

دوره‌ی ۲  
شماره‌ی ۳/۱  
فصلنامه  
پاییز  
۱۴۰۱

۳/۱

# مهندسی عمران

# شریف



Civil Engineering SHARIF

۳/۱

- مقالات پژوهشی:**
- تحلیل استاتیکی پوسته‌ی ایستوانه‌ای ابزوروب جانسی چندلایه‌ی سه‌بعدی متقاضان با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمسکن زهره محمدی، بهرام نیایش و گرویله اردشیر پهلوستی
  - روزیابی عملکرد بتن پارچه‌ی در بنایگاه تعییلی فرزاد امیری هنرود محمد قیاسی و محسن آمی رعایا
  - مدل نظری فرآداهای ساخت، بهره‌داری و انتقال در محیط پیچیده (عالی‌الحدیقه چندمرودی؛ فرآداهای ملارک آذربایجان) سید محمد مهدی سیرمعزی و محمد حسین صبحیه
  - روزیابی نقش مقننه‌های پنهان فردی در پذیرش سیاست‌های مدبریت تقاضا (نمونه‌ی موردی: طرح ترافیک زوج با فرد در تهران) علیشا ماهپور و سعیده سعیدی شیربور
  - شناسایی و تشخیص اسباب جاذشگی در سیون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مدول ایمان مام عزیزی، حمّض خان‌اصحی و کاظم ریثت و کلی
  - توسعه‌ی روش دون شیکمی چندرعی برای آنالیز مسائل اندرکش دینامیکی سد - مخزن - بی رضا بایانی، احسان جباری و منصف اسکندری قازی
  - پرسی و مقایسه موتورترین روش‌های پهلوه عملکرد پس از آتش سوئن‌های فولادی کوتاه دارای نقص‌های افقی و قائم حمیده قدوی دریمان، رضا رهگذر، محسن محمدیزاده، امیر سعدی داریان و کامبیز نرماسبری
  - تحلیل قابلیت اعتماد قطعات جویی مفهوم‌سازی شده با FRP سهیل پاگیری، وحید توفیق

Civil Engineering

# Sharif

Volume 38 - 2  
Number 3.1  
Quarterly  
Fall  
2022

3.1

ISSN 2676-4768

**ORIGINAL ARTICLES:**

- Static Analysis of Axisymmetric 3-D Layered Transversely Isotropic Thick Cylindrical Shells by Displacement Potential Function  
Z. Mohammadi, B. Navay Neya and A. Ardestani-Behrestagh
- Evaluation of Textile Concrete Behavior in the Accelerated Shelter  
F. Amiri Hanza, M. Fayaz 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. Mimrozi and M.H. Sobhiyeh
- 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. Saiedi Shahrvær
- Debonding Damage Detection and Assessment in a CFST Composite Column Using Modal Dynamic Data  
A. Mamaziz, M. Khanahmadi and K. N. Vakili
- 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. Makhdomi Darmian, R. Rahgozai, M. Mohammadzadeh, A. Saedi Daryan and K. Namashiri
- Reliability Analysis of FRP-Timber System  
S. Palizi and V. Toufigh

# تئریف

دوره ۳۸-۲  
شماره ۲/۱  
پاییز  
۱۴۰۱

- دکتر بیتا آبیتی  
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 تجربی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکtor وهب توفیق  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر حسن حاجی کاظمی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد  
دکتر امیر رضا خویی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر محمد دلنواز  
دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی  
دکتر حسین رحامي  
دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران  
دکتر فیاض رحیم زاده  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر امیر صممیمی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر ناصر طالب بیدختی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز  
دکتر محسن قائیمان  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر هوشنگ کاتبی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
دکتر محمد تقی کاظمی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
دکتر علی کاوه  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران  
دکتر محمد جواد 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 میرزا بزرگ  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دکتر علی نورزاد  
دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی  
دکتر جواد واثقی امیری  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
دکتر ابوالحسن وفائی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف  
مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی  
سردبیر: دکتر محسن قائیمان  
سردبیرهای تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

مدیر داخلی: پژوهان خیرمندی  
مدیر اجرایی: پریسا مردمی  
مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف خان

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار  
حروف چینی: سانا نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی  
صفحه‌آرایی: غزل احمدی میرقاد  
امور اجرایی: شیما آن اسدالله، مریم پورابراهیمی باوفا  
طرح لوگو: زندیاد مرتضی ممیز  
طرح روی جلد و ساختار صفحه‌آرایی: مصطفی اسدالله  
نظرات 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: ۰۹۳۱۶۴۰۶۶۱۶۴۰۵۴۱۹  
پست تصویری: ۰۶۶۰۱۲۹۸۳

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>



**مهندسی عمران**

## هیأت تحریریه‌ی تخصصی

• سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر احمد ابریشم‌چی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانچی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افسار

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخورداری

دانشیار داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشیار داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و ارزی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسینی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حسن حاجی کاظمی

استاد داشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سیدمحسن حائری

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیرضا خویی

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیانپور

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدمهندی زهرابی

دانشیار داشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدمهردی سعادت‌پور

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان

دکتر ناصر طالب بیدختی

استاد داشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد داشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد داشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمد تقی کاظمی

دانشیار داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

استاد داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمحمدالدین میرمحمدحسینی

دانشیار داشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدشهاب الدین یثربی

دانشیار داشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

## هیأت مشاوران

دکتر فردین ازدری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر احمد آفتتابی ثانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر ابراهیم افسر دیز

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

دکتر مرتضی اسکندری قادری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر مجید پاسیانی خیاری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه حقوق اردبیلی

دکتر مجید پرچمی 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 کمامی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آیت‌الله بروجردی

دکتر رضا گلشن خواص

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت

دکتر امیر رضا مددوحی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تربیت مدرس

## مطالب این شماره

### مقالات پژوهشی:

- ۳ تحلیل استاتیکی پوسته‌ی استوانه‌یی ایزوتروف جانبی چندلایه‌ی سه‌بعدی متقاضن با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان زهرا محمدی، بهرام نوائی‌نیا و عزیزالله اردشیر بهشتانی
- ۱۵ ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌یی در پناهگاه تعجیلی فرزاد امیری هنزا، محمد فیاض و محسن امی رعایا
- ۲۷ مدل نظری قراردادهای ساخت، بهره‌برداری و انتقال در محیط پیچیده (مطالعه‌ی چندموردی: قراردادهای مشارکت آزادراهی ایران) سید محمد مهدی میرمعزی و محمد حسین صبیحیه
- ۴۱ ارزیابی نقش متغیرهای پنهان فردی در پذیرش سیاست‌های مدیریت تقاضا (نمونه‌ی موردی: طرح ترافیک زوج یا فرد در تهران) علیرضا ماہپور و سعیدی شهریور
- ۵۳ شناسایی و تشخیص آسیب جدادشده‌ی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مodal آرمان مام عزیزی، مجتبی خان احمدی و کامران نوبخت وکیلی
- ۶۵ توسعه‌ی روش بدون شبکه‌ی چندریبعی برای آنالیز مسائل اندرکنش دینامیکی سد - مخزن - پی رضا بابایی، احسان جباری و مرتضی اسکندری قادری
- 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 نرماسیزی
- ۸۹ تحلیل قابلیت اعتماد قطعات چوبی مقاوم‌سازی شده با FRP سهیل پالیزی، وهب توفیق

### ضمائمه:

۱۰۷ چکیده مقالات به انگلیسی

# تحلیل استاتیکی پوسته‌ی استوانه‌ی ایزوتروف جانبی چندلایه‌ی سه‌بعدی متقارن با استفاده از توابع پتانسیل تغییرمکان

زهرا محمدی (دانشجوی دکتری)

بهام نوائی نیا<sup>\*</sup> (استاد)

عزیزالله اردشیر بهرستاقی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بايل

در نوشتار حاضر، روش تحلیلی ساده و مؤثر براساس تابع پتانسیل جابه‌جایی به منظور حل مسائل استاتیکی سه‌بعدی پوسته‌ی استوانه‌ی ضخیم و چندلایه با مصالح کشسان خطی ایزوتروف جانبی ارائه شده است. شرایط مرزی انتهایی پوسته از نوع تکیمگاه ساده انتخاب شده و پوسته تحت بارگذاری شعاعی متقارن محوری در سطوح داخلی و خارجی خود قرار گرفته است. معادلات کشسانی سه‌بعدی به کمک تابع پتانسیل تغییرمکان ساده‌سازی شده و معادله‌ی دیفرانسیل جزئی مرتبه‌ی چهار بر حسب تابع پتانسیل را به وجود آورده‌اند. معادله‌ی حاکم به دست آمده به کمک روش جداسازی متغیرها و با ارضاء دقیق شرایط مرزی در دو انتهای، تنش در سطوح داخلی و خارجی استوانه و نیز پیوستگی تنش و جابه‌جایی در هر نقطه مشترک لایه‌ها حل و پس از تعیین تابع پتانسیل، کایه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در هر نقطه از استوانه قابل محاسبه است. مقایسه 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.

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

واژگان کلیدی: تابع پتانسیل جابه‌جایی، حل تحلیلی، مصالح ایزوتروف جانبی، پوسته‌ی استوانه‌ی چندلایه.

## ۱. مقدمه

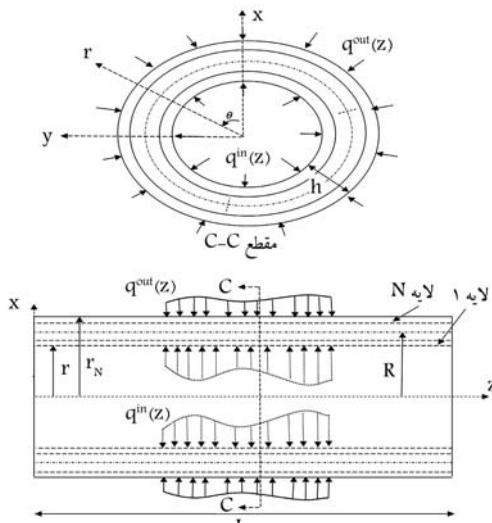
آیینه‌گار<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۲۷)،<sup>[۱]</sup> پوسته‌ی استوانه‌یی تحت بار فشاری یکفاخت را با به کارگیری توری کشسانی و با استفاده از تابع لاو و توری‌های کلاسیک تیموشنکو - دالن و فلاگ که قابلیت کاربرد برای مسائل متقارن محوری در محیط ایزوتروف را دارند، بررسی کرده‌اند. چاندراشخارا<sup>۸</sup> و همکاران (۱۹۸۲)،<sup>[۲]</sup> مسئله‌ی پوسته‌ی استوانه‌ی ایزوتروف جانبی با طول نامحدود تحت بار متقارن محوری را با استفاده از تابع تنش لختیتسکی حل کرده‌اند. در ادامه، چاندراشخارا و کومار<sup>۹</sup> (۱۹۹۳)،<sup>[۳]</sup> حل دقیقی برای پوسته‌ی استوانه‌ی ایزوتروف جانبی با طول محدود تحت بار متقارن محوری با استفاده از روش تابع جابه‌جایی ارائه شده توسط الیوت<sup>۱۰</sup> توسعه داده‌اند. شیانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)،<sup>[۴]</sup> تحلیل کشسان سیلاندر چندلایه‌ی توخلالی دو بعدی با مصالح ایزوتروف را براساس حل لامه در حالت کرنش مسطح مطالعه کردن. تعدادی از مشهورترین توابع در مسائل استاتیکی تابع لامه<sup>۱۲</sup> و تابع لاو برای محیط ایزوتروف، لختیتسکی - هو - نوواکی<sup>۱۳</sup> و الیوت برای محیط ایزوتروف جانبی هستند. تابع پتانسیل لختیتسکی - هو - نوواکی برای مصالح ایزوتروف جانبی که در آن محور<sup>۱۴</sup> عمود بر صفحه‌ی ایزوتروفی فرض می‌شود، استفاده می‌شود.<sup>[۵]</sup>

پوسته‌ها از عناصر سازه‌یی معمول در سازه‌های مهندسی، شامل: مخازن تحت فشار، لوله‌ها، سازه‌های نگهدارنده‌ی مایعات و دیگر سازه‌ها هستند.<sup>[۶]</sup> توری‌های مختلفی برای تحلیل پوسته‌های ایزوتروف و غیرایزوتروف وجود دارند که تعدادی از آن‌ها برای پوسته‌های نازک توسعه یافته‌اند و براساس فرضیات سینماتیک کیرشهوف - لاو،<sup>[۷]</sup> که در آن خطوط مستقیم عمود به سطح میانی در پوسته تغییرشکل نیافرماند، بعد از تغییرشکل نیز مستقیم و عمود به سطح میانی باقی می‌مانند، بنا شده است.<sup>[۸]</sup> با استفاده از فرضیات لاو، توری‌های پوسته‌ی متفاوتی توسط پژوهشگران مختلف گشترش یافته است که تعدادی از آن‌ها حالت کلی تری از توری لاو هستند. توری‌های پوسته‌ی تیموشنکو<sup>۲</sup>، دالن<sup>۳</sup>، ساندرس<sup>۴</sup>، فلاگ<sup>۵</sup> و ریسنر-نقدي<sup>۶</sup> برخی از توری‌های مذکور هستند. توری‌های پوسته در فرضیات روابط کرنش - جابه‌جایی با یکدیگر متفاوت هستند، برخی از آن‌ها به دلیل داشتن ترم‌های مرتبه‌ی بالا و یا تغییرشکل‌های برشی و کرشن شعاعی از بقیه دقیق‌تر هستند.<sup>[۲]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۴، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.59265.3039



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

### ۳. معادلات حاکم

قانون هوك تعمیم یافته برای مصالح ایزوتrop جانبی در سیستم مختصات استوانه‌بی به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:<sup>[۱۰]</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_{rr,i} &= A_{11,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{11,i} \frac{u_i}{r} + A_{12,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{\theta\theta,i} &= A_{12,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{11,i} \frac{u_i}{r} + A_{13,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{zz,i} &= A_{13,i} \frac{\partial u_i}{\partial r} + A_{12,i} \frac{u_i}{r} + A_{22,i} \frac{\partial w_i}{\partial z} \\ \sigma_{rz,i} &= A_{22,i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن،  $u_i$  و  $w_i$  به ترتیب مؤلفه‌های تغییرمکان در جهت‌های  $r$  و  $z$  همچنین  $\sigma_{rr,i}$ ،  $\sigma_{\theta\theta,i}$ ،  $\sigma_{zz,i}$  و  $\sigma_{rz,i}$  به مؤلفه‌های تانسور تنش هستند. ضربایر  $A_{11,i}$ ،  $A_{12,i}$ ،  $A_{13,i}$  و  $A_{22,i}$  ثابت‌های کشسانی مصالح ایزوتrop جانبی لایه‌ی  $i$  هستند که برای توصیف خواص کشسانی مصالح موردنیاز هستند. ثابت‌های مذکور به ثابت‌های مهندسی  $E_i$ ،  $v_i$  و  $G'_i$  مرتبه هستند:<sup>[۱۰]</sup>

$$\begin{aligned} A_{11,i} &= \frac{E_i \left( 1 - \frac{E'_i}{E_i} v_i'^2 \right)}{(1 + v_i) \left( 1 - v_i - 2 \frac{E'_i}{E_i} v_i' \right)} \\ A_{12,i} &= \frac{E_i v_i'}{1 - v_i - 2 \frac{E'_i}{E_i} v_i'}, \quad A_{13,i} = G'_i \\ A_{22,i} &= \frac{E'_i (1 - v_i)}{1 - v_i - 2 \frac{E'_i}{E_i} v_i'}, \\ A_{12,i} &= A_{11,i} - 2 A_{66,i}, \quad A_{66,i} = \frac{E_i}{2(1 + v_i)} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $v_i$  و  $E'_i$  به ترتیب معرف مدول یانگ در صفحه‌ی ایزوتropی و در جهت عمود بر آن،  $v_i$  و  $E'_i$  به ترتیب معرف نسبت پواسون در صفحه‌ی ایزوتropی و در جهت عمود بر آن و  $E'_i$  مدول برشی در صفحه‌ی عمود بر صفحه‌ی ایزوتropی هستند. معادلات حرکت بر حسب مؤلفه‌های جابه‌جایی در محیط ایزوتrop جانبی و

اسکندری قادری (۲۰۰۵)،<sup>[۸]</sup> تابع پتانسیل لختیسکی - هو - نواکی را از مسائل کشسان استاتیک به کشسان دینامیک توسعه داد. ایشان مسائل استاتیکی (۲۰۰۹)،<sup>[۹]</sup> و دینامیکی (۲۰۱۰)<sup>[۱۰]</sup> مختلف را برای نیم فضا و فضای ایزوتrop جانبی با استفاده از روش تابع پتانسیل معرفی شده در نوشتاری در سال ۲۰۰۵،<sup>[۸]</sup> حل کردند. نعمت‌زاده و همکاران (۲۰۱۱)،<sup>[۱۱]</sup> تابع پتانسیل لختیسکی - هو - نواکی را با موفقیت برای تحلیل صفحات ایزوتrop جانبی نازک، نسبتاً ضخیم و ضخیم تحت بار استاتیکی دلخواه استفاده کردند. نوائی نیا و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۲]</sup> راه حل سه‌بعدی برای صفحات مستطیلی ضخیم تحت بار متجر<sup>[۱۳]</sup> و حل سه‌بعدی دقیقی برای خمش صفحات مستطیلی ضخیم FGM<sup>[۱۴]</sup> با استفاده از تابع پتانسیل توسعه داده شده در نوشتار اسکندری قادری (۲۰۰۵)،<sup>[۸]</sup> ارائه داده‌اند. چندین کار مرتبط در زمینه‌ی تحلیل سه‌بعدی ارتعاش آزاد و کمانش صفحات مستطیلی توسط نوائی نیا و همکاران انجام شده است.<sup>[۱۵-۱۶]</sup>

در حالی که مطالعات متعددی برای تحلیل سه‌بعدی ورق، فضا و نیم فضا با استفاده از تابع پتانسیل ارائه شده است؛ فقط تعداد محدودی مطالعه در ادبیات مربوط به تحلیل سه‌بعدی پوسته‌ی استوانه‌بی جدار ضخیم چندلایی ایزوتrop و ایزوتrop جانبی بدون فرضیات ساده‌سازی برای توزیع تنش و کرنش در راستای ضخامت وجود دارد. در نوشتار حاضر، با استفاده از تابع پتانسیل لختیسکی - هو - نواکی و تئوری کشسانی سه‌بعدی، پوسته‌ی استوانه‌بی ایزوتrop 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<sup>[۱۴]</sup> معادله دیفرانسیل حاکم پاره‌یی مرتبه‌ی چهار به دست آمده است که به روش جداسازی متغیرها حل و برآسان آن پاسخ‌های مسئله، شامل: جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در هر نقطه از پوسته‌ی مورد بررسی به دست آمده شده 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. مقایسه 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 استوانه‌بی تک‌لایه و چندلایه تحت بار استاتیکی تعریف شده و تأثیر پارامترهای مختلف، نظری میزان غیرایزوتropی و ناهمگنی پوسته و همچنین نسبت ابعادی در توزیع تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها بررسی شده‌اند.

### ۲. بیان مسئله

پوسته‌ی استوانه‌بی با طول  $L$  لایه با خصوصیات مصالح ایزوتrop جانبی کشسان خطی در نظر گرفته شده است. سیلندر استوانه‌بی دارای شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده در دو انتهای پوسته بوده و با رشعاعی متقارن محوری در سطوح داخلی و خارجی پوسته اعمال شده است. ضخامت هر لایه و ضخامت کل پوسته به ترتیب به صورت (۲) معرف شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مسئله در سیستم مختصات استوانه‌بی ( $r, \theta, z$ ) است که در آن محور  $z$  عمود بر صفحه‌ی ایزوتropی، موازی مرز لایه‌ها و محور تقارن رفتاری لایه‌ها فرض شده است.

استوانه را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشت:

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

که در آن،  $q^{in}$  و  $q^{out}$  به ترتیب بارگسترده در سطوح داخلی و خارجی هستند. همچنین شرایط مرزی جابه‌جایی و تنش در سطح مشترک بین لایه‌های  $i+1$  و  $i$  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  $i = 1, 2, \dots, N$  و  $0 < z, L$  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 منظورتابع 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 مستقل 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:

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

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

$$s_{2,i} \neq s_{1,i}$$

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

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

$$\begin{aligned} A_{11,i} \left( \frac{\partial^r u_i}{\partial r^r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial r} - \frac{u_i}{r^r} \right) + (A_{12,i} + A_{21,i}) \frac{\partial^r w_i}{\partial r \partial z} \\ + A_{22,i} \frac{\partial^r u_i}{\partial z^r} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_{22,i} \left( \frac{\partial^r w_i}{\partial r^r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_i}{\partial r} \right) + (A_{12,i} + A_{21,i}) \left( \frac{\partial^r u_i}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \\ + A_{11,i} \frac{\partial^r w_i}{\partial z^r} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

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 تعییرمکان در دستگاه مختصات استوانه‌یی بر حسب تابع پتانسیل  $F_i$  که توسط لختیت‌سکی - هو - نواکی معرفی شده است، به صورت رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

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

که در آن، مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \alpha_{1,i} &= \frac{A_{66,i} + A_{12,i}}{A_{66,i}}, \quad \alpha_{2,i} = \frac{A_{22,i}}{A_{66,i}}, \\ \alpha_{2,i} &= \frac{A_{22,i} + A_{12,i}}{A_{66,i}}, \quad \beta_i = \frac{\alpha_{2,i}}{1 + \alpha_{1,i}}, \end{aligned} \quad (6)$$

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، از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

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

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.

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

## 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

## ۶. ارضا شرایط مرزی و پیوستگی

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

$$\begin{aligned} q(z) &= \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{q}_m = \sum_{m=1}^{\infty} q_m \sin \frac{m\pi z}{L} \\ q_m &= \frac{2}{L} \int_0^L q(z) \sin \frac{m\pi z}{L} dz \end{aligned} \quad (24)$$

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:

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

که در آن، بالاپویس  $T$  معرف ترانهاده 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:

$$x_i^{in} = \left\{ U_{m,i}(r_*, z) W_{m,i}(r_*, z)^\circ - \tilde{q}^{in} \right\}^T \quad (26)$$

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

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

$$x_i = M_i(r, z) \{c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i}\}^T \quad (28)$$

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:

$$x_i^{in} = M_i(r_{i-1}, z) \{c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i}\}^T \quad (29)$$

$$x_i^{out} = M_i(r_i, z) \{c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i}\}^T \quad (30)$$

از رابطه‌ی ۳۰، بردار مجھولات  $\{c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i}\}^T$  به صورت رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید:

$$\{c_{1,i} \ c_{2,i} \ c_{3,i} \ c_{4,i}\}^T = M_i^{-1}(r_i, z) x_i^{out} \quad (31)$$

با جایگذاری ضرایب مجھول 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:

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

اگر  $s_{1,i} = s_{4,i}$ :

$$\begin{aligned} R_{m,i} &= c_{1,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) + c_{4,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ &+ c_{1,i} r I(1, \gamma_m r / s_{1,i}) + c_{4,i} r K(1, \gamma_m r / s_{1,i}) \end{aligned} \quad (25)$$

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

اگر  $s_{2,i} \neq s_{1,i}$ :

$$\begin{aligned} F_i(r, z) &= \sum_{m=1}^{\infty} \cos \gamma_m z (c_{1,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ &+ c_{4,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) + c_{1,i} r I(1, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ &+ c_{4,i} r K(1, \gamma_m r / s_{1,i})) \end{aligned} \quad (26)$$

اگر  $s_{2,i} = s_{1,i}$ :

$$\begin{aligned} F_i(r, z) &= \sum_{m=1}^{\infty} \cos \gamma_m z (c_{1,i} I(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ &+ c_{4,i} K(\circ, \gamma_m r / s_{1,i}) + c_{1,i} r I(1, \gamma_m r / s_{1,i}) \\ &+ c_{4,i} r K(1, \gamma_m r / s_{1,i})) \end{aligned} \quad (26)$$

که در آن‌ها،  $c_{1,i}, c_{2,i}, c_{3,i}, c_{4,i}$  و  $\gamma_m$  ثابت‌های مجھول 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 ازاء  $p = 1, 2, \dots, j$  به ترتیب توابع بسل اصلاح شده‌ی نوع اول و دوم از مرتبه‌ی  $p$  هستند. با جایگذاری رابطه‌ی ۱۶ در رابطه‌ی ۵ و ارضا 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 ۱۰، مؤلفه‌های جابه‌جایی و تتش 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  $S_{rr m,i}(r, z), S_{\theta\theta m,i}(r, z), S_{zz m,i}(r, z), S_{rz m,i}(r, z)$  و  $S_{zz m,i}(r, z)$  روابطی هستند که در پیوست ارائه شده‌اند.

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

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

که در آن،  $1, \dots, N-1 = n$  با جایگذاری ضرایب مجهول در معادله‌های ۱۸، ۲۳، مؤلفه‌های جابه‌جایی و تنش پوسته‌ی استوانه‌ی ایزوتروپ جانبی ناممگن 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

### ۱. راستی آزمایی

به منظور راستی آزمایی روابط به دست آمده در پژوهش حاضر و نیز تکریل محاسبات، نتایج عددی حاصل از روش استفاده شده در پژوهش حاضر، با نتایج منتشر شده در نوشتار چاندراسخارا و همکاران [۱۹۹۳] برای پوسته‌ی استوانه‌ی تکلایه و سلایه با مصالح ایزوتروپ جانبی تعریف شده در نوشتار اخیر و تحت بارگذاری سینوسی متقارن محوری در سطح خارجی باشد.<sup>۱۰</sup> مقایسه شده است. در بخش حاضر، به منظور مقایسه‌ی نتایج از رابطه‌ی ۴۵ برای بی‌بعد کردن مؤلفه‌ی جابه‌جایی و تنش استفاده شده است.

$$\bar{u} = \frac{100 \times 10^{10}}{q_0 h \left(\frac{R}{h}\right)^4},$$

$$(\bar{\sigma}_{ZZ}, \bar{\sigma}_{\theta\theta}) = \frac{1}{q_0 \left(\frac{R}{h}\right)^4} (\sigma_{ZZ}, \sigma_{\theta\theta}) \quad (45)$$

در جدول ۱، نتایج پوسته‌ی استوانه‌ی تکلایه برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی و  $L = R$  در محدوده‌ی پوسته‌ی استوانه‌ی جدار ضخیم تا خیلی نازک مشاهده می‌شود که مطابق آن، حدوداً  $2/5$  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 استوانه‌ی سلایه با ضخامت متفاوت لایه‌ها  $L = R$  و  $h_1 = 2h_2 = 3h_3 = 2h_4$  برای نسبت‌های مختلف ضخامت کل به شعاع میانی پوسته ارائه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده با نوشتار چاندراسخارا و همکاران [۱۹۹۳]<sup>۱۱</sup> اختلاف حدوداً  $5/10\%$  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 شده اختلاف کاسته شده است.

