left( \frac{R}{h} \right)^2} (\sigma_{ZZ}, \sigma_{\theta\theta}) \end{aligned} \quad (45)$$

در جدول ۱، نتایج پوسته‌ی استوانه‌یی تک‌لایه برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی  $L = R$  در محدوده‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی جدار ضخیم تا خیلی نازک مشاهده می‌شود که مطابق آن، حدوداً ۰/۲ درصد اختلاف بین نتایج برای  $h/R = 0/5$  وجود دارد و هنگامی که نسبت ضخامت پوسته کاهش می‌یابد، از درصد اخیر اختلاف کاسته شده است. همچنین در جدول ۲، نتایج پوسته‌ی استوانه‌یی سه‌لایه با ضخامت متفاوت لایه‌ها  $h_1 = 2h_2 = 3h_3$  و  $L = R$  برای نسبت‌های مختلف ضخامت کل به شعاع میانی پوسته ارائه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده با نوشتار چاندراشکارا و همکاران (۱۹۹۳)<sup>[۵]</sup> اختلاف حدود ۰/۱ درصد بین نتایج را برای  $h/R = 0/2$  نشان می‌دهد و هنگامی که نسبت ضخامت به شعاع میانی پوسته کاهش یافته است، از درصد ذکر شده‌ی اختلاف کاسته شده است.

علاوه بر این، به منظور راستی‌آزمایی، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS-Implicit نسخه‌ی ۲۰۲۰ مقایسه شده است. برای این منظور، در مدل‌سازی اجزاء محدود از جزء C3D8R، که جزء ۸ گره‌یی است، استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی، بارگذاری و هندسه‌ی مدل اجزاء محدود، دقیقاً با آنچه که در پژوهش حاضر به صورت تحلیلی استفاده شده است، مطابقت دارد. به منظور تعیین ابعاد مناسب برای مش‌بندی، آنالیز حساس صورت گرفته است، که به عنوان مثال، نمونه‌ی پوسته‌ی استوانه‌یی تک‌لایه با  $h/R = 0/1$  شامل ۱۷۲۰۰۰ جزء است که در نمونه‌های دیگر به تناسب ابعاد

جدول ۱. مقایسه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌های بی‌بعد در وسط دهانه برای پوسته‌ی استوانه‌ای تک‌لایه‌ی ایزوتروپ جانبی تحت بارگذاری فشار سینوسی خارجی.

$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_1}$	$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_2}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_1}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_2}$	$\bar{u} _{r=R}$	مرجع	$h/R$
$-0/2216$	$-0/1172$	$-1/0673$	$0/8858$	$-7/6125$	[5]	
$-0/2145$	$-0/1236$	$-0/9248$	$0/7882$	$-7/5951$	المان محدود	$0/5$
$-0/2242$	$-0/1171$	$-1/0609$	$0/8861$	$-7/5904$	کار حاضر	
$-0/0876$	$-0/0642$	$-0/4839$	$0/5115$	$-1/8830$	[5]	
$-0/0848$	$-0/0678$	$-0/4454$	$0/4733$	$-1/8839$	المان محدود	$0/2$
$-0/0880$	$-0/0640$	$-0/4830$	$0/5112$	$-1/8804$	کار حاضر	
$-0/0648$	$-0/0542$	$-0/2804$	$0/2918$	$-0/7942$	[5]	
$-0/0631$	$-0/0563$	$-0/2574$	$0/2683$	$-0/7937$	المان محدود	$0/1$
$-0/0649$	$-0/0541$	$-0/2802$	$0/2917$	$-0/7918$	کار حاضر	
$-0/0439$	$-0/0399$	$-0/1132$	$0/1156$	$-0/2839$	[5]	
$-0/0432$	$-0/0407$	$-0/1045$	$0/1068$	$-0/2841$	المان محدود	$0/05$
$-0/0439$	$-0/0399$	$-0/1131$	$0/1156$	$-0/2838$	کار حاضر	
$-0/0199$	$-0/0191$	$0/0220$	$0/0222$	$-0/0530$	[5]	
$-0/0196$	$-0/0192$	$0/0206$	$0/0207$	$-0/0530$	المان محدود	$0/02$
$-0/0199$	$-0/0191$	$0/0220$	$0/0222$	$-0/0530$	کار حاضر	
$-0/0100$	$-0/0099$	$-0/0057$	$0/0057$	$-0/0136$	[5]	
$-0/0100$	$-0/0099$	$-0/0051$	$0/0050$	$-0/0135$	المان محدود	$0/01$
$-0/0100$	$-0/0099$	$-0/0057$	$0/0057$	$-0/0136$	کار حاضر	

در شکل‌های ۲ و ۳، تغییرات توابع تنش بی‌بعد  $\sigma_{rr}(r, z)$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد  $(\bar{r} = \frac{r-r_1}{r_2-r_1})$  را برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی پوسته‌ی استوانه‌ای به ترتیب برای مصالح گرافیت اپوکسی و زینک در  $z = L/2$  مشاهده می‌شوند. مقادیر عددی نسبت‌های  $h/R$  و  $R/L$  بر روی نمودارهای مرتبط مشخص شده است. در شکل‌های مذکور، ارضاء شرایط مرزی تنش در سطوح داخلی و خارجی پوسته در همه‌ی منحنی‌ها به خوبی مشهود است.

در شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات توابع تنش بی‌بعد  $\sigma_{\theta\theta}(r, z)$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی پوسته‌ی استوانه‌ای به ترتیب برای مصالح گرافیت اپوکسی و زینک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، بزرگی تابع تنش  $\sigma_{\theta\theta}(r, z)$  رابطه‌ی معکوس با افزایش ضخامت پوسته دارد. در شکل ۶، تغییرات توابع تنش بی‌بعد  $\sigma_{zz}(r, z)$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد برای مصالح جدول ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین و کمترین تنش  $\sigma_{zz}(r, z)$  به ترتیب مربوط به گرافیت اپوکسی و زینک بوده و برای همه‌ی مصالح معرفی شده، مقدار تابع در حوالی  $\bar{r} = 0/55$  تغییر علامت داده است.

در شکل ۷، تغییرات تابع جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد  $u(r, z)$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد برای مصالح مختلف بررسی شده مشاهده می‌شود که مطابق آن، بیشترین و کمترین جابه‌جایی شعاعی به ترتیب مربوط به گرافیت اپوکسی و زینک است. با بررسی رابطه‌ی ۵، دلیل اصلی آن را در تأثیر معکوس ضریب کشسانی

نمونه افزایش یافته است. نتایج حاصل از تحلیل در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است، که نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب روش تحلیلی استفاده شده با روش عددی اجزاء محدود است.

## ۲.۷. نتایج و بحث

• پوسته‌ی استوانه‌ای تک‌لایه: مقادیر بی‌بعد مؤلفه‌های تنش و جابه‌جایی برای ماده‌ی ایزوتروپ جانبی، شامل: گرافیت اپوکسی و زینک و همچنین ماده‌ی ایزوتروپ آلومینیوم محاسبه شده است. ثابت‌های کشسان مصالح ذکر شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در بخش حاضر، توابع بی‌بعد ذکر شده برای پوسته‌ی استوانه‌ای تحت بارگذاری فشار خارجی یکنواخت متقارن محوری برای مصالح فهرست شده در جدول ۳ به‌طور عددی ارزیابی شده است. برای حالتی که پوسته تحت بار فشاری یکنواخت در سطح خارجی خود قرار دارد، تابع بارگذاری به صورت رابطه‌ی ۴۶ بیان می‌شود:

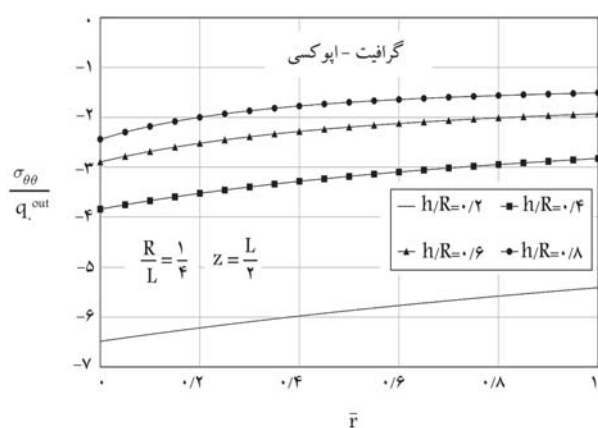
$$q^{out}(z) = q_0^{out}, \quad 0 < z < l \quad (46)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲۴، بار شعاعی در پوسته‌ی استوانه‌ای را می‌توان به‌صورت بسط سری فوریه مطابق رابطه‌ی ۴۷ بیان کرد:

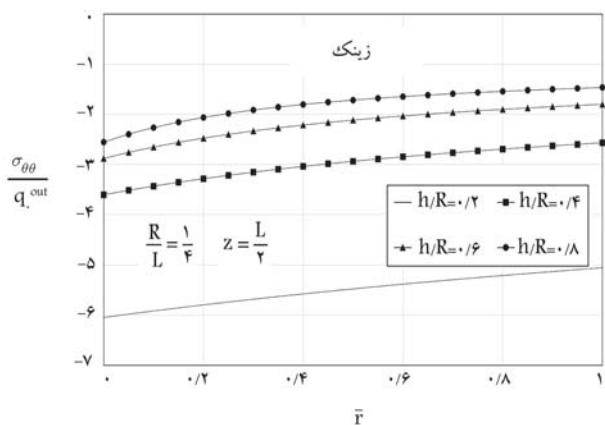
$$q^{out}(z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4q_0^{out}}{m\pi} \sin \frac{m\pi z}{L} \quad (47)$$

جدول ۲. مقایسه‌ی تنش‌ها و جابجایی‌های بی‌بعد در وسط دهانه برای پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه‌ی ایزوتروپ جانبی و تحت بارگذاری فشار سینوسی خارجی.

$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_p}$	$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_c}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_p}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_c}$	$\bar{u} _{r=R}$	مرجع	$h/R$
-۰/۰۸۱۹	-۰/۰۵۹۶	-۰/۰۴۷۵۸	۰/۰۴۷۲۸	-۱/۷۴۹۸	[۵]	۰
-۰/۰۸۰۲	-۰/۰۶۳۷	-۰/۰۴۴۳۹	۰/۰۴۵۴۵	-۱/۷۷۰۴	المان محدود	۰/۲
-۰/۰۸۲۶	-۰/۰۵۹۵	-۰/۰۴۷۶۶	۰/۰۴۷۲۹	-۱/۷۴۷۴	کار حاضر	
-۰/۰۵۸۲	-۰/۰۴۸۴	-۰/۰۲۶۲۷	۰/۰۲۵۴۱	-۰/۰۷۰۶۲	[۵]	۰/۱
-۰/۰۵۷۷	-۰/۰۵۱۰	-۰/۰۲۵۱۶	۰/۰۲۴۵۴	-۰/۰۷۱۹۹	المان محدود	
-۰/۰۵۸۵	-۰/۰۴۸۴	-۰/۰۲۶۳۲	۰/۰۲۵۴۰	-۰/۰۷۰۶۵	کار حاضر	
-۰/۰۳۷۰	-۰/۰۳۳۴	-۰/۰۹۷۶	۰/۰۹۵۳	-۰/۰۲۳۸۵	[۵]	۰/۰۵
-۰/۰۳۷۴	-۰/۰۳۵۲	-۰/۰۹۳۶	۰/۰۹۱۸	-۰/۰۲۵۵۴	المان محدود	
-۰/۰۳۷۱	-۰/۰۳۳۶	-۰/۰۹۷۹	۰/۰۹۵۲	-۰/۰۲۳۸۶	کار حاضر	



شکل ۴. تغییرات تنش محیطی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌یی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



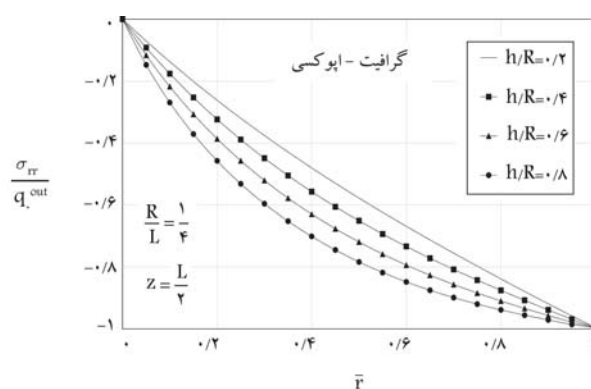
شکل ۵. تغییرات تنش محیطی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌یی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.

در جابجایی شعاعی می‌توان یافت. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ضریب کشسانی  $A_{11}$  مربوط به زینک و کمترین مقدار آن مربوط به گرافیت اپوکسی بوده است.

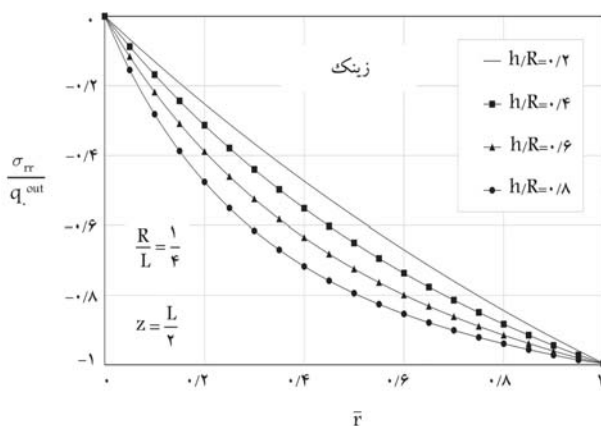
در شکل ۸، تغییرات تابع جابجایی محوری بی‌بعد  $w(r, z)$  در امتداد محور  $z$

جدول ۳. ثابت‌های کشسانی مصالح (GPa).

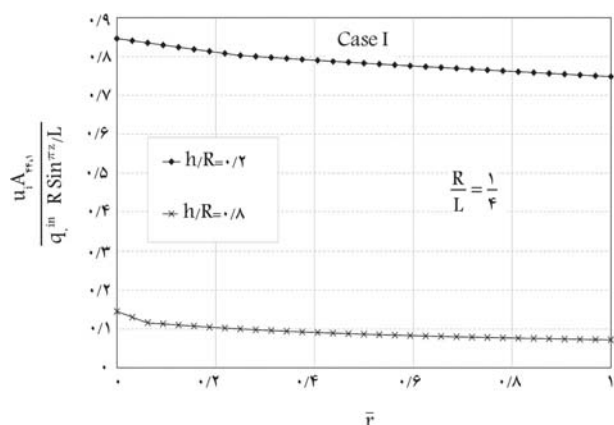
مصالح	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{23}$	$A_{44}$
گرافیت - اپوکسی	۱۳/۹۲	۶/۹۲	۶/۴۴	۱۶۰/۷	۷/۰۷
زینک	۱۵۸/۳۵	۳۱/۵۱	۴۷/۴۴	۶۱/۶	۴۰
آلومینیوم	۱۰۲/۲۳	۵۰/۳۵۴	۵۰/۳۵۴	۱۰۲/۲۳	۲۵/۹۴



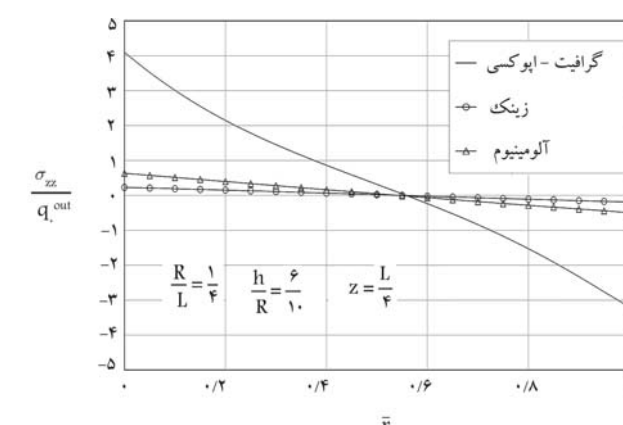
شکل ۶. تغییرات تنش شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌یی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



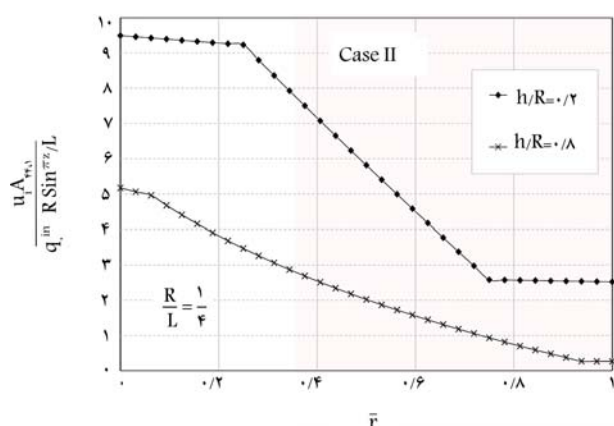
شکل ۷. تغییرات تنش شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌یی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



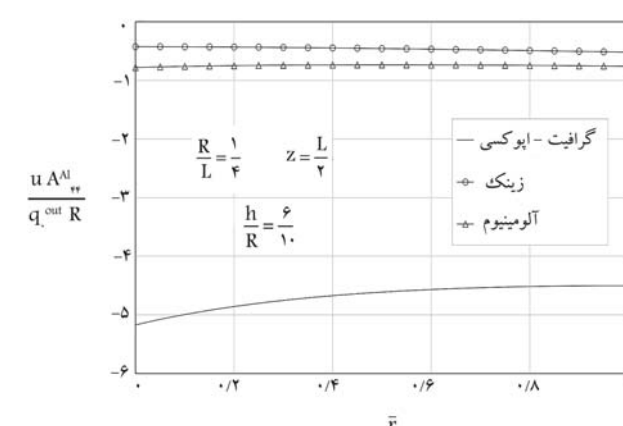
شکل ۹. تغییرات جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای سه لایه.



شکل ۶. تغییرات تنش طولی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای مصالح مختلف.



شکل ۱۰. تغییرات جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای سه لایه.



شکل ۷. تغییرات جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای برای مصالح مختلف.

استوانه‌ای سه لایه ارائه شده است، که در آن لایه‌های داخلی و خارجی پوسته از ماده‌ی ایزوتروپ جانبی گرافیت اپوکسی و لایه‌ی میانی آن یک بار از ماده‌ی ایزوتروپ آلومینیوم و بار دیگر از ماده‌ی ایزوتروپ فوم که ماده‌ی بسیار ضعیف است، ساخته شده باشد. لایه‌ها به گونه‌ی روی هم قرار گرفته‌اند که نسبت ضخامت لایه‌ی داخلی و خارجی یکسان و برابر با  $h_1/R = h_2/R = 1/20$  است و نسبت ضخامت لایه‌ی میانی متغیر است، به طوری که نسبت ضخامت کلی پوسته نیز متغیر است.

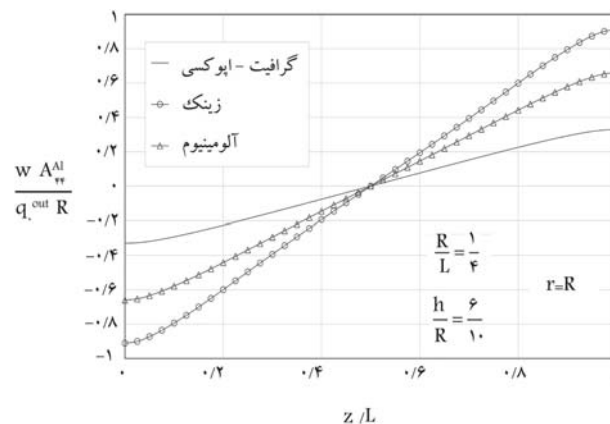
پوسته‌ی استوانه‌ای سه لایه تحت بارگذاری شعاعی سینوسی متقارن محوری در کل سطح داخلی خود قرار دارد و بنابراین تابع بارگذاری را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۴۸ بیان کرد:

$$q^{in}(z) = q_0^{in} \sin \frac{\pi z}{L} \quad 0 < z < l \quad (48)$$

با استفاده از معادله‌ی ۲۷، ضریب بارگذاری در فضای فوری به فرم رابطه‌ی ۴۹ به دست می‌آید:

$$q_m^{in} = q_0^{in} \quad \text{for} \quad m = 1 \quad (49)$$

در شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات تابع جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته به ترتیب برای حالت‌های Case I و Case II مشاهده

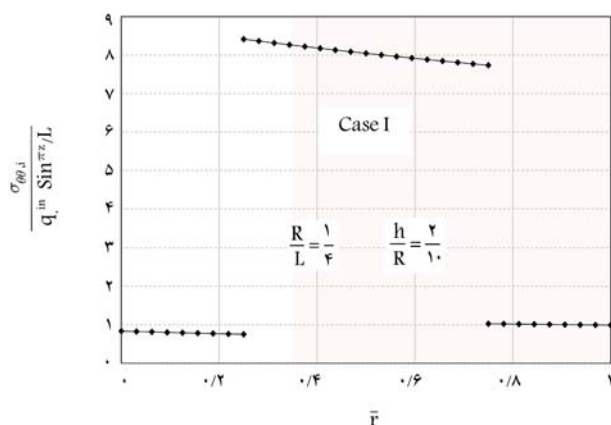


شکل ۸. تغییرات جابه‌جایی محوری بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی طولی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای برای مصالح مختلف.

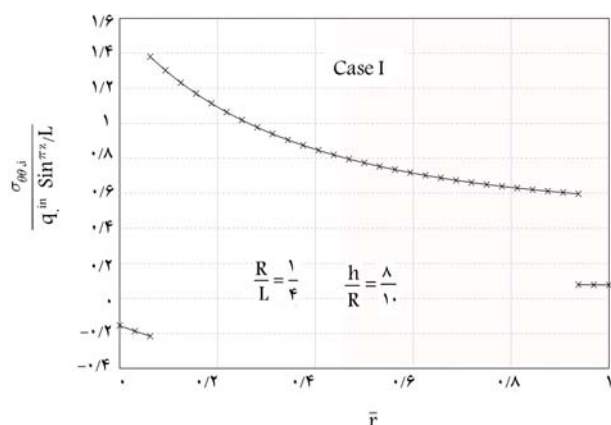
مشاهده می‌شود. همان‌طور که در معادله‌ی ۵ مشاهده می‌شود، تابع جابه‌جایی رابطه‌ی مستقیم با ضرایب  $(1 + \alpha_1)$  و  $\beta$  دارد که با توجه به رابطه بین ضرایب مذکور و ضرایب کشسانی مواد، تغییرات در منحنی‌های شکل ۸ قابل انتظار است.

- پوسته‌ی استوانه‌ای سه لایه: در بخش حاضر، نتایج حاصل از پژوهش برای پوسته‌ی

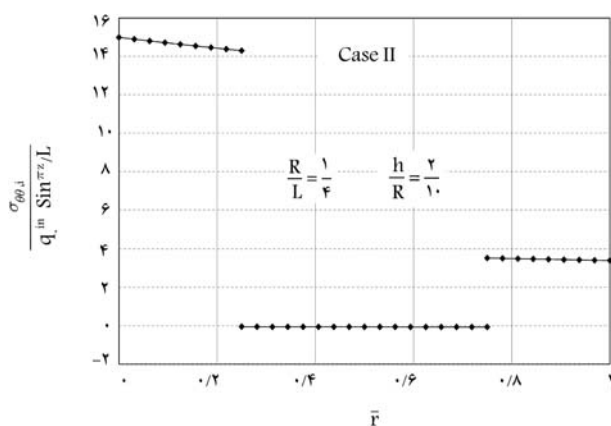




شکل ۱۳. تغییرات تنش محیطی بی بُعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه.

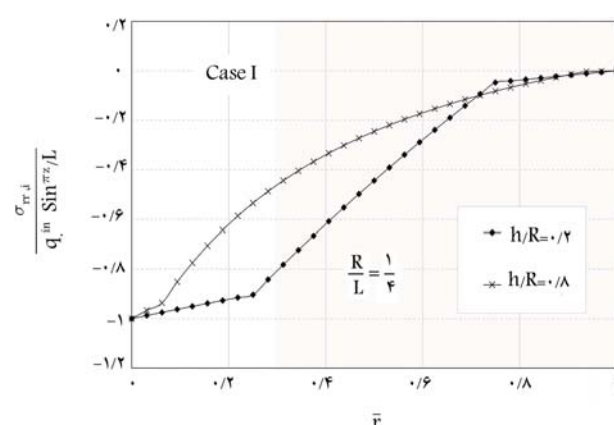


شکل ۱۴. تغییرات تنش محیطی بی بُعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه.

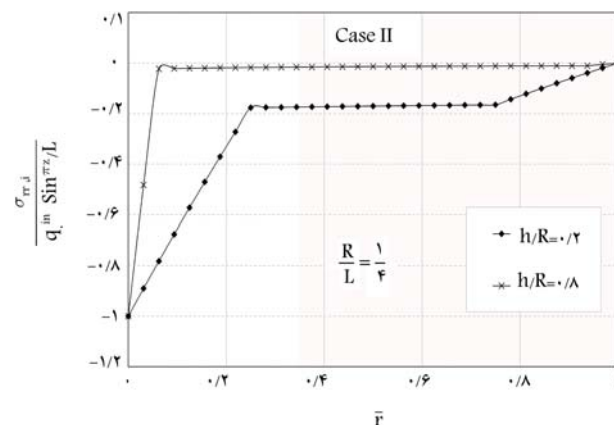


شکل ۱۵. تغییرات تنش محیطی بی بُعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه.

ارضاء شده است. در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، تغییرات تابع تنش محیطی بی بُعد برای پوسته با ضخامت‌های مختلف بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته برای Case I و Case II مشاهده می‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر تنش  $\sigma_{\theta\theta}$  در مرز لایه‌ها، فاقد پیوستگی است و در همه‌ی منحنی‌ها، برش در مقدار تنش مذکور در سطوح بین لایه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات تنش شعاعی بی بُعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه.



شکل ۱۲. تغییرات تنش شعاعی بی بُعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته‌ی استوانه‌یی سه لایه.

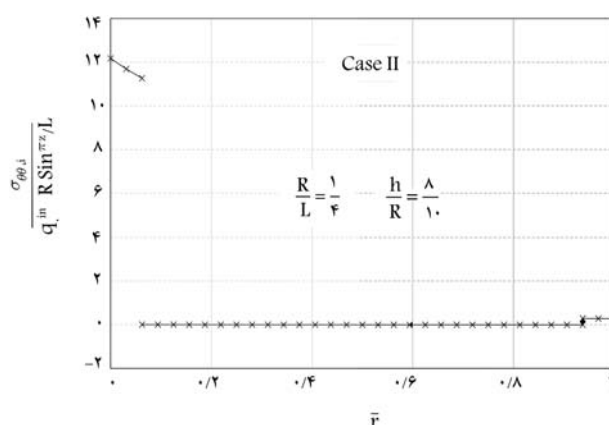
جدول ۴. ترکیب مصالح در لایه‌های مختلف پوسته سه لایه.

نوع	لایه		
	۳	۲	۱
Case I	گرافیت - اپوکسی	آلومینیوم	گرافیت - اپوکسی
Case II	گرافیت - اپوکسی	فوم پلی‌اورتان*	گرافیت - اپوکسی
$A_{11} = A_{33} = 117.846 MPa, A_{12} = A_{13} = 17.77 MPa,$ $A_{22} = A_{23} = 5.385 MPa, \rho = 75 kg/m^3$			

می‌شود که مطابق منحنی‌ها با افزایش ضخامت پوسته، مقدار جابه‌جایی کاهش یافته است. همچنین در Case I، بزرگی جابه‌جایی شعاعی در امتداد ضخامت پوسته تقریباً ثابت است و تغییر شیب غیرقابل توجهی در محل تغییر لایه مشاهده می‌شود؛ در حالی که در Case II، تغییر شیب قابل توجهی در محل تغییر لایه اتفاق افتاده است. مقایسه‌ی منحنی‌های مشابه در شکل‌های ۹ و ۱۰، تأثیر زیاد جنس لایه‌ی میانی را در جابه‌جایی شعاعی پوسته نشان می‌دهد؛ به طوری که در Case II، بزرگی جابه‌جایی در بعضی نقاط حدوداً ۵۰ برابر نقاط مرتبط در Case I بوده است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات تابع تنش شعاعی بی بُعد  $\sigma_{rr}$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بُعد پوسته برای Case I و Case II در جدول ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، در همه‌ی منحنی‌ها، شرایط مرزی تنش و شرایط پیوستگی به خوبی

حل دقیق پوسته‌ی استوانه‌ای با تکیه‌گاه ساده با مصالح ایزوتروپ جانبی کشسان خطی ارائه شده است. پوسته‌ی استوانه‌ای تحت فشار استاتیکی قرار داشته و با ارضاء شرایط مرزی به‌طور دقیق و حل معادله‌ی دیفرانسیل حاکم، تابع پتانسیل و سپس جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها از طریق رابطه با تابع پتانسیل به دست آمده‌اند. در ادامه، با اعمال کلیه‌ی شرایط حاکم بین لایه‌ها، شامل پیوستگی تنش و جابه‌جایی، تحلیل برای پوسته‌ی استوانه‌ای چندلایه گسترش داده شده است. در پژوهش حاضر، هیچ فرضیات ساده‌شونده‌ی در رابطه با توزیع تنش و کرنش در راستای ضخامت وجود نداشته است و بنابراین از آن می‌توان برای پوسته‌های جدار نازک تا جدار ضخیم با دقت یکسان در نتایج استفاده کرد. مقایسه‌ی نتایج با دیگر نتایج تحلیلی و همچنین نتایج اجزاء محدود، توافق بسیار عالی نتایج حاصل از روش ارائه‌شده را برای پارامترهای مصالح مختلف، نسبت ضخامت و نسبت ابعادی مختلف پوسته نشان می‌دهد. همچنین تأثیر تغییر در هندسه، مصالح، و نوع بارگذاری به‌طور عددی برای چند نوع مصالح پوسته‌ی ایزوتروپ و ایزوتروپ جانبی با مقادیر متفاوت و برای پوسته‌ی استوانه‌ای یک و سه لایه‌ی غیرایزوتروپ محاسبه و به شکل نمودارهایی ظاهر شده است، که در کلیه‌ی نتایج شرایط مرزی در دو انتها، سطوح بیرونی و داخلی پوسته و فصل مشترک بین لایه‌ها به‌طور کامل و دقیق ارضاء شده است.



شکل ۱۶. تغییرات تنش محیطی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ای سه لایه.

## ۸. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، با استفاده از معادلات کشسانی سه‌بعدی و تابع پتانسیل جابه‌جایی،

## پانویس‌ها

1. Kirchhoff-Love
2. Timoshenko
3. Donnell
4. Sanders
5. Flugge
6. Reissner-Naghdi
7. Iyengar
8. Chandrashekhar
9. Kumar
10. Elliott
11. Xiang
12. Lamé
13. Lekhnitskii-Hu-Nowackii

## منابع (References)

1. Reddy, J.N. "Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis", CRC Press (2003).
2. Iyengar, K.S. and Sebastian, V.K. "Comparison of elasticity and shell-theory solutions for finite circular cylindrical shells", *Nuclear Engineering and Design*, **21**(1), pp. 137-157 (1972).
3. Chandrashekhar, K. and Gopalakrishnan, P. "Transversely isotropic infinite cylindrical shell subjected to a radial axisymmetric line load", *Fibre Science and Technology*, **16**(4), pp. 275-293 (1982).
4. Chandrashekhar, K. and Gopalakrishnan, P. "Elasticity solution for a multilayered transversely isotropic circular cylindrical shell", *Journal of Applied Mechanics*, **49**(1), pp. 108-114 (1982).
5. Chandrashekhar, K. and Kumar, B.S. "Static analysis of a thick laminated circular cylindrical shell subjected to axisymmetric load", *Composite Structures*, **23**(1), pp. 1-9 (1993).
6. Xiang, H., Shi, Z. and Zhang, T. "Elastic analyses of heterogeneous hollow cylinders", *Mechanics Research Communications*, **33**(5), pp. 681-691 (2006).
7. Wang, M.Z. and Wang, W. "Completeness and nonuniqueness of general solutions of transversely isotropic elasticity", *International Journal of Solids and Structures*, **32**(3-4), pp. 501-513 (1995).
8. Eskandari-Ghadi, M. "A complete solution of the wave equations for transversely isotropic media", *Journal of Elasticity*, **81**(1), pp. 1-19 (2005).
9. Eskandari-Ghadi, M., Pak, R.Y. and Ardeshtir-Behrestaghi, A. "Elastostatic Green's functions for an arbitrary internal load in a transversely isotropic bi-material full-space", *International Journal of Engineering Science*, **47**(4), pp. 631-641 (2009).
10. Eskandari-Ghadi, M., Pak, R.Y. and Ardeshtir-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).
11. Eskandari-Ghadi, M. and Sattar, S. "Axisymmetric transient waves in transversely isotropic half-space", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(2), pp. 347-355 (2009).

12. Eskandari-Ghadi, M., Fallahi, M. and Ardeshtir-Behrestaghi, A. "Forced vertical vibration of rigid circular disc on a transversely isotropic half-space", *Journal of Engineering Mechanics*, **136**(7), pp. 913-922 (2010).
13. 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).
14. Nateghi Babagi, P., Navayi Neya, B. and Dehestani, M. "Three dimensional solution of thick rectangular simply supported plates under a moving load", *Meccanica*, **52**(15), pp. 3675-3692 (2017).
15. 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).
16. Bakhshandeh, A., Navayi Neya, B. and Nateghi-Babagi, P. "Benchmark solution for free vibration analysis of transversely isotropic thick rectangular plates", *Acta Mechanica*, **228**(11), pp. 3977-3995 (2017).
17. Roshanbakhsh, M.Z., Tavakkoli, S.M. and Navayi Neya, B. "Free vibration of functionally graded thick circular plates: An exact and three-dimensional solution", *International Journal of Mechanical Sciences*, **188** (2020).
18. Moslemi, A., Navayi Neya, B. and Vaseghi-Amiri, J. "3-D elasticity buckling solution for simply supported thick rectangular plates using displacement potential functions", *Applied Mathematical Modelling*, **40**(11-12), pp. 5717-5730 (2016).
19. Moslemi, A., Navayi Neya, B. and Vaseghi Amiri, J. "Benchmark solution for buckling of thick rectangular transversely isotropic plates under biaxial load", *International Journal of Mechanical Sciences*, **131**, pp. 356-367 (2017).

که در آنها:

$$\kappa_{j,i} = \gamma_m A_{\lambda\lambda,i} \alpha_{r,i} \frac{\gamma_m}{s_{j,i}^r} + \gamma_m A_{\lambda r,i} \alpha_{r,i}, \quad j = \lambda, r$$

$$\begin{aligned} S_{\theta\theta m,i}(r, z) = & \sin \gamma_m z [\xi_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \\ & + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i})) \\ & + \xi_{r,i} (c_{r,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{r,i})) \\ & + \frac{\gamma}{r} A_{\varphi\varphi,i} \alpha_{r,i} \gamma_m (c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \\ & + c_{r,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \\ & + c_{r,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}))] \end{aligned}$$

که در آنها:

$$\begin{aligned} \xi_{j,i} = & (A_{\lambda r,i} \alpha_{r,i} - A_{\lambda\lambda,i} (\lambda + \alpha_{\lambda,i})) \\ & + \frac{\gamma_m}{s_{j,i}^r} + \gamma_m A_{\lambda r,i} \alpha_{r,i}, \quad j = \lambda, r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{zz m,i}(r, z) = & \sin \gamma_m z [\varphi_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \\ & + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i})) \\ & + \varphi_{r,i} (c_{r,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}))] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{j,i} = & A_{\lambda r,i} \alpha_{r,i} \frac{\gamma_m}{s_{j,i}^r} - A_{rr,i} \gamma_m^r \\ & (\lambda + \alpha_{\lambda,i}) \left( \frac{\lambda}{s_{j,i}^r} - \beta_i \right), \quad j = \lambda, r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{rz m,i}(r, z) = & A_{rr,i} \cos \gamma_m z \left[ \varsigma_{\lambda,i} \left( c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \right. \right. \\ & \left. \left. + c_{r,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \right) + \varsigma_{r,i} \left( c_{r,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) \right. \right. \end{aligned}$$

پیوست

در بخش حاضر، ضرایب  $S_{rz m,i}(r, z)$  و  $S_{\theta\theta m,i}(r, z)$ ،  $W_{m,i}(r, z)$ ،  $U_{m,i}(r, z)$  و  $S_{zz m,i}(r, z)$  در رابطه‌های ۱۸ الی ۲۳، ارائه شده‌اند. اگر  $s_{r,i} \neq s_{\lambda,i}$ :

$$U_{m,i}(r, z) = \alpha_{r,i} \gamma_m \sin \gamma_m z.$$

$$\begin{aligned} & \left[ c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) + c_{r,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \right. \\ & \left. + c_{r,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) \right] \end{aligned}$$

$$W_{m,i}(r, z) = (\lambda + \alpha_{\lambda,i}) \cos \gamma_m z \left[ \left( \frac{\gamma_m}{s_{\lambda,i}^r} - \beta_i \gamma_m^r \right) \right.$$

$$(c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i})$$

$$\left. + c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) \right) \left( \frac{\gamma_m}{s_{\lambda,i}^r} - \beta_i \gamma_m^r \right)$$

$$(c_{r,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}))]$$

$$S_{rr m,i}(r, z) = \sin \gamma_m z [\kappa_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{r,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}))$$

$$+ \kappa_{r,i} (c_{r,i} I(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}) + c_{\lambda,i} K(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}))$$

$$- \frac{\gamma}{r} A_{\varphi\varphi,i} \alpha_{r,i} \gamma_m (c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{r,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{\lambda,i}) + c_{r,i} I'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i})$$

$$(c_{r,i} K'(\circ, \gamma_m r/s_{r,i}))]$$

$$\left. + c_{\tau,i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\tau,i}) \right) \Bigg] \quad \text{که در آن:}$$

$$\kappa_{\tau,i} = r \kappa_{\lambda,i} + \frac{\gamma}{r} \gamma_m (A_{\varphi\varphi,i} \alpha_{\lambda,i} - A_{\lambda\tau,i})$$

$$S_{\theta\theta m,i}(r, z) = \sin \gamma_m z \left[ \xi_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \right.$$

که در آنها:

$$+ c_{\tau,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \xi_{\tau,i} (c_{\tau,i} I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \frac{\gamma}{r} \gamma_m A_{\varphi\varphi,i} \alpha_{\tau,i} (c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K'$$

$$(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) + \gamma_m ((A_{\lambda\tau,i} + A_{\lambda\lambda,i}) \alpha_{\tau,i}$$

$$- \gamma A_{\lambda\tau,i} (\lambda + \alpha_{\lambda,i}))$$

$$(c_{\tau,i} I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \Bigg]$$

اگر  $s_{\tau,i} = s_{\lambda,i}$ :

$$\xi_{\tau,i} = r \xi_{\lambda,i} + \frac{\lambda}{r} \gamma_m (A_{\lambda\lambda,i} + A_{\lambda\tau,i}) \alpha_{\tau,i} - \frac{\gamma}{r} \gamma_m A_{\lambda\tau,i}$$

$$S_{zz m,i}(r, z) = \sin \gamma_m z \left[ \varphi_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \right.$$

$$+ c_{\tau,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \varphi_{\tau,i} (c_{\tau,i} I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \gamma \gamma_m (A_{\lambda\tau,i} \alpha_{\tau,i} - A_{\tau\tau,i} (\lambda + \alpha_{\lambda,i}))$$

$$(c_{\tau,i} I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \Bigg]$$

که در آن:

$$\varphi_{\tau,i} = r \varphi_{\lambda,i} + \frac{\gamma}{r} \gamma_m (A_{\lambda\tau,i} \alpha_{\tau,i} - A_{\tau\tau,i} (\lambda + \alpha_{\lambda,i}))$$

$$S_{rz m,i}(r, z) = A_{\tau\tau,i} \cos \gamma_m z \left[ \varsigma_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \right.$$

$$+ c_{\tau,i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) + (\gamma_m \frac{A_{\lambda\tau,i}}{A_{\varphi\varphi,i}} + \frac{\gamma_m}{s_{\lambda,i}^{\gamma}} (\lambda + \alpha_{\lambda,i})) \cdot$$

$$(c_{\tau,i} r I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} r K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \varsigma_{\tau,i} (c_{\tau,i} I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \Bigg]$$

$$\varsigma_{\tau,i} = \varsigma_{\lambda,i} + \frac{\gamma \gamma_m}{s_{\lambda,i}^{\gamma}} (\lambda + \alpha_{\lambda,i})$$

$$U_{m,i}(r, z) = \gamma_m \alpha_{\tau,i} \sin \gamma_m z \left[ c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \right.$$

$$+ c_{\tau,i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{\tau,i} (I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + r I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ c_{\tau,i} (K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + r K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \Bigg]$$

$$W_{m,i}(r, z) = (\lambda + \alpha_{\lambda,i}) \cos \gamma_m z \left[ \left( \frac{\gamma_m}{s_{\lambda,i}^{\gamma}} - \beta_i \gamma_m \right) \right.$$

$$(c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{\tau,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) + \left( \frac{\gamma_m}{s_{\lambda,i}^{\gamma}} - \beta_i \gamma_m + \frac{\gamma}{r} \right)$$

$$(c_{\tau,i} r I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{\tau,i} r K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) + \gamma c_{\tau,i} I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})$$

$$+ \gamma c_{\tau,i} K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \Bigg]$$

$$S_{rr m,i}(r, z) = \sin \gamma_m z \left[ \kappa_{\lambda,i} (c_{\lambda,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) \right.$$

$$+ c_{\tau,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \kappa_{\tau,i} (c_{\tau,i} I(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$- \frac{\gamma}{r} \gamma_m A_{\varphi\varphi,i} \alpha_{\tau,i} (c_{\lambda,i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i})$$

$$+ c_{\tau,i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\lambda,i}))$$

$$+ \gamma_m (A_{\lambda\lambda,i} + A_{\lambda\tau,i}) \alpha_{\tau,i} - \gamma A_{\lambda\tau,i} (\lambda + \alpha_{\lambda,i}).$$

$$(c_{\tau,i} I'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i}) + c_{\tau,i} K'(\lambda, \gamma_m r / s_{\lambda,i})) \Bigg]$$

## ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌بی در پناهگاه تعجیلی

فرزاد امیری هنزا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد فیاضی\* (استادیار)

محسن امین رعایا (پژوهشگر)

دانشکده‌ی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جابج امام حسین (ع)

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۱۵-۲۵، (پژوهشی)

استفاده از بتن پارچه‌بی در ساخت پناهگاه با توجه به مزایای اقتصادی و سرعت نصب آن در حال توسعه است. توجه روزافزون به کارکرد مذکور، مستلزم مطالعه‌ی رفتار محصول در برابر بارهای وارده است و لزوم درک عمیق از مواد و اجزاء بتن پارچه‌بی باعث شناخت بهتر و امکان ارتقاء کیفیت محصول می‌شود. از این رو، خواص دو فاز، شامل پارچه و ملات که عملکرد سازه‌بی دارند، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود در مقیاس ماکرو و مزو با نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مختلف مقایسه شده است که نشان‌دهنده‌ی صحت مطالعه‌ی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف با مقاومت کششی بیشتر همزمان با افزایش مدول ینگ و سختی، عملکرد بهتری در برابر بارهای وارده دارد. پناهگاه طراحی شده، قابلیت تحمل سرباره را دارد و آن را در برابر حملات خمپاره نیز مقاوم می‌سازد. استفاده از پناهگاه بتن پارچه‌بی بدون هیچگونه سرباره نیز آن را در برابر تهدید ۵ کیلوگرمی TNT در فاصله‌ی ۳ متری مقاوم می‌سازد.

amirifarzad1000@gmail.com  
m.fayyaz@modares.ac.ir  
mohsenaminraya@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن پارچه‌بی، میان‌مقیاس، نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، پناهگاه تعجیلی.

## ۱. مقدمه

مقداری گچ با درصد‌های مختلف (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) را به سیمان کلسیم و همچنین تأثیر نرمی گچ را در خصوصیات مکانیکی محصول به صورت آزمایشگاهی ارزیابی کرده و نتیجه گرفته‌اند که با افزایش میزان گچ در سیمان کلسیم، مقاومت‌های مکانیکی بتن پارچه‌بی بهبود و زمان گیرش محصول نیز کاهش می‌یابد. به هر حال، زمانی که مقدار گچ ۳۰٪ استفاده می‌شود، یک کاهش مقاومت در محصول اتفاق می‌افتد. پارچه‌های اسپیسر<sup>۵</sup> در بسیاری از مناطق، استفاده‌های متفاوت از کاربردهای پزشکی تا کاربردهای محافظتی دارند. خصوصاً ویژگی سبب‌بندی پارچه‌های اسپیسر، فرصت‌های متفاوتی را برای برنامه‌های ویژه ارائه می‌دهند. ویژگی مقاومت در برابر فشرده‌سازی پارچه‌های اسپیسر، یکی از اصلی‌ترین خصوصیات آن‌هاست. همچنین ایشان نشان دادند که شروع ترک‌های ظاهر شده در مقاومت‌های کششی و خمشی بتن پارچه‌بی تقریباً به ترتیب ۳/۰، ۱/۳ و ۳/۴ مگاپاسکال است و بعد از پاشیدن آب بر روی بتن پارچه‌بی، وزن مخصوص بتن پارچه‌بی سخت شده حدود ۱۷۰۰-۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود.<sup>[۱]</sup>

هان و همکاران (۲۰۱۴)، خصوصیات رفتار کششی بتن پارچه‌بی (CC) را تحت ۵ پارچه‌ی سه‌بعدی مختلف با الگوهای متفاوت بررسی و گسترش ترک و منحنی کشش - تنش کششی در CC را با پوشش‌های مختلف آزمایش کردند و دریافتند که تقویت‌کننده‌ی پارچه‌بی سه‌بعدی، گزینشی بهتری نسبت به نخ‌های فاصله‌دار است. علاوه بر این نشان دادند که وزن مخصوص CC در حدود ۷۰ الی

یکی از منحصربه‌فردترین محصولات جایگزین بتن، بتن پارچه‌بی<sup>۱</sup> است. بتن پارچه‌بی یک کامپوزیت با خواص سیمانی Geo Synthetic صفحه‌بی است. در صورت بروز حوادث غیرمترقبه می‌توان با استفاده از مصالح سبک و پرکاربرد مذکور در کوتاه‌ترین زمان ممکن شرایط حیات مجدد را به مناطق بحران‌زده بازگرداند. همچنین می‌توان با اتکا به سرعت عمل و حفاظت بالای آن، در اجرای سرباره‌ها و پوشش‌های نظامی، از محصول نوین اشاره‌شده بهره برد. شرکت کانکریت کانوس<sup>۲</sup> با مسئولیت محدود در تاریخ ۱۶ اوت ۲۰۰۵ تأسیس شد، تا توسعه‌ی تجاری مفهوم پناهگاه سریع احداث را آغاز کند. در سال ۲۰۰۹، اولین محصول تجاری شرکت کانوس با نام CC یا پارچه‌ی بتنی (بتن پارچه‌بی) وارد بازار شد و در سال ۲۰۱۵، اولین محصول فرعی آن با نام بتن پارچه‌بی نفوذناپذیر<sup>۳</sup> به بازار معرفی شد.<sup>[۱]</sup> پارچه‌ی بتنی (برای اختصار CC)، یکپارچه‌ی انعطاف‌پذیر آغشته به پودر سیمان است که هنگام آبرسانی سخت می‌شود تا یک لایه‌ی بتنی نازک، با دوام و ضد آب و مقاوم در برابر آتش ایجاد کند. هان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، استفاده از سیمان کلسیم سولفور آلومیناتی را در بتن پارچه‌بی برای دستیابی به مقاومت بیشتر، گیرش سریع‌تر و بهبود خصوصیات مکانیکی محصول بررسی کرده‌اند. ایشان اضافه کردن

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59061.3022

۸۰ درصد وزن مخصوص بتن است که به دلیل تولید یک ماتریس سختی با تداخل بالا ناشی از کاهش قابل توجه سیمان داخل پارچه، بتن پارچه‌ای و مصرف زیاد آب اضافه شده است.<sup>[۳]</sup> حسین و مگوید<sup>۶</sup> (۲۰۱۶)، برای تجزیه و تحلیل ساختار دیوار حائل متشکل از بتن پارچه‌ای، از روش مدل‌سازی اجزاء محدود استفاده کرده‌اند.<sup>[۴]</sup> سیستم دیواره‌ی حائل خاک مسلح که توسط زارنبرگ<sup>۷</sup> (۱۹۹۸) توسعه داده شده است، برای مطالعه‌ی توزیع تنش و جابه‌جایی افقی مرتبط در هنگام استفاده از CC به عنوان لایه‌ی محافظ سطح استفاده شده است. رفتار بیرون‌کشیدگی انواع مختلف آرماتورها به طور قابل توجهی متفاوت بوده و بار کششی در لایه‌ی عامل تقویتی هم به تغییرات شرایط مرزی بسیار حساس است. به عنوان مثال، تغییر نوع آرماتور، شرایط خاک و پژوهش‌هایی در زمینه‌ی اندرکنش خاک و ژئوگرید تحت بارهای بیرون کشندگی انجام شده است.<sup>[۵]</sup>

به منظور مدل‌سازی عددی رفتار بتن پارچه‌ای در شرایط مختلف، شناخت ویژگی‌های مکانیکی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن پارچه‌ای ضروری است. مدل‌سازی برای تحلیل و طراحی بتن که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا موزوسکوپی (میان‌مقیاس) انجام می‌شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی سازه‌های بتن مسلح، تعیین رفتار غیرخطی است. در نرم‌افزار آباکوس برای در نظر گرفتن خرابی و همچنین تعریف رفتار غیرخطی بتن که باید در بخش خواص مصالح مشخص شود، به سه روش تعریف می‌شود: مدل ترک اندود<sup>۸</sup>، ترک شکننده<sup>۹</sup> و مدل خمیری آسیب‌دیده<sup>۱۰</sup> است. مدل خمیری آسیب‌دیده، یگانه مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شود.

در مدل خمیری آسیب‌دیده، دو فرض اصلی ترک‌خوردگی کششی و خرد شدن فشاری در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. در ترک‌خوردگی کششی در اثر کشش تک‌محوره، منحنی تنش - کرنش تا نقطه‌ی تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از نقطه‌ی تنش خرابی، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل‌مشاهده در می‌آیند که به صورت منحنی نرم‌شوندگی در فضای تنش - کرنش نمایش داده می‌شوند.<sup>[۶]</sup> لی<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، طراحی CC را با هدف ساختار مقاوم‌سازی خاک بررسی کردند و دریافتند که جابه‌جایی افقی پارچه‌ی بتنی (CC) کمی بزرگ است. همچنین مطالعات مختلفی در مورد پاسخ لوله‌های مدفون و مقاوم‌سازی مجدد آن‌ها در برابر انفجارها انجام داده و پاسخ مکانیکی خط لوله‌ی دفن شده برای انفجارهای داخلی را بررسی کرده‌اند. به منظور بررسی پاسخ فشار - تنش در خطوط لوله‌ی مدفون با فشار داخلی تحت انفجار سطح، محاسبات عددی یک لوله‌ی مدفون با فشار داخلی بررسی و پاسخ دینامیکی یک خط لوله‌ی دفن شده پس از انفجار سطح شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که بیشینه‌ی درصد تنش و کرنش خمیری در قسمت بالای خط لوله‌ی مدفون منتقل شده است.<sup>[۷]</sup>

ژانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، اولین بار رفتار مکانیکی بتن پارچه‌ای تقویت شده با FRP<sup>۱۳</sup> را به طور آزمایشی با استفاده از آزمایش‌های کششی و خمشی بررسی کردند و دریافتند که بتن پارچه‌ای تقویت شده با FRP از نظر رفتار مکانیکی، پیشرفت قابل توجهی را نشان می‌دهد. مقاومت کششی بتن پارچه‌ای با تقویت‌کننده‌ی AFRP<sup>۱۴</sup> به ۸/۷۴ مگاپاسکال در جهت تار و ۸/۷۶ مگاپاسکال در جهت پود می‌رسد که به ترتیب حدود ۶ و ۹ برابر بیشتر از بتن پارچه‌ی خالی است که مقاومت کششی آن ۱/۳۶ مگاپاسکال در جهت تار و ۰/۹۹ مگاپاسکال در جهت پود در بیشینه‌ی بار بوده است.

مقاومت خمشی بتن پارچه‌ای تقویت شده با AFRP در جهت تار برابر ۵۰/۸۶ مگاپاسکال و در جهت پود برابر ۴۲/۸۶ مگاپاسکال است که تقریباً ۲۰ برابر بیشتر از

بتن پارچه‌ی خالی است که مقاومت خمشی آن در جهت تار برابر ۲/۴ مگاپاسکال و در جهت پود برابر ۲/۱۵ مگاپاسکال بوده است.

همچنین ایشان نشان دادند که مقاومت خمشی CC با تقویت AFRP در طول جهت تار تقریباً ۱۶٪ بیشتر از اندازه‌گیری جهت پود است. در طول آزمایش کشش و خمش، از ترک‌های احتمالی به طور مؤثر جلوگیری می‌شود، زیرا صفحه‌ی الیاف AFRP تنش کششی را به پارچه‌ی اسپیسر سه‌بعدی بتن پارچه‌ی منتقل می‌کند. تقویت‌کننده‌ی FRP با توجه به پیشرفت چشمگیر خواص مکانیکی آن، اندازه‌ی کارآمد برای گسترش کاربردهای بتن پارچه‌ی را فراهم می‌کند.<sup>[۵،۷]</sup> انصاری و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که مقاومت خمشی پانل‌های بتن پارچه‌ی تقویت‌شده‌ی آلومینیومی، ۲۳ مگاپاسکال است، که حدود ۱۰ برابر بیشتر از پانل‌های بتن پارچه‌ی به تنهایی (۲/۴ مگاپاسکال) است. تقویت با ورق آلومینیوم باعث بهبودی مؤثر در خصوصیات مکانیکی پانل‌های بتن پارچه‌ی می‌شود، که به طور چشم‌گیری کاربردهای آن را گسترش می‌دهد.<sup>[۹]</sup> لی و همکاران (۲۰۱۹)، نیز بر روی استفاده از بتن پارچه‌ی برای محافظت از شیب کار کردند و نتایج خود را با استفاده از شاتکریت در محافظت از شیب‌ها مقایسه کردند و آن‌ها را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی کردند و با در نظر گرفتن مدول یانگ ۱۹۰۰۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳۵ و وزن مخصوص ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای بتن پارچه‌ی به عنوان پارامترهای ورودی در نرم‌افزار استفاده کردند و بتن پارچه‌ی را با لایه‌ی تقویت شده‌ی FRP در نرم‌افزار مدل‌سازی کردند و بیشینه‌ی تنش اعمال شده روی بتن پارچه‌ی را با توجه به ارتفاع‌های مختلف خاک (۸،۶ و ۱۰ متر) به ترتیب برابر ۵/۱۷، ۶/۶۳ و ۸/۱۶ مگاپاسکال به دست آوردند و دریافتند که توسعه‌ی مقاومت فشاری بتن پارچه‌ی بسیار سریع‌تر از شاتکریت و مقاومت فشاری نهایی آن‌ها تقریباً یکسان است. گرچه فشار کششی نهایی بتن پارچه‌ی ۲/۰ برابر بیشتر از شاتکریت است، اما مقاومت کششی ترک اولیه‌ی بتن پارچه‌ی در جهت پود مانند شاتکریت است که حدود ۵/۰ مگاپاسکال است. آرماتور ورق FRP به طور قابل توجهی مقاومت کششی را به ۹ مگاپاسکال افزایش می‌دهد و مقاومت برشی بتن پارچه‌ی و بتن پارچه‌ی تقویت‌شده با FRP می‌تواند در جهت ضخامت به ۱۰ مگاپاسکال برسد. مقاومت کششی بالا و مقاومت برشی بتن پارچه‌ی تقویت‌شده با FPR، مزایای بیشتری را به عنوان یک لایه‌ی محافظ شیب مهندسی پیش‌ساز و شرایط پیچیده‌ی زمین‌شناسی به ارمغان می‌آورد.<sup>[۱۰]</sup>

دینگ و همکاران (۲۰۲۰)، رفتار و عملکرد شیب‌های تقویت شده‌ی مختلف بتن پارچه‌ی در هنگام بارگذاری زلزله را از طریق یک سری آزمایش میز لرزش بررسی کردند و دریافتند که بتن پارچه‌ی که اخیراً توسعه یافته است، تأثیر بهتری در محدود کردن تغییر شکل شیب در طول بارگذاری لرزه‌ی نسبت به تقویت‌کننده‌ی ژئوتکسایل<sup>۱۵</sup> غیربافته دارد و استفاده از آرماتور کامپوزیت می‌تواند مقاومت لرزه‌ی شیب‌ها را بهبود بخشد.<sup>[۱۱]</sup>

ژو<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی مجموعه‌ی آزمایش‌های میز لرزان بر روی شیب‌های تقویت شده برای مطالعه‌ی ویژگی‌های دینامیکی شیب کار کردند و دریافتند که با افزایش درجه‌های شیب بتن پارچه‌ی، اثر تقویتی بهتری حاصل می‌شود و آرماتور ۳۰ درجه به سطح آستانه می‌رسد و نقطه‌ی لغزش از تاج شیب به وسط مدل تقویت شده تغییر می‌کند. ناحیه‌ی ۷/۲ پایینی شیب در هنگام زلزله نسبتاً پایدار و آرماتورها در پایین شیب بی‌اثر بوده‌اند. هنگامی که هر دو اثر تقویت‌کننده و دشواری ساخت در نظر گرفته می‌شوند، مقدار ۲۰ درجه، شیب مناسبی در شیب‌های تقویت شده با بتن پارچه‌ی است. ویژگی‌های افزایش مقاومت بتن پارچه‌ی، آن را برای کاربرد در حفاظت از شیب مناسب می‌سازد.<sup>[۱۲]</sup>

میزان مقاومت پناهگاه طراحی شده با استفاده از بتن پارچه‌یی در برابر حملات انفجاری و سرباره‌های آن در مقابل TNT، هدف مطالعه‌ی پژوهش حاضر بوده است.

## ۲. روش مطالعه

در پژوهش حاضر، از مدل رفتاری خمیری آسیب‌دیده‌ی بتنی (CDP) مطابق جدول برای شبیه‌سازی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت آنالیز خمش چهارنقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. آزمایش خمش، نوعی آزمون خواص مکانیکی مواد است که در آن مقاومت قطعه در برابر خم‌شدگی سنجیده می‌شود. آزمایش خمش چهارنقطه‌یی همانند آزمون خمش سه‌نقطه‌یی است، با این تفاوت که به جای یک سمبه از دو سمبه جهت اعمال نیرو استفاده می‌شود، که فاصله‌ی سمبه‌ها از دو طرف با تکیه‌گاه‌های نزدیک خود برابر است. بیشترین یا بیشینه تنش خمشی در سندان بارگذاری در آزمون‌های خمشی در آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی رخ می‌دهد. در آزمون‌های خمش چهارنقطه‌یی، بیشینه تنش خمشی بر روی بخش تیر بین نقاط بارگذاری پخش می‌شود. همچنین، در مواردی که مواد یکدست هستند، مانند مواد پلاستیکی، آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی بهترین کارایی را دارد؛ در صورتی که مواد یکدست نباشند، مانند مواد کامپوزیتی، آزمایش خمش چهارنقطه‌یی بهترین کارایی را دارد. تمرکز تنش در یک آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی کوچک و در مرکز جسم تحت بارگذاری متمرکز است، در حالی که تمرکز تنش در یک آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در یک ناحیه‌ی بزرگ‌تر است و از شکست زودرس جلوگیری می‌کند، با توجه به اینکه بتن پارچه‌یی خواص مواد کامپوزیت را دارد. به همین جهت در پژوهش حاضر، از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی استفاده شده است. آزمایش خمش چهارنقطه‌یی بتن پارچه‌یی توسط دستگاه کشش ۲ تن، SANTAM-STM۲۰ در آزمایشگاه علوم رازی انجام شده است (شکل ۱).

عملکرد دستگاه مذکور به صورت سروالکترونیکال بوده و جهت کنترل بار از بازخورد Load cell و جابه‌جایی دقیق فک‌ها استفاده می‌کند. با به‌کار بردن موتور و دیوارسرو به عنوان محرک، دقت کنترل افزایش پیدا کرده و با بهره‌گیری از بازخورد از Encoder، انجام آزمایش در بازه‌ی گسترده‌یی از سرعت با دقت بالا (۱/۰۰۰-۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) انجام پذیر است. با توجه به اینکه استاندارد BS EN ۱۲۴۶۷ در برگه‌ی اطلاعات شرکت تولیدکننده‌ی بتن پارچه‌یی خارجی موجود بود و همچنین استاندارد مذکور، یک استاندارد بسیار کامل و دقیق از نمونه‌های Fiber Cement Sheet است، برای آزمایش خمش به استاندارد ذکر شده استناد شده است. روش آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در آزمایشگاه بدین صورت بوده است که در ابتدا نمونه‌های



شکل ۱. دستگاه خمش چهارنقطه‌یی.

جان<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، اخیراً بر روی تقویت بتن پارچه‌یی کار کرده و دریافته‌اند که بتن پارچه‌یی، کاربردی گسترده و پتانسیل کاربردی بسیار زیادی در حفاظت از چادرها و پناهگاه‌های اضطراری، تعمیر اضطراری و ساخت روسازی فرودگاه، تعمیر اضطراری و ساخت پروژه‌های موقعیتی و سایر مهندسی‌های اضطراری دارد. با این حال، مقاومت فشاری CC، استحکام خمشی، مقاومت در برابر سایش، و عملکرد ضدنفوذ هنوز نیاز به بهبود دارد. برای دستیابی به هدف اخیر، می‌توان این تلاش‌ها را انجام داد: اصلاح مواد سازنده‌ی بتن پارچه‌یی، تقویت بتن پارچه‌یی توسط FRP با پیوند خارجی.<sup>[۱۳]</sup>

هادی جعفری و همکاران (۲۰۲۰)، بتن پارچه‌یی را به صورت المان Shell در نظر گرفتند و برای محافظت از لوله‌های مدفون آن را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، به صورت ماکرو شبیه‌سازی کردند و تأثیر بتن پارچه‌یی در پاسخ خطوط لوله‌ی فولادی مدفون را تحت نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند و همچنین بیشینه تنش‌های خطوط لوله‌ی مدفون برای حالت‌هایی که ضخامت بتن پارچه‌یی آن‌ها ۲۰ میلی‌متر است، را ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد لایه‌های بتن پارچه‌یی، تنش ناشی از بارگذاری انفجار سطح در دیواره‌های خطوط لوله‌ی دفن‌شده در بیشتر موارد کاهش یافته است.<sup>[۱۴]</sup>

شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بر روی بتن پارچه‌یی توسط پژوهشگران اکثراً در مقیاس ماکرو بودند و این خلأ در زمینه‌ی شبیه‌سازی مزو بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار اجزاء محدود مشاهده می‌شد؛ در همین راستا، در مطالعه‌ی حاضر، به شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو پرداخته شده و با نتایج شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در حالت ماکرو مقایسه صورت گرفته است. در مدل ماکرو ارائه شده سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات و امکان استفاده‌ی وسیع‌تر، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. استفاده از روش ماکرو، به دلیل کاهش حجم بالای محاسبات نسبت به مدل مزو مقرون به صرفه است و می‌تواند به صورت گسترده استفاده شوند. در ضمن، گزینش مدل کلی مناسب برای اتصال، شامل: اجزاء مختلف، پیکربندی، و ارتباط اجزا و همچنین انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر یک از اجزاء مدل برگزیده که جهت حصول نتایج با دقت قابل قبول ضروری است، در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است. اما این نکته نباید فراموش شود که استفاده از روش مزو، قابل اتکاتر است و نتایج را به دقت بالاتری ارائه می‌کند. بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو به صورت محدود و آن‌هم فقط به صورت المان shell مدل شده است و چندان دقیق نیست. در ابتدا، برای ارائه‌ی مدل رفتاری خمیری آسیب‌دیده‌ی بتنی (CDP) برای شبیه‌سازی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار آباکوس به صورت ماکرو بوده و با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه مقایسه شده است. همچنین به بررسی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در آزمایشگاه و در نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است. در مرحله‌ی بعد، بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو شبیه‌سازی شده و به صورت ماده‌ی دو فازی در نظر گرفته شده و با نتایج به دست آمده از مدل ماکرو بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است. سپس با استفاده از مدل ماکرو به دست آمده، سازه‌هایی که در آن‌ها از بتن پارچه‌یی استفاده شده است، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده از خروجی نرم‌افزار مذکور با نتایج آزمایش میدانی مقایسه شده‌اند. در نهایت، به بررسی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت انفجار در هوای آزاد پرداخته شده است. لذا، به دست آوردن: (۱) بیشینه‌ی جابه‌جایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت بار خمش چهارنقطه‌یی؛ (۲) پارامترهای تخریب انفجاری در مدل ایجاد شده با استفاده از بتن پارچه‌یی؛ و (۳)

جدول ۱. مشخصات CDP داده شده به بتن پارچه‌ای.

°/۰۰۱	Viscosity Parameter
°/۶۶۷	K
۱/۱۶	$Fb_0/Fc_0$ (پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک‌محوره)
°/۱	Eccentricity (پتانسیل خروج از مرکزیت خمیری)
۳°	Dilation Angle (زاویه‌ی اتساع)

پتانسیل خروج از مرکزیت خمیری: عدد کوچک مثبتی است که مساوی نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن است که برای بتن پارچه‌ای ۱/۱° در نظر گرفته شده است.

پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک‌محوره: پارامتر ذکر شده، مشخصات تابع گسیختگی را بیان می‌کند، که برای بتن پارچه‌ای ۱/۱۶ در نظر گرفته شده است. [۱۵]  
پارامتر  $K_c$ : در مدل خمیری آسیب‌دیده برای بتن، مقدار پیش‌فرض ضرب ۰/۶۶۷ است، که براساس آزمایش‌های فشاری سه‌محوره و تحلیل‌های عددی پیشنهاد شده است، که برای بتن پارچه‌ای همان مقدار اخیر در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو در نرم‌افزار، در ابتدا یک جسم Solid به ابعاد ۱۳×۸۰×۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و مشخصات فشاری و کششی نمونه‌ی بتن پارچه‌ای به‌دست آمده در آزمایشگاه به جسم ترسیم شده مطابق شکل ۲، اختصاص یافته است. سپس فک‌های واردکننده‌ی بار در مدل به قطر ۲۰ رسم شده است. فاصله‌ی بین فک‌های بالایی برابر ۹۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های ثابت پایین، ۲۷۰ میلی‌متر بوده است (مطابق شکل ۳). به فک‌های بالایی فقط جابه‌جایی در راستای عمود بر نمونه و به میزان ۱۰ میلی‌متر داده شده است و برای اینکه فقط عملکرد خود بتن پارچه‌ای بررسی شود و برش پانچ صورت نگیرد، اتصال‌های دو طرف نمونه به صورت مفصل (جابه‌جایی‌ها در راستاهای اصلی برابر صفر) در نظر گرفته شده است. و در وسط فک‌ها، Partition زده شد تا نمونه دارای شبکه‌بندی یا Mesh با کیفیت‌تری شود.

برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌ای در مقیاس مزو در نرم‌افزار آباکوس، بتن پارچه‌ای به‌صورت دوفازی (بتن و پارچه) در نظر گرفته شده است. بدین‌صورت که ماده‌ی ملات با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال به‌صورت یک‌فاز و پارچه‌ی تهیه شده از نخ FDY به‌صورت یک فاز دیگر در نظر گرفته شده است (شکل ۴) که نمودار استحکام کششی نخ به آن داده شده است. اتصال بین پارچه و ملات به‌صورت tie در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی بتن پارچه‌ای مطابق قبل، تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و به فک جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر داده شده است. سپس نمودار نیرو - جابه‌جایی ترسیم و با نمودار نیرو - جابه‌جایی مدل ماکرو مقایسه شده است.

-- تفاوت دو روش ماکرو و مزو و دلایل استفاده از هر کدام: مدل‌سازی برای تحلیل و طراحی بتن، که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا موزوسکوپی (میان‌مقیاس) انجام می‌شود. در بررسی ماکروسکوپی، که رایج‌ترین شیوه‌ی مدل‌سازی بتن است، تمامی بتن به‌صورت تک فاز، شامل خمیر سیمان، مدل‌سازی می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی، هر یک از فازها با عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، نظیر کریستال‌های سیمان و سنگدانه‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. به‌دلیل افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات و نیاز به رایانه‌هایی با ظرفیت‌های خیلی بالا، مدل‌سازی اخیر فقط برای موارد خاص یا دوفازه‌ی (ITZ) بتن به عنوان یک ماده‌ی ناهمگن سه فاز،

بتن پارچه‌ای در ابعاد ۸۰×۳۰ میلی‌متر با ضخامت ۱۳ میلی‌متر در آزمایشگاه دانشگاه در قالب‌های چوبی با همین ابعاد ساخته و پس از ۱۰ روز از قالب خارج شده‌اند. دستگاه خمشی چهارنقطه‌ای، شامل چهار فک مطابق شکل ۱ است که دو فک پایین ثابت دارد که فاصله‌ی بین آن‌ها ۳۰ میلی‌متر است. فک‌هایی بالایی با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه جابه‌جایی دارند و به سمت پایین حرکت می‌کنند. قطر فک‌هایی که به نمونه نیرو وارد می‌کنند، برابر ۲۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های بالایی ۹۰ میلی‌متر است و دستگاه خمشی چهارنقطه‌ای مجهز به حسگر LVDT<sup>۱۸</sup> برای ترسیم لحظه‌ای نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه است.

## -- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها:

ابعاد نمونه‌ها و طول آزمایش باید به گونه‌ای باشند که:

- نسبت دهانه/ضخامت اسمی بیشتر از یا برابر با ۱۵ باشد.
  - نسبت دهانه/انحراف در هنگام بارگی بیشتر از یا برابر با ۲۰ باشد.
  - طول نمونه‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با مقدار دهانه به علاوه ۴۰ میلی‌متر باشد.
  - عرض نمونه‌ها از ۵ برابر ضخامت اسمی نمونه‌ها بیشتر یا مساوی باشد.
  - نمونه‌ها ممکن است مربع یا مستطیل باشند.
  - ابعاد ترجیحی نمونه‌ها ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر باشد.
- طول دهانه‌ی ترجیحی ۲۰۰ میلی‌متر باشد.
- در مواردی که ابعاد و دهانه‌ی ترجیحی دارای شرایط a تا d نباشند، ابعاد و دهانه طوری تنظیم شود که شرایط ذکر شده برآورده شود.
- ابعاد نمونه‌ها و دهانه‌ی آزمایش ممکن است از مقادیر ترجیحی تغییر یابند، به شرط آنکه شرایط a تا d برآورده شود.