علاوه بر این، به منظور راستی آزمایی، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS-Implicit نسخه‌ی ۲۰۲۰ C3D8R مقایسه شده است. برای این منظور، در مدل سازی اجزاء محدود از جزء  $\epsilon$  که جزء ۸ گرهی 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 مشنوندی، آنالیز حساس‌صورت گرفته است، که به عنوان مثال، نمونه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ی تکلایه با  $h/R = 0/01$  شامل  $172000$  جزء است که در نمونه‌های دیگر به تناسب ابعاد

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:

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

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

$$\begin{aligned} \{U_{m,1}(r_0, z) W_{m,1}(r_0, z)^\circ - \tilde{q}^{in}\}^T \\ = T_1 \dots T_N M_N(r_N, z) \{c_{1,N} & c_{\tau,N} & c_{\tau,N} & c_{\tau,N}\}^T \end{aligned} \quad (37)$$

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:

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

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

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

که می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۴۲ نیز بیان شود:

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

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

$$\begin{bmatrix} G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \\ \bar{M}_{N,11} & \bar{M}_{N,12} & \bar{M}_{N,13} & \bar{M}_{N,14} \\ \bar{M}_{N,21} & \bar{M}_{N,22} & \bar{M}_{N,23} & \bar{M}_{N,24} \\ \bar{M}_{N,31} & \bar{M}_{N,32} & \bar{M}_{N,33} & \bar{M}_{N,34} \\ \bar{M}_{N,41} & \bar{M}_{N,42} & \bar{M}_{N,43} & \bar{M}_{N,44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1,N} \\ c_{\tau,N} \\ c_{\tau,N} \\ c_{\tau,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ -\tilde{q}^{in} \\ \vdots \\ -\tilde{q}^{out} \end{bmatrix} \quad (43)$$

جدول ۱. مقایسه‌ی تنش‌ها و جابه‌جایی‌های بی‌بعد در وسط دهانه برای پوسته‌ی استوانه‌ی تک‌لایه‌ی ایزوتربوپ 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	$h/R$
-۰/۲۲۱۶	-۰/۱۱۷۲	-۱/۰۶۷۳	۰/۸۸۵۸	-۷/۶۱۲۵	[۵]	
-۰/۲۱۴۵	-۰/۱۲۳۶	-۰/۹۲۴۸	۰/۷۸۸۲	-۷/۵۹۵۱	المان محدود	۰/۵
-۰/۲۲۴۲	-۰/۱۱۷۱	-۱/۰۶۰۹	۰/۸۸۶۱	-۷/۵۹۰۴	کار حاضر	
-۰/۰۸۷۶	-۰/۰۶۴۲	-۰/۴۸۳۹	۰/۵۱۱۵	-۱/۸۸۳۰	[۵]	
-۰/۰۸۴۸	-۰/۰۶۷۸	-۰/۴۴۵۴	۰/۴۷۲۳	-۱/۸۸۳۹	المان محدود	۰/۲
-۰/۰۸۸۰	-۰/۰۶۴۰	-۰/۴۸۳۰	۰/۵۱۱۲	-۱/۸۸۰۴	کار حاضر	
-۰/۰۶۴۸	-۰/۰۵۴۲	-۰/۲۸۰۴	۰/۲۹۱۸	-۰/۷۹۴۲	[۵]	
-۰/۰۶۳۱	-۰/۰۵۶۳	-۰/۲۵۷۴	۰/۲۶۸۳	-۰/۷۹۳۷	المان محدود	۰/۱
-۰/۰۶۴۹	-۰/۰۵۴۱	-۰/۲۸۰۲	۰/۲۹۱۷	-۰/۷۹۱۸	کار حاضر	
-۰/۰۴۳۹	-۰/۰۳۹۹	-۰/۱۱۳۲	۰/۱۱۵۶	-۰/۲۸۳۹	[۵]	
-۰/۰۴۳۲	-۰/۰۴۰۷	-۰/۱۰۴۵	۰/۱۰۶۸	-۰/۲۸۴۱	المان محدود	۰/۰۵
-۰/۰۴۳۹	-۰/۰۳۹۹	-۰/۱۱۳۱	۰/۱۱۵۶	-۰/۲۸۳۸	کار حاضر	
-۰/۰۱۹۹	-۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۲۲	-۰/۰۵۳۰	[۵]	
-۰/۰۱۹۶	-۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۰۶	۰/۰۲۰۷	-۰/۰۵۳۰	المان محدود	۰/۰۲
-۰/۰۱۹۹	-۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۲۲	-۰/۰۵۳۰	کار حاضر	
-۰/۰۱۰۰	-۰/۰۰۹۹	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۷	-۰/۰۱۳۶	[۵]	
-۰/۰۱۰۰	-۰/۰۰۹۹	-۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۰	-۰/۰۱۳۵	المان محدود	۰/۰۱
-۰/۰۱۰۰	-۰/۰۰۹۹	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۷	-۰/۰۱۳۶	کار حاضر	

در شکل‌های ۲ و ۳، تغییرات توابع تنش بی‌بعد ( $r, z$ ) بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد ( $\frac{r-r}{r_N-r} = \bar{r}$ ) را برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی پوسته‌ی استوانه‌ی بی به ترتیب برای مصالح گرافیت اپوکسی و زینک در  $L/z = L/R$  مشاهده می‌شوند. مقادیر عددی نسبت‌های  $h/R$  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 ( $r, z$ ) بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد برای نسبت‌های مختلف ضخامت به شعاع میانی پوسته‌ی استوانه‌ی بی به ترتیب برای مصالح گرافیت اپوکسی و زینک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، بزرگی تابع تنش ( $r, z$ ) رابطه‌ی معکوس با افزایش ضخامت پوسته دارد.

در شکل ۶، تغییرات توابع تنش بی‌بعد ( $r, z$ ) بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد برای مصالح جدول ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین و کمترین تنش ( $r, z$ ) به ترتیب مربوط به گرافیت اپوکسی و زینک بوده و برای همه‌ی مصالح معرفی شده، مقدار تابع در حوالی  $55^\circ = \bar{r}$  تغییر علامت داده است.

در شکل ۷، تغییرات تابع جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد ( $r, z$ ) 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.

## ۷. نتایج و بحث

پوسته‌ی استوانه‌ی تک‌لایه: مقادیر بی‌بعد مؤلفه‌های تنش و جابه‌جایی برای ماده‌ی ایزوتربوپ جانبی، شامل: گرافیت اپوکسی و زینک و همچنین ماده‌ی ایزوتربوپ آلومینیوم محاسبه شده است. ثابت‌های کشسان مصالح ذکر شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در بخش حاضر، تابع بی‌بعد ذکر شده برای پوسته‌ی استوانه‌ی بی تحت بارگذاری فشار خارجی یکنواخت متقاضن محوری برای مصالح فهرست شده در جدول ۳ به طور عددی ارزیابی شده است. برای حالتی که پوسته تحت بار فشاری یکنواخت در سطح خارجی خود قرار دارد، تابع بارگذاری به صورت رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود:

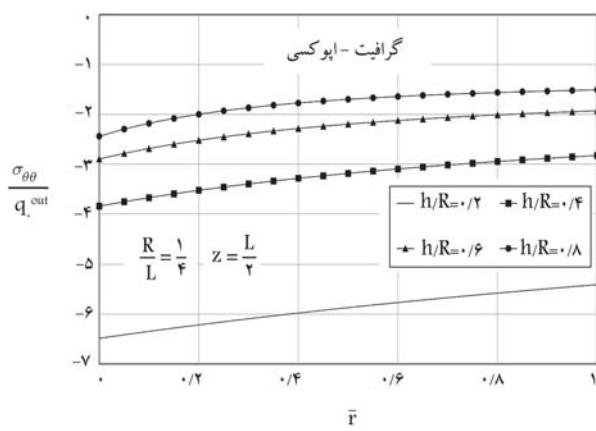
$$q^{out}(z) = q^{out}, \quad 0 < z < l \quad (46)$$

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

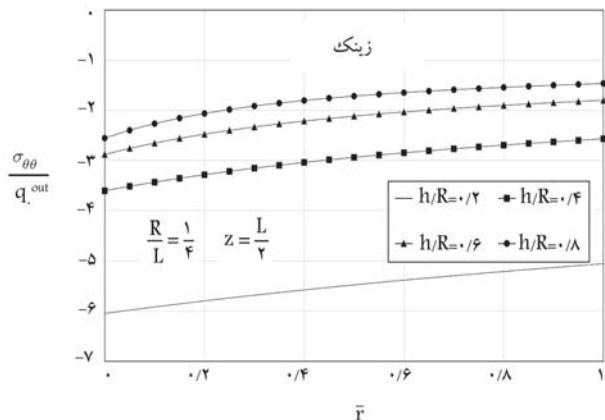
$$q^{out}(z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4q^{out}}{m\pi} \sin \frac{m\pi z}{L} \quad (47)$$

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

$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_1}$	$\bar{\sigma}_{\theta\theta} _{r=r_c}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_1}$	$\bar{\sigma}_{zz} _{r=r_c}$	$\bar{u} _{r=R}$	مرجع	$h/R$
-۰/۰۸۱۹	-۰/۰۵۹۶	-۰/۴۷۵۸	۰/۴۷۲۸	-۱/۷۴۹۸	[۵] السان محدود کار حاضر	
-۰/۰۸۰۲	-۰/۰۶۳۷	-۰/۴۴۳۹	۰/۴۵۴۵	-۱/۷۷۰۴		
-۰/۰۸۲۶	-۰/۰۵۹۵	-۰/۴۷۶۶	۰/۴۷۲۹	-۱/۷۴۷۴		
-۰/۰۵۸۲	-۰/۰۴۸۴	-۰/۲۶۲۷	۰/۲۵۴۱	-۰/۷۰۶۲	[۵] السان محدود کار حاضر	
-۰/۰۵۷۷	-۰/۰۵۱۰	-۰/۲۵۱۶	۰/۲۴۵۴	-۰/۷۱۹۹		
-۰/۰۵۸۵	-۰/۰۴۸۴	-۰/۲۶۳۲	۰/۲۵۴۰	-۰/۷۰۶۵		
-۰/۰۳۷۰	-۰/۰۳۳۴	-۰/۰۹۷۶	۰/۹۵۳	-۰/۲۳۸۵	[۵] السان محدود کار حاضر	
-۰/۰۳۷۴	-۰/۰۳۵۲	-۰/۰۹۳۶	۰/۰۹۱۸	-۰/۲۵۵۴		
-۰/۰۳۷۱	-۰/۰۳۳۶	-۰/۰۹۷۹	۰/۰۹۵۲	-۰/۲۳۸۶		



شکل ۴. تغییرات تنش محیطی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌بی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



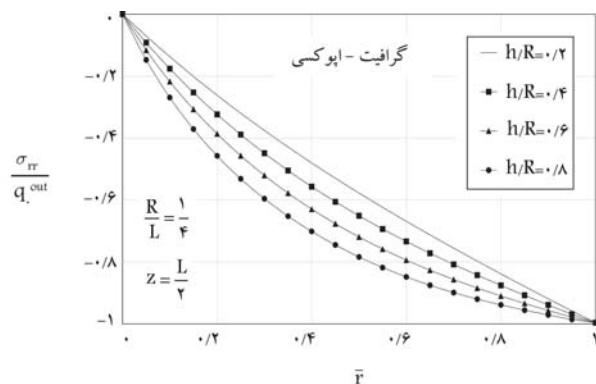
شکل ۵. تغییرات تنش محیطی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌بی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.

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

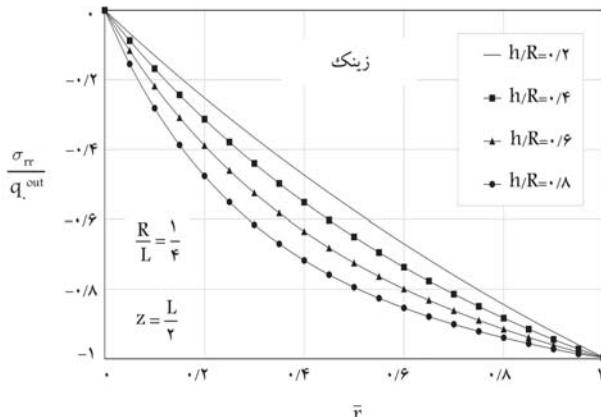
در شکل ۸، تغییرات تابع جابه‌جایی محوری بی بعد ( $w(r, z)$ ) در امتداد محور  $z$

جدول ۳. تابع‌های کشسانی مصالح (GPa).

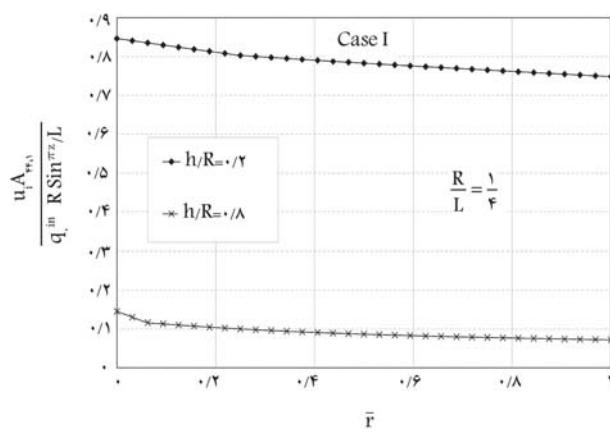
$A_{44}$	$A_{33}$	$A_{12}$	$A_{12}$	$A_{11}$	مصالح
۷/۰/۷	۱۶۰/۷	۸/۴۴	۶/۹۲	۱۳/۹۲	گرافیت - اپوکسی
۴۰	۶۱/۶	۴۷/۴۴	۳۱/۵۱	۱۵۸/۳۵	زنک
۲۵/۹۴	۱۰۲/۲۳	۵۰/۳۵۴	۵۰/۳۵۴	۱۰۲/۲۳	آلومینیوم



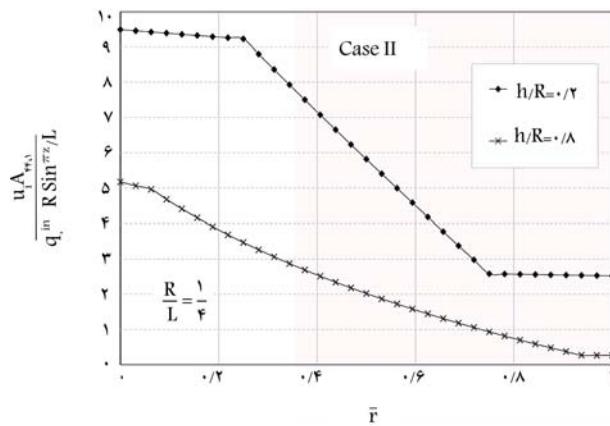
شکل ۲. تغییرات تنش شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌بی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



شکل ۳. تغییرات تنش شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌بی بر حسب فاصله‌ی شعاعی برای نسبت‌های مختلف ضخامت.



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



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

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

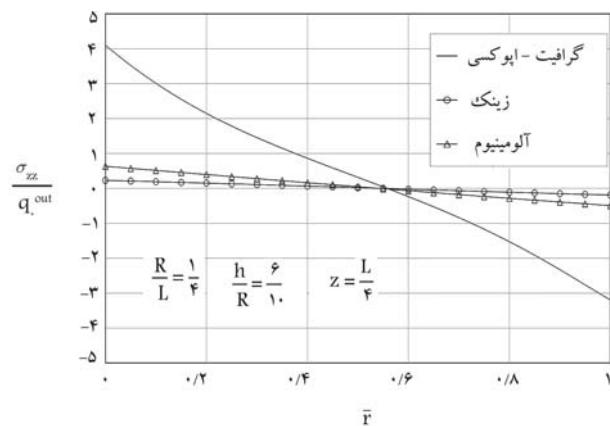
پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه تحت بارگذاری شعاعی سینوسی متقارن محوری در کل سطح داخلی خود قرار دارد و بنابراین تابع بارگذاری را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۴۸ بیان کرد:

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

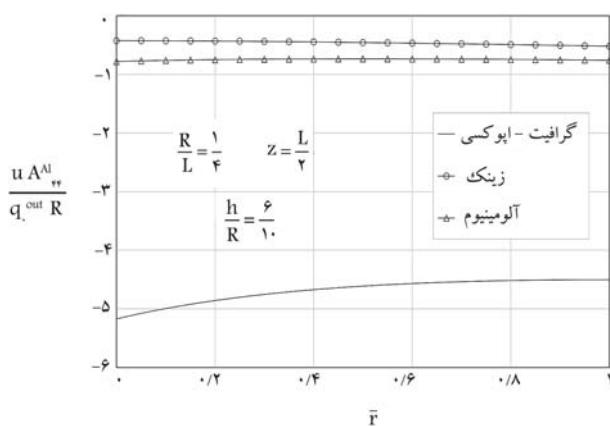
با استفاده از معادله‌ی ۲۷، ضریب بارگذاری در فضای فوریه به فرم رابطه‌ی ۴۹ به دست می‌آید:

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

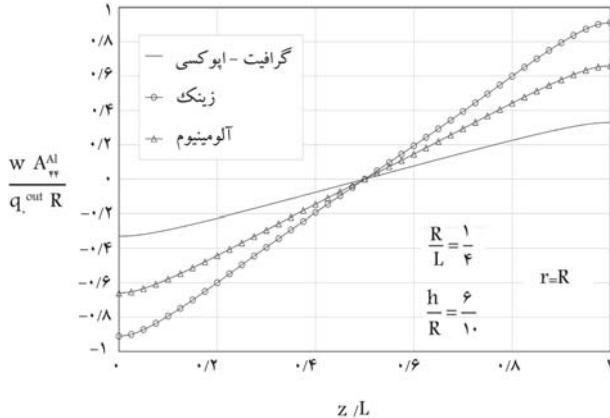
در شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات تابع جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته به ترتیب برای حالت‌های Case I و Case II مشاهده



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



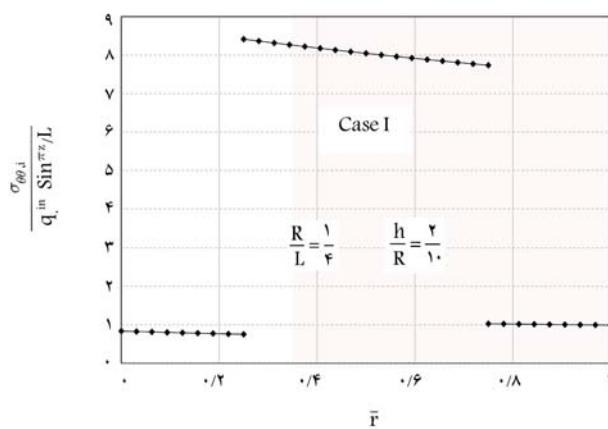
شکل ۷. تغییرات جابه‌جایی شعاعی بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ی برای مصالح مختلف.



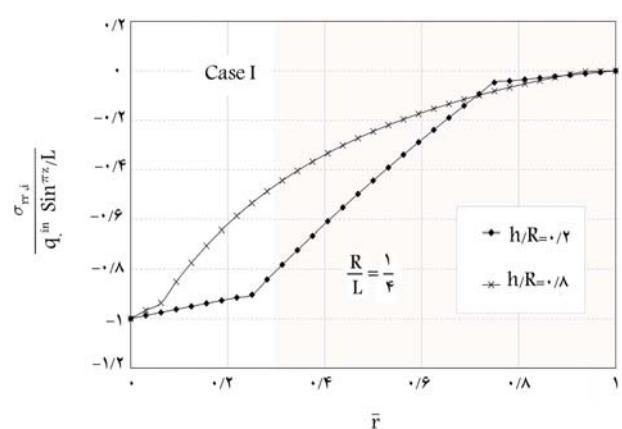
شکل ۸. تغییرات جابه‌جایی محوری بی‌بعد بر حسب فاصله‌ی طولی بی‌بعد پوسته‌ی استوانه‌ی برای مصالح مختلف.

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

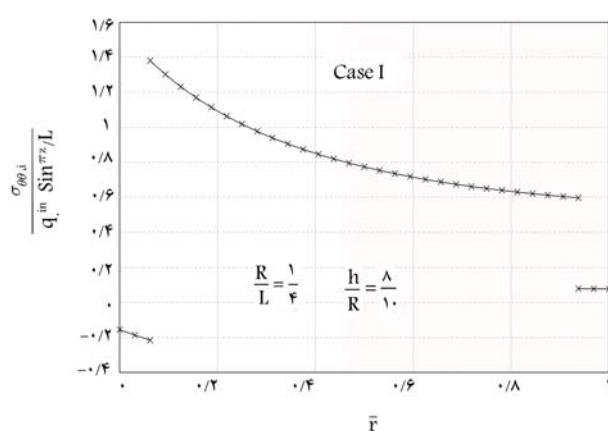
- پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه: در بخش حاضر، نتایج حاصل از پژوهش برای پوسته‌ی



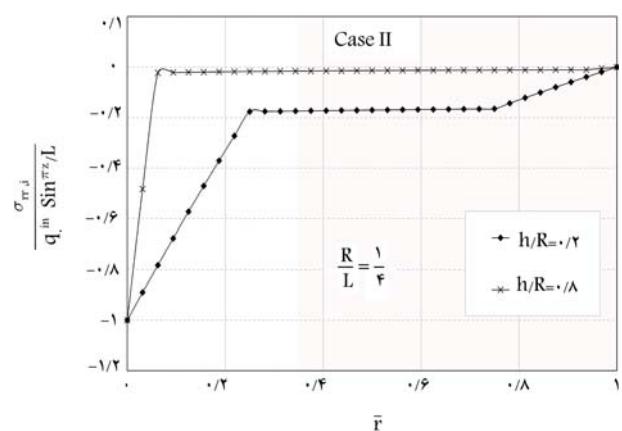
شکل ۱۳. تغییرات تنش محیطی بی بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه.



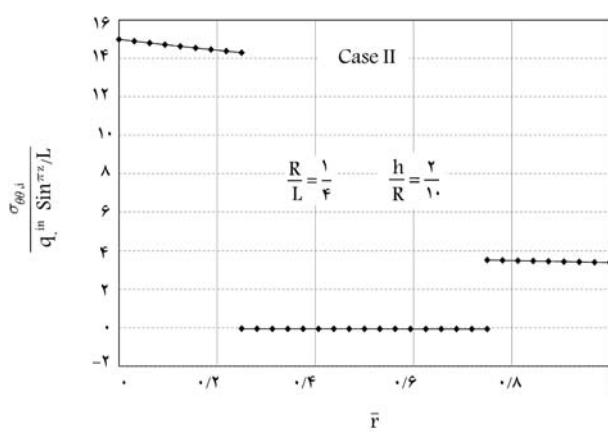
شکل ۱۱. تغییرات تنش شعاعی بی بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه.



شکل ۱۴. تغییرات تنش محیطی بی بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه.



شکل ۱۲. تغییرات تنش شعاعی بی بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه.



شکل ۱۵. تغییرات تنش محیطی بی بعد بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد پوسته‌ی استوانه‌ی سه لایه.

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

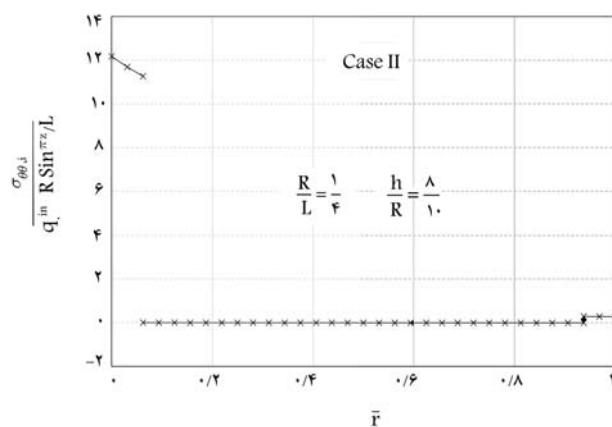
جدول ۴. ترکیب مصالح در لایه‌های مختلف پوسته سه لایه.

نوع	لایه
Case I	۱
گرافیت - اپوکسی	آلومینیوم
گرافیت - اپوکسی	فوم پلی اورتان*
$A_{11} = A_{22} = 18,846 \text{ MPa}$ , $A_{12} = A_{21} = 17,077 \text{ MPa}$ , $A_{44} = A_{66} = 5,385 \text{ MPa}$ , $\rho = 55 \text{ kg/m}^3$	گرافیت - اپوکسی

می‌شود که مطابق منحنی‌ها با افزایش ضخامت پوسته، مقدار جابه‌جاوی کاهش یافته است. همچنین در Case I، بزرگی جابه‌جاوی 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 مشاهده در شکل‌های ۹ و ۱۰، تأثیر زیاد جنس لایه‌ی میانی را در جابه‌جاوی شعاعی پوسته نشان می‌دهد؛ به طوری که در Case II، بزرگی جابه‌جاوی در بعضی نقاط حدوداً ۵۰٪ برابر نقاط مرتبط در Case I بوده است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات تابع تنش شعاعی بی بعد  $\sigma_{rr,j}$  بر حسب فاصله‌ی شعاعی بی بعد 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 استوانه‌یی با تکیه‌گاه ساده با مصالح ایزوتربوپ جانبی کشسان خطی ارائه شده است. پوسته‌ی استوانه‌یی تحت فشار استاتیکی قرار داشته و با ارضاء شرایط مرزی به طور 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 پوسته‌تگی تنش و جابه‌جایی، تحلیل برای پوسته‌ی استوانه‌یی چندلایه گسترش داده شده است. در پژوهش حاضر، هیچ فرضیات ساده‌شونده‌یی در رابطه با توزیع تنش و کرنش در راستای ضخامت وجود نداشته است و بنابراین از آن می‌توان برای پوسته‌های جدار نارک 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 ارائه شده را برای پارامترهای مصالح مختلف، نسبت ضخامت و نسبت ابعادی مختلف پوسته نشان می‌دهد. همچنین تأثیر تغییر در هندسه، مصالح، و نوع بارگذاری به طور عددی برای چند نوع مصالح پوسته‌ی ایزوتربوپ و ایزوتربوپ جانبی با مقادیر متفاوت و برای پوسته‌ی استوانه‌یی یک و سه لایه‌ی غیرایزوتربوپ محاسبه و به شکل نمودارهای ظاهر شده است، که در کلیه‌ی نتایج شرایط مرزی در دو انتها، سطوح بیرونی و داخلی پوسته و فصل مشترک بین لایه‌ها به طور کامل و دقیق ارضاء شده است.



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

## ۸. نتیجه‌گیری

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

## پانوشت‌ها

1. Kirchhoff-Love
2. Timoshenko
3. Donnell
4. Sanders
5. Flugge
6. Reissner-Naghdi
7. Iyengar
8. Chandrashekara
9. Kumar
10. Elliott
11. Xiang
12. Lame
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. Chandrashekara, 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. Chandrashekara, 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. Chandrashekara, 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 Ardeshir-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 Ardeshir-Behrestaghi, A. "Transversely isotropic elastodynamic solution of a finite layer on an infinite subgrade under surface loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(12), pp. 986-1003 (2008).
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 Ardestir-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. Nematizadeh, 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:

### پیوست

$$\kappa_{j,i} = \gamma_m A_{\text{v},i} \alpha_{\text{r},i} \frac{\gamma_m^r}{s_{j,i}^r} + \gamma_m^r A_{\text{v},i} \alpha_{\text{r},i}, \quad j = 1, 2$$

$$\begin{aligned} S_{\theta\theta m,i}(r,z) = & \sin \gamma_m z [\xi_{\text{v},i} (c_{\text{v},i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i})) \\ & + c_{\text{r},i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i})] \\ & + \xi_{\text{r},i} (c_{\text{r},i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) + c_{\text{t},i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i})) \\ & + \frac{r}{r} A_{\text{rr},i} \alpha_{\text{r},i} \gamma_m (c_{\text{v},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \\ & + c_{\text{r},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \\ & + c_{\text{r},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) + c_{\text{t},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i})) ] \end{aligned}$$

که در آنها:

$$\xi_{j,i} = (A_{\text{v},i} \alpha_{\text{r},i} - A_{\text{v},i} (\text{v} + \alpha_{\text{v},i})) \\ + \frac{\gamma_m^r}{s_{j,i}^r} + \gamma_m^r A_{\text{v},i} \alpha_{\text{r},i}, \quad j = 1, 2$$

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

$$\varphi_{j,i} = A_{\text{v},i} \alpha_{\text{r},i} \frac{\gamma_m^r}{s_{j,i}^r} - A_{\text{rr},i} \gamma_m^r \\ (\text{v} + \alpha_{\text{v},i}) \left( \frac{1}{s_{j,i}^r} - \beta_i \right), \quad j = 1, 2$$

$$\begin{aligned} S_{rz m,i}(r,z) = & A_{\text{rr},i} \cos \gamma_m z \left[ \varsigma_{\text{v},i} \left( c_{\text{v},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \right. \right. \\ & \left. \left. + c_{\text{r},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \right) \right] + \varsigma_{\text{r},i} \left( c_{\text{r},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) \right. \\ & \left. + c_{\text{t},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) \right) \right] \end{aligned}$$

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

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

$$\left[ c_{\text{v},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) + c_{\text{r},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \right]$$

$$+ c_{\text{r},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) + c_{\text{t},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) \Big]$$

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

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

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

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

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

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

$$+ \kappa_{\text{r},i} (c_{\text{r},i} I(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i}) + c_{\text{t},i} K(\circ, \gamma_m r / s_{\text{r},i})) \Big]$$

$$- \frac{r}{r} A_{\text{rr},i} \alpha_{\text{r},i} \gamma_m (c_{\text{v},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i})$$

$$+ c_{\text{r},i} K'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) + c_{\text{t},i} I'(\circ, \gamma_m r / s_{\text{v},i}) \Big)$$

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

$$\begin{aligned}
 & \kappa_{\tau,i} = r\kappa_{\vee,i} + \frac{\gamma}{r}\gamma_m(A_{\theta,i}\alpha_{\vee,i} - A_{\tau,i}) \\
 S_{\theta m,i}(r,z) &= \sin\gamma_m z [\xi_{\vee,i}(c_{\vee,i}I(\circ, \gamma_m r/s_{\vee,i}) \\
 &+ c_{\tau,i}K(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) \\
 &+ \xi_{\tau,i}(c_{\tau,i}I(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}K(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) \\
 &+ \frac{\gamma}{r}\gamma_m A_{\theta,i}\alpha_{\tau,i}(c_{\vee,i}I'(\circ, \gamma_m r/s_{\vee,i}) + c_{\tau,i}K' \\
 &(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) + \gamma_m((A_{\tau,i} + A_{\vee,i})\alpha_{\tau,i} \\
 &- \gamma A_{\tau,i}(\gamma + \alpha_{\tau,i})) \\
 &(c_{\tau,i}I'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}K'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}))] \\
 & \vdots \text{در آنها:} \\
 & \xi_{\tau,i} = r\xi_{\vee,i} + \frac{\gamma}{r}\gamma_m(A_{\vee,i} + A_{\tau,i})\alpha_{\tau,i} - \frac{\gamma}{r}\gamma_m A_{\tau,i} \\
 S_{zzm,i}(r,z) &= \sin\gamma_m z [\varphi_{\vee,i}(c_{\vee,i}I(\circ, \gamma_m r/s_{\vee,i}) \\
 &+ c_{\tau,i}K(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) \\
 &+ \varphi_{\tau,i}(c_{\tau,i}I(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}K(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) \\
 &+ \gamma_m(A_{\tau,i}\alpha_{\tau,i} - A_{\tau,i}(\gamma + \alpha_{\tau,i})) \\
 &(c_{\tau,i}I'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}K'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}))] \\
 & \vdots \text{در آنها:} \\
 & \varphi_{\tau,i} = r\varphi_{\vee,i} + \frac{\gamma}{r}\gamma_m(A_{\tau,i}\alpha_{\tau,i} - A_{\tau,i}(\gamma + \alpha_{\tau,i})) \\
 S_{rzmn,i}(r,z) &= A_{\tau,i}\cos\gamma_m z [\varsigma_{\vee,i}(c_{\vee,i}I'(\circ, \gamma_m r/s_{\vee,i}) \\
 &+ c_{\tau,i}K'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) + (\gamma_m \frac{A_{\tau,i}}{A_{\theta,i}} + \frac{\gamma_m^{\tau}}{s_{\tau,i}^{\tau}}(\gamma + \alpha_{\tau,i})). \\
 &(c_{\tau,i}rI'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}rK'(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i})) \\
 &+ \varsigma_{\tau,i}(c_{\tau,i}I(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}) + c_{\tau,i}K(\circ, \gamma_m r/s_{\tau,i}))] \\
 & \vdots \text{در آنها:} \\
 \varsigma_{\tau,i} &= \varsigma_{\vee,i} + \frac{\gamma_m^{\tau}}{s_{\tau,i}^{\tau}}(\gamma + \alpha_{\tau,i})
 \end{aligned}$$

# ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌بی در پناهگاه تعجیلی

فرزاد امیری هنزا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد فیاض\* (استادیار)

محسن امین رعایا (دروزه‌شگر)

دانشکده‌ی مهندسی و پدآفند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مهندسي عمليات شرف، (پيش ۱۴۰۱) ۱/۳-۲، شماره‌ی ۱۵-۱۷، (پژوهشي)

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 وارد 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 نرم افزار المان محدود مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود در مقیاس ماقر و مزو با نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مختلف مقایسه شده است که نشان‌دهنده صحت مطالعه‌ی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف با مقاومت کششی بیشتر هم‌مان با آفرایش مدول یانگ و سختی، عملکرد بهتری در برابر بارهای وارد 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، نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، پناهگاه تعجیلی.