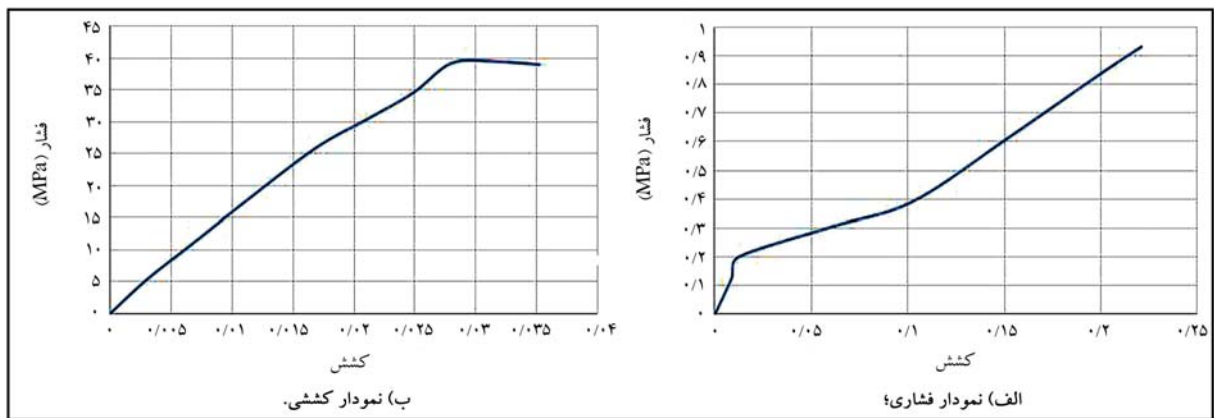
به دلیل ایجاد شرایط دقیق آزمایشگاهی و وجوب همگنی بین نمونه‌های مختلف و همچنین جلوگیری از تأثیر غیریک‌نواخت بودن نمونه در لبه‌های نمونه‌ی بتن پارچه‌ای، نمونه‌برداری باید شرایط ویژه‌ی داشته باشد، که در ادامه توضیح داده شده است: برای صفحات با ابعاد کوچک، ۵ صفحه‌ی نمونه به‌صورت تصادفی گرفته می‌شود. برای صفحه‌های کوچک‌تر از ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر، کل صفحه‌ها آزمایش می‌شوند. برای صفحه‌های بزرگ‌تر، یک نمونه‌ی آزمایش مربع ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر از هر صفحه برش داده می‌شود. قطعه‌ی آزمایش به صورت صحیح در برابر تکیه‌گاه‌ها تنظیم و با استفاده از میله‌ی بارگذاری مرکزی بارگذاری می‌شود.

نمونه باید طوری بارگذاری شود که شکستگی در ۱۰ و ۳۰ ثانیه رخ دهد. نرخ ثابت کرنش ترجیح داده می‌شود. در صورت عدم امکان تهیه‌ی لوازم ذکر شده، بار ثابت بارگذاری قابل قبول است. برای نمونه‌های بدون بافت، ضخامت در دو نقطه، قبل از شکستن در امتداد خط بارگیری یا بعد از شکستن در امتداد لبه‌ی شکسته، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود.

صفحات با ابعاد بزرگ، نمونه‌های آزمایش از همان قسمت صفحه بریده می‌شوند. طرح‌های برش دیگر ممکن است استفاده شود، به شرطی که تعداد مساوی از نمونه‌ها از برش عمود و موازی با جهت تولید باشد. پارامترهای استفاده شده در مدل CDP برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای بتن پارچه‌ای طبق جدول ۱ استخراج شده‌اند.

زاویه‌ی اتساع ( $\Psi$ ): زاویه‌ی اتساع کرنش خمیری در اثر برش را در فاز بعد از کشسان تعریف می‌کند. هنگامی که  $\Psi = 0^\circ$  باشد، ماده هیچ‌گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. زاویه‌ی اتساع برای بتن پارچه‌ای ۳° در نظر گرفته شده است.

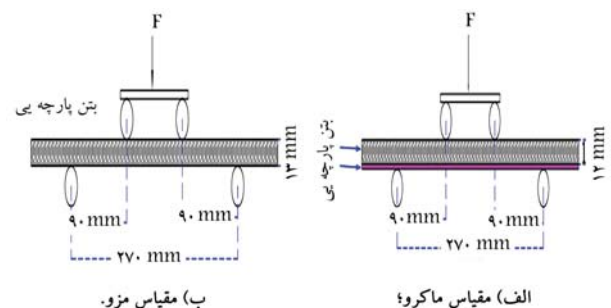




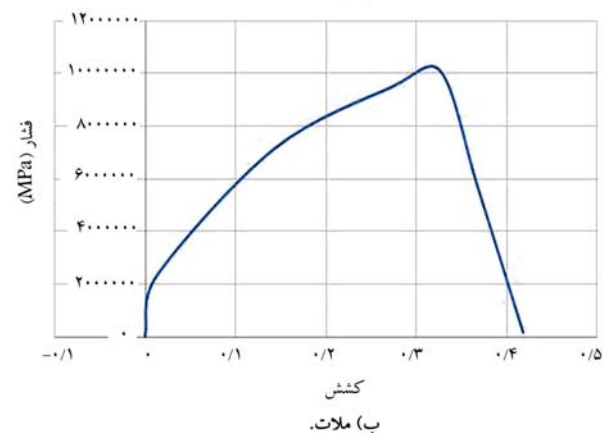
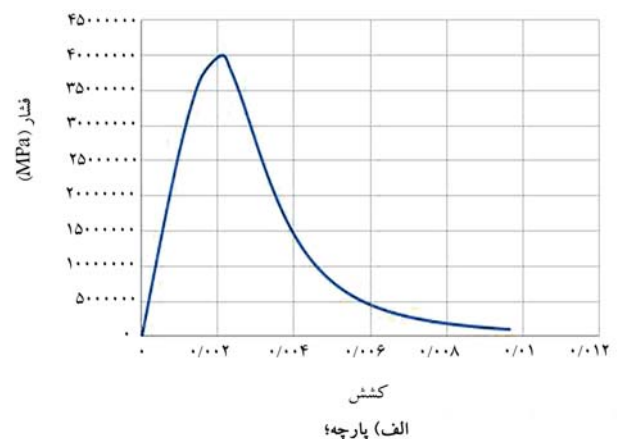
شکل ۲. مشخصات داده شده به بتن پارچه‌بی در حالت ماکرو.

مشمول بر: سنگدانه، خمیرسیمان و ناحیه‌ی انتقال انجام می‌شود. میان‌مقیاس مشمول بر سنگدانه و خمیرسیمان در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل بتن در میان‌مقیاس می‌تواند صفت‌های بتن غیرمسلح را به خوبی نشان دهد. برای دستیابی به درک عمیق‌تر، مطالعات نظری مبتنی بر تجزیه و تحلیل روی ساختار ریزمکانیکی، برهم‌کنش بین اجزاء مختلف بتن برای استنباط رفتار سازنده‌ی میکروسکوپی بتن توسعه یافته است. با این حال، ساختار موضوعی و خصوصیات تک‌تک اجزاء بتن و آثار آن‌ها در رفتار مواد میکروسکوپی در نظر گرفته نمی‌شود. برای اینکه چنین جزئیاتی در تحلیل محاسباتی گنجانده شود، نیاز است که بتن به عنوان یک ماده‌ی ترکیبی چندمقیاس، که در آن ریزساختارها واقعاً شبیه‌سازی شده‌اند، تجزیه و تحلیل شود. شبیه‌سازی‌های عددی، همراه با تئوری و آزمایش، ابزاری فوق‌العاده مهم برای موفقیت در بررسی خواص مواد با استفاده از علم مواد محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند. در شبیه‌سازی عددی بتن در سطح میکروسکوپی، مشخص است که چندین پارامتر، مانند: شکل، اندازه و توزیع سنگ‌دانه‌های درشت درون ماتریس ملات به‌طور قابل‌توجهی در رفتار مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند.

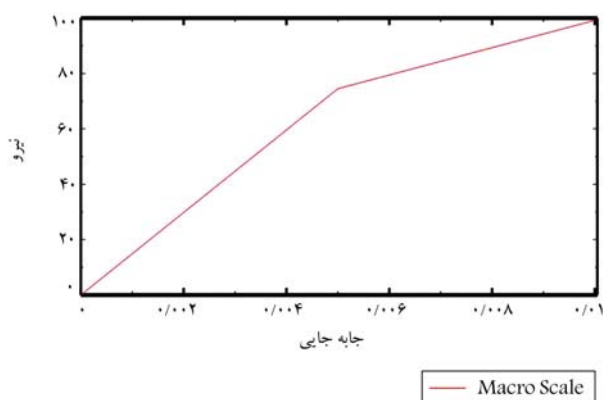
در مدل ماکرو ارائه شده سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات و امکان استفاده‌ی وسیع‌تر، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. استفاده از روش ماکرو، به دلیل کاهش حجم بالای محاسبات نسبت به مدل مزو مقرون به صرفه است و می‌تواند به صورت گسترده استفاده شوند. در ضمن گزینش مدل کلی مناسب برای اتصال، شامل: اجزاء مختلف، پی‌کربندی و ارتباط اجزاء و همچنین انتخاب مدل رفتاری مناسب برای هر یک از اجزاء مدل برگزیده که جهت حصول نتایج با دقت قابل قبول ضروری است، در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است. اما این نکته نباید فراموش شود که استفاده از روش مزو قابل انکاتر است و نتایج را با دقت بالاتری ارائه می‌کند. در شبیه‌سازی مذکور، نمودارهای فشاری و کششی بتن پارچه‌بی به دست آمده از آزمایشگاه و نتایج پژوهشگران، به عنوان ورودی نرم‌افزار در نظر گرفته شده و نمونه‌ی بتن پارچه‌بی به صورت خمش چهارنقطه‌ی شبیه‌سازی شده است. در نهایت نمودار نیرو - جابه‌جایی به عنوان خروجی نرم‌افزار، در یک مرحله به صورت دوخطی ترسیم شده و در مرحله‌ی بعد، ترک‌ها و شکستگی‌های نمونه، در نمودار به دست آمده لحاظ شده است. در پژوهش حاضر، برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب، روش‌ها و ابعاد مختلف شبکه‌بندی بررسی شده و متناسب با هر مرحله، نمودار نیرو - جابه‌جایی ترسیم و در نهایت نمودارهای به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند. بنابراین برای مشاهده‌ی محل شکستگی‌ها (صعود و سقوط‌ها) در نمودار نیرو -



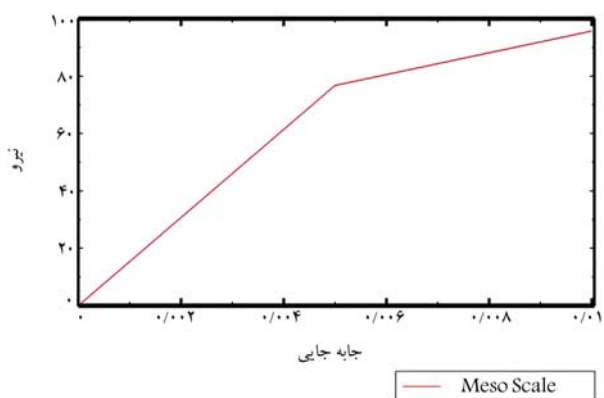
شکل ۳. فاصله‌ی بین اجزا در حالت شبیه‌سازی خمش چهارنقطه‌بی.



شکل ۴. مشخصات داده شده به بتن پارچه‌بی در حالت مزو.



شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو تحت خمش چهارنقطه‌ای.



شکل ۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی به دست آمده‌ی بتن پارچه‌ای در حالت شبیه‌سازی در مقیاس مزو.

نیرو - جابه‌جایی ارائه‌شده توسط ژانگ و همکارانش، بر مبنای مقاومت خمشی - جابه‌جایی ترسیم شده است، با توجه به رابطه‌ی ۱، نمودار نیرو - جابه‌جایی تبدیل به نمودار مقاومت خمشی - جابه‌جایی شده است.

$$MOR = \frac{FL}{bh^2} \quad (1)$$

که در آن، مقاومت خمشی نهایی<sup>۱۹</sup> به دست آمده است؛  $L$  طول کل نمونه مساوی ۴۰۰ میلی‌متر،  $b$  عرض نمونه مساوی ۸۰ میلی‌متر،  $h$  ضخامت نمونه مساوی ۱۳ میلی‌متر است و از طریق رابطه‌ی ۱، مقدار نیرو بر حسب کیلونیوتن محاسبه شده است. با توجه به شکل ۶، مقدار پیشینه‌ی نیرو برای بتن پارچه‌ای، ۱۰۰ کیلونیوتن به دست آمده است. با توجه به رابطه‌ی ۱، مقدار مقاومت خمشی نهایی برای بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو، ۲ مگاپاسکال به دست آمده است که مقدار اخیر در پژوهش ژانگ طبق جدول ۲ معادل  $2/15 \pm 0/09$  مگاپاسکال به دست آمده و نتیجه‌ی به دست آمده در نرم‌افزار آباکوس، میزان خطای ۰/۰۶٪ را نشان داده است.

#### ۴. راستی‌آزمایی مدل بتن پارچه‌ای شبیه‌سازی شده در

##### مقیاس مزو

پس از پایان تحلیل نمودار نیرو - جابه‌جایی استخراج شده در حالت مزو (شکل ۷) با نتایج حالت ماکرو و نتایج آزمایشگاه علوم رازی (شکل ۸) مقایسه و نتیجه‌گیری



شکل ۵. پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌ای.

جابه‌جایی، نیاز به شبیه‌سازی بتن پارچه‌ای در مقیاس مزو است و نتایج اخیر در شبیه‌سازی ماکرو قابل رؤیت نیستند. همچنین برای تقویت بتن پارچه‌ای در برابر بارهای دینامیکی و اضافه کردن مواد افزودنی برای تقویت خواص بتن پارچه‌ای، شبیه‌سازی بتن پارچه‌ای در مقیاس مزو الزام و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. پناهگاه تعجیلی مطابق استاندارد نمونه‌ی خارجی مطابق شکل ۵الف، با ابعاد: طول ۶/۲۴ متر و ارتفاع قوس ورودی ۲/۳۵ متر در محیط نرم‌افزار ترسیم شده است. در انتها، برای شبیه‌سازی پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌ای مطابق شکل ۵ب در نرم‌افزار آباکوس، پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌ای تحت وزن خود و بار گسترده‌ی خاک مطابق شکل ۵ج، شبیه‌سازی و نتایج تنش و جابه‌جایی برای سازه محاسبه شده است. لذا سازه به صورت قوس در نظر گرفته شده است که طراحی سازه‌های به شکل قوس، باعث پخش قدرت انفجار در سطح بیشتری از خاک می‌شود که موجب کاهش انتقال نیرو به سازه‌ی مورد مطالعه می‌شود. بنابراین درجه ایمنی سازه‌های مذکور به لحاظ عملکرد در برابر بار انفجار به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت و برای افزایش ممان اینرسی مقطع شکل به پناهگاه تعجیلی مدنظر، چین‌خوردگی‌هایی با ارتفاع ۶ سانتی‌متر داده شده است، لذا با افزایش ممان اینرسی مقطع، تنش و تغییرشکل خمشی مقطع کاهش یافته و فاصله‌ی بین هر دو چین متوالی ۳۵/۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از آنجا که طول هر رول بتن پارچه‌ای ۱۱۰ سانتی‌متر و طول مستقیم هر رول بتن پارچه‌ای با چین‌خوردگی‌های داده شده به آن ۷۸ سانتی‌متر است، پس در شبیه‌سازی انجام شده از ۸ رول بتن پارچه‌ای استفاده شده است، تا طول موردنظر سازه به دست آید. برای بررسی عملکرد تخریب کششی بتن پارچه‌ای، نمونه‌ی با ضخامت ۱۳ میلی‌متر در مقابل بار انفجار شبیه‌سازی شده و با توجه به مطالعات صورت‌گرفته توسط پژوهشگران روی نمونه‌ی خارجی، بتن پارچه‌ای با ابعاد  $100 \times 100$  سانتی‌متر در برابر ۵ کیلوگرم ماده‌ی منفجره‌ی TNT در فاصله‌ی ۳ متر قرار گرفته است.

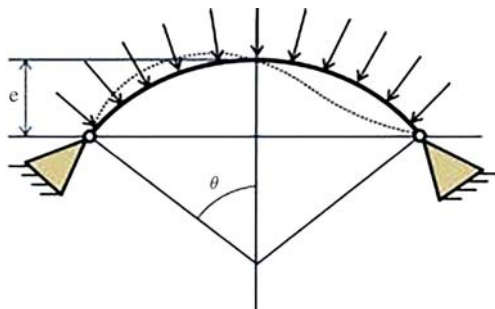
#### ۳. راستی‌آزمایی مدل بتن پارچه‌ای شبیه‌سازی شده در

##### مقیاس ماکرو

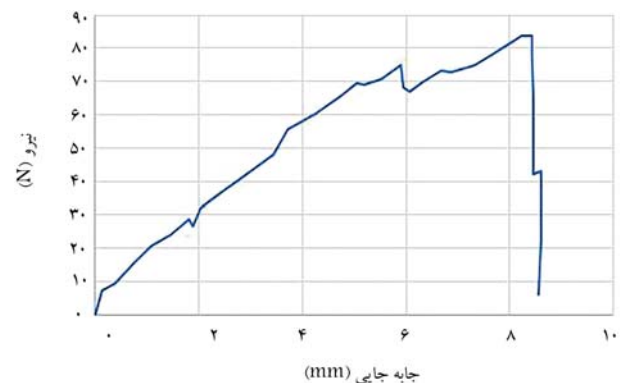
نمودار خمش چهارنقطه‌ای بتن پارچه‌ای انتخاب شده با توجه به انتخاب اندازه شبکه‌بندی ۰/۰۲۵ متر و در نظر گرفتن زمان تحلیل یک ثانیه، با نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از نتایج مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۸]</sup>، مقایسه و مشاهده شده است، که نتایج بسیار به هم نزدیک و قابل قبول بوده است؛ و چون نمودار

جدول ۲. محاسبه‌ی مقاومت خمشی نمونه‌ی بتن پارچه‌ی طبق پژوهش ژانگ و همکاران.

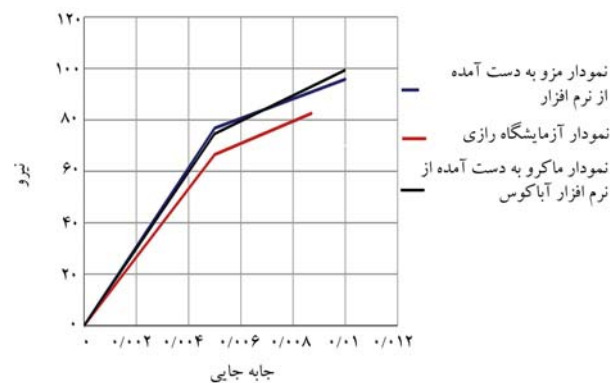
CCs				خمش
مقدار کشش در ترک اولیه				مقاومت خمشی نهایی
ترک اولیه (mm)				مدول یانگ معادل (MPa)
ترک (%)				
۰/۰۹ ± ۰/۰۲	۰/۹۶ ± ۰/۲۴	۲/۴۰ ± ۰/۲۶	۲/۳۹ ± ۰/۲۷	بتن پارچه‌ی در جهت تار-CC
۰/۱۰ ± ۰/۰۱	۱/۰۶ ± ۰/۰۶	۲/۱۵ ± ۰/۰۹	۲/۱۰ ± ۰/۰۳	بتن پارچه‌ی در جهت پود-CC
۱/۷۲ ± ۰/۲۳	۱۷/۸۹ ± ۲/۳۹	۵۰/۸۶ ± ۰/۹۹	۲/۹۸ ± ۰/۳۹	بتن پارچه‌ی تقویت شده در جهت تار-CC-AF
۱/۷۹ ± ۰/۱۹	۱۸/۴۷ ± ۱/۹۴	۴۲/۸۶ ± ۴/۶۱	۲/۴۰ ± ۰/۲۲	بتن پارچه‌ی تقویت شده در جهت پود-CC-AF



شکل ۱۰. مود کمانشی برای تیر قوسی دایروی.



شکل ۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی گرفته شده از آزمایشگاه رازی.



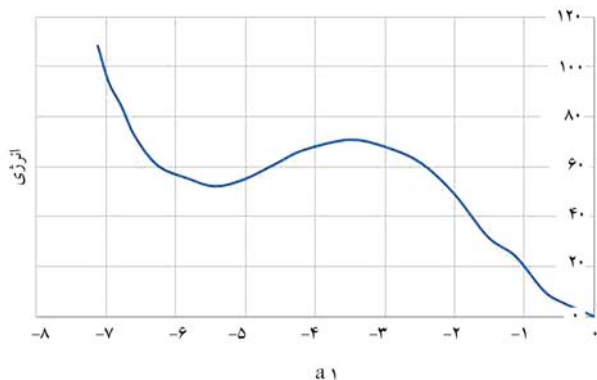
شکل ۹. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی بتن پارچه‌ی در مقیاس مزو و ماکرو و نتایج آزمایشگاهی.

شد که نمودارها از لحاظ ساختار و دوخطی بودن، شبیه هم‌دیگر هستند و فقط در مشخصات ملات و پارچه‌ی استفاده شده تفاوت دارند؛ چون مشخصات پارچه‌ی نمونه‌ی داخلی و مشخصات پارچه در نرم‌افزار با هم تفاوت دارند که همین امر باعث ایجاد تفاوت شده است؛ ولی از لحاظ ساختار نمودار، شباهت بسیار زیاد و قانع‌کننده‌ی وجود دارد و تفاوت اصلی به دلیل سختی ماده‌ی بتن در هر دو حالت است و حالت کشسانی بتن، تأثیر بسیار زیادی دارد و همچنین نتیجه گرفته شد که نتایج حالت مزو با نتایج آزمایشگاه، اختلاف کمتری دارد و مدل‌سازی بتن پارچه‌ی در حالت مزو نسبت به ماکرو، دقت بالاتری دارد. محل شکستگی نمودارها تقریباً در جابه‌جایی ۵/۰۰ متر رخ داده است. همچنین میزان بار قابل تحمل در مدل‌سازی مزو تقریباً ۹۰ کیلو نیوتن است که این مقدار برای مدل ماکرو تقریباً ۱۰۰ نیوتن و برای آزمایش آزمایشگاهی معادل ۸۲/۵ نیوتن به دست آمده است (شکل ۹).

## ۵. بررسی پدیده‌ی فروجهش ناگهانی

تیر قوسی کم‌عمق، یک المان سازه‌ی مهم در کاربرد بناهای مهندسی راه و ساختمان، مهندسی مکانیک، و هوافضا است. مشخصه‌ی مهم تیرهای قوسی کم‌عمق تحت بارگذاری جانبی، ناپایداری آن‌ها در برابر نیروهای بحرانی است که در اثر آن سازه دستخوش یک جابه‌جایی بزرگ ناگهانی به‌سوی یک ساختار تعادلی جدید می‌شود که اصطلاحاً فروجهش نامیده می‌شود. با معرفی مواد مدرج تابعی و ترکیب آن با بحث تیرهای قوسی، نتایج جالبی حاصل می‌شود که می‌توان سازه‌هایی را با مشخصات پایداری مطلوبی برای شرایط خاص ایجاد کرد. مسئله‌ی بحرانی در رفتار تیرهای قوسی کم‌عمق تحت بارهای جانبی، ناپایداری هندسه‌ی آن‌هاست که می‌تواند منجر به تخریب سازه یا جابه‌جایی‌های بیش از حد شود. در واقع، اگر میزان نیروی فشاری درونی تیرهای قوسی به بیش از مقدار حدی برسد، در این صورت سازه دستخوش یک جابه‌جایی بزرگ ناگهانی به‌سوی ساختار تعادلی جدیدی می‌شود. این پدیده می‌تواند هم مطلوب باشد (تغییر وضعیت سوئیچ) و هم خطرناک (فروپاشی یک گنبد یا خرپا). به‌طور کلی دو حالت برای کمانش تیرهای قوسی وجود دارد:

۱. اگر مرتبه‌ی ارتفاع اولیه‌ی تیر قوسی با فاصله‌ی دو تکیه‌گاه تیر قوسی یکسان باشد (شکل ۱۰)، این امکان برای تیر قوسی وجود دارد که تحت فشار بحرانی در مود نشان داده شده (نقطه‌چین) کمانش کند. برای نمونه، تیرهای قوسی دایروی تحت نیروی عرضی گسترده‌ی غیریکنواخت با انواع گوناگون تکیه‌گاه‌ها می‌تواند برای مدل اخیر در نظر گرفته شود.
۲. اگر ارتفاع اولیه‌ی یک تیر قوسی شکل بسیار کوچک‌تر از فاصله‌ی دو تکیه‌گاه آن باشد، در این صورت تیر قوسی، کم‌عمق نامیده می‌شود (شکل ۱۱) و نیروی محوری که به دلیل ثابت بودن دو انتهای تیر ایجاد می‌شود، نقش مهمی را در پایداری کشسانی ایفا می‌کند. تیر ممکن است ناپایدار شود و به‌طور ناگهانی معکوس انحنای اولیه شود که تغییر انحنای خط ممند به خط نقطه‌چین بیانگر پدیده‌ی مذکور است (شکل ۱۱).



شکل ۱۲. نمودار تابع انرژی بر حسب  $a/d$ .

است: اگر سیستم معادلات حرکت دارای بیش از یک ساختار تعادلی پایدار باشد، یک ساختار تعادلی بهینه در میان آن‌ها وجود دارد که کمترین میزان انرژی را دارد و ساختار تعادلی ذاتی نامیده می‌شود که در اینجا همان نقطه‌ی  $p^0$  است. اگر سیستم تحت تأثیر یک اختلال اولیه یا اعمال نیرویی (ضربه‌یی) قرار گیرد، سیستم در نهایت به حالت تعادلی مرجع خود میل خواهد کرد و گفته می‌شود که سیستم در مقابل پدیده‌ی فروجهش دینامیکی پایدار است. اما اگر اختلال یا نیروی اعمال شده به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، سیستم ممکن است در نهایت به یک ساختار تعادلی پایدار دیگری که متفاوت از این حالت مرجع است، جهش کند و این جهش‌های بین ساختارهای تعادلی، ناپایداری فروجهش نامیده می‌شود. برای اینکه این نوع مفهوم پایداری به‌طور فیزیکی مشهود باشد، حالت تعادلی مرجع الزاماً باید یک حالت پایدار موضعی باشد و برای تعیین نیروی بحرانی از تابع لیپانوف استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۲):

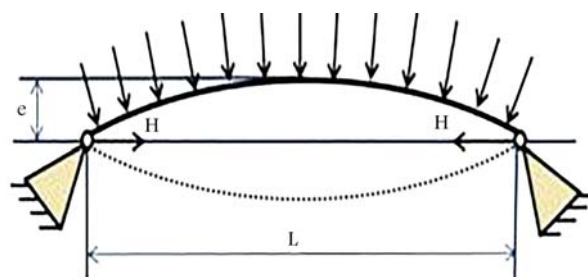
$$V(C) = \Pi(C) - \Pi(p^0) \quad (2)$$

مطالعه‌ی توزیع نقاط  $p^0$  تعادل در فضای حالت مرتبط با سطوح تراز  $V(C)$  حول نقطه‌ی تعادلی ذاتی  $p^0$  برای تیر قوسی کم‌عمق منجر به این نتایج درباره‌ی نقطه‌ی بحرانی  $p^*$  خواهد شد:

۱. به ازاء  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots$ ، فقط یک ساختار تعادلی موضعی  $P^0$  وجود دارد و  $p^*$  در بازه‌ی اخیر وجود ندارد و بنابراین مهم نیست که نیرو چه اندازه بزرگ باشد، تیر قوسی در برابر پدیده‌ی فروجهش پایدار است و نیروی بحرانی می‌تواند هر مقداری داشته باشد.

۲. به ازاء  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots$ ، سه نقطه‌ی بحرانی وجود دارد:  $p^0$ ،  $p^1$  و  $p^2$  با استفاده از نمودار انرژی بر حسب  $a/d$  در شکل ۱۲ (سایر مقادیر  $n = 3, 2, \dots$  صفر است) مشخص است که اولین نقطه‌ی بحرانی که بسط سطح تراز  $V(C)$  حول  $p^0$  برخورد می‌کند، نقطه‌ی بحرانی  $p^1$  است، پس  $p^*$  است.

مرز ناحیه‌ی پایدار در مقابل پدیده‌ی فروجهش ناگهانی تیر قوسی کم‌عمق، برای مواد همگن برابر عدد ثابت  $\lambda a = 2$  است و مقدار عمق اولیه‌ی آن نیز از رابطه‌ی  $e$  به‌دست می‌آید. این مرز برای مواد مدرج تابعی برابر  $\lambda a = 2(D/B)^{1/2}$  است و رابطه‌ی عمق اولیه‌ی تیر قوسی نیز برابر  $e = f_{ra}$  خواهد بود که متناسب با شعاع ژیراسیون سفتی است و مقدار بیشینه یا کمینه‌ی  $\lambda a$  با بیشینه یا کمینه‌ی مقدار توزیع سفتی ارتباطی ندارد. با به کارگیری ساختار مدرج تابعی در تیرهای قوسی کم‌عمق، برخلاف حالت همگن، دامنه‌ی برای  $\lambda a$  وجود دارد که برای طراح این امکان را فراهم



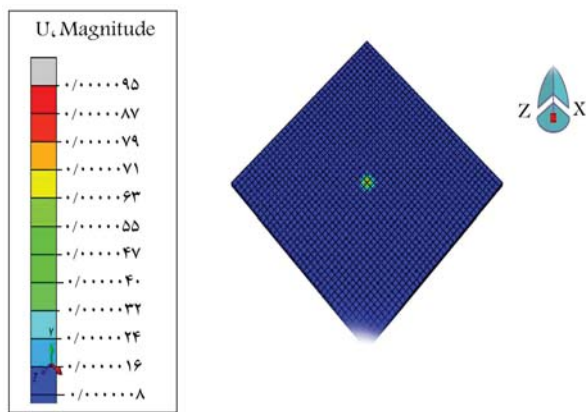
شکل ۱۱. مود کمانشی برای تیر قوسی کم‌عمق.

پارامتر نیرویی که تغییری زیاد در پاسخ ایجاد کند، نیروی بحرانی نامیده می‌شود. پس از تخطی نیرو از سطح نیرویی بحرانی، تیر قوسی کم‌عمق به‌طور ناگهانی از یک حالت تعادلی پایدار به یک ساختار تعادلی پایدار غیرمجاور آن جهش می‌کند. این پدیده‌ی ناپایدار، فروجهش نامیده می‌شود که یک مشخصه‌ی مهم از تیرهای قوسی کم‌عمق است. پژوهش‌ها در بررسی پایداری تیرهای قوسی کم‌عمق با توجه به چگونگی بار عرضی اعمال شده بر آن‌ها، می‌توانند به دو دسته تقسیم‌بندی شوند: پایداری استاتیکی و پایداری دینامیکی. در بحث پایداری استاتیکی فرض می‌شود که بارگذاری عرضی در یک حالت شبه‌استاتیکی اعمال شده است. به علت رفتار غیرخطی تغییرشکل تیر قوسی، وضعیت‌های تعادلی پایدار چندگانه‌یی ممکن است وجود داشته باشد و ساختار تیر قوسی ممکن است از یک حالت تعادلی پایدار به حالت تعادلی پایدار دیگری جهش کند.

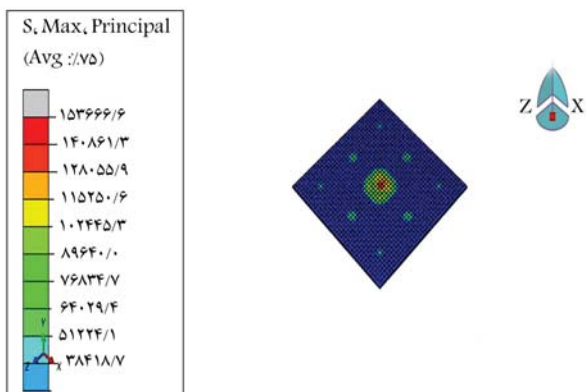
به‌طور کلی راهکارهای استفاده شده در برآورد نیروهای بحرانی دینامیکی سازه‌های کشسان، که بارگذاری دینامیکی دارند، در دو رویکرد می‌توانند دسته‌بندی شوند: رویکرد اول، استفاده از روش‌های عددی در تحلیل معادلات حرکت سیستم‌های مذکور است تا کمانش دینامیکی یک سازه تحت بار متداول دینامیکی برای انواع مقادیر پارامتر نیرویی بررسی شود و پاسخ سازه‌ی سیستم در پایداری دینامیکی احراز شود. به منظور ساده‌سازی تحلیل عددی برای حل معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت، یک سازه‌ی پیوسته باید به مدلی با چندین درجه آزادی تفکیک شود و اغلب تعداد درجه‌های آزادی که برای چنین سیستم‌هایی در نظر گرفته می‌شود، زیاد است و محاسبات بسیاری را می‌طلبد. دقت رویکرد عددی اغلب وابسته به تعداد درجه‌های آزادی سیستم تقلیل می‌یابد و دقت روش محاسبه‌ی عددی اتخاذ شده است. رویکرد دوم، مطالعه‌ی انرژی کلی سیستم است که به عنوان روش‌های انرژی نیز شناخته می‌شود. در رویکرد اخیر، به دو طریق به مطالعه‌ی سیستم پرداخته می‌شود. در روش اول، انرژی کلی سیستم در صفحه‌ی فازی بررسی می‌شود،<sup>[۱۶]</sup> که در آن، شرایط بحرانی سیستم به مشخصات صفحه‌ی فازی آن وابسته است. از این رو، ابتدا با تعیین نقاط بحرانی از روی معادله‌ی حرکت، ویژگی‌های نقاط بحرانی در صفحه‌ی فازی بررسی می‌شود و اهمیت آن در این است که با استفاده از ویژگی‌های اشاره‌شده، می‌توان کلیه‌ی شرایط کافی برای پایداری و ناپایداری دینامیکی سیستم را تعیین کرد. در روش دوم، که براساس اصل پایستاری انرژی استوار است،<sup>[۱۷]</sup> با استفاده از معادله‌ی انرژی کلی سیستم، شرایط بحرانی و نیروهای بحرانی تعیین می‌شوند. مزیت اصلی رویکرد دوم در این است که معیاری در تعیین نیروی بحرانی کمانش دینامیکی فراهم می‌کند و عملاً پژوهشگران نیازی به حل معادلات حرکت سیستم ندارند.

## ۶. بار بحرانی ضربه‌یی برای تعیین پدیده‌ی فروجهش دینامیکی

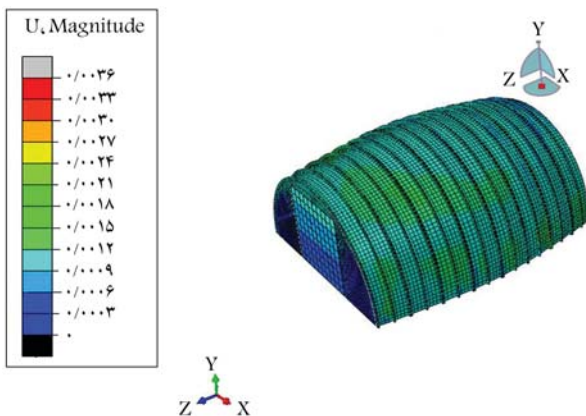
در بحث توصیف ناپایداری فروجهش دینامیکی، مفهوم فیزیکی به این شرح مدنظر



شکل ۱۳. کانتور جابه‌جایی به‌دست آمده برای بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ.



شکل ۱۴. کانتور تنش بیشینه‌ی بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ.



شکل ۱۵. کانتور جابه‌جایی به‌دست آمده از سازه‌ی بادی در نرم‌افزار.

اندازه‌ی ۶-۹e است، که مقدار بسیار کمی است؛ پس هیچ خرابی در سطح نمونه ایجاد نشده و میزان بیشینه‌ی تنش ایجادشده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی مقدار ۱۵/۰° مگاپاسکال و در وسط بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده، طبق شکل ۱۴ رخ داده است، که مقدار بسیار کمی است و تا تنش قابل تحمل بتن پارچه‌یی فاصله‌ی بسیار زیادی دارد. استفاده از پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌یی، تحت بارگذاری خاک فقط به میزان ۳/۶ میلی‌متر در آن جابه‌جایی ایجاد شده است و استفاده از پناهگاه تعجیلی نسبت به پناهگاه‌های استفاده شده در دوران مقدس، قابلیت ایمنی و اقتصادی بهتری را ارائه می‌دهد (شکل ۱۵).

می‌کند که با در نظر گرفتن مواد مدرج تابعی، یک انتخاب مناسب از ابعاد اولیه‌ی تیر قوسی کم‌عمق بسته به نوع کاربرد و فضای مورد نیاز در دست داشته باشد. فقط به ازاء امکان بروز ناپایداری، فروجهش دینامیکی وجود دارد و آن نیز فقط زمانی روی می‌دهد که انرژی دریافتی سیستم توسط بار ضربه‌یی  $F$  بیش از مقدار انرژی نقطه‌ی بحرانی  $p^*$  باشد. در غیر این صورت، پدیده‌ی فروجهش دینامیکی روی نخواهد داد و سیستم پایدار خواهد بود.

در تیرهای قوسی کم‌عمق همگن تنها عامل مؤثر در میزان بار بحرانی  $F$ ، پارامتر عمق اولیه‌ی تیر قوسی شکل (مقدار  $\lambda$ ) است که یک ارتباط خطی بین بار ضربه‌یی بحرانی  $F$  و  $\lambda$  وجود دارد. در حالی که در تیرهای قوسی کم‌عمق با مواد مدرج تابعی، میزان بار بحرانی  $F$  به توزیع ناهمگنی آن وابسته است. به طوری که به ازاء مقدار  $\lambda$  یکسان برای هر دو حالت همگن و ناهمگن، با انتخاب مقادیر مختلف برای  $\gamma$  و  $m$  می‌توان بار بحرانی  $F$  را به مراتب بیشتر از حالت همگن و یا کمتر از آن به‌دست آورد. بنابراین با توجه به اینکه ارتفاع سازه‌ی پناهگاه بتن پارچه‌یی کمتر از ۳ متر و در گروه سازه‌های قوسی کم‌عمق قرار دارد، پدیده‌ی فروجهش ناگهانی در سازه‌ی پناهگاه ساخته شده از بتن پارچه‌یی رخ نداده است.

## ۷. نتایج و بحث

با توجه به شکل ۹ این نتیجه گرفته شد که نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس‌های مزو و ماکرو با استفاده مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس، بسیار نزدیک به نتایج پژوهشگران و آزمایش‌های آزمایشگاهی بوده است، همچنین این نتایج به‌دست آمده است:

۱. جابه‌جایی نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی در آزمایش آزمایشگاهی تقریباً ۹۰۰°/متر و مقدار جابه‌جایی به‌دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس در مقیاس مزو و ماکرو ۱۰۰°/متر بوده است.
۲. در مقدار جابه‌جایی ۵۰۰°/متر، در نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آزمایشگاه و نرم‌افزار، شکست نمودار دوخطی ایجاد شده است.
۳. مقدار نیروی ایجاد شده در محل شکستگی نمودارها در مقدار جابه‌جایی ۵۰۰°/متر برای آزمایش آزمایشگاهی ۶۶/۵ نیوتن، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو ۷۶/۷۵ نیوتن، و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو ۷۴/۵ نیوتن بوده است.
۴. مقدار نیروی نهایی به‌دست آمده از نمودارها، برای آزمایش آزمایشگاهی ۸۲/۵ نیوتن، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو ۹۵/۷ نیوتن و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو ۹۹/۲ کیلونیوتن بوده است.

۵. سطح زیر نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمده از آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی، تقریباً شبیه هم به‌دست آمده است. همچنین نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به‌دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس، تحت مقیاس‌های ماکرو و مزو، بتن پارچه‌یی بسیار نزدیک همدیگر به‌دست آمده‌اند.

شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی تحت انفجار به صورت کانوپ تحت ۵ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۳ متری قرار گرفته و فرض شده است که حذف المان اتفاق بیفتد. مطابق شکل ۱۳ مشاهده شده است که بیشینه‌ی جابه‌جایی ایجادشده در وسط نمونه به

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به راستی‌آزمایی نتایج ماکرو و مزو بتن پارچه‌ای در نرم‌افزار آباکوس با نتایج پژوهش ژانگ و نتایج آزمایشگاهی بتن پارچه‌ای تحت خمش چهارنقطه‌ای، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. میزان سرباره‌ی قابل تحمل بتن پارچه‌ای تحت خمش چهارنقطه‌ای ۸۲/۵ نیوتن است. تحت سرباره‌ی ۸۲/۵ نیوتن، به میزان ۱۰ میلی‌متر جابه‌جایی در نمونه‌ی بتن پارچه‌ای ایجاد شده و صعود و سقوط‌های ایجاد شده در نمودار نیرو - جابه‌جایی مانع از شکست نمونه در جابه‌جایی نسبتاً پایین نسبت به بتن شده و عملکرد انعطاف‌پذیری خوب بتن پارچه‌ای را نشان داده است. سپس به

بررسی و عملکرد بتن پارچه‌ای در سازه‌ی دفاعی پناهگاه تعجیلی پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

-- میزان سرباره‌ی قابل تحمل توسط پناهگاه، ۷۰ سانتی‌متر است که توسط سازندگان نمونه‌ی خارجی ارائه شده است.

-- میزان جابه‌جایی ایجاد شده در پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌ای، ۳ میلی‌متر و میزان تنش ایجاد شده تحت سرباره‌ی ۷۰ سانتی‌متر خاک، ۲/۷ مگاپاسکال در قسمت پایین پناهگاه بوده است.

-- در نهایت عملکرد بتن پارچه‌ای تحت بار انفجاری ۵ کیلوگرم در فاصله‌ی ۳ متری بررسی شده و نتایج نشان داده است که بتن پارچه‌ای به دلیل داشتن کرنش خمیری گسیختگی کششی بالا در حدود ۱۰ برابر بتن معمولی در مقابل انفجار، عملکرد بسیار خوبی نشان داده است.

## پانوشته‌ها

1. concrete canvas
2. Canvas
3. concrete canvas hydro (CC Hydro)
4. Han
5. Spacer fabric
6. Hussein & Meguid
7. Zonberg
8. concrete smeared cracking
9. crack propagation
10. concrete damage plasticity
11. Li
12. Zhang
13. fiber reinforced ploymer (FRP)
14. aramid fiber reinforced polymer (AFRP)
15. Geotextile
16. Zhou
17. Jun
18. linear variable differential transformer (LVDT)
19. MOR

## منابع (References)

1. Tsessarsky, M., Peled, A., Katz, A. and Anteby, I. "Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells-static and impact properties", *Construction and Building Materials*, **44**, pp. 514-523 (2013).
2. Han, F., Chen, H. and Li, X. "Improvement of mechanical properties of concrete canvas by anhydrite-modified calcium sulfoaluminate cement", *Journal of Composite Materials*, **50**(14), pp. 1937-1950 (2016).
3. Han, F., Chen, H., Jiang, X. and et al. "Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas", *Construction and Building Materials*, **65**, pp. 620-629 (2014).
4. Hussein, M. and Meguid, M. "A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(3), pp. 295-307 (2016).
5. Zornberg, J.G., Sitar, N. and Mitchell, J.K. "Limit equilibrium as basis for design of geosynthetic reinforced slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(8), pp. 684-698 (1998).
6. ABAQUS Analysis Users Manual, Version 6.10
7. Li, H., Chen, H., Liu, L. and et al. "Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 557-567 (2016).
8. Zhang, F., Chen, H., Li, X. and et al. "Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels", *Composite Structures*, **176**, pp. 608-616 (2017).
9. Ansari Umair, A. and Pallavi, K.P. "Experimental study of the mechanical behaviour of aluminium mosquito sheet on concrete canvas panels", *International Journal of Advanced Research In Engineering and Technology (IJARET)*, **9**(4), pp. 154-161 (2018).
10. Li, H., Chen, H., Li, X. and et al. "Design and construction application of concrete canvas for slope protection", *Powder Technology*, **344**, pp. 937-946 (2019).
11. Ding, G., Zhou, Li., Wang, J. and et al. "Shaking table tests on gravel slopes reinforced by concrete canvas geotextiles and geomembranes", **48**(4), pp. 539-545 (2020).
12. Zhou, L., Ding, G., Tan, J. and et al. "Seismic response of concrete-canvas reinforced slopes: Influence of tilt degrees for reinforcement", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **14**(03), p. 2050011 (2020).
13. Jun, Z., Wei, X., Xingzhong, W. and et al. "Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, **15**(1), p. 155892502097575 (2020).



14. Jafari, H., Atrchian, M. and Daghigh, Y. "Dynamic response of buried pipelines retrofitted with concrete canvas panels under blast loading", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **44**(1), pp. 105-119 (2020).
15. Wahalathantri, B. and et al. "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS", in *Proceedings of the 1st International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland (2011).
16. Hsu, C.S. "On dynamic stability of elastic bodies with prescribed initialconditions", *International Journal of Engineering Science*, **4**(1), pp. 1-21 (1966).
17. Simitses, G.J. "Dynamic stability of suddenly loaded structures springerVerlag", 398, New York, University of Technology (1990).





# مدل نظری قراردادهای ساخت، بهره‌برداری و انتقال در محیط پیچیده (مطالعه‌ی چندموردی: قراردادهای مشارکت آزادراهی ایران)

سیدمحمد مهدی میومعزی (استادیار)  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ  
محمدحسین صبیحی\* (دانشیار)  
دانشکده‌ی معماری و هنر، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۲۷-۴۰، (پژوهشی)

تأمین مالی بالا و دوره‌ی بهره‌برداری طولانی، دو جنبه‌ی مهم اثرپذیری قراردادهای مشارکتی از محیط پروژه هستند. ساختار قراردادهای مشارکتی در ایران به جهت عدم تناسب با محیط پیچیده‌ی پروژه، اهداف عملکردی را با مشکل مواجه کرده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی عوامل محیطی مؤثر، چالش‌ها، موانع بستری، نحوه‌ی تعامل و پیامدهای حاصل از قراردادهای مشارکت آزادراهی است. راهبرد مطالعه‌ی موردی، رویکرد کیفی و تجزیه و تحلیل داده‌ها با نظریه‌ی داده‌بنیاد، ویژگی‌های عمده‌ی روش‌شناسی پژوهش حاضر هستند. یافته‌های حاصل از چهار مورد آزادراهی، ابتدا نشان دادند که قراردادهای مشارکت، بدون توجه به چرخه‌ی عمر و بهره‌برداری طولانی منعقد شده‌اند. در دوره‌ی ساخت، علی‌رغم سعی در عملکرد هم‌دلانه، ولی به دلیل فهم ناقص از تعهدهای قراردادی و انتقال نامناسب ریسک‌ها، معیارهای عملکردی رضایت‌بخش نیستند. همچنین در دوره‌ی بهره‌برداری نیز به دلیل افزایش هزینه‌ها، ناکافی بودن درآمد و افزایش پیچیدگی محیطی، بازگشت سرمایه در ابهام قرار گرفته است. مدل زمینه‌ی به‌دست آمده، قراردادهای مذکور را نابالغ و با طرفین ناراضی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: پروژه‌ی ساخت بهره‌برداری انتقال، پیچیدگی محیطی، آزادراه عوارضی، مطالعه‌ی موردی، نظریه‌ی داده‌بنیاد.

mirmoezi@usc.ac.ir  
sobhiyah@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

امروزه مشارکت عمومی - خصوصی (PPP)<sup>۱</sup> با دو رویکرد توسعه یافته است: ۱. رویکرد تأمین مالی - محور، و ۲. رویکرد خدمات - محور است.<sup>۱</sup> مشارکت عمومی خصوصی باعث ایجاد نوآوری مطلوب و بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی می‌شود و با انتقال ریسک‌ها به بخش خصوصی و انتقال هزینه‌های سایه به بخش عمومی، قوام می‌یابد.<sup>۲</sup> از آنجا که پروژه‌های مشارکتی سرمایه‌بر، با زمان ساخت و بهره‌برداری طولانی، فازهای متعدد، عدم قطعیت‌های بالا و ریسک‌های زیادی دارند؛ اجرای آن‌ها به روش ساخت، بهره‌برداری و انتقال (BOT)<sup>۲</sup> متداول شده است. دوره‌ی ساخت طولانی و سرمایه‌گذاری زیاد در پروژه‌های آزادراهی سبب بروز عوامل ناشناخته بر ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌شود و بر بازده پروژه در زمان بهره‌برداری تأثیر نامطلوب خواهند گذاشت.<sup>۳</sup> در پروژه‌های BOT به دلیل تعدد عوامل پیش‌گفته، پیچیدگی‌های زیادی به وجود می‌آید که در نتیجه پروژه‌ها با عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های قابل توجه

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱/۲۰، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۴.

DOI:10.24200/J30.2022.58562.2987

مواجه می‌شوند.<sup>۴</sup> دلمون<sup>۳</sup> (۲۰۱۰)،<sup>۵</sup> در بررسی ترکیب‌های مختلف مشارکت عمومی و خصوصی نشان داد که پروژه‌ی BOT از نظر سرمایه‌ی، متکی به بخش خصوصی است و از نظر اداره و مدیریت خدمات، ترکیبی متکی به دو بخش عمومی و خصوصی با تمایل به نقش بیشتر بخش خصوصی است. در پروژه‌ی BOT، فازهای: مطالعات بنیادی، امکان‌سنجی، طراحی مفهومی و پایه، طراحی تفصیلی و اجرایی، تدارکات، تأمین مالی، ساخت، راه‌اندازی، بهره‌برداری و انتقال همگی در یک بسته‌ی<sup>۴</sup> کامل قراردادی منعقد می‌شوند. دمیرل<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>۶</sup> ترکیب فازهای اخیر در یک قرارداد، وجود یک رویکرد مشخص، انتقال بیشتر ریسک‌ها به بخش خصوصی و زمان بهره‌برداری بلندمدت را چهار ویژگی عمده‌ی قراردادهای مشارکتی دانسته‌اند.

در دیدگاه رایج، پارادایم (حوزه‌ی تفکر) جاری و غالب نظریه‌پردازی‌ها در دانش مدیریت، بر فرض یقین و ثبات استوارند و پدیده‌ها همواره منظم و پیش‌بینی‌پذیر قلمداد می‌شوند،<sup>۷</sup> که البته دانش مدیریت پروژه نیز با همین پارادایم رشد و تکامل یافته است. پارادایم مذکور با نگاه تقلیل‌گرایانه<sup>۶</sup> و تجربه‌گرایانه<sup>۷</sup> محیط را منظم، باثبات

و تکرارپذیری می‌داند و وجود سازمان و نظم را مبنای حوزه‌ی تفکر خود قلمداد می‌کند. اما تجربه‌ی دو دهه‌ی اخیر نشان داده که پارادایم اخیر در شرایط آشوبناک<sup>۸</sup> و پیچیده<sup>۹</sup>، قادر به پاسخگویی نیست و سبب چالش‌های متعدد می‌شود. بررسی‌های نتایج پروژه‌های مشارکت عمومی - خصوصی در ایران نشان می‌دهند عدم قطعیت‌ها، ریسک‌ها و تغییرات پیش‌بینی نشده که روندی افزایشی نیز دارند، موجب کاهش ثبات و پایداری محیط پروژه شده‌اند. در یک تعارض جدی، قراردادهای مشارکت عمومی - خصوصی از یک سو با فرض محیطی با تغییرات خطی و پیوسته و با دیدگاه سنتی کارفرما - پیمانکار تدوین یافته و از سوی دیگر، با تغییرات پیش‌بینی نشده، غیرخطی و ناپیوسته مواجه هستند. در محیط پیچیده نه فقط پیش‌بینی‌پذیری بسیار ضعیف می‌شود، بلکه پیش‌بینی‌های موجود، اعتبار خود را نیز از دست می‌دهند. در چنین محیطی، دستیابی به معیارهای کلیدی موفقیت (مانند: زمان، هزینه و بازگشت سرمایه) با چالش جدی روبرو است. در گزارش سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی،<sup>[۸]</sup> یکی از مهم‌ترین عوامل کندی روند مشارکت، تدوین نامناسب قراردادهای مشارکتی عنوان شده است. مطالعات اولیه نشان داده است که محیط پروژه‌ی در ایران به شدت پیچیده است و ساختار مشارکت عمومی - خصوصی با نظام قراردادی BOT متناسب نیست و پارادایم موجود مدیریت پروژه، سازوکارهای مناسب انجام و بهره‌برداری از پروژه را در چنین محیطی ندارد. با توجه به ماهیت پروژه‌های زیربنایی، ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی بروز خواهند کرد؛ بنابراین برای شرکت در مناقصه‌های پروژه‌های زیربنایی و به تبع موفقیت در انجام آن‌ها، باید نحوه‌ی سودآوری، هزینه‌ها و رویدادهای منجر به ریسک واقع‌بینانه تخمین زده شوند.<sup>[۹]</sup> هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی چالش‌ها، مشکلات، موانع بستری و سایر عوامل محیطی و همچنین تعاملات طرفین در انتخاب راهبردهای پیشبرد قرارداد و در نهایت فهم پیامدهای مشارکت عمومی - خصوصی در قراردادهای آزادراهی در قالب یک مدل نظری است.

## ۲. مرور ادبیات

مرور ادبیات سبب کسب آگاهی از کارهای پژوهشی انجام گرفته تاکنون، دسترسی به معیارهایی برای مقایسه و ارزیابی نتایج پژوهش، و نیز کمک به تحلیل و تفسیر یافته‌ها و همچنین ایجاد حساسیت نظری است.

### ۱.۲. ویژگی‌های نظام انجام پروژه (PDS)<sup>۱۰</sup> به روش BOT

نظام انجام پروژه، مجموعه‌ی فرایندهای جامع طراحی و ساخت است که تمامی روش‌ها، فعالیت‌ها، توالی عملیات، روابط قراردادی، تأمین مالی، تعهدات، روابط فیما بین و شکل‌های مختلف توافق‌ها را شامل می‌شود و همگی آن‌ها در جهت تکمیل موفقیت‌آمیز طراحی و ساخت پروژه به کار می‌روند.<sup>[۱۰]</sup> به علاوه، راهبرد مدیریت پروژه در نحوه‌ی تخصیص ریسک‌های پروژه بین عوامل اصلی و تعهدات و مسئولیت‌های قراردادی آن‌ها و نیز چگونگی انجام مراحل مختلف برای نیل به اهداف پروژه نیز در نظام مذکور تعریف می‌شوند. فرایند مشارکت در برگیرنده‌ی چهار مؤلفه‌ی اساسی: نحوه‌ی تأمین مالی<sup>۱۱</sup>، روش انجام پروژه<sup>۱۲</sup>، روش انتخاب عوامل طراحی و سازنده<sup>۱۳</sup> و مبنای پرداخت در قرارداد هاست<sup>[۱۱]</sup>.<sup>۱۴</sup> انجام پروژه‌ها به روش طرح و ساخت و تأمین مالی (DBF)<sup>۱۵</sup> و همچنین مشارکت عمومی - خصوصی در حوزه‌ی تأمین مالی پروژه‌ی قرار دارد و معمولاً از طریق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی (غیردولتی) محقق می‌شوند. در این موارد،

توجه‌پذیری فنی - اجرایی - مالی پروژه و ملزومات بازگشت سرمایه، مهم‌ترین موضوع‌ها هستند. کلاکج<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۱]</sup> بر این باورند که بین مشارکت در یک قرارداد با یک قرارداد مشارکتی، تفاوت اساسی وجود دارد و بنابراین هر یک از طرفین مشارکت در صورت فهم این موضوع می‌توانند به موفقیت آن کمک کنند. چن و دولوی<sup>۱۷</sup> (۲۰۰۷)،<sup>[۱۲]</sup> مهم‌ترین عامل محرک قراردادهای BOT را نیاز به سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی زیرساخت‌ها و در مقابل، عوامل مهم مانع‌زا را: ترتیب‌های مالی پیچیده، ویژگی‌های قراردادی پیچیده، هزینه‌ی اولیه‌ی بالا و ریسک زیاد دانسته‌اند. در قراردادهای BOT، بخش خصوصی (سرمایه‌گذار) وظیفه‌ی بهره‌برداری از پروژه را هم بر عهده دارد و در پایان دوره‌ی بهره‌برداری، آن را باید به طرف دیگر قرارداد (بخش عمومی) منتقل کند. مدت بهره‌برداری در پروژه‌های آزادراهی به دلیل حجم بالای تأمین مالی، معمولاً ۲۰ الی ۳۰ سال تعیین می‌شوند.<sup>[۱۳]</sup> تورینا و کارپوسیچ<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۱۵]</sup> در مقایسه بین مدل‌های موجود در فرایند مشارکت عمومی - خصوصی نشان دادند که مدل BOT در مقایسه با سایر مدل‌ها هم از نظر مشارکت (درگیر شدن) بخش خصوصی و هم از نظر زمان قرارداد، بالاترین رتبه را به خود اختصاص می‌دهد. پروژه‌های BOT درون خود بیشترین اجزاء با قراردادهای گوناگون و مراحل تکاملی را دارند که می‌توانند سبب بیشترین پیچیدگی و ریسک شوند. بر همین مبنا، آلیسون و شریف<sup>۱۹</sup> (۲۰۰۲)،<sup>[۱۶]</sup> معتقدند در کشورهای در حال توسعه، هرگونه سرمایه‌گذاری به روش BOT، باید با توجه به آثار اقتصادی و غیراقتصادی در بستر و محیط پروژه باشد؛ زیرا پروژه‌های مذکور، به دلیل ذات بلندمدت بودن، سازمانی پیچیده پیدا می‌کنند و در طول عمر آن‌ها ممکن است قوانین، سیاست، اجتماع، بازار و محیط اقتصادی دچار تغییرات اساسی شوند. دوردایف و اسماعیل<sup>۲۰</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۱۴]</sup> موانع BOT را: الف) پیچیدگی ترتیب‌های تنظیم مالی، ب) پیچیدگی ساختاری قراردادها، پ) هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، ت) پیچیدگی فرایندهای پروژه، ث) تعدد شرکا و ج) افق بلند زمانی ذکر کرده‌اند. خان<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸)،<sup>[۱۷]</sup> کلید موفقیت BOT را فائق آمدن بر چالش‌های اقتصادی، محیطی، اجتماعی، حقوقی و مالی می‌دانند.

### ۲.۲. منابع ریسک و عدم قطعیت

گستره‌ی دانش مدیریت پروژه<sup>۲۲</sup>، ریسک را رویداد یا شرایط غیرقطعی می‌داند که در صورت رخداد، آثار مثبت یا منفی در یک یا چند از اهداف پروژه می‌گذارد. پرنس<sup>۲۳</sup> ریسک را رویداد یا مجموعه‌ی رویدادهای غیرقطعی می‌داند که در صورت وقوع، در دستیابی به اهداف تأثیر می‌گذارد و ترکیبی از احتمال دریافت تهدید (تأثیر منفی) یا فرصت (تأثیر مثبت) بر اهداف است. هیلسون<sup>۲۴</sup> (۲۰۰۴)،<sup>[۱۸]</sup> ریسک را عدم قطعیت قابل اندازه‌گیری و عدم قطعیت را ریسک غیرقابل اندازه‌گیری می‌داند. پروژه‌های زیربنایی نوع BOT، مشخصات پیچیده‌ی ریسک‌ها دارند و تا حد قابل توجهی، موفقیت هر پروژه‌ی BOT تحت تأثیر میزان مدیریت ریسک‌های مختلف آن پروژه است. مهم‌ترین مراحل درگیر در مدیریت ریسک یک پروژه عبارت از: شناسایی ریسک، ارزیابی ریسک و سپس مراحل اولویت‌بندی و پاسخ به آن‌ها هستند.<sup>[۱۹]</sup>

خودر و نبوی<sup>۲۵</sup> (۲۰۱۹)،<sup>[۲۰]</sup> با مطالعه‌ی منابع ریسک در پروژه‌های زیربنایی و سپس به کمک ساختار شکست ریسک‌ها، آن‌ها را به شش دسته‌ی عمده، شامل: ریسک‌های خارجی، مالی، مدیریت پروژه، فنی، سازمانی و محیطی تقسیم کرده‌اند. ایشان در یک تقسیم‌بندی عمده‌تر، ریسک‌ها را مشتمل بر ریسک‌های داخلی (ریسک‌های مالی، مدیریت پروژه، فنی، سازمانی و محیطی) و ریسک‌های

برآوردها و تخمین‌ها اشاره دارند و گستره‌ی دوم، مرتبط با عدم شفافیت و ابهام حاصل از عواملی، مانند: رفتار بازیگران، فقدان دانش و اطلاعات، نداشتن ساختار مناسب و وجود منابع شناخته یا ناشناخته‌ی انحراف در پروژه هستند که به اصول مرتبط با طراحی و تدارک‌ها و منطق حاکم بر آن‌ها، اهداف و اولویت‌ها و ارتباط‌های میان طرفین درگیر در پروژه مربوط هستند. جعفری (۲۰۰۱)،<sup>[۲۸]</sup> منابع عدم قطعیت در پروژه‌ها را شامل: عوامل خارجی (مانند: فشارهای رقابتی و مالی، تضادها و موضوع‌های اجتماعی)، دگرگونی‌های اهداف کسب و کار (مانند: تغییر علائق و نیازهای ذی‌نفعان پروژه) و روش‌های ضعیف تحقق بخشیدن به برنامه‌ها (مانند: دانش و تجربه‌ی ناکافی تیم پروژه، عدم شایستگی مدیر پروژه، پیچیدگی و نیز منحصر به فرد بودن پروژه) می‌داند. بوریسون<sup>۳۰</sup> و هام (۲۰۰۵)،<sup>[۲۹]</sup> مبانی عدم قطعیت را در سه دسته‌ی: تغییرات ساختاری، غیرقابل پیش‌بینی بودن تأمین و تدارک‌ها و سرانجام آرایش نیروهای سیاسی - اجتماعی که محیط خارج از پروژه را غیرقابل پیش‌بینی می‌سازد، تقسیم می‌کنند. نگوین (۲۰۱۷)،<sup>[۲۳]</sup> قراردادهای ناکامل، هزینه‌ی بالای معامله‌ها، فرصت‌طلبی و بلندمدت بودن قرارداد را منابع عمده‌ی عدم قطعیت‌ها می‌داند.

### ۳.۲. پیچیدگی محیط<sup>۳۱</sup> پروژه

پیچیدگی به حرکت در لبه‌ی آشوب و حدواسط بین نظم و بی‌نظمی است.<sup>[۳۰]</sup> پیچیدگی در مدیریت پروژه از دو دیدگاه: الف) پروژه‌ی پیچیده، و ب) محیط پیچیده، قابل طرح است. در نوشتار حاضر، دیدگاه دوم موردنظر بوده است. محیط پروژه، محیطی وسیع‌تر از سازمان پروژه است که توسط ذی‌نفعان، عوامل سیاسی، اجتماعی و اقتصادی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و معمولاً خارج از محدوده‌ی قابل کنترل مدیریت پروژه است.<sup>[۳۱]</sup> در تئوری سیستم‌ها، سیستم پیچیده از چند جزء تشکیل شده است که نه فقط بر هم اثر متقابل (برهم‌کنشی<sup>۳۲</sup>) دارند، بلکه با محیط پیرامون خود نیز برهم‌کنش دارند. یک سیستم پیچیده، مستعد بی‌نظمی است.<sup>[۳۲]</sup> یک تغییر کوچک در سیستم پیچیده، نه فقط سبب پیچیدگی مدیریت آن خواهد شد، بلکه در اثر خاصیت پویایی (دینامیکی) تغییر و آثار برهم‌کنشی آن با سایر اجزا، تغییرات دیگری به وقوع خواهند پیوست که سیستم را پیچیده‌تر می‌سازد.<sup>[۳۳]</sup> هاس (۲۰۰۸)،<sup>[۳۴]</sup> دلایل اصلی پیچیدگی را ابهام (فقدان آگاهی از وقایع و علت آن‌ها)، عدم قطعیت‌ها، عدم توانایی پیش‌ارزیابی قبل از اقدام‌ها، و پیش‌بینی‌ناپذیری پدیده‌ها می‌داند. رمینگتون و پولاک<sup>۳۴</sup> (۲۰۰۸)،<sup>[۳۵]</sup> یکی از منابع پیچیدگی در پروژه‌ها را مربوط به تغییرات زیاد در محیط پروژه و تغییرات در قوانین دانسته‌اند. پیچیدگی و آشوبناکی ارتباط مفهومی مستقیمی دارند، به گونه‌ی که آشوب، ابتدا نظم زیربنایی سیستم را هدف قرار می‌دهد و سپس حوادث ساده را پیچیده می‌سازد.<sup>[۳۲]</sup> اثر پروانه‌یی<sup>۳۵</sup> معروف‌ترین نماد آشوبناکی است که حساسیت بالا به شرایط اولیه نیز شناخته می‌شود و مبین امکان ایجاد تغییرهای بزرگ (مانند یک ریسک بزرگ) در اثر تغییری کوچک و پیش‌پا افتاده است. موفقیت پروژه‌ها در چنین محیطی مستقیماً به داشتن اهداف واضح، پاسخ‌جابک به تغییرات و ارتباط مؤثر بین ذی‌نفعان پروژه بستگی دارد.<sup>[۳۶]</sup> میرمعزی و صبحیه (۲۰۱۹)،<sup>[۳۷]</sup> مؤلفه‌های پیچیدگی محیط قراردادهای مشارکت آزادراهی را شناسایی کرده‌اند. ایشان مهم‌ترین عوامل علی پیچیدگی محیطی را: ناپایداری‌های اقتصادی، تغییرات پیش‌بینی‌ناپذیر و نابالغی طرفین مشارکت شناخته و عواملی مانند: ضعف قراردادی و چالش‌های فرهنگی را سبب پیچیده‌تر شدن محیط عنوان کرده‌اند. مطابق نظر مالانستا و اسمیت<sup>۳۶</sup> (۲۰۱۴)،<sup>[۳۸]</sup> پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی بودن امور، دو بُعد و دو منبع عدم

خارجی شناخته‌اند. مطالعه‌ی موردی ساندهاویتری<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۲۱]</sup> در آزادراه‌های اندونزی نشان داد که منابع ریسک و عدم قطعیت، شامل: امور بانکی، تورم، حجم تردد و وسائط نقلیه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، هزینه‌های ساخت، هزینه‌ی استملاک زمین و ویژگی‌های طراحی هستند. ژوو<sup>۲۷</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۲۲]</sup> منابع عمده‌ی تولید ریسک در پروژه‌های مشارکتی را مشتمل بر: اقتصاد کلان، دوره‌ی ساخت و بهره‌برداری، بلوغ دولت، سازوکار بازار، بقاء (پایداری) اقتصادی و مداخله‌های دولت دسته‌بندی کرده‌اند. نگوین<sup>۲۸</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۲۳]</sup> ریسک‌ها را از دو منشأ برون‌زاد و درون‌زاد می‌داند. منشأ ریسک‌های برون‌زاد، شامل: مخالفت‌های اجتماعی، تغییر قوانین، نرخ سرمایه‌گذاری، تورم و تعدیل قیمت‌هاست که به خارج از مرزهای پروژه تعلق دارد و تغییراتی است که اغلب بخش عمومی (دولت) مسبب آن‌هاست. منشأ ریسک‌های درون‌زاد، شامل مواردی، مانند: تملک اراضی، شرایط زمین، مجوزها، مجوزهای زیست‌محیطی، باستان‌شناسی، دسترسی، حقوق راه و خدمات، ارتباط به سایت، معارضان، قراردادهای پیمانکاران جزء، تأخیرهای پیمانکاران جزء، سایر تأخیرها، طراحی، کارایی (عملکرد)، ریسک استفاده (تقاضا)، درآمد، نحوه‌ی دسترسی و ارائه‌ی خدمات، هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری، نقص‌های باقیمانده و اختیار خاتمه‌ی پیمان توسط بخش عمومی می‌داند. امام‌جمعه‌زاده (۲۰۱۴)،<sup>[۱۱]</sup> ریسک‌ها را در دو دسته‌ی ریسک‌های خارج پروژه (غیرقابل کنترل) و ریسک‌های داخل پروژه (قابل کنترل) تقسیم‌بندی کرده است. وی منابع دسته‌ی اول را: حقوقی، سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و طبیعی (محیطی) و منابع دسته‌ی دیگر را: محصول مدیریت، عوامل انسانی، تأمین و تدارکات و قرارداد می‌داند. ترنر<sup>۲۹</sup> (۲۰۱۴)،<sup>[۲۴]</sup> ریسک‌ها را در سه دسته‌ی: خارجی، داخلی و حقوقی (قانونی) تقسیم کرده است. وی منابع ریسک‌های خارجی را به انواع پیش‌بینی‌پذیر، ولی نامشخص (مانند: بازار، مالی، عوامل آب و هوایی و آثار اجتماعی) و پیش‌بینی‌ناپذیر (مانند: اقدام‌های دولت یا سایر نهادهای تأثیرگذار و حوادث قهری) که ریسک‌هایی بیمه‌پذیر هستند، تقسیم‌بندی کرده است. ایشان منابع ریسک‌های داخلی را به انواع فنی و غیرفنی و ریسک‌های قانونی را ناشی از قوانین: حقوقی، قراردادهای و مسئولیت مدنی می‌داند. فلاح شمس و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۲۵]</sup> ریسک‌ها را به این سه دسته تقسیم کرده‌اند: دسته‌ی اول، ریسک‌های مالی - تجاری هستند که منابع ایجاد آن‌ها را تأخیر در تکمیل، تأمین مالی و هزینه‌ی تأمین مالی، افزایش هزینه‌های ساخت، حوادث غیر قابل پیش‌بینی، تغییر قیمت (تورم)، تجربه‌ی عوامل درگیر در پروژه، فناوری، وجود منابع و مواد اولیه، کسب مجوز و پروانه‌های لازم، اعتبار خریداران محصول پروژه و عدم پایبندی به تعهدها در انجام پروژه دانسته‌اند. دسته‌ی دوم، ریسک‌های سیاسی (کشوری) هستند که منابع آن‌ها نیز شامل: تحریم اقتصادی، قطع روابط اقتصادی، عدم وجود قوانین و مقررات مشخص و شفاف، عدم ثبات قوانین، اجرای ضعیف قوانین، مصادره، ملی کردن و ضبط اموال، مالیات، محدودیت (ممنوعیت) صادرات، تبعیض (رانت)، امنیت و تروریسم، حوادث غیر قابل پیش‌بینی سیاسی و عدم حمایت حقوقی از قرارداد بیان کرده‌اند. دسته‌ی سوم، ریسک‌های ارزی هستند که از منابعی مانند: میزان قابلیت تبدیل ارز، نوسان‌های نرخ ارز و محدودیت ورود و خروج ارز ایجاد می‌شود. شهبازی و صبحیه (۲۰۱۹)،<sup>[۲۶]</sup> یکی از منابع عمده‌ی داخلی ریسک تأثیرگذار در پروژه‌های مشارکت آزادراهی ایران را نحوه‌ی تشریک مساعی طرفین قرارداد شناخته‌اند.