## ۱. مقدمه

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 غیرمنتقبه 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 سرپناه‌ها 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 بتی (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 بتی (برای اختصار CC)، یک پارچه‌ی انعطاف‌پذیر آغشته به پودر سیمان است که هنگام آبرسانی سخت می‌شود تا یک لایه‌ی بتی 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 آلومینیانی را در بتن پارچه‌بی برای دستیابی به مقاومت بیشتر، گیرش سریع تر و بهبود خصوصیات مکانیکی محصول بررسی کردند. ایشان اضافه کردن

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

\* نویسنده مسئول  
تاریخ: دریافت ۲۷ اکتبر ۱۴۰۰، اصلاحیه ۲، ۳۱، ۱۴۰۱، ۳/۳۱، 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 تخلخل بالا ناشی از کاهش قابل توجه سیمان داخل پارچه، بتن پارچه‌یی و مصرف زیاد آب اضافه شده است.<sup>[۱]</sup> حسین و مگوید<sup>۶</sup> (۲۰۱۶)، برای تجزیه و تحلیل ساختار دیوار حائل متنشکل از بتن پارچه‌یی، از روش مدل‌سازی اجزاء محدود استفاده کردند.<sup>[۲]</sup> سیستم دیواری حائل خاک مسلح که توسعه زارینگ<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 بارکشی در لایه‌ی عامل تقویتی هم به تغییرات شرایط مرزی بسیار حساس است. به عنوان مثال، تغییر نوع آرماتور، شرایط خاک و پژوهش‌هایی در زمینه‌ی اندرکش خاک و ژئوگرد تحت بارهای بیرون کشیدگی انجام شده است.<sup>[۸]</sup>

به منظور مدل‌سازی عددی رفتار بتن پارچه‌یی در شرایط مختلف، شناخت ویژگی‌های مکانیکی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن پارچه‌یی ضروری است. مدل‌سازی برای تحلیل و طراحی بتن که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا مزووسکوپی (میان‌مقیاس) انجام می‌شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی سازه‌های بتن پارچه‌یی تعیین رفتار غیرخطی است. در نرم افزار آباکوس برای درنظر 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 ترک خودگی کششی و خرد شدن فشاری در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. در ترک خودگی کششی در اثر کشش تک محوره، منحنی تنش - کرنش تا نقطه‌ی تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند از عبور از نقطه‌ی تنش خرابی، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند که به صورت منحنی نرم‌شوندگی در فضای تنش - کرنش نمایش داده می‌شوند.<sup>[۱۱]</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، طراحی CC را با هدف ساختار مقاوم‌سازی خاک بررسی کردند و دریافتند که جابه‌جایی افقی پارچه‌یی بتنی (CC) کمی بزرگ است. همچنین مطالعات مختلفی در مورد پاسخ لوله‌های مدفون و مقاوم‌سازی مجدد آن‌ها در برابر انفرادها انجام داده و پاسخ مکانیکی خط لوله‌ی دفن شده برای انفارهای داخلی را بررسی کردند. به منظور بررسی پاسخ فشار - تنش در خطوط لوله‌ی مدفون با فشار داخلی تحت انفعال سطح، محاسبات عددی یک لوله‌ی مدفون با فشار داخلی بررسی و پاسخ دینامیکی یک خط لوله‌ی دفن شده پس از انفعال سطح شیوه‌سازی شد و نتایج نشان داد که بیشینه‌ی درصد تنش و کرنش خمیری در قسمت بالای خط لوله‌ی مدفون منتقل شده است.<sup>[۱۲]</sup>

زانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، اولین بار رفتار مکانیکی بتن پارچه‌یی تقویت شده با FRP<sup>۱۳</sup> را به طور آزمایشی با استفاده آزمایش‌های کششی و خمشی بررسی کردند و دریافتند که بتن پارچه‌یی تقویت شده با FRP از نظر رفتار مکانیکی پیش‌رفت قابل توجهی را نشان می‌دهد. مقاومت کششی بتن پارچه‌یی با تقویت کششی<sup>۱۴</sup> AFRP<sup>۸/۷۶</sup> به ۸/۷۲ مگاپاسکال در جهت تار و ۸/۷۶ مگاپاسکال در جهت پود در می‌رسد که به ترتیب حدود ۶ و ۹ برابر بیشتر از بتن پارچه‌یی 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 خممشی بتن پارچه‌یی 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 پارچه‌یی، آن را برای کاربرد در حفاظت از شیب مناسب می‌سازد.<sup>[۱۵]</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.

جان<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، اخیراً بر روی تقویت بتن پارچه‌یی کار کرده و در یافته‌اند که بتن پارچه‌یی، کاربردی گستردۀ و پتانسیل کاربردی بسیار زیادی در حفاظت از چادرها و پناهگاه‌های اضطراری، تعمیر اضطراری و ساخت روسازی فروندگاه، 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 سازنده بتن پارچه‌یی، تقویت بتن پارچه‌یی توسط FRP با پیوند خارجی.<sup>[۱۸]</sup>

## ۲. روش مطالعه

در پژوهش حاضر، از مدل رفتاری خمیری آسیب‌دیده 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 خم شدگی سنجیده می‌شود. آزمایش خمش چهارنقطه‌یی همانند آزماش خمش سه نقطه‌یی است، با این تفاوت که به جای یک سنبه از دو سنبه جهت اعمال نیرو استفاده می‌شود، که فاصله‌ی سنبه‌ها از دو طرف با تکیه‌گاه‌های نزدیک خود برابر است. بیشترین یا بیشینه‌ی تنش خمشی در سنداهن بازگذاری در آزمون‌های خمشی در آزمایش خمش سه نقطه‌یی برابر است. در آزمون‌های خمش چهارنقطه‌یی، بیشینه‌ی تنش خمشی بر روی بخش تیر بین نقاط بازگذاری پخش می‌شود. همچنین، در مواردی که مواد یکدست هستند، مانند مواد پلاستیکی، آزمایش خمش سه نقطه‌یی 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 سه نقطه‌یی 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، STM-۲۰ SANTAM در آزمایشگاه علوم رازی انجام شده است (شکل ۱).

عملکرد دستگاه مذکور به صورت سروالکتریکال بوده و جهت کشترل بار از بازخورد Load cell و جایه‌جایی دقیق فک‌ها استفاده می‌کند. با بهکاربردن موتور و درایور سرو به عنوان محرک، دقت کشترل افزایش پیدا کرده و با بهره‌گیری از بازخورد از Encoder، انجام آزمایش در بازه‌ی گستردگی از سرعت با دقت بالا (۱۰۰۰-۵/۰۰۰) میلی‌متر بر دقیقه) انجام پذیر است. با توجه به اینکه استاندارد BS EN ۱۲۴۶۷ در برگه‌ی اطلاعات شرکت تولیدکننده بتن پارچه‌یی خارجی موجود بود و همچنین استاندارد Fiber Cement Sheet مذکور، یک استاندارد بسیار کامل و دقیق از نمونه‌های است. برای آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در آزمایشگاه بدین صورت بوده است که در ابتدا نمونه‌های

هادی جعفری و همکاران (۲۰۲۰)، بتن پارچه‌یی را به صورت المان Shell در نظر گرفته‌ند و برای محافظت از لوله‌های مدفن آن را در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، به صورت ماکرو شبیه‌سازی کردند و تأثیر بتن پارچه‌یی در پاسخ خطوط لوله‌ی فولادی مدفن را تحت نرم‌افزار آباکوس بررسی کردند و همچنین بیشینه‌ی تنش‌های خطوط لوله‌ی مدفن 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 بازگذاری افججار سطح در دیواره‌های خطوط لوله دفعه‌شده در بیشتر موارد کاهش یافته است.<sup>[۱۹]</sup>

شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بر روی بتن پارچه‌یی توسط پژوهشگران اکثراً در مقیاس ماکرو بودند و این خلاً در زمینه‌ی شبیه‌سازی مزو بتن پارچه‌یی در نرم‌افزار اجزاء محدود مشاهده می‌شد؛ در همین راستا، در مطالعه‌ی حاضر، به شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در حالت ماکرو مقایسه صورت گرفته است. در مدل ماکرو ارائه شده پارچه‌یی در دقت ماکرو مقایسه صورت گرفته است. در مدل مزو مفروض 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 مفروض به صرفه است و می‌تواند به صورت گستردگه استفاده شوند. در ضمن، گزینش مدل کلی مناسب برای اتصال شامل: اجراء 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 انکاتر 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 آسیب‌دیده 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. درنهایت، به بررسی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت افججار در هوای آزاد پرداخته شده است. لذا، به دست آوردن: (۱) بیشینه‌ی جایه‌جایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی تحت بار خمش چهارنقطه‌یی؛ (۲) پارامترهای تخریب افجغاری در مدل ایجاد شده با استفاده از بتن پارچه‌یی؛ و (۳)



شکل ۱. دستگاه خمش چهارنقطه‌یی.

جدول ۱. مشخصات CDP داده شده به بتن پارچه‌بی.

	Viscosity Parameter
۰/۰۰۱	K
۰/۶۶۷	
۱/۱۶	$Fb_0/Fc_0$ (پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک محوره)
۰/۱	Eccentricity (پانسیل خروج از مرکزیت خمیری)
۳۰	Dilation Angle (زاویه اتساع)

پانسیل خروج از مرکزیت خمیری: عدد کوچک مثبتی است که مساوی نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن است که برای بتن پارچه‌بی  $1/0$  در نظر گرفته شده است.

پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک محوره: پارامتر ذکر شده، مشخصات تابع گسیختگی را بین می‌کند، که برای بتن پارچه‌بی  $1/16$  در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۵]</sup> پارامتر  $Kc$ : در مدل خمیری آسیب دیده برای بتن، مقاومت پیش فرض ضریب  $0/667$  است، که براساس آزمایش‌های فشاری سه محوره و تحلیل‌های عددی پیشنهاد شده است، که برای بتن پارچه‌بی همان مقدار اخیر در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌بی در مقیاس ماکرو در نرم‌افزار در ابتدا یک جسم Solid به ابعاد  $130 \times 80 \times 40$  میلی‌متر در نظر گرفته شده و مشخصات فشاری و کششی نمونه‌ی بتن پارچه‌بی به دست آمده در آزمایشگاه به جسم ترسیم شده مطابق شکل ۲، اختصاص بافته است. سپس فک‌های اورادکننده بار در مدل به قطر  $20$  رسم شده است. فاصله‌ی بین فک‌های بالانی برابر  $90$  میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های نیزه  $13$  میلی‌متر باشد. برای اینکه فک‌های پارچه‌بی به دست آمده در آزمایشگاه به جسم ترسیم شده مطابق شکل ۳ است. به فک‌های بالانی فقط جایه‌جایی در راستای عمود بر نمونه و به میزان  $10$  میلی‌متر داده شده است و برای اینکه فقط عملکرد خود بتن پارچه‌بی بررسی شود و برش پانچ صورت نگیرد، اتصال‌های دو طرف نمونه به صورت مفصل (جایه‌جایی‌ها در راستاهای اصلی برابر صفر) در نظر گرفته شده است. در وسط فک‌ها، Partition زده شد تا نمونه دارای شبکه‌بندی Mesh با کیفیت‌تری شود.

برای شبیه‌سازی بتن پارچه‌بی در مقیاس مزو در نرم‌افزار آباکوس، بتن پارچه‌بی به صورت دوفازی (بتن و پارچه) در نظر گرفته شده است. بدین صورت که ماده‌ی ملات با مقاومت فشاری  $40$  مگاپاسکال به صورت یک فاز و پارچه‌ی تهیه شده از نخ FDY به صورت 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 به صورت tie در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی بتن پارچه‌بی مطابق قبل، تحت آزمایش خمین چهارنقطه‌بی در نرم‌افزار آباکوس مدل سازی و به فک جایه‌جایی  $10$  میلی‌متر داده شده است. سپس نمودار نیرو - جایه‌جایی ترسیم و با نمودار نیرو - جایه‌جایی مدل ماکرو مقایسه شده است.

نقاوت دو روش ماکرو و مزو و دلایل استفاده از هر کدام: مدل سازی برای تحلیل و طراحی بتن، که یک ماده‌ی ناهمگن است، در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا میکروسکوپی (میان مقیاس) انجام می‌شود. در بررسی ماکروسکوپی، که رایج‌ترین شیوه‌ی مدل سازی بتن است، تمامی بتن به صورت تک فاز شامل خمیر سیمان، مدل سازی می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی، هر یک از فازها با عناصر تشکیل دهنده‌ی آن‌ها، نظری کریستال‌های سیمان و سنگدانه‌ها، مدل سازی می‌شوند. به دلیل افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات و نیاز به رایانه‌هایی با ظرفیت‌های خیلی بالا، مدل سازی اخیر فقط برای موارد خاص یا دوفازه‌ی (ITZ) بتن به عنوان یک ماده‌ی ناهمگن سه فازه،

بتن پارچه‌بی در ابعاد  $80 \times 50 \times 30$  میلی‌متر با ضخامت  $13$  میلی‌متر در آزمایشگاه داشتگاه در قالب‌های چوبی با همین ابعاد ساخته و پس از  $10$  روز از قالب خارج شده‌اند. دستگاه خمین چهارنقطه‌بی، شامل چهار فک مطابق شکل ۱ است که دو فک پایین ثابت دارد که فاصله‌ی بین آن‌ها  $30$  میلی‌متر است. فک‌های بالایی با سرعت  $1$  میلی‌متر بر دقیقه جایه‌جایی دارند و به سمت پایین حرکت می‌کنند. قطر فک‌هایی که به نمونه نیرو وارد می‌کنند، برابر  $20$  میلی‌متر و فاصله‌ی بین فک‌های بالایی  $90$  میلی‌متر است و دستگاه خمین چهارنقطه‌بی مجهز به حسگر LVDT<sup>۱۸</sup> برای ترسیم لحظه‌ی نیرو - جایه‌جایی نمونه است.

## ۲- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها:

ابعاد نمونه‌ها و طول آزمایش باید به گونه‌یی باشند که:

(a) نسبت دهانه/ضخامت اسمی بیشتر از یا برابر با  $15$  باشد.

(b) نسبت دهانه/انحراف در هنگام پارگی بیشتر از یا برابر با  $20$  باشد.

(c) طول نمونه‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با مقدار دهانه به علاوه‌ی  $40$  میلی‌متر باشد.

(d) عرض نمونه‌ها از  $5$  برابر ضخامت اسمی نمونه‌ها بیشتر یا مساوی باشد.

(e) نمونه‌ها ممکن است مریع یا مستطیل باشند.

(f) ابعاد ترجیحی نمونه‌ها  $250 \times 250$  میلی‌متر باشد.

## ۳- طول دهانه‌ی ترجیحی $200$ میلی‌متر باشد.

-- در مواردی که ابعاد و دهانه‌ی ترجیحی دارای شرایط a تا d نباشند، ابعاد و دهانه‌ی طوری تنظیم شود که شرایط ذکر شده برآورده شود.

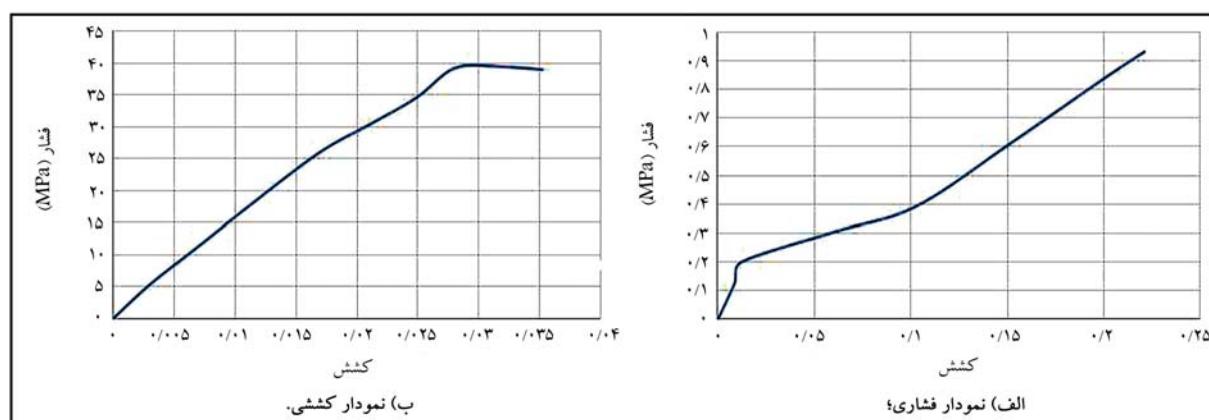
-- ابعاد نمونه‌ها و دهانه‌ی آزمایش ممکن است از مقادیر ترجیحی غییر باشد، به شرط آنکه شرایط a تا d برآورده شود.

به دلیل ایجاد شرایط دقیق آزمایشگاهی و وجوب همگنی بین نمونه‌های مختلف و همچنین جلوگیری از تأثیر غیرنحوی‌های بدن نمونه در لبه‌ی نمونه‌ی بتن پارچه‌بی، نمونه‌بندی باید شرایط ویژه‌ی داشته باشد، که در ادامه توضیح داده شده است: برای صفحات با ابعاد کوچک،  $5$  صفحه‌ی نمونه به صورت تصادفی گرفته می‌شود. برای صفحه‌های کوچک‌تر از  $250 \times 250$  میلی‌متر، کل صفحه‌ها آزمایش می‌شوند. برای صفحه‌های بزرگ‌تر، یک نمونه‌ی آزمایش مریع  $250 \times 250$  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  $10$  و  $30$  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 بدنون بافت، ضخامت در دو نقطه، قبل از شکست در امتداد خط بارگزیری یا بعد از شکست 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 پارچه‌بی 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  $\Psi = 0$  باشد، ماده هیچگونه تغییر حجم کرنشی ندارد. زاویه‌ی اتساع برای بتن پارچه‌بی  $30$  در نظر گرفته شده است.

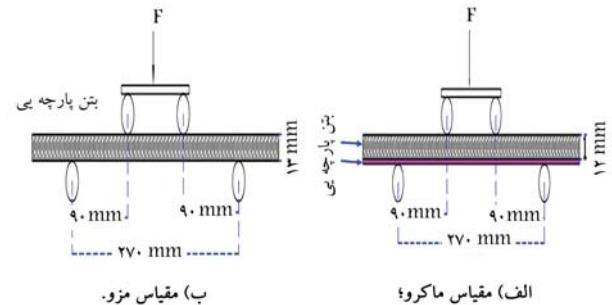


شکل ۲. مشخصات داده شده به بتن پارچه‌بی در حالت ماکرو.

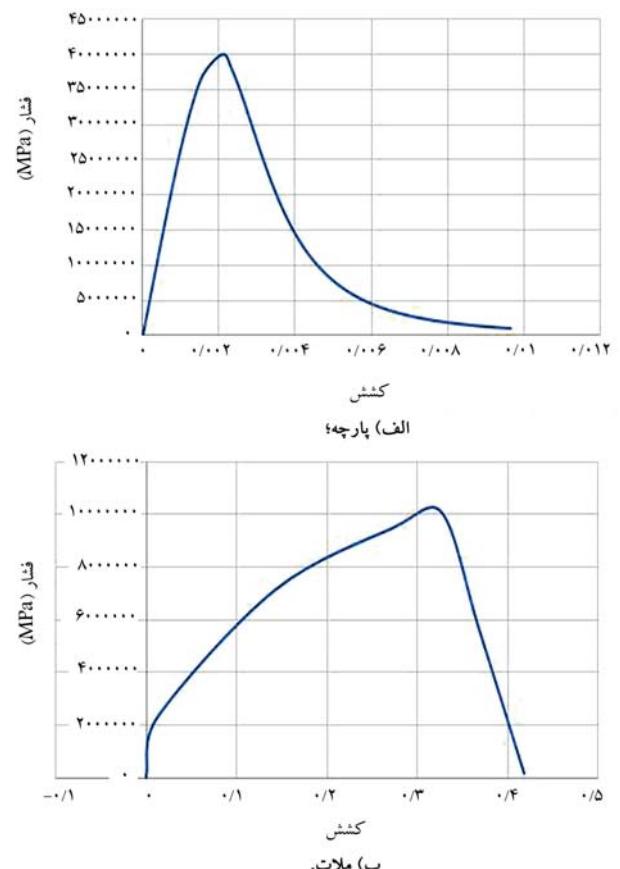
مشتمل بر: سنگدانه، خمیرسیمان و ناحیه‌ی انتقال انجام می‌شود. میان مقیاس مشتمل بر سنگدانه و خمیر سیمان در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل بتن در میان مقیاس می‌تواند صفت‌های بتن غیر مسلح را به خوبی نشان دهد. برای دستیابی به درک عمیق‌تر مطالعات نظری مبتنی بر تجزیه و تحلیل روش ساختار ریز مکانیکی، برهم‌کنش بین اجزاء مختلف بتن برای استنباط رفتار سازنده‌ی میکروسکوپی بتن توسعه یافته است. با این حال، ساختار موضوعی و خصوصیات نک‌تک اجراء بتن و آثار آن‌ها در رفتار مواد ماکروسکوپی در نظر گرفته نمی‌شود. برای اینکه چنین جزئیاتی در تحلیل محاسباتی گشجانده شود، نیاز است که بتن به عنوان یک ماده‌ی ترکیبی چند مقیاس، که در آن ریزساختارها واقعاً شبیه‌سازی شده‌اند، تجزیه و تحلیل شود. شبیه‌سازی‌های عددی، همراه با تئوری و آزمایش، ابزاری فوق العاده 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 به طور قابل توجهی در رفتار مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند.

در مدل ماکرو ارائه شده سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات و امکان استفاده وسیع‌تر، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. استفاده از روش ماکرو، به دلیل کاهش حجم بالای محاسبات نسبت به مدل مزو مقرن به صرفه است و می‌توانند 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 اجراء 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 ابتکار 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 خمث چهار نقطه‌ی شبیه‌سازی شده است. درنهایت نمودار نیرو - جابه‌جاوی به عنوان خروجی نرم‌افزار در یک مرحله به صورت دوخطی ترسیم شده و در مرحله‌ی بعد، ترک‌ها و شکستگی‌های بتن پارچه‌بی به دست آمده لحاظ شده است. در پژوهش حاضر، برای رسیدن به شبیه‌سازی مناسب، روش‌ها و ابعاد مختلف شبکه‌بندی بررسی شده و مناسب با هر مرحله، نمودار نیرو - جابه‌جاوی ترسیم و درنهایت نمودارهای به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند.

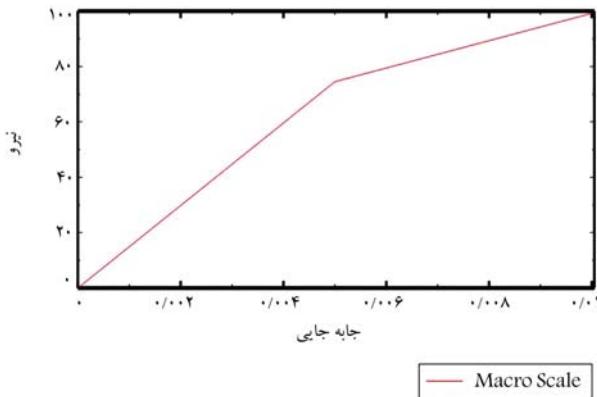
بنابراین برای مشاهده‌ی محل شکست‌ها (صعود و سقط‌ها) در نمودار نیرو -



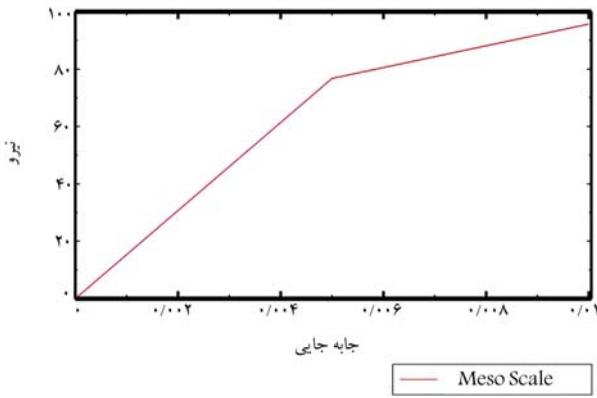
شکل ۳. فاصله‌ی بین اجزا در حالت شبیه‌سازی خمث چهار نقطه‌ی بی.



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



شکل ۶. نمودار نیرو - جایه جایی بتن پارچه‌یی در مقیاس مacro تحت خمس چهارنقطه‌یی.



شکل ۷. نمودار نیرو - جایه جایی به دست آمده‌ی بتن پارچه‌یی در حالت شبیه‌سازی در مقیاس مزو.

نیرو - جایه جایی ارائه شده توسط ژانگ و همکارانش، بر مبنای مقاومت خمشی - جایه جایی ترسیم شده است، با توجه به رابطه‌ی ۱، نمودار نیرو - جایه جایی تبدیل به نمودار مقاومت خمشی - جایه جایی 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 کیلونیوتون محاسبه شده است. با توجه به شکل ۶، مقدار بیشینه‌ی نیرو برای بتن پارچه‌یی، ۱۰۰ کیلونیوتون به دست آمده است. با توجه به رابطه‌ی ۱، مقدار مقاومت خمشی نهایی برای بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو، 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 نتیجه‌یی به دست آمده در نرم افزار آباکوس، میزان خطای  $5/06$ ٪ را نشان داده است.

#### ۴. راستی آزمایی مدل بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده در مقیاس مزو

پس از بیان تحلیل نمودار نیرو - جایه جایی استخراج شده در حالت مزو (شکل ۷) با نتایج حالت مacro و نتایج آزمایشگاه علوم رازی (شکل ۸) مقایسه و نتیجه‌گیری



ج) اعمال بارگذاری بار خاک به عمق ۷۰ cm

شکل ۵. پناهگاه تعجیلی بتن پارچه‌یی.

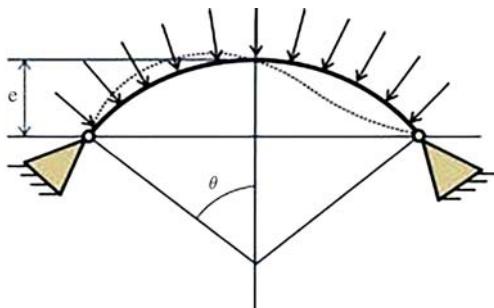
جایه جایی، نیاز به شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو است و تابع اخیر در شبیه‌سازی مacro قابل رویت نیستند. همچنین برای تقویت بتن پارچه‌یی در برابر بارهای دینامیکی و اضافه کردن مواد افزودنی برای تقویت خواص بتن پارچه‌یی، شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو لازم و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. پناهگاه تعجیلی مطابق استاندارد نمونه‌ی خارجی مطابق شکل ۵الف، با ابعاد: طول  $6/24$  متر و ارتفاع قوس ورودی  $2/35$  متر در محیط نرم افزار ترسیم شده است. در انتهایها برای شبیه‌سازی پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌یی تحت وزن خود و بار نرم افزار آباکوس، پناهگاه تعجیلی ساخته شده از بتن پارچه‌یی تحت وزن خود و بار گسترده‌ی خاک مطابق شکل ۵ج، شبیه‌سازی و نتایج تنش و جایه جایی 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، چین خودگذگاری هایی با ارتفاع ۶ سانتی‌متر داده شده است، لذا با افزایش ممان اینرسی مقطع، تنش و تعییرشکل خمشی مقطع کاهش یافته و فاصله‌ی بین هر دو چین متوالی  $35/1$  سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از آنجا که طول هر رول بتن پارچه‌یی  $110$  سانتی‌متر و طول مستقیم هر رول بتن پارچه‌یی با چین خودگذگاری داده شده به آن  $78$  سانتی‌متر است، پس در شبیه‌سازی انجام شده از  $8$  رول بتن پارچه‌یی استفاده شده است، تا طول موردنظر سازه به دست آید. برای بررسی عملکرد تخریب کششی بتن پارچه‌یی، نمونه‌یی با ضخامت  $13$  میلی‌متر در مقابله با انفجار شبیه‌سازی شده و با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگران روی نمونه‌ی خارجی، بتن پارچه‌یی با ابعاد  $100 \times 100$  سانتی‌متر در برابر  $5$  کیلوگرم ماده‌ی منفجره‌ی TNT در فاصله‌ی  $3$  متر قرار گرفته است.

### ۳. راستی آزمایی مدل بتن پارچه‌یی شبیه‌سازی شده در مقیاس مacro

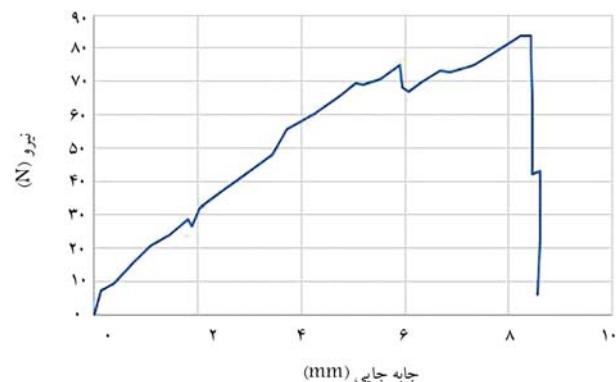
نمودار خمس چهارنقطه‌یی بتن پارچه‌یی انتخاب شده با توجه به انتخاب اندازه شبکه‌بندی  $25/00$  متر و در نظر گرفتن زمان تحلیل یک ثانیه، با نمودارهای نیرو - جایه جایی به دست آمده از نتایج مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، <sup>[۸]</sup> مقایسه و مشاهده شده است، که نتایج بسیار به هم نزدیک و قابل قبول بوده است؛ و چون نمودار

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

خشن	CCs			
	مقادیر کشش در ترک اولیه	ترک اولیه (%)	ترک (%)	
مدول یانگ معادل (MPa)	مقادیر خمشی نهایی (MPa)	ترک اولیه (mm)	ترک (%)	
$2/39 \pm 0/27$	$2/40 \pm 0/26$	$0/96 \pm 0/24$	$0/09 \pm 0/02$	بتن پارچه‌یی در جهت تار-CC
$2/10 \pm 0/03$	$2/15 \pm 0/09$	$1/06 \pm 0/06$	$0/10 \pm 0/01$	بتن پارچه‌یی در جهت پود-CC
$2/98 \pm 0/39$	$50/86 \pm 0/99$	$17/89 \pm 2/39$	$1/72 \pm 0/23$	بتن پارچه‌یی تقویت شده در جهت تار-CC-AF
$2/40 \pm 0/22$	$42/86 \pm 4/61$	$18/47 \pm 1/94$	$1/79 \pm 0/19$	بتن پارچه‌یی تقویت شده در جهت پود-CC-AF



شکل ۱۰. مود کمانشی برای تیر قوسی دایروی.



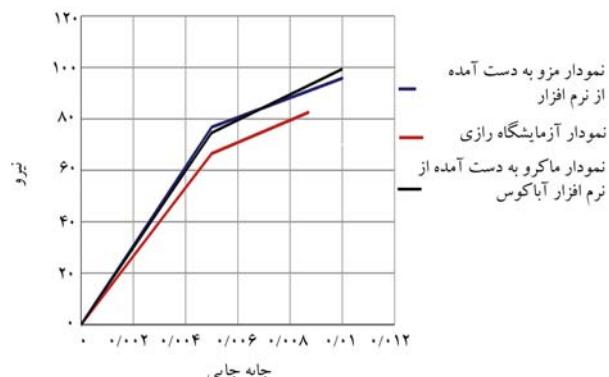
شکل ۸. نمودار نیرو - جایه جایی گرفته شده از آزمایشگاه رازی.

## ۵. بررسی پدیده‌ی فروجهش ناگهانی

تیر قوسی کم عمق، یک المان سازه‌یی مهم در کاربرد بنایهای مهندسی راه و ساختمان، مهندسی مکانیک، و هوافضاست. مشخصه‌یی مهم تیرهای قوسی کم عمق تحت بارگذاری جانبی، ناپایداری آن‌ها در برابر نیروهای بحرانی است که در اثر آن سازه دستخوش یک جایه جایی بزرگ ناگهانی به‌سوی یک ساختار تعادلی جدید می‌شود که اصطلاحاً فروجهش نامیده می‌شود. با معرفی مواد مدرج تابعی و ترکیب آن با مشخصات تیرهای قوسی، نتایج جالبی حاصل می‌شود که می‌توان سازه‌هایی را با مشخصات پایداری مطلوبی برای شرایط خاص ایجاد کرد. مستطله‌یی بحرانی در رفتار تیرهای قوسی کم عمق تحت بارهای جانبی، ناپایداری هندسه‌یی آن‌هاست که می‌تواند منجر به تخریب سازه یا جایه جایی‌های 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 جایه جایی بزرگ ناگهانی به‌سوی ساختار تعادلی جدیدی می‌شود. این پدیده می‌تواند هم مطلوب باشد (تغییر وضعیت سوئیچ) و هم خط‌نماک (افروپاشی یک گنبد یا خرپا). به‌طورکلی دو حالت برای کمانش تیرهای قوسی وجود دارد:

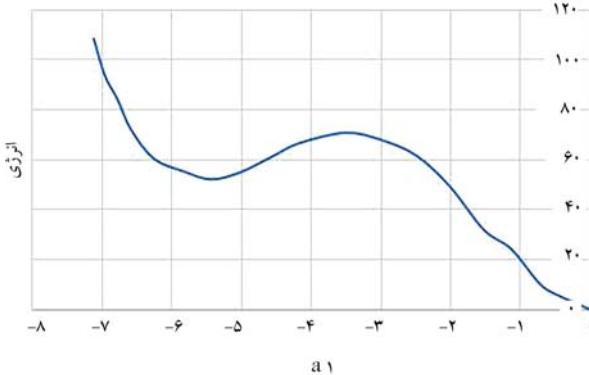
۱. اگر مرتبه‌ی ارتفاع اولیه‌ی تیر قوسی با فاصله‌ی دو تکیه‌گاه تیر قوسی یکسان باشد (شکل ۱۰)، این امکان برای تیر قوسی وجود دارد که تحت فشار بحرانی در مود نشان داده شده ( نقطه چین ) کمانش کند. برای نمونه، تیرهای قوسی دایروی تحت نیروی عرضی گستره‌دهی غیریکنواخت با انواع گوناگون تکیه‌گاه‌ها می‌تواند برای مدل 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، کم عمق 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 به طور ناگهانی معکوس اتحانی اولیه شود که تغییر اتحانی از خط ممتد به خط نقطه چین بیانگر پدیده‌ی مذکور است (شکل ۱۱).



شکل ۹. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جایه جایی شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو و ماکرو و نتایج آزمایشگاهی.

شد که نمودارها از لحاظ ساختار و دوخطی بودن، شبیه همیگر هستند و فقط در مشخصات ملات و پارچه‌یی استفاده شده تقاضوت دارند؛ چون مشخصات پارچه‌یی نمونه‌ی داخلی و مشخصات پارچه در نرم افزار با هم تقاضوت دارند که همین امر باعث ایجاد تفاوت شده است؛ ولی از لحاظ ساختار نمودار، شباهت بسیار زیاد و قانع‌کننده‌یی وجود دارد و تقاضوت 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 مدل سازی بتن پارچه‌یی در حالت مزو نسبت به ماکرو، دقت بالاتری دارد. محل شکستگی نمودارها تقریباً در جایه جایی  $0/005$  متر رخ داده است. همچنین میزان بار قابل تحمل در مدل سازی مزو تقریباً  $90$  کیلونیوتن است که این مقدار برای مدل ماکرو تقریباً  $100$  نیوتون و برای آزمایش آزمایشگاهی معادل  $82/5$  نیوتون به دست آمده است (شکل ۹).



شکل ۱۲. نمودار تابع انرژی بر حسب a<sub>1</sub>.

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 نقطهٔ p<sup>۰</sup> است. اگر سیستم تحت تأثیر یک اختلال اولیه یا اعمال نیرویی (ضربه‌یی) قرار گیرد، سیستم درنهایت به حالت تعادلی مرجع خود میل خواهد کرد و گفتهٔ می‌شود که سیستم در مقابل پدیدهٔ فروجehش دینامیکی پایدار است. اما اگر اختلال یا نیروی اعمال شده به اندازهٔ کافی بزرگ باشد، سیستم ممکن است درنهایت به یک ساختار تعادلی پایدار دیگری که متفاوت از این حالت مرجع است، جهش کند و این جهش‌های بین ساختارهای تعادلی، ناپایداری فروجehش نامیده می‌شود. برای اینکه این نوع مفهوم پایداری به طور فیزیکی مشهود باشد، حالت تعادلی مرجع الزاماً باید یک حالت پایدار موضوعی باشد و برای تعیین نیروی بحرانی از تابع لیپاونوف استفاده می‌شود (رابطهٔ ۲):

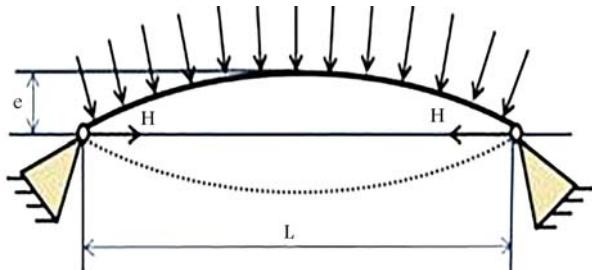
$$V(C) = \Pi(C) - \Pi(p^0) \quad (2)$$

مطالعهٔ توزیع نقاط p<sup>۰</sup> تعادل در فضای حالت مرتبط با سطح تراز V(C) حول نقطهٔ تعادلی ذاتی p<sup>۰</sup> برای تیر قوسی کم عمق منجر به این تابع دربارهٔ نقطهٔ بحرانی p\* خواهد شد:

۱. به ازاء  $(\bar{D}/\bar{B}) < \lambda_1 < \lambda_2$ ، فقط یک ساختار تعادلی موضوعی p<sup>۰</sup> وجود دارد و p\* در بازهٔ اخیر وجود ندارد و بنابراین مهم نیست که نیرو چه اندازهٔ بزرگ باشد، تیر قوسی در برابر پدیدهٔ فروجehش پایدار است و نیروی بحرانی می‌تواند هر مقداری داشته باشد.

۲. به ازاء  $(\bar{D}/\bar{B}) < \lambda_1 \leq \lambda_2$ ، سه نقطهٔ بحرانی وجود دارد: (۱) p<sup>۰</sup> و (۲) p<sup>۰</sup> با استفاده از نمودار انرژی بر حسب a<sub>1</sub> در شکل ۱۲ (سایر مقادیر ... an, n = ۳, ۲, ۱, ...) صفر است) مشخص است که اولین نقطهٔ بحرانی که بسط سطح تراز V(C) حول p<sup>۰</sup> برخورد می‌کند، نقطهٔ بحرانی p<sup>۰</sup> است. پس ۱ p<sup>۰</sup> است.

مرز ناحیهٔ پایدار در مقابل پدیدهٔ فروجehش ناگهانی تیر قوسی کم عمق، برای مواد همگن برابر عدد ثابت ۲ =  $\lambda a$  است و مقدار عمق اولیهٔ آن نیاز رابطهٔ e به دست می‌آید. این مرز برای مواد مدرج تابعی برابر  $\lambda a / 2$  است و رابطهٔ عمق اولیهٔ تیر قوسی نیز برابر  $e = 4ra$  خواهد بود که متناسب با شعاع ژیراسیون سفتی است و مقدار بیشینهٔ یا کمینهٔ  $\lambda a$  با بیشینهٔ یا کمینهٔ مقدار توزیع سفتی ارتباطی ندارد. با به کارگیری ساختار مدرج تابعی در تیرهای قوسی کم عمق، برخلاف حالت همگن، دامنهٔ بیشینهٔ برای a وجود دارد که برای طراح این امکان را فراهم



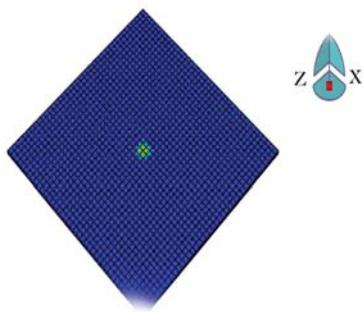
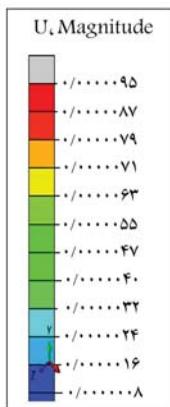
شکل ۱۱. مود کمانشی برای تیر قوسی کم عمق.

پارامتر نیرویی که تغییری زیاد در پاسخ ایجاد کند، نیروی بحرانی نامیده می‌شود. پس از تخطی نیرو از سطح نیرویی بحرانی، تیر قوسی کم عمق به طور ناگهانی از یک حالت تعادلی پایدار به یک ساختار تعادلی پایدار غیرمجاور آن جهش می‌کند. این پدیدهٔ ناپایدار، فروجehش نامیده می‌شود که یک مشخصهٔ مهم از تیرهای قوسی کم عمق است. پژوهش‌ها در بررسی پایداری تیرهای قوسی کم عمق با توجه به چگونگی بار عرضی اعمال شده بر آن‌ها، می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند: پایداری استاتیکی و پایداری دینامیکی. در بحث پایداری استاتیکی فرض می‌شود که بازگذاری عرضی در یک حالت شبه استاتیکی اعمال شده است. به علت رفتار غیرخطی تغییرشکل تیر قوسی، وضعیت‌های تعادلی پایدار چندگاهی ممکن است وجود داشته باشد و ساختار تیر قوسی ممکن است از یک حالت تعادلی پایدار به حالت تعادلی پایدار دیگری جهش کند.

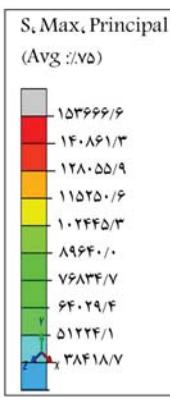
به طورکلی راهکارهای استفاده شده در برآورد نیروهای بحرانی دینامیکی سازه‌های کشسان، که بازگذاری دینامیکی دارند، در درویکرد می‌توانند دسته‌بندی شوند: رویکرد اول، استفاده از روش‌های عددی در تحلیل معادلات حرکت سیستم‌های مذکور است تا کمانش دینامیکی یک سازه تحت بار متداول دینامیکی برای انواع مقادیر پارامتر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

## ۶. بار بحرانی ضربه‌یی برای تعیین پدیدهٔ فروجehش دینامیکی

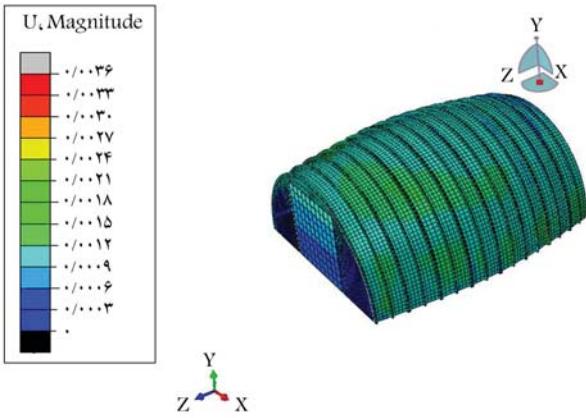
در بحث توصیف ناپایداری فروجehش دینامیکی، مفهوم فیزیکی به این شرح مدنظر



شکل ۱۳. کانتور جابه‌جایی به دست آمده برای بتن پارچه‌بی تحت انفجار کانوپ.



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



شکل ۱۵. کانتور جابه‌جایی به دست آمده از سازه‌ی بادی در نرم‌افزار.

اندازه‌ی  $9 \times 10^{-6}$  است، که مقدار بسیار کمی است؛ پس هیچ خواصی در سطح نمونه ایجاد نشده و میران بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌بی مقدار  $15 \times 10^{-6}$  مگاپاسکال و در سطح بتن پارچه‌بی شبیه‌سازی شده، طبق شکل ۱۴ رخ داده است، که مقدار بسیار کمی است و تا تنش قابل تحمل بتن پارچه‌بی فاصله‌ی بسیار زیادی دارد. استفاده از پناهگاه تعجبی بتن پارچه‌بی، تحت بارگذاری خاک فقط به میران  $2/6$  میلی‌متر در آن جابه‌جایی ایجاد شده است و استفاده از پناهگاه تعجبی نسبت به پناهگاههای استفاده شده در دوران مقدس، قابلیت ایمنی و اقتصادی بهتری را ارائه می‌دهد (شکل ۱۵).

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

در تیرهای قوسی کم عمق همگن تنها عامل مؤثر در میران بار بحرانی  $F$ ، پارامتر عمر اولیه تیر قوسی شکل (۱۱) است که یک ارتباط خطی بین بار ضربه‌ی بحرانی  $F$  و  $\lambda$  وجود دارد. در حالی که در تیرهای قوسی کم عمق با مواد مدرج تابعی، میران بار بحرانی  $F$  به توزیع ناهمگنی آن وابسته است. به طوری که به ازاء مقدار  $\lambda$  یکسان براز 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 یا کمتر از آن به دست آورد. بنابراین با توجه به اینکه ارتفاع سازه‌ی پناهگاه بتن پارچه‌بی کمتر از ۳ متر و درگروه سازه‌های قوسی کم عمق قرار دارد، پدیده‌ی فروجehش ناگهانی در سازه‌ی پناهگاه ساخته شده از بتن پارچه‌بی رخ نداده است.

## ۷. نتایج و بحث

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

۱. جابه‌جایی نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌بی در آزمایش آزمایشگاهی تقریباً  $۹/۰ \times 10^{-6}$  متر و مقدار جابه‌جایی به دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس در مقیاس مزو و ماکرو  $۱/۰ \times 10^{-6}$  متر بوده است.

۲. در مقدار جابه‌جایی  $۵/۰ \times 10^{-6}$  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  $۵/۰ \times 10^{-6}$  متر برای آزمایش آزمایشگاهی  $۶/۵ \times 10^{-7}$  نیوتون، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو  $۷/۶ \times 10^{-7}$  نیوتون، و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو  $۵/۴ \times 10^{-7}$  نیوتون بوده است.

۴. مقدار نیروی نهایی به دست آمده از نمودارها، برای آزمایش آزمایشگاهی  $۵/۰ \times 10^{-7}$  نیوتون، برای آزمایش عددی در مقیاس مزو  $۷/۵ \times 10^{-7}$  نیوتون و برای آزمایش عددی در مقیاس ماکرو  $۲/۹ \times 10^{-7}$  کیلونیوتون بوده است.

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

شبیه‌سازی بتن پارچه‌بی تحت انفجار به صورت کانوپ تحت  $5$  کیلوگرم TNT در فاصله‌ی  $۳$  متری قرار گرفته و فرض شده است که حذف المان اتفاق بیفت. مطابق شکل ۱۳ مشاهده شده است که بیشینه‌ی جابه‌جایی ایجاد شده در وسط نمونه به

بررسی و عملکرد بتن پارچه‌یی در سازه‌ی دفاعی پناهگاه تعجیلی پرداخته شده  
و این نتایج به دست 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  
پارچه‌یی، ۳ میلی‌متر و میزان تنفس ایجاد شده تحت سرباره‌ی ۷۰ سانتی‌متر  
خاک، ۲/۷ مکاپاسکال در قسمت پایین پناهگاه بوده است.

-- درنهایت عملکرد بتن پارچه‌یی تحت بار انفجاری ۵ کیلوگرم در فاصله‌ی  
۳ متری بررسی شده و نتایج نشان داده است که بتن پارچه‌یی به دلیل داشتن  
کرنش خیری گسیختکی کشنی بالا در حدود ۱۰ برابر بتن معمولی در  
مقابل انفجار عملکرد بسیار خوبی نشان داده است.

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به راستی آزمایی نتایج ماکرو و مزو بتن پارچه‌یی در نرم افزار آباقوس با نتایج  
پژوهش ژانگ و نتایج آزمایشگاهی بتن پارچه‌یی تحت خمین چهار نقطه‌یی، این  
نتایج به دست آمده است:

۱. میزان سرباره‌ی قابل تحمل بتن پارچه‌یی تحت خمین چهار نقطه‌یی ۸۲/۵  
نیوتون است. تحت سرباره‌ی ۸۲/۵ نیوتون، به میزان ۱۰ میلی‌متر جابه‌جایی در  
نمونه‌ی بتن پارچه‌یی 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 پارچه‌یی را نشان داده است. سپس به

## پانوشت‌ها

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 polymer (FRP)
14. aramid fiber reinforced polymer (AFRP)
15. Geotextile
16. Zhou
17. Jun
18. linear variable differential transformer (LVDT)
19. MOR

## منابع (References)

1. Tsersarsky, 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, Version6.10
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 Daghighe, 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 initial conditions", *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 چند موردی: قراردادهای مشارکت آزادراهی ایران)

سید محمد مهدی میرموزی (استادیار)  
دانشکده فنی و هندسی، دانشگاه علم و فرهنگ  
محمد حسین صبیحی\* (دانشیار)  
دانشکده معماری و هنر دانشگاه تربیت مدرس

مهمنسی عمان شرف، (پیز ۱۴۵۱) دری ۲ - ۳، شماره ۱ / ۳۰-۳۱، (پژوهش)

تأمین مالی بالا و دوره‌ی بهره‌برداری طولانی، دو جنبه‌ی مهم اثربخشی قراردادهای مشارکتی از محیط پروژه هستند. ساختار قراردادهای مشارکتی در ایران به جهت عدم تابع با محیط پیچیده‌ی پروژه، اهداف عملکردی را با مشکل مواجه کرده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی عوامل محیطی مؤثر، چالش‌ها، موانع بستره، نحوه تعامل و پیامدهای حاصل از قراردادهای مشارکت آزادراهی است. راهبرد مطالعه‌ی موردي، رویکرد کیفی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با نظریه‌ی داده‌بنیاد، ویژگی‌های عده‌ی روش شناسی پژوهش حاضر هستند. یافته‌های حاصل از چهار مرحله آزادراهی، ابتدا نشان دادند که قراردادهای مشارکت، بدون توجه به چرخه‌ی عمر و بهره‌برداری طولانی منعقد شده‌اند. در دوره‌ی ساخت، علی‌رغم سعی در عملکرد هدفمند، ولی به دلیل فهم ناقص از تهدیهای 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 ابعاد قارگرفته است. مدل زمینه‌ی بدست آمده، قراردادهای مذکور را نابالغ و با طرفین ناراضی نشان می‌دهد.

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

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

## ۱. مقدمه

مواجهه می‌شوند.<sup>[۴]</sup> دلمون<sup>[۳]</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 تمايل به نقش بیشتر بخش خصوصی است. در پروژه‌ی BOT، فازهای: مطالعات پیاده‌ی، امکان‌سنجی، طراحی مفهومی و پایه، طراحی تفصیلی و اجرایی، تدارکات، تأمین مالی، ساخت، راهاندازی، بهره‌برداری و انتقال همگی در یک بسته‌ی<sup>[۵]</sup> کامل قراردادی منعقد می‌شوند. دمیرل<sup>[۶]</sup> و ممکاران<sup>[۷]</sup> ترکیب فازهای اخیر در یک قرارداد، وجود یک رویکرد مشخص، انتقال بیشتر ریسک‌ها به بخش خصوصی و زمان بهره‌برداری بلندمدت را چهار ویژگی عده‌ی قراردادهای مشارکتی دانسته‌اند.

در دیدگاه رایج، پارادایم (حوزه‌ی تفکر) جاری و غالب نظریه‌بردازی‌ها در داشت مدیریت، بر فرض یقین و ثبات استوارند و پدیده‌ها همواره منظم و پیش‌بینی‌پذیر قلمداد می‌شوند،<sup>[۸]</sup> که البته دانش مدیریت پروژه نیز با همین پارادایم رشد و تکامل یافته است. پارادایم مذکور با نگاه تقلیل‌گرایانه<sup>[۹]</sup> و تجریب‌گرایانه<sup>[۱۰]</sup> محیط را منظم، باثبات

امروزه مشارکت عمومی - خصوصی (PPP)<sup>[۱]</sup> با رویکرد توسعه یافته است: ۱. رویکرد تأمین مالی - محور و ۲. رویکرد خدمات - محور است.<sup>[۱۱]</sup> مشارکت عمومی خصوصی باعث ایجاد ناآوری مطلوب و بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی می‌شود و با انتقال ریسک‌ها به بخش خصوصی و انتقال هزینه‌های سایه به بخش عمومی، قوام می‌یابد.<sup>[۱۲]</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 خواهد گذاشت.<sup>[۱۳]</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 ۱۰/۱/۱۴۰۰، اصلاحیه ۲۰/۱/۱۴۰۱، پذیرش ۳/۱/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.58562.2987

توجیه پذیری فنی - اجرایی - مالی پروژه و ملزمومات بازگشت سرمایه، مهم ترین موضوع هاستند. کلاچ<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۷]</sup> بر این باورند که بین مشارکت در یک قرارداد با یک قرارداد مشارکتی، تقاضوت اساسی وجود دارد و بنابراین هر یک از طرفین مشارکت در صورت فهم این موضوع می توانند به موفقیت آن کمک کنند. چن و دولوی<sup>۱۷</sup> (۲۰۰۷)،<sup>[۱۸]</sup> مهم ترین عامل محرك قراردادهای BOT را نیاز به سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی زیرساخت‌ها و در مقابل، عوامل مهم مانع را: ترتیب‌های مالی پیچیده، ویژگی‌های قراردادی پیچیده، هزینه‌ی اولیه‌ی بالا و ریسک زیاد داشته‌اند. در قراردادهای BOT، بخش خصوصی (سرمایه‌گذار) وظیفه‌ی بهره‌برداری از پروژه را هم بر عهده دارد و در پایان دوره بهره‌برداری، آن را باید به طرف دیگر قرارداد (بخش عمومی) منتقل کند. مدت بهره‌برداری در پروژه‌های آزادراهی به دلیل حجم بالای تأمین مالی، معمولاً<sup>۱۸</sup> الی ۳۵ سال تعیین می‌شوند.<sup>[۱۹]</sup> تورینا و کارپوسیج<sup>۱۹</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۲۰]</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 اجراء با قراردادهای گوناگون و مراحل تکاملی را دارند که می‌توانند سبب بیشترین پیچیدگی و ریسک شوند. بر همین مبنای، آلیسون و شریف<sup>۲۰</sup> (۲۰۰۲).<sup>[۲۱]</sup> معتقدند در کشورهای در حال توسعه، هرگونه سرمایه‌گذاری به روشن، باید با توجه به آثار اقتصادی و غیراقتصادی در بستره 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. دوردايف و اسماعیل<sup>۲۱</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۲۲]</sup> موضع 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>۲۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸)،<sup>[۲۳]</sup> کلید موفقیت BOT را فاقه آمدن بر چالش‌های اقتصادی، محیطی، اجتماعی، حقوقی و مالی می‌دانند.

## ۲.۱. منابع ریسک و عدم قطعیت

گستره‌ی دانش مدیریت پروژه<sup>۲۴</sup>، ریسک را رویداد یا شرایط غیرقطعی می‌داند که در صورت رخداد، آثار مثبت یا منفی در یک یا چند از اهداف پروژه می‌گذارد. پرینس<sup>۲۵</sup> ریسک را رویداد یا مجموعه‌ی از رویدادهای غیرقطعی می‌داند که در صورت وقوع، در دستیابی به اهداف تأثیر می‌گذارد و تکمیلی در احتمال دریافت تهدید (تأثیر منفی) یا فرصت (تأثیر مثبت) بر اهداف است. هیلسون<sup>۲۶</sup> (۲۰۰۴)،<sup>[۲۷]</sup> ریسک را عدم قطعیت قابل اندازه‌گیری و عدم قطعیت را ریسک غیرقابل اندازه‌گیری می‌داند. پروژه‌های زیربنایی نوع BOT، مشخصات پیچیده‌ی از ریسک‌ها دارند و تا حد قابل توجهی، موفقیت هر پروژه‌ی BOT تحت تأثیر میزان مدیریت ریسک‌های مختلف آن پروژه است. هم‌ترین مراحل درگیر در مدیریت ریسک یک پروژه عبارت از: شناسایی ریسک، ارزیابی ریسک و سپس مراحل اولویت‌بندی و پاسخ به آن‌ها هستند.<sup>[۲۸]</sup>

خودیر و نبوی<sup>۲۹</sup> (۲۰۱۹)،<sup>[۲۰]</sup> با مطالعه‌ی منابع ریسک در پروژه‌های زیربنایی و سپس به کمک ساختار شکست ریسک‌ها، آن‌ها را به شش دسته‌ی عده، شامل: ریسک‌های خارجی، مالی، مدیریت پروژه، فنی، سازمانی و محیطی تقسیم کرده‌اند. ایشان در یک تقسیم‌بندی عده‌تر، ریسک‌ها را مشتمل بر ریسک‌های داخلی (ریسک‌های مالی، مدیریت پروژه، فنی، سازمانی و محیطی) و ریسک‌های

و تکرار پذیر می‌داند و وجود سازمان و نظم را مبنای حوزه‌ی تفکر خود قلمداد می‌کند. اما تجربه‌ی دو دهه‌ی اخیر نشان داد که پارادایم اخیر در شرایط آشوبناک<sup>۲۱</sup> و پیچیده<sup>۲۲</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>[۲۳]</sup> یکی از مهم‌ترین عوامل کنندی 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 نحوه سودآوری، هزینه‌ها و رویدادهای منجر به ریسک واقع‌بینانه تاخین زده شوند.<sup>[۲۴]</sup> هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی چالش‌ها، مشکلات، موانع بستره و سایر عوامل محیطی و همچنین تعاملات طرفین در انتخاب راهبردهای پیشبرد قرارداد و درنهایت 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.