شناخت منابع ریسک بدون توجه به منابع عدم قطعیت، کاری بیهوده است؛ زیرا منبع ریسک‌ها از عدم قطعیت پدیده‌ها نشأت می‌گیرد. چیم و وارد (۲۰۰۱)،<sup>[۲۷]</sup> دوگستره برای عدم قطعیت قائل شده‌اند. گستره‌ی اول، مرتبط با تغییرات در معیارهای عملکردی، مانند: هزینه، مدت، و کیفیت پروژه هستند که به تغییرپذیری و مبانی

قطعیت هستند که برای موفقیت پروژه، باید به حکمرانی انعطاف‌پذیر<sup>۳۷</sup> در هنگام تدوین قرارداد توجه جدی کرد. همچنین پاسلاوسکی<sup>۳۸</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۳۹]</sup> برای موفقیت پروژه‌های پیچیده که در محیط متغیر و ناپایدار اجرا می‌شوند، انعطاف‌پذیری را فرصتی می‌داند که با وجود مشکلات، مراحل اجرای پروژه را قابل تداوم می‌سازد. لذا، دان<sup>۳۹</sup> (۲۰۲۰)،<sup>[۴۰]</sup> برای پاسخ به عدم قطعیت‌ها در محیط‌های پیچیده، رویکردهای تطبیقی را مناسب دانسته است. خلاصه، با مرور ادبیات ملاحظه شد که چالش‌های عمده‌ی قراردادهای مشارکت، شامل: چالش‌های مالی (مانند: هزینه‌های ساخت، راهبرد مناسب تأمین مالی، درآمد حاصل از بهره‌برداری و بازگشت سرمایه) و چالش‌های غیرمالی (مانند: محدودیت‌های زیست‌محیطی، فناوری، شرایط اجتماعی و پیچیدگی‌های محیطی) هستند. بروز ریسک با توجه به چالش‌های ذکر شده و همچنین ویژگی‌های برشمرده‌ی قراردادهای BOT و تعدد منابع عدم قطعیت، اجتناب‌ناپذیر است و محیط پروژه، پتانسیل پیچیده شدن و در نتیجه تأثیر نامطلوب در عملکرد و پیامدها را دارد. شناسایی منابع ریسک، مدیریت، نحوه‌ی برخورد با آن و میزان انعطاف‌پذیری قرارداد از شروط بدون قید و شرط موفقیت هستند.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

پارادایم‌های (حوزه‌های تفکر) مطرح در پژوهش‌های علوم اجتماعی و مدیریت، شامل: فرااثبات‌گرایی<sup>۴۰</sup>، ساخت‌گرایی<sup>۴۱</sup>، جانبدارانه/مشارکتی<sup>۴۲</sup> و پراگماتیسم<sup>۴۳</sup> هستند. لالوند<sup>۴۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۴۲]</sup> نشان دادند از آنجا که مدیریت پروژه، یک رشته علمی - عملی<sup>۴۵</sup> است، معرفت‌شناسی<sup>۴۶</sup> پارادایم آن باید بتواند پیوند قوی بین تئوری و عمل برقرار سازد. بنابراین گونه‌ی<sup>۴۷</sup> پراگماتیسم در حوزه‌ی مدیریت پروژه از سایر گونه‌ها ارجح‌تر است. فراستخواه (۲۰۱۷)،<sup>[۴۳]</sup> ویژگی‌های نگاه پراگماتیک را عمل‌گرایی یا نوع‌ل‌گرایی معطوف به مسائل جهان واقعی، دسترسی به حقیقت با ایجاد معرفت علمی و ایجاد پیشرفت و حل یک مسئله‌ی واقعی می‌داند.

رویکرد پژوهش حاضر از نوع کیفی انتخاب شده است. مزیت‌های مهم پژوهش کیفی، وضعیت در حال ظهور (اکتشافی)، پویایی و تفسیری بودن آن است. در پژوهش کیفی، فرایند استدلال و تحلیل عمدتاً استقرایی است. گردآوری داده‌ها در پژوهش حاضر با استفاده از راهبرد مطالعه‌ی موردی (مورد کاوی) انجام شده است، زیرا پدیده از بسترش جدا نمی‌شود و در پیوند با آن بررسی و از میان انبوه اطلاعات داده‌های موردنظر با بررسی موشکافانه تولید می‌شود.

در پژوهش حاضر، چهار مورد<sup>۴۸</sup> مشتمل بر قراردادهای پل زال - اندیمشک، کنارگذر غربی اصفهان، خرم‌آباد - پل زال و ساوه - همدان انتخاب و مطالعه شده‌اند. بخش عمومی طرف قرارداد، شرکت ساخت و توسعه‌ی زیربنای حمل و نقل کشور به نمایندگی از وزارت راه و شهرسازی دولت جمهوری اسلامی ایران و بخش خصوصی به ترتیب شامل شرکت‌های: آبادراهن پارس، سیمین سپاهان، شالوده و دنا رهساز بوده‌اند. سؤال‌های پژوهش، شامل: ۱ سؤال اصلی و ۳ سؤال فرعی، به این ترتیب طراحی شده‌اند:

**سؤال اصلی:** مدل نظری قراردادهای مشارکت آزادراهی، چه مؤلفه‌هایی دارند؟  
**سؤال‌های فرعی:** الف) عوامل علی و زمینه‌ی، مقوله‌ی هسته و پیامدهای قراردادهای مشارکت عمومی - خصوصی آزادراهی چه هستند؟ ب) عوامل علی و زمینه‌ی، مقوله‌ی هسته و پیامدهای انجام پروژه‌های آزادراهی چه هستند؟ پ) راهبردهای بخش عمومی - خصوصی در ساخت و بهره‌برداری از آزادراه و پیامدهای آن‌ها چه هستند؟

در پژوهش حاضر، ۲۲ مصاحبه‌ی میدانی (مورد اول، ۶ مصاحبه؛ مورد دوم، ۸ مصاحبه؛ مورد سوم، ۴ مصاحبه؛ و مورد چهارم، ۴ مصاحبه‌ی ساختاریافته و تدریجی) برگزار شده است. با شرکت در چندین جلسه‌ی انجمن شرکت‌های راهساز، اطلاعات گران‌قیمتی از مشکلات و موانع پیش‌روی قراردادهای آزادراهی کسب شده است. علاوه بر مصاحبه، مستندها، ارتباط‌ها، ذهنیت و فهم طرفین از مسائل و مشکلات طرف مقابل، کنکاش شده و به نظرات کنشگران درخصوص فرایندها، برنامه‌ها، راهبردها، مفهوم‌ها و ملزوم‌های مشارکت و نحوه‌ی تأمین منافع طرف مقابل نیز توجه شده است.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و شکل‌دهی به یافته‌ها در پژوهش حاضر به کمک نظریه‌ی داده بنیاد و رهیافت استراس - کوربین انجام شده است. ابتدا از مجموع اطلاعات به‌دست آمده، حدود ۶۰۰ مفهوم و مقوله ساخته شدند. سپس از بین مقوله‌های مذکور، ۱۲ الگو (هر مورد ۳ الگو) و بعد از آن، با ترکیب الگوها، سه الگوی عمده (الگوهای: تدوین قرارداد، عملکرد دوره‌ی ساخت و عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری) تدوین شدند. در انتها، سه الگوی عمده با هم ترکیب و مدل نظری قراردادهای مشارکت آزادراهی تدوین شده است.

### ۴. مورد‌ها، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

#### ۱.۴. مشخصات مورد‌ها

در پژوهش حاضر، به مطالعه‌ی عمیق چهار مورد آزادراهی پرداخته شده است که جزئیات آن‌ها به این ترتیب است:

**مورد اول:** آزادراه پل زال - اندیمشک در استان خوزستان و به طول ۴۵ کیلومتر در مدت حدود ۳ سال از فروردین ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹۲ ساخته شده است. در زمان مناقصه (سال ۱۳۸۵)، هزینه‌ی پروژه معادل ۱۱۰ میلیارد تومان برآورد شده بود. در طی روند اجرایی شدن مشارکت در سال ۱۳۸۹، هزینه‌ی ساخت با افزایش دو برابری معادل ۲۲۰ میلیارد تومان روبرو شد. ولی در نهایت، پروژه‌ی مذکور با هزینه‌ی بالغ بر ۳۹۰ میلیارد تومان (بیش از ۳ برابر برآورد اولیه) به بهره‌برداری رسید. آزادراه مذکور با شراکت اولیه‌ی ۵۰ - ۵۰ درصد توافق شد. ولی با توجه به افزایش شدید هزینه‌ها، با کاهش سهم‌الشراکه‌ی بخش خصوصی به صورت ۳۵ - ۶۵ درصد به انجام رسیده است. **مورد دوم:** آزادراه کنارگذر غربی اصفهان با طولی معادل ۱۰۰ کیلومتر با چهار خط عبور در سه قطعه احداث و بهره‌برداری شده است. قطعه‌ی اول، در اوایل سال ۱۳۸۳ شروع و در دهه‌ی فجر سال ۱۳۸۵ و سپس با ادامه‌ی ساخت آزادراه، قطعه‌ی دوم نیز در بهار سال ۱۳۸۷ به بهره‌برداری رسیده‌اند. قطعه‌ی سوم با تجدیدنظر و اصلاح، پس از یک وقفه‌ی چهار ساله، در سال ۱۳۹۱ شروع و در سال ۱۳۹۷ به بهره‌برداری رسیده است. طول کل مدت اجرا، که در قرارداد ۴ سال پیش‌بینی شده بود، با ۱۰ سال تأخیر، ۱۴ سال طول کشید. کل هزینه‌ی پروژه‌ی اخیر در حالی که پیش‌بینی اولیه‌ی آن ۸۵ میلیارد تومان بود، با ۲/۵ برابر آن، یعنی بالغ بر ۲۰۰ میلیارد تومان، اجرایی شده و با شراکت ۳۵ - ۶۵ درصد به انجام رسیده است. **مورد سوم:** آزادراه خرم‌آباد - پل زال به طول ۱۰۴ کیلومتر با مشارکت ۵۰ - ۵۰ درصد به انجام رسیده است. ساخت آزادراه از دی‌ماه سال ۱۳۸۴ آغاز و در آبان‌ماه ۱۳۸۹ با هزینه‌ی ۷۵۰ میلیارد تومان به بهره‌برداری رسیده است. **مورد چهارم:** بخشی از آزادراه ساوه - همدان با طول حدود ۹۰ کیلومتر که در استان مرکزی قرار دارد، پژوهش حاضر مطالعه شده است. دوران مشارکت ۲۵ سال بوده است، که ۴۲ ماه آن به دوره‌ی احداث اختصاص داشته است. بعد از انعقاد

قرارداد، ساخت تدریجی پروژه‌ی اخیر در نیمه‌ی دوم سال ۱۳۸۵ آغاز و ابتدا یک باند آن تا کیلومتر ۶۰ در سال ۱۳۸۸ و سپس باند دوم در سال ۱۳۸۹ و در نهایت، ۳۰ کیلومتر دیگر در سال ۱۳۹۰ (با دوره‌ی ساخت ۵ ساله) به بهره‌برداری رسیده است. آزادراه مذکور با شراکت ۵۰ - ۵۰ درصد به انجام رسیده است.

## ۲.۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

اطلاعات به دست آمده از مصاحبه‌ها و سایر روش‌ها، ابتدا به صورت متنی پیاده‌سازی و عبارت‌های قابل فهم و معنی‌دار آن استخراج شده‌اند. در مواردی نیز در صورت بروز ابهام، مصاحبه‌ی جدیدی برای یافتن پاسخ یا شفاف‌سازی ابهامات و تکمیل اطلاعات، تدارک دیده شده است. اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده در هر مورد به صورت عبارت‌ها و سپس مفاهیم و پس از آن، مقوله‌های پرمعنی ساخته شده‌اند. مقوله‌ها هم در سه مرحله، به نام‌های: کدبندی اولیه، کدبندی باز و کدبندی گزینشی شکل کامل‌تر و مترکب‌تری به خود گرفتند. روند کسب داده‌ها و مقوله‌های ساخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

به واسطه‌ی تعداد بسیار زیاد مفاهیم به دست آمده از چهار مورد پژوهش، از ذکر عبارت‌ها و مفاهیم استفاده شده در کدبندی‌های باز و محوری خودداری و فقط به مقوله‌های عمده‌ی استفاده شده در کدبندی گزینشی برای استفاده در ساخت الگوها و مدل نظری اکتفا شده است. در هر مورد، یک الگوی تدوین قرارداد، یک الگوی عملکرد دوره‌ی ساخت و یک الگوی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری ساخته و سپس متناظراً با یکدیگر ترکیب شده‌اند که در ادامه، روند ساخت الگوهای ترکیبی تشریح شده است.

## ۱.۲.۴. الگوی تدوین قرارداد

به منظور دستیابی به فهم اینکه چه عواملی در ایجاد قرارداد دخالت داشته‌اند؛ زمینه‌های مؤثر و انگیزه و دیدگاه آن‌ها در ورود به مشارکت چه بوده است؛ طرفین چه راهبردهایی انتخاب کرده‌اند؛ و پیامدهای ایجاد شده چه بوده است؛ مفاهیم و مقوله‌های متعددی (شامل شرایط: علّی، محوری، زمینه‌یی، واسطه‌یی، راهبردی

و پیامدها) ساخته شدند. در جدول ۲، در چهار سطر، مقوله‌های استفاده شده در ساخت الگوهای تدوین قرارداد ارائه شده‌اند. هر سطر از جدول مذکور، مؤلفه‌های یک الگو در مورد (Case) خاص خود است. سپس الگوهای مذکور با یکدیگر مقایسه و با تحلیل بین موردی، الگوی پارادایمی عمده‌ی تدوین قرارداد ساخته شد که نتیجه‌ی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

## ۲.۲.۴. الگوی عملکرد دوره‌ی ساخت

از یافته‌های پژوهش آشکار شد که پس از تدوین قرارداد، به‌طور کلی طرفین با فهم متقابل و با نیت همکاری در تحقق اهداف، با تمام توان سعی در پیشبرد مشارکت داشته‌اند. ولی با دقت و بررسی بیشتر یافته‌ها و همچنین مقوله‌های متناظر در هر مورد مشخص شد که به علت پیچیدگی محیطی و افزایش پیش‌بینی‌ناپذیری امور در چنین محیطی، ریسک‌های متعددی به وقوع رسیده است که روند ساخت در مورد‌ها را با فراز و فرودهای قابل توجهی مواجه کرده است. در جدول ۳، مقوله‌های به دست آمده و استفاده شده در ساخت الگوهای عملکرد دوره‌ی ساخت ارائه شده است. هر سطر از جدول مذکور، مؤلفه‌های یک الگو در مورد (Case) خاص خود است. سپس الگوهای ساخته شده با یکدیگر مقایسه و با تحلیل بین موردی، الگوی پارادایمی عمده‌ی عملکرد دوره‌ی ساخت تدوین شد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

## ۳.۲.۴. الگوی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری

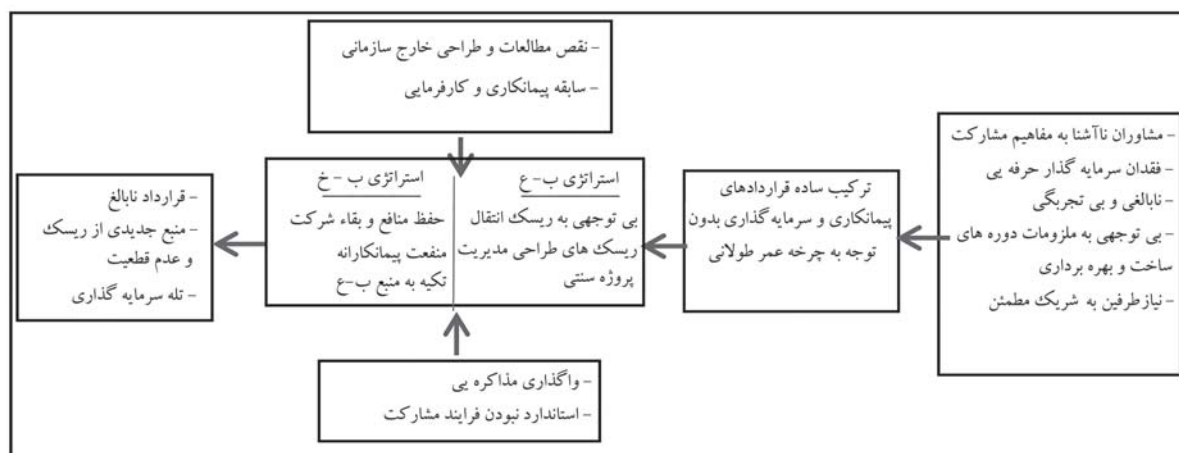
دوره‌ی بهره‌برداری در قراردادهای مشارکت عمومی - خصوصی، بازه‌ی زمانی قابل توجهی دارد که براساس بازگشت اصل و فرع سرمایه‌ی بخش خصوصی محاسبه شده است. با توجه به یافته‌های پژوهش، مشاهده شد که چالش اصلی مشارکت عمومی - خصوصی در دوره‌ی عدم تحقق بازگشت به موقع سرمایه است. در جدول ۴، مقوله‌های استفاده شده در الگوهای عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری ارائه شده است، که هر سطر آن، مؤلفه‌های یک الگو است. با بررسی دقیق و ریزبینانه‌ی الگوهای به دست آمده از عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر و همچنین تحلیل بین مورد‌ها، الگوی پارادایمی عمده‌ی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری به دست آمده است، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مقوله‌های ساخته شده از مفاهیم به دست آمده از مورد‌ها.

موردها (آزادراه)	حوزه‌ی مورد مطالعه	کدبندی	
		محوری	گزینشی
پل زال - اندیمشک	مقوله‌های تدوین قرارداد	۳۰	۱۴
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	۹۵	۱۷
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	۵۲	۲۰
کنارگذر غربی اصفهان	مقوله‌های تدوین قرارداد	۳۸	۱۵
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	۶۱	۲۰
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	۲۹	۲۱
خرم‌آباد - پل زال	مقوله‌های تدوین قرارداد	۳۸	۱۶
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	۳۱	۱۷
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	۵۲	۱۹
ساوه - همدان	مقوله‌های تدوین قرارداد	۵۰	۱۶
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	۵۸	۱۸
	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	۴۷	۲۲

جدول ۲. مقوله‌های ساخته شده در کدبندی گزینشی تدوین قرارداد.

مورد	شرایط علی	محوری	زمینه‌یی	واسطه‌یی	راهبردی	پیامدها
آزادراه پل زال - اندیمشک	- بی‌توجهی به ملزومات مشارکت	ترکیب قرارداد	- دیدگاه کارفرمایی	- سابقه‌ی کمک به	- توسعه‌ی قرارداد	- قرارداد ناپخته
	- نابالغی	قرارداد سرمایه‌گذاری	- دیدگاه پیمانکاری	- پیمانکار درمانده	- معمول	- بی‌توجهی به دوره‌ی بهره‌برداری طولانی
	- دید سطحی به قرارداد		- مدیریت پروژه سنتی (متداول)	- سابقه‌ی چانه‌زنی	- حفظ بقاء شرکت	
	- ناهمسویی اهداف و عملکرد		- محیط پیچیده	- نقص مطالعات	- فرض نظم اول	
					- مدیریت پروژه	
					- انتقال مسائل به بعد	
آزادراه کنارگذر غربی اصفهان	- نقص در قانون مشارکت	قرارداد ناسازگار با مفاهیم سرمایه‌گذاری	- نقص مطالعات و برنامه‌ریزی	- واگذاری مذاکره‌یی	- سرمایه‌گذاری ذیل	- نابالغی قرارداد
	- نابالغی		- محیط پیچیده	- ریسک بخش عمومی	- پیمانکاری	- بی‌توجهی به دوره‌ی بهره‌برداری
	- بی‌توجهی به ملزومات مشارکت		- استاندارد نبودن فرایند مشارکت	- در انتخاب شریک خصوصی	- چشم‌داشت به منابع	
				- عدم قطعیت	- بخش عمومی	
				- تامین مالی	- بی‌توجهی به تامین مالی	
					- داشتن کار و منافع دائمی	
زادراه خرم‌آباد - پل زال	- بی‌توجهی به معیارهای سرمایه‌گذاری	قرارداد ضعیف: (مطالعات ناقص، عدم تخصیص شفاف ریسک‌ها، صلب در مبلغ و سود و معطوف در تعدیل هزینه‌ها)	- عدم قطعیت مطالعات و طراحی	- کم‌توجهی به ملزومات مشارکت	- سرمایه‌گذاری مانند پیمانکاری	- قرارداد منبع عدم قطعیت و ریسک
	- تعجیل قراردادی		- قرارداد بلندمدت	- مطالعات ناقص	- سرمایه‌گذاری مطمئن	- انتقال ریسک‌ها به بعد
	- نابالغی		- سابقه‌ی پیمانکاری و کارفرمایی		- ساده‌نگری به بهره‌برداری	
	- عرق میهنی				- خیرانه	
آزادراه ساوه - همدان	- نابالغی و بی‌تجربگی	ترکیب ساده	- عدم قطعیت	- طراحی ناقص	- بی‌توجهی به ریسک	- قرارداد منبع ریسک
	- مشاوران ناآشنا به مفاهیم مشارکت	قراردادهای پیمانکاری و سرمایه‌گذاری بدون توجه به چرخه‌ی عمر طولانی	- مطالعات و طراحی	- کرپودر	- سرمایه‌گذاری سودآور	- قرارداد ناپخته
	- فقدان سرمایه‌گذار حرفه‌یی		- طراحی برون سازمانی	- بلندمدت بودن قرارداد	- انتقال ریسک‌های طراحی	- تله‌ی سرمایه‌گذار
	- قوانین و آیین‌نامه‌های دولت‌محور				- تجربیات پیمانکارانه	
	- بی‌توجهی به ملزومات دوره‌های ساخت و بهره‌برداری					

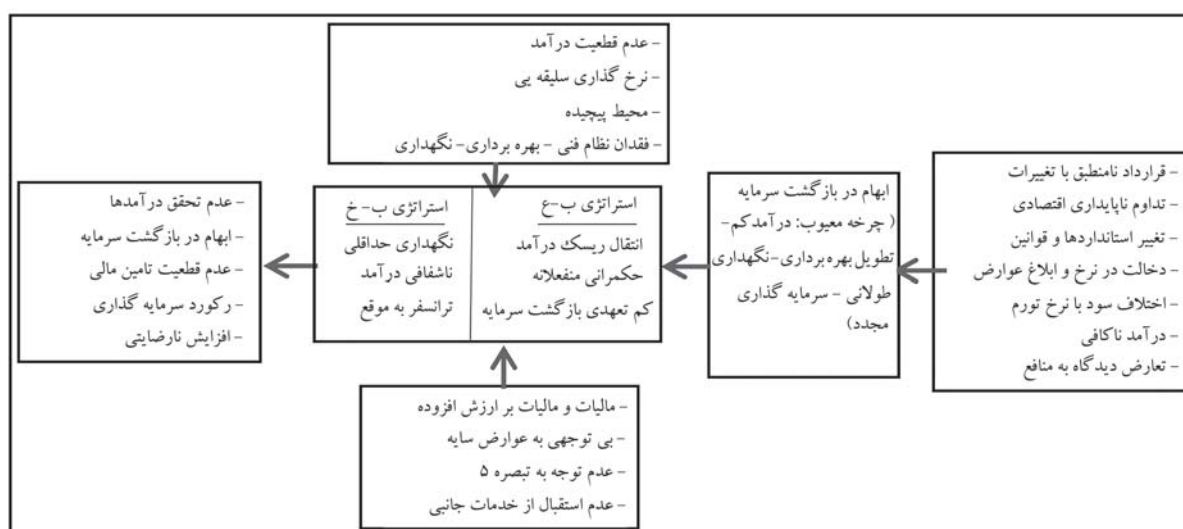


شکل ۱. الگوی پارادایمی عمده‌ی تدوین قراردادهای آزادراهی.



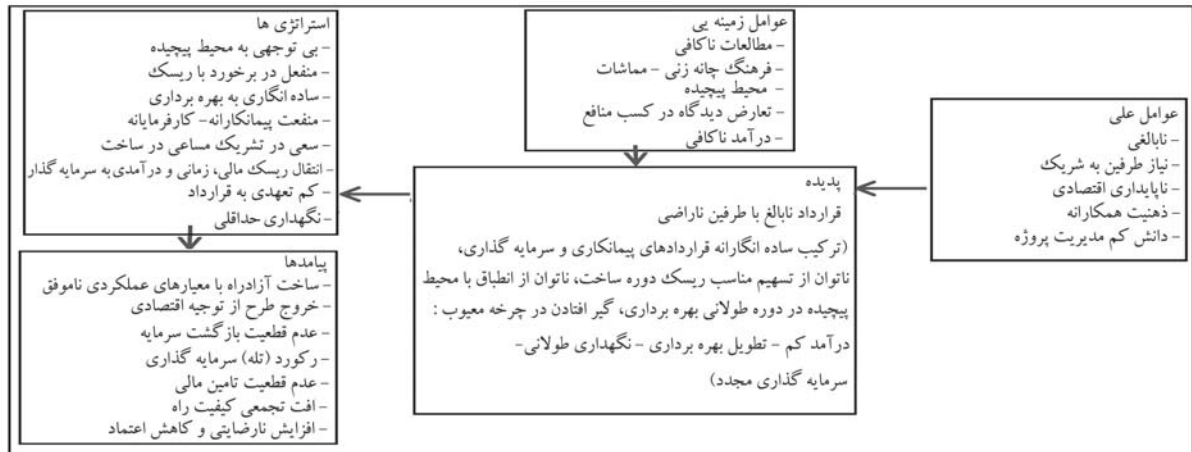
جدول ۴. مقوله‌های ساخته شده در کدبندی گزینشی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری.

مورد	شرایط علی	محوری	زمینه‌ی	واسطه‌ی	راهبردی	پیامدها
آزادراه پل زال - اندیمشک	- دخالت در نرخ و زمان - ابلاغ عوارض - قرارداد نابالغ - اختلاف سود با نرخ تورم - هزینه‌های پیش‌بینی نشده‌ی نگهداری	درآمد پایین و ابهام در بازگشت سرمایه	- بی‌توجهی به منافع شریک - قرارداد نامنتطبق با محیط - محیط پیچیده	- مالیات بر سرمایه‌گذاری - عدم تطابق درآمد - هزینه - عدم استقبال از خدمات جانبی	- انتقال ریسک درآمد - نگهداری حداقلی - انتقال ریسک مالی - مدیریت هوشمند - بی‌تهدی به بازگشت سرمایه	- عدم قطعیت زمان بازگشت سرمایه - درآمد نامناسب - رکود سرمایه‌گذاری در اقتصاد تورمی - عدم تمایل به تداوم مشارکت
آزادراه کنارگذر غربی اصفهان	- قرارداد نابالغ - ناپایداری به قرارداد - دخالت در عوارض - درآمد ناکافی	اختلاف دیدگاه به منافع بازگشت سرمایه	- عدم انطباق قرارداد با شرایط محیطی - فقدان نظام فنی - بهره‌برداری - نگهداری - نهادینگی تاخیر (عدم قطعیت زمان)	- مالیات بر سرمایه‌گذاری و مالیات بر ارزش افزوده - بی‌توجهی به عوارض سایه - عدم توجه به تبصره ۵	- انتقال ریسک درآمد - نگهداری سنتی - انتقال ریسک مالی - عدم شفافیت درآمدها - بی‌تهدی به بازگشت سرمایه - امید به آینده	- تنافر منحنی درآمد سرمایه‌گذاری - سرمایه‌گذاری - ابهام بازگشت سرمایه - افت کیفیت تامین مالی جدید - افزایش نارضایتی
آزادراه خرم‌آباد - پل زال	- قرارداد ضعیف - عقب ماندن سود سرمایه‌گذاری از تورم - افزایش غیرقابل پیش‌بینی هزینه‌ها - عدم درآمد پیش‌بینی شده - عدم تضمین درآمد	عملکرد ناسازگار قرارداد	- عدم قطعیت درآمد - نرخ‌گذاری سابقه‌ی - چالش مالیات	- تحریم بین‌المللی - کاهش تردد	- انتقال ریسک مالی - بی‌توجهی به منافع شریک - کم‌تهدی به بازگشت سرمایه - نگهداری مناسب - پذیرش ریسک - امید به بخش عمومی	- ابهام در بازگشت سرمایه - کاهش ارزش سرمایه - افزایش نارضایتی
آزادراه ساوه - همدان	- ناپایداری اقتصادی - قرارداد ناپخته - تغییر استانداردها و قوانین - ضعف فرهنگی	عدم تناسب درآمد با حجم سرمایه‌گذاری	- کاهش نرخ و تاخیر در ابلاغ عوارض - فقدان نظام فنی - بهره‌برداری - نگهداری - تورم و افزایش شدید قیمت‌ها - احساس بی‌حمایتی در بخش خصوصی	- مالیات و مالیات بر ارزش افزوده - بی‌توجهی به عوارض سایه - عدم توجه به تبصره ۵	- انتقال ریسک درآمد - نگهداری حداقلی - حکمرانی منفعلانه - ناشفافی درآمدها - بی‌توجه به بازگشت سرمایه - امید به آینده	- ابهام در بازگشت سرمایه - عدم تحقق درآمدها - عدم قطعیت تامین مالی - رکود سرمایه‌گذاری - افزایش نارضایتی



شکل ۳. الگوی پارادایمی عمده‌ی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری قراردادهای آزادراهی.





شکل ۴. مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی.

### ۳.۴. مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی

الگوهای مشارکت بخش عمومی - خصوصی در سه دوره: الف) تدوین قرارداد، ب) عملکرد دوره ساخت، و پ) عملکرد دوره بهره‌برداری در چهار آزادراه مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۱ الی ۳ مشاهده می‌شوند. عوامل علی، زمینه‌یی و همچنین راهبردها و پیامدهای هر مشارکت و فضای حاکم بر قراردادهای مذکور، واضح و شفاف روشن شده است. به منظور یکپارچه کردن یافته‌ها و نیل به هدف عمده‌ی پژوهش، الگوهای اخیر با یکدیگر ترکیب و مدل واحدی تدوین شده است. پژوهشگران بیشترین توان خود را برای جامعیت مدل با توجه به مقوله‌های مشابه و متفاوت در الگوها اعمال کرده‌اند. در نتیجه، مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی تدوین شده است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

شرح مقوله‌های اصلی مدل که در واقع یافته‌های مهم پژوهش محسوب می‌شوند و برای تدوین قضیه‌ها از آن‌ها استفاده شده است، به این قرارند:

#### ۱.۳.۴. پدیده‌ی قراردادهای مشارکت آزادراهی

پدیده‌ی (مقوله‌ی هسته) کشف شده عبارت از قرارداد نابالغ با طرفین ناراضی است و در بردارنده‌ی این مفاهیم است که قراردادهای آزادراهی از ترکیب ساده‌انگارانه‌ی قراردادهای پیمانکاری و قراردادهای سرمایه‌گذاری شکل گرفته و دو ضعف عمده‌ی ناتوانی در تسهیم مناسب ریسک در دوره ساخت و ناتوانی در انطباق با محیط پیچیده در دوره طولانی بهره‌برداری دارند. به علاوه سرمایه‌گذاران نیز در یک چرخه‌ی معیوب گیر افتاده‌اند. به این ترتیب که چون درآمد حاصل از بهره‌برداری ناکافی است و با مقادیر پیش‌بینی شده تفاوت دارد، سبب تطویل دوره بهره‌برداری می‌شود. از طرفی، با طولانی شدن دوره بهره‌برداری، نگهداری آزادراه نیز طولانی می‌شود و طبیعتاً هزینه‌های نگهداری که دائماً در حال افزایش است، به عنوان سرمایه‌گذاری جدید، به سرمایه‌گذاری‌های قبلی اضافه می‌شود. تأمین مالی برای سرمایه‌گذاری جدید هم چالش‌زاست و همچنین از طریق بهره‌برداری بازگشت کند به طولانی شدن قرارداد می‌انجامد. بنابراین یک چرخه با پایانی مبهم پیش‌رو است که زمان بازگشت سرمایه، سرمایه را با ابهام روبرو می‌سازد. در نتیجه با توجه به موارد اخیر، فاصله‌ی<sup>۴۹</sup> ملموس بین برنامه‌ریزی تا انجام پروژه و از انجام تا بهره‌برداری از آن وجود دارد که سبب نارضایتی طرفین قرارداد شده است.

#### ۲.۳.۴. عوامل علی

در مدل به ۵ علت اصلی اشاره شده است که در اینجا به آن‌ها اشاره شده است:

— عامل نابالغی و نیاز طرفین به شریک: مطابق گفته‌های بخش خصوصی، مشارکت بخش خصوصی از روی ناچاری است، زیرا در صورتی که پروژه برای انجام وجود نداشته باشد، باید بخش بزرگی از امکانات و عوامل فنی بیکار شوند که این موضوع در شرکت‌های بزرگ پیمانکاری، خطر اضمحلال آن‌ها را در پی خواهد داشت. به این ترتیب بخش خصوصی بدون توجه به ویژگی‌های سرمایه‌گذاری و مشارکت، و فقط برای حفظ شرایط کمینه‌ی خود و همچنین به امید حمایت دولتی که تجربه‌ی آن را در قراردادهای متعارف داشته است، وارد قرارداد شده است. از طرف دیگر، بخش عمومی (دولتی) نیز بدون توجه به محدودیت سقف سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و بی‌توجه به مفهوم ریسک و با تکیه بر دیدگاه سنتی در قراردادهای سه عاملی، به مشارکت نگرسته است. برای مثال، یکی از مصاحبه‌گران بخش عمومی گفته است: چون مطالعات اولیه وجود ندارد و یا بسیار ناقص هستند، برآوردها با خطا همراه است و لذا نمی‌توان در یک فرایند رقابتی اصولی نسبت به جذب سرمایه‌گذار اقدام کرد. همین که یک سرمایه‌گذار وجود داشته باشد، با وی مذاکره صورت می‌گیرد. موارد اخیر نشان از نابالغی طرفین مشارکت دارد.

— عامل ناپایداری اقتصادی: تورم افسارگسیخته، تغییرات پیش‌بینی نشده، کاهش ارزش پول ملی و بی‌ثباتی در قیمت‌ها، گویای ناپایداری اقتصادی هستند. ناپایداری اقتصادی در بعضی پروژه‌ها، هزینه‌ی ساخت و در نتیجه، میزان سرمایه‌گذاری را تا ۳ برابر افزایش داده است.

— عامل ذهنیت همکارانه: در مواردی، طرفین با تشریک مساعی توانسته‌اند بر مشکلات پروژه فائق آیند. ولی در عمل مشاهده شده است که در بسیاری از مواقع با وجود اینکه بخش عمومی قصد همکاری داشته است، یا نتوانسته و یا از نظر سازمانی، امکان همکاری نداشته است. به علاوه یافته‌ها نشان داده‌اند بخش عمومی در بسیاری از مواقع نیز باور به همکاری را برخلاف منش کارفرمایانه دانسته است. در دیدگاه سنتی کارفرمایی، پیمانکار کلاه‌برداری است که همواره می‌خواهد از دولت بکند. به این ترتیب یافته‌ها نشان داده‌اند که در روند مشارکت، ذهنیت و قصد همکاری وجود داشته است، ولی توفیق چندانی حاصل نشده است.

— عامل دانش کم مدیریت پروژه: یافته‌ها نشان داده‌اند طرفین از نظر دانش مدیریت، پروژه و اصولی را که باید در چنین قراردادهایی رعایت کنند، دچار فقر

افت داشته و از آنجا که بخش عمومی، تبصره ۵ قانون مشارکت را هم عمل نمی‌کند، درآمد سرمایه‌گذار ناکافی است.

#### ۴.۳.۴. راهبرد ۴

بخش‌های عمومی و خصوصی، راهبردهای گوناگونی را برای پیشبرد اهداف پروژه به کار بسته‌اند. مهم‌ترین و در عین حال چالش‌زاترین آن‌ها، شامل: بی‌توجهی به محیط پیچیده، منفعل در برخورد با ریسک، ساده‌انگاری به بهره‌برداری، منفعت پیمانکارانه - کارفرمایانه، انتقال نامناسب ریسک‌های مالی، زمانی و درآمدی به سرمایه‌گذار، کم‌تعهدی به قرارداد و نگهداری کمینه بوده است، که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است:

-- راهبرد بی‌توجهی به محیط پیچیده: قراردادی که برای محیط ساده تنظیم شده باشد، نمی‌تواند در محیط پیچیده، عملکرد مناسبی داشته باشد. مهم‌ترین ویژگی قراردادهای در محیط ساده: صلیبیت، نگاه خطی به روندها و فرایندهای اجرای پروژه، پیش‌بینی‌پذیری و فرض برنامه‌پذیر بودن محیط است. یافته‌های پژوهش نشان داد که دیدگاه اصلی طرفین مشارکت، فرض محیط ساده بوده و از ویژگی‌های محیط پیچیده غفلت شده است.

-- راهبرد انفعال در برخورد با ریسک‌ها: بخش عمومی دارای سازمانی وسیع با مدیریت چندلایه ولی کارمندآب بوده و از آنجا که دیدگاه کارفرمایانه در آن جاری است، همواره سرمایه‌گذار را در نقش پیمانکار (نه شریک) نگریسته است. در سازمان مذکور، کرختی قابل ملاحظه‌ای در برخورد با ریسک‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که در انتقال ریسک‌های مالی، زمانی و درآمدی به بخش خصوصی، به منافع وی مانند یک شریک نگاه نشده است. به علاوه، از اصول تخصیص ریسک که مهم‌ترین آن‌ها، شامل: امکان مدیریت ریسک، هزینه مدیریت ریسک و انگیزه کنترل ریسک است، نیز در انتقال ریسک‌ها توجه نشده است. به این ترتیب، به جای برخورد فعال با ریسک، ساده‌ترین راه یعنی انفعال و سپس انتقال طرف مقابل لحاظ شده است.

-- راهبرد ساده‌انگاری به دوره‌ی بهره‌برداری: موضوع بهره‌برداری یک کار تخصصی است، که باید به شرکت‌های حرفه‌ای واگذار شود. بخش خصوصی که پیشینه‌ی پیمانکاری داشته و در مشارکت با عنوان سرمایه‌گذار وارد شده است، فاقد ویژگی‌های یک بهره‌بردار حرفه‌ای است. بخش‌های عمومی و خصوصی در قراردادهای مشارکت، به سادگی با موضوع برخورد کرده و در نتیجه سه نقش: سرمایه‌گذار، پیمانکار و بهره‌بردار به طور هم‌زمان به بخش خصوصی واگذار شده است.

-- راهبرد سعی در تشریک مساعی: طرفین بر این واقعیت واقف بوده‌اند که در قراردادهای مشارکتی، تشریک مساعی یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت و رسیدن به اهداف شراکت است. یافته‌ها نشان داده‌اند که طرفین در دوره‌ی ساخت، همواره نیت و قصد همکاری داشته و در مواردی هم با تشریک مساعی توانسته‌اند بر مشکلات پروژه فائق آیند. موافقت با تغییرات در طرح به منظور کاهش هزینه و زمان، مثال بارزی از این تشریک مساعی است که از نکات مثبت قراردادهای مشارکتی ارزیابی شده است.

-- راهبرد کم‌تعهدی به قرارداد: دخالت در تعیین میزان نرخ عوارض، تأخیر در ابلاغ عوارض، عمل نکردن به قانون مشارکت (مانند تبصره ۵)، تأخیر در تأمین مالی سهم‌الشراکه و تأخیر در استملاک اراضی، از جمله موارد مهم کم‌تعهدی به قرارداد است.

مزمن هستند. شواهدی مانند بی‌توجهی به مفاد یک قرارداد پخته، بی‌توجهی به مطالعات ریسک، بی‌توجهی به ملزومات شراکت، نداشتن برنامه‌ریزی برای برخورد اصولی با ریسک، فهم ناقص از مشارکت و مواردی از این قبیل نشان می‌دهند طرفین، دانش مدیریت پروژه‌ی کافی نداشته و به دنبال حل مشکلات و پیشبرد امور پروژه از طریق سنتی و تجربیات پیمانکار - کارفرما بوده‌اند.

#### ۴.۳.۴. عوامل زمینه‌یابی

عواملی زمینه‌یابی در مدل ارائه شده به منظور اختصار از ترکیب عوامل بستری و عوامل واسطه‌یابی تدوین یافته است که به این ترتیب به آن‌ها توجه می‌شود:

-- فرهنگ چانه زنی - مماشات: بخش‌های عمومی و خصوصی به ترتیب با سابقه‌ی کارفرمایی و پیمانکاری، تجربه‌ی انجام پروژه‌های زیادی داشته‌اند. بخش دولتی کارفرما، در عین دقت در امور قراردادی و مالی، برای پیشبرد پروژه از جهت همکاری با پیمانکار، به دلایل مختلف در بسیاری موارد با وی مماشات کرده است. پیمانکار هم به جهت تأمین مالی دولتی، همواره چشم به بودجه‌ی کارفرما داشته و برای دریافت تسهیلات و اعتبارات، مجبور به چانه‌زنی بوده است. نکته‌ی مهم این است که طرفین مشارکت، فرهنگ ذکر شده‌ی قراردادهای سه عاملی را با خود به قراردادهای مشارکت آورده‌اند.

-- شکل‌گیری محیط پیچیده: محیط پروژه در ایران، محیطی مملو از تغییر در قوانین، ناپایداری اقتصادی، پر ریسک، وجود منابع عدم قطعیت فراوان و تحت تأثیر شدید تصمیم‌گیری‌های کلان سیاسی و رخداد‌های بین‌المللی است که در مجموع، محیط پروژه به محیطی با تغییرات غیرخطی و پیش‌بینی‌ناپذیر تبدیل و برنامه‌ریزی در آن غیرممکن یا سخت شده است. علاوه بر موارد اخیر، ماهیت قراردادهای BOT (مانند تعدد قراردادهای در یک قرارداد جامع و بلندمدت بودن قرارداد) بر پیچیدگی محیط افزوده است. محیط اشاره شده نه فقط از توان مدیریت بخش خصوصی خارج است، بلکه در مواردی هم بخش عمومی از مدیریت آن عاجز و به ناچار آن را پذیرفته است.

-- عامل تعارض دیدگاه در کسب منافع: یکی از مهم‌ترین مشکلات مشارکت، تعارض دیدگاه بخش عمومی با بخش خصوصی به منافع بازگشت سرمایه است. دیدگاه بخش عمومی این است که اگر بازگشت سرمایه در زمان موردنظر محقق نشود، با تطویل دوره‌ی بهره‌برداری، سود معادل بانکی سرمایه‌گذاری را به سرمایه‌گذار می‌دهد. اما بخش خصوصی معتقد است سودی که پس از چند سال از مدت پیش‌بینی شده در قرارداد به دستش می‌رسد، نه فقط سود نیست، بلکه ضرر هم است. زیرا تورم حاکم بر اقتصاد ایران همواره از سود بانکی عقب‌تر است. از طرفی دیگر، از آنجا که سود در اقتصاد ایران ناشی از تورمی است که به مالک و صاحب یک ارزش تعلق می‌گیرد، با طولانی شدن قرارداد و عدم انتفاع سرمایه‌گذار از افزایش ارزش آزادراه، تعارض اشاره شده عمیق‌تر می‌شود.

-- عامل درآمد ناکافی: بخش عمومی در ابلاغ نرخ عوارض هم از نظر میزان عوارض توافق شده در قرارداد، و هم از نظر زمان ابلاغ، شرایط قرارداد را رعایت نمی‌کند. تا حدی که یکی از مصاحبه‌گران بخش خصوصی گفت: ما در قرارداد داشتیم که ۱۲٪ سالانه به عوارض اضافه شود. تا قبل از سال ۸۹ ما عوارض را طبق قرارداد، خودمان تعیین و با یک نامه فقط اعلام می‌کردیم؛ ولی از سال ۸۹ دخالت دولت آغاز شد و تا دو سال حتی اجازه‌ی افزایش هم نداشتیم. الان عوارض را مستقیماً دولت تعیین می‌کند و فقط از ما نظر می‌خواهند. این نمونه‌ی از دخالت در مفاد قرارداد است. از طرف دیگر، اتفاق‌های طبیعی، مانند ویروس کرونا، تعداد سفرها را بسیار کاهش داده است. بنابراین در مجموع، درآمد آزادراه

-- راهبرد نگهداری کمینه: در اثر افزایش هزینه‌های نگهداری نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده در قرارداد، امکان رعایت استانداردها ضعیف شده است. در استانداردهای بین‌المللی حدود ۲ الی ۶ درصد هزینه ساخت، صرف هزینه نگهداری سالیانه می‌شود و این در حالی است که مطابق قرارداد، ۱۵٪ از درآمد آزادراه به نگهداری اختصاص می‌یابد. به این ترتیب، نگهداری به میزان کمینه می‌تواند کاهش یافته است.

#### ۵.۳.۴. پیامدهای مشارکت

یافته‌های پژوهش از منظر پیامدهای قراردادهای مشارکت آزادراهی، مهم‌ترین و در عین حال نشان‌دهنده وضعیت به ظهور رسیده قراردادهای اخیر هستند که به این ترتیب تشریح شده‌اند:

-- پیامد ساخت آزادراه با اهداف عملکردی ناموفق: اگر اهداف عملکردی شامل: هزینه، زمان، کیفیت، ریسک، منافع و رضایت باشد و قرار باشد به‌طورکلی درخصوص تحقق آن‌ها اظهارنظر شود، یافته‌های حاصل از چهار مورد چنین نشان می‌دهند که:

الف) از نظر هزینه، ریسک، و منافع، هیچ‌کدام از پروژه‌ها موفق نبوده‌اند. زیرا، اولاً پروژه‌ها با هزینه تمام شده به مراتب بیشتر از هزینه اولیه بوده‌اند، ثانیاً چون مطالعات ریسک انجام نشده بوده است، ریسک‌های متعددی رخ داده‌اند که اغلب از توان کنترل و مدیریت بخش خصوصی خارج بوده و چالش‌زا شده‌اند و ثالثاً اگر منافع بخش‌های عمومی و خصوصی عبارت از: سود مناسب، هزینه کم و زمان پیش‌بینی شده پایان قرارداد باشد، یافته‌ها نشان از عدم تحقق آن‌ها دارند.

ب) از نظر زمان ساخت، در پروژه‌هایی که سرمایه‌گذار آن بنیه مالی قوی داشته است، به هدف زمانی رسیده است؛ ولی در مواردی هم تأخیر چندساله مشاهده شده است. زمان بهره‌برداری که اهمیت آن در بازگشت سرمایه است، در کلیه موارد با تأخیر همراه بوده است.

پ) موضوع عدم رضایت کاملاً مشهود است، ولی با توجه به اهمیت یافته‌های پژوهش در این خصوص، پیامد نارضایتی در بند دیگری مفصلاً بیان شده است.

-- پیامد خروج طرح از توجیه اقتصادی: طولانی شدن دوره ساخت، افزایش قیمت‌ها، تحمیل تأمین مالی اضافی به سرمایه‌گذار، تأخیر در بهره‌برداری و تطویل دوره بهره‌برداری، منجر به این شده است که توجیه اقتصادی طرح زیر سؤال رود. عدم قطعیت در زمان بازگشت سرمایه در کلیه موارد، چالش اصلی به شمار می‌رود و در مجموع، توجیه اقتصادی پروژه به شدت ضعیف شده به نظر رسیده است.

-- پیامد رکود (تله) سرمایه‌گذاری: از آنجا که برای سرمایه‌گذار در پروژه‌های آزادراهی، مالکیتی برای بخش خصوصی ایجاد نمی‌شود، لذا تأخیر در بازگشت سرمایه، نه فقط سودی ندارد، بلکه با توجه به اختلاف سود سرمایه‌گذاری با تورم اقتصادی، ضرر هم دارد. بر این اساس، سرمایه‌گذاران خود را در یک تله سرمایه‌گذاری می‌بینند. تله‌ای که به واسطه عدم وجود انعطاف در قرارداد، سرمایه‌گذار باید به آن تمکین کند. البته با تمکین وی، سرمایه‌گذاری به رکود افتاده و امکان توسعه سرمایه برای بخش خصوصی منتفی شده است.

-- پیامد افت تجمعی کیفیت راه: کم بودن بودجه نگهداری آزادراه از یک سو و تأثیر منفی ریسک‌های دوره بهره‌برداری و افزایش هزینه‌ها در دوره اخیر از سوی دیگر، سبب ناتوانی سرمایه‌گذار در نگهداری استاندارد آزادراه شده است که در درازمدت، افت کیفیت را به همراه دارد.

-- پیامد افزایش نارضایتی و کاهش اعتماد: با مرور یافته‌های پژوهش حاضر، جامع‌ترین و عمومی‌ترین پیامدی که مشاهده شده است، همین پیامد اخیر است. پیامد افزایش نارضایتی و کاهش اعتماد را در واقع می‌توان پیامدها نامید. به این معنی که به دلایل: قرارداد نابالغ، معیارهای عملکردی ناموفق، خروج سرمایه‌گذاری از توجیه اقتصادی، عدم قطعیت بازگشت سرمایه، رکود سرمایه‌گذاری و تحمیل تأمین مالی اضافی برای نگهداری در دوره بهره‌برداری، همگی معیارهای نامطلوبی برای بخش خصوصی تلقی می‌شوند. از طرف دیگر، بخش عمومی نیز از آنجا که خود را مالک آزادراه می‌داند، عدم موفقیت در اهداف عملکردی را با اهداف سازمانی و توسعه‌ی ملی ناسازگار می‌داند. از این رو، می‌توان نارضایتی و کاهش اعتماد را دوطرفه دانست و با نگاهی آسیب‌شناسانه، برای اصلاح سیستم مذکور کوشید.

#### ۴.۴. قضایای نظری پیشنهادی مبتنی بر مدل نظری

قضایای نظری مشتمل بر روابط و مفاهیم مطرح در مدل نظری هستند. در پژوهش حاضر، با توجه به نظام مشارکتی پروژه‌های آزادراهی و نگاهی آسیب‌شناسانه به فرایندهای تدوین قرارداد و عملکرد مطلوب در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری، در مجموع سه قضیه به این شرح مطرح شده است که هر یک از آن‌ها در قالب یک فرضیه قابل طرح در پژوهش‌های آتی هستند.

قضیه ۱: ویژگی‌های بلوغ در مشارکت، اصول انتخاب شریک، پایداری اقتصادی، دانش مدیریت پروژه و تشریک مساعی، عوامل علی در توسعه مشارکت بخش‌های عمومی و خصوصی در قراردادهای آزادراهی هستند.

قضیه ۲: ویژگی‌های زمینه‌ی و واسطه‌ی مشتمل بر: کفایت مطالعات، فرهنگ مشارکت به جای فرهنگ کارفرما - پیمانکار، محیط پیچیده، ناهم درکسب منافع و کفایت درآمد، عوامل بسترساز در قراردادهای مشارکت آزادراهی هستند.

قضیه ۳: نتایج و پیامدهای مشارکت بخش‌های عمومی و خصوصی در پروژه‌های آزادراهی، مشتمل بر: معیارهای عملکردی ناموفق، حفظ توجیه اقتصادی طرح، قطعیت زمان بازگشت سرمایه، امنیت سرمایه‌گذاری، قطعیت میزان تأمین مالی، کیفیت، رضایت و ایجاد اعتماد هستند.

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

#### ۱.۵. نتایج پژوهش

در پژوهش حاضر، حجم بالایی از اطلاعات میدانی به دست آمده است که منجر به دستیابی به اشباع نظری شده است. تدوین الگوهای پارادایمی نشان داد که تفاوت‌های عمده بین یافته‌های چهار مورد پژوهش ناچیز است و تقریباً همگی آن‌ها درگیر چالش‌های نسبتاً مشخص و مشترکی بوده‌اند.

با دقت در یافته‌ها، توجه به الگوهای پیش‌گفته و مدل نظری تدوین‌شده، این نتایج به دست آمده است:

۱. در ایران به دلایل: ناپایداری اقتصادی، ناهم‌راستایی قانون مشارکت با سایر قوانین، ریسک زیاد و پیش‌بینی ناپذیری تغییرات، محیط پروژه پیچیدگی بالایی دارد که تأثیر عمده‌ی آن در بروز عدم قطعیت در هزینه، زمان و درآمد نمایان شده است.
۲. طرفین مشارکت به آثار و پیامدهای راهبردهای خود توجه کافی ندارند. راهبردهای شاخصی، همچون: انتقال ریسک‌های مالی، زمانی و درآمدی به بخش خصوصی،

با اصول تخصیص ریسک منافات دارد؛ زیرا بخش خصوصی نه توان، نه امکان و نه بودجه‌ی مدیریت آن را دارد.

۳. نوع تفکر و تعاملات دوره‌ی منتهی به انعقاد قرارداد مشارکت، نشان از: ترکیب ساده‌ی قراردادهای پیمانکاری و سرمایه‌گذاری بدون توجه به چرخه‌ی عمر طولانی پروژه‌هاست. بی‌توجهی به ملزومات مشارکت، نابالغی و استاندارد نبودن فرایند مشارکت، عوامل عمده‌ی این خطای راهبردی شناسایی شده‌اند. تدوین قرارداد ناپخته نیز خود منبع عدم قطعیت و ریسک‌های بعدی شده است. به علاوه، به دلیل تسریع در انعقاد قرارداد از طرف بخش عمومی و انتخاب راهبرد حفظ بقاء به هر قیمت از طرف بخش خصوصی، ریسک‌های نقص مطالعات و طراحی به دوره‌های ساخت پروژه و بهره‌برداری از آن انتقال یافته است. در نتیجه، بخش خصوصی با گرفتار شدن در ریسک‌های متعدد، احساس گرفتاری در تله‌ی سرمایه‌گذاری دارد.

۴. یافته‌های دوره‌ی ساخت نشان می‌دهند که دوره‌ی ساخت مستقیماً تحت تأثیر توانمندی مالی سرمایه‌گذار قرار دارد. به طوری که سرمایه‌گذاران با توان مالی بالا، حتی زودتر از موعد پیش‌بینی شده توانستند به بهره‌برداری برسند، ولی سرمایه‌گذاران ضعیف‌تر، با تأخیر زیاد مواجه شده‌اند. بنابراین انتخاب سرمایه‌گذار، از این منظر شایسته‌ی توجه بیشتر است. از طرفی دیگر، در دوره‌ی ساخت، اگر چه طرفین سعی در عملکرد همدلانه داشته‌اند، ولی فهم ناقص از تعهدات قراردادی، عدم قطعیت در میزان تأمین مالی و سپس کرختی نسبت به تأمین منافع سرمایه‌گذار، سبب نارضایتی بخش خصوصی شده است.

۵. یافته‌های دوره‌ی بهره‌برداری حاکی از عدم تناسب درآمد با حجم سرمایه‌گذاری دارد، که نتیجه‌ی آن ایجاد چرخه‌ی معیوب (درآمد ناکافی - طولانی شدن دوره‌ی بهره‌برداری - افزایش دفعات بازسازی - نیاز به سرمایه‌گذاری مجدد) شده است. عواملی مانند: دخالت در تعیین نرخ و زمان ابلاغ عوارض، عدم تطابق هزینه - درآمد و افزایش غیرقابل پیش‌بینی هزینه‌ها سبب ایجاد چرخه‌ی معیوب و تعارض دیدگاه طرفین به کسب منافع طرف مقابل، سبب تشدید آن شده است. پیامدهایی مانند: رکود سرمایه، ابهام در امنیت سرمایه‌گذاری، افزایش نارضایتی و کاهش تمایل به تداوم قراردادهای مشارکتی مهم‌ترین پیامدهای شناسایی شده هستند.

۶. مطابق سند چشم‌انداز تا سال ۱۴۰۴ قرار بر ساخت ۱۰۰۰۰ کیلومتر آزادراه بوده است و این در حالی است که طول کل آزادراه‌های کشور تاکنون (حدود ۳۰

سال پس از تصویب قانون مشارکت) به کمتر از ۳۰۰۰ کیلومتر رسیده است که بعید به نظر می‌رسد صنعت راه در این ۴ سال باقیمانده، به هدف نزدیک شود. بنابراین یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد بخش عمومی در حوزه‌ی آزادراه، توفیق قابل ملاحظه‌ای در مشارکت با بخش خصوصی نداشته و حتی رغبت سرمایه‌گذاران نیز که کاهش یافته است، با واقعیت‌های میدانی تطابق دارد.

۷. از آنجا که پروژه‌های زیربنایی مشارکت آزادراهی، بلندمدت هستند، سرمایه‌گذاران ویژه‌ی به آن‌ها جذب شده و مطلوبیت کمتری نزد سرمایه‌گذاران داشته‌اند. در دنیا، دولت‌ها به دلیل اهداف توسعه‌ی، بیشتر نقش حامی، پشتیبان و تسهیل‌گر را دارند. در مقابل، بخش خصوصی به پروژه‌های زیربنایی نگاه آرمانی و دغدغه‌مند ندارد، بلکه از منظر منافع عمدتاً اقتصادی به آن‌ها می‌نگرد. به این ترتیب بخش عمومی و با دیدگاه کلان‌تر دولت، برای پیشبرد اهداف خویش باید نگاه متفاوتی از نگاه موجود به چنین سرمایه‌گذاری‌هایی داشته باشد.

۸. مدل به‌دست آمده مؤید این واقعیت است که نظام قراردادی موجود که مبتنی بر تجارب کارفرمایان - پیمانکارانه بوده است، در اثر انطباق‌ناپذیری با محیط پیچیده، پرریسک و پیش‌بینی‌ناپذیر پروژه‌ی در کشور، در فرایند مشارکت گرفتار چالش‌های متعدد بوده و پیامدهای مطلوب و رضایت‌باری ایجاد نشده است. بنابراین برای تحقق اهداف توسعه‌ی باید اصلاحات ساختاری و تغییرات هنجاری در قرارداد مشارکت و راهبردهای طرفین در انجام مشارکت ایجاد شود.

## ۲.۵. پیشنهادهای پژوهشی آتی

الف) روش‌های تأمین منابع مالی پروژه‌های سرمایه‌گذاری متناسب با محیط پیچیده‌ی ایران؛

ب) راهکارهای بلوغ‌رسانی و نهادینه‌سازی مشارکت در بخش‌های عمومی و خصوصی؛

پ) روش‌های نوین مشارکت و متناسب با واقعیت‌های جامعه‌ی ایران (ایرانیزه کردن مشارکت)؛

ت) راهکارهای مالی - حقوقی برای توسعه‌ی ابزارها و بازارهای مالی با هدف خرید و فروش پروژه‌های مشارکتی؛

ث) راهکارها و مؤلفه‌های هنجاری انطباق‌پذیری قراردادهای مشارکت آزادراهی با محیط پیچیده.

## پانویس‌ها

1. public private partnership (PPP)
2. build operate transfer (BOT)
3. Delmon
4. package
5. Demirel
6. reductionism
7. positivistism
8. chaos

9. complex
10. project delivery system (PDS)
11. finance
12. project delivery method
13. procurement method
14. basis of reimbursement
15. design build finance (DBF/BOT)
16. Klakegg
17. Chen & Doloi
18. Turina & Car-Pusic
19. Alison & Sherif

20. Durdyev & Ismail
21. Khan
22. PMBOK
23. PRINCE2
24. Hilson
25. Khodeir & Nabawy
26. Sandhyavetri
27. Xu
28. Nguyen
29. Turner
30. Borison
31. complexity environment
32. interaction
33. Hass, K
34. Remington & Pollack
35. butterfly effect
36. Malatesta & Smith
37. flexible governance
38. Paslawski
39. Dunn
40. post positivism
41. constructivism
42. advocacy/participatory
43. pragmatism
44. Lalonde
45. scientific - professional discipline
46. epistemology
47. typological
48. Case
49. mismatch

## منابع (References)

1. Abdel Aziz, A.M. "Successful delivery of public-private partnerships for infrastructure development", *Journal of Construction Engineering and Management*, **33**(12), pp. 918-931 (2007).
2. Dhanshyam, M. and Srivastava, S.K. "Governance structures for public infrastructure projects: Public-private management regimes, contractual forms and innovation", *Construction Management and Economics* (2021). DOI/10.1080/01446193.2021.1938162.
3. Sun, H., Liang, Y., Wang, Y. and et al. "An Optimal investment portfolio for BOT freeway projects from the perspective of transportation and construction enterprises", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **25**, pp. 3636-3649 (2021).
4. Lal, N.S. and Mathew, A.M. "Identification of risk factors leading to cost and time overrun in B-O-T projects", *Special Issue. International Conference on Innovative Trends in Engineering for sustainability*, **10**(1) (2021).
5. Delmon, J. "Understanding options for public-private partnerships in infrastructure: sorting out the forest from the trees-BOT, DBFO, DCMF, Concession, Lease.", *World Bank Policy Research Working Paper* (2010).
6. Leendertse, W., Volker, L. and Hertogh, M. "Flexibility in PPP contracts -Dealing with potential change in the pre-contract phase of a construction project", *Construction Management and Economics*, **35**(4), pp. 196-206 (2016).
7. Danaee Fard, H. and Alvani, S.M. "Theory of order in disorder in management", *Saffar* (In Persian) (2015).
8. Plan and Budget Organization, "A Report of Status of participation projects in the construction of freeways", (In Persian) (2012).
9. Abd El Khalek, H., Aziz, R.F. and Kamel, H.M. "Risk and Uncertainty Assessment Model in Construction Projects Using Fuzzy Logic", *AJCE*, **4**(1), pp. 24-39 (2016).
10. Dorsey, R. "Project delivery systems for building construction", Washington, D.C., Associated General Contractors of America (1997).
11. Emamjomeh Zade, M.H., *Project Delivery Systems*, Educational Booklet.
12. Klakegg, O.J., Pollack, J. and Crawford, L. "Preparing for successful collaborative contracts", *Sustainability*, **13**(1), p. 289 (2021).
13. Chen, C. and Doloi, H. "BOT application in China: Driving and impeding factors", *International Journal of Project Management*, **26**(4), pp. 388-398 (2008).
14. Durdyev, S. and Ismail, S. "The build-operate-transfer model as an infrastructure privatisation strategy for Turkmenistan", *Utilities Policy*, **48**, pp. 195-200 (2017).
15. Turina, N. and Car-Pusic, D. "Overview of PPP models and the analysis of the opportunities for their application", University of Rijeka (2006).
16. McCowan, A. and Mohamed, Sh. "Evaluation of build-operate transfer (BOT) project: Opportunities in developing countries", Griffith University, Queensland, Australia (2002).
17. Khan, A.H. and Jamil, M. and Sattar, M. "The trend of build operate and transfer (BOT) projects in Pakistan", *Conference ICCIDC-I*, Karachi, Pakistan (2008).
18. Hilson, D. "Measuring changes in risk exposure", *The Measured*, **4**(3), pp. 11-14 (2004).
19. Thomas, A.V., Kalidindi, S.N. and Ganesh, L.S. "Modelling and assessment of critical risks in BOT road projects", *Construction Management and Economics*, **24**(4), pp. 407-424 (2006).
20. Khodeir, L.M. and Nabawy, M. "Identifying key risks in infrastructure projects - Case study of Cairo Festival City project in Egypt", *Ain Shams Engineering Journal*, **10**(3), pp. 613-621 (2019).
21. Sandhyavetri, A., Malik, A., Suprayogi, I. and et al. "Risk and uncertainty in the medan-binjai toll road infrastructure project, Indonesia based on the stochastic analyzes", *EJERS (European Journal of Engineering Research and Science)*, **3**(6), pp. 39-46 (2018).
22. Xu, Y.; Yeung, J.F.Y.; Chan, A.P.C. and et al. "Developing a risk assessment model for PPP projects in China - A fuzzy synthetic evaluation approach", *Automation in Construction*, **19**(7), pp. 929-943 (2010).
23. Nguyen, D.A. "Improving public-Private Partnership Contracts through Risk: Characterization, Contract Mechanisms, and Flexibility", *Virginia Polytechnic Institute and State*, Blacksburg, Virginia (2017).
24. Turner, J.R., *Handbook of Project Based Management*, 4th ed., McGraw-Hill (2014).
25. Fallah Shams, M.F., Tajmir Riahi, H. and Mozafari, H. "Risk management in financial contracts BLT/BOLT", (In Persian) (2008).

26. Shahbazi Razlighi, Y. and Sobhiyah, M. H. and Danaeefard, H., "Obstacles to public and nongovernmental collaboration in BOT freeway projects in Iran", *Journal of Structural and Construction Eng. (JSCE)*, **7**(3-35), pp. 109-129 (In Persian) (2019).
27. Chapman, R.J. "The controlling influences on effective risk identification and assessment for construction design management", *International Journal of Project Management*, **19**(3), pp. 147-160 (2001).
28. Jaafari, A. "Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: Time for a fundamental shift", *International Journal of Project Management*, **19**(2), pp. 89-101 (2001).
29. Borison, A.A. and Hamm, G. "Better power contracts: Using flexibility to increase value", *The Electricity Journal*, **18**(10), pp. 62-69 (2005).
30. Saynisch, M. "Mastering complexity and changes in projects, economy, and society via project management second order (PM-2)", *Project Management Journal*, **41**(5), pp. 4-20 (2010).
31. Nazari, A., Forsat Kar, E. and Kiafar, B. "Risk management in projects: Plan and budget organization", Tehran, Iran (In Persian) (2008).
32. Othman, M., Zain, A. and Hamdan, A.R. "A Review on project management and issues surrounding dynamic development environment of ICT project: Formation of research area", *International Journal of Digital Content Technology and its Applications (JDCTA)*, **4**(1), pp. 96-105 (2010).
33. Cristobal, J.R.S. "Complexity in project management", *Procedia Computer Science*, **121**, pp. 762-766 (2017).
34. Low, C. "Introducing the new project complexity model: Part I", [Online] (Available: [www.projecttimes.com/articles/introducing-the-new-project-complexity-mod](http://www.projecttimes.com/articles/introducing-the-new-project-complexity-mod)<https://el-part-i.html>).
35. Remington, K. and Pollack, J., *Tools For Complex Projects*, Gower Pulishing Limited, USA, England (2008).
36. Nguyen, T.S. and Mohamed, S. "Stakeholder management in complex projects", *Proceedings the 7TH World Construction Symposium*, Ceylon Institute of Builders (2018).
37. Mirmoezzi, Seyed M.M. and Sobhiyah, M.H. "Identifying and explaining the effecting factors in environmental complexity of public private partnership projects: Case study: Freeway partnership contracts of Iran", *Journal of Structure and Construct*, **8**, pp. 114-134 (In Persian) (2019).
38. Malatesta, D. and Smith, C. "Designing contracts for complex services", *Public Administration*, **92**(3), pp. 531-548 (2014) [Online] (Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/padm.12004>).
39. Paslawski, J. "Flexible approach for construction process management under risk and uncertainty", *Procedia Engineering*, **208**, pp. 114-124 (2017).
40. Dunn, R. "Adaptive leadership: Leading through complexity", *Journal of the commonwealth council for educational*, **48**(1), pp. 31-38 (2020).
41. Danaee Fard, S.H. "Recearch design: Qualitative, quantitative and mix methods", 1st ed.: Mehraban (in Persian) (2013).
42. Lalonde, P., Bourgault, M. and Findeli, A. "Building pragmatist theories of PM practice: Theorizing the act of project management", *Project Management Journal*, **41**(5), pp. 21-36 (2010).
43. Farasatkah, M. "Research method in social sciences: With grounded theory emphasis", 1st ed. Tehran: Nashre Agah (In Persian) (2017).

# ارزیابی نقش متغیرهای پنهان فردی در پذیرش سیاست‌های مدیریت تقاضا (نمونه‌ی موردی: طرح ترافیک زوج یا فرد در تهران)

علیرضا ماهپور\* (استادیار)

دانشکده‌ی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

سعیده سعیدی شهردور (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، مؤسسه‌ی عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی

مهندسی عمران (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۴۱-۵۲، (پژوهشی)

مشکلات ناشی از استفاده‌ی خودروی شخصی منجر به توسعه‌ی سیاست‌های مدیریت تقاضا شده است، که نتیجه‌ی آن می‌تواند کاهش استفاده از خودروی شخصی باشد. سیاست‌های مدیریت تقاضا را می‌توان در سطح کلان به دو دسته‌ی سخت و نرم تقسیم‌بندی کرد. پذیرش عمومی سیاست‌های نرم راحت‌تر است، اما افراد نسبت به پذیرش سیاست سخت مقاومت می‌کنند. هدف از پژوهش حاضر، سنجش مقاومت افراد به پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی است. هدف مذکور با بررسی میزان پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی در قالب تغییر رفتار سفر با گردآوری بیش از ۵۰۰ پرسش‌نامه به صورت تصادفی در میان شهروندان تهرانی در محدوده‌ی طرح زوج یا فرد و محدوده‌ی طرح ترافیک در سال ۱۳۹۶ سنجیده شده است. با استفاده از مدل لجوجیت چندگانه به بررسی تغییر رفتار افراد در پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودروی شخصی در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته‌یی) و میان‌مدت (۱ ماهه) پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که ارزش‌ها و هنجارهای فردی از عوامل مؤثر در تغییر رفتار کاربران در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت است.

واژگان کلیدی: نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار، مدیریت تقاضا، متغیر پنهان، تغییر رفتار.

a\_mahpour@sbu.ac.ir  
s.saeedi@imps.ac.ir

## ۱. مقدمه

مانند: راحتی، کاهش زمان سفر، و عدم وابستگی است. به علاوه، استفاده از خودروی شخصی، نشان‌دهنده‌ی موقعیت اجتماعی (نمادی از ثروت و شخصیت) است. عوامل ذکر شده، که انگیزه‌های غیرقابل مشاهده برای استفاده از خودروی شخصی هستند، معضلی برای تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی افراد هستند. زیرا پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی به معنی دست کشیدن از منابع و منافع شخصی برای کاربران خودروی شخصی محسوب می‌شود. بر این اساس، مطالعات پیشین نشان داده است که اجرای سیاست‌های سخت به تنهایی در کاهش استفاده از خودروی شخصی کافی نیست یا برای مدت کوتاهی مؤثر است. لذا در نظر گرفتن سیاست‌های نرم در کنار سیاست‌های سخت می‌تواند نتیجه‌ی مطلوب‌تری داشته باشد.