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

نظام انجام پروژه، مجموعه‌ی فرایندهای جامع طراحی و ساخت است که تمامی روش‌ها، فعالیت‌ها، توالی عملیات، روابط قراردادی، تأمین مالی، تعهدات، روابط فیماهی و شکل‌های مختلف توافق‌ها را شامل می‌شود و همگی آن‌ها در جهت تکمیل موقفيت‌آمیز طراحی و ساخت پروژه به کار می‌روند.<sup>[۱۱]</sup> به علاوه، راهبرد مدیریت پروژه در نحوه 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 برگرینده‌ی چهار مؤلفه‌ی اساسی: نحوه تأمین مالی<sup>۱۲</sup>، روش انجام پروژه<sup>۱۳</sup>، روش انتخاب عوامل طراحی و سازنده<sup>۱۴</sup> و مبانی پرداخت در قرارداد هاست.<sup>[۱۵]</sup>

انجام پروژه‌ها به روش طرح و ساخت و تأمین مالی (DBF)<sup>۱۵</sup> و همچنین مشارکت عمومی - خصوصی در حوزه تأمین مالی پروژه‌ی قرار دارد و معمولاً از طریق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی (غیردولتی) محقق می‌شوند. در این موارد،

خارجی شناخته‌اند. مطالعه‌ی موردی ساندھیاوتی<sup>۲۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)<sup>۲۷</sup> در آزادراه‌های اندونزی نشان داد که منابع ریسک و عدم قطعیت، شامل: امور بازکاری، تورم، حجم تردد و سائنس نقليه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، هزینه‌های ساخت، هزینه‌ی استملاک زمین و ویژگی‌های طراحی هستند. ژو<sup>۲۸</sup> و همکاران (۲۰۱۰)<sup>۲۹</sup> منابع عدم قطعیت 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>۳۰</sup> ریسک‌ها را از دو منشأ برون زاد و درون زاد می‌داند. منشأ ریسک‌های برون زاد، شامل: مخالفت‌های اجتماعی، تغییر قوانین، نیز سرمایه‌گذاری، تورم و تعدیل قیمت هاست که به خارج از مرزهای پروژه تعقل دارد و تغییراتی است که اغلب بخش عمومی (دولت) مسبب آن هاست. منشأ ریسک‌های درون زاد، شامل موادی، مانند: تملک اراضی، شرایط زمین، مجوزهای ریسک‌های زیست‌محیطی، باستان‌شناسی، دسترسی، حقوق راه و خدمات، ارتباط به سایت، معارضان، قراردادهای پیمانکاران جزء، تأخیرهای پیمانکاران جزء، سایر تأخیرها، طراحی، کارآیی (عملکرد)، ریسک استفاده (نقاضا)، درآمد، نحوه‌ی دسترسی و ارائه‌ی خدمات، هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری، نقص‌های باقیمانده و اختیار خانمه‌ی خدمات، هزینه‌های پیمان توسط بخش عمومی می‌داند. امام جمعه‌زاده (۲۰۱۴)<sup>۳۱</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. تزنر<sup>۳۲</sup> ریسک‌ها را در سه دسته‌ی: خارجی، داخلی و حقوقی (قانونی) تقسیم کرده است. وی منابع ریسک‌های خارجی را به انواع پیش‌بینی‌پذیر و لی نامشخص (مانند: بازار، مالی، عوامل آب و هوای و آثار اجتماعی) و پیش‌بینی تاپذیر (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، قراردادها و مسئولیت مدنی می‌داند. فلاخ شمس و همکاران (۲۰۱۹)<sup>۳۳</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 پایندی به تعهدات 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 (ممونیتیت) صادرات، تبعیض (رانت)، امنیت و توریسم، 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 نیز ارز و محدودیت ورود و خروج ارز ایجاد می‌شود. شهبازی و صحیحه (۲۰۱۹)<sup>۳۴</sup> یکی از منابع عدمه‌ی 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 نشات می‌گیرد. چیمن و وارد (۲۰۱۱)<sup>۳۵</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

### ۳.۲. پیچیدگی محیط<sup>۳۶</sup> پروژه

پیچیدگی به حرکت در لبه‌ی آشوب و حد老子ط 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 وسیع تراز 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 (برهمکشی<sup>۳۲</sup>) دارند، بلکه با محیط پیرامون خود نیز برهمکنش دارند. یک سیستم پیچیده، مستعد بی‌نظمی است.<sup>۳۲</sup> و 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<sup>۳۴</sup> (۲۰۰۸)،<sup>۳۵</sup> دلایل اصلی پیچیدگی را ابهام (福德ان آگاهی از وقایع و علم آن‌ها)، عدم قطعیت‌ها، عدم توانایی پیش‌ارزیابی قبل از اقدام‌ها، و پیش‌بینی تاپذیری پدیده‌ها می‌داند. رمینگتون و پولاک<sup>۳۶</sup> (۲۰۰۸)<sup>۳۷</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 گونه‌یی که آشوب، ابتدا نظم زیربنایی سیستم را هدف قرار می‌دهد و سپس حوادث ساده را پیچیده می‌سازد.<sup>۳۸</sup> اثر پروانه‌ی<sup>۳۹</sup> معروف‌ترین نماد آشوبناکی است که حساسیت بالا به شرایط اولیه نیز شناخته می‌شود و میین امکان ایجاد تغییرهای بزرگ (مانند یک ریسک بزرگ) در اثر تغییری کوچک و پیش‌پا افتاده است. موقوفیت پروژه‌ها در چنین محیطی مستقیماً به داشتن اهداف واضح، پاسخ چاک به تغییرات و ارتباط مؤثر بین ذی‌نفعان پروژه بستگی دارد.<sup>۴۰</sup> میرمعزی و صحیحه (۲۰۱۹)<sup>۴۱</sup> مؤلفه‌های پیچیدگی محیط قراردادهای مشارکت آزادراهی را شناسایی کرده‌اند. ایشان مهم‌ترین عوامل علی پیچیدگی محیطی را: ناپایداری‌های اقتصادی، تغییرات پیش‌بینی تاپذیر و نابالغی طرفین مشارکت شناخته و عواملی مانند: ضعف قراردادی و چالش‌های فرهنگی را سبب پیچیده‌تر شدن محیط عنوان کرده‌اند. مطابق نظر مالاستا و اسمنیت<sup>۴۲</sup> قراردادهای مشارکت آزادراهی را شناسایی کرده‌اند. ایشان مهم‌ترین عوامل علی

در پژوهش حاضر، ۲۲ مصاحبه‌ی میدانی (مورد اول، ۶ مصاحبه‌ی مورد دوم، ۸ مصاحبه‌ی مورد سوم، ۴ مصاحبه‌ی و مورد چهارم، ۴ مصاحبه‌ی ساختار یافته و تدریجی) برگزار شده است. با شرکت در چندین جلسه‌ی انجمن شرکت‌های راهسازی، اطلاعات گران‌قیمتی از مشکلات و موانع پیش روی 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 ملزم‌های مشارکت و نحوه تأمین منابع طرف مقابل نیز توجه شده است.

تجزیه‌ی تحلیل داده‌ها و شکل‌دهی به یافته‌ها در پژوهش حاضر به کمک نظریه‌ی داده بینیاد و رهیافت استراتس - کوربین انجام شده است. ابتدا از مجموع اطلاعات به دست 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 (الگوها): تدوین قرارداد، عملکرد دوره‌ی ساخت و عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری (تدوین شدن، در انتهای، سه الگوی عمده با هم ترکیب و مدل نظری قراردادهای مشارکت آزادراهی تدوین شده است).

قطعیت هستند که برای موقیت پژوهه، باید به حکمرانی انعطاف‌پذیر<sup>۳۷</sup> در هنگام تدوین قرارداد توجه جدی کرد. همچنین پاسلاوسکی<sup>۳۸</sup>، [۲۰۱۷]، [۳۹] برای موقیت پژوهه‌های پیچیده که در محیط متغیر و ناپایدار اجرا می‌شوند، انعطاف‌پذیری را فرستی می‌داند که با وجود مشکلات، مراحل اجرای پژوهه را قابل تداوم می‌سازد. لذا، دان<sup>۴۰</sup> [۲۰۲۰] 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 چالش‌های اجتماعی و پیچیدگی‌های محیطی) هستند. بروز ریسک با توجه به منابع عدم قطعیت، اجتناب ناپذیر است و محیط پژوهه، پتانسیل پیچیده شدن و در نتیجه تأثیر نامطلوب در عملکرد و پیامدها را دارد. شناسایی منابع ریسک، مدیریت نحوه برخورد با آن و میزان انعطاف‌پذیری قرارداد از شروط بدون قید و شرط موقیت هستند.

## 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:

مورده اول: آزادراه پل زال - اندیمشک در استان خوزستان و به طول ۴۵ کیلومتر در مدت حدود ۳ سال از فوریه ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹۲ ساخته شده است. در زمان مقاومه (سال ۱۳۸۵)، هزینه‌ی پژوهه معادل ۱۵۰ میلیارد تومان برآورد شده بود. در طی روند اجرایی شدن مشارکت در سال ۱۳۸۹، هزینه‌ی ساخت با افزایش دو برابری معادل ۲۲۰ میلیارد تومان رو برو شد. ولی درنهایت، پژوهه‌ی مذکور با هزینه‌ی بالغ بر ۳۹۰ میلیارد تومان (بیش از ۳ برابر برآورد اولیه) به بهره‌برداری رسید. آزادراه مذکور با شرکت اولیه‌ی ۵۰ - ۵۰ درصد توافق شد. ولی با توجه به افزایش شدید هزینه‌ها، با کاهش سهم الشرکاء بخش خصوصی به صورت ۳۵ - ۶۵ درصد به انجام رسیده است. مورد دوم: آزادراه کنارکذر 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 اجراء، که در قرارداد 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 دی ماه سال ۱۳۸۴ آغاز و در آبان ماه 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

## ۳. روش‌شناسی پژوهش

پارادایم‌های (حوزه‌های تفکر) مطرح در پژوهش‌های علوم اجتماعی و مدیریت، شامل: فرازبات‌گرایی<sup>۴۱</sup>، ساخت‌گرایی<sup>۴۲</sup>، جانبدارانه/مشارکتی<sup>۴۳</sup> و پراگماتیسم<sup>۴۴</sup> هستند. لالوند<sup>۴۵</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، [۲۰] نشان دادند از آنجا که مدیریت پژوهه، یک رشته‌ی علمی - عملی<sup>۴۶</sup> است، معرفت‌شناسی<sup>۴۷</sup> پارادایم آن باید بتواند پیوند قوی بین تئوری و عمل برقرار سازد. بنابراین گونه‌ی پراگماتیسم در حوزه‌ی مدیریت پژوهه از سایر گونه‌ها ارجح‌تر است. فراستخواه (۲۰۱۷)، [۲۳] ویژگی‌های نگاه پراگماتیک را عمل‌گرایی یا نوعمل‌گرایی 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 عمده‌ی استقرایی است. گردآوری داده‌ها در پژوهش حاضر با استفاده از راهبرد مطالعه‌ی موردي (موردی (کاوی) انجام شده است، زیرا پدیده از بسترهای جدا نمی‌شود و در پیوند با آن بررسی و از میان انواع اطلاعات، داده‌های موردنظر با بررسی موشکافانه تولید می‌شود.

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

سؤال اصلی: مدل نظری قراردادهای مشارکت آزادراهی، چه مؤلفه‌هایی دارند؟ سوال‌های 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 پژوهه‌های آزادراهی چه هستند؟ و (پ) راهبردهای بخش عمومی - خصوصی در ساخت و بهره‌برداری از آزادراه و پیامدهای آن‌ها چه هستند؟

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 عمدۀ تدوین قرارداد ساخته شد که نتیجه‌ی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

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 درنهایت، ۳۰ کیلومتر دیگر در سال ۱۳۹۰ (با دوره‌ی ساخت ۵ ساله) به بهره‌برداری رسیده است. آزادراه مذکور با شرکت ۵۰ - ۵۰ درصد به انجام رسیده است.

#### ۲.۲.۴. الگوی عملکرد دوره‌ی ساخت

از یافته‌های پژوهش آشکار شده که پس از تدوین قرارداد، به‌طورکلی طرفین با فهم متقابل و با نیت همکاری در تحقق اهداف، با تمام توان سعی در پیشیرد مشارکت داشته‌اند. ولی با دقت و بررسی بیشتر یافته‌ها و همچنین مقوله‌های متأنث در هر مورد مشخص شد که به علت پیچیدگی محیطی و افزایش پیش‌بینی تابزیری امور در چنین محیطی، ریسک‌های متعددی به وقوع رسیده است که روند ساخت در موردها را با فراز و فرودهای قبل توجهی مواجه کرده است. در جدول ۳، مقوله‌های به‌دست 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 عمدۀ 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 به‌دست آمده از عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر و همچنین تحلیل بین موردها، الگوی پارادایمی عمدۀ عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری به دست آمده است، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مقوله‌های ساخته شده از مفاهیم به‌دست آمده از موردها.

کدبندی گزینشی	محوری	باز	حوزه‌ی مورد مطالعه	موردها (آزادراه)
۱۴	۲۶	۳۰	مقوله‌های تدوین قرارداد	پل زال - اندیمشک
۱۷	۸۹	۹۵	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	
۲۰	۴۳	۵۲	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	
۱۵	۳۳	۲۸	مقوله‌های تدوین قرارداد	کنارگذر غربی اصفهان
۲۰	۵۳	۶۱	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	
۲۱	۲۷	۲۹	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	
۱۶	۳۲	۲۸	مقوله‌های تدوین قرارداد	خرم‌آباد - پل زال
۱۷	۳۳	۲۱	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	
۱۹	۴۳	۵۲	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	
۱۶	۵۰	۵۰	مقوله‌های تدوین قرارداد	ساوه - همدان
۱۸	۵۸	۵۸	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی ساخت	
۲۲	۴۷	۴۷	مقوله‌های عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری	

#### 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 پرمument ساخته شده‌اند. مقوله‌ها هم در سه مرحله، به نام‌های: کدبندی اولیه، کدبندی باز و کدبندی گزینشی شکل کامل تر و متراکم‌تری به خود گرفتند. روند کسب داده‌ها و مقوله‌های ساخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

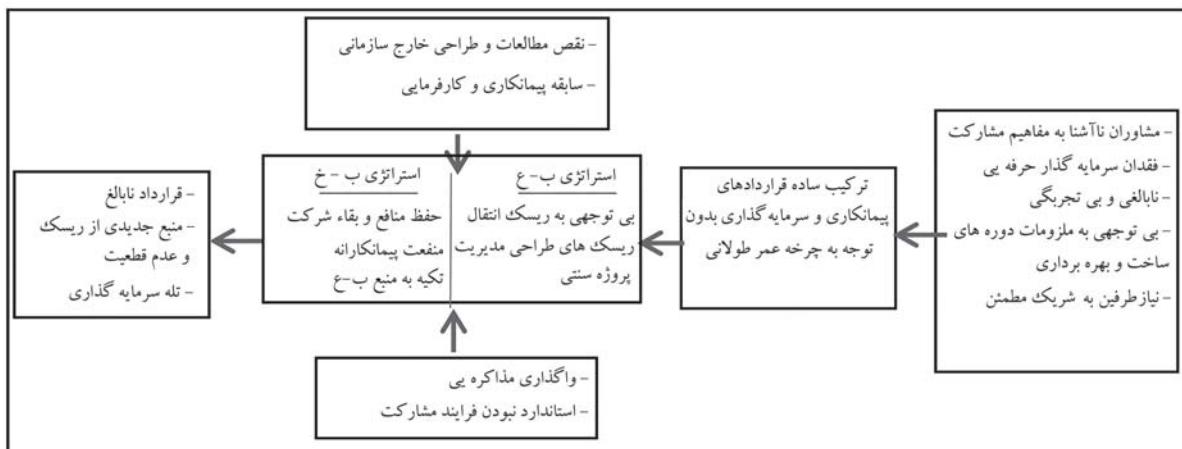
به واسطه‌ی تعداد بسیار زیاد مفاهیم به‌دست آمده از چهار مورد پژوهش، از ذکر عبارت‌ها و مفاهیم استفاده شده در کدبندی‌های باز و محوری خودداری و فقط به مقوله‌های عمدۀ استفاده شده در کدبندی گزینشی برای استفاده در ساخت الگوها و مدل نظری اکتفا شده است. در هر مورد، یک الگوی تدوین قرارداد، یک الگوی عملکرد دوره‌ی ساخت و یک الگوی عملکرد دوره‌ی بهره‌برداری ساخته و سپس متناظر 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: علی، محوری، زمینه‌ی، واسطه‌ی، راهبردی

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

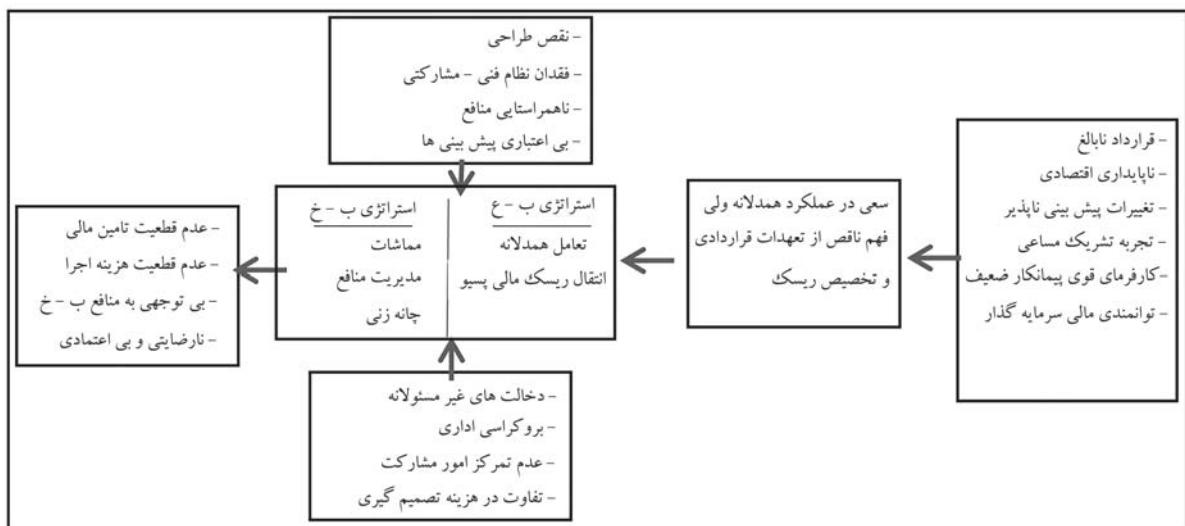
مورد	شرطی علی	محوری	زمینه‌بی	واسطه‌بی	راهنمایی	پیامدها
آزادراه پل	- بی‌توجهی به مازومات	ترکیب قرارداد	- دیدگاه کارفرمایی	- سابقه کمک به	- توسعه‌ی قرارداد	- قرارداد ناچشمیه
زال - اندیمشک	مشارکت	پیمانکاری با	- دیدگاه پیمانکاری	پیمانکار درمانده	معمول	- بی‌توجهی به دوره‌ی بهره‌برداری طولانی
- نابالغی	قرارداد سرمایه‌گذاری	قرارداد سرمایه‌گذاری	- مدیریت پروژه سنتی	- سبقه‌ی چانه‌زی	- حفظ بقاء شرکت	- فرض نظم اول
دید سطحی به قرارداد	(متداول)	پیمانکار با کارفرما	- محیط پیچیده	- نقش مطالعات	مدیریت پروژه	- مذکور
- نامه‌سوسی اهداف و						- انتقال مسائل به بعد
آزادراه کنارگذر	- نقش در قانون	قرارداد ناسازگار با	- نقش مطالعات و	- واگذاری مذاکره‌ی	- سرمایه‌گذاری ذیل	- نابالغی قرارداد
غربی اصفهان	مشارکت	مفاهیم سرمایه‌گذاری	برنامه‌ریزی	پیمانکاری	- ریسک بخش عمومی	- بی‌توجهی به دوره‌ی بهره‌برداری
- نابالغی	- استاندارد نبودن	- محیط پیچیده	در انتخاب شریک خصوصی	- چشمداشت به منابع	- عدم قطعیت	- عدم قطعیت
- بی‌توجهی به مازومات	مشارکت	- فرایند مشارکت	باختن عمومی	تامین مالی	- بی‌توجهی به تامین مالی	- داشتن کار و منافع دانشی
آزادراه خرم آباد	- بی‌توجهی به معیارهای	قرارداد ضعیف :	- عدم قطعیت مطالعات	- کم توجهی به	- سرمایه‌گذاری مانند	- قرارداد منبع
پل زال	سرمایه‌گذاری	(مطالعات ناقص، عدم و طراحی	قراردادهای پیمانکاری	مزومات مشارکت	پیمانکاری	عدم قطعیت و ریسک
- تعجیل قراردادی	- تخصیص شفاف ریسک‌ها	- قرارداد بلندمدت	- سایه‌ی پیمانکاری بدون	- مطالعات ناقص	- سرمایه‌گذاری مطمئن	- انتقال ریسک‌ها به بعد
- نابالغی	صلب در مبلغ	- طراحی برون سازمانی	کارفرمایی	- طراحی	- ساده‌نگری به بهره‌برداری	- ساده‌نگری
- عرق میهنه	و سود و منعطف در	توجه به چرخه عمر	تغییر هزینه‌ها)	- توجه به	- خبره	- خبره
آزادراه ساوه	- نابالغی و بی‌تجربگی	ترکیب ساده	قراردادهای پیمانکاری	- عدم قطعیت	- قرارداد منبع ریسک	- قرارداد منبع
همدان	- مشاوران ناآشنا به	مطالعات و طراحی	و سرمایه‌گذاری بدون	مطالعات و طراحی	- سرمایه‌گذاری سودآور	- سرمایه‌گذاری سودآور
- بی‌توجهی به مازومات	به مفاهیم مشارکت	- طراحی برون سازمانی	توجه به چرخه عمر طولانی	- طراحی	- انتقال ریسک‌های	- تله سرمایه‌گذار
دوره‌های ساخت و	قدنان سرمایه‌گذار حرفه‌ی	توجه به چرخه عمر	دولت محور	- توجه به منبع بع	- تجهیزات پیمانکارانه	- تجهیزات پیمانکارانه
بهره‌برداری	- قوانین و آیین‌نامه‌های	طولانی	- بی‌توجهی به مازومات			



شکل ۱. الگوی پارادایمی عمدۀ تدوین قراردادهای آزادراهی.

جدول ۳. مقوله‌های ساخته شده در کدبندی گرینشی عملکرد دوره‌ی ساخت.

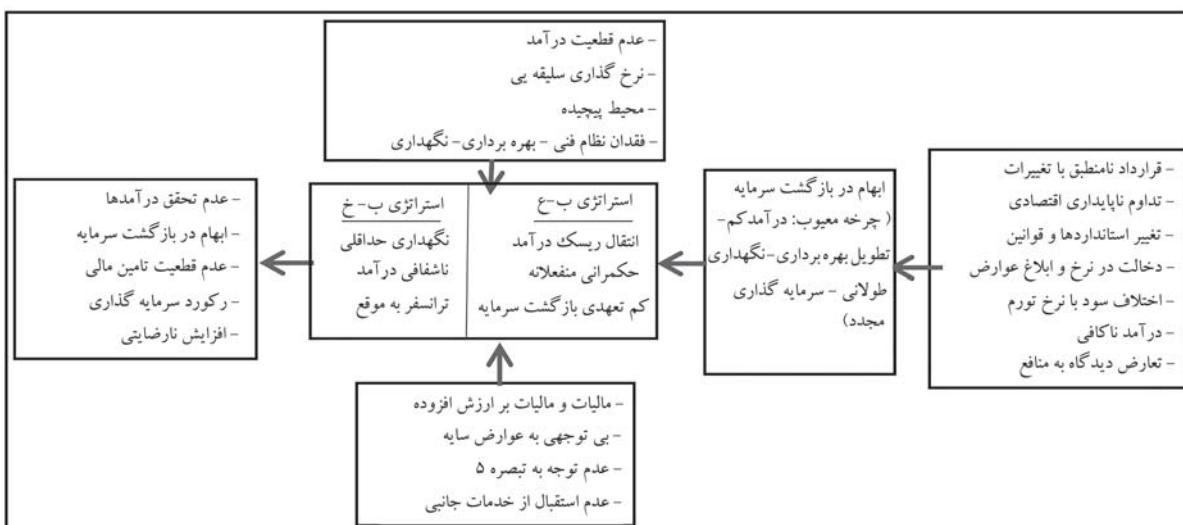
مورد	شرایط علی	محوری	زمینه‌یی	واسطه‌یی	راهنده‌یی	پیامدها
آزادراه پل	- تشریک مساعی	تسريع دراجرا	- تجربه‌ی زیاد طرفین	- کاهش سهم شرکت	- تعادل همدلنه	
زال - اندیمشک	- توانمندی مالی	علیرغم چالش‌های	- بی اعتباری پیش‌بینی‌ها	- عدم قطعیت هزینه	- تسريع در ساخت	
	سرمایه‌گذار	فراوان	- محیط ناپایدار	- انتقال ریسک مالی	- ساخت	
	- مدیریت توانمند	بالادستی حمایتی	- فقدان قوانین	- چانه زنی	- کاهش اعتناد	- بی توجهی به منافع خصوصی
	- قرارداد نابالغ					
آزادراه کارگذر	- بخش خصوصی ضعیف طولانی شدن دوره‌ی	- نقص مطالعات	- نبود وام سرمایه‌گذاری	- انتقال ریسک مالی	- کاهش اعتناد	
غربی اصفهان	- میل به کارفرمایی	ساخت خارج از معیار	- عدم قطعیت قرارداد	- به سرمایه‌گذار	- تامین مالی جدید	
	سرمایه‌گذار	- عادی شدن تاخیر		- مماشات	- تعارض منافع	- بخش عمومی
	- پیمانکاری با سرمایه‌گذاری	- بروکراسی اداری	- پیمانکاری با سرمایه‌گذاری	- پیمانکاری با سرمایه‌گذاری	- کاهش سهم الشرکه	- تعییرات پیش‌بینی ناپذیر
	- قرارداد نابالغ	- کاهش توجیه	- مرکز متعدد تصمیم‌گیر	- چانه زنی پیمانکارانه	- اقتصادی طرح	
آزادراه خرم آباد	- قرارداد ضعیف	عملکرد همدلنه در	- عدم تخصیص ریسک	- تجربه قبلی	- حمایت درون سازمانی	- موفق در اجرا
پل زال	- پیچیدگی محیط پروژه اجرای قرارداد و تامین	- تعدد مراجع تصمیم‌گیر	- نابالغی	- تشریک مساعی	- انتقال‌ها ریسک‌ها	- عدم پایبندی به قانون
	- عدم پایبندی به قانون مالی به موقع علیرغم	- ناهمسویی قانون	- رفتار کارفرمایی	- عدم حمایت	- به سرمایه‌گذار	- تحریم بین‌المللی
	چالش‌های موجود	مشارکت با سایر	- عدم حمایت	- برونو سازمانی	- کاهش اعتناد	- قوانین
آزادراه ساوه	- بخش خصوصی	فهم ناقص از تعهدات	- دخالت‌های غیرمسئله‌لنه	- رفتار کارفرمایانه	- عدم قطعیت	
همدان	پیمانکار مأب	در مشارکت و ضعف	- عدم تمرکز	- همکاری پیمانکارانه	- تامین مالی	
	- بخش عمومی	ارتباطات موثر	- فقدان نظام فنی	- انتقال ریسک مالی	- نارضایتی	- در تصمیم‌گیری
	کارفرمایی	- ناهمراستایی منافع	- مشارکتی	- مدیریت منافع	- کاهش رغبت	- بروکراسی اداری
	- اقتصاد بیمار				به مشارکت	
	- دانش کم					
	مدیریت پروژه					
	- قرارداد نابخته					



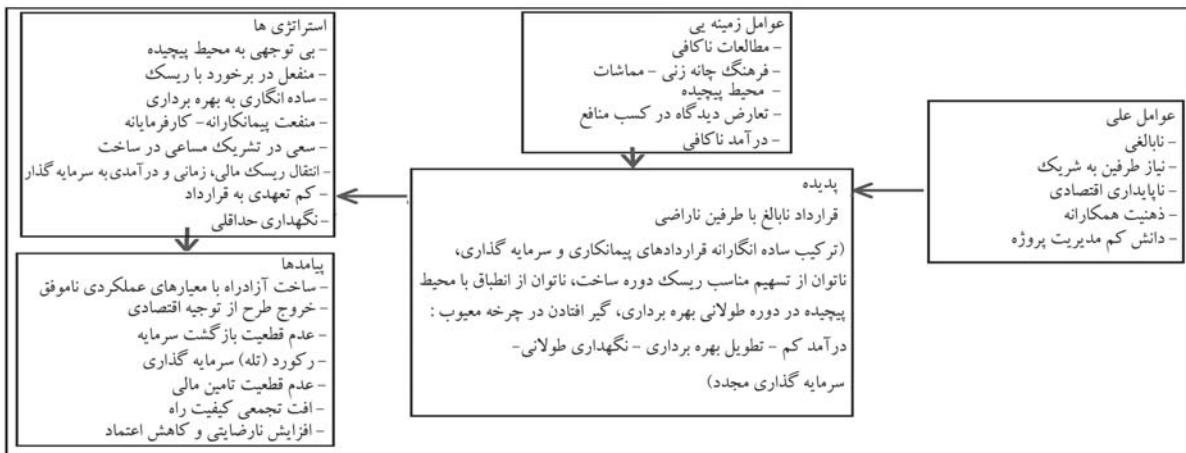
شکل ۲. الگوی پارادایمی عده‌ی عملکرد دوره‌ی ساخت قراردادهای آزادراهی.

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

مورد	شرط‌های علی	محوری	زمینه‌یی	واسطه‌یی	راهبردی	پیامدها
آزادراه پل زال - آندیمشک	- دخالت در نرخ و زمان ابlag عوارض	- درآمد پایین و ابهام در بازگشت سرمایه	- بی‌توجهی به منافع شریک	- مالیات بر درآمد	- عدم قطعیت زمان بازگشت سرمایه	- انتقال ریسک بازگشت سرمایه نگهداری حداقلی نگهداری حداقلی نگهداری مالی هزینه
آزادراه کتارگذر غربی اصفهان	- قراداد نابالغ نرخ تورم	- عدم تطبیق درآمد خدمات جانبی	- عدم تطبیق درآمد با محیط	- قرارداد نابالغ هزینه	- عدم استقبال از خدمات جانبی	- عدم قطعیت زمان در اقتصاد تورمی عدم تنبیل به تداوم مشارکت
آزادراه خرم‌آباد - پل زال همدان	- قرارداد ضعیف عقب ماندن سود سرمایه‌گذاری از تورم افزایش غیرقابل پیش‌بینی هزینه‌ها عدم درآمد پیش‌بینی شده عدم تضمین درآمد	- عدم قطعیت درآمد قرارداد قرارداد کاهش تردد چالش مالیات	- عدم قطعیت درآمد حریم بین‌المللی	- بی‌توجهی به منافع سرمایه	- انتقال ریسک مالی بازگشت سرمایه نگهداری سرمایه نگهداری مناسب پذیرش ریسک امید به بخش عمومی	- ایهام در بازگشت عملکرد ناسازگار با حجم سرمایه‌گذاری بازگشت سرمایه کتم‌تهدی به بازگشت سرمایه نگهداری مناسب پذیرش ریسک امید به بخش عمومی
آزادراه ساوه - همدان	- ناپایداری اقتصادی قرارداد ناپاخته تعییر استانداردها و قوانین ضعف فرهنگی	- عدم تناسب درآمد با با حجم سرمایه‌گذاری ارتش افزوده فقدان نظام فنی - بی‌توجهی به عوارض بهره‌برداری - نگهداری عدم تحقق درآمدها عدم قطعیت تامین مالی افت کیفیت افزایش نارضایتی	- کاهش نرخ و تأخیر در بالag عوارض ارتش افزوده فقدان نظام فنی - بی‌توجهی به عوارض بهره‌برداری - نگهداری عدم تحقق درآمدها عدم قطعیت تامین مالی افت کیفیت افزایش نارضایتی	- انتقال ریسک بر نگهداری حداقلی نگهداری منفعانه سایه نگهداری عدم توجه به بازگشت سرمایه امید به آینده	- عدم قطعیت درآمد حریم بین‌المللی نرخ گذاری سلیقه‌یی محیط پیچیده فقدان نظام فنی - بهره‌برداری - نگهداری	- عدم تناسب درآمد با مالیات و مالیات بر نگهداری حداقلی نگهداری منفعانه سایه نگهداری عدم توجه به بازگشت سرمایه امید به آینده



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



شکل ۴. مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی.

-- عامل نابالغی و نیاز طرفین به شریک: مطابق گفته های بخش خصوصی، مشارکت بخش خصوصی از روی ناجاری 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 شرکت های بزرگ پیمانکاری، خطر اضطراری متحمل آن ها را در پی خواهد داشت. به این ترتیب بخش خصوصی بدون توجه به ویژگی های سرمایه گذاری و مشارکت، فقط برای حفظ شرایط کمینه خود و همچنین به امید حمایت دولتی که تجربه ای آن را در قراردادهای متعارف داشته است، وارد قرارداد شده است. از طرف دیگر، بخش عمومی (دولتی) نیز بدون توجه به محدودیت سقف سرمایه گذاری بخش خصوصی و بی توجه به مفهوم ریسک و با تکیه بر دیدگاه سنتی در قراردادهای سه عاملی، به مشارکت نگریسته است. برای مثال، یکی از مصاحبه گران بخش عمومی گفته است: چون مطالعات اولیه وجود ندارد و یا بسیار ناقص هستند، برآوردها با خطای همراه است و لذا نمی توان در یک فرایند رقابتی اصولی نسبت به جذب سرمایه گذار اقدام کرد. همین که یک سرمایه گذار وجود داشته باشد، با وی مذاکره صورت می گیرد. موارد اخیر نشان از نابالغی طرفین مشارکت دارد.

-- عامل نایابداری اقتصادی: تورم افسار گسیخته، تغییرات پیش بینی نشده، کاهش ارزش پول ملی و بی ثباتی در قیمت ها، گوایی نایابداری اقتصادی هستند. نایابداری اقتصادی در بعضی پروژه ها، هزینه ساخت و در نتیجه، میزان سرمایه گذاری را تا ۳ برابر افزایش داده است.

-- عامل ذهنیت همکارانه: در مواردی، طرفین با تشریک مساعی توائسته اند 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 یافته ها نشان داده اند بخش عمومی در بسیاری از مواقع نیز باور به همکاری را برخلاف منش کارفرمایانه دانسته است. در دیدگاه سنتی کارفرمایی، پیمانکار کلاه برداری است که همواره می خواهد از دولت بکند. به این ترتیب یافته ها نشان داده اند که در روند مشارکت، ذهنیت و قصد همکاری وجود داشته است، ولی توفيق چندانی حاصل نشده است.

-- عامل دانش کم مدیریت پروژه: یافته ها نشان داده اند طرفین از نظر دانش مدیریت، پروژه و اصولی را که باید در چنین قراردادهایی رعایت کنند، چهار فقر

#### ۳.۴ مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی

الگوهای مشارکت بخش عمومی - خصوصی در سه دوره ای: (الف) تدوین قرارداد، (ب) عملکرد دوره ای ساخت، و (پ) عملکرد دوره ای بهره برداری در چهار آزادراه موردمطالعه به ترتیب در شکل های ۱ الی ۳ مشاهده می شوند. عوامل علی، زمینه بی و همچنین راهبردها و پیامدهای هر مشارکت و فضای حاکم بر قراردادهای مذکور واضح و شفاف روشان شده است. به منظور یکپارچه کردن یافته ها و نیل به هدف عمده پژوهشگران بیشترین توان خود را برای جامعیت مدل با توجه به مقوله های مشابه و متفاوت در الگوها اعمال کرده اند. در نتیجه، مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی تدوین شده است که در شکل ۴ مشاهده می شود.

شرح مقوله های اصلی مدل که در واقع یافته های مهم پژوهش محسوب می شوند و برای تدوین قضیه ها از آن ها استفاده شده است، به این قرارند:

#### ۳.۵ پدیده مدل نظری کلان قراردادهای مشارکت آزادراهی

پدیده (مفهوم هسته) کشف شده عبارت از قرارداد نابالغ با طرفین ناراضی است و در بردارنده ای مفاهیم است که قراردادهای آزادراهی از ترکیب ساده انگارانه قراردادهای پیمانکاری و قراردادهای سرمایه گذاری شکل گرفته و دو ضعف عمده ای ناتوانی در تسهیم مناسب ریسک در دوره ای ساخت و ناتوانی در انتباط با محیط پیچیده در دوره ای طولانی بهره برداری دارند. به علاوه سرمایه گذاران نیز در یک چرخه معیوب گیر افتاده اند. به این ترتیب که چون درآمد حاصل از بهره برداری ناکافی است و با مقادیر پیش بینی شده تفاوت دارد، سبب تطویل دوره ای بهره برداری می شود. از طرفی، با طولانی شدن دوره ای بهره برداری، نگهداری آزادراه نیز طولانی می شود و طبیعتاً هزینه های نگهداری که دائماً در حال افزایش است، به عنوان سرمایه گذاری جدید، به سرمایه گذاری های قبلی اضافه می شود. تأمین مالی برای سرمایه گذاری جدید هم چالش زاست و همچنین از طریق بهره برداری بازگشت کند به طولانی شدن قرارداد می نجامد. بنابراین یک چرخه با پیانی میهم پیش رو است که زمان بازگشت سرمایه، سرمایه را با ابهام رو برو می سازد. در نتیجه با توجه به موارد اخیر، فاصله بی ۴۹ ملماوس بین برنامه ریزی تا انجام پروژه و از انجام تا بهره برداری از آن وجود دارد که سبب ناراضایی طرفین قرارداد شده است.

#### ۲.۳.۴ عوامل علی

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

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

#### ۴.۳.۴. راهبردها

بخش‌های عمومی و خصوصی، راهبردهای گوناگونی را برای پیشبرد اهداف پروژه به کار بسته‌اند. مهم‌ترین و در عین حال چالش‌زنترین 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، کم تعهدی 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 متناسبی داشته باشد. مهم‌ترین ویژگی قراردادها در محیط ساده: صلیبت، 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 کارمندانه بوده و از آنجا که دیدگاه کارفرمایانه در آن جاری است، همواره سرمایه‌گذار را در نقش پیمانکار (نه شریک) نگیریسته است. در سازمان مذکور، کرتخی قابل ملاحظه‌ی در برخورد با ریسک‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که در انتقال ریسک‌های مالی، زمانی و درآمدی به بخش خصوصی، ریسک که در انتقال ریسک‌ها، شامل: امکان مدیریت ریسک، هزینه‌ی مدیریت ریسک و انجیزه‌ی کنترل ریسک است، نیز در انتقال ریسک‌ها توجه نشده است. به این ترتیب، به جای برخورد فعلی با ریسک، ساده‌ترین راه یعنی انفعال و سپس انتقال طرف مقابل لحاظ شده است.

-- راهبرد ساده‌انگاری به دوره‌ی بهره‌برداری: موضوع بهره‌برداری یک کارتخصیصی است، که باید به شرکت‌های حرفی و اگذار شود. بخش خصوصی که پیشینه‌ی پیمانکاری داشته و در مشارکت با عنوان سرمایه‌گذار وارد شده است، فقد ویژگی‌های یک بهره‌بردار حرفی 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 و اگذار شده است.

-- راهبرد سعی در تشریک مساعی: طرفین براین واقعیت واقف بوده‌اند که در قراردادهای مشارکتی، تشریک مساعی یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت و رسیدن به اهداف شرکت است. یافته‌ها نشان داده‌اند که طرفین در دوره‌ی ساخت، همواره نیت و قصد همکاری داشته و در مواردی هم با تشریک مساعی توائیسته‌اند بر مشکلات پژوهه 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 تبصره‌ی ۵)، تأخیر در تأمین مالی سهم‌الشراکه و تأخیر در استتمالک اراضی، از جمله موارد مهم کم‌تعهدی به قرارداد است.

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

**۴.۳.۴. عوامل زمینه‌یی**  
عواملی زمینه‌یی در مدل ارائه شده به منظور اختصار از ترتیب عوامل بستره و عوامل واسطه‌یی تدوین یافته است که به این ترتیب به آن‌ها توجه می‌شود:

-- فرهنگ چانه زنی - معاشات: بخش‌های عمومی و خصوصی به ترتیب با سابقه‌ی کارفرمایی و پیمانکاری، تجربه‌ی انجام پژوهه‌های زیادی داشته‌اند. بخش دولتی کارفرما، در عین دقت در امور قراردادی و مالی، برای پیشبرد پژوهه از جهت همکاری با پیمانکار، به دلایل مختلف در بسیاری موارد با وی معاشات 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 اورده‌اند.

-- شکل‌گیری محیط پیچیده: محیط پژوهه در ایران، محیطی مملو از تغییر در قوانین، ناپایداری اقتصادی، پر ریسک، وجود متابع عدم قطعیت فراوان و تحت تأثیر شدید تصمیم‌گیری‌های کلان سیاسی و رخدادهای بین‌المللی است که در مجموع، محیط پژوهه به محیطی با تغییرات غیرخطی و پیش‌بینی ناپذیر تبدیل و برنامه‌ریزی در آن غیرممکن یا سخت شده است. علاوه‌بر موارد اخیر، ماهیت قراردادهای BOT (مانند تعدد قراردادها 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 تعاقب 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 مصاحب‌گران 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 می‌خواهد. این نمونه‌یی 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 هزینه‌ی ساخت، صرف هزینه‌ی نگهداری سالیانه می‌شود و این در حالی است که مطابق قرارداد، ۱۵٪ از درآمد آزادراه به نگهداری اختصاص می‌یابد. با این ترتیب، نگهداری به میران کمینه ممکن 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 رسیده‌ی 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 به طورکلی درخصوص تحقق آن‌ها اظهارنظر شود، یافته‌های حاصل از چهار مرور چنین نشان می‌دهند که:

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

ب) از نظر زمان ساخت، در پروژه‌هایی که سرمایه‌گذار آن بینه‌ی 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 کلیه‌ی موردها 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 مفصل‌بیان شده است.

-- پیامد خروج طرح از توجیه اقتصادی: طولانی شدن دوره‌ی ساخت، افزایش قیمت‌ها، تحمل تأمین مالی اضافی به سرمایه‌گذار تأخیر در بهره‌برداری و تغییل دوره‌ی بهره‌برداری، منجر به این شده است که توجیه اقتصادی طرح زیر سوال رود. عدم قطعیت در زمان بازگشت سرمایه در کلیه‌ی موردها، چالش اصلی به شمار می‌رود و در مجموع، توجیه اقتصادی پروژه به شدت ضعیف شده به نظر رسیده است.

-- پیامد رکود (تله) سرمایه‌گذاری: از آنجاکه 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 تله‌ی سرمایه‌گذاری می‌بینند. تله‌ی که بواسطه‌ی عدم وجود انعطاف در قرارداد سرمایه‌گذار باید به آن تمکین کند. البته با تمکین وی، سرمایه‌گذاری به رکود افتاده و امکان توسعه‌ی سرمایه برای بخش خصوصی منتفی شده است.

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

#### 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 فرضیه‌ی قابل طرح در پژوهش‌های آتی هستند.

قضیه‌ی ۱: ویزگی‌های بلوغ در مشارکت، اصول انتخاب شریک، پایداری اقتصادی، دانش مدیریت پروژه و شریک مساعی، عوامل علی در توسعه‌ی مشارکت بخش‌های عمومی و خصوصی در قراردادهای آزادراهی هستند.

قضیه‌ی ۲: ویزگی‌های زمینه‌ی و واسطه‌ی مشتمل بر: کفایت مطالعات، فرهنگ مشارکت به جای فرهنگ کارفرما - پیمانکار، محیط پیچیده، تقاضه در کسب منافع و کفایت درآمد، عوامل بسترساز در قراردادهای مشارکت آزادراهی هستند.

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

#### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

##### ۱. 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 عمدی 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 تدوین شده، این نتایج به دست آمده است:

۱. در ایران به دلایل: ناپایداری اقتصادی، ناهم راستایی قانون مشارکت با سایر قوانین، ریسک زیاد و پیش‌بینی ناپذیری تغییرات، محیط پروژه پیچیدگی بالایی دارد که تأثیر عمدی 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،

سال پس از تصویب قانون مشارکت) به کمتر از ۳۰۰ کیلومتر رسیده است که بعدی 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 ملاحظه‌ی در مشارکت با بخش خصوصی نداشته و حتی رغبت سرمایه‌گذاران نیز که کاهش یافه است، با واقعیت‌های میدانی تطابق دارد.

۷. از آنجاکه پروژه‌های زیربنایی مشارکت آزادراهی، بلندمدت هستند، سرمایه‌گذاران ویژه‌یی به آن‌ها جذب شده و مطلوبیت کمتری نزد سرمایه‌گذاران داشته‌اند. در دنیا، دولت‌ها به دلیل اهداف توسعه‌یی، پیشتر نقش حامی، پشتیبان و تسهیل‌گر را دارند. در مقابل، بخش خصوصی به پروژه‌های زیربنایی نگاه آرمانی و دغدغه‌مند ندارد، بلکه از منظر منافع عمده‌ی 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 به دست آمده مؤید این واقعیت است که نظام قراردادی موجود که مبتنی بر تجارت کارفرمایانه – پیمانکارانه بوده است، در اثر انطباق‌نایابی با محیط پیچیده، پریسک و پیش‌بینی نایابی پروژه‌یی در کشور، در فرایند مشارکت گرفتار چالش‌های متعدد بوده و پامده‌های مطلوب و رضایت‌باری ایجاد نشده است. بنابراین برای تحقق اهداف توسعه‌یی 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 پیچیده 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 مشارکت؛

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

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 پروژه‌های است. بی‌توجهی به ملزمات مشارکت، نایابی و استاندارد نبودن فرایند مشارکت، عوامل عمده‌ی این خطای راهبردی شناسایی شده‌اند. تدوین قرارداد ناپاخته 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 حفظبقاء 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 همدلنه 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 تشید آن شده است. پامدهایی مانند: رکود سرمایه، ابهام در امنیت سرمایه‌گذاری، افزایش نارضایتی و کاهش تمایل به تداوم قراردادهای مشارکتی مهم‌ترین پامده‌های 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

## پانوشت‌ها

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

## مراجع (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 buliding 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. Sandhyavitri, 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 Danaee-Fard, 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-modhttps://el-part-i.html](http://www.projecttimes.com/articles/introducing-the-new-project-complexity-modhttps://el-part-i.html)).
35. Remington, K. and Pollack, J., *Tools For Complex Projects*, Gower Publishing 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. "Research 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)

مهمنشی عمان شرف، (پیز ۱۴۵۱)  
دوری ۲ - ۸، شماره ۱ / ۳ ص. ۴۰-۳۷ (پژوهشی)

علیرضا ماهپور \* (استادیار)  
دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
سعیده سعیدی شهرپور (کارشناس ارشد)  
دانشکده هندسی صنایع، دوسری عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی

مشکلات ناشی از استفاده 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 افزاد 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 تعییر 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 لوگیت چندگانه به بررسی تعییر رفتار افراد در پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودروی شخصی در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته‌ی) و میان‌مدت (۱ ماهه) پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که ارزش‌ها و هنجارهای فردی از عوامل مؤثر در تعییر رفتار کاربران در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت است.

**واژگان کلیدی:** نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار، مدیریت تقاضا، متغیر پنهان، تعییر رفتار

## 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، معملاً برای تعییر رفتار انتخاب وسیله‌ی افزاد 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 مطلوب تری 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 راه‌بندا)، نتیجه‌ی تراکم ترافیکی خودروهای شخصی هستند. کاهش تراکم ترافیکی مسوط به استفاده ای کمتر از خودروی شخصی و استفاده ای بیشتر از وسایل حمل و نقل همگانی است. سیاست‌گذاران حمل و نقلی با استفاده از سیاست‌های مدیریت تقاضا (TDM)<sup>۱</sup> افراد را به سمت استفاده از وسایل همگانی ترغیب می‌کنند. سیاست‌های مدیریت تقاضا به طور کلی از طریق مکانیسم‌های گوتاگون بازدارنده و تشویقی به دو دسته‌ی سخت و نرم طبقه‌بندی می‌شوند.<sup>[۱]</sup> افزایش قیمت پارکینگ، عوارض جاده‌ها و قیمت‌گذاری راه‌بندا، 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 ۱۷/۱۱/۱۴۰۰، اصلاحیه ۱۶/۱۳/۱۱، پذیرش ۱۵/۱۳/۱۴۰۱

DOI:10.24200/J30.2022.59669.3066

با تور<sup>۴</sup> و همکارش (۲۰۱۷) در مطالعه‌یی در شهر استانبول برای تعیین آثار سیاست‌های مورد نیاز سفر، شامل مجموعه‌یی از سیاست‌های ساخت و نرم، همچون: محدودیت پارکینگ، ساعت‌های کاری منعطه برای کارمندان، تغییر سطح خدمات عمومی و حمل و نقل عمومی نشان داده‌اند که اولویت حمل و نقل عمومی بوده و سیاست‌های نرم، نذری شر، و موقفست بفتی داشته‌اند.<sup>[۴]</sup>

مطالعات در کشورهای مختلف نشان می‌دهند که اثربخشی، مقیولیت و امکان پذیری 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، درکشورها، جوامع، محیط‌ها و گروه‌های قومی مختلف که تحت نظریه‌ی ارزش - باور - هنچار (VBN) ارائه شده‌اند، متفاوت هستند.<sup>[۱۱]</sup> ارزش‌ها با اثرگذاری در باورها و هنچارهای فردی، منجر به تغییر رفتار می‌شوند. تئوری حمایت از محیط‌زیست ارزش - باور - هنچار استرن<sup>۵</sup> (۱۹۹۴)،<sup>[۱۲]</sup> چارچوبی برای بررسی عوامل هنچاری مؤثر در نگرش‌های پایدار رفتاری فراهم کرده است. تئوری VBN، از تئوری ارزش،<sup>[۱۳]</sup> دیدگاه الگوی جدید ریست‌محیطی (NEP)<sup>۶</sup> و مدل فعالیت - هنچار (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 فعل شدن هنچارهای فردی برای تغییر رفتار می‌شود. به طور کلی، نظریه‌ی VBN، ارزش‌ها را از طریق اثرگذاری غیرمستقیم باورها و هنچارها در رفتار در نظر می‌گیرد.

از 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 راهنمای زندگی فردی برای رسیدن به موقعیتی مطلوب معرفی کرده است. لذا بر اساس پژوهش ایشان، دیگرتو و استنگ<sup>۹</sup>، اباری را توسعه داده‌اند که نوعی از ارزش معرفی شده توسط شوارتز و عاملی مؤثر در باور، هنجار و رفتار بوده است.<sup>۱۰</sup> ارزش‌های مذکور، شامل: جهتگیری ارزش جاهطلبی<sup>۱۱</sup>، عدالت‌طلبی<sup>۱۲</sup> و حمایت از کره‌ی زمین<sup>۱۳</sup> هستند، که با اضافه شدن ارزش راحت‌طلبی<sup>۱۴</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 کره‌ی زمین، نظری آلودگی هوا و گرمایش زمین، جهتگیری ارزشی پیوند با کره‌ی 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 دانلاب (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 را باید به عنوان پاسخ به هنجارهای فردی در مورد چنین رفتاری رخ دهد. همچنین دیگرتو و استنگ، نظریه‌ی VBN را برای پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو در ۵ کشور اروپایی در مورد ارتباط زنجیره‌ی نظریه‌ی VBN مطالعه کرده‌اند 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 د، آغازت، که یک کشه، آم، بکا، لاست، بافتله‌های، مشابه، انشا، داده

زنگیروار ارزش‌ها و باورهای فردی است، که در نهایت می‌تواند در تغییر رفتار فرد مؤثر باشد. نظریه‌ی ارزش - باور - هنگار (VBN)، یک نظریه‌ی سلسه‌های مراتبی است، که در کشورهای مختلف در پذیرش سیاست سخت بررسی شده است، اما اثربداری متغیرهای مذکور در دوره‌های کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) تا به حال بررسی نشده است. به منظور پر کردن خلاً ذکر شده در مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر به بررسی اثر ترکیبی ارزش‌ها، باورها و هنگارهای فردی خارج از توالی زنگیره، به همراه وزنگی‌های 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 افزاد 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 تعییر رفتار در دوره‌های مختلف اجرای سیاست‌های سخت اثربخش است؟» و «آیا نگرش‌های زیست‌محیطی منجر به تعییر رفتار افراد در دوره‌های مختلف اجرای طرح زوج با فرد می‌شود؟». هدف از پژوهش حاضر ارزیابی دقیقی استفاده از خودروی فردی مؤثر در تعییر رفتار افراد تحت اجرای سیاست‌های کاهش از خودروی شخصی است، که می‌تواند به ارائه دستاوردهای قابل توجهی در پذیرش و پایداری نتایج سیاست‌های حمل و نقلی 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 و استفاده‌ی  
بیشتر از وسایل سازگار با محیط زیست پیشنهاد شده است.<sup>[۲]</sup> سیاست مدیریت  
تقاضا را می‌توان به عنوان راهبرد یا مجموعه‌ی از عوامل، با هدف اثربخشی در  
رفتار سفر به وسیله‌ی معروفی گزینه‌های جایگزین جایه‌جایی و برآورده کردن نیازهای  
تحرک یک منطقه مشاهده کرد.<sup>[۳]</sup> از این رو، اعتقاد بر این است که سیاست‌های  
مدیریت تقاضای حمل و نقل (TDM)<sup>[۴]</sup>، پتانسیل قابل توجهی در کاهش استفاده  
از خودروی شخصی دارند.<sup>[۵]</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 این که 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>[۶]</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>[۷]</sup> بسیاری از مطالعات که با استفاده از سیاست‌های (نرم) بررسی  
شده‌اند،<sup>[۸]</sup> آثار مثبت مریبوط به تغییر شیوه از تومیل شخصی به حمل و نقل عمومی  
را، گزارش داده‌اند.

و هنگارهای 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 حمل و نقل همگانی مانند مترو و اتوبوس تحت تأثیر سیاست قیمت‌گذاری محدوده، از چهار دسته متغیر مرتبط با ارزش‌ها، اعتقادها و هنگارهای افراد در محدوده‌ی طرح کترول آلوودگی هوا در شهر تهران و در میان افراد حضور یافته استفاده کرده و دریافت‌های افرادی که نگرانی عمیق‌تری نسبت به مسائل کره‌ی زمین داشته و ارزش حمایت قوی‌تری از کره‌ی 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 مطابویت متغیرهای مشاهده شده و انتخاب تغییر وسیله‌ی حمل و نقلی معنی‌دار بوده است. [۲۰ و ۲۱]

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

به منظور بررسی عوامل پنهان نگرشی محیط‌بستی 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 سلسه مراتبی استفاده شده و نتایج قابل ملاحظه‌ی در کشورهای مختلف با فرهنگ‌های مختلف داشته است. [۲۲ و ۲۳] 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 نقیلی، اثر مستقیمی دارد.**

**فرضیه‌ی ۱،۱: سطح رفاه اقتصادی در دوره‌ی کوتاه‌مدت طرح منجر به عدم تغییر وسیله‌ی 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 کره‌ی زمین در استفاده از وسایل حمل و نقل 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 عاقبت رفتاری در استفاده از وسایل همگانی اثری مثبت دارد.**

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

است؛ به این طریق که ارزش‌ها و هنگارهای 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 هنگاری، 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. [۱۵] 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 کره‌ی زمین، در باورها و هنگارهای 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 گمنجانده نشده است، یک پیش‌بینی کننده‌ی مهم رفتار است. بنابراین، ارزش راحت‌طلبی بهتر است در به کارگیری مدل‌های VBN گمنجانده شود. [۱۶] اونال 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. هنگارهای فردی برای کاهش استفاده از خودرو بوده‌اند، به این معنی که حس تعهد اخلاقی با پذیرش سیاست‌کاهش استفاده از خودرو بوده‌اند، به این معنی که حس تعهد اخلاقی با حمایت بیشتر از سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو همراه است. مسئولیت‌پذیری، قوی‌ترین پیش‌بینی کننده‌ی هنگارهای 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 محیط‌بستی، قوی‌ترین پیش‌بینی کننده‌ی آگاهی از عاقبت رفتاری در زنجیره‌ی علی در نظریه‌ی VBN است. آنها در یافتن که مقدار حمایت از کره‌ی زمین، فرایند فعال‌سازی هنگارهای فردی را فعل 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 دیگروت و همکارانش را گسترش داده و نشان می‌دهد که پذیرش سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو به دنبال فرایندی از ارزش‌های حمایت از کره‌ی زمین، یک محرك مهم بوده است. [۱۷]

اخیراً مطالعه‌یی 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، آثار زیان‌آوری در پذیرش سیاست دارد. امکان پذیرش سیاست ممکن است منجر به انتخاب شیوه‌های سفر پایدار شود. [۱۸ و ۱۹] 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 کره‌ی زمین

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی افراد.

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

فرضیه‌ی ۵: هنجره‌های فردی در عدم استفاده از وسائل شخصی در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت اجرای طرح زوج یا فرد اثری مستقیم دارد.