در مطالعات پیشین برای کسب شناخت در فرایند تصمیم‌گیری فرد، مدل‌های انتخاب با ساختار متغیر پنهان غنی شده است. در پژوهش حاضر، از نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار (VBN)<sup>۲</sup> برای بررسی نگرش‌های محیط‌زیستی استفاده شده است. رفتار حامی محیط‌زیست در نتیجه‌ی فعال شدن هنجارهای فردی طی فرایند

هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی (آلودگی هوا و راه‌بندان)، نتیجه‌ی تراکم ترافیکی خودروهای شخصی هستند. کاهش تراکم ترافیکی منوط به استفاده‌ی کمتر از خودروی شخصی و استفاده‌ی بیشتر از وسایل حمل‌ونقل همگانی است. سیاست‌گذاران حمل‌ونقلی با استفاده از سیاست‌های مدیریت تقاضا (TDM)<sup>۱</sup>، افراد را به سمت استفاده از وسایل حمل‌ونقل همگانی ترغیب می‌کنند. سیاست‌های مدیریت تقاضا به طور کلی از طریق مکانیسم‌های گوناگون بازدارنده و تشویقی به دو دسته‌ی سخت و نرم طبقه‌بندی می‌شوند.<sup>[۱]</sup> افزایش قیمت پارکینگ، عوارض جاده‌ها و قیمت‌گذاری راه‌بندان، نمونه‌هایی از سیاست‌های سخت هستند و در مقابل، اقدام‌هایی چون افزایش آگاهی (فرهنگ‌سازی)، جزء دسته‌ی سیاست‌های نرم هستند.<sup>[۱]</sup>

استفاده از خودروی شخصی و انگیزه‌ی استفاده از آن تحت تأثیر منافع فردی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۳/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۱۵

DOI:10.24200/J30.2022.59669.3066

زنجیره‌وار ارزش‌ها و باورهای فردی است، که در نهایت می‌تواند در تغییر رفتار فرد مؤثر باشد. نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار (VBN)، یک نظریه‌ی سلسله‌مراتبی است، که در کشورهای مختلف در پذیرش سیاست سخت بررسی شده است، اما اثرگذاری متغیرهای مذکور در دوره‌های کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) تا به حال بررسی نشده است. به منظور پر کردن خلأ ذکر شده در مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر به بررسی اثر ترکیبی ارزش‌ها، باورها و هنجارهای فردی خارج از توالی زنجیره، به همراه ویژگی‌های فردی و سفر در تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه تحت اجرای طرح زوج و فرد در شهر تهران در دوره‌های کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) پرداخته شده است.

به علاوه در پژوهش حاضر به بررسی نگرش‌های زیست‌محیطی با عنوان «متغیر پنهان مؤثر در تغییر رفتار افراد» پرداخته شده است. آگاهی افراد از پیامدهای تبعیت از سیاست‌های سخت، آنها را به تغییر رفتار داوطلبانه ترغیب می‌کند. لذا بررسی نگرش‌های پنهان محیط‌زیستی در بازه‌های زمانی مختلف، که منجر به پایداری تغییر رفتار و موفقیت اجرای سیاست‌ها می‌شود، می‌تواند به پیش‌بینی پذیرش سیاست‌های سخت توسط افراد با ویژگی‌های مختلف اقتصادی - اجتماعی و هدف سفر کمک کند، که نوآوری پژوهش حاضر است.

سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که: «آیا عوامل پنهان، مانند: ارزش‌ها، باورها و هنجارهای فردی در کنار سایر ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی فرد در تغییر رفتار در دوره‌های مختلف اجرای سیاست‌های سخت اثرگذار است؟» و «آیا نگرش‌های زیست‌محیطی منجر به تغییر رفتار افراد در دوره‌های مختلف اجرای طرح زوج یا فرد می‌شود؟». هدف از پژوهش حاضر ارزیابی دقیق‌تری از عوامل پنهان فردی مؤثر در تغییر رفتار افراد تحت اجرای سیاست‌های کاهش استفاده از خودروی شخصی است، که می‌تواند به ارائه‌ی دستوردهای قابل‌توجهی در پذیرش و پایداری نتایج سیاست‌های حمل‌ونقلی منجر شود. در ادامه، به ادبیات و نظریه‌ی مورد بررسی، فرضیه‌های پژوهش، روش پژوهش، نتایج مدل‌سازی، بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## ۲. پیشینه‌ی پژوهش

سیاست‌های مدیریت تقاضا به منظور کاهش استفاده از خودروی شخصی استفاده‌ی بیشتر از وسایل سازگار با محیط زیست پیشنهاد شده است.<sup>[۲]</sup> سیاست مدیریت تقاضا را می‌توان به عنوان راهبردی با مجموعه‌ی از عوامل، با هدف اثربخشی در رفتار سفر به وسیله‌ی معرفی گزینه‌های جایگزین جابه‌جایی و برآورده کردن نیازهای تحرک یک منطقه مشاهده کرد.<sup>[۴]</sup> از این رو، اعتقاد بر این است که سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل (TDM)،<sup>۳</sup> پتانسیل قابل‌توجهی در کاهش استفاده از خودروی شخصی دارند.<sup>[۴]</sup> سیاست‌های اخیر به دو دسته‌ی سیاست‌های سخت و نرم طبقه‌بندی می‌شوند. علی‌رغم اثربخشی قابل توجه سیاست‌های سخت در کشورهای مختلف در کاهش سفر با وسایل شخصی و افزایش استفاده از وسایل پایدار، بحث‌های ادامه‌دار در مورد این‌که آیا سیاست‌های سخت فقط منجر به کاهش استفاده از خودرو می‌شوند یا سیاست‌های نرم تأثیر مستقیمی در کاهش استفاده از خودرو دارند، وجود دارد.<sup>[۵]</sup> بسیاری از مداخلات مبتنی بر سیاست‌های نرم، هم در مقیاس کوچک و هم در مقیاس بزرگ با نتایج موفق، اغلب در کشورهای توسعه‌یافته اعمال می‌شوند.<sup>[۶]</sup> بسیاری از مطالعات که با استفاده از سیاست‌های «نرم» بررسی شده‌اند،<sup>[۷]</sup> آثار مثبت مربوط به تغییر شیوه از اتومبیل شخصی به حمل‌ونقل عمومی را گزارش داده‌اند.<sup>[۸]</sup>

باتور<sup>۴</sup> و همکارش (۲۰۱۷) در مطالعه‌ی در شهر استانبول برای تعیین آثار سیاست‌های مورد نیاز سفر، شامل مجموعه‌ی از سیاست‌های سخت و نرم، همچون: محدودیت پارکینگ، ساعت‌های کاری منعطف برای کارمندان، تغییر سطح خدمات عمومی و حمل‌ونقل عمومی نشان داده‌اند که اولویت حمل‌ونقل عمومی بوده و سیاست‌های نرم، پذیرش و موفقیت بهتری داشته‌اند.<sup>[۹]</sup>

مطالعات در کشورهای مختلف نشان می‌دهند که اثربخشی، مقبولیت و امکان‌پذیری سیاست‌های TDM بستگی به عوامل مختلفی، از جمله: ویژگی‌های پنهان فردی، مثل هنجارها و مقاصد عمومی، باورهای محیطی، آگاهی از مشکلات و منافع درک شده دارد.<sup>[۱۰]</sup>

عوامل ذکر شده‌ی اخیر، در کشورها، جوامع، محیط‌ها و گروه‌های قومی مختلف، که تحت نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار (VBN) ارائه شده‌اند، متفاوت هستند.<sup>[۱۱]</sup> ارزش‌ها با اثرگذاری در باورها و هنجارهای فردی، منجر به تغییر رفتار می‌شوند. تئوری حمایت از محیط‌زیست ارزش - باور - هنجار استرن<sup>۵</sup> (۱۹۹۴)،<sup>[۱۲]</sup> چارچوبی برای بررسی عوامل هنجاری مؤثر در نگرش‌های پایدار رفتاری فراهم کرده است. تئوری VBN، از تئوری ارزش،<sup>[۱۳]</sup> دیدگاه الگوی جدید زیست‌محیطی (NEP)<sup>۶</sup> و مدل فعالیت - هنجار (NAM)<sup>۷</sup> ادغام شده است. نظریه‌ی VBN، زنجیره‌ی از متغیرهای ارزشی، باورهای خاص در مورد پیامدهای منفی رفتار و توانایی افراد برای جلوگیری از عواقب منفی اشاره شده است، که منجر به فعال شدن هنجارهای فردی برای تغییر رفتار می‌شود. به طور کلی، نظریه‌ی VBN، ارزش‌ها را از طریق اثرگذاری غیرمستقیم باورها و هنجارها در رفتار در نظر می‌گیرد.

ارزش‌ها به طور غیرمستقیم در رفتار حمایت از محیط‌زیست مؤثر هستند. بر این اساس، مطالعه‌ی عوامل مؤثر در ترجیحات فردی برای پیش‌بینی تصمیم‌گیری و در نهایت تغییر رفتار کاربران خودروی شخصی اهمیت دارد.

شوارتز<sup>۸</sup> (۱۹۹۲)، ارزش را به عنوان یک اصل راهنما در زندگی فردی برای رسیدن به موقعیتی مطلوب معرفی کرده است. لذا بر اساس پژوهش ایشان، دیگروت و استگ<sup>۹</sup>، ابزاری را توسعه داده‌اند که نوعی از ارزش معرفی شده توسط شوارتز و عاملی مؤثر در باور، هنجار و رفتار بوده است.<sup>[۱۴]</sup> ارزش‌های مذکور، شامل: جهت‌گیری ارزش جاه‌طلبی<sup>۱۰</sup>، عدالت‌طلبی<sup>۱۱</sup> و حمایت از کهری زمین<sup>۱۲</sup> هستند، که با اضافه شدن ارزش راحت‌طلبی<sup>۱۳</sup> گسترش یافته‌اند. افراد با جهت‌گیری راحت‌طلبی و جاه‌طلبی، به ارزش‌های شخصی، خوش‌گذرانی و حفظ منافع خود تمایل دارند. ولی افراد با نگرانی نسبت به شرایط کهری زمین، نظیر آلودگی هوا و گرمایش زمین، جهت‌گیری ارزشی پیوند با کهری زمین در آنها بیشتر است و همچنین افرادی که نسبت به شرایط سایر انسان‌ها و رفاه اجتماعی ایشان، اهمیت بیشتری قائل هستند، دارای جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی هستند. الگوی جدید زیست‌محیطی برگرفته از پژوهش دانلاپ<sup>۱۴</sup> (NEP)، با تأکید بر باورها در محدودیت‌های رشد، لزوم تعادل رشد اقتصادی با حفاظت از محیط‌زیست را نیاز به حفظ تعادل طبیعت می‌داند. برای نمونه، با توجه به تئوری فعالیت - هنجار در پاسخ به رفتار حامی اجتماع، انتخاب شیوه‌های سفر سازگار با محیط‌زیست باید به عنوان پاسخ به هنجارهای فردی در مورد چنین رفتاری رخ دهد. همچنین دیگروت و استگ، نظریه‌ی VBN را برای پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو در کشورهای اروپایی در مورد ارتباط زنجیره‌ی نظریه‌ی VBN مطالعه کردند و دریافتند که ارزش‌ها با اثرگذاری در نگرانی‌های محیطی منجر به آگاهی از پیامدها و پذیرش مسئولیت رفتاری در فرد شده است. همچنین فعال شدن هنجارهای فردی در کاهش استفاده از خودرو منجر به حمایت قوی‌تر از سیاست‌های مذکور شده است. مطالعه‌ی نظریه‌ی VBN در آرژانتین، که یک کشور آمریکای لاتین است، یافته‌های مشابهی را نشان داده



و هنجارهای فردی در پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی اشاره کرد.

طیرانی و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی به منظور شناسایی عوامل مؤثر در مدیریت تقاضای وسایل نقلیه‌ی شخصی و تغییر شیوه‌ی سفر از خودروی شخصی به وسیله‌ی حمل‌ونقل همگانی مانند مترو و اتوبوس تحت تأثیر سیاست قیمت‌گذاری محدوده، از چهار دسته متغیر مرتبط با ارزش‌ها، اعتقادات و هنجارهای افراد در محدوده‌ی طرح کنترل آلودگی هوا در شهر تهران و در میان افراد حضور یافته استفاده کرده و دریافته‌اند افرادی که نگرانی عمیق‌تری نسبت به مسائل کربی زمین داشته و ارزش حمایت قوی‌تری از کربی زمین داشته‌اند، پس از اجرای سیاست قیمت‌گذاری در محدوده‌ی مورد مطالعه، تمایل بیشتری به استفاده از اتوبوس و مترو در مقایسه با سایر افراد با ارزش‌های فردی متفاوت داشته‌اند. در مقابل نیز افرادی که دارای ارزش راحت‌طلبی قوی‌تری بوده‌اند، قبل و بعد از اجرای سیاست قیمت‌گذاری، اقدام به استفاده از خودروی شخصی کرده‌اند. برخی از متغیرهای اقتصادی - اجتماعی استفاده شده در مطالعات اخیر نیز در مطلوبیت متغیرهای مشاهده شده و انتخاب تغییر وسیله‌ی حمل‌ونقلی معنی‌دار بوده است.<sup>[۲۰ و ۲۱]</sup>

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

به منظور بررسی عوامل پنهان نگرشی محیط‌زیستی در کنار سایر عوامل اقتصادی - اجتماعی مؤثر در تغییر رفتار انتخاب وسیله در اجرای سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی، از نظریه‌ی VBN در پژوهش حاضر استفاده شده است. عوامل پنهان نظریه‌ی VBN در مطالعات پیشین به صورت سلسله مراتبی استفاده شده و نتایج قابل ملاحظه‌ی در کشورهای مختلف با فرهنگ‌های مختلف داشته است.<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup> به همین منظور فرضیه‌هایی به منظور بررسی عوامل مذکور در نظر گرفته شده است:

**فرضیه‌ی ۱:** ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی افراد در تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه، اثر مستقیمی دارد.

**فرضیه‌ی ۱،۱:** سطح رفاه اقتصادی در دوره‌ی کوتاه‌مدت طرح منجر به عدم تغییر وسیله می‌شود.

**فرضیه‌ی ۲،۱:** مردان در دوره‌ی میان‌مدت اجرای طرح زوج یا فرد تمایل به استفاده از وسایل خصوصی دارند.

**فرضیه‌ی ۲:** هدف سفر بر عدم تغییر وسیله در دوره‌ی کوتاه‌مدت اثر مستقیم دارد.

**فرضیه‌ی ۳:** جهت‌گیری‌های ارزشی با تغییر رفتار انتخاب وسیله، رابطه‌ی مستقیم دارد.

**فرضیه‌ی ۱،۳:** جهت‌گیری ارزش حمایت از کربی زمین در استفاده از وسایل حمل‌ونقل همگانی در دوره‌ی اجرای طرح زوج یا فرد کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) اثر مثبت دارد.

**فرضیه‌ی ۲،۳:** جهت‌گیری ارزش راحت‌طلبی در دوره‌ی بلندمدت منجر به عدم تغییر وسیله می‌شود.

**فرضیه‌ی ۴:** باورها در تغییر وسیله در دوره‌ی کوتاه‌مدت اثری مستقیم دارند.

**فرضیه‌ی ۱،۴:** آگاهی از عواقب رفتاری در استفاده از وسایل همگانی اثری مثبت دارد.

**فرضیه‌ی ۲،۴:** پذیرش مسئولیت رفتاری در مطلوبیت عدم استفاده از خودروی شخصی اثری مثبت دارد.

است؛ به این طریق که ارزش‌ها و هنجارهای فردی فعال شده منجر به پذیرش راحت‌تر سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو و تمایل بیشتر برای وسایل سازگار با محیط زیست شده است. این یافته حاکی از آن است که تعهدات اخلاقی یا هنجاری، نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌ها ایفا می‌کنند، تا سیاست‌های کاهش خودرو نه فقط در اروپا، بلکه در یک کشور آمریکای لاتین، که در آن مسائل محیطی به طور سیستماتیک بحث و بررسی شده‌اند، پذیرفته شود.<sup>[۱۵]</sup> همچنین با تفاوت‌های فرهنگی در کشورهای مختلف، نظریه‌ی VBN در کشور ژاپن که جزء کشورهای با برنامه‌ریزی میان‌مدت است، بررسی شده است. نتایج نظریه‌ی VBN در ژاپن نشان می‌دهد که گرایش ارزشی حمایت از کربی زمین، در باورها و هنجارهای فردی اثر مثبت دارد؛ در حالی که جهت‌گیری‌های ارزش جاه‌طلبی، اثر منفی دارد. مطالعه‌ی ایشان مبنی بر در نظر گرفتن ارزش راحت‌طلبی، که معمولاً در مدل‌های VBN گنجانده نشده است، یک پیش‌بینی‌کننده‌ی مهم رفتار است. بنابراین، ارزش راحت‌طلبی بهتر است در به کارگیری مدل‌های VBN گنجانده شود.<sup>[۱۶]</sup> اوانال و همکاران (۲۰۱۹)، پژوهشی با موضوع «آیا نظریه‌ی VBN می‌تواند مقبولیت سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو را توضیح دهد»، را در کشور روسیه به عنوان یک کشور سوسیالیستی بررسی کرده‌اند. یافته‌های ایشان در جهت مورد انتظار بوده و همه‌ی متغیرها به طور مثبت و متوالی در زنجیره‌ی نظریه‌ی VBN ارتباط داشته‌اند. هنجارهای فردی برای کاهش استفاده از خودرو، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ی قابلیت پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودرو بوده‌اند، به این معنی که حس تعهد اخلاقی با حمایت بیشتر از سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو همراه است. مسئولیت‌پذیری، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ی هنجارهای شخصی است، که نشان می‌دهد زمانی که فرد مسئول آثار منفی فعالیت‌های خود در رابطه با استفاده از خودرو در محیط است، فرد تعهد اخلاقی قوی‌تری برای کاهش استفاده از خودروی شخصی دارد و باور محیط‌زیستی، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ی آگاهی از عواقب رفتاری در زنجیره‌ی علّی در نظریه‌ی VBN است. آنها دریافته‌اند که مقادیر حمایت از کربی زمین، فرایند فعال‌سازی هنجارهای فردی را فعال و احساسات تعهد اخلاقی را برای کاهش مصرف خودرو پیش‌بینی کرده و مقبولیت سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو را به دلیل دستاوردهای زیست‌محیطی افزایش داده است. یافته‌های پژوهش ایشان در روسیه، پژوهش دیگر و همکارانش را گسترش داده و نشان می‌دهد که پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو به دنبال فرایندی از ارزش‌هاست، که باعث فعال شدن هنجار در تبعه‌ی روسیه شده و ارزش‌های حمایت از کربی زمین، یک محرک مهم بوده است.<sup>[۱۷]</sup>

اخیراً مطالعه‌ی برای ارزیابی درک عمومی نسبت به پذیرش سیاست زوج یا فرد در هند با استفاده از تئوری VBN در سال ۲۰۲۱ انجام شده است، که در آن به بررسی درک عمومی نسبت به محدودیت استفاده از خودروی شخصی و پذیرش محدودیت‌های استفاده از خودروی شخصی مبنی بر نظریه‌ی VBN پرداخته شده است. در پژوهش اخیر، در بررسی نقش اعتماد کاربران به دولت محلی در رابطه با پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی نتیجه‌گیری شده است که جامعه درک نگرانی‌های زیست‌محیطی را پذیرفته است، اما پذیرش سیاست‌ها تحت تأثیر حاکمیت دولتی بوده است. نتایج پژوهش ایشان به دولت مرکزی کمک می‌کند تا نسبت به درک عمومی افراد از اجرای سیاست‌ها شناخت پیدا کند، زیرا پیچیدگی سیاست‌ها، آثاریان‌آوری در پذیرش سیاست دارد. امکان پذیرش سیاست ممکن است منجر به انتخاب شیوه‌های سفر پایدار شود.<sup>[۱۸ و ۱۹]</sup> مطالعه‌ی VBN در کشورهای مختلف نتایج مشابهی با اندکی تفاوت را داشته است. از مهم‌ترین یافته‌های بررسی نظریه‌ی VBN می‌توان به اثربخشی ارزش حمایت از کربی زمین

**فرضیه ۵:** هنجارهای فردی در عدم استفاده از وسایل شخصی در هر دو دوره کوتاه مدت و میان مدت اجرای طرح زوج یا فرد اثری مستقیم دارد.

تردد وسایل نقلیه در محدوده مرکزی شهر تهران، از طریق روش مدیریت تقاضای قیمت‌گذاری محدوده و همچنین محدودیت میزان تردد در طول سال کنترل می‌شود. در حلقه مرکزی محدوده مدیریت تقاضای تردد وسایل نقلیه، که با عنوان محدوده طرح ترافیک شناخته می‌شود، وسایل نقلیه جهت ورود به محدوده طرح ترافیک موظف‌اند هزینه مربوط به طرح ترافیک را بر مبنای قیمت مصوب هر سال پرداخت کنند. محدوده وسیع‌تری که محدوده طرح ترافیک در داخل آن قرار دارد، محدوده طرح کنترل آلودگی هوا نام دارد، که تا پایان سال ۱۳۹۷ با عنوان محدوده طرح زوج یا فرد نامیده می‌شد. در طرح جدید، که از تیرماه سال ۱۳۹۸ اجرا شده است، وسایل نقلیه می‌توانند در طول یک فصل، ۲۰ مرتبه وارد محدوده طرح کنترل آلودگی هوا شوند و چنانچه تعداد دفعات تردد آنها به بیش از ۲۰ بار در طول یک فصل تجاوز کند، موظف‌اند هزینه ورود به محدوده مذکور را بر مبنای هزینه طرح ترافیک پرداخت کنند. در طرح قبلی (محدوده طرح زوج یا فرد)، وسایل نقلیه می‌توانستند طبق انطباق‌پذیری اولین رقم از سمت راست پلاک وسیله نقلیه خود و روزهای هفته، در محدوده طرح زوج یا فرد تردد کنند.

روش نظرسنجی به وسیله پرسش‌نامه در سپتامبر سال ۱۳۹۸ در شهر تهران صورت پذیرفته و پرسش‌نامه شامل دو بخش رجحان آشکار شده و رجحان اظهار شده بوده است. بنابر ماهیت پژوهش حاضر، از سؤال‌های بخش SP استفاده شده است. در مطالعه حاضر، بیش از ۵۰۰ پرسش‌نامه به صورت تصادفی در میان شهروندان تهرانی در محدوده طرح زوج یا فرد و محدوده طرح ترافیک، که با وسیله نقلیه همگانی و یا غیرهمگانی سفر کرده بودند، توزیع شده است. در نهایت، پس از پاک‌سازی داده‌ها، ۵۰۰ پرسش‌نامه کامل شده از بین شرکت‌کنندگان در پژوهش، مبنای مدل‌سازی قرار گرفت.

پرسش‌نامه به دو بخش اصلی تقسیم شده است: بخش اول، مربوط به اطلاعات فردی، شامل: جنسیت، وضعیت تأهل، سن، تحصیلات، اشتغال، درآمد ماهیانه، سطح تحصیلات، داشتن مدرک گواهینامه، تعداد وسایل نقلیه خانوار آنان بوده است. بخش دوم، خود شامل ۴ زیربخش بوده است: زیربخش اول، مربوط به شاخص‌های ارزشی (جهت‌گیری‌های ارزشی) و در ادامه، نیز شاخص‌های NEP در بخش دوم ارائه شده‌اند. بخش‌های اندازه‌گیری AR، AC و PN در زیربخش سوم قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که ارزش‌ها، نگرش‌ها و اعتقادهایی که در بخش دوم پرسش‌نامه ارائه شده‌اند، بیشتر به عنوان متغیرهای پنهان توسط سایر پژوهشگران برای تئوری‌های VBN و NAM ارائه و در حال حاضر نیز در مطالعات حاضر استفاده شده‌اند. خلاصه‌ای از تحلیل توصیفی داده‌های به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. در ابتدای بخش بررسی نگرش‌ها، رفتارهای زیست‌محیطی تحت عنوان راحت‌طلبی، جاه‌طلبی، عدالت‌طلبی و پیوند با طبیعت با ۱۲ ارزش معرفی شده است. به منظور بررسی ارزش‌ها از طیف لیکرتی ۹ تایی، از مقدار ۱- (مخالف با ارزش‌های من) تا مقدار ۷ (اهمیت فوق‌العاده) به عنوان ارزشی فوق‌العاده مهم در زندگی افراد پرسش شده است. در ادامه‌ی بخش نیز ۱۵ عبارت مربوط به باورهای محیط‌زیستی با استفاده از طیف لیکرتی ۵ تایی، ۵ عبارت در مورد آگاهی از عواقب رفتاری، ۶ عبارت برای پذیرش مسئولیت رفتار و ۸ عبارت برای هنجارهای فردی با طیف لیکرتی ۷ تایی ارائه شده است.

در جدول ۲، متغیرهای پنهان و نماگرها ارائه شده‌اند. متغیرهای توضیحی استفاده شده در این مقاله، مستقیماً و یا به صورت ترکیبی با استفاده از سؤال‌های پرسش‌نامه استفاده شده‌اند. بعد از انجام تحلیل عاملی اکتشافی<sup>۱۵</sup> و استخراج عامل‌های پنهان

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی افراد.

متغیر	دسته‌بندی	فراوانی	فراوانی نسبی
جنسیت	زن	۲۱۳	۴۲/۶
	مرد	۲۸۷	۵۷/۴
وضعیت تأهل	مجرد	۲۰۰	۴۰
	متأهل	۳۰۰	۶۰
سن	۱۸ تا ۲۴	۸۰	۱۶
	۲۵ تا ۳۴	۱۵۷	۳۱/۴
	۳۵ تا ۴۴	۱۳۵	۲۷
	۴۵ تا ۵۴	۷۶	۱۵/۲
	۵۵ تا ۶۴	۴۲	۸/۴
	۶۵ تا ۷۴	۱۰	۲
	زیر دیپلم	۴۳	۸/۶
	دیپلم	۱۱۱	۲۲/۲
تحصیلات	فوق دیپلم	۱۱۱	۲۲/۲
	لیسانس	۱۶۸	۳۳/۶
	فوق لیسانس	۵۸	۱۱/۶
	دکترا	۹	۱/۸
شغل	بیکار	۱۲۲	۲۴/۴
	بازنشسته	۲۶	۵/۲
	کارمند دولتی	۳۶	۷/۲
	کارمند بخش خصوصی	۹۹	۱۹/۸
	آزاد	۱۹۴	۳۸/۸
	پزشک	۵	۱
	مهندس	۱۱	۲/۲
	سایر	۷	۱/۴
متوسط هزینه خانوار (به میلیون)	کمتر از ۱	۱۵	۳
	۱ تا ۲	۹۸	۱۹/۶
	۲ تا ۳	۱۴۱	۲۸/۲
	۳ تا ۴	۱۲۹	۲۵/۸
	۴ تا ۵	۸۹	۱۷/۸
	۵ تا ۱۰	۲۲	۴/۴
	بیشتر از ۱۰	۶	۱/۲
	۰	۵۲	۱۰/۴
تعداد خودروی تحت مالکیت	۱	۳۳۴	۶۶/۸
	۲	۱۰۲	۲۰/۴
	۳	۱۰	۲
	۴	۲	۰/۴
تعداد اعضای خانوار	۱	۴۶	۹/۲
	۲	۱۰۷	۲۱/۴
	۳	۱۷۶	۳۵/۲
	۴	۱۳۷	۲۷/۴
	۵ نفر و بیشتر	۳۴	۶/۸
داشتن گواهینامه	بله	۴۳۷	۸۷
	خیر	۶۳	۱۳
مجموع		۵۰۰	

جدول ۲. متغیرهای پنهان و نماگرها.

ردیف	متغیر پنهان	نماگر	مرجع
۱	راحت طلبی	۱- لذت و خوشی	(De Groot et al., 2008; Steg et al., 2014a, Steg et al., 2014b)
		۲- لذت بردن از زندگی	
		۳- احساس رضایت فردی	
		۱- قدرت اجتماعی	
۲	جاه طلبی	۲- رفاه	
		۳- قدرت و توانمندی مدیریتی	
		۴- قدرت نفوذ و اثرگذاری	
		۵- جاه طلبی	
۳	عدالت طلبی	۱- برابری	
		۲- جهانی در صلح و آرامش	
		۳- عدالت اجتماعی	
		۴- کمک رسانی	
۴	پیوند با طبیعت	۱- ارزش قائل شدن برای کره زمین	
		۲- احساس پیوند با طبیعت	
		۳- محافظت از محیط زیست	
		۴- جلوگیری از آلوده سازی محیط زیست	
۵	الگو جدید محیط زیستی (NEP)	۱- جمعیت جهانی، در حال نزدیک شدن به حدی است که کره زمین توانایی حمایت و پشتیبانی از آن را ندارد.	Dunlap et al., 2000)
		۲- پشر بسته به نیازهای خود، حق دخل و تصرف در محیط زیست را دارد.	
		۳- هنگامی که انسان با طبیعت مواجه می شود، اغلب عواقب فاجعه باری را به بار می آورد.	
		۴- نبوغ انسان ها، تضمین خواهد کرد که ما زمین را غیر قابل سکونت نخواهیم کرد.	
		۵- انسان ها به شدت از محیط زیست سوء استفاده می کنند.	
		۶- در صورت بهره برداری صحیح، کره زمین می تواند منابع طبیعی زیادی را در اختیار ما قرار دهد.	
		۷- گیاهان و حیوانات، به اندازه انسان ها، حق بقا و زندگی دارند.	
		۸- تعادل طبیعت برای مقابله با تأثیرات کشورهای مدرن صنعتی، به اندازه کافی قوی است.	
		۹- با وجود توانمندی های ویژه ای که ما انسان ها از آن برخورداریم، کماکان تابع قوانین طبیعت هستیم.	
		۱۰- بسیاری از فجایع زیست محیطی مطرح شده در سالیان اخیر، اغراق آمیز و غیر واقعی است.	
۶	آگاهی از عواقب	۱- استفاده از خودرو باعث تمام شدن منابع طبیعی، همچون نفت می شود.	(De Groot and Steg, 2008; Jakovcovic and Steg, 2013)
		۲- استفاده از خودرو فضای بسیار زیادی را اشغال می کند که در نتیجه فضای کمتری برای حمل و نقل پاک فراهم میشود.	
		۳- استفاده از خودرو یکی از دلایل مهم حوادث مربوط به ترافیک است.	
		۴- استفاده از خودرو به علت ایجاد سر و صدای ترافیکی و آلودگی هوا، باعث کاهش کیفیت زندگی می شود.	
		۵- با کاهش استفاده از خودرو، سطح آلودگی هوا کاهش می یابد.	
۷	پذیرش مسئولیت	۱- من هم احساس می کنم که در قبال استفاده از سوخت های فسیلی توسط خودروها مسئولیت دارم.	
		۲- من نیز به خاطر مشکلاتی که توسط خودروها به وجود آمده اند، مسئول هستم.	
		۳- نه فقط دیگران، مانند دولت، مسئول ترافیک سنگین هستند، بلکه من نیز هستم.	
		۴- من هم در خصوص تأثیر ترافیک جاده ای بر روی گرمایش زمین، احساس مسئولیت می کنم.	
		۵- در اصل، یک نفر نمی تواند به تنهایی مشکلات استفاده از ماشین را کاهش دهد.	
		۶- سهم من در مشکلات استفاده از خودرو ناچیز است.	
۸	هتجارهای فردی	موظف هستم که سفر های خود را در مسیر های سازگار با محیط زیست انجام دهم.	(De Groot et al., 2008)
		من تبدیل به انسان بهتری می شوم، اگر به جای وسیله نقلیه شخصی، بیشتر از وسایل نقلیه عمومی استفاده نمایم.	
۹		افرادی مانند من، هرکاری که می توانند باید انجام دهند تا استفاده از وسیله نقلیه خود را به حداقل برسانند.	
		احساس می کنم موظف هستم به هنگام انتخاب گزینه های سفر، پیامدهای زیست محیطی را در نظر بگیرم.	
		اگر من بخواهم وسیله نقلیه جدیدی را خریداری کنم، موظف هستم وسیله ای را با صرفه جویی بیشتر انرژی تهیه نمایم.	
		صرف نظر از آنچه که دیگران انجام می دهند، استفاده از وسیله نقلیه خود را به حداقل ممکن برسانم.	
		وقتی از ماشین استفاده می کنم احساس گناه نمی کنم، حتی اگر گزینه های منطقی دیگری برای حمل و نقل باشد.	

از سؤال‌های پرسش‌نامه، از متغیرهای اجتماعی - اقتصادی و ترکیب با عامل‌های پنهان استفاده شده است. متغیرهای ترکیبی در بررسی تغییر رفتار افراد در دوره‌های مختلف اجرای طرح زوج یا فرد نتایج قابل تأملی داشته‌اند. نتایج تحلیل عاملی اکتشافی و متغیرهای پنهان استخراج شده در جدول ۳ و متغیرهای ترکیبی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

در سناریوی شماره ۱ (اجرای طرح زوج یا فرد) پرسش‌نامه از افراد خواسته شد شرایط فرضی آلودگی هوا و اجرای طرح زوج یا فرد را در نظر بگیرند؛ از افراد پرسیده شد «فرض کنید شرایط آلودگی هوا ناسالم گزارش شده و موظف به اجرای طرح زوج یا فرد از درب منازل، از روز شنبه الی پنج‌شنبه هستید. چنانچه طرح مذکور، به صورت کوتاه‌مدت ۱ هفته‌ای یا میان‌مدت ۱ ماهه اجرا شود، در روز مغایر با پلاک خودروی خود، کدام گزینه را جهت تردد انتخاب می‌کنید؟» بررسی پاسخ افراد به این پرسش نشان می‌دهد که ۲۷٪ از مترو، ۱۳٪ از تاکسی و تاکسی اینترنتی و ۱۰٪ ماشین شخصی با پرداخت جریمه را انتخاب کرده‌اند. فقط ۱۲٪ افراد گزینه‌های تغییر روز، ساعت، مسیر تردد و لغو سفر را انتخاب کرده‌اند.

مجموعه‌ی گزینه‌های انتخاب وسیله در دو دوره‌ی اجرای طرح زوج یا فرد کوتاه‌مدت و میان‌مدت در گزینه‌های معرفی شده در پرسش‌نامه بر اساس فراوانی هر گزینه تجمیع شد و در نهایت به ۳ گزینه‌ی: خصوصی، نیمه‌خصوصی و همگانی تقطیل یافت. گزینه‌ی وسیله‌ی خصوصی، شامل: خودروی شخصی، وسیله‌ی نقلیه‌ی ثانویه، موتورسیکلت، تغییر روز، تغییر ساعت و تغییر مسیر است. وسیله‌ی نیمه‌خصوصی از تجمیع گزینه‌های تاکسی، تاکسی اینترنتی و آژانس و گزینه‌ی همگانی از تجمیع مترو و اتوبوس تشکیل شده است. در جدول ۵، گزینه‌های پیشنهادی برای طرح زوج یا فرد در دوره‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت ارائه شده است.

#### ۴. نتایج مدل‌سازی

ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ایموس (نسخه ۲۵) ۱۶، متغیرهای پنهان پژوهش حاضر از طریق تحلیل عاملی اکتشافی استخراج شده است. پس از مشخص شدن مناسب بودن داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی اکتشافی، داده‌هایی که بار عاملی پایینی داشتند، از روند پژوهش خارج شدند. در استخراج عامل‌ها از روش تحلیل عاملی با روش مؤلفه‌های اصلی<sup>۱۷</sup> استفاده شده است. برای بررسی کفایت نمونه در انجام تحلیل عاملی اکتشافی از ضریب KMO استفاده شده است. نتایج ارائه شده‌ی KMO در جدول ۶، نشان‌دهنده‌ی کفایت نمونه‌هاست.

از بین ۶۰ نماگر، نگرش‌های زیست‌محیطی پژوهش با استفاده از تحلیل عاملی اکتشافی شناسایی شده‌اند.

پس از استخراج عوامل نگرشی به ساخت مدل‌های لججیت چندگانه برای هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت توسط نرم‌افزار این‌لوجیت (نسخه ۵) ۱۸ پرداخته شده است. در مدل لججیت چندگانه‌ی دوره‌ی کوتاه‌مدت، ۱۸ متغیر مستقل و در دوره‌ی میان‌مدت، ۲۱ متغیر مستقل بر مطلوبیت وسایل نقلیه، شناسایی و معنی‌دار شده‌اند. از میان ۱۰۰۰ مدل پرداخت شده، دو مدل با بیشترین بهبود در تابع لگاریتم درست‌نمایی به عنوان مدل‌های برتر برای هر یک از دوره‌ها شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از مدل‌ها در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند.

با پرداخت مدل لججیت چندگانه در اجرای طرح زوج یا فرد در دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته)، عوامل اثرگذار در تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی افراد بررسی

شده‌اند. مدل دوره‌ی کوتاه‌مدت با بیشترین بهبود در مقدار لگاریتم تابع درست‌نمایی  $LL(\beta) = -536/0$  با ۱۸ متغیر به عنوان مدل برتر انتخاب شده است.

مدل دوره‌ی میان‌مدت با ۲۱ متغیر مجازی و ترکیبی با بیشترین مقدار تابع لگاریتم درست‌نمایی  $LL(\beta) = -798/532$  و معیارهای شاخص‌های برازش کلی،  $\rho^2 = 0/156$  و  $\rho^2_{adj} = 0/138$  بوده است. در مدل دوره‌ی میان‌مدت، متغیرهای بیشتری معنی‌دار شده و همچنین مقادیر  $\rho^2$  نیز بیشتر از مقدار دوره‌ی کوتاه‌مدت بوده است.

#### ۵. بحث و تحلیل نتایج

از آن‌جا که افراد نسبت به پذیرش سیاست سخت (کاهش یا منع استفاده از خودروی شخصی) مقاومت دارند و بنا بر مطالعات پیشین، افراد بعد از تبعیت از سیاست‌های سخت به رفتار قبلی خود روی می‌آورند، بنابراین ممکن است تغییر رفتار آن‌ها تحت دوره‌های مختلف اجرای طرح متفاوت باشد.<sup>۱۹</sup> در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی رفتار افراد در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) پرداخته شده است. سیاست بررسی شده در مطالعه‌ی حاضر، طرح زوج یا فرد بوده است.

نتایج حاکی از آن است که در هدف سفرهای اجباری، رفاه اقتصادی از عوامل مؤثر در عدم پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی بوده است. متوسط هزینه‌ی خانوار و قیمت تقریبی خودرو به عنوان رفاه اقتصادی در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده‌است. در مطالعه‌ی حاضر، متغیرهای هزینه‌های خانوار (۴-۵ میلیون تومان) و قیمت تقریبی خودروی شخصی (۵۰-۱۰۰ میلیون تومان) بر روی مطلوبیت استفاده از وسیله‌ی خصوصی در دوره‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت با علامت مثبت معنادار شده‌اند. این بدان معناست که افراد با سطح رفاه بیشتر بعد از اجرای طرح زوج یا فرد در دوره‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت به استفاده از خودروی شخصی استمرار خواهند داشت.

از دیگر عواقب مؤثر در عدم تغییر رفتار در دوره‌ی کوتاه‌مدت، حضور فرد همراه با هدف سفر کاری است. سفرهای کاری از دسته سفرهای روزانه محسوب می‌شوند و به دلیل مشخص بودن زمان حضور در محل کار، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است. به همین دلیل امکان تغییر برنامه‌ی سفر کاری ممکن نیست. افراد با هدف سفر کاری در دوره‌ی میان‌مدت نیز تمایلی به تغییر رفتار سفر ندارند. در دوره‌ی میان‌مدت، سفرهای اختیاری (تفریح و خرید) منجر به تغییر رفتار افراد نشده است. متغیر هدف اختیاری با علامت منفی بر روی وسیله‌ی همگانی در دوره‌ی میان‌مدت معنادار شده است. انتظار می‌رفت در دوره‌ی میان‌مدت، سفرهای غیراجباری به دلیل نداشتن محدودیت زمانی سفرهای با هدف کاری، که نیازمند حضور در ساعت مشخصی در محل کار است، منجر به تغییر رفتار شود. کارمندان در دوره‌ی کوتاه‌مدت، تمایلی به تغییر رفتار نداشتند. همچنین افراد بازنشسته و پزشک نیز در دوره‌ی میان‌مدت تمایل به استفاده از وسایل نیمه‌خصوصی نداشتند. انتظار می‌رفت در رفتار افراد بازنشسته به دلیل نداشتن برنامه‌ی سفرهای کاری در سفرهای روزانه‌ی خود در دوره‌ی میان‌مدت، تغییر مشاهده شود، اما علامت متغیر مذکور بر وسیله‌ی نیمه‌خصوصی با علامت مثبت معنی‌دار شده است.

جنسیت، یکی از متغیرهای اثرگذار مثبت در انتخاب وسیله‌ی نقلیه‌ی شخصی بوده است. با بررسی بیشتر مشخص شده است مردان در این طرح اقدام به استفاده

جدول ۳. نتایج تحلیل عاملی اکتشافی.

عامل	نماگرها	بارعاملی
ارزش راحت طلبی (HV)	لذت و خوشی	۰/۳۶۳
	لذت بردن از زندگی	۰/۴۶۷
	احساس رضایت فردی	۰/۲۰۹
ارزش جاه طلبی (EV)	قدرت اجتماعی	۰/۱۹۸
	رفاه	۰/۰۷۵
	قدرت و توانمندی مدیریتی	۰/۳۸۱
	قدرت نفوذ و اثرگذاری	۰/۳۹۷
	جاه طلبی	۰/۰۶۵
ارزش نوع دوستی (AV)	برابری	۰/۱۱۸
	جهانی در صلح و آرامش	۰/۴۲۳
	عدالت اجتماعی	۰/۳۷۵
	کمک رسانی	۰/۱۵۷
حمایت از کره زمین (BV)	ارزش قائل شدن برای کره زمین	۰/۱۳۴
	احساس پیوند با طبیعت	۰/۳۰۲
	محافظت از محیط زیست	۰/۴۸۴
	جلوگیری از آلوده سازی محیط زیست	۰/۱۳۱
باور محیط زیستی	هنگامی که انسان با طبیعت مواجه می شود، اغلب عواقب فاجعه باری را به بار می آورد.	۰/۴۴۳
	تعادل طبیعت بسیار ظریف و شکننده است.	۰/۶۸۵
	اگر همه چیز در مسیر فعلی خود ادامه پیدا کند، ما به زودی یک فاجعه بزرگ زیست محیطی را تجربه خواهیم کرد.	۰/۷۸۷
	نبوغ انسان ها، تضمین خواهد کرد که ما زمین را غیر قابل سکونت نخواهیم کرد.	۰/۴۸۸
	تعادل طبیعت برای مقابله با تأثیرات کشورهای مدرن صنعتی، به اندازه کافی قوی است.	۰/۵۱۶
	بسیاری از فجایع زیست محیطی مطرح شده در سالیان اخیر، اغراق آمیز و غیرواقعی است.	۰/۷۲۳
	در صورت بهره برداری صحیح، کره زمین می تواند منابع طبیعی زیادی را در اختیار ما قرار دهد.	۰/۴۶۰
	گیاهان و حیوانات، به اندازه انسان ها، حق بقا و زندگی دارند.	۰/۷۴۱
سوالات آگاهی از عواقب رفتار (AC)	استفاده از خودرو باعث تمام شدن منابع طبیعی، همچون نفت می شود.	۰/۰۹۲
	استفاده از خودرو فضای بسیار زیادی را اشغال می کند که در نتیجه فضای کمتری برای دوچرخه سواران، عابرین پیاده و کودکان فراهم می شود.	۰/۱۷۵
	استفاده از خودرو یکی از دلایل مهم حوادث مربوط به ترافیک است.	۰/۳۴۱
	استفاده از خودرو به علت ایجاد سر و صدای ترافیکی و آلودگی هوا، باعث کاهش کیفیت زندگی می شود.	۰/۳۲۰
	با کاهش استفاده از خودرو، سطح آلودگی هوا کاهش می یابد.	۰/۲۲۱
	من هم احساس می کنم که در قبال استفاده از سوخت های فسیلی توسط خودروها مسئولیت دارم.	۰/۷۱۴
مسئولیت رفتاری (AR)	من نیز به خاطر مشکلاتی که توسط خودروها به وجود آمده اند، مسئول هستم.	۰/۸۱۹
	نه فقط دیگران، مانند دولت، مسئول ترافیک سنگین هستند، بلکه من نیز هستم.	۰/۶۹۲
	من هم در خصوص تأثیر ترافیک جاده ای بر روی گرمایش زمین، احساس مسئولیت می کنم.	۰/۶۲۵
	در اصل، یک نفر نمی تواند به تنهایی مشکلات استفاده از ماشین را کاهش دهد.	۰/۶۰۹
	سهم من در مشکلات استفاده از خودرو ناچیز است.	۰/۶۰۰
مختار فردی	سفر های خود را در مسیر های سازگار با محیط زیست، از جمله استفاده از دوچرخه انجام دهم.	۰/۶۳۱
	من تبدیل به انسان بهتری می شوم، اگر به جای وسیله نقلیه شخصی، بیشتر از وسایل نقلیه عمومی استفاده نمایم.	۰/۶۶۳
	افرادی مانند من، هرکاری که می توانند باید انجام دهند تا استفاده از وسیله نقلیه خود را به حداقل برسانند.	۰/۷۳۱
	موظف هستم به هنگام انتخاب گزینه های سفر، پیامدهای زیست محیطی استفاده از ماشین را در نظر بگیرم.	۰/۷۴۷
	اگر بخواهم وسیله نقلیه جدیدی را خریداری کنم، به لحاظ اخلاقی، وسیله ای را با صرفه جویی بیشتر انرژی تهیه نمایم.	۰/۵۷۵
	من وقتی که از ماشین استفاده می کنم احساس گناه نمی کنم، حتی اگر گزینه های منطقی دیگری برای حمل و نقل وجود داشته باشد.	۰/۹۹۵
	فکر نمی کنم مجبور باشم استفاده از وسیله نقلیه شخصی خود را به حداقل برسانم.	۰/۳۹۴

جدول ۴. متغیرهای ترکیبی.

نوع متغیر	تعریف متغیر	نماد متغیر
متغیر پنهان * دامی	ارزش عدالت طلبی * سن (۳۵-۴۴)	$LV_{short-car-AV}$
	پذیرش مسئولیت * همراه (فرزند)	$LV_{short-car-AR}$
	هنگام فردی * تعداد خودرو (۲ وسیله)	$LV_{med-car-PN}$
	ارزش حمایت از کمره زمین * هدف همراه (تفریح)	$LV_{med-car-BV}$
	ارزش راحت طلبی * جنسیت	$LV_{med-car-HV}$
	هنگام فردی ( $PN_1$ ) * گواهینامه	$LV_{med-car-PN}$
	باور حمایت از محیط زیست ( $NEP_1$ ) * درآمد مستقل	$LV_{short-semi-NEP_1}$
	باور حمایت از محیط زیست ( $NEP_1$ ) * هدف سفر (کار)	$LV_{med-semi-NEP_1}$
	ارزش راحت طلبی * قیمت خودرو (۲۰-۵۰ میلیون تومان)	$LV_{med-semi-HV}$
	آگاهی از عواقب رفتار * سن (۱۸-۲۴)	$LV_{short-pub-AC}$
	ارزش عدالت طلبی * شغل (کارمند بخش خصوصی)	$LV_{short-pub-AV}$
	ارزش حمایت از کمره زمین * سن (۲۵-۳۴)	$LV_{short-pub-BV}$
	ارزش عدالت طلبی * تحصیلات (زیردیپلم)	$LV_{med-pub-AV}$
	ارزش حمایت از کمره زمین * شغل (کارمند بخش خصوصی)	$LV_{med-pub-BV}$

از وسیله نقلیه شخصی می کنند. با توجه به آخرین آمارهای منتشر شده از جمعیت شاغل شهر تهران (سالنامه‌ی آماری سال ۱۳۹۸ شهر تهران)، از مجموع ۲/۶۶۷/۸۲۳ نفر شاغل در شهر تهران، ۸۱٪ شاغلین در تهران، مرد هستند. لذا، استفاده‌ی بیشتر مردها از وسیله نقلیه شخصی به جهت تردد در محدوده‌ی مورد مطالعه توجیه پذیر است.

به عبارت دیگر، نتایج نشان داد که افراد نسبت به پذیرش سیاست مقاومت دارند و ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی به تنهایی منجر به تغییر رفتار انتخاب وسیله نقلیه نمی شوند. می توان چنین تفسیر کرد که فرهنگ سازی می تواند منجر به تغییر شود، چرا که آگاهی از عواقب، تأثیر مثبتی در انتخاب وسایل همگانی دارد و آگاهی از عواقب با آموزش و فرهنگ سازی به دست می آید، که این نتیجه مؤید فرضیه های ۱ و ۲ است.

نتایج بررسی نظریه‌ی VBN به صورت سلسله مراتبی، نشان دهنده‌ی مؤثر بودن ارزش‌ها در پیش بینی تغییر رفتار به صورت غیرمستقیم است و همچنین متغیرهای مذکور می توانند مستقیماً در تغییر رفتار مؤثر باشند. ارزش‌ها به صورت غیرمستقیم از طریق پذیرش مسئولیت ناشی از رفتار در هنگامها در مطالعات پیشین مؤثر بوده اند.<sup>[۵]</sup>

در میان عوامل ارزشی زنجیره‌ی VBN، جهت گیری ارزش حمایت از کمره زمین، پیش بینی کننده‌ی قوی برای تغییر رفتار بوده است.

نتایج مطالعه‌ی VBN در ژاپن نشان داد که ارزش حمایت از کمره زمین در باورهای حمایتی از کمره زمین و هنگامها اثر مثبت دارد. همچنین مطالعه‌ی VBN در روسیه ارزش حمایت از کمره زمین با ایجاد تعهد اخلاقی برای کاهش مصرف خودرو، در فرایند فعال شدن هنگامهای فردی مؤثر بوده است، که مقبولیت سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو را برای دستاوردهای زیست محیطی افزایش می دهد. مشاهده‌های اخیر مطابق نتایج مطالعاتی بوده است که در کشورهای اروپایی و آمریکای لاتین نیز بررسی شده اند.<sup>[۷]</sup> هر چه جهت گیری ارزش حمایت از کمره زمین برای افراد قوی تر باشد، نسبت به مسائل و مشکلات ناشی از استفاده‌ی خودرو حساس تر هستند. در پژوهش حاضر، کارمندان بخش خصوصی در صورت اجرای طرح زوج یا فرد تمایلی به تغییر رفتار نداشتند، ولی با جهت گیری ارزش حمایت از

جدول ۵. شیوه‌های پیشنهادی در سناریوی اجرای طرح زوج یا فرد (کوتاه مدت و میان مدت).

گزینه	فراوانی مطلق	فراوانی نسبی
وسيله‌ی شخصی با پرداخت جریمه	۴۸	۱۰
وسيله‌ی نقلیه‌ی ثانویه	۳۷	۷
آژانس	۱۴	۳
تاکسی	۶۶	۱۳
مترو	۱۳۴	۲۷
اتوبوس	۴۷	۹
تاکسی اینترنتی	۶۳	۱۳
موتورسیکلت	۲۹	۶
تغییر روز جهت تردد در ناحیه	۲۱	۴
تغییر ساعت جهت تردد در ناحیه	۱۹	۴
تغییر مسیر جهت تردد	۱۲	۲
لغو	۱۰	۲
مجموع	۵۰۰	۱۰۰

جدول ۶. شاخص ارزیابی تحلیل عاملی اکتشافی در پژوهش حاضر.

ردیف	مجموعه‌ی تحلیل شده	نماد	مقدار KMO
۱	ارزش راحت طلبی	HV	۰/۷۳۴
۲	ارزش جاه طلبی	EV	۰/۷۷۸
۳	ارزش عدالت طلبی	AV	۰/۸۱۱
۴	ارزش حمایت از کمره زمین	BV	۰/۸۱۶
۵	باورهای محیط زیستی	NEP	۰/۶۲۶
۶	آگاهی از عواقب رفتار	AC	۰/۷۹۹
۷	پذیرش مسئولیت رفتار	AR	۰/۷۴۱
۸	هنگامهای فردی	PN	۰/۷۷۶



جدول ۷. نتایج مدل لوجیت دوره‌های کوتاه‌مدت.

p - value	ضریب دوره‌های کوتاه‌مدت			علامت متغیر	متغیر
	همگانی	نیمه خصوصی	خصوصی		
۰/۰۰۸			۰/۸۲۴***	$a_{car}$	ثابت
۰/۰۰۰		۰/۶۷۶***		male	جنسیت
۰/۰۶۰	۱/۳۴۵*			$age_{\varphi}$	سن
۰/۰۰۰			۲/۲۲۳***	$cost_{\varphi}$	هزینه خانوار
۰/۰۶۴		۰/۳۹۶*		$edu_{\varphi}$	مدرک تحصیلی
۰/۰۲۱	۰/۶۸۳**			epkh	اشتغال (کارمند بخش خصوصی)
۰/۰۰۱			۱/۲۲۰***	$hmp_{\varphi}$	هدف همراه
۰/۰۴۳		۰/۶۷۶**		$frq_{\varphi}$	فراوانی سفر
۰/۳۰			۰/۰۲۷**	$tt_{short-car}$	
۰/۰۴		۰/۳۸***		$tt_{short-semi}$	زمان سفر
۰/۰۰۵	۰/۰۲۳***			$tt_{short-pub}$	
۰/۰۹۷			۰/۳۹۶*	$LV_{short-car-AV}$	
۰/۰۵۴			۲/۰۰۱*	$LV_{short-car-AR}$	
۰/۰۷۵			۰/۴۵۶*	$LV_{med-car-PN}$	
۰/۰۰۸		۰/۳۹۶***		$LV_{short-semi-Nep}$	ترکیبی
۰/۰۳۶	۰/۷۷۶**			$LV_{short-pub-AC}$	
۰/۰۵۶	۰/۸۵۰*			$LV_{short-pub-AV}$	
۰/۰۵۱	۰/۴۰۹*			$LV_{short-pub-BV}$	

افراد به استفاده از وسایل نیمه‌خصوصی در دوره‌ی میان‌مدت اجرای طرح شده است.

جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی، اهمیت به رفاه سایر افراد جامعه است و در هنجارها و رفتار حمایت از محیط زیست، اثری مثبت دارد. مشاهده شد که افراد جوان در محدوده‌ی سنی (۳۵-۴۴) سال با جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی در دوره‌ی کوتاه‌مدت تمایلی به استفاده از وسایل نیمه‌خصوصی ندارند، همچنین کارمندان بخش خصوصی نیز با جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی در دوره‌ی کوتاه‌مدت تمایل به استفاده از وسایل همگانی خواهند داشت. در رفتار افراد با تحصیلات زیر دیپلم و جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی در دوره‌ی میان‌مدت، تغییری مشاهده نشده است. جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی افراد فقط در دوره‌ی کوتاه‌مدت در تغییر رفتار مؤثر است. بر این اساس فرضیه‌ی ۱.۳ پذیرفته و فرضیه‌ی ۲.۳ رد می‌شود.

باورهای افراد در قبال پذیرش مسائل مربوط به محیط زیست، از جمله پذیرش مسئولیت رفتار از عوامل مهم در تغییر رفتار انتخاب وسیله هستند. در دو دوره‌ی اجرای طرح زوج یا فرد انتظار عدم تغییر رفتار در انتخاب وسیله در همراهی فرزند در سفرها می‌رفت. اما افرادی که فرزند در سفرهای خود به همراه داشتند و باور به پذیرش مسئولیت رفتار در انتخاب وسیله داشتند، در هر دو دوره‌ی اجرای طرح تمایلی به استفاده از وسیله‌ی خصوصی نداشتند. باورهای افراد از عوامل مهم در تغییر رفتار سفر هستند و این نتیجه مؤید فرضیه‌ی ۴ است.

بنابر نتایج مطالعه‌ی VBN در روسیه، هنجارهای فردی قوی‌ترین عامل در پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی هستند. هنجارهای فردی تعهد اخلاقی فرد نسبت به استفاده از خودروی شخصی بیشتر است. در پژوهش حاضر با افزایش تعداد وسیله‌ی شخصی تحت مالکیت افراد انتظار می‌رفت افراد با دسترسی بیشتر به وسیله‌ی نقلیه‌ی شخصی در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت طرح، تغییری در رفتار آنها مشاهده نشود. اما از آن‌جا که افراد با هنجارهای فردی فعال

کره‌ی زمین به تغییر رفتار و استفاده از وسایل همگانی در دوره‌ی میان‌مدت اجرای طرح تمایل خواهند داشت.

افراد جوان در بازه‌ی سنی (۲۵-۳۴) سال با جهت‌گیری ارزش حمایت از کره‌ی زمین به وسایل همگانی در دوره‌ی کوتاه‌مدت اجرای طرح زوج یا فرد تمایل خواهند داشت. در سفرهای همراهی با هدف تفریح انتظار می‌رفت که افراد از خودروی شخصی استفاده کنند، ولی افراد با جهت‌گیری ارزش حمایت از کره‌ی زمین در هدف اخیر، که فراوانی کمتری نسبت به بقیه‌ی هدف‌های سفر دارند، افراد در دوره‌ی میان‌مدت به تغییر رفتار روی می‌آورند. در سفرهای با حضور همراه، که هدف، سفر فرد همراه تفریح است، انتظار می‌رفت در رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه تغییری مشاهده نشود، اما با جهت‌گیری ارزش حمایت از کره‌ی زمین در دوره‌ی میان‌مدت در رفتار افراد تغییر مشاهده شده است. به طور خاص، افراد با جهت‌گیری ارزش حمایت از کره‌ی زمین، در صورت اجرای سیاست کاهش استفاده از خودرو، بیشتر به تغییر رفتار روی می‌آورند؛ در حالی که افراد با جهت‌گیری ارزش راحت‌طلبی، تمایل کمتری به تغییر رفتار استفاده از خودرو دارند. هر چه ارزش راحت‌طلبی افراد بیشتر باشد، تعهدات اخلاقی آنها نسبت به کاهش استفاده از خودروی شخصی کمتر است؛ زیرا خودروی شخصی از نظر راحتی و امنیت برای کاربران جذاب است، در حالی که استفاده از وسیله‌ی همگانی چنین ویژگی را ندارد. در مطالعه‌ی که در روسیه انجام شده است،<sup>[۱۷]</sup> ارزش راحت‌طلبی و عدالت‌طلبی در پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی مؤثر نبوده است، اما در پژوهش حاضر مشاهده شد که در صورت اجرای طرح زوج یا فرد میان‌مدت، مردان با جهت‌گیری راحت‌طلبی به تغییر رفتار انتخاب وسیله روی می‌آورند. این نتیجه می‌تواند به دلیل مشاهده‌ی آلودگی هوا و آثار منفی در سلامت افراد در طولانی‌مدت با جهت‌گیری راحت‌طلبی باشد. همچنین قیمت تقریبی خودرو (۵۰-۱۰۰ میلیون تومان) و جهت‌گیری ارزش راحت‌طلبی منجر به تمایل

جدول ۸. نتایج مدل لجیت دوره‌های میان‌مدت.

p - value	ضریب دوره‌های میان‌مدت			علامت متغیر	متغیر
	همگانی	نیمه خصوصی	خصوصی		
۰/۰۰			-۱/۶۶۰***	$b_{car}$	ثابت
۰/۰۲۲			۰/۵۵۰**	male	جنسیت
۰/۰۰	۱/۰۵۷***			$age_1$	سن
۰/۰۰	-۱/۳۰۰***			$vehcost_1$	قیمت تقریبی
۰/۰۰			۲/۷۱۴***	$vehcost_1$	خودروی شخصی
۰/۰۲۱		-۰/۵۶۲**		indc	درآمد مستقل
۰/۰۴۷		۰/۹۰۳**		ret	بازنشسته
۰/۰۳۰		۲/۵۵۸**		doct	پزشک
۰/۰۰			۰/۸۲۴***	$purp_1$	هدف سفر
۰/۰۰۲	-۰/۹۹۴***			$mpurp_1$	
۰/۰۱۸		۰/۵۳۷**		$zdu_1$	مدت زمان حضور در ناحیه
۰/۰۴۷			-۰/۰۲۵**	$tt_{med-car}$	زمان سفر
۰/۰۰۱		-۰/۰۴۲***		$tt_{med-semi}$	
۰/۰۱۲	-۰/۰۲۲**			$tt_{med-bus}$	
۰/۰۷۳			-۴/۰۲۴*	$LV_{1med-car-BV}$	ترکیبی
۰/۰۲۸			-۰/۳۰۵**	$LV_{1med-car-HV}$	
۰/۰۱۳			-۰/۳۱۸**	$LV_{1med-car-PN}$	
۰/۰۲۰		-۰/۳۹۶**		$LV_{1med-semi-Nep_1}$	
۰/۰۱۹		۰/۴۸۷**		$LV_{1med-semi-HV}$	
۰/۰۷۵	-۰/۴۹۰*			$LV_{1med-pub-AV}$	
۰/۰۵۹	۰/۵۴۷*			$LV_{1med-pub-BV}$	

زنجیره‌ی در نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار (VBN) نیز استفاده شده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تغییر رفتار افراد در مواجهه با سیاست‌های متبع استفاده از خودرو (سیاست سخت) بوده است. سیاست در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، اجرای طرح زوج یا فرد است. روش جمع‌آوری داده در مطالعه‌ی حاضر، از طریق روش نظرسنجی مصاحبه‌ی حضوری به وسیله‌ی پرسش‌نامه در شهر تهران صورت پذیرفته است. بنابر مطالعات پیشین، علاوه بر ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی و ویژگی‌های وسیله‌ی نقلیه، از عوامل پنهان فردی مؤثر در رفتار انتخاب وسیله‌ی افراد برگرفته از نظریه‌ی VBN نیز پرسش‌گری شده است. پس از پالایش داده‌ها جهت شناسایی متغیرهای پنهان نگرشی محیط‌زیستی و عوامل زیربنایی پرسش‌نامه از تحلیل عاملی اکتشافی استفاده شده است. در نهایت، به ساخت مدل‌های لجیت چندگانه در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) پرداخته شده است. نتایج مدل‌های لجیت چندگانه نشان داد در دوره‌های زمانی مختلف، اجرای سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی، همان‌طور که از مرور ادبیات انتظار می‌رفت، رفتارهای افراد تحت تأثیر عواملی غیر از عوامل اجتماعی - اقتصادی

شده، به لحاظ اخلاقی خود را موظف به کمینه‌سازی خودروی شخصی می‌دانند، در افرادی که تعداد خودروی شخصی آنها بیش از ۱ عدد است، در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت طرح، تمایلی به استفاده از وسیله‌ی خصوصی ندارند، همچنین داشتن گواهینامه و هنجار فعال شده در هر دو دوره‌ی مذکور منجر به تغییر رفتار افراد شده است، که نشان‌دهنده‌ی پذیرفته شدن فرضیه‌ی ۵ است.

## ۶. نتیجه‌گیری

سیاست‌های کاهش استفاده از خودروی شخصی، که شامل افزایش هزینه‌های خودروی شخصی و بهبود خدمات حمل‌ونقلی است، اکثراً با مخالفت افراد روبه‌رو می‌شود. به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که نگرش‌های زیست‌محیطی افراد در پذیرش سیاست‌ها مؤثر باشد. بر این اساس، به منظور تغییر رفتار افراد در اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا فقط به عوامل مشاهده شده بسنده نشده و از روابط



خودروی شخصی به همراه بهبود وسایل حمل و نقل همگانی از نظر سرعت و راحتی می‌توان افراد را به تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه تشویق کرد. در این صورت افراد با مشاهده‌ی نتیجه‌ی تغییر رفتار خود و آثار مثبت زیست‌محیطی در انتخاب وسایل سازگار با محیط‌زیست می‌توانند مداومت داشته باشند. تعهدات اخلاقی با ایجاد حس وظیفه در پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی مؤثر هستند. هر چند میزان تعهد اخلاقی فرد به حمایت از محیط‌زیست بیشتر تمایل به تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه خواهد داشت. دسترسی به تعداد بیشتر خودروی شخصی، توانایی پرداخت جریمه و حضور همراه و هدف سفر از عوامل مؤثر در عدم تغییر وسیله‌ی نقلیه در پژوهش حاضر شناخته شده‌اند. اما فعال شدن هنجارهای فردی و ارزش‌های مؤثر در رفتار حمایت از محیط‌زیست، اثر عوامل ذکر شده را کاهش داده و منجر به تغییر رفتار افراد در دوره‌های میان‌مدت و کوتاه‌مدت اجرای طرح شده است.

بنابر یافته‌های پژوهش حاضر در طراحی یک سیستم حمل و نقل پایدار اجتماعی و سازگار با محیط‌زیست در راستای اولویت‌های مردم، برنامه‌ریزی سفرهای کاری و تحصیلی در پذیرش سیاست‌ها توسط کاربران در کنار افزایش آگاهی می‌تواند مؤثر باشد. تغییر رفتار و رفتار حمایت از محیط‌زیست، متفاوت از سبک زندگی سبز است. بسیاری از کاربران خودروی شخصی با تبعیت از سبک زندگی سبز، مانند صرفه‌جویی انرژی و مدیریت پسماند، در برابر سیاست‌های منع استفاده از خودروی شخصی مقاومت می‌کنند. زیرا تغییر رفتار برای افراد سخت و یا غیرممکن است. برنامه‌ریزان حمل و نقل باید درک سلسله مراتب ترجیحات فردی و برنامه‌ریزی سفرهای کاری و تحصیلی بر پذیرش سیاست‌ها توسط کاربران کمک داشته باشند. به کارگیری سیاست‌های نرم در کنار سیاست‌های سخت می‌تواند پذیرش سیاست‌های سخت را برای افراد قابل فهم و اجرا کند. تغییر رفتار افراد تحت برانگیخته شدن جهت‌گیری ارزش، باور و هنجار نشان‌دهنده‌ی وجود ناهمگونی سلیقه‌ی است. به عنوان پیشنهادها آتی در مورد بحث پژوهش حاضر، بررسی اثر ارزش‌های فردی و هنجاری به تفکیک جنسیت و حضور همراه در سفرهای با هدف اجباری در پذیرش سیاست‌ها با استفاده از مدل‌های کلاس پنهان پیشنهاد می‌شود.

آنهاست. ویژگی‌های فردی افراد، از جمله سطح رفاه اقتصادی و موقعیت شغلی در دوره‌های مختلف اجرای طرح از عوامل اثرگذار بودند؛ در حالی که به مرور زمان میزان اثرگذاری برخی از ویژگی‌های مذکور در تغییر رفتار اثر متفاوتی داشته است. در مدل‌های پرداخت شده، برخی از متغیرها فقط در یک بازه‌ی زمانی اثرگذار بودند. برخی از متغیرهای پنهان فردی برگرفته از نظریه‌ی VBN در شدت و اثر معناداری ویژگی فردی مؤثر بوده و در دوره‌های مختلف منجر به تغییر رفتار کاربران خودروی شخصی شده است. معمولاً افراد در مواجهه با سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی، حتی در صورت مشاهده‌ی آلودگی هوا، تمایلی به تغییر رفتار ندارند. در صورت پذیرش فقط برای مدت کوتاهی از سیاست‌ها پیروی خواهند داشت. این مسئله مربوط به عدم شناخت افراد از میزان اثرگذاری رفتار حمایت از محیط‌زیست در شرایط اضطرار است. جهت‌گیری ارزشی و ملاحظات اخلاقی در پیش‌بینی رفتار حمایت از محیط‌زیست در افرادی که با توجه به وضعیت اجتماعی خود تمایلی به تغییر رفتار نداشتند، عاملی پراهمیت شناخته شده است. ارزش حمایت از کروی زمین و هنجارهای فردی از مهم‌ترین عوامل در تغییر رفتار افراد در دوره‌های اجرای سیاست منع استفاده از خودرو بوده است. افرادی که با توجه به شرایط رفاهی و موقعیت شغلی در اجرای طرح زوج یا فرد در دوره‌های میان‌مدت تمایلی به تغییر رفتار نداشتند، اما با جهت‌گیری ارزشی و تعهدات اخلاقی به تغییر رفتار روی آوردند. همچنین هنجارهای فردی فعال شده، افراد را به لحاظ اخلاقی موظف به تغییر وسیله در شرایط آلودگی می‌کند. بنابر پژوهش‌های پیشین، ارزش‌های راحت‌طلبی و جاه‌طلبی، ارتباطی منفی با باورهای حمایت از محیط‌زیست داشته و افراد با جهت‌گیری ذکر شده، نسبت به تغییر وسیله تمایلی نداشتند؛ اما مشاهده‌های مدل‌سازی پژوهش حاضر نشان می‌دهد افراد با ارزش‌های مبتنی بر راحتی و رفاه شخصی نیز به تغییر رفتار در شرایط آلودگی روی می‌آورند. زیرا این دسته افراد که ارزش‌هایی برای راحتی خود دارند، با مشاهده‌ی آلودگی هوا و افت کیفیت زندگی راغب به تغییر رفتار می‌شوند.

درک راحتی و به‌صرفه بودن خودروی شخصی، عاملی مهم در مقاومت افراد در تغییر وسیله‌ی نقلیه است، که با وجود هزینه‌ها و ممنوعیت استفاده از آن، افراد بر عدم تغییر وسیله اصرار دارند. با افزایش آگاهی افراد نسبت به مضرات استفاده از

## پانویس‌ها

1. transport demand management
2. value- belief- norm
3. travel demand management
4. Batur
5. Stern
6. new ecological paradiam (NEP)
7. norm activation model (NAM)
8. Shwartz
9. De Groot & Steg
10. egoistic value
11. altruistic value
12. biospheric value
13. hedonic value
14. Dunlap

15. exploratory analysis
16. Amos 25
17. principal component
18. nlogit 5

## منابع (References)

1. Bamberg, S., Fujii, S., Friman, M. and et al. Behaviour theory and soft transport policy measures", *Transport policy*, **18**(1), pp. 228-235 (2011).
2. Habibian, M. and Rezaei, A. "Accounting for systematic heterogeneity across car commuters in response to multiple TDM policies: case study of Tehran", *Transportation*, **44**(4), pp. 681-700 (2017).