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

روش نظرسنجی به وسیله‌ی پرسشنامه در سپتامبر سال ۲۰۱۸ در شهر تهران صورت پذیرفت 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 مطالعه‌ی حاضر، بیش از ۵۰۰ پرسشنامه به صورت تصادفی در میان شهروندان تهرانی در محدوده‌ی طرح زوج یا فرد و محدوده‌ی طرح زوج وسیله‌ی نقیلی همگانی و یا غیرهمگانی سفر کرده بودند، توزیع شده است. در نهایت، پس از پاک‌سازی داده‌ها، ۵۰ پرسشنامه‌ی کامل شده ازین 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 وسائل نقلیه‌ی 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 ارزش‌های اندازه‌گیری AR و PN در زیربخش سوم قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که ارزش‌ها، نگرش‌ها و اعتقادهایی که در بخش دوم پرسشنامه ارائه شده‌اند، پیشتر به عنوان متغیرهای پنهان توسط سایر پژوهشگران برای تئوری‌های NAM و VBN ارائه شده‌اند. بخش‌های ارزشی در مطالعات حاضر استفاده شده‌اند. خلاصه‌ی 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 فوق العاده) به عنوان ارزشی فوق العاده مهم در زندگی افراد پرسش شده است. در ادامه 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 هنجره‌ای 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 یا به صورت ترکیبی با استفاده از سؤال‌های پرسشنامه استفاده شده شده‌اند. بعد از انجام تحلیل عاملی اکتشافی<sup>۱۵</sup> و استخراج عامل‌های پنهان

جدول ۲. متغیرهای پنهان و نماگرها.

ردیف	متغیر پنهان	نماگر	مرجع
۱	راحت طلبی	۱-لذت و خوشی ۲-لذت بردن از زندگی ۳-احساس رضایت فردی	(De Groot et al., 2008; Steg et l., 2014a; Steg et al., 2014b)
۲	جاده طلبی	۱-قدرت اجتماعی ۲-رفاه ۳-قدرت و توانمندی مدیریتی ۴-قدرت نفوذ و اثرگذاری ۵-جاده 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 بیوند 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. ۲-بشر 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 بهار می آورد. ۴-بنویغ 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 پهنه 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 آمزد و غیر واقعی است.	Dunlap et al., 2000)
۶	آگاهی از عواقب	۱-استفاده از خودرو باعث تمام شدن منابع طبیعی، همچون نفت می شود. ۲-استفاده از خودرو فضای بسیار زیادی را اشغال می کند که در نتیجه فضای کمتری برای حمل و نقل باک فراهم می شود. ۳-استفاده از خودرو یکی از دلایل مهم حوادث مریبوط 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.	(De Groot and Steg, 2008; Jakovcevic and Steg, 2013)
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 در توطیخ خودروها به وجود آمده اند، مسئول هستم. ۳-نه فقط دیگران، مانند دولت، مسئول ترافیک سنتگین 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	هنجرهای فردی	موظّف هستم که سفر های خود را در مسیر های سازگار با محیط زیست انجام دهم. من تبدیل به انسان بهتری می شوم، اگر به جای وسیله نقلیه شخصی، بیشتر از وسایل نقلیه عمومی استفاده نمایم. افرادی مانند من، هر کاری که می توانند باید انجام دهند تا استفاده از وسیله نقلیه خود را به حداقل برسانند. احساس می کنم موظّف هستم به هنگام انتخاب گزینه های سفر، پیامدهای زیست محیطی را در نظر پنگیرم. اگر من بخواهم وسیله نقلیه جدیدی را خریداری کنم، موظّف 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.	(De Groot et al., 2008)
۹			

شده‌اند. مدل دوره‌ی کوتاه‌مدت با بیشترین بهبود در مقدار لگاریتم تابع درست‌نمایی  $\text{LL}(\beta) = -0.536 / 0.53$  با  $18$  متغیر به عنوان مدل برتر انتخاب شده است. مدل دوره‌ی میان‌مدت با  $21$  متغیر مجازی و ترکیبی با بیشترین مقدار تابع لگاریتم درست‌نمایی  $\text{LL}(\beta) = -7.98 / 0.532$  و معیارهای شاخص‌های برازش کلی  $= 0.156$  و  $\rho_{adj} = 0.138$  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 بنابر مطالعات پیشین، افراد بعد از تعییت از سیاست‌های سخت به رفتار قبلی خود روی می‌آورند، بنابراین ممکن است تعییر رفتار آن‌ها تحت دوره‌های مختلف اجرای طرح متفاوت باشد.<sup>[۹]</sup> در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی رفتار افراد در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت ( $1$  هفته) و میان‌مدت ( $1$  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 عامل 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 شده است. در مطالعه‌ی حاضر، متغیرهای هزینه‌های خانوار ( $5-4$  میلیون تومان) و قیمت تقریبی خودروی شخصی ( $50-100$  میلیون تومان) بر روی مطلوبیت استفاده از وسیله‌ی خصوصی در دوره‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت با علامت مشیت 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 تعییر 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 تعییر برنامه‌ی سفر کاری ممکن نیست. افراد با هدف سفر کاری در دوره‌ی میان‌مدت نیز تمایلی به تعییر رفتار سفر ندارند. در دوره‌ی میان‌مدت، سفرهای اختیاری (تفريح و خرید) منجر به تعییر 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 تعییر رفتار شود. کارمندان در دوره‌ی کوتاه‌مدت، تمایلی به تعییر رفتار نداشتنند. همچنین افزاد بازنیسته و پژوهشک نیز در دوره‌ی میان‌مدت تمایل به استفاده از وسائل نیمه‌خصوصی داشتند. انتظار می‌رفت در رفتار افراد بازنیسته به دلیل نداشتن برنامه‌ی سفرهای کاری در سفرهای روزانه‌ی خود در دوره‌ی میان‌مدت، تعییر مشاهده شود، اما علامت متغیر مذکور بر وسیله‌ی نیمه‌خصوصی با علامت مشیت معنی‌دار شده است.

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

از سوال‌های پرسش‌نامه، از متغیرهای اجتماعی - اقتصادی و ترکیب با عامل‌های پنهان استفاده شده است. متغیرهای ترکیبی در بررسی تعییر 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  $3$  و متغیرهای ترکیبی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول  $4$  ارائه شده‌اند.

در سیناریوی شماره‌ی  $1$  (اجرا طرح زوج یا فرد) پرسش‌نامه از افراد خواسته شد شرایط فرضی آلوگی هوا و اجرای طرح زوج یا فرد را در نظر بگیرند؛ از افراد پرسیده شد «فرض کنید شرایط آلوگی هوا ناسالم گزارش شده و موظف به اجرای طرح زوج یا فرد از درب منزل، از روز شنبه الی پنج‌شنبه هستید. چنانچه طرح مذکور به صورت کوتاه‌مدت  $1$  هفته‌ی یا میان‌مدت  $1$  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  $27\%$  از مترو،  $13\%$  از تاکسی و تاکسی اینترنتی و  $10\%$  ماشین شخصی با پرداخت جریمه را انتخاب کرده‌اند. فقط  $12\%$  افراد گزینه‌های تعییر 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 تجمع شد و در نهایت به  $3$  گزینه‌ی خصوصی، نیمه‌خصوصی و همگانی تقلیل یافت. گزینه‌ی وسیله‌ی خصوصی، شامل: خودروی شخصی، وسیله‌ی نقلیه‌ی ثانویه، موتورسیکلت، تعییر روز، تعییر ساعت و تعییر مسیر است. وسیله‌ی نیمه‌خصوصی از تجمع گزینه‌های تاکسی، تاکسی اینترنتی و آژانس و گزینه‌ی همگانی از تجمع مترو و اتوبوس تشکیل شده است. در جدول  $5$ ، گزینه‌های پیشنهادی برای طرح زوج یا فرد در دوره‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت ارائه شده است.

## ۴. نتایج مدل‌سازی

ابتدا با استفاده از نرم افزار ایموس (نسخه‌ی  $25$ )<sup>[۱۶]</sup>، 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 عاملی از روش تحلیل عاملی با روش مؤلفه‌های اصلی<sup>[۱۷]</sup> استفاده شده است. برای بررسی کفايت نمونه در انجام تحلیل عاملی اکتشافی از ضریب KMO استفاده شده است. نتایج ارائه شده KMO در جدول  $6$ ، نشان‌دهنده‌ی کفايت نمونه‌هاست.

از بین  $6$  نماگر، نگرش‌های زیست‌محیطی پژوهش با استفاده از تحلیل عاملی اکتشافی شناسایی شده‌اند.

پس از استخراج عوامل نگرشی به ساخت مدل‌های لوجیت چندگانه برای هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت توسعه نرم افزار ایموس (نسخه‌ی  $5$ )<sup>[۱۸]</sup> پرداخته شده است. در مدل لوجیت چندگانه‌ی دوره‌ی کوتاه‌مدت،  $18$  متغیر مستقل و در دوره‌ی میان‌مدت،  $21$  متغیر مستقل بر مطلوبیت وسایل نقلیه، شناسایی و معنی‌دار شده‌اند. از میان  $1000$  مدل پرداخت شده، دو مدل با بیشترین بهبود در تابع لگاریتم حاصل از مدل‌ها در جدول‌های  $7$  و  $8$  ارائه شده‌اند.

با پرداخت مدل لوجیت چندگانه در اجرای طرح زوج یا فرد در دوره‌ی کوتاه‌مدت ( $1$  هفته)، عوامل اثرگذار در تعییر رفتار انتخاب وسیله‌ی افراد بررسی

### جدول ۳. نتایج تحلیل عاملی اکتشافی.

عامل	نماینده	باراعمالی
ارزش راحت طلبی (HV)	لذت و خوشی لذت بودن از زندگی	-۰/۳۶۳ -۰/۴۶۷ -۰/۲۰۹
ارزش جاه طلبی (EV)	احساس رضایت فردی قدرت اجتماعی رفاه قدرت و توانمندی مدیریتی قدرت فنوز و انرگذاری	-۰/۱۹۸ -۰/۱۷۵ -۰/۳۸۱ -۰/۳۹۷ -۰/۱۰۶۵
ارزش نوع دوستی (AV)	جهانی در صلح و آرامش عادالت اجتماعی کمک رسانی	-۰/۱۱۸ -۰/۴۲۳ -۰/۳۷۵ -۰/۱۵۷
حمایت از کره زمین (BV)	ارزش قاتل شدن برای کره زمین احساس پیوند با طبیعت محافظت از محیط زیست جلوگیری از آلوده سازی محیط زیست	-۰/۱۲۴ -۰/۳۰۲ -۰/۴۸۴ -۰/۱۳۱
NEP <sub>1</sub>	اگر همه چیز در مسیر قلی خود آدمه پیدا کند، ما به زودی یک فاجعه بزرگ زیست محیطی را تجربه خواهیم کرد. نیوگ انسان ها، تضمین خواهد کرد که ما زمین را غیر قابل سکونت تجربه خواهیم کرد.	-۰/۴۴۳ -۰/۶۸۵ -۰/۷۸۷
NEP <sub>2</sub>	تعادل طبیعت با مقابله با تأثیرات کشورهای مندرن صنعتی، به اندازه کافی قوی است.	-۰/۴۸۸ -۰/۵۱۶ -۰/۷۲۳
NEP <sub>3</sub>	در صورت بهره برداری صحیح، کره زمین می تواند منابع طبیعی زیادی را در اختیار ما قرار دهد. گیاهان و حیوانات، به اندازه انسان ها، حق بقا و زندگی دارند.	-۰/۴۶۰ -۰/۷۴۱
موالات اکنجه رفعت (AC)	استفاده از خودرو باعث تمام شدن منابع طبیعی، همچون نفت می شود. استفاده از خودرو فضای زیادی را اشغال می کند که در نتیجه فضای کمتری برای دوچرخه سواران، عابرین پیاده و کودکان فراهم می شود.	-۰/۰۹۲ -۰/۱۷۵
AR <sub>1</sub>	استفاده از خودرو یکی از دلایل مهم حوادث مریض به ترافیک است. استفاده از خودرو به علت ایجاد سر و صدای ترافیکی و آلودگی هوا، باعث کاهش کیفیت زندگی می شود.	-۰/۳۴۱ -۰/۳۲۰ -۰/۲۲۱
AR <sub>2</sub>	من هم احساس می کنم که در قبال استفاده از سوخت های فسیلی توسط خودروها مسئولیت دارم. من نیز به خاطر مشکلاتی که توسط خودروها به وجود آمده اند، مسئول هستم.	-۰/۷۱۴ -۰/۸۱۹ -۰/۱۶۹۲ -۰/۱۶۳۵
مسولیت رفتاری (AR)	نه فقط دیگران، مانند دولت، مسئول ترافیک سنگن هستند، بلکه من نیز هستم. من هم در خصوص تأثیر ترافیک جاده ای بر روی گرمایش زمین، احساس مسئولیت می کنم.	-۰/۱۶۰۹ -۰/۱۶۰۰
محیط فوری PN <sub>1</sub>	سفر های خود را در مسیر های سازگار با محیط زیست، از جمله استفاده از دوچرخه انجام دهم. من تبدیل به انسان بهتری می شوم، اگر به جای وسیله نقلیه شخصی، بیشتر از وسایل نقلیه عمومی استفاده نمایم.	-۰/۶۳۱ -۰/۶۶۳ -۰/۷۲۱ -۰/۷۴۷ -۰/۵۷۵
PN <sub>2</sub>	افرادی مانند من، هر کاری که می توانند باید انجام دهند تا استفاده از وسیله نقلیه خود را به حداقل برسانند. موظف هستم به هنگام انتخاب گزینه های سفر، بیامدهای زیست محیطی استفاده از ماشین را در نظر نگیرم. اگر بخواهم وسیله نقلیه جدیدی را خریداری کنم، به لحاظ اخلاقی، وسیله ای را با صرفه جویی بیشتر انرژی تهیه ننمایم.	-۰/۹۹۵ -۰/۳۹۴

جدول ۴. متغیرهای ترکیبی.

نام متغیر	تعریف متغیر	نوع متغیر
$LV_{short-car-AV}$	ارزش عدالت طلبی*	سن (۳۵-۴۴)
$LV_{short-car-AR}$	پذیرش مسئولیت همراه (فرزنده)	
$LV_{med-car-PN}$	هنچار فردی*	تعداد خودرو (۲ و سیله)
$LV_{med-car-BV}$	ارزش حمایت از کره زمین*	هدف همراه (تفريح)
$LV_{med-car-HV}$	ارزش راحت طلبی*	جنسیت
$LV_{med-car-PN}$	هنچار فردی	(PN <sub>۱</sub> )*گواهینامه
$LV_{short-semi-Nep}$	باور حمایت از محیط زیست (NeP <sub>۱</sub> )*درآمد مستقل	متغیر پنهان *دامی
$LV_{med-semi-Nep}$	باور حمایت از محیط زیست (Nep <sub>۱</sub> )*هدف سفر (کار)	
$LV_{med-semi-HV}$	ارزش راحت طلبی*	قیمت خودرو (۵۰-۲۰ میلیون تومان)
$LV_{short-pub-AC}$	آگاهی از عواقب رفتار*	سن (۱۸-۲۴)
$LV_{short-pub-AV}$	ارزش عدالت طلبی*	شغل (کارمند بخش خصوصی)
$LV_{short-pub-BV}$	ارزش حمایت از کره زمین*	سن (۲۵-۳۴)
$LV_{med-pub-AC}$	ارزش عدالت طلبی*	تحصیلات (زیر دiplam)
$LV_{med-pub-BV}$	ارزش حمایت از کره زمین*	شغل (کارمند بخش خصوصی)

از وسیله‌ی نقلیه‌ی شخصی می‌کنند. با توجه به آخرین آمارهای منتشر شده از جمعیت شاغل شهر تهران (سال‌نامه‌ی آماری سال ۱۳۹۸ شهر تهران)، از مجموع ۶۶۷/۲ نفر شاغل در شهر تهران، ۸۱٪ شاغلین در تهران، مرد هستند. لذا، استفاده‌ی بیشتر مردها از وسیله‌ی نقلیه‌ی شخصی به جهت ترد در محدوده‌ی مورد مطالعه توجیه‌پذیر است.

به عبارت دیگر، نتایج نشان داد که افراد نسبت به پذیرش سیاست مقاومت دارند و ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی به تنها منجر به تغییر رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه‌ی نمی‌شوند. می‌توان چنین تفسیر کرد که فرهنگ‌سازی می‌تواند منجر به تغییر شود، چراکه آگاهی از عواقب، تأثیر مشتبی در انتخاب وسایل همگانی دارد و آگاهی از عواقب با آموزش و فرهنگ‌سازی به دست می‌آید، که این نتیجه مؤید فرضیه‌های ۱ و ۲ است.

نتایج بررسی نظریه‌ی VBN به صورت سلسله مراتبی، نشان‌دهنده مؤثر بودن ارزش‌ها در پیش‌بینی تغییر رفتار به صورت غیرمستقیم است و همچنین متغیرهای مذکور می‌توانند مستقیماً در تغییر رفتار مؤثر باشند. ارزش‌ها به صورت غیرمستقیم از طریق پذیرش مسئولیت ناشی از رفتار در هنچارها در مطالعات پیشین مؤثر بوده‌اند.<sup>[۵]</sup>

در میان عوامل ارزشی زنجیره‌ی VBN، جهت‌گیری ارزش حمایت از کره زمین، پیش‌بینی‌کننده قوی برای تغییر رفتار بوده است.

نتایج مطالعه‌ی VBN در زبان نشان داد که ارزش حمایت از کره زمین در باورهای حمایتی از کره زمین و هنچارها اثر مشتبی دارد. همچنین مطالعه‌ی VBN در روسیه ارزش حمایت از کره زمین با ایجاد تعهد اخلاقی برای کاهش مصرف خودرو، در فرایند فعل شدن هنچارهای فردی مؤثر بوده است، که معمولاً سیاست‌های کاهش استفاده از خودرو را برای دستاوردهای زیست‌محیطی افزایش می‌دهد. مشاهده‌های اخیر مطابق نتایج مطالعاتی بوده است که در کشورهای اروپایی و آمریکای لاتین نیز بررسی شده‌اند.<sup>[۶]</sup> هر چه جهت‌گیری ارزش حمایت از کره زمین برای افراد قوی ترباشد، نسبت به مسائل و مشکلات ناشی از استفاده‌ی خودرو حساس‌تر هستند. در پژوهش حاضر، کارمندان بخش خصوصی در صورت اجرای طرح زوج یا فرد تمایلی به تغییر رفتار نداشتند، ولی با جهت‌گیری ارزش حمایت از

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

گزینه	فراوانی مطلق	فراوانی نسبی	وسیله‌ی شخصی با پرداخت جریمه
۱۰	۴۸	۱۰	وسیله‌ی نقاییه ی ثانویه
۷	۳۷	۷	آرانس
۳	۱۴	۳	تاكسي
۱۳	۶۶	۱۳	مترو
۲۷	۱۳۴	۲۷	اتوبوس
۹	۴۷	۹	تاكسي اينترنتي
۱۳	۶۳	۱۳	موتورسيكلات
۶	۲۹	۶	تغییر روز جهت تردد در ناحیه
۴	۲۱	۴	تغییر ساعت جهت تردد در ناحیه
۴	۱۹	۴	تغییر مسیر جهت تردد
۲	۱۲	۲	لغو
۲	۱۰	۲	مجموع
۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰	

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

ردیف	مجموعه‌ی تحلیل شده	نام	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 کره زمین	BV	۰/۸۱۶
۵	باورهای محیط‌زیستی	NEP	۰/۶۲۶
۶	آگاهی از عواقب رفتار	AC	۰/۷۹۹
۷	پذیرش مسئولیت رفتار	AR	۰/۷۴۱
۸	هنچارهای فردی	PN	۰/۷۷۶

## جدول ۷. نتایج مدل لوجیت دوره‌های کوتاه‌مدت.

p - value	ضریب دوره‌های کوتاه‌مدت		علامت متغیر	متغیر
	خصوصی نیمه خصوصی	همگانی		
۰/۰۰۸		-۰/۸۲۴***	<i>a_car</i>	ثابت
۰/۰۰۰	-۰/۶۷۶***		<i>male</i>	جنسيت
۰/۰۶۰	۱/۳۴۵*		<i>age_6</i>	سن
۰/۰۰۰		۲/۲۲۳***	<i>cost_6</i>	هزینه خانوار
۰/۰۶۴	۰/۳۹۶*		<i>edu_4</i>	مدرک تحصیلی
۰/۰۲۱	-۰/۶۸۳**		<i>epkh</i>	اشغال (کارمند بخش خصوصی)
۰/۰۰۱		۱/۲۲۰***	<i>hmp_1</i>	هدف همراه
۰/۰۴۳	-۰/۶۷۶**		<i>frq_61</i>	فراوانی سفر
۰/۰۳۰		-۰/۰۲۷**	<i>tt_short-car</i>	
۰/۰۰۴	-۰/۳۸***		<i>tt_short-semi</i>	زمان سفر
۰/۰۰۵	-۰/۰۲۳***		<i>tt_short-pub</i>	
۰/۰۹۷		-۰/۳۹۶*	<i>LV_{short-car-AV}</i>	
۰/۰۵۴		-۲/۰۰۱*	<i>LV_{short-car-AR}</i>	
۰/۰۷۵		-۰/۴۵۶*	<i>LV_{med-car-PN}</i>	
۰/۰۰۸	-۰/۳۹۶***		<i>LV_{short-semi-Ncp1}</i>	ترکیبی
۰/۰۳۶	۰/۷۷۶**		<i>LV_{short-pub-AC}</i>	
۰/۰۵۶	۰/۸۵۰*		<i>LV_{short-pub-AV}</i>	
۰/۰۵۱	۰/۴۰۹*		<i>LV_{short-pub-BV}</i>	

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

جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی، اهمیت به رفاه سایر افراد جامعه است و در هنگارها و رفتار حمایت از محیط زیست، اثری مشیت دارد. مشاهده شد که افراد جوان در محدوده‌ی سنی (۴۴-۳۵) سال با جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی در دوره‌ی کوتاه‌مدت تمایلی به استفاده از وسائل خصوصی ندارند، همچنین کارمندان بخش خصوصی نیز با جهت‌گیری ارزش عدالت‌طلبی در دوره‌ی کوتاه‌مدت تمایل به استفاده از وسائل همگانی خواهند داشت. در رفتار افراد با تخصیلات زیر دلیل 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 مسولیت 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، هنگارهای فردی قوی‌ترین عامل در پذیرش سیاست کاهش استفاده از خودروی شخصی هستند. هنگارهای 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 تقليه‌ی شخصی در هر دو دوره‌ی کوتاه‌مدت و میان‌مدت طرح، تغییری در رفتار آنها مشاهده نشود. اما از آنجا که افراد با هنگارهای فردی فعال

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

افراد جوان در بازه‌ی سنی (۳۴-۲۵) سال با جهت‌گیری ارزش حمایت از کرده‌ی زمین به وسائل همگانی در دوره‌ی کوتاه‌مدت اجرای طرح زوج یا فرد تمایل خواهند داشت. در سفرهای همراهی با هدف تقویت انتظار می‌رفت که افراد از خودروی شخصی استفاده کنند، ولی افراد با جهت‌گیری ارزش حمایت از کرده‌ی 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 تقویح است، انتظار می‌رفت در رفتار انتخاب وسیله‌ی نقلیه تغییری مشاهده نشود، اما با جهت‌گیری ارزش حمایت از کرده‌ی زمین در دوره‌ی میان‌مدت در رفتار افراد تغییر مشاهده شده است. به طور خاص، افراد با جهت‌گیری ارزش حمایت از کرده‌ی 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 خودرو شخصی کمتر است؛ زیرا خودروی شخصی از نظر راحتمی و امنیتی 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 الودگی هوا و آثار منفی در سلامت افراد در طولانی‌مدت با جهت‌گیری راحت‌طلبی باشد. همچنین قیمت تقویتی خودرو (۱۰۰-۵۰ میلیون تومان) و جهت‌گیری ارزش راحت‌طلبی منجر به تمایل

جدول ۸. نتایج مدل لوجیت دوره‌های میان‌مدت.

p - value	ضریب دوره‌های میان‌مدت		علامت متغیر	متغیر
	همگانی	نیمه خصوصی		
۰ / ۰۰		- ۱ / ۶۶۰ ***	$b_{car}$	ثابت
۰ / ۰۲۲		۰ / ۵۵۰ **	male	جنسیت
۰ / ۰۰	۱ / ۰۵۷***		age <sub>1</sub>	سن
۰ / ۰۰	- ۱ / ۳۰۰ ***		vehcost <sub>2</sub>	قیمت تقریبی
۰ / ۰۰	۲ / ۷۱۴ ***		vehcost <sub>†</sub>	خودروی شخصی
۰ / ۰۲۱	- ۰ / ۵۶۲ **		indc	درآمد مستقل
۰ / ۴۴۷	۰ / ۹۰۳ **		ret	بازنیسته
۰ / ۰۳۰	۲ / ۵۵۸ **		doct	اشغال پزشک
۰ / ۰۰		۰ / ۸۲۴ ***	purp <sub>1</sub>	هدف سفر
۰ / ۰۰۲	- ۰ / ۹۹۴ ***		mpurp <sub>†</sub>	
۰ / ۰۱۸		۰ / ۵۳۷ **	zdu <sub>‡</sub>	مدت زمان حضور در ناحیه
۰ / ۰۴۷		- ۰ / ۰۲۵ **	$tt_{med-car}$	
۰ / ۰۰۱	- ۰ / ۰۴۲ ***		$tt_{med-semi}$	زمان سفر
۰ / ۰۱۲	- ۰ / ۰۲۲ **		$tt_{med-bus}$	
۰ / ۰۷۳		- ۴ / ۰۲۴ *	$LV_{med-car-BV}$	
۰ / ۰۲۸		- ۰ / ۳۰۵ **	$LV_{med-car-HV}$	
۰ / ۰۱۳		- ۰ / ۳۱۸ **	$LV_{med-car-PN}$	
۰ / ۰۲۰	- ۰ / ۳۹۶ **		$LV_{med-semi-Nep^1}$	ترکیبی
۰ / ۰۱۹	۰ / ۴۸۷ **		$LV_{med-semi-HV}$	
۰ / ۰۷۵	- ۰ / ۴۹۰ *		$LV_{med-pub-AV}$	
۰ / ۰۵۹	۰ / ۵۴۷ *		$LV_{med-pub-BV}$	

زنگیره‌بی در نظریه‌ی ارزش - باور - هنجار (VBN) نیز استفاده شده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تغییر رفتار افراد در مواجهه با سیاست‌های منع 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 ظرف‌سنجی مصاحبه‌ی حضوری به وسیله‌ی پرسشنامه در شهر تهران صورت پذیرفته است. بنابر مطالعات پیشین، علاوه‌بر ویژگی‌های اقتصادی - اجتماعی و ویژگی‌های وسیله‌ی نقلیه، از عوامل پنهان فردی مؤثر در رفتار انتخاب وسیله‌ی افراد برگرفته از نظریه‌ی VBN نیز پرسشنگری شده است. پس از پالاسن داده‌ها جهت شناسایی متغیرهای پنهان نگرشی محیط‌زیستی و عوامل زیربنایی پرسشنامه از تحلیل عاملی اکتشافی استفاده شده است. در نهایت، به ساخت مدل‌های لوجیت چندگانه در دو دوره‌ی کوتاه‌مدت (۱ هفته) و میان‌مدت (۱ ماه) پرداخته شده است. نتایج مدل‌های لوجیت 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 مؤلف 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 فعلی 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 حمل و نقلی است، اکثرًا با مخالفت افراد روبرو 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 بستنده نشده و از روابط

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 میران 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 انرجه معناداری ویژگی فردی مؤثر بوده و در دوره‌های مختلف منجر به تغییر رفتار 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 میران 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 پر اهمیت شناخته شده است. ارزش حمایت از کره‌ی زمین و هنجارهای فردی از مهم‌ترین عوامل در تغییر رفتار افراد در دوره‌های اجرای سیاست منع استفاده از خودرو بوده است. افزادی که با توجه به شرایط رفاهی و موقعیت شغلی در اجرای طرح زوج یا فرد در دوره‌های میان‌مدت تمابلی به تغییر رفتار نداشتند، اما با جهت‌گیری ارزشی و تعهدات اخلاقی به تغییر رفتار روی آورند. همچنین هنجارهای فردی فعال شده، افراد را به لحاظ اخلاقی مؤلف به تغییر وسیله‌ی در شرایط آلودگی می‌کند. بنابر پژوهش‌های پیشین، ارزش‌های راحت‌طلبی و جاهطلبی، ارتباطی منفی با باورهای حمایت از محیط‌زیست داشته و افزاد با جهت‌گیری ذکر شده، نسبت به تغییر وسیله‌ی تمایلی نداشتند؛ اما مشاهده‌های مدل‌سازی پژوهش حاضر نشان می‌دهد افزاد 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 به صرفه بودن خودروی شخصی، عاملی مهم در مقاومت افراد در تغییر وسیله‌ی نقیه است، که با وجود هزینه‌ها و منوعیت استفاده از آن، افراد بر عدم تغییر وسیله‌ی اصرار دارند. با افزایش آگاهی افراد نسبت به مضرات استفاده از می‌شود.