3. Meyer, M.D. "A toolbox for alleviating traffic congestion and enhancing mobility", United States, *Federal Highway Administration* (1997).
4. Bueno, P.C., Gomez, J., Peters, J.R. and et al. "Understanding the effects of transit benefits on employees' travel behavior: Evidence from the New York-New Jersey region", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **99**, pp. 1-13 (2017).
5. Stopher, P.R. "Reducing road congestion: a reality check", *Transport Policy*, **11**(2), pp. 117-131 (2004).
6. Möser, G. and Bamberg, S. "The effectiveness of soft transport policy measures: A critical assessment and meta-analysis of empirical evidence", *Journal of Environmental Psychology*, **28**(1), pp. 10-26 (2008).
7. Mirbaha, B., Sherafatipour S. and Mahpour A. "Congestion pricing model for urban congested roads (case study: sadr elevated highway)", *Journal of Transportation Engineering*, **7**(2), pp. 353-365 (2016).
8. Ruiz, T. and Garcia, P. "Variations on timing decisions after participating in travel behavior change programs", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **160**, pp. 625-633 (2014).
9. Batur, İ. and Koç. "Travel demand management (TDM) case study for social behavioral change towards sustainable urban transportation in Istanbul", *Cities*, **69**, pp. 20-35 (2017).
10. Jakovcevic, A. and Steg, L. "Sustainable transportation in Argentina: Values, beliefs, norms and car use reduction", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **20**, pp. 70-79 (2013).
11. Beirão, G. and Cabral, J.S. "Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study", *Transport Policy*, **14**(6), pp. 478-489 (2007).
12. Stern, P.C. and Dietz, T. "The value basis of environmental concern", *Journal of Social Issues*, **50**(3), pp. 65-84 (1994).
13. Schwartz, Sh.H. "An overview of the Schwartz theory of basic values?", *Online readings in Psychology and Culture*, **2**(1), p.11 (2012).
14. Lind, H.B., Nord ærn, T., Jørgensen, S.H. and et al. "The value-belief-norm theory, personal norms and sustainable travel mode choice in urban areas", *Journal of Environmental Psychology*, **44**, pp. 119-125 (2015).
15. Tayarani Yousefabadi, A., Mahpour, A. and Javanshir, H. "Modeling share change of non-public vehicles and the rate of emissions due to the implementation of demand management policies", *Journal of Transportation Research*, **17**(3), pp. 203-216 (2020).
16. Hiratsuka, J., Perlaviciute, G. and Steg, L. "Testing VBN theory in Japan: relationships between values, beliefs, norms, and acceptability and expected effects of a car pricing policy", *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, **53**, pp. 74-83 (2018).
17. Ünal, A.B., Steg, L. and Granskaya, J. "To support or not to support, that is the question: Testing the VBN theory in predicting support for car use reduction policies in Russia", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **119**, pp. 73-81 (2019).
18. Jain, N.K., Kaushik, K. and Choudhary, P. "Sustainable perspectives on transportation: public perception towards odd-even restrictive driving policy in Delhi, India", *Transport policy*, **106**, pp. 99-108 (2021).
19. Arroyo, R., Ruiz, T., Mars, L. and et al. "Influence of values, attitudes towards transport modes and companions on travel behavior", *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, **71**, pp. 8-22 (2020).
20. Tayarani Yousefabadi, A., Mahpour, A., Farzin, I. and et al. "The assessment of the change in the share of public transportation by applying demand management policies: evidence from extending traffic restriction to the air pollution control area in tehran", *AUT Journal of Civil Engineering*, **5**(2), pp. 144-212 (2021).
21. Tayarani Yousefabadi, A., Mahpour, A. and Javanshir, H. "Technical evaluation and comparison of odd-even traffic restriction with district pricing policy in reduction of emissions generated from transportation vehicles (case study: selected area of tehran city)", *Journal of Transportation Research*, **17**(2), pp. 81-96 (2020).
22. Mahpour, A., Mamdoohi, A., HosseinRashidi, T. and et al. "Shopping destination choice in Tehran: An integrated choice and latent variable approach", *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, **58**, pp. 566-580 (2018).
23. Hess, S. and Börjesson, M. "Understanding attitudes towards congestion pricing: a latent variable investigation with data from four cities", *Transportation Letters*, **11**(2), pp. 63-77 (2019).

# شناسایی و تشخیص آسیب جاشدگی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال

آرمان مام‌عزیزی\* (استادیار)

محشم خان‌احمدی (دانشجوی دکتری)

گاهران نوبخت وکیل (ره‌بی)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۵۳-۶۳ (پژوهشی)

شناسایی آسیب در سازه‌ها از اهداف اولیه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها است. امروزه استفاده از ستون‌های کامپوزیت CFST در صنعت ساختمان، به‌ویژه سازه‌های ساختمانی بلندمرتبه، رو به افزایش است. در ستون‌های کامپوزیت CFST، جاشدگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی به‌عنوان رایج‌ترین نوع آسیب مطرح است، که در نوشتار حاضر به تأثیر آن بر خواص دینامیکی مودال و همچنین، شناسایی منطقه‌ی آسیب جاشدگی پرداخته شده است. جاشدگی به عمق ۳ میلی‌متر به صورت کاهش سختی بتن در اتصال با جداری فولادی تعریف و ستون تحت تحلیل بسامدی واقع شده است. تفاوت در مقادیر بسامدی و همچنین، میزان همبستگی مودال کمتر از ۱ به دلیل وجود آسیب مشاهده شده است. برای شناسایی ناحیه‌ی جاشدگی، شاخصی بر مبنای ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه و کمینه‌ی نسبی شاخص آسیب در تمامی مودها در موقعیت‌های جاشدگی اتفاق افتاده است.

**واژگان کلیدی:** پایش سلامتی سازه، شناسایی آسیب جاشدگی، تحلیل بسامدی، معیار همبستگی مودال، تحلیل موجک.

## ۱. مقدمه

آگاهی از وضعیت سلامتی سازه‌ها، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. بی‌شک وضعیت سلامتی سازه‌ها بسیار مهم است و در صورت تشخیص وجود آسیب، محل و شدت آن می‌توان با ترمیم محل آسیب و یا تعویض المان‌های آسیب‌دیده، حتی‌الامکان از وقوع خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری کرد. ابداع و توسعه‌ی انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مفاهیم و کاربردهای عملی را کاهش داده و این امکان را فراهم ساخته است که با استفاده از روش‌های پایش سلامتی قابل اعتماد، بتوان رفتار سازه‌ها را در مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل کرد.

یکی از روش‌های کارآمد تشخیص آسیب سازه‌ی، تحلیل پاسخ‌های سازه به طور هم‌زمان در دو حوزه‌ی زمان و بسامد، استفاده از تبدیل ریاضی توانمندی چون تبدیل موجک (WT)<sup>۱</sup> است که با استفاده از آن، اطلاعات بیشتری از پاسخ تحلیل شده‌ی سازه بر اساس توانایی آن در محلی‌سازی پاسخ در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۳۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2022.59903.3075

a.mamazizi@uok.ac.ir  
m.khanahmadi@uok.ac.ir  
k.vakili@uok.ac.ir

می‌شود.<sup>[۱]</sup> بر این اساس، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی شناسایی آسیب بر مبنای تبدیلات موجک انجام شده است که در ادامه، تاریخچه‌ی از کاربردهای تبدیل موجک در حوزه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها ارائه شده است. کاتونین<sup>۲</sup> (۲۰۱۰)، با استفاده از تبدیل موجک و داده‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های چندگانه پرداخت و دریافت که برای شناسایی محل ترک، حذف نوفه از ضرایب جزئیات موجک لازم است. ژانگ و ایادیجی<sup>۳</sup> (۲۰۱۱)، با استفاده از تبدیل موجک ایستا (SWT)<sup>۴</sup> و داده‌های مودال به آشکارسازی ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند و نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای داده‌های شکل مود، می‌توان محل آسیب را شناسایی کرد. ژو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، با به کارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بُعدی<sup>۶</sup> و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر<sup>۷</sup> به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند. لی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۵]</sup> با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته<sup>۹</sup> به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی، قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرابایی را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب استفاده شود. لی و هو<sup>۱۰</sup>

(۲۰۱۴)،<sup>[۶]</sup> به شناسایی آسیب زیرساختاری با در نظر گرفتن آسیب به صورت کاهش سختی در سازه‌ی قاب دوبعدی ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه‌ی موجک پرداختند و موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به‌درستی شناسایی کنند. کاتونین (۲۰۱۵)،<sup>[۷]</sup> با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکانکس<sup>۱۱</sup> تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای آسیب‌دیده‌ی صفحات کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که با استفاده از موجک‌های مذکور، مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۸]</sup> با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتنی پرداختند و با استفاده از تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده‌ی تراز هر طبقه برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه، از جمله جرم، وجود دارد. عباس‌نیا<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۹]</sup> در پژوهشی با استفاده از روش دو مرحله‌ی مبتنی بر تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرها پرداختند و با استفاده از تبدیل موجک، محل‌های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی‌شده‌ی آسیب کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌های آسیب شدند. رحامی و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۱۰]</sup> با استفاده از مفاهیم آنالیز انرژی در تبدیل بسته‌ی موجک به تشخیص خرابی در سکوها ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت، حتی در آسیب‌های با شدت کم، به‌طور محسوسه‌ی به شدت خسارت‌های وارده به سکو وابسته است. یانگ و ایادیچی<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۱۱]</sup> روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند و نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها، باعث اختلال در سطح بسامد مودال شده و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص کرد. نوری<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۱۲]</sup> به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان می‌توان شناسایی آسیب موفق‌تری را انجام داد. رضایی‌فرو و همکاران (۲۰۱۸-۲۰۲۰)،<sup>[۱۳-۱۵]</sup> به شناسایی آسیب جراثینگی در ستون‌های فولادی پُر شده با بتن (CFST)<sup>۱۶</sup> براساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آسیب جراثینگی توسط یک لایه‌ی پلی استایرن نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته‌ی بتنی و جداری فولادی شبیه‌سازی شده و با استفاده از تبدیل موجک، موفق به شناسایی محل جراثینگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی شدند.

وانگ<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۴]</sup> برای شناسایی آسیب سازه‌های تونلی زیرزمینی، یک تبدیل موجک جدید براساس روش بردار نیروی باقیمانده پیشنهاد و برای مدل المان محدود تونل با انواع آسیب استفاده کردند، که نتایج شناسایی موفق‌ی به‌دست آمد. حسینی واعظ و عارف‌زاده (۲۰۱۹)،<sup>[۱۷]</sup> با استفاده از تحلیل تبدیل موجک به مقایسه‌ی داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند و موفق به شناسایی محل‌های آسیب شدند و دریافتند که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از داده‌های استاتیکی، عواملی چون نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری، در میزان ضرایب موجک تأثیرگذار است. میرزایی<sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۸]</sup> با روشی مشابه روش عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۹]</sup> به شناسایی آسیب در سازه‌ی خرابی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند و به این طریق، المان‌های آسیب‌دیده، شناسایی و مقدار آسیب در هر یک از آن‌ها محاسبه شدند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۹]</sup> با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود

صفحه‌ی فولادی به مقایسه‌ی ضرایب موجک وضعیت‌های سالم و معیوب پرداختند و دریافتند که اغتشاش‌ها در ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب، چشم‌گیر بوده و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد. همچنین، ایشان نشان دادند که از تحلیل موجک شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل موجک شکل‌های مود بالاتر، موقعیت‌های آسیب با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب موجک شناسایی می‌شود. آن‌ها در مطالعات دیگری با استفاده از تبدیل موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته‌ی پانلی و کامپوزیت چندلایه شدند.<sup>[۲۰، ۲۱]</sup> همچنین ایشان با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته به آشکارسازی آسیب در تیرهای فولادی پرداختند و نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب را با دقت بالایی شناسایی کرد.<sup>[۲۲، ۲۳]</sup> همچنین ایشان در مطالعات دیگری،<sup>[۲۴، ۲۵]</sup> با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به شناسایی آسیب در المان ستون تحت اثر بار محوری پرداختند و دریافتند که مقادیر اوج در سیگنال‌های خروجی با صرف‌نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، در محل‌های آسیب می‌باشد. رضایی‌فر و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۲۶، ۲۷]</sup> با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند و محل آسیب را با ایجاد جهش نسبی بیشینه و کمینه در ضرایب موجک تولیدشده شناسایی کردند. ما<sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۲۸]</sup> بر مبنای تحلیل موجک انحنای استاتیکی المان‌های تیر به شناسایی آسیب‌های چندگانه پرداختند و نتایج شناسایی موفق‌ی به‌دست آوردند. در پژوهش دیگری، سان<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>[۲۹]</sup> با استفاده از تبدیل موجک و همبستگی تصاویر دیجیتال موفق به شناسایی آسیب در صفحه‌های کامپوزیت شدند.

در سال‌های اخیر، مطالعات آزمایشگاهی و عددی در ارتباط با مباحث لرزه‌یی و اتصال‌ها در سازه‌های با ستون‌های کامپوزیت CFST انجام شده است.<sup>[۳۰-۳۲]</sup> با این حال، هنوز به صورت جدی به موضوع پایش سلامتی در المان‌های مذکور پرداخته نشده است. با توجه به گسترش استفاده از ستون‌های کامپوزیت در صنعت ساختمان به‌ویژه سازه‌های ساختمانی بلند، شناسایی آسیب در آن‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است. از طرفی، جراثینگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی از رایج‌ترین نوع آسیب‌ها در ستون‌های با مقاطع مرکب است. براین اساس در نوشتار حاضر، به تشخیص ناحیه‌ی آسیب جراثینگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی ستون CFST با به‌کارگیری الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پرداخته شده است. همچنین، اثر جراثینگی بتن از جداری فولادی بر خواص دینامیکی مودال (بسامدها و شکل‌های مود) بررسی و در ادامه به مباحث تئوری تبدیل موجک پرداخته شده است.

## ۲. تبدیل موجک

تبدیل موجک، یک تبدیل ریاضی پردازشی سیگنال‌ها است که مشخصات بسامدی سیگنال را در یک بازه‌ی زمانی کوتاه استخراج می‌کند و نشان می‌دهد که با گذشت زمان به چه نحو تغییر می‌کند. تبدیل موجک، مجموعه‌ی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن بسامدی تغییر می‌کند و اجزاء بسامدی در رزولوشن‌های مختلف به‌دست می‌آیند.<sup>[۳۳]</sup> در یک تقسیم‌بندی کلی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)<sup>۲۱</sup> و تبدیل موجک گسسته (DWT)<sup>۲۲</sup> به این صورت تعریف می‌شود.

## ۱.۲. تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته ی سیگنال  $f(t)$  در بازه ی  $-\infty$  تا  $\infty$  مطابق رابطه ی ۱ تعریف می شود: [۳۵،۳۴]

$$CWT_{s,\tau}^{\psi}(f(t)) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (۱)$$

که در آن،  $s$  و  $\tau$  به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر انتقال و  $\psi$  تابع موجک هستند. مقیاس های بالا ( $s > 1$ ) متناظر با جزئیات<sup>۲۳</sup> و مقیاس های پایین ( $s < 1$ ) متناظر با تقریب های<sup>۲۴</sup> سیگنال هستند. تابع موجک در رابطه ی ۱، باید این ویژگی ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۳۷،۳۶] (رابطه ی ۲):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (۲)$$

۲. انرژی آن محدود باشد [۳۷،۳۶] (رابطه ی ۳):

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (۳)$$

۳. باید در رابطه ی ۴ صدق کند: [۳۸-۳۶]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (۴)$$

که در آن،  $\Psi$  تبدیل فوری ی  $\psi$  و  $\omega$  بیانگر بسامد است. در رابطه ی ۲، تابع به صورت نوسانی است. رابطه ی ۳ به این معنی است که بیشترین انرژی موجک برای یک بازه ی زمانی کوتاه، نامحدود نمی شود. [۳۸]

## ۲.۲. تبدیل موجک گسسته

به دلیل تغییر پیوسته ی پارامترهای مقیاس و انتقال، انجام CWT روی یک سیگنال، منجر به تولید اطلاعات اضافی می شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازه ی حافظه افزایش می یابد. بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس های مختلف مورد نظر است. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و سپس، وابسته کردن پارامتر انتقال به آن است [۳۵] (رابطه ی ۵): [۳۵]

$$\begin{cases} s = s_o^j, & s_o < 1, j \in Z \\ \tau = k\tau_o s_o^j, & \tau_o \neq 1, k \in Z \end{cases} \quad (۵)$$

با فرض  $s_o = 2$  و  $\tau_o = 1$ ، تبدیل موجک گسسته ی سیگنال  $f(t)$  با استفاده از رابطه ی ۶ به دست می آید: [۳۶،۳۵]

$$DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) = \langle f(t), \psi_{j,k} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-k2^j}{2^j} \right) dt \quad (۶)$$

اگر مجموعی از ضرایب موجک  $DWT_{j,k}^{\psi}(f(t))$  وجود داشته باشد که اطلاعات کامل سیگنال  $f(t)$  را توصیف کند، باید رابطه ی ۷ برقرار باشد: [۳۵،۳۴]

$$A \|f(t)\|^2 \leq \sum_{j,k} |DWT_{j,k}^{\psi}(f(t))|^2 \leq B \|f(t)\|^2 \quad (۷)$$

که در آن،  $A, B \in R^+$  در چنین حالتی، سیگنال  $f(t)$  را می توان از طریق معکوس تبدیل موجک گسسته مطابق رابطه ی ۸ بازسازی کرد: [۳۵،۳۴]

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) \psi_{j,k}(t) \quad (۸)$$

در تحلیل چندمقیاسی، یک سیگنال مشخص را می توان در دو قسمت جزئیات و تقریبات تجزیه کرد. برای به دست آوردن سطح بعدی جزئیات و تقریبات، می توان اطلاعات تقریبی را بیشتر تجزیه کرد. فرایند تجزیه می تواند تا رسیدن به مقیاس طراحی شده ی  $z$  تکرار شود و این چگونگی پیاده سازی یک تبدیل موجک گسسته ( $DWT$ ) است. معادله های ۹ و ۱۰، جزئیات و تقریبات را در مقیاس  $z$  ارائه می دهند: [۳۵،۳۴]

$$\begin{aligned} f_a^j(t) &= \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t) \end{aligned} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} f_d^j(t) &= \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

که در آن،  $k \in Z$  و ضرایب  $a_{j,k}$  و  $d_{j,k}$  به ترتیب در ارتباط با تقریبات و جزئیات هستند. در نتیجه، یک سیگنال  $f(t)$  را می توان با استفاده از معادله ی ۱۱ به مجموعه یی از زیرفضا تجزیه کرد:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (۱۱)$$

که در آن،  $j$  یک پارامتر مقیاس از پیش تعیین شده است. در معادله های اخیر،  $\phi(t)$  تابع مقیاس و  $\psi(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$  نسخه ی انتقال یافته و مقیاس شده ی  $\phi(t)$  است. [۳۴]

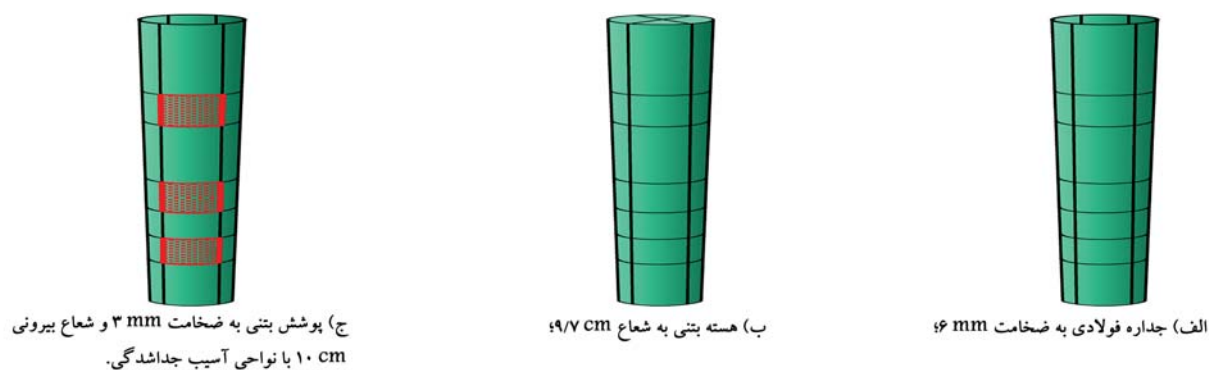
## ۳. مدل سازی المان محدود ستون CFST

ستون CFST با مقطع دایره یی به شعاع ۱۰ سانتی متر به ارتفاع ۳ متر و ضخامت جداره ی فولادی ۶ میلی متر با شرایط تکیه گاهی مفصلی و مشخصات مصالح فولادی و بتنی ارائه شده در جدول ۱ به ترتیب با استفاده از المان های Shell و Solid در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی شده است.

در شکل ۱، المان های تشکیل دهنده ی ستون CFST با نواحی آسیب جلدشدگی به طول ۳۰ سانتی متر و عرض ۲۵/۰ محیط مقطع ستون و عمق ۳ میلی متر که به صورت کاهش سختی بتن به میزان ۳۰ درصد تعریف شده است، مشاهده می شود. مشخصات هندسی محل های آسیب نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی و بتنی در ستون CFST.

مصالح	مدول کشسانی (MPa)	چگالی ( $k/m^3$ )	نسبت پواسون
فولاد	۲۰۰۰۰۰	۷۸۵۰	۰/۳
بتن	۱۸۰۰۰	۲۱۷۰	۰/۲



شکل ۱. المان‌های ستون CFST.

جدول ۲. مشخصات هندسی محل‌های آسیب جدارشدگی ستون CFST.

وضعیت	تعداد	شماره	آسیب	
			منطقه (متر)	
D1	1	1	0/6 - 0/9	
D2	1	2	1/2 - 1/5	
D3	1	3	2/1 - 2/4	
D4	2	1	0/6 - 0/9	
	2	3	2/1 - 2/4	

جدول ۳. مقادیر بسامدی وضعیت‌های سالم و آسیب (Hz).

وضعیت	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>
سالم	87/058	229/91	428/34	669/02	941/51	1237/5
D1	87/056	229/88	428/28	668/98	941/42	1237/3
D2	87/044	229/90	428/27	668/95	941/40	1237/3
D3	87/056	229/88	428/28	668/98	941/42	1237/3
D4	87/055	229/84	428/22	668/94	941/32	1237/1

## ۴. تحلیل مودال

### ۴.۱. بررسی مقادیر بسامدی

ستون CFST با ابعاد مش ۳۰ میلی‌متر بدون هیچ‌گونه اثر بارگذاری در هر یک از حالت‌های آسیب D1 تا D4 و نیز، حالت بدون آسیب، تحلیل بسامدی شده است. مش‌بندی المان‌های Solid و Shell به ترتیب به صورت ۴ گره‌یی و ۸ گره‌یی به روش انتگرال‌گیری کاهشی انجام شده است. در جدول ۳، مقادیر بسامدی وضعیت‌های با آسیب و بدون آسیب ۶ مود اول ارائه شده است؛ که مطابق آن، مقدار بسامد حالت‌های آسیب از مقدار بسامد نظیرشان در حالت بدون آسیب کمتر است. همچنین، بسامد حالت آسیب D4 از بسامد حالت‌های آسیب D1 و D3 کمتر است؛ زیرا حالت آسیب D4 به صورت مجموع حالت‌های آسیب‌های D1 و D3 تعریف شده است.

### ۴.۲. بررسی همبستگی شکل‌های اولیه و ثانویه مود

یکی از معیارهایی که به کمک آن می‌توان میزان همبستگی شکل‌های مود یک سازه

را محاسبه کرد، معیار همبستگی مودال (MAC)<sup>۲۵</sup> است که مطابق رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:<sup>[۲۹]</sup>

$$MAC(\phi_i^u, \phi_j^d) = \frac{\left( \sum_{k=1}^n \phi_{i,k}^u \times \phi_{j,k}^d \right)^2}{\sum_{k=1}^n \left( \phi_{i,k}^u \right)^2 \times \sum_{k=1}^n \left( \phi_{j,k}^d \right)^2} \quad (12)$$

که در آن،  $\phi_i^u$  و  $\phi_j^d$  به ترتیب شکل مود  $i$ ام اولیه و  $j$ ام ثانویه هستند. بیشترین و کمترین مقدار  $MAC$  به ترتیب ۱ و صفر است (مطابق رابطه‌ی ۱۳):

$$0 < MAC \leq 1 \Rightarrow \log(MAC^{-1}) \geq 0 \quad (13)$$

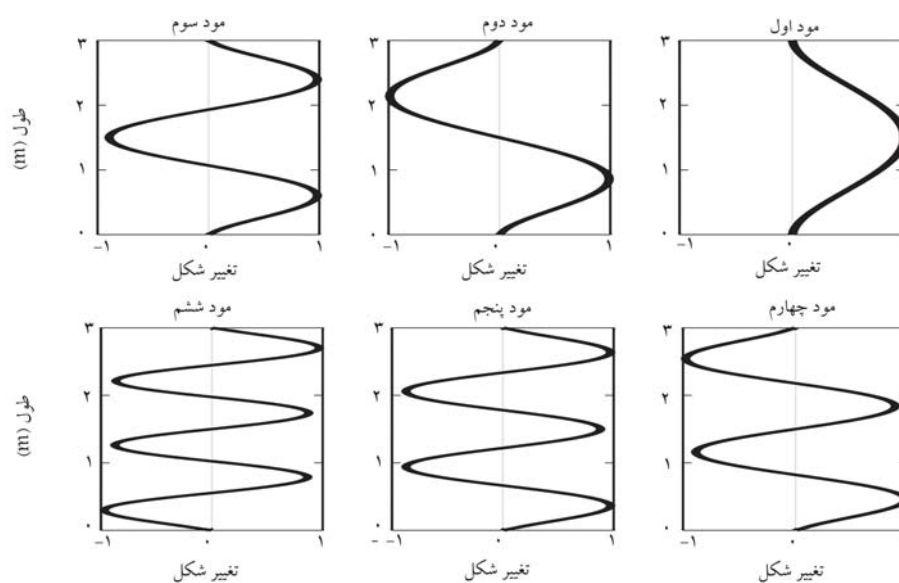
در شکل ۲، شش شکل مود اول حالت بدون آسیب ستون مشاهده می‌شوند. در جدول‌های ۴ الی ۷، نیز مقادیر منفی لگاریتم  $MAC$  محاسبه و ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که مقادیر قطری ماتریس‌های همبستگی مودال، همگی مقداری غیرصفر هستند. مقدار صفر متناظر با مقدار  $MAC$  برابر با ۱ است و انطباق کامل شکل مودهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. به عبارتی، اگر تمام درایه‌های قطر اصلی ماتریس همبستگی مودال صفر باشد، آنگاه در سازه آسیبی وجود ندارد. مشاهده می‌شود که چنین نیست و مقادیر قطری به دلیل وجود آسیب غیرصفر هستند.

## ۵. شناسایی آسیب

یکی از قابلیت‌های تبدیل‌های موجک، شناسایی موقعیت‌های مکانی یا زمانی است که در آن موقعیت‌ها، سیگنال مورد نظر دچار تغییرات یا ناپیوستگی‌های ناگهانی شده است. بررسی‌های اولیه‌ی انجام شده نشان داده است که ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی سیگنال‌های فرضی، اطلاعات مفیدی جهت شناسایی نقاط ناپیوستگی دارند. بر این اساس، در نوشتار حاضر، برای شناسایی نواحی جدارشدگی بتن از جداره‌ی فولادی الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته، به شرح مراحل زیر تعریف شده است که شاخص پیشنهادی در الگوریتم مذکور، میزان بی‌نظمی و اغتشاش را در موقعیت‌های جدارشدگی بتن از جداره فولادی نشان می‌دهد.

### ۵.۱. الگوریتم تشخیص آسیب

گام ۱: فراخوانی سیگنال‌های شکل مود سالم و آسیب دیده به محیط نرم‌افزار تحلیل



شکل ۲. شش شکل مود اول ستون CFST در حالت بدون آسیب.

جدول ۴. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۱.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ( $LMAC^{-1}$ )
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۰/۵۲۳	۵/۱۵۸۲	۱۰/۷۷۷	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۴	۰/۰۰۰۰۰۴۹۰۹	۱
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۳۰	۴/۵۲۶۵	۷/۴۰۱۹	۰/۰۰۳۴۵۱۱	۹/۰۹۹۶	۲
۷/۹۹۲۸	۴/۲۹۱۷	۷/۸۳۴۱	۰/۰۰۳۲۳۴۴	۷/۴۱۶۳	۴/۹۶۷۲	۳
۴/۲۰۷۷	۸/۰۵۱۰	۰/۰۰۰۰۹۶۳۷	۷/۸۲۸۲	۴/۵۲۴۴	۱۰/۵۹۳	۴
۷/۰۰۶۵	۰/۰۰۰۵۵۵۸	۸/۰۱۰۲	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۳۲	۵/۱۶۲۳	۵
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۳۹۲	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۶۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۱۱	۶

شماره‌ی مود حالت  
آسیب D۱

جدول ۵. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۲.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ( $LMAC^{-1}$ )
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۹/۴۸۵۸	۵/۱۶۷۷	۹/۱۹۶۵	۴/۹۵۵۴	۸/۵۵۱۲	۰/۰۰۳۶۶۲۷	۱
۴/۶۴۴۰	۱۰/۲۷۰	۴/۵۱۶۲	۸/۲۵۶۹	۰/۰۰۰۱۶۳۸۷	۸/۵۲۷۵	۲
۸/۲۵۰۸	۴/۲۸۳۳	۷/۵۴۹۸	۰/۰۰۳۸۷۳	۸/۳۳۴۵	۴/۹۸۹۴	۳
۴/۱۹۲۲	۸/۲۶۰۲	۰/۰۰۱۱۱۱۱	۷/۵۵۴۷	۴/۵۳۲۳	۹/۲۲۲۴	۴
۷/۶۴۹۲	۰/۰۰۱۱۰۷۹	۸/۳۳۲۹	۴/۳۱۸۹	۱۰/۷۸۹	۵/۱۵۷۶	۵
۰/۰۰۱۶۸۳۵	۷/۶۷۵۷	۴/۲۲۸۱	۸/۳۳۱۶	۴/۶۳۳۰	۹/۶۸۶۶	۶

شماره‌ی مود حالت  
آسیب D۲

جدول ۶. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۳.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ( $LMAC^{-1}$ )
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۰/۵۰۱	۵/۱۵۸۲	۱۰/۸۰۰	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۵	۰/۰۰۰۰۰۴۹۱	۱
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۲۶	۴/۵۲۶۵	۷/۴۰۲۰	۰/۰۰۳۴۵۱۳	۹/۰۹۹۷	۲
۷/۹۹۴۱	۴/۲۹۱۷	۷/۸۳۵۲	۰/۰۰۳۲۳۴۳	۷/۴۱۶۲	۴/۹۶۷۲	۳
۴/۲۰۷۷	۸/۰۵۰۱	۰/۰۰۰۰۹۶۳۸۹	۷/۸۲۶۷	۴/۵۲۴۴	۱۰/۵۷۵	۴
۷/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۵۵۵۹	۸/۰۱۱۶	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۲۷	۵/۱۶۲۳	۵
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۴۰۶	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۵۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۴۳	۶

شماره‌ی مود حالت  
آسیب D۳

جدول ۷. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۴.

منفی لگاریتم معیار انطباق مودال (LMAC <sup>-۱</sup> )	شماره‌ی مود حالت سالم					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۰۰۰۰۰۱۹۶	۱۶/۷۰۱	۴/۹۸۴۸	۱۴/۶۸۲	۵/۱۵۷۶	۱۴/۳۷۴
۲	۱۵/۴۲۸	۰/۰۱۳۰۳۲	۱۵/۹۹۴	۴/۵۲۹۷	۱۷/۲۸۱	۴/۶۲۷۸
۳	۴/۹۶۵۷	۱۶/۳۶۷	۰/۰۱۲۲۵۲	۱۴/۲۱۱	۴/۲۸۵۶	۱۴/۳۹۹
۴	۱۴/۶۴۵	۴/۵۳۰۸	۱۳/۹۳۵	۰/۰۰۰۳۸۴۱	۱۴/۵۲۲	۴/۲۱۱۵
۵	۵/۱۶۴۷	۱۷/۳۰۳	۴/۳۲۶۲	۱۴/۴۳۶	۰/۰۰۲۱۹۷۴	۱۳/۲۲۷
۶	۱۴/۲۶۷	۴/۶۶۹۴	۱۴/۳۸۶	۴/۲۱۶۴	۱۳/۲۱۰	۰/۰۱۱۳۴۵

شماره‌ی مود حالت  
آسیب D۴

ریاضیاتی متلب:

## ۲.۵. شناسایی ناحیه‌ی آسیب جدارشدگی

براساس الگوریتم پیشنهادی، ضرایب جزئیات موجک حاصل از انجام تحلیل موجک توابع موجک مختلف استخراج و شاخص‌های شناسایی آسیب شش مود اول حالت‌های آسیب D۱ تا D۴ محاسبه شده است. نتایج نموداری مربوط به تحلیل موجک تابع موجک db۱۰ در شکل‌های ۳ الی ۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن در منطقه‌ی جدارشدگی بتن از جداری فولادی، در تمامی مودهای بررسی‌شده، بی‌نظمی و اغتشاش در نمودارهای شاخص آسیب وجود دارد؛ به نحوی که مناطق آسیب به خوبی و با دقت بالایی شناسایی شده‌اند. همچنین، با توجه به اینکه آسیب D۴ به صورت مجموع دو حالت آسیب D۱ و D۳ تعریف شده است، مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص آسیب برای حالت آسیب D۴ برابر با مجموع مقادیر شاخص‌های آسیب دو حالت آسیب D۱ و D۳ است. همچنین، مقایسه‌ی نمودارهای حالت آسیب دوتایی D۴ با هر یک از حالت‌های آسیب تک‌ی D۱ و D۳ نشان می‌دهد که با اضافه شدن یک موقعیت آسیب جدید به هر یک از حالت‌های آسیب تک‌ی مذکور، تغییری در مقدار شاخص آسیب ناحیه‌ی جدارشدگی به وجود نمی‌آید و یا کمترین تغییر در آن صورت می‌گیرد که قابل چشم‌پوشی است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به عبارتی، شاخص‌های آسیب نواحی جدارشدگی مستقل از هم هستند و این یک امتیاز مثبت برای شاخص آسیب پیشنهادی است. چرا که در غیراین صورت ممکن است عدم شناسایی یک منطقه‌ی جدارشدگی در شناسایی سایر مناطق جدارشدگی تأثیرگذار باشد و در نتیجه، برخی از مناطق جدارشدگی بتن از جداری فولادی شناسایی نشود.

## ۳.۵. تأثیر شدت آسیب بر شاخص مکان‌یاب آسیب

یک روش مناسب تشخیص آسیب باید به مقدار آسیب از نظر عمق، سطح و شدت حساسیت نشان دهد. به این معنی که با افزایش مقدار آسیب، شاخص مکان‌یاب آسیب مقادیر اکسترم نسبی بزرگ‌تری را نشان دهد. بررسی‌ها برای شدت‌های آسیب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد برای حالت آسیب D۱ انجام شده است. با توجه به محدودیت تعداد صفحه‌های نوشتار حاضر، فقط نتایج نموداری مربوط به مود سوم در شکل ۷ گزارش شده است، که مطابق آن، با افزایش شدت آسیب، شاخص‌های مکان‌یاب آسیب در مختصات مکانی ثابت، اغتشاش و جهش بالایی را نشان می‌دهند.

## ۴.۵. تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر شاخص مکان‌یاب آسیب

با استفاده از یک روش مناسب برای تشخیص آسیب، علاوه بر اینکه باید بتوان موقعیت‌های آسیب با مقادیر مختلف خسارت را شناسایی کرد، باید جوابگو

$$U = \text{xlsread}('Undamaged Signal.xlsx');$$

$$D = \text{xlsread}('Damaged Signal.xlsx');$$

گام ۲: انجام درون‌یابی سیگنال‌های فراخوانی شده بر مبنای طول ستون (L):

$$x = \text{linspace}(0, L, \text{numel}(U));$$

$$xi = \text{linspace}(0, L, n \times \text{numel}(U))$$

$$Ui = \text{interp1}(x, U, xi, 'spline');$$

$$Di = \text{interp1}(x, D, xi, 'spline');$$

در پژوهش حاضر، مقدار  $n$  برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است.

گام ۳: انجام تحلیل موجک گسسته روی سیگنال‌های گام ۲ و استخراج ضرایب موجک:

$$[cAu, cDu] = \text{dwt}(Ui, 'wavelet function');$$

$$[cAd, cDd] = \text{dwt}(Di, 'wavelet function');$$

در پژوهش حاضر، تابع موجک مادر، تابع تحلیلی db۱۰ انتخاب شده است.

گام ۴: تعریف شاخص مکان‌یاب آسیب (DLI)<sup>۲۶</sup> بر مبنای ضرایب جزئیات تحلیل موجک حاصل از گام ۳:

$$\text{if } \text{acosd}(\text{dot}(Ui, Di) / (\text{norm}(Ui) \times \text{norm}(Di))) < 90$$

$$DLI = cDu - cDd; \quad \text{else}$$

$$DLI = cDu + cDd;$$

$$\text{end}$$

گام ۵: شناسایی آسیب:

$$xx = \text{linspace}(0, L, \text{numel}(DLI));$$

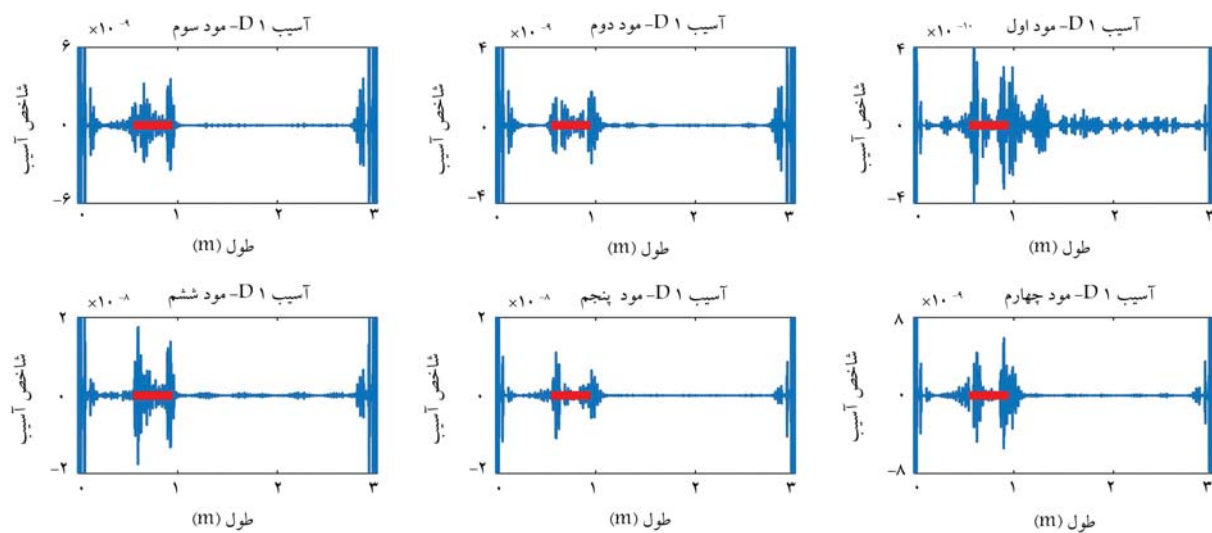
$$xxi = \text{linspace}(0, L, m \times \text{numel}(DLI));$$

مقدار  $m$  برابر با ۵ در نظر گرفته شده است.

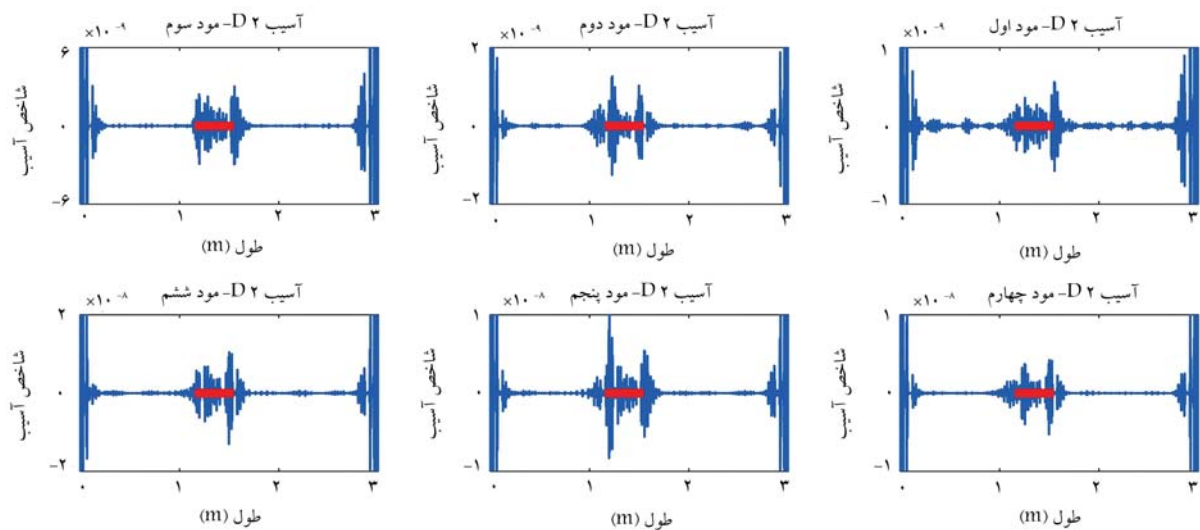
$$DLIi = \text{interp1}(xx, DLI, xxi, 'spline');$$

$$\text{figure}; \text{plot}(xxi, DLIi)$$

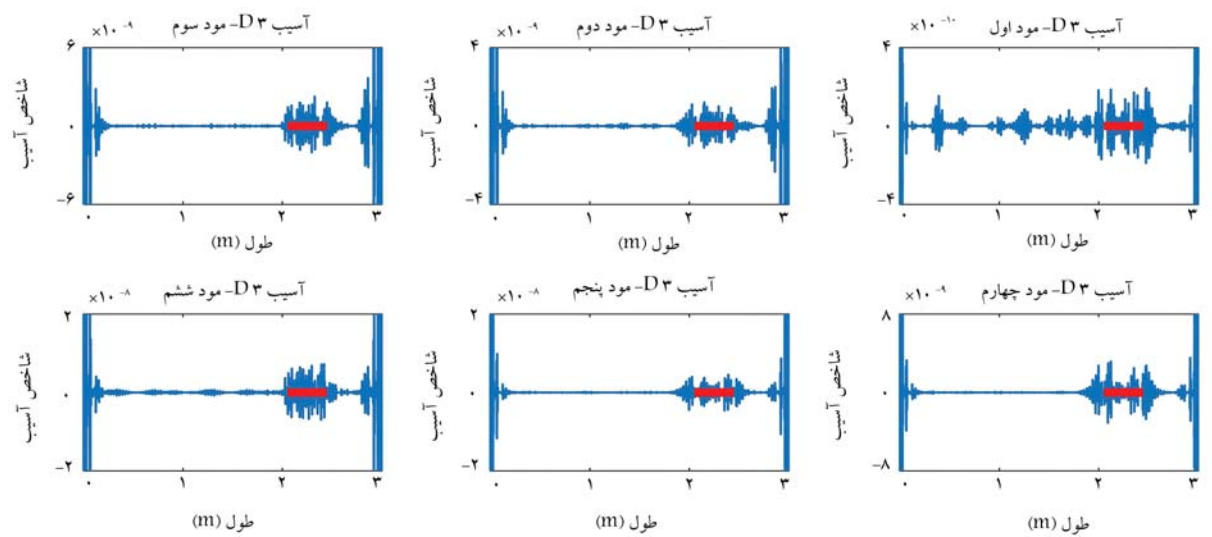




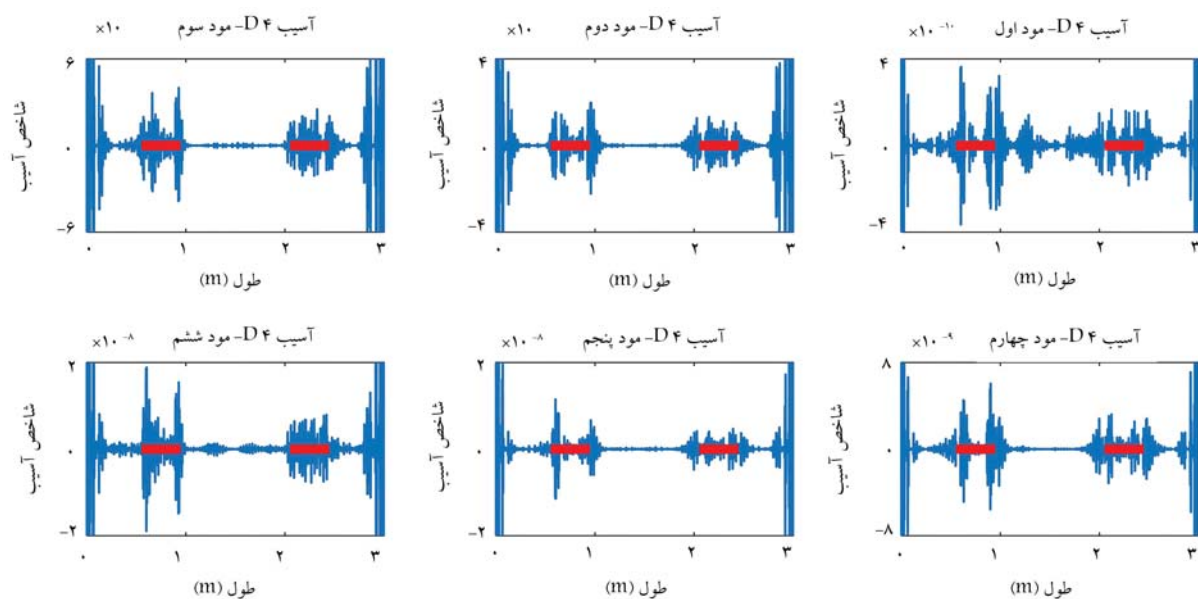
شکل ۳. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۱.



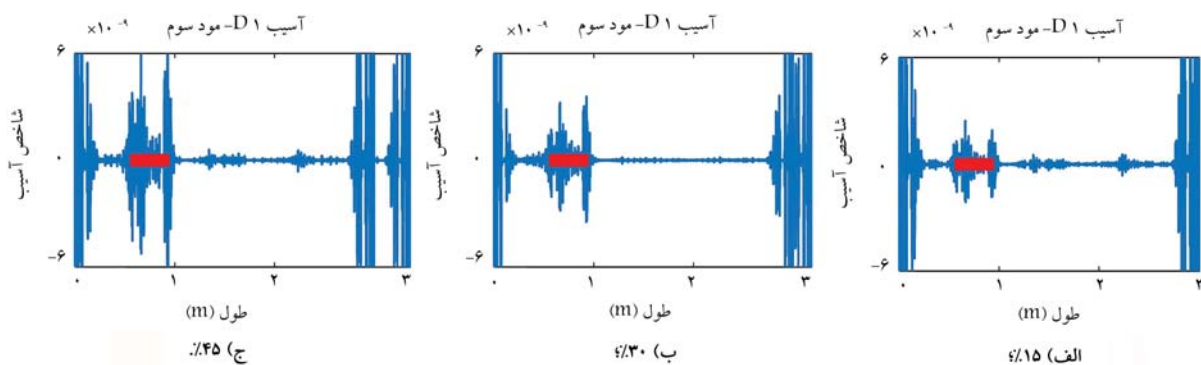
شکل ۴. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۲.



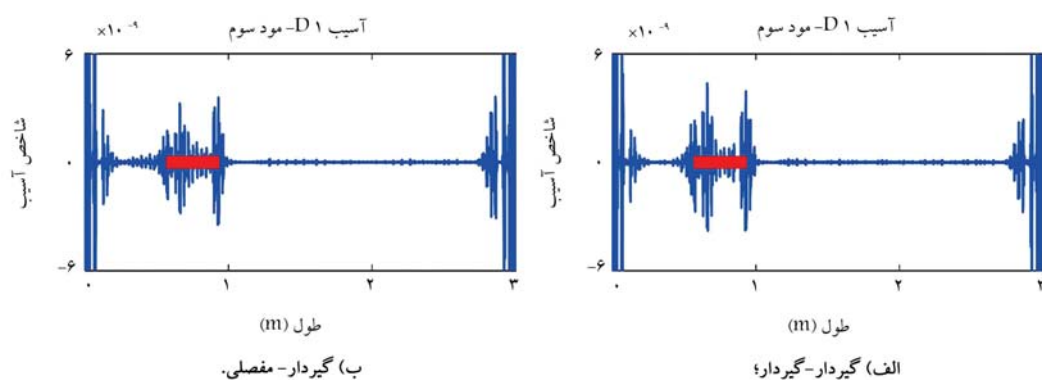
شکل ۵. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۳.



شکل ۶. نمودارهای شاخص مکان یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D4.



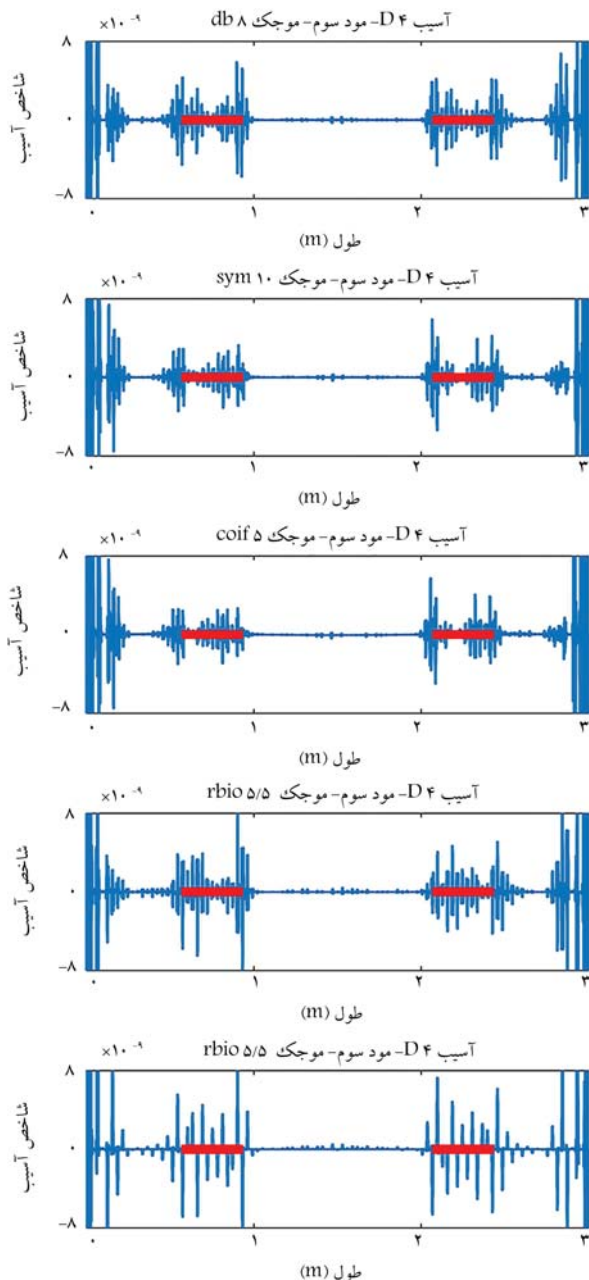
شکل ۷. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D1 با شدت آسیب.



شکل ۸. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D1 با شرایط تکیه‌گاهی.

فقط نتایج نموداری حالت آسیب D1 برای مود سوم در شکل ۸ گزارش شده است، که مطابق آن، مقادیر اکسترممی متفاوتی در محل آسیب ایجاد شده است. بنابراین شاخص پیشنهادی برای تشخیص موقعیت آسیب ستون کامپوزیت CFST با شرایط تکیه‌گاهی مختلف، یک شاخص تشخیصی مناسب است.

تغییرات شرایط تکیه‌گاهی به منظور تشخیص موقعیت آسیب نیز بود. بررسی‌های انجام شده در موده‌های مختلف با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار و گیردار - مفصلی نشان می‌دهند که با تغییر شرایط تکیه‌گاهی، همچنان نتایج شناسایی موفق حاصل می‌شود، با این تفاوت که مقادیر اکسترممی متفاوتی در موقعیت آسیب محاسبه می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد صفحه‌های نوشتار حاضر،



شکل ۹. نمودارهای شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) وضعیت آسیب D4 (مود سوم) با توابع موجک مختلف.

شاخص آسیب نواحی آسیب پیشین تغییری نمی‌کند و یا تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است؛ به عبارتی، شاخص‌های آسیب موقعیت‌های مختلف جداولی از هم مستقل بوده و این یک امتیاز مثبت برای شاخص پیشنهادی آسیب در روند شناسایی محسوب می‌شود؛ زیرا در غیر این صورت ممکن است عدم شناسایی یک موقعیت جداولی بر شناسایی سایر موقعیت‌های جداولی اثرگذار باشد و در نتیجه، برخی از موقعیت‌های جداولی قابل شناسایی نباشند.

۴. در حالت آسیب D4، دو منطقه‌ی جداولی کاملاً متقارن از نظر هندسه‌ی آسیب (سطح و عمق جداولی) و ویژگی مصالح آسیب (شدت آسیب) برای ستون با شرایط تکیه‌گاهی متقارن تعریف شده است. نتایج نموداری نشان داد با اینکه مسئله

## ۵.۵. تشخیص آسیب با دیگر توابع موجک

یکی از مشکلات اساسی تعیین موقعیت آسیب با استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر موجک، انتخاب تابع موجک مناسب است. در روش پیشنهادی نوشتار حاضر، شناسایی آسیب با توابع موجک متعددی انجام شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص‌های مکان‌یاب آسیب محاسبه شده با تعداد زیادی از توابع موجک خانواده‌های دایجیز (Db)<sup>۲۷</sup>، سیملتس (Sym)<sup>۲۸</sup>، کوپلتس (Coif)<sup>۲۹</sup> توابع موجک بیورتوگونا<sup>۳۰</sup>، پرش نسبیه کمینه و بیشینه را در موقعیت‌های مختلف آسیب نشان می‌دهند. نتایج نموداری شاخص آسیب وضعیت D4 (مود سوم) با تعدادی از توابع موجک در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین میزان بی‌نظمی و اغتشاش با چشم‌پوشی از بی‌نظمی‌های ابتدا و انتهای ستون، در منطقه‌ی آسیب رخ داده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

امروزه پایش و کنترل سلامتی در سازه‌های مهندسی در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا، یکی از زمینه‌های پژوهشی برای بسیاری از پژوهشگران است. به طوری که در دهه‌های اخیر، مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل پایش سلامت در سازه‌ها، شناسایی موقعیت‌های آسیب در اعضای سازه‌یی به خصوص تیرها و ستون‌هاست که از مهم‌ترین اعضای سازه‌یی هستند و انتظار می‌رود آخرین اعضای آسیب‌دیده‌ی سازه‌ها، ستون‌ها باشند. امروزه استفاده از ستون‌های مقاطع مرکب به دلیل بهره‌مندی همزمان از ویژگی‌های دو ماده‌ی فولاد و بتن، تأمین ممان اینرسی معادل مقاطع بزرگ و غیره در صنعت ساختمان به ویژه سازه‌های ساختمانی بلند رو به گسترش است. با این حال، تاکنون مطالعات جدی در زمینه‌ی پایش سلامتی در ارتباط با ستون‌های مقاطع مرکب صورت نگرفته است. ستون‌های فولادی پرشده با بتن (ستون‌های CFST)، یکی از ستون‌های مقاطع مرکب هستند، که مورد توجه طراحان است. جدانشدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی در ستون‌های CFST، یکی از رایج‌ترین نوع آسیب‌هاست؛ بنابراین شناسایی منطقه‌ی جدانشدگی بتن از جداره‌ی فولادی مورد توجه واقع شده است. تبدیل موجک، یکی از روش‌های ریاضیاتی توانمند پردازش سیگنال‌هاست که قابلیت محلی‌سازی سیگنال را در دو حوزه‌ی زمان و بسامد دارد. براساس ویژگی مذکور، الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته جهت شناسایی منطقه‌ی آسیب جداولی پیشنهاد شده است که براساس آن شاخص‌های تعیین بی‌نظمی محاسبه شده است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده برای سه حالت آسیب تکی و یک حالت آسیب دوتایی نشان داد که:

۱. مکان‌یاب آسیب در تمامی مودها در نواحی جداولی، بی‌نظمی و اغتشاش را نشان می‌دهد؛ به نحوی که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های جداولی را شناسایی کرد. لازم به ذکر است در مود اول با اینکه در منطقه‌ی آسیب، بی‌نظمی مشاهده می‌شود، اما شناسایی کمی دشوار است؛ بنابراین، مودهای بالاتر پیشنهاد می‌شود.

۲. مقادیر شاخص آسیب یک حالت آسیب چندتایی که به صورت مجموع حالت‌های آسیب تکی تعریف شده است، با اختلاف بسیار ناچیزی با مجموع شاخص‌های آسیب حالت‌های آسیب تکی برابر است.

۳. با اضافه شدن یک موقعیت جداولی جدید به یک حالت آسیب، مقدار

ب) با اضافه شدن یک منطقه جراثدگی جدید به ستون محتمل آسیب، میزان کاهش مقادیر بسامدی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی، با افزایش میزان خسارت، میزان کاهش بسامد افزایش می‌یابد.

ج) در اثر جراثدگی بتن از جداری فولادی، مقادیر قطری معیار همبستگی مودال شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی کمتر از واحد محاسبه می‌شود (مقادیر قطری ماتریس منفی لگاریتم MAC نا صفر محاسبه می‌شود)؛ به عبارتی، در اثر جراثدگی بتن از جداری فولادی، شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی منطبق بر هم نیستند.

کاملاً متقارن تعریف شده است، اما لزوماً مقادیر بی‌نظمی و اغتشاش در مناطق جراثدگی، متقارن نیستند. همچنین، تقارن مناطق جراثدگی نمی‌تواند توانمندی و قابلیت تشخیصی شاخص پیشنهادی را با مشکل مواجه سازد. علاوه بر نتایج شناسایی موقعیت جراثدگی، اثر جراثدگی بتن از جداری فولادی در خواص مودال (بسامدها و شکل‌های مود ارتعاشی) بررسی و این نتایج حاصل شده است:

الف) در اثر جراثدگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی، مقدار بسامد در تمام مودها کاهش می‌یابد.

## پانوشته‌ها

1. (WT) Wavelet Transform
2. Katunin
3. Zhong & Oyadji
4. stationary Wavelet Transform (SWT)
5. Xu
6. Two-dimensional directional gaussian wavelets
7. Laser scanned operating deflection shapes
8. Lee
9. Continuous Relative Wavelet Entropy Method
10. Li
11. Quincunx
12. Patel
13. Abbasnia
14. Yang & Oyadji
15. Noori
16. Concrete-Filled Steel Tube Columns (CFST)
17. Wang
18. Mirzaei
19. Ma
20. Sun
21. Continuous Wavelet Transform (CWT)
22. Discrete Wavelet Transform (DWT)
23. Details
24. Approximations
25. Modal Assurance Criterion (MAC)
26. Damage Localization Index (DLI)
27. Daubechies
28. Symlets
29. Coiflets
30. Biorthogonal

## منابع (References)

1. Zhou, S., Tang, B. and Chen, R. "Comparison between non-stationary signals fast Fourier transform and wavelet analysis", *Intelligent Interaction and Affective Computing, International Asia Symposium, IEEE* (2009).
2. Katunin, A. "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, **45**(2), pp. 41-52 (2010).
3. Zhong, S. and Oyadji, S.O. "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, **18**, pp. 169-190 (2011).
4. Xu, W., Radzienski, M., Ostachowicz, W. and et al. "Damage detection in plates using two-dimensional direction Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes", *Structural Health Monitoring*, **12**(5-6), pp. 457-468 (2013).
5. Lee, S.G., Yun, G.J. and Shang, S. "Reference-free damage detection for truss bridge structures by continuous relative wavelet entropy method", *Structural Health Monitoring*, pp. 1-14 (2014).
6. Li, J. and Hao, H. "Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction", *Structural Health Monitoring*, pp. 1-17 (2014).
7. Katunin, A. "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**(1), pp. 251-261 (2015).
8. Patel, S.S., Chourasia, A., Panigrahi, S. and et al. "Damage identification of RC structures using wavelet transformation", *Procedia Engineering*, **144**, pp. 336-342 (2016).
9. Abbasnia, R., Mirzaei, B. and Yousefbeck, S. "A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams", *Journal of Vibroengineering*, **18**(3), pp. 1497-1513 (2016).
10. Rahami, H., Amini-Tehrani, H., Akhavan, M. and et al. "Damage detection in offshore fixed platforms using concepts of energy entropy in wavelet packet transform", *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, **48**(3), pp. 241-248 (2016).
11. Yang, C. and Oyadji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Journal of Computers and Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
12. Noori, M., Wang, H., Altabey, W.A. and et al. "A modified wavelet energy rate-based damage identification method for steel bridges", *Scientia Iranica*, **25**(6), pp. 3210-3230 (2018).

13. Rezaifar, O., Younesi, A., Gholhaki, M. and et al. "Debbonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(Special Issue 4), pp. 93-106 (2018).
14. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", *Magazine of Civil Engineering*, **85**, pp. 136-145 (2019).
15. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Esfandiari, A. "Damage detection in concrete filled tube columns based on experimental modal data and wavelet technique", *Mechanics of Advanced Composite Structures*, **7**(2), pp. 245-254 (2020).
16. Wang, S., Li, J., Luo, H. and et al. "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", *Engineering Structures*, **178**, pp. 506-520 (2019).
17. Hoseini Vaez, S. and Arefzade, T. "Comparison of static and modal analysis in damage detection of concrete gravity dams via wavelet transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35.2**(1.1), pp. 33-41 (2019).
18. Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefibeik S. and et al. "A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization algorithm", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **7**(1), pp. 1-20 (2019).
19. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(5), pp. 198-214 (2021).
20. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(8), pp. 289-309 (2021).
21. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalehahman, A. and et al. "Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method", *Journal of Vibration & Sound*, **10**(20), pp. 144-156 (2022).
22. Khanahmadi, M., Rezayfar, O. and Gholhaki, M. "Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(9), pp. 166-183 (2021).
23. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Wavelet-based damage detection of steel beam-structures", *Journal of Structure & Steel*, **15**(33) (2021).
24. 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).
25. Khanahmadi, M., Khademi-Kouhi, M. and Azizi-Rashid, F. "A finite element analytical study of the effect of axial load on structural modal properties in a column", *5th International Conference on Civil, Architecture and Urban Engineering* (2021).
26. Hanteh, M.; Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37**(2.2), pp. 131-147 (2021).
27. Hanteh, M. and Rezaifar, O. "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
28. Ma, Q., Solis, M. and Galvin, P. "Wavelet analysis of static deflections for multiple damage identification in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **147**, pp. 1-14 (2021).
29. Sun, G., Wang, Y., Luo, Q. and et al. "Vibration-based damage identification in composite plates using 3D-DIC and wavelet analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **173**, p. 108890 (2022).
30. Pachideh, G. and Gholhaki, M. "Evaluation of concrete filled steel tube column confined with FRP", *Journal of Testing Evaluation*, **48**, pp. 4343-4354 (2020).
31. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. "An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**(2), pp. 629-638 (2021).
32. Rezaifar, O. and Younesi, A. "Experimental study discussion of the seismic behavior on new types of internal/external stiffeners in rigid beam-to-CFST/HSS column connections", *Construction and Building Materials*, **136**, pp. 574-589 (2017).
33. Rezaifar, O. and Younesi, A. "Finite element study the seismic behavior of connection to replace the continuity plates in (NFT/CFT) steel columns", *Steel and Composite Structures*, **21**(1), pp. 73-91 (2016).
34. Mallat, S. "A wavelet tour of signal processing: the sparse way", Academic Press (2008)
35. Gao, R.X. and Yan, R. "Wavelets: Theory and applications for manufacturing", Springer Science & Business Media (2010).
36. Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of solids and structures*, **40**(13-14), pp. 3557-3569 (2003).
37. Shuncong, Z. and Olutunde Oyadiji, S. "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers & Structures*, **89**(1-2), pp. 127-148 (2011).
38. Kim, Hansang, and Hani Melhem, "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
39. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. "Dynamic behaviour of 3D-panel single-storey system using shaking table testing", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337



# توسعه‌ی روش بدون شبکه‌ی چندربعی برای آنالیز مسائل اندرکنش دینامیکی سد - مخزن - پی

رضا بابایی (دانشجوی دکتری)

احسان جباری\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه قم

مرتضی اسکندری قادی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۶۵-۷۶، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، روش بدون شبکه‌ی تابع پایه‌ی شعاعی چند ربعی برای حل مسائل اندرکنش لرزه‌یی سد - مخزن - پی در حوزه‌ی بسامد توسعه داده شده است. در این راستا، یک فن نوین تجزیه‌ی دامنه پیشنهاد شده است که در آن دو تابع شکل چند ربعی مجزا برای هر مرکز محاسباتی واقع بر مرزهای اندرکنشی تعریف شده است. همچنین برای تعیین یکی از مهم‌ترین عوامل در دقت و سرعت روش حاضر، یعنی متغیر شکل بهینه، روابط جدیدی براساس بسامد بار زلزله پیشنهاد شده است که هزینه‌های محاسباتی را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که متغیر شکل بهینه به تعداد زیردامنه‌ها، نسبت سختی سد به پی و تراکم‌پذیری سیال وابسته نیست و این امر بر کارایی رویکرد حاضر می‌افزاید. راستی‌آزمایی روش پیشنهادی نیز طی مثال‌های مختلفی در مقایسه با روش دقیق به انجام رسیده و سرعت و دقت بیشتر آن در مقایسه با روش اختلاف محدود نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: توابع پایه‌ی شعاعی، تابع چند ربعی، روش بدون شبکه، متغیر شکل، اندرکنش سد - مخزن - پی.

r.babae@stu.qom.ac.ir  
e.jabbari@qom.ac.ir  
ghadi@ut.ac.ir

## ۱. مقدمه

روش پایه‌ی شعاعی چند ربعی (MQ-RBF)<sup>۱</sup> به دلیل کارایی بالا و سادگی کاربرد، خصوصاً برای حل مسائل با هندسه‌های پیچیده و دارای بُعد بالا، از جمله روش‌های عددی بدون شبکه‌ی محبوب به‌شمار می‌رود.<sup>[۱-۳]</sup> لی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳)، روش چند ربعی را با روش المان محدود (FE)<sup>۳</sup> مقایسه کردند و دریافتند که روش چند ربعی ضمن کاهش حجم محاسبات، دقت بالاتری دارد. ترکیب سایر روش‌های عددی با تابع چند ربعی نیز به مزایای آنان افزوده است.<sup>[۴]</sup> به‌عنوان مثال، سلیمانی و همکاران (۲۰۲۱)، فرمولاسیون ترکیب روش تابع چند ربعی با روش اختلاف محدود (FD)<sup>۴</sup> را برای گسسته‌سازی انواع مشتق‌ها در معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی ارائه کرده‌اند.<sup>[۵]</sup> روش مذکور، که روش کانز<sup>۵</sup> نیز نامیده می‌شود، در حوزه‌های وسیعی از علوم مهندسی، شامل آنالیز تیرها و صفحات نازک، محاسبه‌ی توزیع فشار هیدروپنوماتیکی در مخازن سدهای صلب، و... با موفقیت توسعه داده شده است.<sup>[۶-۷]</sup> به علاوه، لیو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از توابع پایه‌ی شعاعی، روشی نوین برای آنالیز استاتیکی سازه‌ها پیشنهاد داده‌اند.<sup>[۸]</sup> همچنین کاهید باصیری و همکاران

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۳/۱۸، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2022.60113.3085

(۲۰۲۰)، توانسته‌اند تابع چند ربعی را برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی با کاربرد در شبیه‌سازی پدیده‌ی شکست سد با دقت قابل قبولی به کار ببرند.<sup>[۹]</sup> ایشان یک ایده‌ی خلاقانه برای تعیین متغیر شکل<sup>۷</sup> بهینه‌ی روش چند ربعی هم ارائه داده‌اند که حجم محاسبات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. جو<sup>۸</sup> (۲۰۲۰)، نیز توابع پایه‌ی شعاعی را بر مبنای توزیع انطباقی مراکز محاسباتی<sup>۹</sup> برای حل مسائل مقدار اولیه به کار برد و بر انطباق‌پذیری آن‌ها تأکید کرد.<sup>[۱۰]</sup> اخیراً نیز چن<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۱)، ظرفیت قابل‌قبول روش چند ربعی را برای آنالیز مسائل مقدار مرزی دو و سه بُعدی نیز نشان داده است. یک موضوع مهم چالش‌برانگیز در توابع پایه‌ی شعاعی، نحوه‌ی تعیین متغیر شکل بهینه در آن‌هاست.<sup>[۱۱-۱۳]</sup> اگرچه پژوهشگران تاکنون روابط و الگوریتم‌های ارزشمندی را در این زمینه مطرح کرده‌اند، ولی این مسئله همچنان یک چالش جدی به‌شمار می‌رود و هنوز یک راه‌حل جامع برای آن معرفی نشده است.<sup>[۱۳-۱۴]</sup> از این رو، پژوهشگران سعی داشته‌اند در حوزه‌های مختلف، بهترین پیشنهاد را برای آن ارائه دهند. به‌عنوان مثال، آذربینی و همکاران (۲۰۱۹)، یک الگوریتم را مطرح کرده‌اند که در آن، مسئله دوبار با استفاده از تعداد  $N - 2$  مرکز محاسباتی به‌ازاء متغیر شکل‌های مختلف حل و مقدار بهینه‌ی آن به گونه‌ی انتخاب شده است که دو جواب به‌دست آمده از مسئله، کمترین



اختلاف را داشته باشند. الگوریتم مذکور، هزینه محاسباتی بالایی دارد، چرا که از سعی و خطا استفاده می‌شود و در هر سعی و خطا باید مسئله را دو بار حل کند.<sup>[۱۲]</sup>

همچنین کوشکی و همکاران (۲۰۱۹)، برای بهینه‌سازی متغیر شکل از الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>[۱۱]</sup> استفاده کرده و با شبیه‌سازی پدیده تراوش<sup>[۱۲]</sup> نشان داده‌اند که متغیر شکل بهینه می‌تواند مستقل از تعداد نقاط محاسباتی با توزیع‌های مختلف باشد.<sup>[۱۵]</sup> ایشان در مطالعه دیگری از توزیع مراکز محاسباتی براساس روش پادوا<sup>[۱۳]</sup> توأم با کاهش تعداد آن‌ها استفاده کردند و حجم محاسبات در بهینه‌سازی متغیر شکل را کاهش دادند.<sup>[۱۶]</sup> روش چند ربعی علی‌رغم ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود تاکنون در شبیه‌سازی عددی مسائل اندرکنش آب - خاک - سازه (FSSI)<sup>[۱۴]</sup> علی‌الخصوص سیستم‌های سد - مخزن - پی به کار نرفته است. در این راستا و مشخصاً برای آنالیز مسائل اندرکنش سد - مخزن - پی، روش‌های مفید دیگری توسعه یافته‌اند. عطارنژاد و فرساد (۲۰۰۵)، بدنه سد را با یک تیر با مقطع متغیر شبیه‌سازی کردند. مبنای کار آن‌ها تعریف توابع شکل جدیدی بود که از حل معادله دیفرانسیل تیر اوپلر - برنولی به دست می‌آمد. آن‌ها با مدل خود توانستند تأثیر اندرکنش بین سد - مخزن را نشان دهند و توزیع فشار هیدروپنوماتیک وارد بر بدنه سد را با دقت قابل قبولی به دست آورند.<sup>[۱۷]</sup> کیوانی (۲۰۱۳) نیز یک حل بسته برای آنالیز لرزه‌ی سیستم سد - مخزن شامل مخزن نیمه‌بی‌نهایت دوبعدی و مدل تیر برشی تحت بار زلزله‌ی هارمونیک افقی در حوزه‌ی بسامد ارائه داده است. راه‌حل دقیق پژوهش ایشان، اگرچه حالت خاصی از انواع مسائل سد - مخزن است، ولی می‌تواند مبنای خوبی برای راستی‌آزمایی روش‌های عددی جدید باشد.<sup>[۱۸]</sup> روش توانمند المان محدود مشکلاتی، مانند: (۱) هزینه‌ی زیاد برای ساخت شبکه‌ها؛ (۲) ضرورت ایجاد شبکه‌های درشت‌تر و در نتیجه کاهش دقت در شبیه‌سازی میدان‌های بزرگ‌مقیاس، مانند سد - مخزن - پی؛ (۳) تعمیم دشوار به مسائل سه‌بعدی مخصوصاً در هندسه‌های پیچیده و ... را با خود به همراه دارد.<sup>[۱۹]</sup>

روش تفاضل محدود به شبکه‌ی منظمی از خطوط متقاطع کمکی نیاز دارد و معمولاً فقط برای هندسه و شرایط مرزی منظم کاربرد دارد. به علاوه به دلیل مدل‌سازی کل فضا، هزینه محاسباتی بالایی نیز به دنبال دارد.<sup>[۲۰]</sup> در روش المان مرزی (BE)<sup>[۱۵]</sup> با هدف اجتناب از شبکه، فقط مرزهای میدان محاسباتی شبکه‌بندی می‌شوند. برجسته‌ترین نقطه ضعف روش المان مرزی (BE) نیاز به حل اساسی<sup>[۱۶]</sup> وابسته به شرایط مسئله است.<sup>[۲۱]</sup> روش المان مرزی محدود مقیاس شده (SBFE)<sup>[۱۷]</sup> به طور همزمان از ویژگی‌های روش المان محدود و المان مرزی بهره می‌برد. استفاده از توابع شکل کلاسیک روش المان‌های محدود می‌تواند برخی از مشکلات آن روش را با خود به همراه داشته باشد. همچنین این روش به حل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل با ماتریس ضرایب پر منجر می‌شود که نیازمند حل اساسی و هزینه محاسبات بالا است.<sup>[۲۲]</sup> روش المان مرزی محدود مقیاس شده مجزا (DSBFE)<sup>[۱۸]</sup> با ایجاد ویژگی‌های جدید توانسته است ماتریس دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم را به صورت قطری تولید کند و حجم محاسبات را به طور چشمگیری کاهش دهد.<sup>[۲۳]</sup> روش اخیر در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده ضعف دارد، چون همه‌ی مرزها باید از محل مرکز مختصات محلی (LCO)<sup>[۱۹]</sup> آن قابل‌رؤیت باشند. یو<sup>[۲۰]</sup> و همکاران، روش بدون شبکه‌ی هیدروپنوماتیک ذرات هموار (SPH)<sup>[۲۱]</sup> را برای آنالیز پدیده شکست سد با لحاظ کردن اثر فشار هیدروپنوماتیک بر بدنه‌ی سد به کار برده‌اند، ولی روش ذکر شده فقط برای شبیه‌سازی امواج فشاری مخزن استفاده شده و برای شبیه‌سازی سد از سایر روش‌های کمکی بهره برده‌اند.

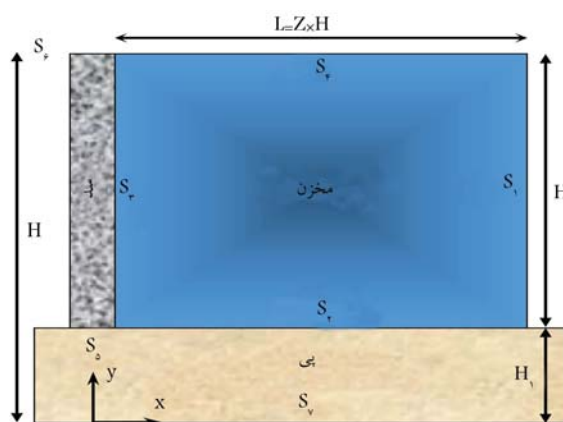
همان‌طور که اشاره شد، به علت برخی از ضعف‌های عنوان شده در روش‌های عددی پیشین که بعضاً ریشه در استفاده از شبکه نیز دارند، تلاش‌های پژوهشی برای اجتناب از شبکه در تحلیل مسائل اندرکنش لرزه‌ی سیستم سد - مخزن - پی در جریان هستند. در این راستا، در پژوهش حاضر، روش بدون شبکه‌ی چند ربعی برای اولین بار توسعه داده شده است که دارای ویژگی‌هایی مانند: (۱) ایجاد یک تابع پاسخ پیوسته در سراسر دامنه؛ (۲) عدم پیوستگی و ارتباطی خاص بین مراکز محاسباتی؛ (۳) قابلیت بالا در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده؛ (۴) کاهش هزینه محاسبات در حل مسائل بزرگ‌مقیاس؛ (۵) تعمیم آسان به مسائل با بُعد بالاتر؛ و ... است. ویژگی‌های اخیر، برخی از نقاط ضعف روش‌های با شبکه را پوشش می‌دهند. در مطالعه‌ی حاضر، برای شبیه‌سازی رفتار سد و پی از معادله‌ی تیر برشی و برای مخزن از معادله‌ی دو بُعدی هلمهولتز<sup>[۲]</sup> استفاده شده است. برای اعمال اندرکنش، یک فن نوین تجزیه‌ی دامنه با تعریف سه زیردامنه‌ی مجزا برای سازه، سیال و خاک پیشنهاد شده است. با این فن، هم امکان شبیه‌سازی اندرکنش بین سه زیردامنه‌ی موجود فراهم و هم تعداد قابل توجهی درایه‌ی صفر در ماتریس ضرایب کل ایجاد می‌شود. برای تعیین متغیر شکل بهینه نیز روابط جدیدی براساس بسامد بار زلزله پیشنهاد شده است که دقت کافی دارند و با استفاده از آن‌ها، حجم محاسبات به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به منظور راستی‌آزمایی و نمایش توانمندی رویکرد پیشنهادی، مثال‌های متنوعی همراه با حل دقیق ارائه و مرایای آن نسبت به روش عددی اختلاف محدود نیز نشان داده شده است.

## ۲. معادلات حاکم و شرایط مرزی

در شکل ۱، هندسه و شرایط مرزی سیستم دینامیکی سد - مخزن - پی به صورت شماتیک مشاهده می‌شود. معادله‌ی حاکم بر انتشار امواج فشار هیدروپنوماتیک مخزن در حوزه‌ی بسامد با در نظر گرفتن زلزله‌ی هارمونیک افقی با دامنه‌ی واحد است:<sup>[۱۸]</sup>

$$\nabla^2 P + K^{-1}P = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\nabla^2$  عملگر لاپلاسین<sup>[۲۳]</sup>،  $P$  مقدار فشار هیدروپنوماتیک و  $K$  عدد موج<sup>[۲۴]</sup> است که به صورت بسامد حرکت هارمونیک زمین بر سرعت امواج صوتی در محیط سیال ( $K = \omega/C$ ) تعریف می‌شود.



شکل ۱. هندسه و شرایط مرزی (S<sub>۱</sub> - S<sub>۷</sub>) در سیستم سد - مخزن - پی.



در مخزن از توابع تخمین چند ربعی مطابق با روابط ۱۲ الی ۱۴ استفاده شده است:

$$u(y, \omega, c_D) = \sum_{j=1}^{N_1} \lambda_j^D(\omega) \sqrt{(y - y_j)^2 + c_D^2} \quad (12)$$

$$P(x, y, \omega_R) = \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_j^R(\omega) \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + c_R^2} \quad (13)$$

$$u(y, \omega, c_F) = \sum_{j=1}^{N_3} \lambda_j^F(\omega) \sqrt{(y - y_j)^2 + c_F^2} \quad (14)$$

که در آن‌ها،  $(x_j, y_j)$  مؤلفه‌های مراکز محاسباتی هستند.  $\lambda_j^D$  و  $\lambda_j^F$  و  $\lambda_j^R$  نیز ضرایب مجهولی هستند که برای به‌دست آوردن آن‌ها باید تعداد  $N_1$ ،  $N_2$  و  $N_3$  مراکز برهم‌نهی در میدان محاسباتی در نظر گرفته شوند. مراکز مذکور به دو گروه مرزی و درون‌میدانی تقسیم می‌شوند، مراکز روی مرز برای اعمال شرایط مرزی مسئله و مراکز داخل میدان برای ارضاء معادلات حاکم در نظر گرفته می‌شوند.  $c_D$ ،  $c_R$  و  $c_F$  نیز متغیرهای شکل بهینه به ترتیب برای زیردامنه‌های سد - مخزن - پی هستند.

در پژوهش حاضر، روابط جدیدی برای متغیرهای شکل بهینه بر حسب بسامد بار زلزله در آنالیز سیستم دینامیکی حاضر ارائه شده است. لازم به ذکر است یک متغیر شکل بهینه، یعنی:  $c = c_D = c_F = c_R$  برای همگرایی کل پاسخ‌های سیستم کافی است. ویژگی‌های مذکور، یعنی فرموله شدن متغیر شکل بهینه و یکتا بودن آن برای هر سه فاز آب - خاک - سازه بر کارایی روش چند ربعی می‌افزاید و حجم محاسبات را به دلیل بی‌نیازی به یک الگوریتم ثانویه برای متغیر شکل بهینه به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. پس از تعیین متغیر شکل بهینه و جایگذاری روابط ۱۲ الی ۱۴ به همراه مشتقات آن‌ها در معادلات حاکم، یک دستگاه معادلات جبری خطی حاصل می‌شود. با حل چنین دستگاهی، ضرایب مجهول و در نتیجه توابع تخمین پاسخ‌ها به دست می‌آیند. در ادامه، فن جدید تجزیه‌ی دامنه‌ی ۲۵ و نحوه‌ی تشکیل ماتریس ضرایب بیان شده است.

### ۱.۳. فن تجزیه‌ی دامنه

فن اعمال تجزیه‌ی دامنه برای اولین بار در پژوهش حاضر به منظور آنالیز مسائل اندرکنشی توسعه داده شده است که در آن، میدان مسئله به زیرمیدان‌های کوچک‌تر شامل: زیردامنه‌ی سد - مخزن - پی تجزیه می‌شوند. سپس روش چند ربعی برای هر زیرمیدان<sup>۲۶</sup>، اعمال و ماتریس‌های ضرایب هر کدام به‌طور جداگانه محاسبه می‌شوند. نکته‌ی قابل توجه در این راستا این است که برای هر کدام از مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای اندرکنشی باید دو تابع شکل چند ربعی جداگانه متناسب با زیرمیدان‌های مجاورش در نظر گرفته شود. مثلاً باید دو ضریب مجهول  $\lambda_j^D$  و  $\lambda_j^R$  برای هر گره‌ی واقع بر مرز مشترک سد - مخزن لحاظ شود؛ لذا با فن ذکر شده، ماتریس ضرایب زیردامنه‌ی سد - مخزن - پی در روابط ۱۵ الی ۱۷ محاسبه می‌شوند.

که در آن‌ها  $N_{Fi}$  و  $N_{bF}$ ،  $N_{Ri}$ ،  $N_{dbR}$ ،  $N_{Di}$ ،  $N_{bD}$ ،  $N_{Fi}$  و  $N_{bF}$  به ترتیب: تعداد مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای سد، درون زیردامنه‌ی سد، کل مخزن به جز مرز اندرکنشی آن، مرز مشترک مخزن - سد، مرزهای پی و درون زیردامنه‌ی پی هستند. واضح است که:  $N_2 = N_{bF} + N_{Fi}$  و  $N_3 = N_{dbR} + N_{Ri}$ ،  $N_1 = N_{bD} + N_{Di}$ . ماتریس ضرایب کل نیز با ترکیب ماتریس هر زیردامنه، محاسبه و دستگاه معادلات جبری حاکم بر کل سیستم مطابق رابطه‌ی ۱۸ تشکیل می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با اعمال فن پیشنهادی، تعداد قابل‌توجهی درایه‌ی صفر در ماتریس ضرایب کل ایجاد می‌شود که این امر سرعت پردازش را افزایش می‌دهد.

اگر سیال مخزن تراکم‌ناپذیر باشد ( $C \rightarrow \infty$ )، معادله‌ی هلمهولتز به معادله‌ی لاپلاس ( $\nabla^2 P = 0$ ) تبدیل می‌شود. هنگامی که سازه‌ی سد با یک تیر برشی با مقطع ثابت و همگن شیب‌سازی شود، معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن در حوزه‌ی بسامد به شکل رابطه‌ی ۲ خواهد بود:

$$G_1 A_1 (\partial^2 u / \partial y^2) = -\rho_{s1} \omega^2 (u + 1) - P|_{(0, y, \omega)} \quad (2)$$

که در آن، صلبیت برشی سد با  $G_1 A_1$ ، جرم واحد طول آن با  $\rho_{s1}$  و تغییرمکان نسبی آن در نقطه‌هایی با مختصه‌ی مکانی  $(0, y)$  در بسامد  $\omega$  با  $u$  بیان می‌شود. اگر برای پی نیز رفتاری مشابه با سد در نظر گرفته شود، معادله‌ی حاکم بر تغییرشکل آن مطابق رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

$$G_2 A_2 (\partial^2 u / \partial y^2) = -\rho_{s2} \omega^2 (u + 1) \quad (3)$$

که در آن،  $G_2 A_2$  و  $\rho_{s2}$  به ترتیب مدول برشی و چگالی پی هستند. شرایط مرزی مخزن، شامل  $S_1$  تا  $S_7$ ، نیز به ترتیب روابط ۴ الی ۷ تعریف می‌شوند:

$$P|_{(L, y, \omega)} = 0 \quad (4)$$

$$(\partial P / \partial y)|_{(x, 0, \omega)} = 0 \quad (5)$$

$$(\partial P / \partial x)|_{(0, y, \omega)} = -\rho_F \omega^2 (u + 1) \quad (6)$$

$$P|_{(x, H, \omega)} = 0 \quad (7)$$

که در آن‌ها،  $\rho_F$  جرم واحد حجم سیال است. شیب در تاج سد و جابه‌جایی در کف پی یا محل سنگ بستر صفر در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین برای شرایط مرزی  $S_6$  و  $S_7$ ، روابط ۸ و ۹ تعریف می‌شوند:

$$\partial u / \partial y|_{(0, H, \omega)} = 0 \quad (8)$$

$$u(0, 0, \omega) = 0 \quad (9)$$

در محل اتصال سد - پی ( $S_5$ ) باید جابه‌جایی و شیب در هر دو زیردامنه مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ برابر در نظر گرفته شود:

$$\partial u / \partial y|_{(H_1, \omega)}^{Dam} = \partial u / \partial y|_{(H_1, \omega)}^{Foundation} \quad (10)$$

$$u(H_1)|^{Dam} = u(H_1)|^{Foundation} \quad (11)$$

همان‌طور که مشخص است، برای آنالیز سیستم سد - مخزن - پی باید ۳ معادله و ۸ شرط مرزی به‌طور همزمان حل شوند تا جابه‌جایی‌های سد - پی و فشار هیدروستاتیک در مخزن به دست آیند. معادله‌های ۶، ۱۰ و ۱۱ شرایط مرزی اندرکنشی هستند که سه محیط آب - خاک - سازه را از یکدیگر متأثر می‌سازند. در ادامه، ایده‌های جدید و راهکارهای لازم برای حل معادله‌های مذکور و نحوه‌ی اعمال اندرکنش بین زیردامنه‌ها با روش چند ربعی بیان شده است.

## ۳. روش چند ربعی

در پژوهش حاضر، برای تخمین جابه‌جایی سد، جابه‌جایی پی و فشار هیدروستاتیک

$$A^{DRF} = \begin{Bmatrix} a_{\backslash 1, \backslash} & \dots & a_{\backslash 1, N_1} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ a_{N_{bD}, \backslash} & \dots & a_{N_{bD}, N_1} & 0 & \dots & 0 & c_{\backslash 1, \backslash}^{III} & \dots & c_{\backslash 1, N_T}^{III} \\ a'_{\backslash 1, \backslash} & \dots & a'_{\backslash 1, N_1} & b'_{\backslash 1, \backslash} & \dots & b'_{\backslash 1, N_T} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{N_{Di}, \backslash} & \dots & a'_{N_{Di}, N_1} & b'_{N_{Di}, \backslash} & \dots & b'_{N_{Di}, N_T} & 0 & \dots & 0 \end{Bmatrix}_{N_1 \times (N_1 + N_T + N_T)} \quad (15)$$

$$A^{RD} = \begin{Bmatrix} 0 & \dots & 0 & b_{\backslash 1, \backslash} & \dots & b_{\backslash 1, N_T} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & b_{N_{dbR}, \backslash} & \dots & b_{N_{dbR}, N_T} & 0 & \dots & 0 \\ a''_{\backslash 1, \backslash} & \dots & a''_{\backslash 1, N_1} & b''_{\backslash 1, \backslash} & \dots & b''_{\backslash 1, N_T} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a''_{N_{Ri}, \backslash} & \dots & a''_{N_{Ri}, N_1} & b''_{N_{Ri}, \backslash} & \dots & b''_{N_{Ri}, N_T} & 0 & \dots & 0 \end{Bmatrix}_{N_T \times (N_1 + N_T + N_T)} \quad (16)$$

$$A^{FD} = \begin{Bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & c_{\backslash 1, \backslash} & \dots & c_{\backslash 1, N_T} \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'''_{\backslash 1, \backslash} & \dots & a'''_{\backslash 1, N_1} & 0 & \dots & 0 & c_{N_{bF}, \backslash} & \dots & c_{N_{bF}, N_T} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & c'_{\backslash 1, \backslash} & \dots & c'_{\backslash 1, N_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & c'_{N_{Fi}, \backslash} & \dots & c'_{N_{Fi}, N_T} \end{Bmatrix}_{N_T \times (N_1 + N_T + N_T)} \quad (17)$$

$$\begin{Bmatrix} A^{DRF} \\ A^{RD} \\ A^{FD} \end{Bmatrix}_{(N_1 + N_T + N_T) \times (N_1 + N_T + N_T)} \begin{Bmatrix} \lambda^D \\ \lambda^R \\ \lambda^F \end{Bmatrix}_{(N_1 + N_T + N_T) \times 1} = \begin{Bmatrix} B^{DRF} \\ B^{RD} \\ B^{FD} \end{Bmatrix}_{(N_1 + N_T + N_T) \times 1} \quad (18)$$

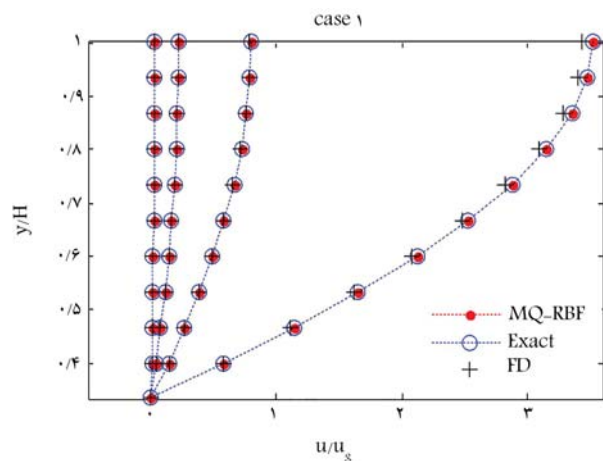
جدول ۱. مثال‌های عددی سیستم سد - مخزن - پی.

نوع سیال مخزن	نوع سد	شرایط مخزن	وضعیت پی	شماره‌ی مثال
-	منعطف	خالی	صلب	۱
-	منعطف	خالی	$t = 1$	۲
-	منعطف	خالی	$t = 10$	۳
-	منعطف	خالی	$t = 50$	۴
تراکم‌پذیر	صلب	پر	صلب	۵
تراکم‌ناپذیر	صلب	پر	صلب	۶
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	صلب	۷
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	$t = 10$	۸
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	$t = 50$	۹

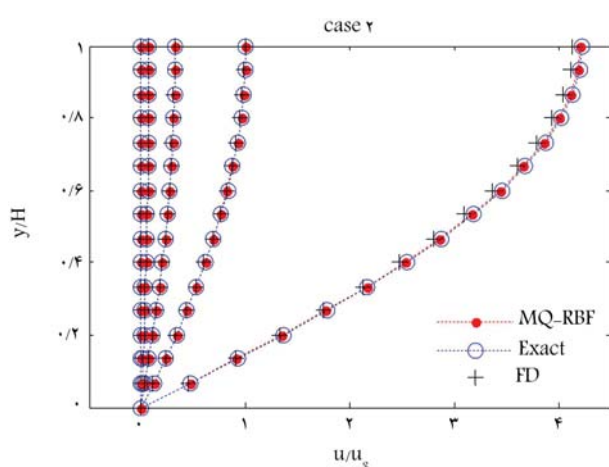
(اندرکنش سد و پی) هستند. همچنین در هر ۴ مثال، مخزن سد، بدون سیال است. در حل مثال‌های مذکور مشاهده شد که تغییرات متغیر شکل بهینه برحسب تغییرات بسامدهای بار زلزله، منظم و قابل فرمول‌بندی بوده است. این امر نشان‌دهنده‌ی کارایی خوب روش چند ربعی در حل مسائل دینامیکی موردبحث است. در پژوهش

#### ۴. مثال‌های عددی

مشخصات هندسی مثال‌های عددی حاضر با توجه به شکل ۱، شامل:  $H_1 = 50m$ ،  $H_T = 100m$  و  $A_1 = 1 \times 10^4 m^2$  و  $Z = 5$  هستند. همچنین خواص فیزیکی سد، شامل:  $\rho_{s1} = 2500 kg m^{-3}$  و  $\rho_{sT} = 1250 kg m^{-3}$  و  $t = G_1 A_1 / G_T A_T$  هستند. برای نمایش بهتر نقاط ضعف و قوت رویکرد حاضر، ۹ مثال مختلف از سیستم دینامیکی موردبحث سد - مخزن - پی مطابق با جدول ۱ بررسی شده است. برای حل مثال‌ها از روش عددی اختلاف محدود نیز استفاده شده است تا عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با یک روش عددی دیگر بهتر ارزیابی شود. توزیع مراکز محاسباتی و نقاط برهم‌نهی برای روش چند ربعی در زیردامنه‌های سد - مخزن - پی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. تعداد مراکز محاسباتی در روش حاضر و تعداد نقاط شبکه در روش اختلاف محدود نیز در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است تعداد مراکز محاسباتی به‌گونه‌ی انتخاب شده‌اند که پاسخ‌ها در مقایسه با حل دقیق، دقت قابل قبولی داشته باشند و با افزایش تعداد آن‌ها، کاهش چندانی در میزان خطا ایجاد نشود. مثال ۱، شامل سد با پی صلب و مثال‌های ۲ الی ۴، شامل سد با پی انعطاف‌پذیر

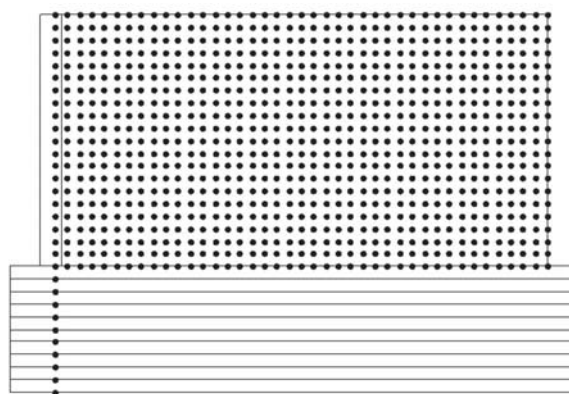


شکل ۳. جابه‌جایی‌های سد در مثال ۱ برای بسامدهای ۲۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ از چپ به راست.



شکل ۴. جابه‌جایی‌های سد و پی در مثال ۲ برای بسامدهای ۳، ۲۱، ۳۹، ۵۷ و ۷۵ از چپ به راست.

به بسامد بار زلزله وابسته است. به عبارت دیگر، حساسیت مثال ۲ به متغیر شکل کمتر و یافتن آن راحت‌تر است. نتیجه‌ی برآمده از این بحث این است که برای آنالیز مسائل مکانیک محیط‌های پیوسته که از معادله‌ی تیر برشی تبعیت می‌کنند، می‌توان با فن تجزیه‌ی دامنه، صعوبت تعیین متغیر شکل را از بین برد، حتی اگر موضوع اندرکنش در میان نباشد. این امر برای معادلات رفتاری دیگر، مانند معادلات تیر تیموشنکو<sup>۲۷</sup> تیر اوپلر - برنولی<sup>۲۸</sup> یا ... قابل پژوهش است. برای محاسبه‌ی پاسخ همه‌ی مثال‌ها از روش‌های دقیق، چند ربعی و اختلاف محدود، برنامه‌نویسی رایانه‌ی به زبان متلب<sup>۲۹</sup> انجام شده است. جابه‌جایی‌های سد - پی در بسامدهای مختلف برای مثال‌های ۱ الی ۴ به ترتیب در شکل‌های ۳ الی ۶ و جابه‌جایی‌های تاج سد نیز به عنوان پاسخ‌ها با بیشینه‌ی خطا در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شوند. به منظور راستی‌آزمایی، پاسخ روش‌های دقیق<sup>[۱۸]</sup> و اختلاف محدود نیز علاوه بر رویکرد پیشنهادی ارائه شده‌اند. در مثال‌هایی مانند مثال‌های ۳ و ۴، که حل دقیق ندارند، فقط پاسخ روش اختلاف محدود به همراه پاسخ روش چند ربعی ارائه شده است. همان‌طور که از شکل‌های مذکور و محاسبات خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)<sup>۳۰</sup> مطابق با جدول ۳ مشخص است، رویکرد پیشنهادی، دقت خوبی دارد.



شکل ۲. توزیع مراکز محاسباتی و برهم‌نهی در مثال‌های عددی برای روش چند ربعی.

جدول ۲. تعداد مراکز محاسباتی.

شماره مثال	چند ربعی	روش
۱	$N_1 = 21$	اختلاف محدود
۲-۴	$N_1 + N_2 = 31$	
۵-۷	$N_1 + N_2 = 882$	
۸-۹	$N_1 + N_2 + N_3 = 893$	

حاضر، برای حل مسائل ابتدا متغیر شکل بهینه برای تعداد محدودی از بسامدها با استفاده از الگوریتم ارائه شده در نوشتار فلاح و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۳]</sup> محاسبه شده است. سپس براساس آن‌ها، رابطه‌ی برای کل بسامدها پیشنهاد شده است. در این راستا، رابطه‌ی ۱۹ برای مثال اول و رابطه‌ی ۲۰ برای مثال‌های ۲ الی ۴ پیشنهاد شده است:

$$c_D(\omega) = -0.00000017\omega^4 + 0.00001012\omega^3 - 0.00036549\omega^2 + 0.00690397\omega + 59.56982517 \quad (19)$$

$$c_D(\omega, t) = c_F(\omega, t) = 90 \quad (20)$$

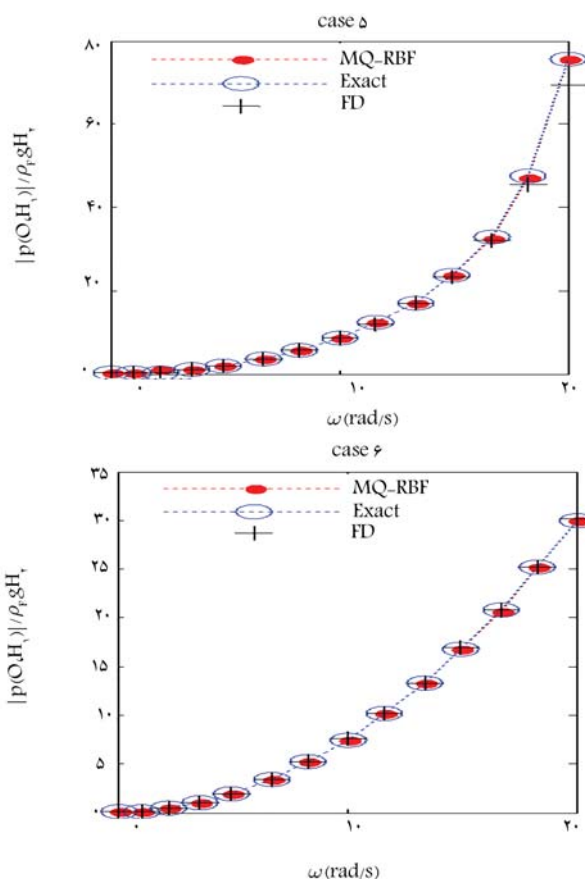
با دراختیار داشتن چنین روابطی نیاز به استفاده از الگوریتم‌های مکمل متغیر شکل، مانند الگوریتم‌های ارائه شده در نوشتارهای ۱۳ الی ۱۶، در کنار روش چند ربعی و نیز محاسبه‌ی آن در همه‌ی بسامدها از بین می‌رود. بنابراین هزینه‌های محاسباتی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

یک نکته‌ی قابل توجه در ارتباط با معادله‌ی ۲۰ این است که متغیر شکل بهینه به نسبت سختی برشی سد و پی ( $t$ ) وابسته نیست، یعنی با یافتن آن در یک نسبت سختی، استفاده از آن برای حل مسائل با نسبت سختی‌های متفاوت امکان‌پذیر است. این موضوع نیز به‌خودی‌خود حجم محاسبات را کنترل می‌کند.

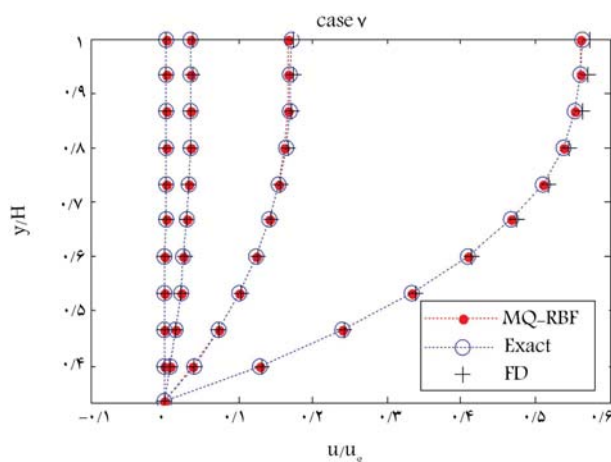
$$c_R(\omega) = 0.00001327\omega^4 - 0.00014994\omega^3 - 0.00003561\omega^2 + 0.00471488\omega + 25.9976796 \quad (21)$$

نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که معادله‌ی ۲۰ به بسامد بار زلزله نیز وابسته نیست. دلیل این امر فن تجزیه‌ی دامنه و اعمال شرایط مرزی ۱۰ و ۱۱ بین دو زیردامنه‌ی سد - پی است. توضیح اینکه، درواقع مثال ۱ و ۲ مشابه یکدیگر هستند و فقط ارتفاع آن‌ها فرق دارد؛ ولی متغیر شکل بهینه در مثال ۱ برخلاف مثال ۲





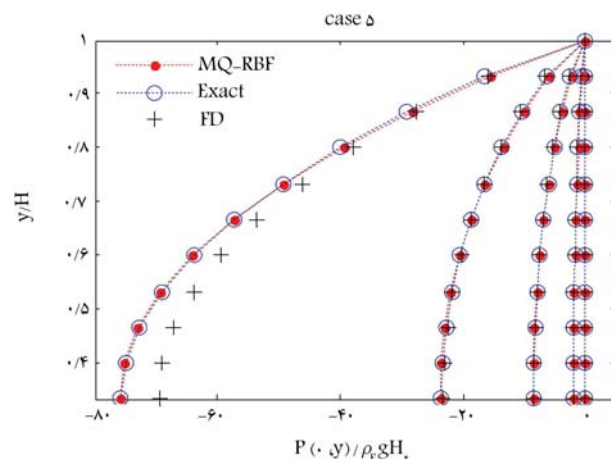
شکل ۱۱. قدرمطلق فشار هیدروپنوماتیک در  $(H_0, \omega)$  برای مثال‌های ۵ و ۶.



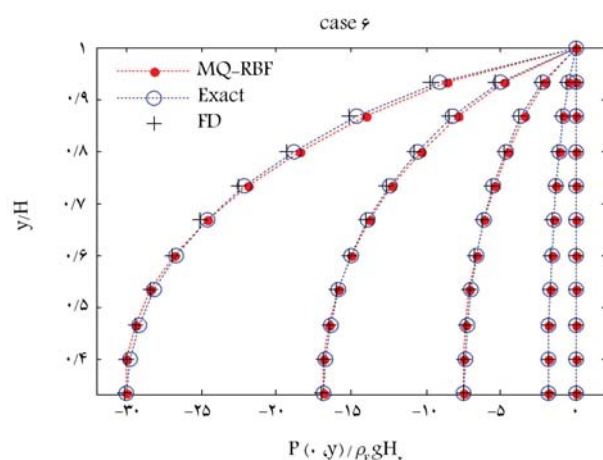
شکل ۱۲. جابه‌جایی‌های سد در مثال ۷ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از چپ به راست.

آن در شکل ۱۴ مشاهده می‌شوند. در مثال‌های ۵ الی ۷، به مقایسه‌ی نتایج حل دقیق<sup>[۱۸]</sup> رویکرد حاضر و روش اختلاف محدود پرداخته شده است. شکل‌های مرتبط و جدول‌های ۲ الی ۴ نشان می‌دهند که در حالت‌های مذکور نیز روش چند ربعی، عملکرد قابل قبولی دارد و سرعت و دقت آن از روش اختلاف محدود بیشتر است.

آنالیز سیستم سد - مخزن - پی با رویکرد حاضر و روش اختلاف محدود در مثال‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند. در حالت‌های مذکور، نسبت سختی برشی سد به پی



شکل ۹. فشار هیدروپنوماتیک وارده بر سد در مثال ۵ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از راست به چپ.



شکل ۱۰. فشار هیدروپنوماتیک وارده بر سد در مثال ۶ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از راست به چپ.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ در بسامدهای مختلف به ترتیب برای مثال‌های ۵ و ۶ و نیز مقادیر بیشینه‌ی فشار در پایه‌ی سد در شکل ۱۱ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم‌پذیری سیال باعث می‌شود که میزان استهلاک امواج فشاری با دور شدن از سد کاهش و فشار هیدروپنوماتیکی در مخزن افزایش یابد. سیستم سد - مخزن با پی صلب در مثال ۷ بررسی شده است. معادله‌ی پیشنهادی برای متغیر شکل بهینه بر حسب بسامد بار زلزله در این حالت مطابق با رابطه‌ی ۲۲ است:

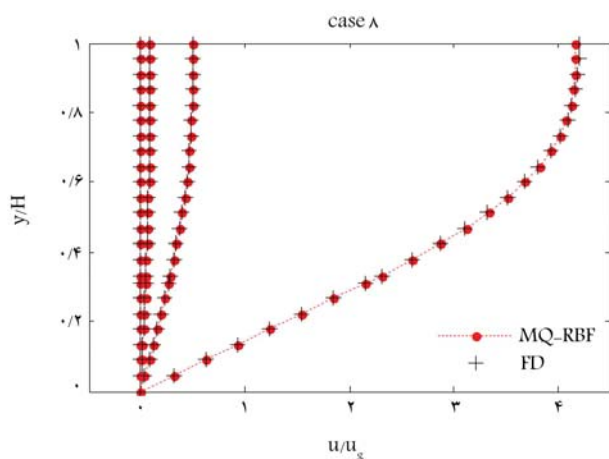
$$c_D(\omega) = c_R(\omega) = 0.00001107\omega^3 - 0.0000988\omega^2 + 0.005385\omega - 0.00871653\omega + 24/8388 \quad (22)$$

نکته‌ی قابل‌توجه این است که متغیر شکل بهینه برای زیردامنه‌های سد و مخزن یکسان به دست آمده است ( $c_D = c_R$ ). این ویژگی به طور قابل‌توجهی در حجم محاسبات صرف جویی می‌کند، زیرا زمان یافتن دو متغیر شکل به صورت همزمان خیلی بیشتر از زمان یافتن یک مقدار برای آن در حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل است. این امر نیز بر کارایی رویکرد پیشنهادی می‌افزاید. پاسخ‌های مثال ۷، شامل جابه‌جایی بدنه‌ی سد و فشار هیدروپنوماتیک وارد بر آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و نیز بیشینه‌ی جابه‌جایی در تاج سد و فشار هیدروپنوماتیک در پاشنه‌ی

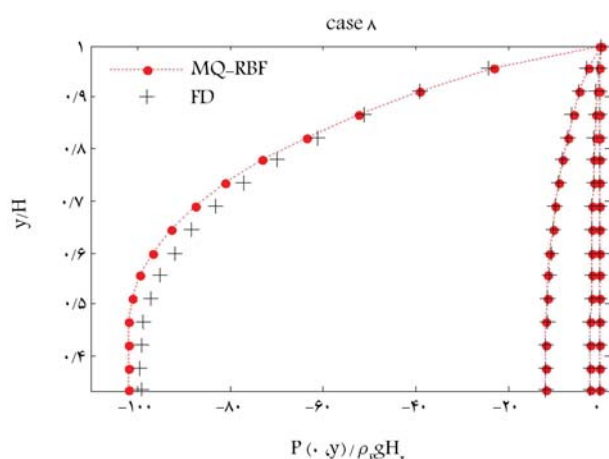
به ترتیب برابر مقادیر دلخواه  $10^\circ$  و  $50^\circ$  هستند و سیال مخزن هم تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی پیشنهادی برای تعیین متغیر شکل بهینه برای بسامدهای کمتر از بسامد مد اول، مطابق معادله‌ی ۲۳ است:

$$c_D(\omega) = c_R(\omega) = c_F(\omega) = 0.00002661\omega^2 + 0.0001078\omega^3 - 0.0018125\omega^2 + 0.00220074\omega + 23.438619 \quad (24)$$

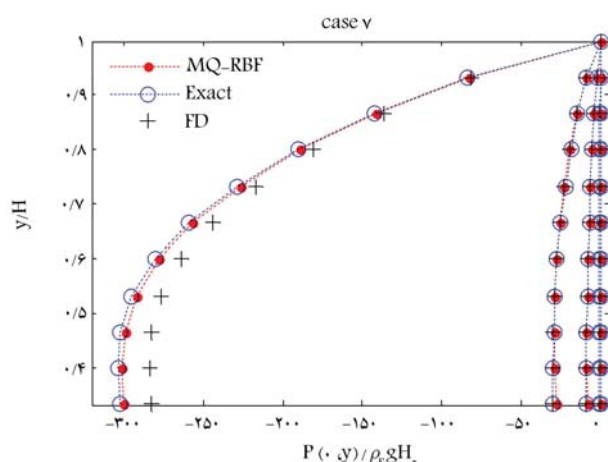
طبق انتظار یک متغیر شکل بهینه برای هر سه زیردامنه‌ی سد، مخزن و پی کفایت می‌کند و نیازی به صرف هزینه‌ی محاسباتی بالا برای بهینه‌سازی همزمان سه متغیر شکل وجود ندارد. اگر در مسائل مشابه چنین اتفاقی نیافتد، الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک<sup>۳۲</sup> می‌توانند مؤثر باشد. پاسخ‌های مثال ۸، شامل جابه‌جایی سد و پی در شکل ۱۵ و فشارهای هیدرودینامیکی وارده بر بدنه‌ی سد در شکل ۱۶ مشاهده می‌شوند. به‌طور مشابه، برای مثال ۹ نیز شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است. در شکل‌های ۱۹ الی ۲۲ نیز جابه‌جایی در تاج سد و فشار وارد بر پایه‌ی آن در بسامدهای مختلف برای هر دو مثال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود. از آنجایی که حل دقیقی جهت محاسبه‌ی خطا برای این قبیل



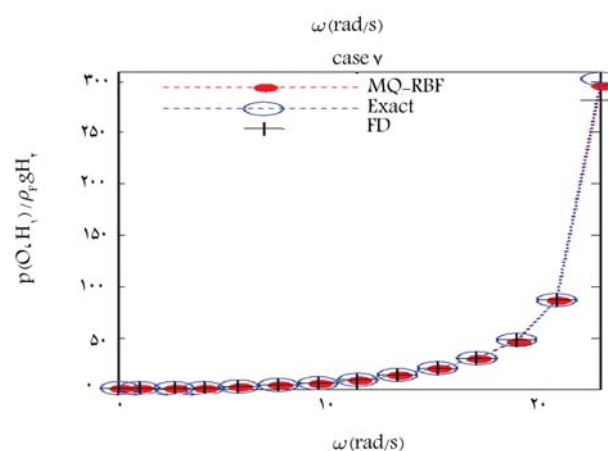
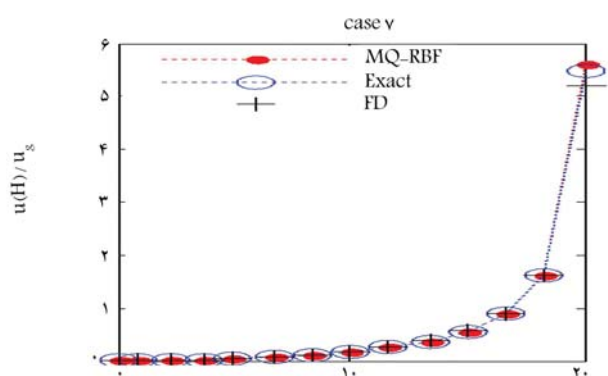
شکل ۱۵. جابه‌جایی‌های سد در مثال ۸ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از چپ به راست.



شکل ۱۶. فشار هیدرودینامیک وارده بر سد در مثال ۸ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از راست به چپ.



شکل ۱۳. فشار هیدرودینامیک وارده بر سد در مثال ۷ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از راست به چپ.

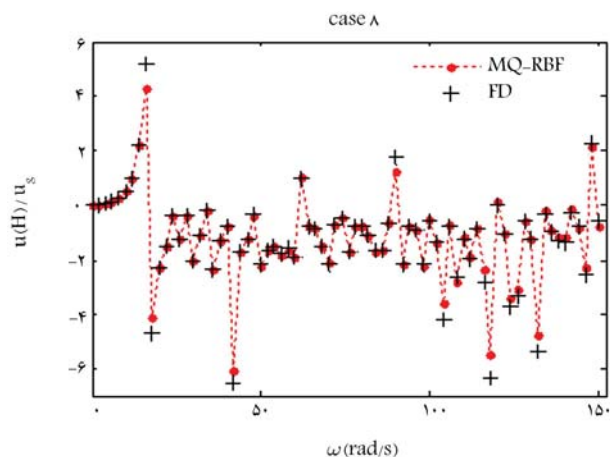


شکل ۱۴. جابه‌جایی‌های سد در  $(\omega, H)$  و قدرمطلق فشار هیدرودینامیک در  $(H_1, \omega)$  برای مثال ۷.

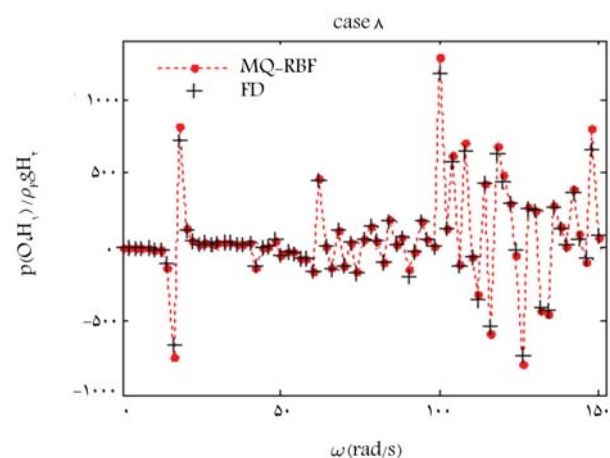
جدول ۴. خطای جذر میانگین مربعات فشار هیدرودینامیک در  $(H_1, \omega)$ .

شماره مثال	روش	
	چند ربعی	اختلاف محدود
۵	۰/۰۶۴۴	۰/۰۴۸۲۵
۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۱۱۴
۷	۰/۰۴۹۳۳	۱/۴۹۳۶

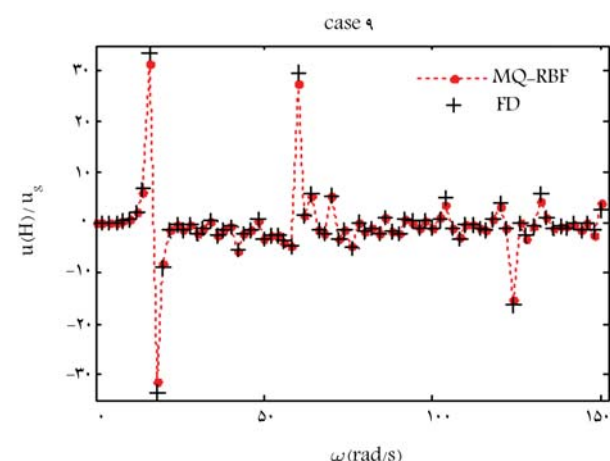




شکل ۱۹. جابجایی های سد در  $(H, \omega)$  برای مثال هشت.

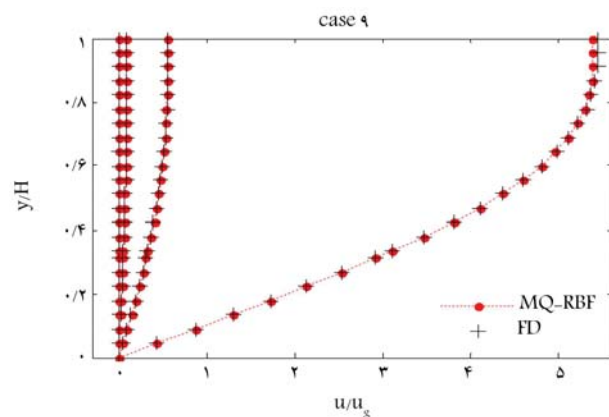


شکل ۲۰. فشار هیدروپدینامیک در  $(H, \omega)$  برای مثال ۸.

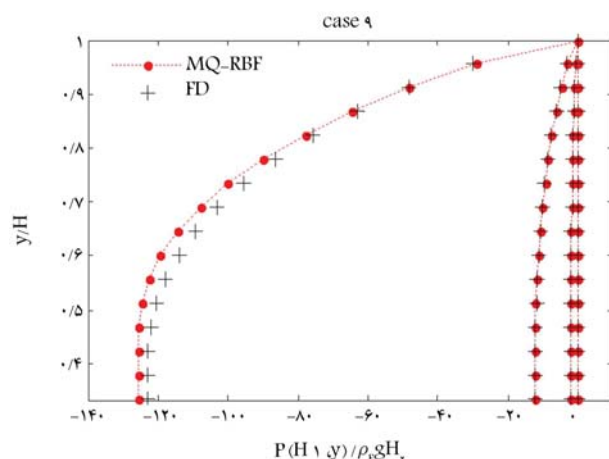


شکل ۲۱. جابجایی های سد در  $(H, \omega)$  برای مثال ۹.

یک چالش جدی پژوهشی به شمار می‌رود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در مسئله‌ی مورد بحث، تغییرات متغیر شکل بهینه برحسب افزایش بسامد بار هارمونیک زلزله‌ی منظم بوده و روابط جدیدی برای تعیین آن ارائه شده است. با فن جدید پیشنهادی پژوهش حاضر مشخص شد که روش چند ربعی برای سیستم‌های سد - پی، سد - مخزن و سد - مخزن - پی به متغیرهای شکل بهینه‌ی جداگانه برای



شکل ۱۷. جابجایی های سد در مثال ۹ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از چپ به راست.



شکل ۱۸. فشار هیدروپدینامیک وارده بر سد در مثال ۹ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ از راست به چپ.

مسائل موجود نیست و پاسخ هر دو روش عددی، مانند مثال‌های قبلی اختلاف چندانی ندارند، پاسخ‌ها قابل اعتماد تلقی می‌شوند. در مسائل سد - پی و سد - مخزن، هر چه نسبت سختی برشی سد به پی افزایش یابد، بسامد طبیعی سیستم کاهش و پاسخ‌های آن در بسامدهای یکسان افزایش می‌یابد (شکل ۲۳).

## ۵. نتیجه‌گیری

برای اولین بار در پژوهش حاضر، روش بدون شبکه‌ی تابع پایه‌ی شعاعی چند ربعی با پیشنهاد یک فن جدید تجزیه‌ی دامنه برای مسائل اندرکنش دینامیکی در حوزه‌ی بسامد توسعه داده شده است. در فن پیشنهادی، دو تابع شکل چند ربعی متفاوت برای مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای اندرکنشی در نظر گرفته شده است، که هر کدام براساس معادله‌ی حاکم و مراکز محاسباتی زیردامنه‌ی مجاورش تعریف شده است. در این راستا، سیستم‌های دینامیکی سد - مخزن - پی، شامل اندرکنش معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی و معمولی، بررسی و روند تجزیه‌ی دامنه، تشکیل ماتریس‌های ضرایب هر زیردامنه و تولید ماتریس ضرایب کلی سیستم ارائه شده است. ماتریس ضرایب به دست آمده، دارای تعداد قابل توجهی درایه‌ی صفر است که در کاهش حجم محاسبات تأثیر دارد. تعیین متغیر شکل بهینه هم‌اکنون در کنار توابع پایه‌ی شعاعی،

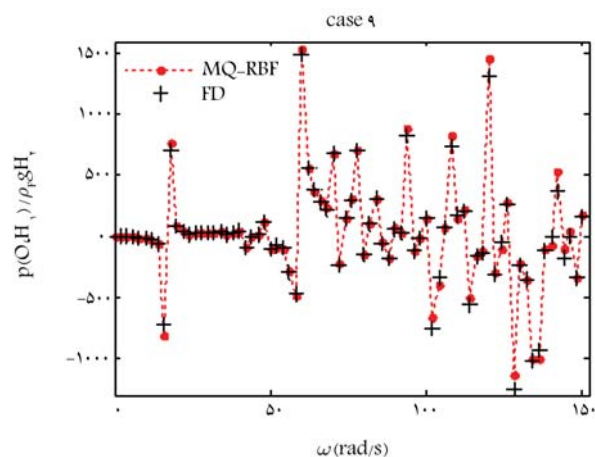
بیش از  $20^\circ$  برابر مراکز محاسباتی در روش حاضر بوده است؛ بنابراین سرعت روش چند ربعی بسیار بیشتر از روش اختلاف محدود است. همچنین خطای هر دو روش اخیر با افزایش بسامد بارگذاری افزایش یافته است، ولی پاسخ‌های روش اختلاف محدود برخلاف روش چند ربعی، انطباق مناسبی با پاسخ‌های دقیق در بسامدهای نزدیک به بسامد تشدید نداشته است. به‌منظور ارزیابی بیشتر روش پیشنهادی پژوهش حاضر، آنالیز مسائل دو و سه بعدی با هندسه‌ی پیچیده‌تر در حوزه‌ی بسامد و زمان و مقایسه‌ی آن با روش‌ها و نرم‌افزارهای موجود برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

## تقدیر و تشکر

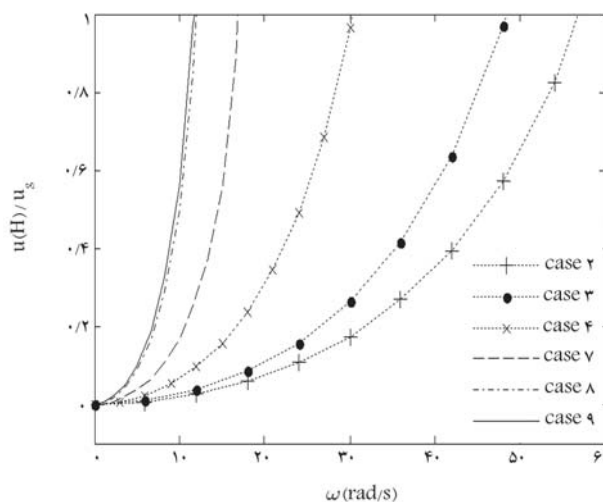
بدین وسیله نویسندگان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) که پژوهش حاضر را طی طرح پژوهشی شماره‌ی ۹۸۰۰۱۷۲۱ حمایت کرده‌اند، سپاسگزاری می‌کنند.

## فهرست علائم

- $\bar{u}_g$ : جابه‌جایی زمین در حوزه‌ی زمان  $(m)$ ؛
- $T$ : زمان  $(s)$ ؛
- $P$ : فشار هیدرودینامیک  $(Pa)$ ؛
- $K$ : عدد موج  $(rad\ m^{-1})$ ؛
- $C$ : سرعت صوت در محیط آب  $(ms^{-1})$ ؛
- $G_1 A_1$ : مدول برشی سد  $(N)$ ؛
- $u$ : جابه‌جایی سد و پی در حوزه فرکانس  $(m)$ ؛
- $(x_j, y_j)$ : مختصات مراکز محاسباتی روش چند ربعی؛
- $G_2 A_2$ : مدول برشی پی  $(N)$ ؛
- $N_1$ : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه‌ی سد؛
- $N_2$ : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه‌ی مخزن؛
- $N_3$ : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه‌ی پی؛
- $CD$ : متغیر شکل زیردامنه‌ی سد  $(m)$ ؛
- $CF$ : متغیر شکل زیردامنه‌ی پی  $(m)$ ؛
- $CR$ : متغیر شکل زیردامنه‌ی مخزن  $(m)$ ؛
- $A^{DRF}$ : ماتریس ضرایب زیردامنه‌ی سد؛
- $A^{RD}$ : ماتریس ضرایب زیردامنه‌ی مخزن؛
- $A^{FD}$ : ماتریس ضرایب زیردامنه‌ی پی؛
- $B^{DRF}$ : ماتریس معلومات زیردامنه‌ی سد؛
- $B^{RD}$ : ماتریس معلومات زیردامنه‌ی مخزن؛
- $B^{FD}$ : ماتریس معلومات زیردامنه‌ی پی؛
- $N_{bD}$ : تعداد مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای سد؛
- $N_{Di}$ : تعداد مراکز محاسباتی درون زیر دامنه سد؛
- $N_{dbR}$ : تعداد مراکز محاسباتی مخزن به جز مرز مشترک؛
- $N_{Ri}$ : تعداد مراکز محاسباتی مرز مشترک سد و مخزن؛
- $N_{bF}$ : تعداد مراکز محاسباتی روی مرزهای پی؛
- $N_{Fi}$ : تعداد مراکز محاسباتی درون زیر دامنه پی؛



شکل ۲۲. فشار هیدرودینامیک در  $(H, \omega)$  برای مثال ۹.



شکل ۲۳. جابه‌جایی‌های سد در  $(H, \omega)$  برای مثال‌های مختلف.

هر زیردامنه نیاز ندارد و یک مقدار واحد برای کل سیستم کافی است. همچنین متغیر شکل به نسبت سختی سد و پی و تراکم‌پذیری سیال مخزن وابسته نیست. موضوعات اشاره شده بر کارایی روش حاضر می‌افزاید و هزینه‌ی محاسبات و عدم قطعیت‌ها را برای یافتن متغیر شکل بهینه شدیداً کاهش می‌دهد. نکته‌ی قابل‌توجه دیگر اینکه اعمال فن تجزیه‌ی دامنه در سیستم سد - پی و استفاده از شرایط مرزی اندرکنشی مناسب، وابستگی متغیر شکل بهینه به بسامدهای بارگذاری را نیز از بین می‌برد. این ویژگی می‌تواند برای کاهش حساسیت متغیر شکل نسبت به متغیرهای موجود در مسائل کشسان دینامیک غیراندرکنشی نیز در کارهای پژوهشی آتی بررسی شود.

برای راستی‌آزمایی نتایج روش پیشنهادی، ۹ مثال عددی مختلف، شامل: سد خالی با پی صلب، سد - پی، سد - مخزن و سد - مخزن - پی حل و پاسخ آن‌ها با حل‌های دقیق موجود مقایسه شده است. نتایج نشان داد که اختلاف ناچیزی بین پاسخ‌های روش دقیق و روش چند ربعی وجود دارد. همچنین برای بررسی کارایی رویکرد حاضر، پاسخ‌های آن با پاسخ‌های روش اختلاف محدود نیز مقایسه شده است. در همه‌ی مثال‌ها، دقت رویکرد حاضر بیش از ۲ برابر روش اختلاف محدود مشاهده شده است. این در حالی است که تعداد نقاط شبکه در روش اختلاف محدود در مثال‌های اول و دوم تا چهارم به ترتیب حدود ۴ و ۱۰ و در سایر مثال‌ها،



$\rho_F$ : چگالی سیال مخزن ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\lambda_j^D$ : ضرایب مجهول توابع شکل چند ربعی سد؛

$\lambda_j^F$ : ضرایب مجهول توابع شکل چند ربعی پی؛

$\lambda_j^R$ : ضرایب مجهول توابع شکل چند ربعی مخزن.

$t$ : نسبت سختی برشی سد به پی؛

$\omega$ : فرکانس بار زلزله ( $\text{rad s}^{-1}$ )

$\rho_{s1}$ : چگالی سد ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\rho_{s2}$ : چگالی پی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

## پانویسها

1. Multiquadric Radial Basis Functions (MQ-RBF)
2. Li
3. Finite Element (FE)
4. Finite Difference (FD)
5. Kansa
6. Liu
7. Shape parameter
8. Gu
9. Computational centers
10. Chen
11. Genetic Algorithm (GA)
12. seepage
13. Padua
14. Fluid-Soil-Structure Interaction (FSSI)
15. Boundary Element (BE)
16. Fundamental solution
17. Scaled Boundary Finite Element (SBFE)
18. Decoupled Scaled Boundary Finite Element (DSBFE)
19. Local Coordinate Origin (LCO)
20. Yu
21. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)
22. Helmholtz equation
23. Laplacian operator
24. Wave number
25. Domain decomposition
26. Subdomain
27. Timoshenko beam
28. Euler-Bernoulli beam
29. Matlab
30. Roots Mean Square Error (RMSE)
31. Resonance frequency
32. Genetic algorithm

## منابع (References)

1. Chen, C.S., Karageorghis, A. and Amuzu, L. "Kansa "RBF collocation method with auxiliary boundary centres for high order BVPs", *J. Comput. Appl. Math.*, **398**, pp. 1-17 (2021).
2. Kansa, E.J. "Multiquadrics-A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics-I surface approximations and partial derivative estimates", *Comput. Math. with Appl.*, **19**(8-9), pp. 127-145 (1990).
3. Fallah, A., Jabbari, E. and Babaee, R. "Development of the Kansa method for solving seepage problems using a new algorithm for the shape parameter optimization", *Comput. Math. with Appl.*, **77**(3), pp. 815-829 (2019).
4. Li, J., Cheng, A.H.-D. and Chen, C.-S. "A comparison of efficiency and error convergence of multiquadric collocation method and finite element method", *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **27**(3), pp. 251-257 (2003).
5. Soleymani, F. and Zhu, S. "RBF-FD solution for a financial partial-integro differential equation utilizing the generalized multiquadric function", *Comput. Math. with Appl.*, **82**, pp. 161-178 (2021).
6. Farahani, B., Berardo, J., Belinha, J. and et al. "On the optimal shape parameters of distinct versions of RBF meshless methods for the bending analysis of plates", *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **84**, pp. 77-86 (2017).
7. Babaee, R., Jabbari, E. and Eskandari-Ghadi, M. "Application of multiquadric radial basis function method for helmholtz equation in seismic wave analysis for reservoir of rigid dams", *Amirkabir J. Civ. Eng.*, **52**(12), pp. 3015-3030 (In Persian) (2019).
8. Liu, Y., Wang, X. and Wang, L. "Interval uncertainty analysis for static response of structures using radial basis functions", *Appl. Math. Model.*, **69**, pp. 425-440 (2019).
9. Kahid Basiri, H., Babaee, R., Fallah, A. and et al. "Development of multiquadric method for solving dam break problem", *J. Hydraul.*, **14**(4), pp. 83-98 (In Persian) (2020).
10. Gu, J. and Jung, J.-H. "Adaptive radial basis function methods for initial value problems", *J. Sci. Comput.*, **82**(2), pp. 1-28 (2020).
11. Chen, W., Hong, Y. and Lin, J. "The sample solution approach for determination of the optimal shape parameter in the Multiquadric function of the Kansa method", *Comput. Math. with Appl.*, **75**(8), pp. 2942-2954 (2018).
12. Liu, C.-S. and Liu, D. "Optimal shape parameter in the MQ-RBF by minimizing energy gap functional", *Appl. Math. Lett.*, **86**, pp. 157-165 (2018).
13. Zhang, Y. "An accurate and stable RBF method for solving partial differential equations", *Appl. Math. Lett.*, **97**, pp. 93-98 (2019).
14. Azarboni, H.R., Keyanpour, M. and Yaghouti, M. "Leave-two-out cross Validation to optimal shape parameter in radial basis functions", *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **100**, pp. 204-210 (2019).
15. Koushki, M., Babaee, R. and Jabbari, E. "Application of RBF multiquadric method for solving seepage problems using a new algorithm for optimization of the shape parameter", *Amirkabir J. Civ. Eng.*, **52**(4), pp. 1009-1024 (In Persian) (2019).

16. Koushki, M., Jabbari, E. and Ahmadiania, M. "Evaluating RBF methods for solving PDEs using Padua points distribution", *Alexandria Eng. J.*, **59**(5), pp. 2999-3018 (2020).
17. Atarnezhad, R. and Farsad, A.R. "Closed-form analysis of dam-reservoir interaction in time-domain including variable dam thickness", *J. College, Eng.*, **39**, 329-340 (2005).
18. Keivani, A., Shooshtari, A. and Sani, A.A. "A closed-form solution for a fluid-structure system: shear beam-compressible fluid", *Coupled Syst. Mech.*, **2**(2), pp. 127-146 (2013).
19. Omid, O. and Lotfi, V. "A symmetric implementation of pressure-based fluid-structure interaction for nonlinear dynamic analysis of arch dams", *J. Fluids Struct.*, **69**, pp. 34-55 (2017).
20. Abdollahi, M. and Attarnejad, R. "Dynamic analysis of dam-reservoir-foundation interaction using finite difference technique", *J. Cent. South Univ.*, **19**(5), pp. 1399-1410 (2012).
21. Millan, M.A., Young, Y.L. and Prevost, J.H. "The effects of reservoir geometry on the seismic response of gravity dams", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **36**(11), pp. 1441-1459 (2007).
22. Qu, Y., Chen, D., Liu, L. and et al. "A direct time-domain procedure for the seismic analysis of dam-foundation-reservoir systems using the scaled boundary finite element method", *Comput. Geotech.*, **138**, pp. 1-23 (2021).
23. Babaei, R. and Khaji, N. "Decoupled scaled boundary finite element method for analysing dam-reservoir dynamic interaction", *Int. J. Comput. Math.*, **97**(8), pp. 1725-1743 (2020).

# بررسی و مقایسه‌ی مؤثرترین روش‌های بهبود عملکرد پس از آتش ستون‌های فولادی کوتاه دارای نقص‌های افقی و قائم

حامد مخدومی درمیان (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

رضا رهگذر\* (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

محسن محمدی زاده (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

امیر ساعدی داریان (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی

کامبیز نورماشیری (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۳/۱، ص. ۷۷-۸۸، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، به بررسی عملکرد ستون‌های فولادی قوطی‌شکل دارای خوردگی در دماهای مختلف و مقاوم‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. بنابراین، ستون‌هایی با جانمایی‌های مختلف نقص (۶ حالت) ساخته شده و تحت اعمال حرارت در ۲ دمای ۲۰ و ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند؛ در ادامه، جهت بهبود رفتار ستون‌ها، با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی در محل نقص، مقاوم‌سازی شده‌اند. سپس ظرفیت باربری کلیه‌ی نمونه‌های ستون (۳۸ نمونه)، به دست آمده است. نتایج پژوهش نشان دادند که هر دو عامل نقص و حرارت، منجر به کاهش مقاومت ستون‌ها و ضعف در عملکرد آن‌ها می‌شود، به‌صورتی که بیشترین کاهش مقاومت ستون به علت نقص در حدود ۳۲٪ و در اثر حرارت ناشی از افزایش دما، در حدود ۳۵٪ بوده است. همچنین مقایسه‌ی روش‌های مقاوم‌سازی نشان داد که استفاده از CFRP، تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد ستون‌های فولادی داشته است. در نهایت، جهت بررسی بیشتر، ۵ نمونه از ستون‌ها با نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی و راستی‌آزمایی شده‌اند.

hamy.mk@gmail.com  
rahgozar@uk.ac.ir  
mohsenmohammadizadeh@yahoo.com  
amir\_saedi\_d@yahoo.com  
narmashiri@iauzah.ac.ir

واژگان کلیدی: ستون فولادی، نقص، حرارت، کامپوزیت CFRP، ظرفیت باربری.

## ۱. مقدمه

وزن کمتر ساختمان‌های فولادی از ساختمان‌های بتنی و در نتیجه نیروی اینرسی کمتر وارده به سازه‌های فولادی در هنگام زمین‌لرزه نسبت به سازه‌های فولادی و اجرای آسان‌تر به‌طور وسیعی در سراسر دنیا استفاده می‌شوند. با توجه به بروز اشتباه‌ها در طراحی، ضعف و اشکال در اجرای سازه‌ها، جزئیات نامناسب میلگردها، محل قرارگیری سخت‌کننده‌ها، تغییر در کاربری ساختمان، خسارت‌های ناشی از خوردگی فولادها (در محیط‌های خورنده) و خسارت‌دیدگی سازه‌ها در اثر بلایای طبیعی و غیرطبیعی، مثل: باد، زلزله و آتش‌سوزی، نیاز به بهسازی و ترمیم برای رسیدن به عملکرد اولیه‌ی اعضا سازه اجتناب‌ناپذیر است. مهم‌ترین ضعف سازه‌های فولادی، مقاومت پایین مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، یعنی فولاد، در برابر خوردگی و نقص‌های اجرایی و همچنین مقاومت بسیار کم در مقابل حرارت بالا و آتش‌سوزی است.<sup>[۱]</sup>

استفاده از فولاد به‌عنوان مصالح ساختمانی از اوایل قرن ۲۰ آغاز شد و در حین جنگ دوم جهانی به‌صورت قابل توجهی گسترش یافت. پس از جنگ دوم جهانی، تهیه‌ی فولاد، امری به مراتب راحت‌تر از قبل شده بود که این امر سبب کاهش چشمگیر قیمت فولاد شد؛ لذا بسیاری از طراحان از اسکلت فلزی برای ساخت ساختمان‌ها استفاده کردند.<sup>[۱]</sup> سازه‌های فولادی یکی از رایج‌ترین سازه‌ها هستند که امروزه استفاده می‌شوند. اعضاء سازه‌های فولادی معمولاً برای تحمل نیروهای فشاری یا خمشی و یا هر دو طراحی می‌شوند. سازه‌های فولادی با توجه به مزایایی از جمله: سرعت ساخت، حجم بیشتر فضاهای داخلی نسبت به سازه‌های بتنی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۳۹، پذیرش ۱۴۰۱/۳۱

DOI:10.24200/J30.2022.60114.3086

پس دو بحران کلی پیشرو در سازه‌های فولادی عبارت است از:

الف) نقص ناشی از خوردگی

ب) آسیب به علت حرارت بالا و آتش.

-- نقص: نقص به دلیل خطاهای طراحی و یا عواملی نظیر: افزایش بار، تغییر کاربری سازه، خطاهای اجرایی، عوامل محیطی، تغییر آیین‌نامه‌ها و خوردگی ناشی از عوامل محیطی در سازه‌های فولادی رخ می‌دهد.

-- آسیب به علت حرارت بالا و آتش: به عقیده‌ی طراحان فولاد، علی‌رغم مزیت‌های بسیار بالای آن، در برابر حرارت بالا و آتش‌سوزی به شدت آسیب‌پذیر است. حرارت بالا و آتش موجب وقوع آسیب‌های گاه جدی به پیکره‌ی ساختمان می‌شود. تأثیر حرارت زیاد به‌خصوص در سازه‌ی فولادی از آن‌جهت خطرناک است که فولاد ساختمانی در اثر افزایش دما، مقاومت و سختی خود را به‌تدریج از دست می‌دهد؛ در نتیجه، ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری اعضا فولادی با افزایش دما کاهش می‌یابد.<sup>[۴]</sup> حتی با وجود تدابیر حفاظت در برابر آتش، به‌دلیل مختلفی همچون: قرار گرفتن در معرض آتش‌های شدیدتر از حالت پیش‌بینی شده یا از بین رفتن مواد محافظ در برابر آتش به‌دلیل اعمال ضربه (در مورد ساختمان‌های تجارت جهانی)، ریسک از دست رفتن مقاومت برخی از اعضا، بسیار بالاست. در صورتی که سازه در برابر خرابی پیش‌رونده، دوام اندکی داشته باشد، روش‌های مختلف بسیار زیادی برای حفظ مقاومت و پایداری سازه‌های فولادی در برابر حرارت وجود دارد. پس از خرابی بعضی از اعضا، امکان وقوع خرابی‌های پیش‌رونده‌ی فاجعه‌باری که منجر به تلفات جانی، مالی و تبعات اجتماعی غیرقابل جبران می‌شوند، وجود خواهد داشت.<sup>[۴]</sup>

اما دانش بسیار کمی در باره‌ی رفتار حقیقی اعضا فولادی با وضعیت تکیه‌گاهی و الگوهای حرارتی مختلف حاصل شده است. عدم فهم درست از رفتار واقعی سازه در حرارت و آتش منجر به یک طراحی غیراقتصادی و ناکارآمد می‌شود. این در حالی است که برخلاف باور عمومی، عضو فولادی محافظت نشده که قسمتی از یک سازه‌ی پیچیده است، امکان دارد بتواند پایداری و مقاومت کافی را در برابر آتش داشته باشد که بستگی به توانایی کل سازه در بازپخش نیروها از مناطقی با حرارت بالا به قسمت‌های خنک‌تر و جلوگیری از وقوع خرابی‌های پیش‌رونده دارد. درخصوص رفتار عضوهای فولادی به‌ویژه ستون‌های فولادی در حرارت بالا و یا آتش، مطالعاتی انجام شده است که به برخی از آن‌ها در اینجا اشاره شده است. پانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵)،<sup>[۵]</sup> آزمایش‌هایی را بر روی مقاومت آتش ستون‌های کوتاه جعبه‌یی و I شکلی در تایوان انجام دادند که هدف از آن‌ها بررسی رفتار ستون‌ها تحت بار آتش بوده است. کاهش مقاومت ستون‌های فولادی در دماهای مختلف و اثر نسبت عرض به ضخامت مقاطع در مقاومت نهایی ستون‌ها در دمای بالا ارزیابی و نتیجه‌گیری شد که بار نهایی ستون‌ها با افزایش نسبت‌های عرض به ضخامت و حرارت کاهش می‌یابد. ونگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)،<sup>[۶]</sup> در بررسی رفتار ستون‌های فولادی محافظت شده در برابر آتش که بخشی از قسمت‌های محافظت شده آسیب دیده بود، دریافت‌اند که طول آسیب پوشش ضد حریق، مقاومت زیادی در برابر حفاظت ستون‌های فولادی دارد و خرابی نمونه‌ها عمدتاً به دلیل کماتش و یا تسلیم قسمت پوشش ضد حریق آسیب‌دیده است. کوری<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۷]</sup> به بررسی پارامتریک ستون‌های فولادی تحت بارگذاری، مقاطع و نسبت‌های لاغری مختلف پرداختند و تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور را در عملکرد ستون‌های تحت شرایط آتش ارائه کردند. آثار مهار محوری نیز به دمای گسیختگی به نسبت بار و نسبت سختی مهار محوری بستگی

داشته است. بیستروم<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۸]</sup> به بررسی نحوه‌ی افزایش دمای ستون‌های دایره‌یی توخالی فولادی تحت افزایش حرارتی محلی پرداختند و نتایج آن را با دستورالعمل Eurocode ۱-۲-۱۹۹۱ مقایسه کردند. فن<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۹]</sup> نیز در بررسی آزمایشگاهی مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع‌شکل (قوطی‌شکل) با فولاد S۳۰۴۰۸، تأثیر پارامترهای مختلف، مانند: نسبت بار m، خروج از مرکزیت و ابعاد مقطع در عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولاد را بررسی کردند و دریافتند که نسبت بار و خروج از مرکزیت، پارامترهای کلیدی در تعیین دمای بحرانی و نحوه‌ی عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی بدون مهار محوری هستند. ایشان در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸،<sup>[۱۰]</sup> همانند پژوهش قبلی‌شان (۲۰۱۶)، مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربع‌شکل (قوطی‌شکل) را این بار با در نظر گرفتن قید، آزمایش کردند و دریافتند که روند ظرفیت باربری ستون‌های فولادی فشرده دارای مهار محوری و خروج از مرکزیت در شرایط آتش‌سوزی دو مرحله را طی می‌کند: پیش‌کمانش و پس‌کمانش.

برای گسترش نمونه از حالت کمانش به حالت گسیختگی نهایی، مدت زمانی سپری می‌شود و ظرفیت باربری مرحله‌ی پس‌کمانش می‌تواند به‌طور مؤثر عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی مقید را بهبود بخشد. ژینگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۲)،<sup>[۱۱]</sup> در بررسی آزمایشگاهی ستون‌های I شکل در شرایط آتش‌سوزی، ۸ ستون با اعمال بار محوری را با نسبت‌های مختلف ظرفیت ستون به ستون و افزایش دمای ستون‌ها آزمایش و عملکرد آن‌ها را ارزیابی کردند و دریافتند که مدل Kucukler نسبت به مبنای طراحی حریق ستون‌ها در برابر آتش در دستورالعمل EN ۱۹۹۳-۱-۲، قابلیت اطمینان بیشتری دارد. برای مقاوم‌سازی و بهسازی قاب‌های فولادی و اعضاء مرتبط، روش‌های متفاوتی مرسوم است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از ورقه‌های الیاف پلیمری مرکب (FRP) و دورپیچ کردن اعضاء قابی با آن‌ها و پوشش سطح آسیب‌دیده با ورق فولادی اشاره کرد. دورپیچ FRP سبب بهبود رفتار مکانیکی فولاد می‌شود؛ کامپوزیت‌های FRP از مصالح نوین برای مقاوم‌سازی (مصالح کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف) هستند. FRP مصالحی است که برای بهسازی و مقاوم‌سازی در راستای افزایش طول عمر سازه استفاده می‌شود و در محاسبات اولیه، مقاومت سازه لحاظ نمی‌شود. گستره‌ی کاربرد FRP، شامل: تیرها، ستون‌ها، دال‌ها، دیوارهای بنایی، پل‌ها، سیلواها، کانال‌ها، مخازن آب و سدهاست.

کریمیان و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۲]</sup> رفتار سازه‌یی و تأثیر CFRP در تقویت ستون‌های کوتاه فولادی مقطع دایره‌یی توخالی (CHS) با نقص افقی و عمودی را بررسی کردند. شهرکی و همکاران اثرات الیاف پلیمری کربنی (CFRP) و همچنین صفحه‌های فولادی را برای مقاوم‌سازی ستون‌های فولادی مقطع مربعی توخالی (SHS) دارای نقص را مورد مطالعه قرار دادند. موارد مورد مطالعه ظرفیت باربری محوری، تأثیر لاغری و رفتار ستون‌های فولادی در تحقیقشان بود. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که CFRP در بهبود ظرفیت نیروی محوری بهتر از صفحه‌های فولادی تقویتی عمل کرده است. شعبانی و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۱۳]</sup> تأثیر موقعیت نقص‌های قائم در رفتار ستون‌های فولادی SHS و همچنین تقویت ستون‌های مذکور با الیاف CFRP را بررسی کردند و دریافتند که نقص مذکور (به ویژه نقص قائم پایین ستون - در میانه‌ی مقطع عرضی) سبب کاهش محسوسی در ظرفیت باربری ستون‌ها، همچنین کمانش محلی و پارگی جانبی محل نقص می‌شود که با استفاده از دورپیچ FRP، این موارد تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کنند. یوسفی و

سلسیوس قرار گرفته و پس از سرد شدن، آزمون فشاری بر روی ۱۴ نمونه‌ی بدون مقاوم‌سازی (۷ نمونه در دو تراز دمایی) انجام شده است. سپس ۲۴ نمونه‌ی دارای نقص (۶ حالت نقص - دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد - دو روش مقاوم‌سازی) توسط الیاف ورق‌های فولادی CFRP مقاوم‌سازی شدند؛ همچنین نمونه‌های ذکر شده تحت آزمایش فشاری (همانند نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی) قرار گرفتند. در نتیجه می‌توان گفت تأثیر مواردی، همچون: نوع نقص، تراز دمایی و نحوه‌ی مقاوم‌سازی، در عملکرد ستون‌های فولادی بررسی و مقایسه شده‌اند.

## ۲. مشخصات نمونه‌های ستون بررسی شده

در پژوهش حاضر، ستون‌های فولادی قوطی‌شکل توخالی به ابعاد  $32 \times 10 \times 10 \times 3$  سانتی‌متر (ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر، ابعاد مقطع ۱۰ سانتی‌متری و ضخامت ۳ میلی‌متر) در ۲ درجه حرارتی مختلف (۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد که بالاتر از دمای شکست فولاد است و تأثیر بیشتری در مقاومت فولاد دارد)، به صورت تقویت نشده و تقویت شده تحت بارگذاری و آزمایش قرار گرفته‌اند.

الف) نمونه‌های سالم و بدون نقص: ۲ عدد.

ب) نمونه‌های دارای نقص بدون تقویت: ۱۲ عدد.

سپس به منظور ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌ها، در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های تقویت شده به وسیله‌ی الیاف CFRP و ورق فولادی محل نقص به این شرح، بررسی و آزمایش شده‌اند.

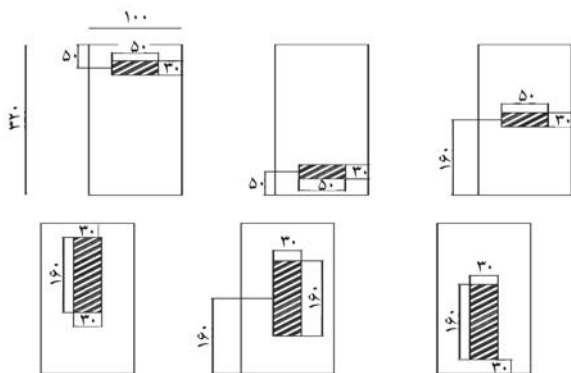
ج) نمونه‌های دارای نقص با تقویت FRP دایره: ۱۲ عدد.

د) نمونه‌های دارای نقص با تقویت ورق فولادی محل نقص: ۱۲ عدد. نمونه‌ها، ابعاد نقص‌ها، محل جانمایی در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.

نقص‌های ذکر شده‌ی ستون در کارخانه توسط دستگاه‌های برش CNC (کنترل عددی رایانه‌ای) ایجاد شده‌اند. تصاویر برش نمونه‌ها و نمونه‌های نقص‌دار در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شوند.

## ۱.۲. شرایط تکیه‌گاهی و لاغری ستون‌ها

تکیه‌گاه‌های ستون با توجه به فیکس و ثابت بودن دو فک دستگاه در جهت سطح مقطع عرضی به صورت گیردار بودند. در ستون‌های مطالعه شده، با توجه به دو انتهای گیردار ستون ( $\lambda = k \times l/r$ ,  $k = 0.5$ ) ضریب لاغری برابر ۵/۲ بوده



شکل ۱. ابعاد ستون‌ها، نقص‌ها و محل قرارگیری نقص.

همکاران (۲۰۲۱)، ستون‌های فولادی دایره‌ی توخالی (CHS) دارای خوردگی را که با FRP تقویت شده بودند، بررسی کردند و نتایج حاکی از افزایش ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری نمونه‌های تقویت شده و همچنین تأخیر در کمناش موضع خورده شده، کنترل گسیختگی و کاهش تنش در محل خوردگی بود.<sup>[۱۵]</sup>

در خصوص تأثیر حرارت و متعاقباً مقاوم‌سازی اعضاء فولادی و بتنی مطالعات محدودی در دسترس است؛ تاو و هان<sup>[۱۶]</sup> (۲۰۰۷)، به ترمیم تیرستون‌های فولادی لوله‌ی دارای هسته‌ی بتنی (CFST) که در معرض آتش بودند، با استفاده از دورپیچ‌های CFRP پرداختند و نمونه‌های دایره‌ی و مربعی با شرایط مذکور را بررسی کردند و دریافتند که دورپیچ CFRP سبب افزایش ظرفیت باربری تیرستون‌های مذکور (CFST) می‌شود؛ در حالی که ترمیم با مواد مذکور، تأثیری در سختی نمونه‌های اخیر نداشته است. جیانگتاو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با میلگردهای GFRP نصب شده در نزدیک سطح (NSM) تحت تأثیر آتش را ارزیابی کردند. ایشان ۱۵ تیر بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با میلگرد و دو تیر مرجع (بدون تقویت) را تحت شرایط آتش استاندارد ISO۸۳۴ و دمای محیط بارگذاری کردند و دریافتند که مواد ضدحریق (محافظت‌کننده در برابر آتش)، مقاومت تیرهای تقویتی با روش NSM-FRP را افزایش می‌دهند؛ از طرفی، اجرای U شکل مواد ضدآتش، تأثیر موفقی‌تری در مهار آتش نسبت به اجرای آن‌ها فقط در وجه زیر تیر داشته است.<sup>[۱۷]</sup> عمران<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۱۸]</sup> از یک روش مدل‌سازی عددی، جهت بررسی رفتار انتقال حرارت در ستون‌های فولادی تقویتی با CFRP و عایق‌بندی شده استفاده کردند. یک پژوهش تجربی جهت تعیین خواص گرمایی فیبرکربن، چسب، CFRP و مواد عایق‌بندی در دماهای بالا انجام و تأثیر ضخامت عایق در انتقال حرارت نیز بررسی شد؛ در نتیجه جزئیات مدل‌های المان محدود انتقال حرارت و خواص گرمایی مهم CFRP و مواد عایق‌بندی ارائه شد. چن<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۱۹]</sup> تأثیر الیاف CFRP در رفتار ستون‌های فولادی حرارت دیده را ارزیابی کردند و به بررسی رفتار فشاری ستون‌های کوتاه فولادی قوطی‌شکل پر شده با بتن (CFST) که با الیاف CFRP تقویت شده بودند، پرداختند. ستون‌های مذکور قبل از تقویت، تحت تأثیر درجه‌های حرارت بالا (۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مثبت دورپیچ FRP در مقاومت و سختی ستون‌های فولادی بود و افزایش تعداد لایه‌های FRP، سبب بهبود بیشتر پارامتر مذکور شده است. هی و چن<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۰)،<sup>[۲۰]</sup> تأثیر درجه حرارت بالا و لایه‌های ورقه‌های CFRP یک، دو، سه و چهار لایه را در رفتار ستون‌های لوله‌ی فولادی بررسی کردند و دریافتند که ستون‌های فولادی دایره‌ی (CST) پس از تقویت ورق‌های CFRP، افزایش باربری بیشتری نسبت به ستون‌های مربعی فولادی (SST) به دست آوردند.

هیچ‌کدام از مطالعات اخیر، تأثیر همزمان نقص و حرارت در اعضاء فولادی و متعاقباً جبران ضعف‌های مذکور و کاهش مقاومت صورت گرفته را با روش‌های مقاوم‌سازی مطالعه نکرده‌اند. همچنین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی عملکرد ستون‌های فولادی در دماهای بالا، محدودیت‌هایی نظیر: عملکرد پس از آتش، ستون‌ها، قابلیت بارگذاری مجدد بر روی آن‌ها پس از آتش، راهکارهای مقاوم‌سازی، ایجاد نقص در عملکرد ستون‌ها، نوع مقطع ستون‌ها و ... دارند. بنابراین در پژوهش حاضر، به بررسی ستون‌های فولادی قوطی‌شکل و مقاوم‌سازی آن‌ها با در نظر گرفتن نقص‌های مختلف در ستون در شرایط پس از حرارت پرداخته شده است. بدین منظور، ستون‌های بدون نقص و دارای ۶ نقص مختلف (در مجموع ۳۸ ستون) طراحی و ساخته شده‌اند. در ادامه، ستون‌ها در ۲ تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه

جدول ۱. نتایج آزمونه‌ی کششی.

نمونه	حد جاری	مقاومت کششی	درصد ازدیاد
شماره مشخصات شدن	(MPa)	(MPa)	طول نسبی
۱ ورق	۳۴۴	۳۵۶	۳۶
۲ ورق	۳۳۱	۳۵۰	۳۰
۳ ورق	۳۳۳	۳۵۲	۳۶

جدول ۲. مشخصات کامپوزیت‌های CFRP استفاده شده‌ی ضخامت.

ضخامت	چگالی	مقاومت کششی	کرنش نهایی	مدول کشسانی
(mm)	(gr/cm <sup>۲</sup> )	(MPa)	(%)	(MPa)
۵/۱۱	۲۰۰	۳۹۰۰	۱/۷	۲۳۰۰۰۰

جدول ۳. خصوصیات رزین اپوکسی.<sup>[۲۱]</sup>

مقاومت کششی	مدول کشسانی	کرنش نهایی
(MPa)	(MPa)	(%)
۳۰	۴۵۰۰	۰/۹

است. تنش تسلیم، مقاومت نهایی، و کرنش نهایی فولاد استفاده شده در ستون‌ها، میانگین نتایج به دست آمده به ترتیب  $f_u = 352 MPa$ ،  $f_y = 335 MPa$  و  $\epsilon_u = 34\%$  در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مدول کشسانی  $E = 270 GPa$  به دست آمده است.

### ۲.۳. مشخصات کامپوزیت‌های CFRP‌های استفاده شده

در پژوهش حاضر، جهت تقویت نمونه‌های ستون فولادی دارای نقص از الیاف کربن CFRP با مشخصات درج شده در جدول ۲ استفاده شده است. نحوه‌ی تقویت به صورت دورپیچ دولایه (دولایه‌ی طولی و دولایه‌ی عرضی) بوده است.

### ۳.۳. مشخصات چسب

چسب، مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تأمین و عملکرد همسان کامپوزیت و ستون را سبب می‌شود. چسب به دو نوع اپوکسی و پلی‌استر تقسیم می‌شود. اپوکسی، بسیار گران‌تر از پلی‌استر است؛ ولی نوع بسیار معمول چسب‌های سازه‌یی بر پایه‌ی اپوکسی استوار است که نتیجه‌ی اختلاط رزین‌های اپوکسی با یک ماده‌ی سفت‌کننده (Hardener) است. کامپوزیت CFRP با استفاده از اپوکسی مخصوص به ستون فولادی چسبانده می‌شود. در جدول ۳، مشخصات چسب استفاده شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

### ۴.۳. مشخصات ورق‌های تقویتی

مشخصات مکانیکی ورق‌های تقویتی، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد ستون‌ها در بخش ۱.۳ است.

## ۴. معرفی و نام‌گذاری نمونه‌های ستون فولادی

به‌طور کلی نمونه‌ها در دو درجه حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد تقسیم‌بندی شده‌اند که با توجه به نوع و جانمایی نقص، تقویت و یا عدم تقویت ستون‌ها



شکل ۲. تصاویر برش CNC نمونه‌ها در کارخانه.



شکل ۳. تصاویر نمونه‌های سالم و نقص‌دار در کارخانه پس از برش CNC محل نقص.



شکل ۴. تصاویر نمونه‌های آزمونه‌ی کششی با نمایش طول آن‌ها.

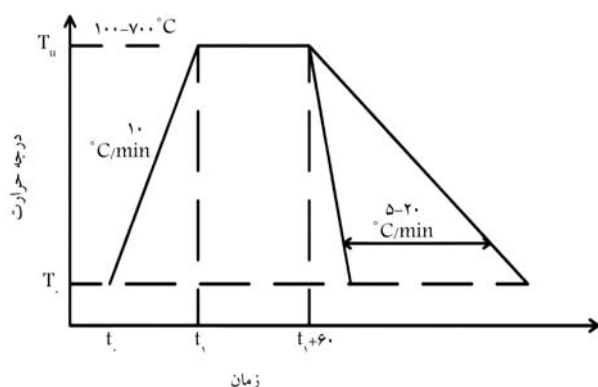
است که نشان‌دهنده‌ی لاغری بسیار پایین است و کوتاه بودن ستون‌ها را تأیید می‌کند و لاغری در ستون‌های کوتاه، تأثیر زیادی ندارد.

## ۳. مشخصات مصالح استفاده شده

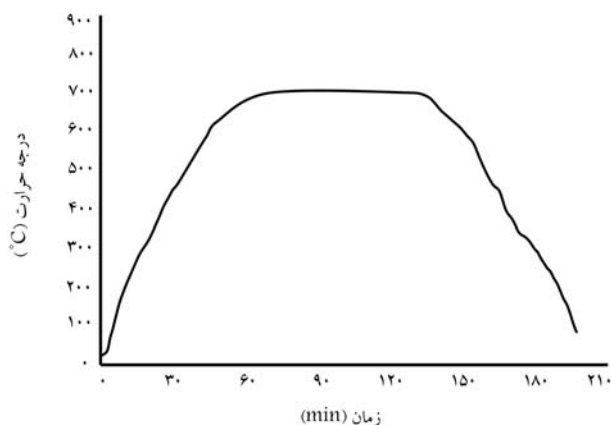
### ۱.۳. مشخصات فولاد

با استفاده از آزمایش آزمونه‌ی کششی ورق فولادی، مشخصات فولاد استفاده شده در ستون‌ها و ورق‌های تقویتی به دست آمده است. نمونه‌های دمپایی مطابق دستورالعمل ASTM ۳۷۰<sup>[۲۰]</sup> جهت آزمون کششی با برش CNC آماده شده‌اند (شکل ۴). خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش کششی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده





شکل ۵. نمودار پیش‌بینی پروسه‌ی افزایش حرارت و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها.



شکل ۶. نمودار دما - زمان (گرمایش - سرمایش) اعمالی به نمونه‌ها.



شکل ۷. تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد اعمال حرارت.



شکل ۸. نمونه‌ی ستون DHM مقاوم‌سازی‌شده با CFRP.

با کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی نمونه‌های ستون نامگذاری شده‌اند:

V (Vertical)	H (Horizontal)	D (Defect)	Control
عمودی	افقی	نقص	نمونه کنترلی
	B (Bot)	M (Middle)	T (Top)
	پایین	وسط	بالا
نتیجه، انواع نقص‌ها با توجه به نوع نقص و محل نقص شامل این موارد است:			
DHB	DHM	DHT	
نقص افقی پایین ستون	نقص افقی وسط ستون	نقص افقی بالای ستون	
DVB	DVM	DVT	
نقص قائم پایین ستون	نقص قائم وسط ستون	نقص قائم بالای ستون	

برای نمونه‌های تقویتی C۲T۲L که به معنی دولایه‌ی عرضی و دولایه‌ی طولی CFRP با الیاف یک جهته است؛ و برای نمونه‌های تقویتی با ورق از PL استفاده شده است که به معنای تقویت محل نقص با پلیت یا ورق فولادی است.

## ۵. پروسه‌ی اعمال حرارت بر روی ستون‌های فولادی

در آزمایش مذکور از یک کوره‌ی الکتریکی، با تنظیم دستی قدرت برای حرارت‌دهی نمونه‌ها استفاده شده است. دو ترموکوپل نوع K روی نمونه و کوره، دمای نمونه و کوره را ثبت می‌کردند. نمونه‌ها از دمای محیط به دماهای هدف با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه حرارت داده شده‌اند. ۲ حالت دمای هدف ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. به محض حرارت‌دهی نمونه تا دمای هدف، دما به مدت ۶۰ دقیقه ثابت نگه داشته شده است، تا شرایط پایداری حرارت در نمونه‌ها ایجاد و از توزیع یکنواخت دما در نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. سپس کوره خاموش و فاز خنک‌شدگی نمونه‌ها شروع شده است. نمونه‌ها، به‌طور طبیعی و با نرخ‌ی حدود ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه کاهش پیدا کرده است، تا به دمای اتاق برسد. [۲۲]

در شکل ۵، منحنی در نظر گرفته شده برای اعمال حرارت به نمونه‌ها و در شکل ۶ نیز منحنی گرمایش، سرمایش واقعی اعمالی (براساس دماهای ثبت شده در زمان‌های مختلف) به نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل ۷، تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد از اعمال حرارت مشاهده می‌شوند. پس از اتمام این مرحله، آزمون‌های مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها در دمای محیط انجام شده است.

## ۶. مقاوم‌سازی نمونه‌ها

### ۱.۶. مقاوم‌سازی اعضا ستون فولادی با الیاف CFRP

در پژوهش حاضر، نمونه‌های مطالعه شده‌ی دارای نقص ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط و بالاترین دمای اعمالی که حدوداً دمای شکست فولاد است) جهت بهبود عملکرد، به صورت دورپیچ کامل توسط الیاف CFRP احاطه و به صورت دولایه‌ی دورپیچ مقاوم‌سازی شده‌اند که بدین منظور از الیاف تک جهته به دو صورت عرضی و طولی استفاده شده است که لایه‌های اول و سوم به صورت عرضی و لایه‌های دوم و چهارم به صورت طولی بودند. نمونه‌ی ستون مقاوم‌سازی شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



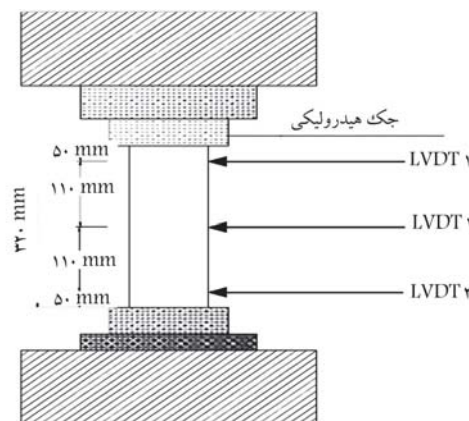
شکل ۱۱. بارگذاری نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت خارجی.



شکل ۹. نحوه‌ی مقاوم‌سازی نمونه‌ها به وسیله‌ی ورق‌های فولادی.



شکل ۱۲. بارگذاری نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت خارجی.



شکل ۱۰. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها زیر چک.

نمونه‌هایی از بارگذاری ستون‌ها با حرارت اعمالی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون تقویت و با تقویت FRP مشاهده می‌شوند.

## ۸. نتایج به‌دست آمده از آزمایش فشاری ستون‌ها

در آزمایش فشاری نمونه‌ها، مقدار بیشینه‌ی بار (بار بحرانی) و تغییرمکان قائم متناظر با بار بحرانی به دست آمده است. جهت تحلیل بررسی ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ها، نمودار نیرو - تغییرمکان قائم ستون‌ها استفاده شده است که از روی نمودار مذکور، بار بیشینه و تغییرمکان متناظر با آن به‌دست آمده است.

## ۱.۸. نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های تقویت نشده‌ی ۲۰، ۷۰۰ درجه و مقایسه‌ی نتایج

در شکل ۱۳، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان برای نمونه‌ی کنترلی (بدون نقص) تقویت نشده مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۴، نتایج کامل نمونه‌های تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. نتایج جدول اخیر نشان می‌دهد که:

-- به دلیل کاهش سطح مقطع عرضی در محل نقص، ضعف و نقص سبب کاهش ظرفیت باربری و تحمل بارهای قائم است، به صورتی که:

الف) کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های ستون ۲۰ درجه را نمونه‌ی دارای نقص

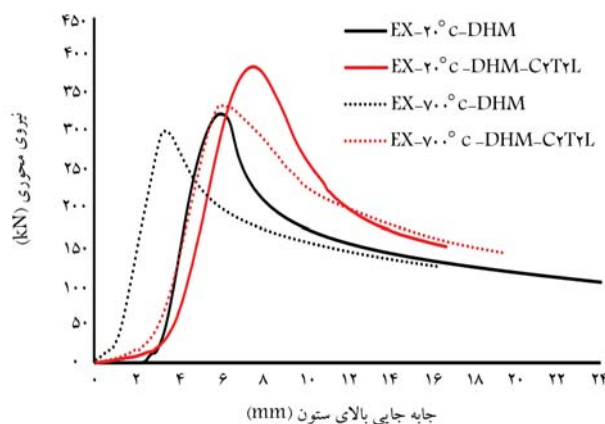
## ۲.۶. مقاوم‌سازی با ورق فولادی

به منظور مقاوم‌سازی اعضاء فشاری فولادی دارای سوراخ، از ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۱ سانتی‌متر بزرگ‌تر از ابعاد سوراخ استفاده شده است. مشخصات مکانیکی ورق‌های مذکور، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد نمونه‌های ستون است. همچنین ورق‌های اشاره شده بر روی مکان سوراخ‌ها جوش داده شده‌اند. صفحه‌ی فولادی جوش داده شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود (نمونه‌هایی با سوراخ‌های افقی و عمودی در وسط). همچنین، برای اتصال جوش، از جوش گوشه استفاده شده است.

## ۷. پروسه‌ی انجام آزمایش فشاری ستون‌های فولادی در آزمایشگاه

به منظور بررسی و تحلیل ستون‌های فولادی بدون نقص، دارای نقص بدون تقویت، و دارای نقص با تقویت، نمونه‌ها توسط چک ۱۰۰ تنی تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و در هر لحظه، نیرو و تغییرمکان قائم متناظر توسط سیستم نمایشی لودسل به صورت اتومات ثبت شده است. همچنین جهت ثبت تغییرمکان افقی (عمود بر راستای عضو) از سه عدد LVDT (ترانسفورماتورهای تفاضلی متغیر جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی) در بالا، وسط و پایین ستون که عمود بر راستای عضو کار گذاشته شده‌اند، استفاده شده است. در شکل ۱۰، نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی به‌همراه نصب LVDT ها مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب





شکل ۱۴. نمودار نیرو - تغییرمکان نمونه‌های تقویتی با CFRP و بدون تقویت با نقص افقی وسط در حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۵. نتایج نمونه‌های تقویت شده با CFRP و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

بیشینه‌ی بار قائم		بیشینه‌ی بار قائم			
$P_{max}(KN)$ برای		$P_{max}(KN)$ برای		شرح نمونه	
نمونه‌های ۷۰۰ درجه		نمونه‌های ۲۰ درجه		شرح نمونه	
تقویت نشده	تقویت شده	تقویت نشده	تقویت شده		
۳۸۵/۱۶	۳۵۰/۹۷	DHT	۳۸۶/۵۶	۳۷۷/۳۴	DHT
۳۳۴/۷۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۸۵/۵۶	۳۲۴/۰۲	DHM
۴۲۷/۶۷	۲۹۵/۱۵	DHB	۴۴۴/۱۷	۳۵۳/۶۷	DHB
۳۴۲/۹۳	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۳۰/۴۴	۴۰۹/۶۴	DVT
۳۶۳/۱۲	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۲۷/۵۴	۳۹۳/۳۰۲	DVM
۳۳۳/۵۸	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۹۱	۴۰۵/۹۳	DVB

شرح بوده است:

الف) نمونه‌های تقویت شده با CFRP: در شکل ۱۴، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان (نمونه با نقص افقی که بحرانی‌ترین حالت باربری را داشته است)، نمونه‌های تقویت شده با CFRP و بدون تقویت مشاهده می‌شود. در جدول ۵ نیز، نتایج کامل نمونه‌های مذکور در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

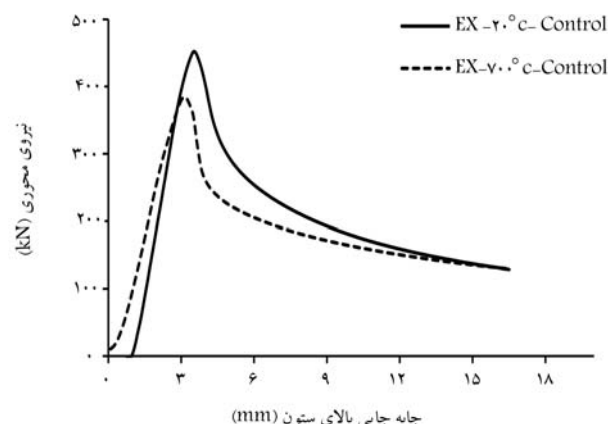
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود:

-- در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تقویت و دورپیچ FRP سبب افزایش باربری و بهبود عملکرد ستون‌ها شده است. به‌صورتی که:

الف) افزایش ۲۶ درصدی تحمل بارهای قائم در نمونه با نقص افقی پایین، بیشترین تأثیر را در نمونه‌های ۲۰ درجه داشته است.

ب) افزایش ۴۵ درصدی تحمل بارهای قائم در نمونه با نقص افقی پایین، بیشترین تأثیر را در نمونه‌های ۷۰۰ درجه داشته است که بیشترین میزان افزایش در بین کل نمونه‌های دو گروه درجه حرارتی را نیز شامل می‌شود.

ب) نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی در محل نقص: در شکل ۱۵، نمونه‌ی از نمودارهای نیرو - تغییرمکان (نمونه با نقص افقی که بحرانی‌ترین حالت باربری



شکل ۱۳. نمودار نیرو - تغییرمکان، نمونه‌های کنترلی (بدون نقص) تقویت نشده در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۴. نتایج نمونه‌های تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

بیشینه‌ی بار قائم		تغییرمکان متناظر			
$P_{max}(KN)$		با $\Delta(mm)$		شرح نمونه	
۷۰۰°C		۲۰°C			
۴۵۱/۶۴	۳۸۳/۴۹	۳/۴۹	۳/۱۸۷۳	Control	
۳۷۷/۳۴	۳۵۰/۹۷	۴/۱۲	۳/۶۶	DHT	
۳۲۴/۰۲	۳۰۱/۵۸	۶/۰۰	۳/۳۵	DHM	
۳۵۳/۶۷	۲۹۵/۱۵	۴/۷۷	۴/۴۵	DHB	
۴۰۹/۶۴	۳۲۲/۰۳	۳/۳۸	۳/۸۱	DVT	
۳۹۳/۳۰۲	۳۴۱/۶۰	۳/۵۱	۳/۸۴	DVM	
۴۰۵/۹۳	۲۶۱/۵۸	۴/۱۰	۲/۸۸	DVB	

افقی وسط ستون دارد (کاهش ۲۸ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترلی در ۲۰ درجه).

ب) کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های ستون ۷۰۰ درجه را نمونه‌ی دارای نقص قائم پایین ستون دارد (کاهش ۳۲ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترلی در ۷۰۰ درجه).

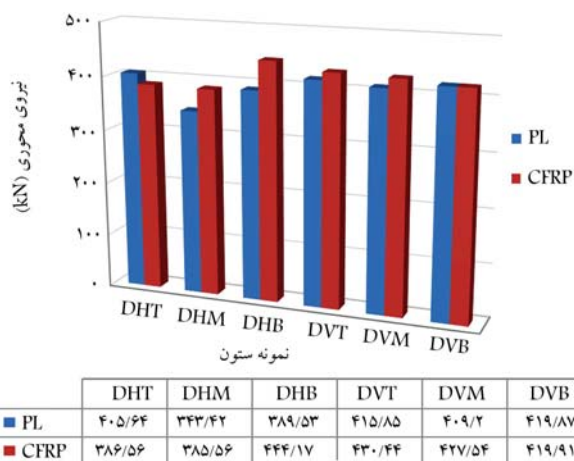
-- تمامی نمونه‌های ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با توجه به کاهش مقاومت فولاد در دما و حرارت بالا، ظرفیت باربری کمتری نسبت به نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد دارند، که این کاهش ظرفیت باربری برای نمونه‌ی کنترلی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۵٪ نسبت به ۲۰ درجه سانتی‌گراد است و بیشترین کاهش ظرفیت باربری در مقایسه‌ی نمونه‌های مشابه در دو درجه حرارتی مذکور، مربوط به نمونه با نقص قائم در پایین ستون است، که کاهش ۳۵ درصدی ظرفیت باربری را با افزایش درجه حرارت به دنبال دارد.

-- تغییرمکان محوری هنگام بار بیشینه، در نمونه با نقص افقی وسط در حرارت ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین مقدار را دارد.

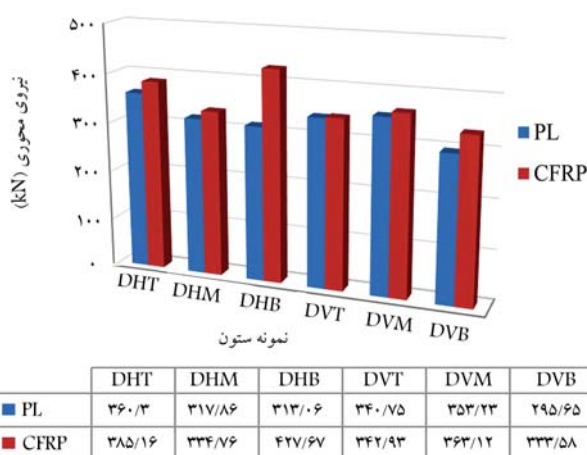
## ۲.۸. نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های تقویت شده‌ی ۲۰ و ۷۰۰

درجه و مقایسه با سایر نتایج

نمونه‌های دارای نقص به دو صورت: (۱) با دورپیچ CFRP و (۲) با ورق فولادی در محل نقص تقویت شده و سپس تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند، که نتایج به این



شکل ۱۶. مقایسه‌ی ظرفیت باربری (بیشینه‌ی نیروی محوری قابل تحمل) نمونه‌های تقویتی با ورق و CFRP در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد.



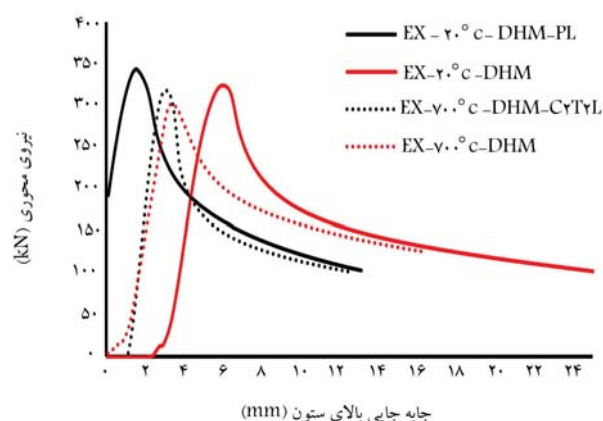
شکل ۱۷. مقایسه‌ی ظرفیت باربری (بیشینه‌ی نیروی محوری قابل تحمل) نمونه‌های تقویتی با ورق و CFRP در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

نسبت به نمونه‌های تقویتی با ورق دارند و تأثیر بیشتر دو لایه‌ی CFRP را نسبت به ورق تقویتی در بهبود رفتار ستون‌ها و ظرفیت باربری ستون‌ها نتیجه می‌دهند. همچنین در نمودارهای شکل ۱۷ نیز همانند شکل ۱۶، تأثیر بیشتر CFRP نسبت به ورق، در تمامی حالت‌های نقص، بدون استثناء مشخص است.

## ۹. مود خرابی نمونه‌ها

با توجه به بررسی نمونه‌ها، نحوه‌ی گسیختگی آن‌ها به این شرح است:

-- حالت خرابی برای نمونه‌های کنترلی تسلیم و به دنبال آن کماتش محلی متقارن است، به نحوی که دو ضلع مخالف به سمت داخل و دو ضلع دیگر به سمت بیرون کماتش می‌کنند (شکل ۱۸الف). در نمونه‌های دارای نقص، در برخی نمونه‌ها با توجه به ضعیف شدن قسمتی از مقطع، کماتش موضعی اغلب در محل نقص به وجود آمده و موجب گسیختگی نمونه شده است (شکل ۱۸ب)؛ و در برخی دیگر، نحوه‌ی خرابی همانند نمونه‌ی کنترلی بوده است. در نمونه‌های تقویت شده به وسیله‌ی ورق‌های فولاد نیز همانند نمونه‌های کنترلی، تسلیم به همراه



شکل ۱۵. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با نقص افقی وسط در ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

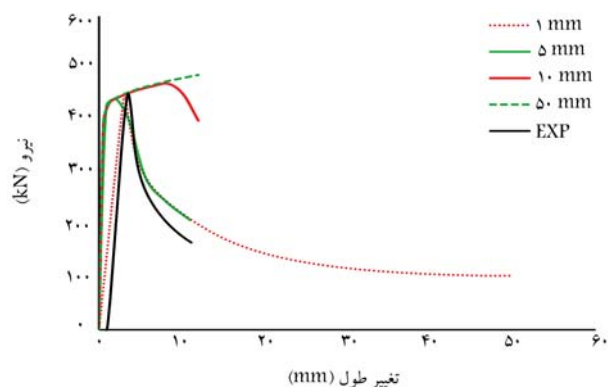
جدول ۶. نتایج نمونه‌های تقویت شده با ورق و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد.

بیشینه‌ی بار قائم		بیشینه‌ی بار قائم	
شرح نمونه	شرح نمونه	شرح نمونه	شرح نمونه
برای $P_{max}(KN)$	برای $P_{max}(KN)$	برای $P_{max}(KN)$	برای $P_{max}(KN)$
نمونه‌های ۷۰۰ درجه	نمونه‌های ۲۰ درجه	نمونه‌های ۷۰۰ درجه	نمونه‌های ۲۰ درجه
تقویت نشده	تقویت شده	تقویت نشده	تقویت شده
۳۶۰/۳	۳۵۰/۹۷	DHT	۴۰۵/۶۴
۳۱۷/۸۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۴۳/۴۲
۳۱۳/۰۶	۲۹۵/۱۵	DHB	۳۸۹/۵۳
۳۴۰/۷۵	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۱۵/۸۵
۳۵۳/۲۳	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۰۹/۲۰
۲۹۵/۵۶	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۸۷

را داشته است)، نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی، و نمونه‌های بدون تقویت مشاهده می‌شوند. در جدول ۶، نیز نتایج کامل نمونه‌های مذکور در دو حرارت ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

مطابق جدول ۶: در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، تقویت با ورق فولادی در محل نقص، نیز همانند روش دیگر تقویت (استفاده از دورپیچ CFRP) سبب افزایش مقاومت ستون‌ها شده است؛ به صورتی که بیشترین افزایش در نمونه‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با نقص افقی پایین ستون (۱۰٪ افزایش) و در نمونه‌های ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه با نقص قائم پایین ستون (۱۳٪ افزایش) بوده است.

-- مقایسه‌ی دو حالت تقویت: در مقایسه بین نتایج نمونه‌های بدون تقویت و نمونه‌های تقویتی در هر دو حالت تقویت به طور جداگانه، مشاهده شد که درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویتی با CFRP بیشتر بوده و در نتیجه، تأثیرگذاری دورپیچ CFRP نسبت به ورق فولادی محسوس‌تر است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مقایسه‌ی دو حالت تقویت برای هر نوع نقص، به ترتیب در دماهای ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. نمودارهای شکل ۱۶ نشان می‌دهد که به جز حالت نقص افقی بالا (DHT)، در تمامی حالت‌ها، نمونه‌های تقویتی با کامپوزیت‌های CFRP (دولایه)، ظرفیت باربری بیشتری



شکل ۱۹. آنالیز حساسیت مش.

$$T(t) = -20t + TU \quad (2)$$

به منظور تحلیل نرم‌افزاری، دو فاز در نظر گرفته شده است:

(الف) فاز اول: تحلیل کوپل سازه‌ی استاتیکی و حرارتی (ترکیب سازه‌ی و حرارتی).

(ب) فاز دوم: تحلیل سازه‌ی استاتیکی.

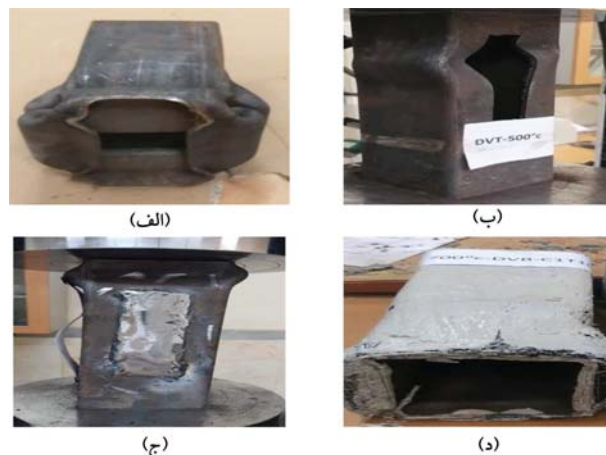
به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، ابتدا آنالیز حساسیت بر روی نمونه‌ی کنترلی انجام شده است و نتایج آن در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که مطابق آن، مش‌بندی با سائز ۵۰ میلی‌متر، دقت مناسبی نداشته و با کاهش سائز مش، دقت مدل‌سازی بهبود یافته است؛ به نحوی که سائز مش ۱ میلی‌متر، بهترین دقت را ایجاد کرده است. از طرفی دیگر، با توجه به نوع مدل‌سازی، اعمال سائز مش ۱ میلی‌متری، خللی در هم‌گرایی مدل ایجاد نکرده است. بنابراین در ادامه، از سائز ۱ میلی‌متر مش برای مدل‌سازی استفاده شده است.

در شکل ۲۰، نمونه‌ی از نمودارهای بار - جابه‌جایی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج عددی، مدل اجزاء محدود، دقت و همگرایی مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی در راستی‌آزمایی پیش‌بینی ظرفیت باربری نمونه‌های فشاری فولادی دارد. همچنین به منظور مطابقت مود خرابی در نتایج آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته، مقایسه‌ی از تغییرشکل نمونه‌ها در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، مدل المان محدودی با دقت مناسبی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی را تعیین کرده است.

## ۱۱. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به بررسی اثر حرارت و نقص در ظرفیت ستون‌های فولادی پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا ۱۴ ستون شامل نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های دارای نقص (۶ نوع نقص) ساخته و در ۲ تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. سپس آزمون فشار بر روی نمونه‌ها انجام شده و نمودارهای بار - جابه‌جایی به‌دست آمده است. در ادامه، ۲۴ ستون دیگر جهت مقاوم‌سازی نقص‌ها به‌وسیله‌ی ورق‌های فولادی و کامپوزیت‌های FRP استفاده و در دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش مشابه شده‌اند. خلاصه‌ی نتایج ۳۸ آزمایش انجام‌شده به این شرح است:

(الف) ضعف و نقص باعث کاهش مقاومت ستون‌ها می‌شود که بیشترین درصد کاهش ظرفیت باربری در نمونه‌های با دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) مربوط به نمونه با نقص افقی میانه‌ی ستون (۲۸٪) و در نمونه‌های ۷۰۰ درجه



شکل ۱۸. مود خرابی نمونه‌ها.

کمانش موضعی رخ داده است (شکل ۱۸ ج). در نمونه‌های تقویت شده به‌وسیله‌ی CFRP نیز اغلب در ۲ ضلع، کمانش محلی داخلی رخ داده و در نهایت، با لایه‌لایه شدن ورق فولاد و CFRP در نواحی گوشه‌های ستون، پارگی رخ داده و نمونه گسیخته شده است. علاوه بر این، اگرچه وقوع کمانش در دو ضلع دیگر ستون که در آن کمانش موضعی به بیرون از طریق محبوس شدن ستون توسط CFRP به تأخیر افتاده است، پس از افزایش دامنه‌ی کمانش موضعی، پارگی CFRP در دو ضلع دیگر نیز رخ داده است (شکل ۱۸ د).

## ۱۰. مدل‌سازی المان محدود

به منظور گسترش نتایج آزمایشگاهی، ۵ نمونه دارای نقص در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۱۲</sup> مدل‌سازی و راستی‌آزمایی شده‌اند که به این شرح هستند:

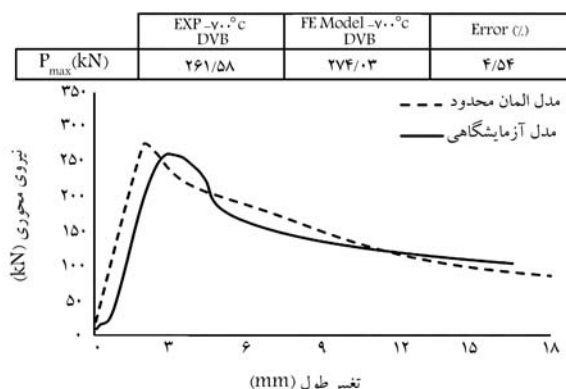
۱. نمونه‌ی بدون نقص (Control)،
۲. نمونه با نقص قائم پایین نمونه (DVB)،
۳. نمونه با نقص افقی وسط نمونه (DHM)،
۴. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DHM-PL)،
۵. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DVB-C<sub>FTVL</sub>).

خواص مصالح، فرایند بارگذاری و کلیه‌ی مشخصات هندسی و مکانیکی مدل‌های عددی مطابق با فرایند استفاده شده در آزمایش‌هاست. در مدل‌سازی مذکور، از المان مکعبی ۳ درجه آزادی، ۸ گره‌ی با گرادین حرارتی (C<sub>3</sub>DAT) و از المان S<sub>4</sub>R (المان صفحه‌ی ۴ گره‌ی) که از المان‌های Shell است، برای مدل‌سازی CFRP استفاده شده است.

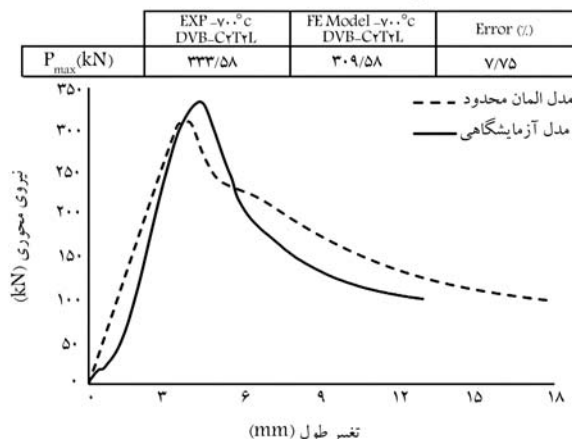
## ۱۰.۱۰. پروسه‌ی اعمال حرارت و تحلیل

جهت اعمال حرارت همانند نمونه‌ی آزمایشگاهی (نمودار شکل ۵ در بخش ۵)، از توابع ۱ و ۲ به ترتیب جهت گرمایش و سپس سرمایش استفاده شده است:

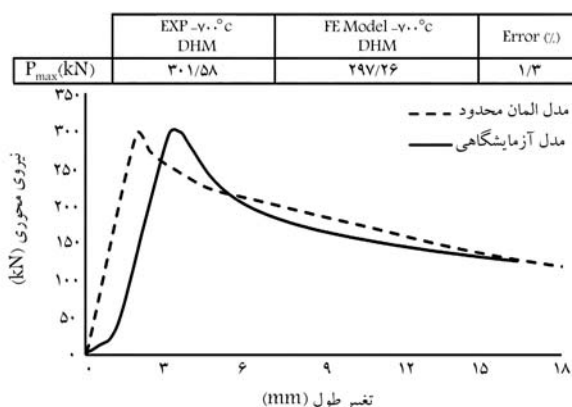
$$T(t) = 10t + T_0 \quad (1)$$



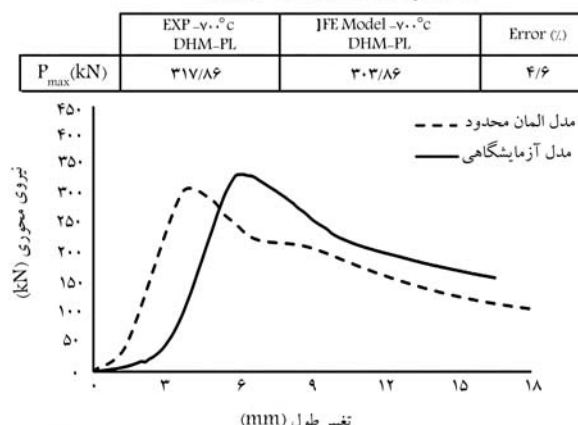
ج) نمونه DVB در دمای ۷۰۰ درجه؛



د) نمونه DVB-CyTyl در دمای ۷۰۰ درجه.

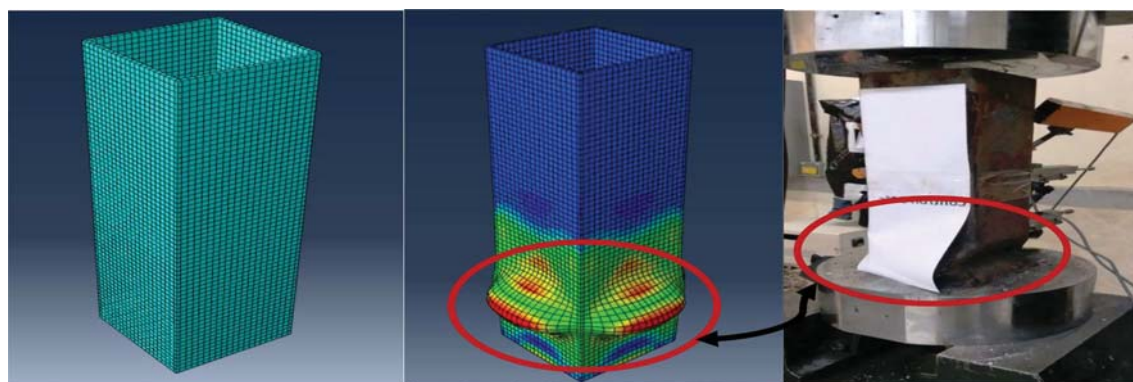


الف) نمونه DHM در دمای ۷۰۰ درجه؛



ب) نمونه DHM-PL در دمای ۷۰۰ درجه؛

شکل ۲۰. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابجایی در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۲۱. مدل‌سازی نمونه‌ی کنترلی در نرم‌افزار آباکوس، حالت تغییر شکل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی.

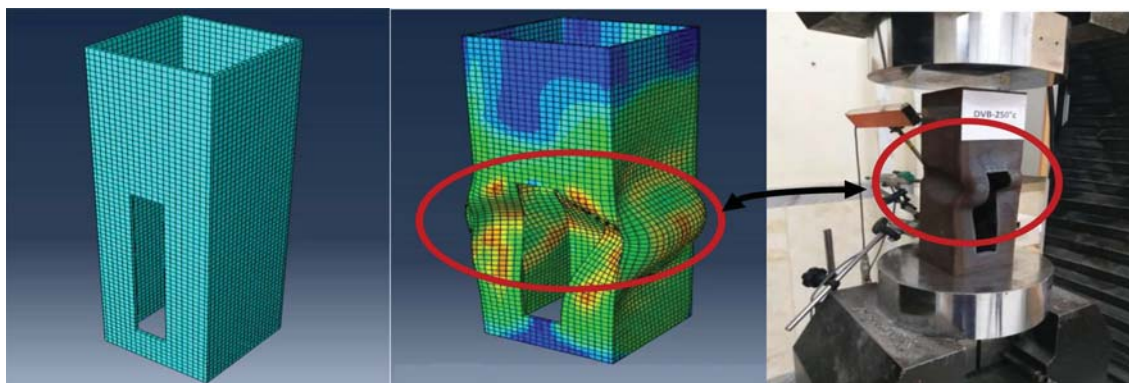
ج) جهت جبران ضعف باربری و کاهش مقاومت ستون‌های فولادی در اثر نقص و همزمان حرارت، یکی از بهترین روش‌ها بدون افزایش محسوس وزن، استفاده از الیاف CFRP به صورت دورپیچ است که تعداد لایه‌های بیشتر به علت محصورکنندگی نقش بیشتری دارند.

د) افزایش مقاومت نمونه‌ها بعد از تقویت دورپیچ CFRP از نتایج بدست آمده در این تحقیق بود که این تأثیر در نمونه‌های با دمای معمولی محیط و دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است که برای نمونه‌ها با نقص افقی پایین ستون

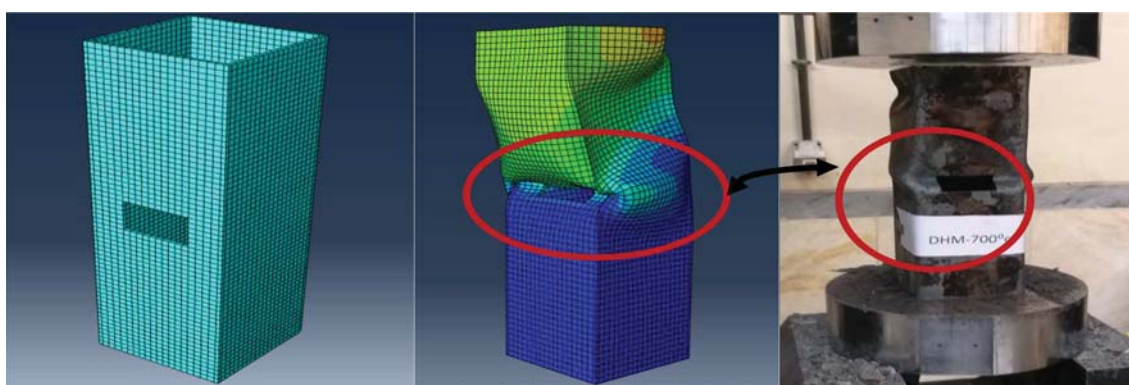
سانتی‌گراد مربوط به نمونه با نقص قائم پایین ستون (کاهش ۳۲ درصدی) است.

ب) حرارت و افزایش دما سبب کاهش مقاومت ستون‌های فولادی می‌شود، به طوری که با افزایش دما تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، که تقریباً دمای شکست فولاد است، کاهش ۱۵ درصدی ظرفیت باربری در نمونه‌ی کنترلی یا بدون نقص مشاهده می‌شود و بیشینه‌ی کاهش مقاومت مذکور در نمونه با نقص قائم ستون رخ داده است (۳۵٪ کاهش مقاومت).





شکل ۲۲. مدل سازی نمونه با نقص قائم پایین نمونه در نرم افزار آباکوس، حالت تغییر شکل نرم افزاری و آزمایشگاهی.



شکل ۲۳. مدل سازی نمونه با نقص افقی وسط نمونه در نرم افزار آباکوس، حالت تغییر شکل نرم افزاری و آزمایشگاهی.

و) تأثیر بیشتر تقویت CFRP نسبت به ورق در بهبود عملکرد ستون های فولادی از دیگر نتایج به دست آمده در مقایسه بین دو حالت تقویت بوده است، که در نمونه های ۷۰۰ درجه سانتی گراد محسوس تر بوده است.

ز) به منظور گسترش نتایج در مطالعات آینده، مدل المان محدودی نمونه ی دارای سوراخ و نمونه ی مقاوم سازی شده، مدل سازی و راستی آزمایی شده است. نتایج مدل المان محدودی، دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته است.

به میزان بیشینه بوده است.

در کل نمونه ها، نمونه ی ۷۰۰ درجه مذکور با ۴۵٪ افزایش باربری نسبت به نمونه ی مشابه تقویت نشده ی آن، بیشترین تأثیر را از استفاده ی دورپیچ CFRP داشته است.

ه) استفاده از دولاپه ی CFRP به علت محصورکنندگی ستون فولادی در مدهای خرابی و کمایش تأثیر داشته و کمایش پایداری را به میزان کمیته رسانده است.

## پانویس ها

11. He & Chen
12. Abaqus

## منابع (References)

1. Yang
2. Wang
3. Correia
4. Bystr
5. Fan
6. Xing
7. Tao & Han
8. Jiangtao
9. Imran
10. Chen

1. Saedi Daryan, A. and Ketabdari, H. "Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **31**(10), p. 04019221 (2019).
2. Ketabdari, H., Saedi Daryan, A. and Hassani, N. "Pre-

- dicting post-fire mechanical properties of grade 8.8 and 10.9 steel bolt", *Journal of Constructional Steel Research*, **162**, p. 105735 (2019).
3. He, K. and Chen, Y. "Experimental investigation of fire-exposed steel tubular stub columns wrapped with CFRP sheets", *Journal of Composite Structures*, **253**, pp. 112807-112823 (2020).
4. Agarwal, J. and Haberland, M. "Robustness of structures: Lessons from failures", *Journal of Structural Engineering International*, **1**, pp. 105-111 (2012).
5. Yang, K.C., Chen, S.J., Lin, C.C. and et al. "Experimental study on local buckling of fire-resisting steel columns under fire load", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**, pp. 553-565 (2005).
6. Wang, W.Y. and Li, G.Q. "Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(6), pp. 1392-1400 (2009).
7. Correia, A.M., Pires, T.A.C. and Rodrigues, J.P.C. "Behaviour of steel columns subjected to fire", *In 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, pp. 879-890 (2010).
8. Bystrom, A., Sjostrom, J., Wickstrom, U. and et al. "Large scale test on a steel column exposed to localized fire", *Journal of Structural Fire Engineering*, **5**(2), pp. 147-160 (2014).
9. Fan, S., Ding, X., Sun, W. and et al. "Experimental investigation on fire resistance of stainless-steel columns with square hollow section", *Thin-Walled Structures Journal*, **98**, pp. 196-211 (2016).
10. Fan, S., Liu, M., Sun, W. and et al. "Experimental investigation of eccentrically compressed stainless steel columns with constraints in fire", *Fire Safety Journal*, **99**, pp. 49-62 (2018).
11. Xing, Z., Zhao, O., Kucukler, M. and et al. "Testing of stainless steel I-section columns in fire", *Journal of Engineering Structures*, **227**, p. 111320 (2021).
12. Karimian, M., Narmashiri, K., Shahraki, M. and et al. "Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP", *Journal of Constructional Steel Research*, **138**, pp. 555-564 (2017).
13. Shahraki, M., Sohrabi, M.R., Azizyan, G.R. and et al. "Experimental and numerical investigation of strengthened deficient steel SHS columns under axial compressive loads", *Structural Engineering and Mechanics Journal*, **67**(2), pp. 207-217 (2018).
14. Shabani Ammari, A. and Narmashiri, K. "Effects of vertical deficiency location on the structural behavior of steel SHS short columns", *Amirkabir (AUT) Journal of Civil Engineering*, **4**(4), pp. 1-14 (2020).
15. Yousefi, O., Narmashiri, K., Hedayat, A.A. and et al. A. "Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP", *Journal of Constructional Steel Research*, **178**, pp. 106496 (2021).
16. Tao, Z. and Han, L.H. "Behaviour of fire-exposed concrete-filled steel tubular beam columns repaired with CFRP wraps", *Thin-Walled Structures Journal*, **45**(1), pp. 63-76 (2007).
17. Jiangtao, Y., Yichao, W., Kexu, H. and et al. "The Performance of near surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire", *Fire Safety Journal*, **90**, pp. 86-94 (2017).
18. Imran, M., Mahendran, M. and Keerthan, P. "Heat transfer modelling of CFRP strengthened and insulated steel tubular columns", *Journal Construction and Building Materials*, **184**, pp. 278-294 (2018).
19. Chen, Y., Wang, K., He, K. and et al. "Compressive behavior of CFRP-confined post heated square CFST stub columns", *Thin-Walled Structures Journal*, **127**, pp. 434-445 (2018).
20. ASTM A370, "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products", ASTM International, West Conshohocken, PA (2020) ([www.astm.org](http://www.astm.org)).
21. Sikadur®-330, Product Data Sheet, Edition 21/02/2012.
22. Hassani, M., Safi, M., Rasti Ardakani, R. and et al. "Post-fire performance of steel reinforced concrete columns with different steel sections", *Advances in Structural Engineering*, **24**(16), pp. 3724-3738 (2021).

# تحلیل قابلیت اعتماد قطعات چوبی مقاوم سازی شده با FRP

سهیل پالیزی (دانشجوی دکتری)

وهب توفیق\* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دربی ۲ - ۳۸، شماره ۳/۱، ص. ۸۹-۱۰۰ (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، تحلیل قابلیت اعتماد سیستم چوب (FRP) با جمع‌آوری مدل‌های ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. همچنین، با استفاده از داده‌های آزمایشی موجود، یک مدل المان محدود علاوه بر مدل‌های قبلی نیز راستی‌آزمایی و ارائه شده است. با در نظر گرفتن سه تراز بارگذاری و تعریف عدم قطعیت در برخی متغیرهای مؤثر در مسئله، تعداد ۱۹۲ تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه‌ی اول در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ضریب مدل انجام شده است. خروجی نشان داد در حالتی که عدم قطعیت در طراحی قطعه در نظر گرفته شود، شاخص قابلیت اعتماد به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، به‌طوری که میانگین شاخص مذکور برای مدل‌های موجود در پژوهش حاضر از ۴/۸۸ به ۲/۷۱ رسیده است. همچنین، مطابق انتظار در حالتی که عدم قطعیت در مسئله در نظر گرفته شده است، تأثیر نسبت بار زنده به بار مرده در تعیین شاخص قابلیت اعتماد تا حدودی از میان رفته است.

soheil.palizi@gmail.com  
toufigh@sharif.edu

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد، مقاوم‌سازی، چوب، FRP، مدل المان محدود.

## ۱. مقدمه

چوب، چسب و FRP مختلف، مقادیر مقاومت اتصال و نیروی شکست سیستم به همراه مود شکست سیستم را در هر آزمایش مشخص کردند. رفتاری<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۷]</sup> به بررسی کیفیت چسب سیستم چوب FRP پرداختند و نشان دادند که نوع چسب و FRP هر دو از پارامترهای تأثیرگذار در یکپارچگی اتصال هستند. ریچر و اشتایگر<sup>۲</sup> (۲۰۰۵)<sup>[۸]</sup> پایداری حرارتی سیستم چوب - FRP را با استفاده از چسب‌بندهای اپوکسی مطالعه کردند.

در مطالعه‌ی مشابه، کلیگر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۹]</sup> تیرهای چوبی را با ورق‌های FRP تقویت کردند و رفتار فشاری و کششی چوب را با اجرای سیستم پیش‌تشدیدگی ارتقاء دادند. از جمله مصالح دیگری که برای ارتقاء ویژگی‌های چوب استفاده شده است، می‌توان به نانورس، شیشه و فیبرهای کربن اشاره کرد.<sup>[۱۰]</sup> چوب و FRP هر دو ساختاری فیبرگونه دارند که در یک ماتریس چسبیده قرار می‌گیرند. در صفحات FRP، کاهش مقاومتی که به‌طور طبیعی و به مرور زمان در چوب رخ می‌دهد، وجود ندارد. اساساً دو نوع آزمون برای بررسی چسب چوب - FRP استفاده می‌شود. پژوهشگران مختلف، آزمون‌های اصلاح شده‌ی ISO<sup>[۱۱]</sup> ۶۲۳۸، ASTM D۹۰۵-۰۳<sup>[۱۲]</sup> ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۳-۱۵]</sup> مقاومت برشی اتصال در طول صفحه‌ی متصل شده از آزمون‌های مذکور به‌دست آمده و به عنوان تنش میانگین معرفی شده‌اند. به دلیل اینکه سطح FRP بین دو قطعه‌ی چوب به حالت ساندویچی به دست آمده است، کرنش صفحات FRP بررسی نشده‌اند. با توجه به این موضوع، سایر پژوهشگران از روش برش تکی و برش دابل اتصال چوب به FRP استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۶-۱۸]</sup> پیکربندی<sup>۴</sup> مذکور، به‌خصوص برای آزمایش، نظارت

قطعات FRP<sup>۱</sup> از فیبرهای با مقاومت‌های بالا تشکیل شده‌اند که در یک ماتریس پلیمری جای گرفته‌اند.<sup>[۱]</sup> استفاده از FRP در سال‌های اخیر، رشد چشم‌گیری داشته است. این اقبال عمومی نیز به دلیل سبکی، سهولت استفاده و ویژگی‌های منحصر به فرد آن، مانند مقاومت کششی بالا و مقاومت در برابر خوردگی و خستگی است. ویژگی‌های اخیر و سازگاری استفاده از ماده‌ی FRP با مصالح مختلف، مهندس‌ها را وادار به استفاده از آن در انواع مختلف سازه‌ها، مانند سازه‌های بتنی، بتایی و چوبی کرده است. سه نوع FRP، شامل: کربن، شیشه و آرامید بیشترین کاربرد را در این حوزه داشته‌اند. یکی از اهداف اصلی استفاده از FRP برای ارتقاء مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌های مختلفی، چون: پل‌ها، سدها، خطوط لوله و اعضاء سازه‌ی است. انواع مختلفی از سیستم‌های مقاوم‌سازی با FRP در ادبیات فنی موجود است که عمدتاً برای سازه‌های بتایی و بتنی هستند.<sup>[۵-۲]</sup>

با وجود اینکه چوب به عنوان یک مصالح قابل بازیافت شناخته می‌شود و به‌طور گسترده از زمان‌های قدیم استفاده شده است، معایبی در استفاده از مصالح قابل بازیافت وجود دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به زوال بیولوژیکی در طول زمان و رفتار ترد در خمش اشاره کرد. کامپوزیت‌های چوب - FRP این نقص‌ها را می‌توانند جبران کنند. ون<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۶]</sup> یک مطالعه‌ی آزمایشی ترتیب دادند و در آن سطح تماس چسب چوب FRP را مطالعه و با استفاده از انواع

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2022.60571.3109

بر سطح FRP را تسهیل می کند که می تواند منجر به توسعه ی مدل های سطحی شود.

پیکربندی آزمون های برشی تکی و دوپل در صنف پژوهشگران این حوزه به عنوان معرف مود دو شکست از سطح اتصال شناخته می شود. آزمون های اشاره شده منجر به استخراج نتایج آزمایشی بسیار مفیدی، مانند: مقاومت اتصال، توزیع کرنش، توزیع تنش برشی و پاسخ تنش لغزشی اتصال می شود. مورد آخر برای شبیه سازی های عددی سطح اتصال و شکست اتصال بسیار مهم است.<sup>[۱۹]</sup> آزمایش بر روی مقاومت و رفتار اتصال FRP به بتن بسیار زیاد است و پیکربندی آزمون برش تکی بسیار محبوب است.<sup>[۲۰]</sup> پژوهشگران مطالعاتی هم بر روی مقاومت و رفتار اتصال FRP و فولاد با استفاده از آزمون های برشی تکی و دوپل انجام داده اند.<sup>[۲۱، ۲۲]</sup> در هر دو اتصال FRP به مصالح مختلف، رفتار اساسی اتصال (حتی با وجود مطالعات کمتر فولاد نسبت به بتن) استخراج شده است. در این راستا، شکست ناشی از جدا شدن چسب در بتن، غالباً در لایه ی بتنی رخ می دهد، زیرا چسب معمولاً قوی تر از بتن است. در اتصال فولاد، گسیختگی غالباً در چسب، سطح فولاد و چسب و سطح FRP و چسب رخ می دهد.<sup>[۲۳]</sup> آزمایش بر روی اتصال FRP به چوب با استفاده از آزمون های برشی تکی و دوپل بسیار محدود است و در نتیجه مدل های تنش - لغزش در حال حاضر نیز در حال توسعه هستند.

تعمیرات با استفاده از FRP با استفاده از سیستم های مختلفی از اتصال صورت می گیرد. در روش چیدمان مرطوب<sup>۷</sup> که در آن صفحات فیبری، خشک یا اصطلاحاً پارچه هایی آغشته به رزین می شوند، به صورت اجرا در محل هستند. روش اخیر توسط ACI<sup>۸</sup> بیان شده است.<sup>[۲۴]</sup> رزین و پرایمر آن، صفحات FRP را به سطح مصالح مورد نظر می چسباند و سیستم در محل عمل آوری می شود. عمده ی مطالعات انجام شده مربوط به اتصال صفحات FRP به قطعات بتنی است. در همین راستا، کایزر و کارباری<sup>۹</sup> (۲۰۰۳).<sup>[۲۵]</sup> برای نخستین بار تأثیر عدم قطعیت ها را در کامپوزیت های ساخته شده به روش چیدمان مرطوب مطالعه کردند. بدین ترتیب، نقص های بالقوه در سیستم، شامل: پارگی در رشته های فیبری، استفاده از مخلوط رزین نامناسب و دارای ناخالصی، خطاهای حین ساخت در محل و نفوذ رطوبت یا مواد شیمیایی را شناسایی کردند. با وجود عدم قطعیت های زیاد موجود در روش اخیر که باعث می شود بازه ی تغییرات نتایج گسترده باشد، روش چیدمان مرطوب غالباً در تعمیرات استفاده می شود، زیرا انعطاف پذیری بیشتری برای استفاده در محل را فراهم می کند و به لحاظ هزینه های اجرایی، کمترین مقدار را در مقایسه با سایر روش ها دارد.<sup>[۲۶]</sup> در مهندسی عمران، تحلیل قابلیت اعتماد در موارد متعددی استفاده شده است، که یکی از آن ها در کامپوزیت های FRP است. وایگاس و آنادرو<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۱).<sup>[۲۷]</sup> به مطالعه ی تأثیر سازه های موجود و عدم قطعیت های FRP بر تعمیرات سازه پرداختند و دریافتند که مهم ترین عدم قطعیت در مرمت سازه مربوط به مساحت آرماتورهای فولادی و همچنین مقاومت سازه ی موجود است. ژانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸).<sup>[۲۸]</sup> با در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در مدل، به بررسی تحلیل احتمالاتی اتصال های بتنی و FRP پرداختند و با استفاده از ۸ مدل موجود در ادبیات فنی، در نهایت پیشنهادهایی مفید در رابطه با مقاوم سازی سازه های بتنی ارائه کردند. عمده ی مطالعات این حوزه هم در رابطه با قطعات بتنی است. لکن در جست و جوی انجام شده توسط نویسندگان، مطالعه ی احتمالاتی در استفاده از سیستم چوب FRP مشاهده نشده است. بنابراین نیاز به شروع مطالعات در این راستا احساس شده است.

در پژوهش حاضر، با توجه به خلأ موجود در زمینه ی طراحی آیین نامه یی قطعات چوبی مقاوم سازی شده با FRP، تمامی مدل های تجربی و تحلیلی موجود در

ادبیات فنی در حوزه ی اخیر جمع آوری شده است. همچنین داده های موجود مربوط به آزمایش کششی سیستم چوب - FRP برای ساخت و راستی آزمایی یک مدل المان محدود استفاده شده است. پنج مدل از مدل های موجود در ادبیات فنی به همراه یک مدل المان محدود با تحلیل قابلیت اعتماد با توجه به سه نسبت مختلف از بارهای زنده به مرده، آنالیز و خروجی حاصل از تحلیل در قالب جدول ها و نمودارهایی ارائه شده است.

## ۲. مدل های موجود در سیستم چوب - FRP

مطابق آنچه که در بخش ۱ بیان شد، مزایایی که روش اتصال چوب - FRP فراهم می کند، شامل: ارتقاء ویژگی های مکانیکی<sup>[۲۹]</sup>، تعیین مود شکست<sup>[۳۰]</sup>، انتخاب ماده ی چسبنده<sup>[۳۱]</sup> و انتخاب نوع FRP توسط مطالعاتی بررسی شده است. ویژگی های اخیر تا حدی مقبول بوده است، حتی در مطالعه یی در سال ۲۰۱۶<sup>[۳۲]</sup>، نشان داده شد که سطح اتصال چوب FRP مقاومت بیشتری نسبت به اتصال سایر مصالحی مثل بتن و فولاد به FRP دارد. بنابراین کارایی استفاده از سیستم چوب FRP برای مقاوم سازی برکسی پوشیده نیست. با وجود این، یکی از رایج ترین شکست های موجود در سیستم چوب FRP، شکست ناشی از جداشدگی چسب کامپوزیت FRP است که در آن از تمام ظرفیت FRP استفاده نشده و شکل پذیری مدنظر سیستم سازه یی صورت نگرفته است. بنابراین نتیجه می شود که عملکرد چسب، مستقیماً در عملکرد کامپوزیت تأثیرگذار است. در همین راستا، مدل های زیادی براساس روابط تجربی و یا تئوری های شکست ارائه شده است. با وجود این، همچنان کمبود مدل های کارا در سیستم چوب - FRP نسبت به سیستم بتن FRP احساس می شود. در جدول ۱، مدل های ارائه شده برای سیستم چوب FRP ارائه شده است. در روابط ارائه شده در جدول ۱،  $P_u$  بیشینه ی بار اعمال شده است.  $t_f$ ،  $b_f$  و  $E_f$  به ترتیب: عرض، ضخامت و مدول کشسانی صفحه ی FRP هستند.  $b_w$ ،  $t_w$  و  $E_w$  به ترتیب عرض، ضخامت و مدول کشسانی چوب هستند.  $f_{ts}$  مقاومت کششی بلوک چوبی،  $G_a$  و  $t_a$  مدول برشی و ضخامت چسب و  $L_e$  و  $L_b$  هم به ترتیب طول اتصال و طول مؤثر اتصال هستند.  $\tau$  و  $\tau(max)$  بیانگر تنش اتصال و بیشینه ی تنش برشی اتصال هستند.  $A$ ،  $B$ ،  $a$  و  $C_1$  تا  $C_8$ ، ثوابت هستند.  $c_1$  و  $c_2$  به صورت تجربی برابر با  $0/7$  و  $1/0$  در نظر گرفته می شوند. ضریب  $k_c$  مشخص کننده ی اثر آماده سازی سطحی است و در بازه ی بین  $0/76$  تا  $1$  قرار دارد. ضریب  $k_u$  درجه مقاوم سازی را مشخص می کند که می تواند برابر با  $1$  فرض شود.  $\gamma_w$  و  $\gamma_a$  جهت چوب و نوع چسب را مشخص می کنند.  $C_N$  و  $C_w$  و  $C_f$  به ترتیب: سختی کشسان، ضریب سختی محوری چوب و ضریب سختی محوری FRP را مشخص می کنند.  $E_{ad}$  و  $S_{ad}$  بیانگر مدول کشسانی و تنش تسلیم چسب هستند. همچنین  $E_f$  و  $S_f$  پارامترهای مدول کشسانی و تنش تسلیم برای FRP را نشان می دهند. ضرایب  $C_1$  تا  $C_5$  در رابطه ی ۵ ضرایب ثابتی هستند که در نوشتار مرجع، مقدار آن ها موجود است.

## ۳. مدل المان محدود سیستم چوب - FRP

به منظور مدل سازی عددی از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در این راستا، از بخشی از داده های آزمایشی موجود در ادبیات فنی برای راستی آزمایی مدل استفاده شده است.<sup>[۱۵]</sup> به طور کلی، یک تحلیل المان محدود، شامل سه مرحله ی:



جدول ۱. مدل‌های موجود در تعیین مقاومت اتصال سیستم چوب - FRP.

مدل	مدل	
	نام	شماره
$P_u = \frac{1}{3} b_f f_{ts} \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ts}}}$	بندتی و کولا (۲۰۱۰) [۲۳]	۱
$P_u = P_{max} \frac{L_b}{L_e} \left( 2 - \frac{L_b}{L_e} \right)$ $P_{max} = c_1 k_b k_e K_\mu b_f \sqrt{E_f t_f \tau_{max}}$ $L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 \tau_{max}}}$ $k_b = 1/0.6 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{f}{f_c}}} \leq k_b \leq 1/2.9$	یواندس و باربوسا (۲۰۱۲) [۲۴]	۲
$P_u = 0.12 \gamma_w \gamma_a b_f L_e^{0.18} \sqrt{E_f t_f}$ $\tau(x) = \frac{\partial J}{\partial \delta} = A^* B C_N e^{-Bs} (1 - e^{-Bs})$ $J = \frac{1}{3} C_N P^3$ $C_N = \left( \frac{1}{b_f} \right) \left( \frac{1}{C_w} + \frac{1}{C_f} + \frac{(t_w + t_f + t_a)^3}{3 D_w} \right)$ $P = A (1 - e^{-Bs})$ $P_u = \gamma_w \sqrt{L_e f_{ts} E_f t_f \left( \frac{b_f}{b_w} \right)^3}$	ون و همکاران (۲۰۱۴) [۵]	۳
$\tau(x) = \frac{P}{b_f L_e} \left( 1 - \frac{x}{L_e} \right) x$ $\tau(max) = \frac{P_u}{3 b_f L_e}$ $L_e = \alpha \beta (f_{ts})^{0.125} \ln(E_f t_f)$ $\beta = \frac{1.25 + \frac{b_f}{b_w}}{2 \left( 1.25 - \frac{b_f}{b_w} \right)}$	واحیدان (۲۰۱۷) [۲۵]	۴
$\frac{P_u}{E_t A_t} = \left\{ \left( \left( \frac{E_{ad}}{E_f} \right)^6 (C^4 \cdot C^0 \cdot C^1) \frac{S_{ad}}{S_f} \left( \left( \frac{S_{ad}}{S_f} - C^2 \right)^2 - \sqrt{C^3 \frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \right)^2 \right. \right.$ $\left. + \left( \left( \left( C^7 + \frac{A_{ad}}{A_f} + \frac{E_{ad}}{E_f} \frac{A_{ad}}{A_f} \right) \sqrt{\frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \left( C^6 + \left( \frac{S_{ad}}{S_f} \right)^2 \right)^2 \right. \right. \left. \left. + \left( \left( \frac{S_{ad}}{S_f} - C^8 \right) C^5 \cdot C^8 \right) \right) \right\}$	پالیزی و توفیق (۲۰۲۲) [۲۶]	۵

جدول ۲. مشخصات مصالح چوب در مدل راستی آزمایی.

مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت فشاری - MPa (انحراف معیار)
چوب نرم *	۶/۳۴ (۱/۵۵)	۳۲/۸ (۲/۱)
چوب سخت **	۱۰/۰۱ (۱/۶۷)	۴۹/۳ (۶/۶)
	*Softwood	**Hardwood

هندسه‌ی مدل، شامل: سه بخش: قطعه‌ی چوبی، چسب و FRP است، که در نرم‌افزار آباکوس مطابق ابعاد ذکرشده تعریف شده است. مقطع همگن به مصالح هر سه جزء اختصاص یافته و از ویژگی کشسان - خمیری به صورت ساده شده برای آن استفاده شده است. تعریف اخیر، مزیتی را فراهم می‌کند که در آن با رسیدن هر کدام از مصالح به حد خمیری، جاری شدنشان اتفاق بیفتند و نیروی شرایط مرزی مربوط به FRP دیگر افزایش نیابد و نیروی بیشتری را تحمل نکند.

در پیکربندی مدل، FRP بر روی قطعه چوبی قرار گرفته و مرز بین چوب و FRP نیز با چسب پوشانده شده است. برای مش‌بندی قطعات هم از المان‌های مکعبی با انتگرال‌گیری کاهش یافته برای سبک‌تر شدن حجم محاسبات استفاده شده

پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است، که در ادامه، با جزئیات بیشتری ارائه شده‌اند.

در مطالعه‌ی مذکور، از آزمایش pull-out استفاده شده است که در آن یک قطعه‌ی FRP از طریق چسب به چوب متصل شده است. سپس تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرد و نیروی حد گسیختگی آن اندازه گرفته می‌شود. با استفاده از دو نوع چوب، سه نوع FRP و شش نوع چسب، تعداد ۸۴ آزمایش انجام و خروجی هر کدام از آزمایش‌ها ارائه شده‌اند. در جدول‌های ۲ الی ۴، مشخصات مصالح چوب، FRP و چسب ارائه شده است.

پیکربندی آزمایش به همراه ابعاد قطعات چوب و FRP در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات مصالح FRP در مدل راستی آزمایی.

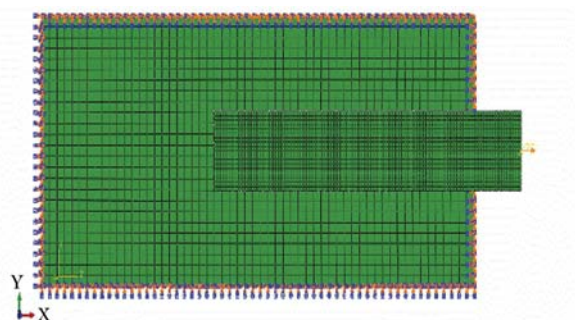
مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت کششی - MPa (انحراف معیار)	کرنش نهایی (انحراف معیار)
صفحه‌ی نوع ۱	۲۳۱ (۱۴)	۲۷۶۸ (۱۷۸)	۰/۰۰۹ ۰/۰۱۲
صفحه‌ی نوع ۲	۲۴۴ (۲۳)	۲۶۰۱ (۳۱۰)	۰/۰۰۰۶ ۰/۰۱۰۴
پروفایل‌های پالتروده شده *	۱۹۲ (۳)	۳۱۳۳ (۸۷)	۰/۰۰۰۵ ۰/۰۱۶۳

\* Pultruded

جدول ۴. مشخصات مصالح چسب در مدل راستی آزمایی.

مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیار)	مقاومت کششی - MPa (انحراف معیار)	کرنش نهایی (انحراف معیار)
۳۰	۸/۸۹ (۰/۱۴)	۲۶/۹ (۱/۲)	۰/۰۰۰۵ ۰/۰۰۳۶
۳۰۰	۳/۴۳ (۰/۰۳)	۴۸/۳ (۶/۲)	۰/۰۰۰۳ ۰/۰۱۷۳
۳۳۰	۴/۲۷ (۰/۱۱)	۲۸/۳ (۱/۵)	۰/۰۰۰۴ ۰/۰۰۶۷
۴۲۰	۱/۷۲ (۰/۰۳)	۲۱/۵ (۰/۵)	۰/۰۰۱۵ ۰/۰۱۸۴
۲۰۱۵	۱/۷۵ (۰/۱۵)	۱۶/۴ (۲/۱)	۰/۰۰۲۸ ۰/۰۱۸۵
تایفو*	۱/۱۸ (۰/۰۷)	۱۵/۲ (۱/۳)	۰/۰۰۸۸ ۰/۰۳۷۲

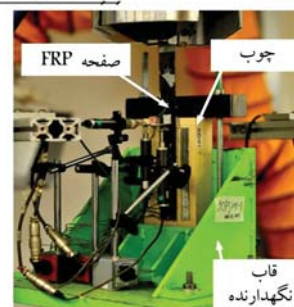
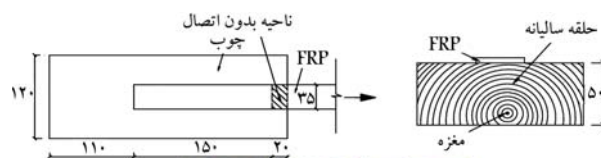
Tyfo\*



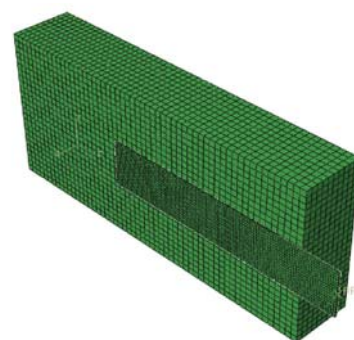
شکل ۳. شرایط مرزی مدل المان محدود.

توجه به پیکربندی آزمایش، صفحاتی که با هم تماس دارند، به صورت صفحه به صفحه متصل و قید TIE برای آن‌ها استفاده شده است. همچنین دور تا دور قطعه‌ی چوبی به صورت گیردار در نظر گرفته شده و در ابتدای قطعه‌ی FRP، یک نقطه به عنوان نقطه‌ی مرجع انتخاب و شرایط مرزی به آن اعمال شده است. این شرایط مرزی به صورت بسته شدن نقطه‌ی مرجع در همه‌ی درجه‌های آزادی به جز جهت کشش دستگاه اعمال نیرو به FRP بوده است. شرایط مرزی مدل نیز در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

پس از مدل‌سازی انجام شده، خروجی‌ها به دست آمدند. توجه شود تمامی داده‌های مربوط به آزمایش بررسی شده و میزان خطا و یا انحراف خروجی‌های مدل المان محدود از مقدار آزمایشی به دست آمده است. خروجی مدل المان محدود برای تمامی آزمایش‌های انجام شده مطابق شکل ۴ به دست آمده است که مطابق آن، ضریب تصمیم‌گیری برابر ۰/۹۳ به دست آمده است، که نشان می‌دهد داده‌های حاصل از تحلیل المان محدود قادرند با دقت بسیار خوبی مقادیر آزمایشی را پیش‌بینی کنند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، داده‌های این نمودار حول خط نیمساز ۴۵ درجه قرار دارد و مدل المان محدود غالباً به صورت over-predict است. بنابراین، مدل المان محدود مذکور می‌تواند مرجع مناسبی برای تحلیل در روش قابلیت اعتماد در نظر گرفته شود.



شکل ۱. پیکربندی آزمایش و ابعاد قطعات.



شکل ۲. مش‌بندی مدل المان محدود.

است که با توجه به اینکه توزیع تنش مدنظر نیست، راهکار مناسبی خواهد بود. ابعاد مش با آزمون و خطا برای چوب، ۰/۰۵ متر و برای FRP و چسب ۰/۰۲ متر انتخاب شده‌اند که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. یک مرحله‌ی تحلیل استاتیکی غیرخطی برای مجموعه انجام شده است که با

نتایج آزمایشی  $P_m^u$  است (رابطه ۳):

$$R = P_u^m \quad (3)$$

همچنین، از منظر طراحی، بار اسمی و مقاومت با هم مرتبطند و بنابراین بارهای اسمی مرده و زنده برحسب مقاومت به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شوند:

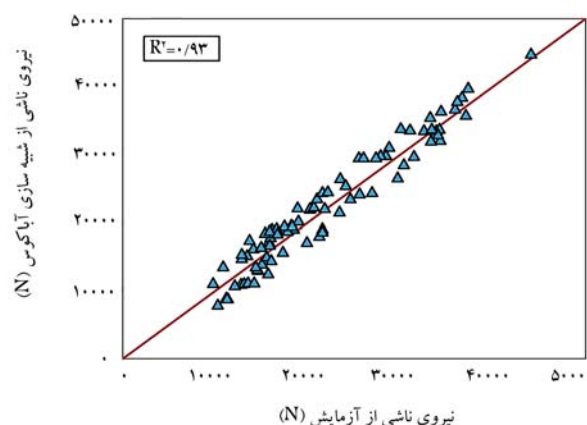
$$S_d = \psi \times P_u^c \quad (4)$$

که در آن،  $S_d$  بار طراحی و  $\psi$  ضریب کاهش برای یافتن یک تراز مناسب از شاخص قابلیت اعتماد است. در صورت نبودن ضریب مدل، ضریب کاهش می‌تواند در بازه‌ی بین ۰/۲ تا ۰/۸ باشد.<sup>[۳۹]</sup> در پژوهش حاضر، به منظور دستیابی به ضریب قابلیت اعتماد،  $\beta = 3$  و براساس ضریب محاسبه شده در هر شش مدل، ضریب کاهش با آزمون و خطا حدوداً برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقاوم‌سازی چوب - FRP با توجه به سناریوهای مختلف بارگذاری می‌تواند انجام شود، سه سطح بارگذاری براساس نسبت بار زنده به بار مرده ( $\eta$ ) برابر با ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ انتخاب شده است.

با مراجعه به نوشتارهای موجود در ادبیات فنی مشاهده شد که توزیع‌های نرمال ۱، لاگنرمال ۱۳، و وایبول ۱۴ برای مدل کشسانی چسب و FRP و همچنین برای تنش تسلیم آن‌ها بیشترین کاربرد را داشته‌اند. برای مسئله‌ی پیش رو از توزیع لاگنرمال برای آن‌ها که بیشتر از بقیه بوده و نیز با توجه به کوچک بودن انحراف معیار متغیرها استفاده شده‌اند. در مجموع ۶ پارامتر شامل: مدل کشسانی، ضخامت، طول و عرض FRP به همراه عرض چوب و مقاومت فشاری چوب به عنوان فضای طراحی در نظر گرفته شده است، که فضای نمونه‌ی به اندازه‌ی ۶۴ (۲<sup>۶</sup>) ایجاد می‌شود. با توجه به وجود سه تراز بارگذاری، تعداد حالت‌های انجام تحلیل قابلیت اعتماد ۱۹۲ (۳ × ۶۴) به دست می‌آید. برای هر حالت، از روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه‌ی اول (FORM) استفاده شده است، تا شاخص قابلیت اعتماد بتا با استفاده از روش هاسوفر - لیند<sup>[۴۰]</sup>، به جهت کاهش هزینه‌ی محاسباتی به دست آید. شاخص قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت هندسی و با یافتن فاصله بین نقاط تعریف شده توسط مقادیر مورد انتظار متغیرها و نزدیک‌ترین نقطه بر ضابطه‌ی شکست تعریف کرد، که به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود:

$$\beta = \min \sqrt{(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu)} \quad (5)$$

که در آن،  $x$  بردار متغیرهای دارای عدم قطعیت در تابع حالت حدی است.  $\mu$  بردار میانگین و  $C$  ماتریس کواریانس برای متغیرهای دارای عدم قطعیت هستند. در مجموع، دو گروه از شاخص قابلیت اعتماد محاسبه شده است: اولی، مربوط به ۶ مدل (۵ مدل جدول ۱ و یک مدل المان محدود) بدون اعمال ضریب مدل است. دومی، نیز حالت با وجود ضریب مدل است. در حالتی که ضریب بار زنده به بار مرده ۱ در نظر گرفته شود، شاخص‌های قابلیت اعتماد محاسبه شده برای داده‌های پژوهش بر مبنای هر ۶ مدل معرفی شده، به صورت جدول‌های ۵ و ۶ به دست می‌آیند. زمانی که عدم قطعیت مدل در تحلیل در نظر گرفته نشود، قابلیت اعتماد محاسبه شده، بیشترین مقدار را در بین دو حالت مذکور دارد که میانگین بتا در این حالت برابر با ۴/۸۸ شده است. با وجود این، نتایج به دست آمده برای بتا برای هر ۶ مدل تفاوت فاحشی با یکدیگر دارند. بیشترین میانگین بتا مربوط به مدل شماره ۵ با میانگین بتا برابر با ۶/۵۲ است، که در ادبیات فنی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به دست آمده بود. همچنین مدل شماره ۶ که مدل المان محدود ساخته شده در پژوهش حاضر است، با میانگین شاخص قابلیت اعتماد برابر



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش با خروجی مدل المان محدود.

## ۴. عدم قطعیت مدل مقاومت اتصال

به دلیل اینکه تمامی روش‌های محاسباتی، شامل ساده‌سازی‌های مختلفی هستند، همواره عدم قطعیت در مدل وجود دارد. برای تعریف ضریب مدل، رابطه‌ی ۱ را همواره می‌توان تعریف کرد:<sup>[۳۷]</sup>

$$P_u^m = \varepsilon \times P_u^c \quad (1)$$

که در آن،  $P_u^m$  مقاومت اتصالی است که به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است.  $P_u^c$  مقاومت اتصال محاسبه شده توسط مدل‌های پیش‌بینی و  $\varepsilon$  ضریب مدل است که متناظر با هر مدل مشخص است. زمانی که ضریب مدل از ۱ بیشتر باشد، نشان می‌دهد که مقاومت محاسبه شده کوچک‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده است؛ و برعکس، هر چه میانگین ضریب مدل به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر خواهد بود. با وجود این، ضرایب بزرگ‌تر از ۱ نشان می‌دهند که مدل ارائه شده، محافظه‌کارانه و عدد کمتر از ۱، نشان‌دهنده‌ی غیرایمن بودن مدل است.

ضریب مدل برای تمامی داده‌های ارائه شده در بخش‌های قبل و برای هر ۵ مدل معرفی شده، محاسبه شده است. میانگین  $\varepsilon$  در بازه‌ی بین ۰/۵۸ (مدل پالیزی و توفیق)<sup>[۳۶]</sup> و ۲/۹۴ (مدل بندتی و کولا)<sup>[۳۳]</sup> به دست آمده است. براساس نتایج میانگین حاصل شده، مدل پالیزی و توفیق از مقاومت اندازه‌گیری شده بزرگ‌تر است، در حالی که پیش‌بینی مدل بندتی و کولا، بسیار کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین در مورد مدل المان محدود نیز پارامتر مذکور محاسبه شده و عدد ۰/۷۴ به دست آمده است، که نشانگر دقت قابل قبول مدل است.

## ۵. تحلیل قابلیت اعتماد

مشابه فرمول‌بندی ACI و همچنین سایر مطالعات مشابه در این حوزه،<sup>[۳۹،۳۸]</sup> تابع حالت حدی برای طراحی مقاومت اتصال چوب - FRP به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:

$$G = R - D - L \quad (2)$$

که در آن،  $G$  تابع حالت حدی،  $R$  ظرفیت،  $D$  و  $L$  تقاضای ناشی از بارهای مرده و زنده هستند. تابع مقاومت  $R$  در حالت عادی، ظرفیت اعضای سازه‌ی مانند ظرفیت خمشی یک تیر را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تابع مقاومت برابر با

جدول ۵. شاخص قابلیت اعتماد در ۶۴ حالت بدون در نظر گرفتن ضریب مدل.

شماره تحلیل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶
۱	۲,۱۱	۴,۱۹	۵,۹۰	۴,۳۲	۵,۷۶	۵,۶۴
۲	۳,۵۶	۳,۵۹	۵,۸۵	۴,۵۸	۵,۵۵	۵,۴۹
۳	۲,۳۲	۵,۰۶	۵,۸۳	۴,۴۴	۵,۶۲	۵,۷۶
۴	۲,۴۶	۳,۲۶	۵,۷۵	۴,۹۶	۵,۷۹	۵,۹۲
۵	۲,۹۵	۳,۱۱	۵,۱۱	۴,۷۶	۶,۲۶	۶,۱۱
۶	۳,۳۳	۳,۸۸	۵,۱۸	۴,۸۹	۶,۳۵	۶,۱۸
۷	۳,۷۰	۴,۷۸	۵,۲۲	۴,۵۵	۶,۴۶	۶,۲۱
۸	۲,۱۹	۴,۱۱	۵,۳۹	۴,۶۱	۶,۴۲	۶,۱۷
۹	۲,۸۱	۴,۰۶	۴,۴۴	۴,۷۷	۶,۷۸	۶,۱۵
۱۰	۲,۴۳	۳,۵۵	۴,۹۶	۴,۳۶	۶,۵۹	۶,۳۵
۱۱	۲,۳۹	۳,۱۸	۵,۰۲	۴,۳۹	۵,۹۶	۶,۳۲
۱۲	۱,۹۵	۳,۲۶	۴,۴۰	۴,۴۴	۵,۹۰	۶,۳۸
۱۳	۱,۸۶	۴,۰۵	۴,۳۱	۴,۲۹	۶,۰۶	۶,۴۱
۱۴	۱,۹۲	۴,۰۹	۵,۰۳	۵,۰۵	۶,۰۱	۶,۵۰
۱۵	۲,۶۳	۴,۱۱	۵,۲۳	۵,۱۱	۶,۰۹	۶,۴۶
۱۶	۲,۸۱	۳,۹۶	۵,۱۳	۵,۲۱	۷,۱۱	۶,۴۹
۱۷	۳,۳۵	۳,۶۲	۵,۱۷	۵,۲۵	۷,۱۸	۶,۵۶
۱۸	۳,۴۴	۳,۳۵	۵,۳۳	۵,۱۵	۷,۲۵	۶,۴۹
۱۹	۳,۰۲	۳,۴۵	۴,۵۱	۵,۱۸	۷,۳۴	۶,۷۶
۲۰	۲,۵۰	۳,۴۰	۴,۶۰	۴,۹۶	۷,۲۷	۶,۹۱
۲۱	۲,۱۱	۳,۶۳	۴,۷۳	۴,۹۲	۷,۵۰	۶,۸۵
۲۲	۲,۶۲	۴,۲۲	۴,۷۷	۴,۹۸	۷,۶۲	۶,۸۱
۲۳	۳,۱۸	۳,۵۵	۵,۸۰	۴,۸۸	۷,۶۶	۶,۹۷
۲۴	۱,۷۳	۳,۶۴	۵,۸۵	۴,۳۹	۷,۶۰	۷,۰۱
۲۵	۳,۱۳	۳,۷۸	۵,۹۱	۴,۷۵	۷,۵۸	۷,۳۲
۲۶	۴,۴۲	۳,۱۱	۵,۹۹	۴,۹۹	۷,۷۱	۸,۰۹
۲۷	۴,۵۳	۳,۲۶	۴,۸۴	۵,۱۰	۷,۹۵	۷,۹۶
۲۸	۴,۶۰	۲,۹۸	۴,۸۸	۵,۱۴	۷,۹۳	۷,۹۲
۲۹	۴,۲۱	۴,۱۶	۴,۹۵	۵,۰۲	۸,۰۵	۷,۶۲
۳۰	۲,۰۹	۴,۰۴	۴,۹۶	۵,۰۶	۸,۰۸	۸,۵۶
۳۱	۱,۹۶	۴,۳۲	۵,۳۹	۴,۵۵	۸,۱۱	۸,۵۲
۳۲	۱,۸۸	۴,۳۸	۵,۴۶	۴,۶۷	۸,۰۱	۷,۹۰
۳۳	۱,۹۱	۴,۴۵	۵,۵۵	۴,۷۸	۷,۵۴	۶,۱۳
۳۴	۳,۴۰	۴,۵۰	۵,۶۴	۴,۸۲	۷,۵۲	۶,۰۱

ادامہی جدول ۵.

۳۵	۱,۸۷	۴,۶۴	۵,۱۱	۴,۹۲	۷,۵۹	۵,۹۲
۳۶	۲,۸۰	۴,۶۸	۵,۱۶	۴,۳۶	۷,۵۶	۵,۶۹
۳۷	۲,۷۶	۴,۷۰	۵,۲۲	۴,۲۱	۷,۶۳	۵,۳۶
۳۸	۲,۷۷	۴,۲۲	۵,۰۰	۴,۲۵	۶,۳۲	۵,۳۴
۳۹	۲,۸۵	۴,۳۲	۵,۰۳	۴,۲۸	۶,۵۸	۵,۲۰
۴۰	۲,۸۸	۴,۷۸	۵,۱۱	۴,۳۳	۶,۴۶	۵,۲۹
۴۱	۲,۱۱	۴,۹۶	۵,۱۶	۴,۱۶	۶,۴۹	۵,۲۱
۴۲	۲,۱۹	۵,۱۵	۴,۴۴	۴,۴۶	۶,۵۹	۵,۱۸
۴۳	۲,۳۴	۵,۱۹	۴,۴۹	۴,۴۹	۶,۴۱	۵,۴۶
۴۴	۲,۳۹	۵,۱۷	۴,۵۵	۴,۲۸	۶,۱۱	۵,۳۹
۴۵	۲,۰۸	۵,۲۳	۴,۵۹	۴,۳۵	۵,۹۵	۵,۸۴
۴۶	۱,۲۸	۵,۱۴	۵,۴۱	۴,۷۴	۶,۰۶	۵,۵۲
۴۷	۲,۳۱	۴,۸۰	۵,۴۶	۴,۸۶	۵,۹۰	۵,۶۶
۴۸	۳,۴۵	۴,۷۶	۵,۵۲	۴,۸۹	۵,۷۸	۵,۱۱
۴۹	۳,۱۸	۴,۴۴	۵,۵۹	۴,۸۲	۵,۸۶	۵,۱۹
۵۰	۴,۰۴	۴,۳۹	۵,۷۹	۴,۹۴	۵,۳۲	۶,۲۳
۵۱	۲,۲۳	۴,۶۷	۵,۸۴	۴,۹۹	۵,۳۶	۶,۳۶
۵۲	۲,۴۴	۴,۷۵	۵,۸۹	۴,۵۹	۵,۳۹	۶,۶۰
۵۳	۲,۹۶	۴,۸۲	۵,۹۲	۴,۶۵	۵,۴۴	۶,۵۲
۵۴	۲,۳۳	۴,۶۴	۴,۵۰	۴,۷۱	۵,۲۶	۶,۴۶
۵۵	۲,۱۹	۴,۴۰	۴,۵۶	۴,۸۸	۵,۲۹	۵,۹۵
۵۶	۳,۱۸	۴,۱۶	۴,۶۱	۴,۳۱	۶,۱۱	۵,۹۱
۵۷	۳,۲۵	۳,۷۶	۴,۶۷	۴,۳۵	۶,۲۶	۵,۹۰
۵۸	۲,۶۱	۳,۵۷	۴,۷۳	۴,۳۶	۶,۳۱	۵,۸۵
۵۹	۲,۶۴	۳,۲۲	۴,۷۸	۴,۴۴	۶,۳۵	۵,۷۵
۶۰	۱,۳۶	۳,۵۶	۴,۸۲	۴,۴۱	۵,۲۵	۵,۷۳
۶۱	۱,۹۶	۳,۴۹	۴,۳۶	۴,۷۲	۵,۱۸	۵,۴۵
۶۲	۱,۸۵	۳,۳۲	۴,۴۲	۴,۶۲	۵,۱۵	۵,۴۹
۶۳	۲,۲۲	۳,۷۱	۴,۴۴	۴,۶۳	۵,۲۱	۵,۵۱
۶۴	۳,۱۶	۳,۱۹	۴,۵۵	۴,۶۹	۵,۲۵	۵,۱۹
میانگین	۲,۶۷	۴,۰۹	۵,۱۱	۴,۶۹	۶,۵۲	۶,۲۴
میانگین کل	۴,۸۸					

جدول ۶. شاخص قابلیت اعتماد در ۶۴ حالت با در نظر گرفتن ضریب مدل.

شماره تحلیل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶
۱	۱,۲۹	۲,۵۱	۳,۱۵	۲,۱۸	۳,۲۰	۳,۰۸
۲	۲,۱۶	۲,۱۱	۳,۱۱	۲,۲۵	۳,۱۰	۳,۰۰
۳	۱,۳۹	۳,۰۳	۳,۰۵	۲,۱۱	۳,۱۴	۳,۱۵
۴	۱,۴۸	۱,۹۵	۳,۰۵	۲,۲۱	۳,۱۹	۳,۲۳
۵	۱,۷۹	۱,۸۲	۲,۷۵	۲,۴۳	۳,۵۰	۳,۳۴
۶	۲,۰۴	۲,۳۲	۲,۸۰	۲,۴۹	۳,۵۵	۳,۳۸
۷	۲,۲۷	۲,۸۶	۲,۸۲	۲,۳۲	۳,۶۱	۳,۳۹
۸	۱,۳۴	۲,۴۱	۲,۸۸	۲,۳۵	۳,۵۰	۳,۴۳
۹	۱,۷۰	۲,۴۳	۲,۳۳	۲,۴۳	۳,۷۹	۳,۴۲
۱۰	۱,۴۹	۲,۱۴	۲,۶۱	۲,۱۱	۳,۶۸	۳,۵۳
۱۱	۱,۴۶	۱,۸۶	۲,۷۱	۲,۲۴	۳,۳۳	۳,۵۱
۱۲	۱,۲۰	۱,۹۵	۲,۳۳	۲,۲۷	۳,۱۸	۳,۵۴
۱۳	۱,۱۴	۲,۴۳	۲,۳۰	۲,۱۹	۳,۳۹	۳,۵۶
۱۴	۱,۱۸	۲,۴۱	۲,۸۲	۲,۵۰	۳,۳۶	۳,۶۱
۱۵	۱,۶۰	۲,۴۶	۲,۸۳	۲,۶۱	۳,۴۵	۳,۵۹
۱۶	۱,۷۲	۲,۳۷	۲,۷۷	۲,۶۶	۳,۹۳	۳,۶۵
۱۷	۲,۰۶	۲,۱۴	۲,۷۹	۲,۶۸	۳,۹۷	۳,۶۹
۱۸	۲,۰۸	۲,۰۱	۲,۸۰	۲,۵۷	۴,۰۱	۳,۶۵
۱۹	۱,۸۵	۲,۰۷	۲,۴۴	۲,۶۴	۴,۰۶	۳,۸۰
۲۰	۱,۵۱	۱,۹۷	۲,۴۹	۲,۵۳	۴,۰۲	۳,۸۸
۲۱	۱,۲۷	۲,۱۷	۲,۵۰	۲,۴۳	۴,۱۴	۳,۸۵
۲۲	۱,۶۱	۲,۴۱	۲,۵۸	۲,۵۴	۴,۲۱	۳,۸۳
۲۳	۱,۹۵	۲,۱۳	۳,۱۴	۲,۴۹	۴,۲۳	۳,۹۲
۲۴	۱,۰۶	۲,۱۸	۳,۰۴	۲,۲۴	۴,۲۰	۳,۸۹
۲۵	۱,۹۰	۲,۱۶	۳,۱۹	۲,۳۰	۴,۱۹	۴,۰۷
۲۶	۲,۷۱	۱,۸۶	۳,۲۴	۲,۵۵	۴,۲۶	۴,۴۹
۲۷	۲,۷۸	۱,۹۱	۲,۵۶	۲,۶۰	۴,۳۹	۴,۴۲
۲۸	۲,۸۲	۱,۶۶	۲,۶۴	۲,۶۲	۴,۳۸	۴,۴۰
۲۹	۲,۵۸	۲,۴۹	۲,۶۸	۲,۵۶	۴,۴۵	۴,۲۳
۳۰	۱,۲۸	۲,۴۲	۲,۶۸	۲,۵۸	۴,۴۶	۴,۷۶
۳۱	۱,۲۰	۲,۵۹	۲,۹۱	۲,۳۲	۴,۴۸	۴,۸۴
۳۲	۱,۱۵	۲,۶۲	۲,۸۶	۲,۳۸	۴,۴۳	۴,۴۹
۳۳	۱,۱۷	۲,۶۱	۳,۰۰	۲,۳۵	۴,۱۷	۳,۴۸
۳۴	۲,۰۴	۲,۶۹	۳,۰۵	۲,۴۶	۴,۱۵	۳,۴۱



ادامہی جدول ۶.

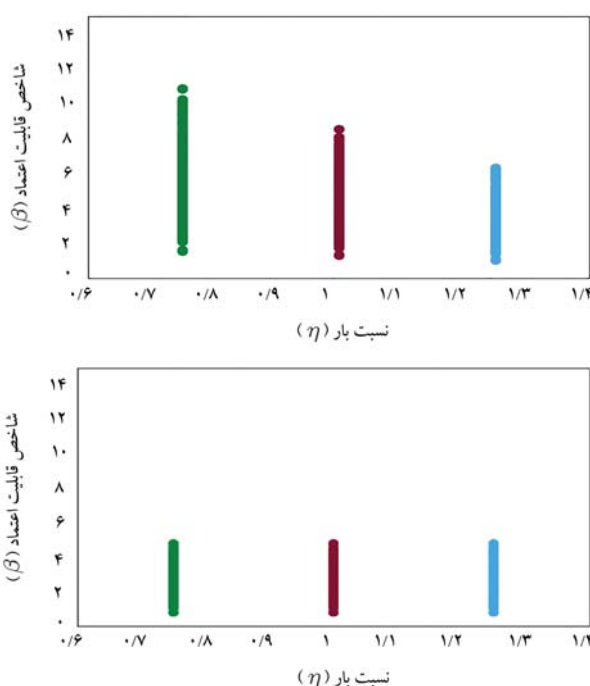
۳,۴۱	۴,۱۵	۲,۴۶	۳,۰۵	۲,۶۹	۲,۰۴	۳۴
۳,۳۶	۴,۱۹	۲,۵۱	۲,۷۰	۲,۵۶	۱,۱۱	۳۵
۳,۲۳	۴,۱۸	۲,۲۲	۲,۷۹	۲,۴۹	۱,۷۲	۳۶
۳,۰۵	۴,۲۲	۲,۰۵	۲,۸۲	۲,۸۱	۱,۶۹	۳۷
۳,۰۰	۳,۵۷	۲,۱۷	۲,۶۱	۲,۵۳	۱,۷۰	۳۸
۲,۹۲	۳,۷۲	۲,۱۸	۲,۶۶	۲,۵۹	۱,۷۵	۳۹
۳,۰۱	۳,۶۵	۲,۲۱	۲,۷۶	۲,۸۶	۱,۶۵	۴۰
۲,۹۶	۳,۶۷	۲,۰۴	۲,۷۹	۲,۹۰	۱,۲۹	۴۱
۲,۹۴	۳,۷۲	۲,۲۸	۲,۴۰	۳,۰۱	۱,۳۴	۴۲
۳,۱۰	۳,۶۲	۲,۲۹	۲,۴۳	۳,۱۱	۱,۴۰	۴۳
۳,۰۶	۳,۴۵	۲,۰۱	۲,۳۵	۳,۱۰	۱,۴۷	۴۴
۳,۳۲	۳,۲۷	۲,۲۲	۲,۴۸	۳,۰۸	۱,۲۸	۴۵
۳,۱۴	۳,۳۳	۲,۴۲	۲,۹۲	۳,۰۸	۰,۷۹	۴۶
۳,۲۲	۳,۲۴	۲,۴۸	۲,۹۵	۲,۸۷	۱,۴۲	۴۷
۲,۹۰	۳,۱۸	۲,۴۹	۲,۸۵	۲,۸۵	۲,۰۹	۴۸
۲,۹۵	۳,۲۲	۲,۵۵	۳,۰۲	۲,۶۱	۱,۹۵	۴۹
۳,۵۴	۲,۹۲	۲,۵۲	۳,۰۲	۲,۵۸	۲,۴۸	۵۰
۳,۶۱	۲,۹۵	۲,۵۱	۳,۱۶	۲,۸۰	۱,۳۷	۵۱
۳,۷۵	۲,۹۶	۲,۳۴	۳,۱۸	۲,۸۴	۱,۵۰	۵۲
۳,۷۰	۲,۹۹	۲,۳۷	۳,۲۰	۲,۸۹	۱,۸۲	۵۳
۳,۵۷	۲,۸۹	۲,۴۰	۲,۳۵	۲,۷۱	۱,۴۰	۵۴
۳,۲۹	۲,۹۱	۲,۴۹	۲,۴۶	۲,۶۳	۱,۳۴	۵۵
۳,۲۷	۳,۳۶	۲,۱۱	۲,۴۹	۲,۴۹	۱,۹۵	۵۶
۳,۲۶	۳,۴۴	۲,۲۲	۲,۵۲	۲,۲۵	۱,۹۲	۵۷
۳,۲۳	۳,۴۷	۲,۱۴	۲,۴۸	۲,۰۸	۱,۶۰	۵۸
۳,۱۸	۳,۴۹	۲,۲۷	۲,۵۸	۱,۹۳	۱,۶۲	۵۹
۳,۱۷	۲,۸۸	۲,۲۵	۲,۶۱	۲,۱۰	۰,۸۰	۶۰
۳,۰۱	۲,۸۵	۲,۴۱	۲,۳۶	۲,۰۹	۱,۲۰	۶۱
۳,۰۳	۲,۸۳	۲,۳۶	۲,۲۵	۱,۹۶	۱,۱۳	۶۲
۳,۰۴	۲,۸۶	۲,۳۶	۲,۴۰	۲,۱۸	۱,۳۶	۶۳
۲,۸۷	۲,۸۸	۲,۳۲	۲,۴۶	۱,۸۸	۱,۹۴	۶۴
۳,۴۹	۳,۶۱	۲,۳۷	۲,۷۳	۲,۴۲	۱,۶۳	میانگین
۲,۷۱	میانگین کل					

قابلیت اعتماد بتا با افزایش نسبت بار زنده به بار مرده برای حالت بدون در نظر گرفتن ضریب مدل نیز کاملاً مشخص است و یک روند کاهشی به خصوصی در نمودار مخصوص آن مشاهده می شود. این در حالی است که با در نظر گرفتن ضریب بار، روند خاصی مشاهده نمی شود و بازه تغییرات شاخص بدون توجه به مدل مقدار یکنواختی را نشان می دهد. این نتیجه با نتیجه حاصل از مطالعه ی ونگ و الینگوود<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۵)، مطابقت دارد.<sup>[۴۱]</sup>

## ۶. نتیجه گیری

چوب به عنوان یکی از قدیمی ترین مصالحی است که همواره در ساخت و سازها، استفاده شده است و با وجود کاربرد گسترده و ویژگی های منحصر به فرد آن، نقاط ضعفی مانند رفتار نسبتاً ترد به خصوص در خمش دارد. برای بهبود عملکرد چوب و همچنین یکی از راهکارها به منظور مقاوم سازی سازه های چوبی، استفاده از قطعات FRP است. سبکی و سهولت اجرای مصالح FRP بر روی قطعات مختلفی چون بتن، فولاد، و چوب سبب شده است تا بتوان با استفاده از آن ها، افزایش مقاومت و شکل پذیری در قطعات سازه ای را مشاهده کرد.

در پژوهش حاضر، محدود مدلهایی که در استفاده از سیستم چوب - FRP موجود بوده است، جمع آوری و عدم قطعیت شش پارامتر، به عنوان پارامترهای مؤثرتر در مقاومت سیستم چوب - FRP، برای انجام یک تحلیل قابلیت اعتماد در نظر گرفته شده است. همچنین در طی مراحل انجام شده، سه نسبت بارگذاری بار زنده به بار مرده برابر با ۱/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ در تابع بارگذاری طراحی قطعه در نظر گرفته شده است. آنچه در طی پژوهش حاضر به دست آمده است، این است که در فرایند طراحی قطعات مقاوم سازی شده با FRP، عدم قطعیت ها تأثیر شگرفی در قابلیت اعتماد مدل های موجود دارند. به طوری که میانگین شاخص قابلیت اعتماد تمامی ۶ مدل موجود، از ۴/۸۸ در حالت بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت به ۲/۷۱ با در نظر گرفتن عدم قطعیت کاهش یافته است. از میان ۵ مدل موجود ارائه شده در مطالعات پیشین، مدل پالیزی و توفیق<sup>[۳۶]</sup> (۲۰۲۲)، با میانگین شاخص قابلیت اعتماد ۳/۶۱ بهترین مدل پیشنهادی است که شاخص آن با شاخص مدل های موجود طراحی سازه ای مطابقت خوبی دارد. شایان ذکر است که متغیرهای مختلفی در قابلیت اعتماد سیستم چوب - FRP تأثیر دارند. لکن در پژوهش حاضر فقط عدم قطعیت ۶ متغیر: مدول کشسانی، ضخامت، طول و عرض FRP به همراه عرض چوب و مقاومت فشاری چوب در نظر گرفته شده است. سایر عدم قطعیت های ذاتی یا شناختی می توانند در فرایند تحلیل سیستم چوب - FRP در مطالعات آتی مورد نظر باشد.



شکل ۵. شاخص قابلیت اعتماد در برابر تغییرات نسبت بارگذاری.

با ۶/۲۴ در رتبه ی دوم قرار گرفت. در حالی که اگر به داده های جدول دقت شود، پراکندگی داده های هر تحلیل بسیار زیاد نیست و در یک محدوده ی مشخصی برای مدل اخیر قرار دارند. این در حالی است که در مدل های ۱ الی ۴، اختلاف بین نتایج هر تحلیل با یکدیگر زیاد است. با اعمال عدم قطعیت در مدل، همان طور که انتظار می رفت، شاخص قابلیت اعتماد بتا کاهش یافته و میانگین آن برای هر ۶ مدل به ۲/۷۱ رسیده است. بنابراین می توان دریافت که در نظر نگرفتن عدم قطعیت در یک مدل طراحی می تواند نتایج بسیار نامناسب را در پی داشته باشد. همان طور که مشاهده می شود، تأثیر عدم قطعیتی که فقط در ۶ متغیر اصلی در پژوهش حاضر بررسی شده است، بسیار قابل توجه است.

در شکل ۵، مقدار شاخص قابلیت اعتماد محاسبه شده از تحلیل FORM بر حسب نسبت بار زنده به بار مرده که قبلاً تعریف شده بود، مشاهده می شود. همان طور که گفته شد، سه نسبت بار ۱/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ ارائه شده است. مطابق شکل اخیر، می توان دریافت که با در نظر گرفتن ضریب مدل، تراز شاخص قابلیت اعتماد بدون توجه به مدل های طراحی، بسیار یکنواخت تر شده است. کاهش ضریب

## پانویس ها

1. fiber reinforced polymer (FRP)
2. Wan
3. Raftery
4. Richter & Steiger
5. Klinger
6. setup

7. wet layup
8. American concrete institute (ACI)
9. Kaiser & Karbhari
10. Wiegghaus & Atadero
11. Zhang
12. normal Distribution
13. lognormal Distribution
14. weibull distribution
15. Hasofer & Lind



16. Wang & Ellingwood

## منابع (References)

- Babatunde, S.A. "Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers", *Composite Structures*, **161**, pp. 246-255 (2017).
- Carney, P. and Myers, J.J. "Shear and flexural strengthening of masonry infill walls with FRP for extreme out-of-plane loading", In *Architectural Engineering 2003: Building Integration Solutions*, pp. 1-5 (2003).
- Galati, N., Tumialan, G. and Nanni, A. "Strengthening with FRP bars of URM walls subject to out-of-plane loads", *Construction and Building Materials*, **20**(1-2), pp. 101-110 (2006).
- Toufigh, V., Toufigh, V., Saadatmanesh, H. and et al. "Strength evaluation and energy-dissipation behavior of fiber-reinforced polymer concrete", *Adv. Civ. Eng. Mater*, **2**(1), pp. 622-636 (2013).
- Frketic, J., Dickens, T. and Ramakrishnan, S. "Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing", *Additive Manufacturing*, **14**, pp. 69-86 (2017).
- Wan, J., Smith, S.T., Qiao, P. and et al. "Experimental investigation on FRP-to-timber bonded interfaces", *Journal of Composites for Construction*, **18**(3), p. A4013006 (2014).
- Raftery, G.M., Harte, A.M. and et al. "Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **29**(2), pp. 101-110 (2009).
- Richter, K. and Steiger, R. "Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives", *Advanced Engineering Materials*, **7**(5), pp. 419-426 (2005).
- Kliger, I.R., Haghani, R., Brunner, M. and et al. "Wood-based beams strengthened with FRP laminates: Improved performance with pre-stressed systems", *European Journal of Wood and Wood Products*, **74**(3), pp. 319-330 (2016).
- Turku, I. and Karki, T. "The effect of carbon fibers, glass fibers and nanoclay on wood flour-polypropylene composite properties", *European Journal of Wood and Wood Products*, **72**(1), pp. 73-79 (2014).
- ISO, "Adhesives:Wood-to-wood adhesive bonds; Determination of shear strength by compressive loading", ISO 6238, Geneva (2001).
- ASTM D905-03, "Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading", West Conshohocken, PA (2003).
- Davalos, J.F., Qiao, P. and Trimble, B.S. "Fiber-reinforced composite and wood bonded interfaces: Part 1. Durability and shear strength", *Journal of Composites Technology and Research*, **22**(4), pp. 224-231 (2000).
- Lopez-Anido, R., Gardner, D.J. and Hensley, J.L. "Adhesive bonding of eastern hemlock glulam panels with eglass/vinyl waster reinforcement", *Forest Products Journal*, **50**, p.43 (2000).
- Crews, K. and Smith, S.T. "Tests on FRP-strengthened timber joints", *Proc., 3rd Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2006*, pp. 677-680 (2006).
- Claisse, P.A., Davis, T.J. and Masse, B. "Fatigue testing of glass/epoxy joints in timber up to the endurance limit", *Construction and Building Materials*, **21**(1), pp. 139-149 (2007).
- Ozcifci, A. and Yapici, F. "Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some wood species", *Journal of Materials Processing Technology*, **202**(1-3), pp. 353-358 (2008).
- Wan, J., Smith, S.T. and Qiao, P.Z. "FRP-to-softwood joints: experimental investigation", In *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, pp. 951-954 Springer, Berlin, Heidelberg (2011).
- Smith, S.T. and Gravina, R.J. "Modeling debonding failure in FRP flexurally strengthened RC members using a local deformation model", *Journal of Composites for Construction*, **11**(2), pp. 184-191 (2007).
- Yao, J., Teng, J.G. and Chen, J.F. "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints", *Composites Part B: Engineering*, **36**(2), pp.99-113 (2005).
- Yu, T., Fernando, D., Teng, J. G. and et al. "Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces", *Composites Part B: Engineering*, **43**(5), pp. 2279-2289 (2006).
- Fawzia, S., Al-Mahaidi, R. and Zhao, X.L. "Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP", *Composite Structures*, **75**(1-4), pp. 156-162 (2006).
- Zhao, X.L. and Zhang, L. "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1808-1823 (2007).
- American Concrete Institute (ACI), "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI 440.2R-08, Farmington Hills, MI (2008).
- Kaiser, H. and Karbhari, V.M. "Identification of potential defects in the rehabilitation of concrete structures with FRP composites", *International Journal of Materials and Product Technology*, **19**(6), pp. 498-520 (2003).
- Atadero, R.A. and Karbhari, V.M. "Sources of uncertainty and design values for field-manufactured FRP", *Composite Structures*, **89**(1), pp. 83-93 (2009).
- Wieghaus, K.T. and Atadero, R.A. "Effect of existing structure and FRP uncertainties on the reliability of FRP-based repair", *Journal of Composites for Construction*, **15**(4), pp. 635-643 (2011).
- Zhang, D., Gu, X.L., Yu, Q.Q. and et al. "Fully probabilistic analysis of FRP-to-concrete bonded joints considering model uncertainty", *Composite Structures*, **185**, pp. 786-806 (2018).
- de Jesus, A.M., Pinto, J.M. and Morais, J.J. "Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 817-828 (2012).



## راهنمای نگارش مقالات مجله علمی و پژوهشی

شریف

مجله علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌ی 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 تازه‌ی 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 به صورت دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

\* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

\* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

\* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها، نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه -- با احتساب شکل و نمودار -- باشد.

\* کلیه عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و 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 Apx و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا 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 شکل‌های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

\* کلیه 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. با توجه 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. "Forecasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, 4(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preformation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

## Abstract

Wood is one of the oldest materials that has always been known as a construction material. Despite its widespread application and unique properties, it has weaknesses such as relatively brittle behavior, especially in bending. In order to improve its performance and boost its features or strengthen wooden structural members, one solution is to employ FRP component, which is widely used as a rehabilitation tool. The lightness and ease of application for different materials such as concrete, wood, and steel have made it possible to increase the strength and ductility of structural elements. In this study, the few models that were available for the wood-FRP system were collected, and the uncertainty of six variables, as the most effective parameters in the strength of this system, was selected for reliability analysis. Also, during the steps, three live to dead load ratios equal to 0.75, 1, and 1.25 were assumed as the design loads. What was achieved during this research was that during the design process of wood-FRP, uncertainties had a significant impact on

the reliability of existing models. Some models could be reliable enough to be applied for design purposes; however, uncertainties seriously affect the reliability of some models. Accordingly, the average reliability index of all six available models decreased from 4.88 in case one fails to consider uncertainties to 2.71 with uncertainties of the models. Among the five existing models presented in previous studies, the Palizi and Toufigh model with an average reliability index of 3.61 was the best-proposed model, which is in good agreement with the acceptable index of existing structural design criteria. It is worth noting that various variables affect the reliability of this system. However, in this study, only the uncertainty of the six variables of modulus of elasticity, thickness, length, and width of FRP, along with wood width and its compressive strength, was considered. Other sources of uncertainties may be considered while analyzing this system in future studies.

**Key Words:** Reliability, strengthening, wood, FRP, finite element model.

in different cases of the interaction systems. In this regard, a few frequency magnitudes were considered and, consequently, different relations were presented for all frequencies using the obtained OSPs. It is found that, the OSP does not depend on the shear modulus of neither the dam nor the foundation. Moreover, the OSP value are not sensitive to the fluid compressibility and do not depend on the number of subdomains. Apparently, these properties reduce the computational costs and facilitate the MQ-RBF application. In order to validate the capabilities of the approach, nine numerical examples are solved in which the Roots Mean Square Error (RMSE) criterion has been evaluated for comparing the results with those of the exact and FD methods. Results show that the proposed method is of acceptable accuracy, i.e. more accurate than FD even with much more FD computational nodes. Also, it is shown that the errors increase by increasing the earthquake frequency value while the FD errors seem to be unacceptable in frequency values close to the resonance frequency, unlike those of the MQ-RBF.

**Key Words:** Radial basis functions, multiquadric method, mesh-less method, shape parameter, dam-reservoir-foundation interaction.

## INVESTIGATING AND COPMARING THE MOST EFFECTIVE METHODS TO IMPROVE POST-FIRE PERFORMANCE OF STEEL SHORT COLUMNS WITH VERTICAL AND HORIZONTAL DEFECTS

**H. Makhdoumi Darmian**

hamy.mk@gmail.com

Dept. of Civil Engineering

Sirjan Branch, Islamic Azad University

**R. Rahgozar**(corresponding author)

rahgozar@uk.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Sirjan Branch, Islamic Azad University

Dept. of Civil Engineering

Shahid Bahonar University, Kerman

**M. Mohammadizadeh**

mohsenmohammadizadeh@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering

Sirjan Branch, Islamic Azad University

**A. Saedi Daryan**

amir\_saedi\_d@yahoo.com

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering

Shahid Beheshti University

**K. Narmashiri**

narmashiri@iauzah.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Zahedan Branch, Islamic Azad University

DOI:10.24200/J30.2022.60114.3086

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 77-88, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 6 April 2022; received in revised form 30 May 2022; accepted 21 June 2022.

### Abstract

In this paper, the performance of box steel columns with corrosion is investigated. Thus the steel columns are made with different defect locations (6 modes) and are subjected to temperatures of  $20^{\circ}\text{C}$  and  $700^{\circ}\text{C}$ . Then, two retrofitted methods (CFRP composites and steel plates) are used in the defect area in order to improve the performance of columns. Afterwards, bearing capacity of all column specimens (38 specimens) has been obtained. The results indicate a decrease in the bearing capacity of the columns and weakness in their performance due to the two factors of defect and heat so that the greatest decrease in the column compression strength is about 32% and 35% due to defect and high temperature, respectively. Also, the comparison of retrofitting methods indicates that the use of composite is more effective in improving the performance of steel columns. Finally, For further investigation, 5 specimens are modeled in ABAQUS finite element software and the results are compared with similar experimental results.

**Key Words:** Steel columns, defect, fire, CFRP composites, bearing capacity.

## RELIABILITY ANALYSIS OF FRP-TIMBER SYSTEM

**S. Palizi**

soheil.palizi@gmail.com

**V. Toufigh**(corresponding author)

toufigh@sharif.edu

Faculty of Civil Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J30.2022.60571.3109

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 89-100, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 16 June 2022; received in revised form 26 June 2022; accepted 5 July 2022.

## COMPOSITE COLUMN USING MODAL DYNAMIC DATA

**A. Mamazizi**(corresponding author)

a.mamazizi@uok.ac.ir

**M. Khanahmadi**

m.khanahmadi@uok.ac.ir

**K. N. Vakili**

k.vakili@uok.ac.ir

**Faculty of Civil Engineering**

**University of Kurdistan**

**DOI:10.24200/J30.2022.59903.3075**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 53-63, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 19 February 2022; received in revised form 11 May 2022; accepted 18 June 2022.

### Abstract

Structural damage detection is one of the primary goals of structural health monitoring. Minimum safety can be provided upon timely identification of the damaged elements and appropriate decisions (repairing or replacing the damaged elements). Today, the use of concrete-filled steel tube composite columns in the construction industry, especially high-rise buildings, is increasing. In these columns, the concrete core debonding from the steel tube is considered a prevalent type of damage. This study discusses the impact of such debonding on dynamic modal properties (natural frequencies and vibration mode shapes) and the detection of debonding damage area based on wavelet analysis. Debonding to a depth of 3 mm is defined as reduction of concrete stiffness in connection with the steel tube, and the column was subjected to frequency analysis. Modal information, including frequency values and vibration mode shapes, were extracted. Differences in frequency values and Modal Assurance Criterion (MAC) smaller than one were observed between primary and secondary shapes of vibrational modes due to the presence of debonded areas. The results showed that with the addition of a new debonding damaged area, the rate of reduction of frequency values increased. The damage index was proposed based on the detail coefficients obtained from discrete wavelet analysis of primary and secondary shapes of vibration modes to identify the area of detachment damage. The results demonstrated that the relative minimum and maximum values of the damage index for all modes occurred in debonding damaged areas. Moreover, the damage index values for different damaged areas were independent of each other. Indeed, the damage index values for other debonding damage situations did not change when a new debonding damaged area was added. This is a positive point in the damage detection process with multiple debonded areas because in this case, the inability to detect a debonding damaged area

cannot affect the detection of other debonding damage situations.

**Key Words:** Structural health monitoring, debonding damage detection, frequency analysis, modal assurance criterion (MAC), wavelet analysis.

## DEVELOPMENT OF THE MULTIQUEADRIC MESH-LESS METHOD FOR ANALYZING THE DYNAMIC INTERACTION OF DAM-RESERVOIR-FOUNDATION PROBLEMS

**R. Babaee**

r.babae@stu.qom.ac.ir

**E. Jabbari**(corresponding author)

e.jabbari@qom.ac.ir

**Department of Civil Engineering**

**University of Qom**

**M. Eskandari-Ghadi**

ghadi@ut.ac.ir

**School of Civil Engineering**

**University of Tehran**

**DOI:10.24200/J30.2022.60113.3085**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 65-76, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 March 2022; received in revised form 8 June 2022; accepted 18 June 2022.

### Abstract

The Multiquadric Radial Basis Function (MQ-RBF) method, despite its advantages, has not yet been developed to be used for Dam-Reservoir-Foundation Interaction (DRFI) problems. In this study, this mesh-less method was developed for solving the DRFI systems in the frequency domain. A new domain decomposition technique was also used for analyzing dynamic interaction problems for the first time in MQ-RBF. In this regard, the computational domain is divided into dam, reservoir, and foundation subdomains. Then, the MQ-RBF method is separately applied to each subdomain. For applying the dynamic interaction between two adjacent subdomains, two Multiquadric shape functions must be considered for each computational center on their interaction boundary. Besides, each shape function is also defined using the computational centers in the subdomain. One of the important challenging issues in RBFs is the determination of the Optimal Shape Parameter (OSP). Thereafter, some new relations in terms of the earthquake frequencies are proposed for the OSPs

large budget and long life cycle. For these two reasons, these contracts are sensitive to the environment and face many problems in complex environments, such as the project environment in Iran. The structure of freeway partnership contracts in Iran does not fit a highly complex environment and so, performance targets are not achieved. The main purpose of this study is to identify the effective environmental factors, challenges, contextual obstacles, strategies, and outcomes in association with freeway partnership contracts. Therefore, with the help of this knowledge, a theoretical model can be developed. Case study strategy, qualitative approach, and data analysis by grounded theory are the main features of the research methodology. The findings of four freeway cases showed that the partnership contracts were developed without considering the long life cycle. Then, in the course of the construction, despite the effort in gathering many different opinions and expertise, satisfactory performance criteria were not established due to weak understanding of contractual obligations and risks. Also, in the operating period, the return on investment remains ambiguous due to increased costs, insufficient revenue, and high environmental complexity. In general, these contracts are defined as immature with dissatisfied parties. Therefore, according to the obtained facts, few investors express interest in public-private partnership contracts and are less desirable to investors. The private sector does not view infrastructure projects as idealistic and task-oriented but rather hunger for economic interests, mainly. Thus, in order to advance its goals, the public sector must have a different view of such investments. Also, the existing contract system, which is based on the employer-contractor experience, in order to fit the complex environment and achieve development goals, must prioritize structural reforms and normative changes in the contracts and strategies of the parties.

**Key Words:** Built operate transfer (BOT), environmental complexity, case study, grounded theory.

## INVESTIGATING THE ROLE OF LATENT INDIVIDUAL COMPONENTS IN THE ACCEPTANCE OF DEMAND MANAGEMENT POLICIES: CASE STUDY OF TEHRAN ODD-EVEN POLICY

**A.R. Mahpour**(corresponding author)

a\_mahpour@sbu.ac.ir

Faculty of Civil

Water and Environmental Engineering  
Shahid Beheshti University

**S. Saeedi Shahrivar**

s.saeedi@imps.ac.ir

Faculty of Industrial Engineering

Institute for Management and Planning Studies

DOI:10.24200/J30.2022.59669.3066

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 41-52, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 6 February 2022; received in revised form 6 June 2022; accepted 6 July 2022.

### Abstract

Due to the problems caused by personal car use, demand management policies have been developed, which result in reduced use of personal vehicles. It is generally accepted that demand management policies are classified into two types: hard or soft. In the case of soft politics, people tend to be receptive, while being combative to hard policies. In the case of Tehran's odd or even zone, the purpose of the paper is to examine the role of latent components in the acceptance of demand management policies. To address the issue and measure the resistance of individuals to accept the car reduction policy, we designed a stated preference questionnaire and measured the acceptance rate in terms of behavior change. Changes in behavior patterns and the choice of private car mode are methods used to determine acceptance rates. The acceptance of policies can be assessed by identifying their hidden nature via the value-belief-norm theory. In this theory, value influences the norm through belief. So, people who know that they should cut down on the use of the private car are more inclined to accept the use of private cars. Examination of the adoption of private car prohibiting policies under changing behavior in different periods of implementation of a private car is debatable. In this study, more than 500 questionnaires were distributed randomly among Tehran citizens including couples or single individuals considering the scope of the traffic plan traveled by transit vehicles. Using the multiple logit model, this study investigates the changes in people's behavior toward accepting the policies of reducing the use of private cars in two short-term and long-term periods. Results show that individual values and norms are effective factors in changing users' behavior over short- and long-term periods.

**Key Words:** Value-belief-norm theory, demand management, latent variable, behavior changing.

## DEBONDING DAMAGE DETECTION AND ASSESSMENT IN A CFST



show excellent agreement at different thickness ratios and aspect ratios of the shells. Some practical problems are solved for one-layered and three-layered cylindrical shells. For this purpose, three types of materials are defined for a one-layered cylindrical shell such as composite material (Graphite epoxy), metallic substance (e.g. Zinc), and isotropic material (Aluminum). Also two combinations of materials are considered for three-layered cylindrical shell so that the inner and outer layers of the shell are made of transversely isotropic material (Graphite epoxy), while the middle layer of the isotropic material is made of aluminum and foam. The values of the non-dimensional functions containing stress and displacement components are calculated for these problems to demonstrate the effect of thickness ratio and anisotropy of the shell on the distribution of the stresses and displacements.

**Key Words:** Displacement potential function, analytical solution, transversely isotropic material, multi-layered cylindrical shell.

## EVALUATION OF TEXTILE CONCRETE BEHAVIOR IN THE ACCELERATED SHELTER

**F. Amiri Hanza**

amirifarzad1000@gmail.com

**M. Fayyaz**(corresponding author)

m.fayyaz@modares.ac.ir

**M. Aminoraya**

mohsenaminraya@modares.ac.ir

**Faculty of Engineering and Passive Defense**

**Imam Hussein University**

**DOI:10.24200/J30.2022.59061.3022**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 15-25, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 18 December 2021; received in revised form 21 May 2022; accepted 21 June 2022.

### Abstract

Concrete canvas rolls have several unique properties have made it a strategic material. A major property is rapidness of installation that can be considered in the construction of accelerated shelters of protection against threats. The use of concrete canvas in the construction of the shelter is also expanding worldwide due to its economic benefits and the speed of its installation, as experience has shown that a two-person team can build a shelter with an area of 25 square meters of concrete canvas in less than an hour. Increasing attention to

this function of concrete canvas requires studying product behavior against incoming loads, and the need for a deep understanding of the material and components of aerated concrete leads to a better understanding of this product and the possibility of improving product quality. Therefore, the properties of two-phase concrete canvas, including fabric and mortar that have structural performance, were studied using Abacus finite element software. The results of finite element simulation on macro and Meso scales were compared with the laboratory results of different samples, showing the accuracy of the study. The results illustrate that the use of fibers with higher tensile strength and high Young's modulus and stiffness has a better performance against the applied loads. The shelter behavior is evaluated against different probable attack scenarios. The designed shelter is capable of withstanding slag up to a height of 70 cm of soil, which also makes it resistant to mortar attacks. The use of a concrete canvas shelter without any slag also makes it resistant to the 5 kg TNT threat at a distance of 3 meters. Using products against larger threats or loads strengthens the shell with appropriate materials or several layers of concrete canvas shells.

**Key Words:** Concrete canvas, Meso-Scale, ABAQUS finite element software, Four-Point bending.

## THEORETICAL MODEL OF BUILT, OPERATE AND TRANSFER CONTRACTS IN A COMPLEX ENVIRONMENT MULTI-CASE STUDY: IRAN FREEWAY PARTNERSHIP AGREEMENTS

**S.M.M. Mirmoezi**

mirmoezi@usc.ac.ir

**Faculty of Engineering**

**Science and Culture University**

**M.H. Sobhiyah**(corresponding author)

sobhiyah@modares.ac.ir

**Faculty of Art**

**Tarbiat Modares University**

**DOI:10.24200/J30.2022.58562.2987**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 27-40, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 25 December 2021; received in revised form 9 April 2022; accepted 25 June 2022.

### Abstract

Build Operate Transfer (BOT) contracts in Public Private Partnership process have two important features:

# Abstracts of Papers in English

## STATIC ANALYSIS OF AXISYMMETRIC 3-D LAYERED TRANSVERSELY ISOTROPIC THICK CYLINDRICAL SHELLS BY DISPLACEMENT POTENTIAL FUNCTION

**Z. Mohammadi**

mohamadi.zahraa@gmail.com

**B. Navayi Neya**(corresponding author)

navayi@nit.ac.ir

**A. Ardeshir-Behrestaghi**

ardeshir@ustmb.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Babol Noshirvani University of Technology**

**DOI:10.24200/J30.2022.59265.3039**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 3.1, Page 3-14, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 October 2021; received in revised form 24 April 2022; accepted 11 May 2022.

### Abstract

This work considers an effective analytical method based on Displacement Potential Function (DPF) for solving 3-D thick and multi-layered transversely isotropic linearly elastic cylindrical shells (non-homogeneous in radial direction) with simply-supported end boundary conditions. Axisymmetric radial loads are applied on the inner and outer faces of the cylindrical shell. Three-dimensional elasticity equations are simplified using displacement potential function result in one single linear partial differential equation of fourth order as governing differential equation in term of displacement potential function. The governing equation is solved via the separation of variable method with exact satisfaction of two end boundary conditions including stress and displacement boundary conditions, stresses on the inner and outer surfaces of the shell, and the continuity conditions of the displacement and tractions on the interfacial surfaces of the multi-layered cylindrical shell. After determining displacement potential function, all other functions such as stresses and displacements can be obtained at each point of the examined shell. Comparison of the results with existing analytical results

## Civil Engineering

The logo of Sharif University of Technology, featuring the word "Sharif" in a bold, stylized, black font.

Fall  
2022

Editor-in-Chief: Mohsen Ghaemian

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, “**Sharif**” publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

**P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN**

**Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983**

**Web: <http://journal.sharif.ir/> [http:// www. globalsciencejournals.com](http://www.globalsciencejournals.com)**

**E-mail: [pajouhesh@sharif.edu](mailto:pajouhesh@sharif.edu)**

## CONTENTS

- 3    **STATIC ANALYSIS OF AXISYMMETRIC 3-D LAYERED TRANSVERSELY ISOTROPIC THICK CYLINDRICAL SHELLS BY DISPLACEMENT POTENTIAL FUNCTION**  
Z. Mohammadi, B. Navayi Neya and A. Ardeshir-Behrestaghi
- 15   **EVALUATION OF TEXTILE CONCRETE BEHAVIOR IN THE ACCELERATED SHELTER**  
F. Amiri Hanza, M. Fayyaz and M. Aminoraya
- 27   **THEORETICAL MODEL OF BUILT, OPERATE AND TRANSFER CONTRACTS IN A COMPLEX ENVIRONMENT MULTI-CASE STUDY: IRAN FREEWAY PARTNERSHIP AGREEMENTS**  
S.M.M. Mirmoezi and M.H. Sobhiyah
- 41   **INVESTIGATING THE ROLE OF LATENT INDIVIDUAL COMPONENTS IN THE ACCEPTANCE OF DEMAND MANAGEMENT POLICIES: CASE STUDY OF TEHRAN ODD-EVEN POLICY**  
A.R. Mahpour and S. Saeedi Shahrivar
- 53   **DEBONDING DAMAGE DETECTION AND ASSESSMENT IN A CFST COMPOSITE COLUMN USING MODAL DYNAMIC DATA**  
A. Mamazizi, M. Khanahmadi and K. N.Vakili
- 65   **DEVELOPMENT OF THE MULTIQUADRIC MESH-LESS METHOD FOR ANALYZING THE DYNAMIC INTERACTION OF DAM-RESERVOIR-FOUNDATION PROBLEMS**  
R. Babaei, E. Jabbari and M. Eskandari-Ghadi
- 77   **INVESTIGATING AND COPMARING THE MOST EFFECTIVE METHODS TO IMPROVE POST-FIRE PERFORMANCE OF STEEL SHORT COLUMNS WITH VERTICAL AND HORIZONTAL DEFECTS**  
H. Makhdoumi Darmian, R. Rahgozar, M. Mohammadizadeh, A. Saedi Daryan and K. Narmashiri
- 89   **RELIABILITY ANALYSIS OF FRP-TIMBER SYSTEM**  
S. Palizi and V. Toufigh

## APPENDIX

- 107   **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**