## پابنوشت‌ها

1. transport demand management
2. value- belief- norm
3. travel demand management
4. Batur
5. Stern
6. new ecological paradigm (NEP)
7. norm activation model (NAM)
8. Schwartz
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. nllogit 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 جداشدگی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مodal

آرمان مامعزبی<sup>\*</sup> (استادیار)

محتمم خان‌حمدی (دانشجوی دکتری)

کامران نوبخت وکیلی (موبی)

گروه هندسی عمران، دانشکده هندسی، دانشگاه کردستان

شناسایی آسیب در سازه‌ها از اهداف اولیه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها است. امروزه استفاده از ستون‌های کامپوزیت CFST در صنعت ساختمان بهویه سازه‌های ساختمانی بلندمرتبه، رو به افزایش است. در ستون‌های کامپوزیت CFST، جداشدگی هسته‌ی بتی از جداری فولادی به عنوان رایج‌ترین نوع آسیب مطرح است، که در نوشتار حاضر به تأثیر آن بر خواص دینامیکی مodal و همچنین، شناسایی منطقه‌ی آسیب جداشدگی پرداخته شده است. جداشدگی 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 همپستگی مodal کمتر از ۱ به دلیل وجود آسیب مشاهده شده است. برای شناسایی ناحیه‌ی جداشدگی، 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 مودهای موقعیت‌های جداشدگی اتفاق افتاده است.

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

واژگان کلیدی: پایش سلامتی سازه، شناسایی آسیب جداشدگی، تحلیل بسامدی، معیار همپستگی مodal، تحلیل موجک.

## ۱. مقدمه

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 مodal یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های چندگانه پرداخت و دریافت که برای شناسایی محل ترک، حذف نوفه مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مقادیر و کاربردهای عملی را کاهش داده و این امکان را فراهم ساخته است که با استفاده از ضرایب جزئیات موجک ایستا (SWT)<sup>۳</sup> و داده‌های مodal به آشکارسازی ترک در تیرها با تبدیل موجک ایستا (WT)<sup>۴</sup> با استفاده از تحلیل ساخته شده داده‌های پرداختند و نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای داده‌های شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند و نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای داده‌های شکل مود، می‌توان محل آسیب را شناسایی کرد. رو<sup>۵</sup> و همکاران<sup>۶</sup> [۲۰۱۳] با به کارگیری موجک‌های گوسی جهت دار دو بُعدی<sup>۷</sup> و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر<sup>۸</sup> به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند. لی<sup>۹</sup> و همکاران<sup>۱۰</sup> [۲۰۱۴] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته<sup>۹</sup> به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خربایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی، قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خربایی را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب استفاده شود. لی و هو<sup>۱۰</sup>

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، حتی‌امکان از وقوع خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری کرد. ابداع و توسعه‌ی انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مقادیر 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 توام‌مندی چون تبدیل موجک (WT)<sup>۱۱</sup> است که با استفاده از آن، اطلاعات بیشتری از پاسخ تحلیل شده‌ی سازه بر اساس توانایی آن در محلی سازی پاسخ در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل

\* نویسنده مسئول

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

DOI:10.24200/J30.2022.59903.3075

صفحه‌ی فولادی به مقایسه‌ی ضرایب موجک وضعیت‌های سالم و معیوب پرداختند و دریافتند که اغتشاش‌ها در ضرایب موجک تولید شده و وضعیت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده و 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 پیش‌ساخته پانلی و کامپوزیت چندلایه شدند.<sup>[۲۱، ۲۰]</sup> همچنین ایشان با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گستته 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]</sup> همچنین ایشان در مطالعات دیگری،<sup>[۲۳]</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 صرف نظر از مقادیر متضاد با او انتهای ستون، در محل‌های آسیب می‌باشد. رضایی فر و همکاران<sup>(۲۰۲۱)</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<sup>(۲۰۲۱)</sup><sup>[۲۴]</sup> بر مبنای تحلیل موجک انحنای استاتیکی المان‌های تبر به شناسایی آسیب‌های چندگانه پرداختند و نتایج شناسایی موفقی به دست آوردند. در پژوهش دیگری، سان<sup>[۲۵]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۲۲)</sup><sup>[۲۶]</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 مباحثت لرزه‌یی و اتصال‌ها در سازه‌های با ستون‌های کامپوزیت CFST انجام شده است.<sup>[۲۷، ۲۸]</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 بهویه سازه‌های ساختمانی بلند، شناسایی آسیب در آن‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است. از طرفی، جدادشگی هسته‌ی بتی از جداره‌ی فولادی از رایج‌ترین نوع آسیب‌ها در ستون‌های با مقاطع مرکب است. براین اساس در نوشтар حاضر، به تشخیص ناحیه‌ی آسیب جدادشگی هسته‌ی بتی از جداره‌ی فولادی ستون CFST با به کارگیری الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پرداخته شده است. همچنین، اثر جدادشگی بتی از جداره‌ی فولادی بر خواص دینامیکی مودال (بسامدها و شکل‌های مود) بررسی و در ادامه به مباحثت توری 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، مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن بسامدی تغییر می‌کند و اجزاء بسامدی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آیند.<sup>[۲۹]</sup> در یک تقسیم‌بندی کلی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)<sup>[۲۱]</sup> و تبدیل موجک گستته (DWT)<sup>[۲۲]</sup> به این صورت تعریف می‌شود.

[۲۰] به شناسایی آسیب زیرساختاری با در نظر گرفتن آسیب به صورت کاهاش سختی در سازه‌ی قاب دویعدی ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه‌ی موجک پرداختند و موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی کنند. کاتونین<sup>(۲۰۱۵)</sup><sup>[۷]</sup> با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکانکس<sup>[۱۱]</sup> تحت اثر ارزی‌های 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 مزدی رخ می‌دهد. پاتل<sup>[۱۲]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۶)</sup><sup>[۱۳]</sup> با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتی 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>[۱۴]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۶)</sup><sup>[۱۵]</sup> در پژوهشی با استفاده از روش دو مرحله‌یی مبتنی بر تبدیل موجک والگوریتم‌های 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 شناسایی شده‌ی آسیب کاهاش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌های آسیب شدند. رحامی و همکاران<sup>(۲۰۱۶)</sup><sup>[۱۶]</sup> با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته‌یی موجک به تشخیص خرابی در سکوهای ثابت دریابی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت، حتی در آسیب‌های باشد کم، به طور محسوسی به شدت خسارت‌های واردہ به سکو وابسته است. یانگ و ایادی‌یحیی<sup>[۱۷]</sup> روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند و نشان دادند که کاهاش سختی موضعی لایه‌ها، باعث اختلال در سطح بسامد مودال شده و با محاسبه‌یی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص کرد. نوری<sup>[۱۸]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۸)</sup><sup>[۱۹]</sup> به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان در شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند و نشان دادند که کاهاش سختی موضعی لایه‌ها، باعث اختلال در سطح بسامد مودال شده و با محاسبه‌یی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص کرد. نوری<sup>[۱۸]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۸)</sup><sup>[۱۹]</sup> به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان در شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند و نشان دادند که کاهاش سختی موضعی لایه‌ها، باعث اختلال در سطح بسامد مودال شده و با محاسبه‌یی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص کرد. نوری<sup>[۱۸]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۸)</sup><sup>[۱۹]</sup> به شناسایی آسیب جدادشگی در ستون‌های فولادی پرداخته با بتن (CFST) به شناسایی آسیب جدادشگی در ستون‌های فولادی پرداختند. آسیب جدادشگی توسط یک لایه‌ی پل استایرن نازک در یکی از جووه ستون بین هسته‌ی بتی و جداره‌ی فولادی شیبیه‌سازی شده و با استفاده از تبدیل موجک، موفق به شناسایی محل جدادشگی هسته‌ی بتی از جداره‌ی فولادی شدند. وانگ<sup>[۲۰]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۹)</sup><sup>[۲۱]</sup> برای شناسایی آسیب سازه‌های تولی زیرزمینی، یک تبدیل موجک جدید بر اساس روش بدرار نیروی باقیمانده پیشنهاد و برای مدل المان محدود تولی با انواع آسیب استفاده کردند، که نتایج شناسایی موفقی به دست آمد. حسینی واعظ و عارف‌زاده<sup>(۲۰۱۹)</sup><sup>[۲۲]</sup> با استفاده از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتی 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. میرزا<sup>[۲۳]</sup> و همکاران<sup>(۲۰۱۹)</sup><sup>[۲۴]</sup> با روشی مشابه روش عباس‌نیا و همکاران<sup>(۲۰۱۶)</sup><sup>[۲۵]</sup> به شناسایی آسیب در سازه‌ی خرپاچی 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<sup>(۲۰۲۱)</sup><sup>[۲۶]</sup> با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود

## ۱.۲ تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته‌ی سیگنال  $f(t)$  در بازه‌ی  $-\infty \text{--} \infty$  مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود: [۲۵,۳۴]

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

که در آن،  $s$  و  $\tau$  به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر انتقال و  $\psi$  تابع موجک هستند. مقیاس‌های بالا ( $s > 1$ ) متناظر با جزئیات <sup>۲۳</sup> و مقیاس‌های پایین ( $s < 1$ ) متناظر یا تقریب‌های <sup>۲۴</sup> سیگنال هستند. تابع موجک در رابطه‌ی ۱، باید این ویژگی‌ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۲۷,۳۶] (رابطه‌ی ۲):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

۲. انرژی آن محدود باشد [۲۷,۳۶] (رابطه‌ی ۳):

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (3)$$

۳. باید در رابطه‌ی ۴ صدق کند: [۳۸-۳۶]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (4)$$

که در آن،  $\Psi$  تبدیل فوریه‌ی  $\psi$  و  $\omega$  بیانگر بسامد است. در رابطه‌ی ۲، تابع به صورت نوسانی است. رابطه‌ی ۳ به این معنی است که بیشترین انرژی موجک برای یک بازه‌ی زمانی کوتاه، نامحدود نمی‌شود. [۳۸]

## ۲.۲ تبدیل موجک گسسته

به دلیل تغییر پیوسته‌ی پارامترهای مقیاس و انتقال، انجام CWT روی یک سیگنال، منجر به تولید اطلاعات اضافی می‌شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازه‌ی حافظه افزایش می‌یابد. بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف مورد نظر است. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته‌سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و سپس، وابسته کردن پارامتر انتقال به آن است [۲۵] (رابطه‌ی ۵):

$$\begin{cases} s = s_o^j, & s_o < 1, j \in Z \\ \tau = k\tau_o s_o^j, & \tau_o \neq 1, k \in Z \end{cases} \quad (5)$$

با فرض  $s_o = 1$  و  $\tau_o = 1$ ، تبدیل موجک گسسته‌ی سیگنال  $f(t)$  با استفاده از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید: [۲۶,۳۵]

$$DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) = \langle f(t), \psi_{j,k} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-k2^j}{2^j}\right) dt \quad (6)$$

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

$$A \|f(t)\|^r \leq \sum_{j,k} |DWT_{j,k}^{\psi}(f(t))|^r \leq B \|f(t)\|^r \quad (7)$$

که در آن،  $A, B \in R^+$  در چنین حالتی، سیگنال  $f(t)$  را می‌توان از طریق معکوس تبدیل موجک گسسته مطابق رابطه‌ی ۸ بازسازی کرد: [۲۵,۳۴]

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) \psi_{j,k}(t) \quad (8)$$

در تحلیل چندمقیاسی، یک سیگنال مشخص را می‌توان در دو قسمت جزئیات و تقریبات تجزیه کرد. برای به دست آوردن سطح بعدی جزئیات و تقریبات، می‌توان اطلاعات تقریبی را بیشتر تجزیه کرد. فرایند تجزیه می‌تواند تا رسیدن به مقیاس طراحی شده‌ی ز تکرار شود و این چگونگی پیاده‌سازی یک تبدیل موجک گسسته (DWT) است. معادله‌های ۹ و ۱۰، جزئیات و تقریبات را در مقیاس ز ارائه می‌دهند: [۲۵,۳۴]

$$f_a^j(t) = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t) \quad (9)$$

$$f_d^j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (10)$$

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 می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۱۱ به مجموعه‌ی از زیرفضا تجزیه کرد:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j.,k} \phi_{j.,k}(t) + \sum_{j=j.}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (11)$$

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

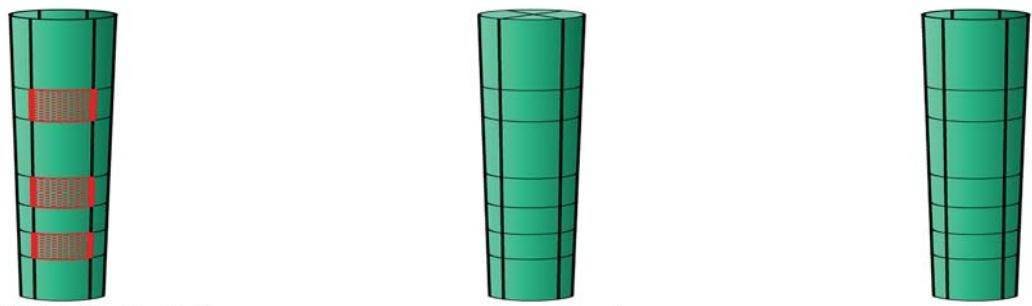
### ۳. مدل‌سازی المان محدود ستون CFST

ستون CFST با مقطع دایره‌بی به شعاع ۱۰ سانتی‌متر به ارتفاع ۳ مترو ضخامت جداری فولادی ۶ میلی‌متر با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و مشخصات مصالح فولادی و بتی در جدول ۱ به ترتیب با استفاده از المان‌های Shell و Solid در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده است.

در شکل ۱، المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی ستون CFST با نواحی آسیب جدنشدگی به طول ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۰/۲۵ می‌حيط مقطع ستون و عمق ۳ میلی‌متر که به صورت کاهش سختی بتن به میزان ۳۰ درصد تعریف شده است، مشاهده می‌شود. مشخصات هندسی محل‌های آسیب نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی و بتی در ستون CFST

مصالح	مدول کشسانی (MPa)	چگالی (kg/m³)	نسبت بوسون
۰/۳	۷۸۵۰	۲۰۰۰۰	فولاد
۰/۲	۲۱۷۰	۱۸۰۰۰	بتن



ج) پوشش بتنی به ضخامت ۳ mm و شاعر بیرونی ۱۰ cm با نواحی آسیب جداشگی.

شکل ۱. المان‌های ستون CFST

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

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

که در آن،  $\phi_i^u$  و  $\phi_j^d$  به ترتیب شکل مود اولیه و زام 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 قطعی ماتریس‌های همیستگی مودال، همگی مقداری غیرصفر هستند. مقدار صفر متضاد با مقدار MAC برابر با ۱ است و انتطاق کامل شکل مودهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. به عبارتی، اگر تمام درایه‌های قطر اصلی ماتریس همیستگی مودال صفر باشد، آنگاه در سازه آسیبی وجود ندارد. مشاهده می‌شود که چنین نیست و مقادیر قطعی 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 اولیه 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 جداشگی بین 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 اختشاش را در موقعیت‌های جداشگی بین از جداره فولادی نشان می‌دهد.

## ۱.۵. الگوریتم تشخیص آسیب

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

جدول ۲. مشخصات هندسی محل‌های آسیب جداشگی ستون CFST.

آسیب	وضعیت	تعداد	شماره	منطقه (متر)
D1	۱	۱	۰/۶ - ۰/۹	
D2	۱	۱	۱/۲ - ۱/۵	
D3	۱	۱	۲/۱ - ۲/۴	
D4	۲	۱	۰/۶ - ۰/۹	
D4	۲	۲	۲/۱ - ۲/۴	

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	۸۷/۰۵۸	۲۲۹/۹۱	۶۶۹/۰۲	۴۲۸/۲۴	۹۴۱/۵۱	۱۲۳۷/۵
D1	۸۷/۰۵۶	۲۲۹/۸۸	۶۶۸/۹۸	۴۲۸/۲۸	۹۴۱/۴۲	۱۲۳۷/۳
D2	۸۷/۰۴۴	۲۲۹/۹۰	۶۶۸/۹۵	۴۲۸/۲۷	۹۴۱/۴۰	۱۲۳۷/۳
D3	۸۷/۰۵۶	۲۲۹/۸۸	۶۶۸/۹۸	۴۲۸/۲۸	۹۴۱/۴۲	۱۲۳۷/۳
D4	۸۷/۰۵۵	۲۲۹/۸۴	۶۶۸/۹۴	۴۲۸/۲۲	۹۴۱/۳۲	۱۲۳۷/۱

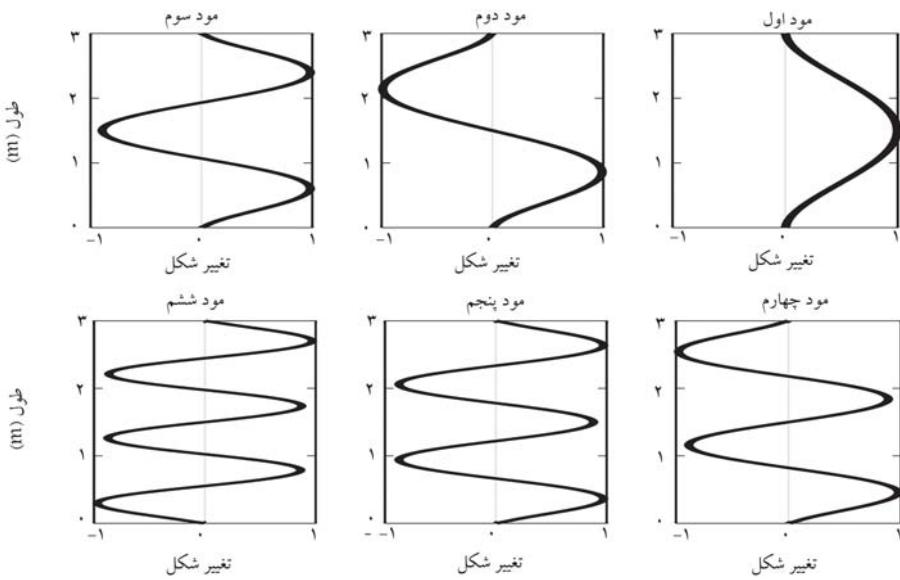
## ۴. تحلیل مودال

### 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 Shell و Solid به ترتیب به صورت ۴ گرهی و ۸ گرهی به روش انتگرال‌گیری کاوهشی 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 و D2 است. زیرا حالت آسیب D4 به صورت مجموع حالت‌های آسیب‌های D1 و D3 تعریف شده است.

### ۲. بررسی همیستگی شکل‌های اولیه و ثانویه مود

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



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 <sup>-1</sup> )
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۰/۵۲۳	۵/۱۵۸۲	۱۰/۷۷۷	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۴	۰/۰۰۰۰۰۴۹۰۹	۱	شماره‌ی مود حالت آسیب D۱
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۲۰	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	۰/۰۰۰۰۵۵۵۸	۸/۰۱۰۲	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۳۲	۵/۱۶۲۳	۵	
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۳۹۲	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۶۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۱۱	۶	

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 <sup>-1</sup> )
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۹/۴۸۵۸	۵/۱۶۷۷	۹/۱۹۶۵	۴/۹۵۵۴	۸/۵۵۱۲	۰/۰۰۳۶۶۲۷	۱	شماره‌ی مود حالت آسیب D۲
۴/۶۴۴۰	۱۰/۲۷۰	۴/۵۱۶۲	۸/۲۵۶۹	۰/۰۰۱۶۳۸۷	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	

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 <sup>-1</sup> )
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۰/۵۰۱	۵/۱۵۸۲	۱۰/۸۰۰	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۵	۰/۰۰۰۰۰۴۹۱	۱	شماره‌ی مود حالت آسیب D۳
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۲۶	۴/۵۲۶۵	۷/۴۰۲۰	۰/۰۰۳۴۵۱۳	۹/۰۹۹۷	۲	
۷/۹۹۴۱	۴/۲۹۱۷	۷/۸۳۰۲	۰/۰۰۳۲۳۴۳	۷/۴۱۶۲	۴/۹۶۷۲	۳	
۴/۲۰۷۷	۸/۰۵۰۱	۰/۰۰۰۰۹۶۳۸۹	۷/۸۲۶۷	۴/۵۲۴۴	۱۰/۵۷۵	۴	
۷/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۵۵۵۹	۸/۰۱۱۶	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۲۷	۵/۱۶۲۳	۵	
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۴۰۶	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۵۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۴۳	۶	

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

شماره‌ی مود حالت سالم							منفی لگاریتم معیار انتقال مودال (LMAC <sup>-1</sup> )
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴/۳۷۴	۵/۱۵۷۶	۱۴/۶۸۲	۴/۹۸۴۸	۱۶/۷۰۱	۰/۰۰۰۰۱۹۶	۱	
۴/۶۲۷۸	۱۷/۲۸۱	۴/۵۲۹۷	۱۵/۹۹۴	۰/۰۱۳۰۳۲	۱۵/۴۲۸	۲	
۱۴/۳۹۹	۴/۲۸۵۶	۱۴/۲۱۱	۰/۰۱۲۲۵۲	۱۶/۳۶۷	۴/۹۶۵۷	۳	
۴/۲۱۱۵	۱۴/۵۲۲	۰/۰۰۰۳۸۴۱	۱۳/۹۳۵	۴/۵۳۰۸	۱۴/۶۴۵	۴	شماره‌ی مود حالت
۱۳/۲۲۷	۰/۰۰۲۱۹۷۴	۱۴/۴۲۶	۴/۳۲۶۲	۱۷/۳۰۳	۵/۱۶۴۷	۵	آسیب D۴
۰/۰۱۱۳۴۵	۱۳/۲۱۰	۴/۲۱۶۴	۱۴/۳۸۶	۴/۶۶۹۴	۱۴/۲۶۷	۶	

## ۲.۵. شناسایی ناحیه‌ی آسیب جاذبه‌گری

براساس الگوریتم پیشنهادی، ضرایب جزئیات موجک حاصل از انجام تحلیل موجک توابع موجک مختلف استخراج و شاخص‌های شناسایی آسیب شدن مود اول حالت‌های آسیب D۱ تا D۴ محاسبه شده است. نتایج نموداری مربوط به تحلیل موجک تابع موجک db<sup>۱۰</sup> در شکل‌های ۳ تا ۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن در منطقه‌ی جاذبه‌گری بین از جداره‌ی فولادی، در تمامی مودهای بررسی شده، 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 جاذبه‌گری 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 جاذبه‌گری مستقل از هم هستند و این یک امتیاز مثبت برای شاخص آسیب پیشنهادی است. چراکه در غیر این صورت ممکن است عدم شناسایی یک منطقه‌ی جاذبه‌گری در شناسایی سایر مناطق جاذبه‌گری تأثیرگذار باشد و در نتیجه، برخی از مناطق جاذبه‌گری بین از جداره‌ی 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 و ۳۰ 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 ضرایط 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 جوابگوی

ریاضیاتی مطلب:

$$U = xlsread ('Undamaged Signal.xlsx');$$

$$D = xlsread ('Damaged Signal.xlsx');$$

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

$$x = linspace (0, L, numel (U));$$

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

$$Ui = interp1 (x, U, xi, 'spline')$$

$$Di = interp1 (x, D, xi, 'spline')$$

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:

$$[cAu, cDu] = dwt (Ui, 'wavelet function');$$

$$[cAd, cDd] = dwt (Di, 'wavelet function');$$

در پژوهش حاضر، تابع موجک مادر، تابع تحلیلی db<sup>۱۰</sup> انتخاب شده است.

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

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

$$DLI = cDu - cDd; \quad else$$

$$DLI = cDu + cDd;$$

end

گام ۵: شناسایی آسیب:

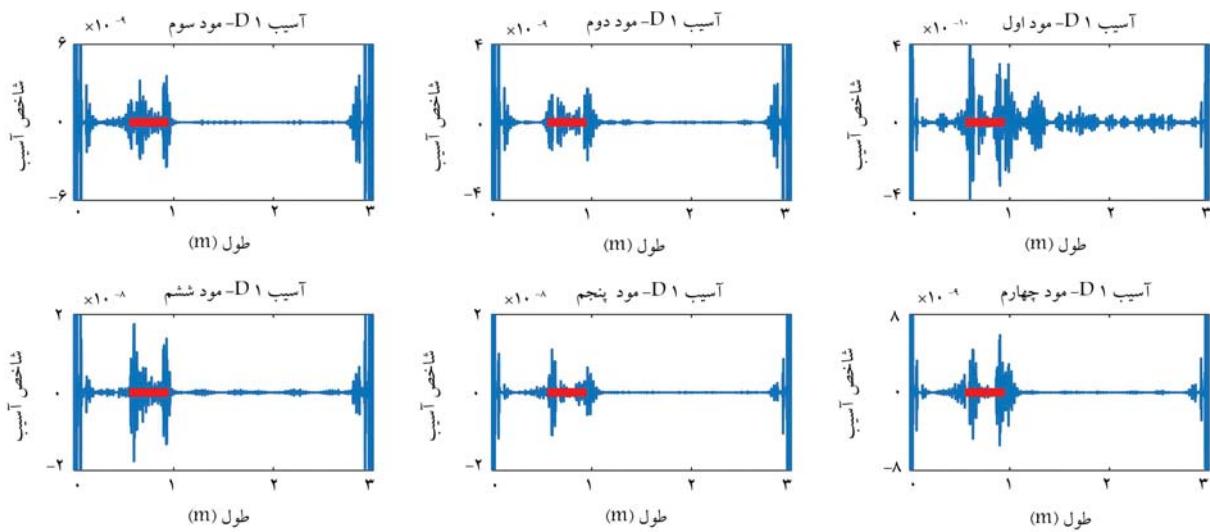
$$xx = linspace (0, L, numel (DLI));$$

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

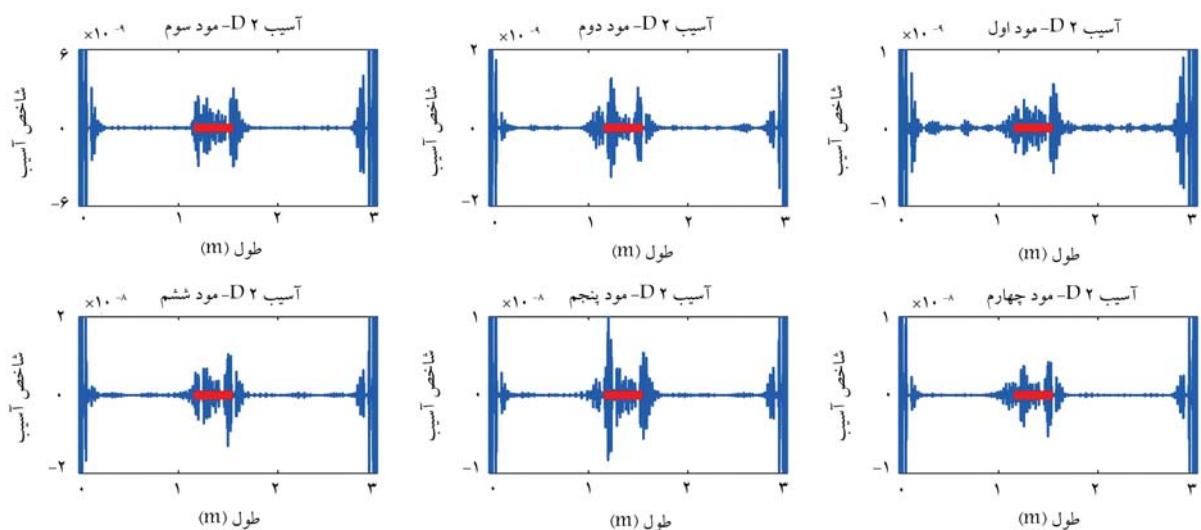
مقدار m برابر با ۵ در نظر گرفته شده است.

$$DLIi = interp1 (xx, DLI, xxi, 'spline');$$

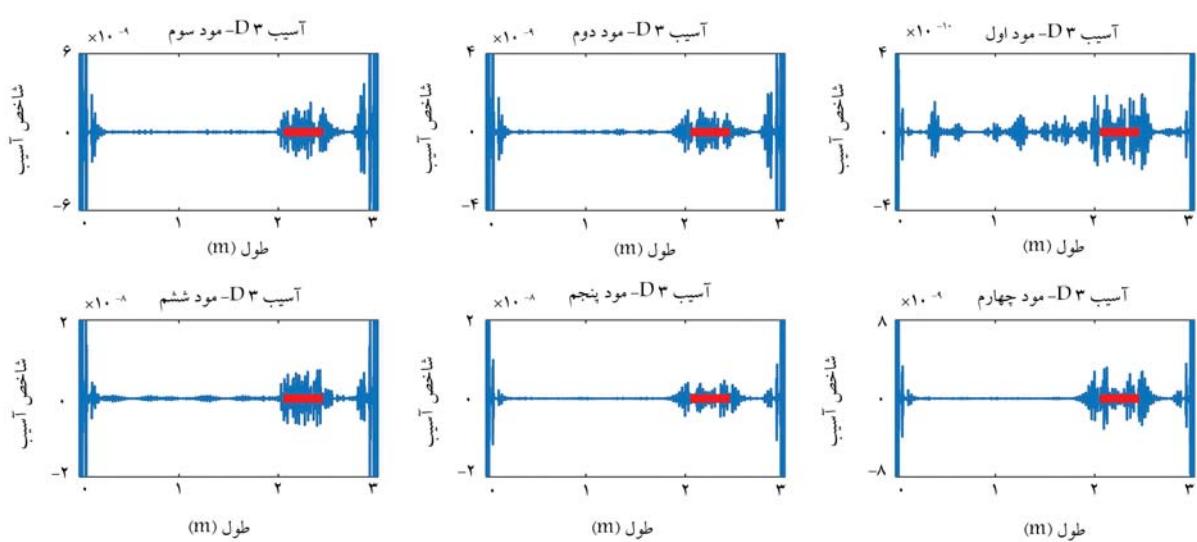
$$figure; plot (xxi, DLIi)$$



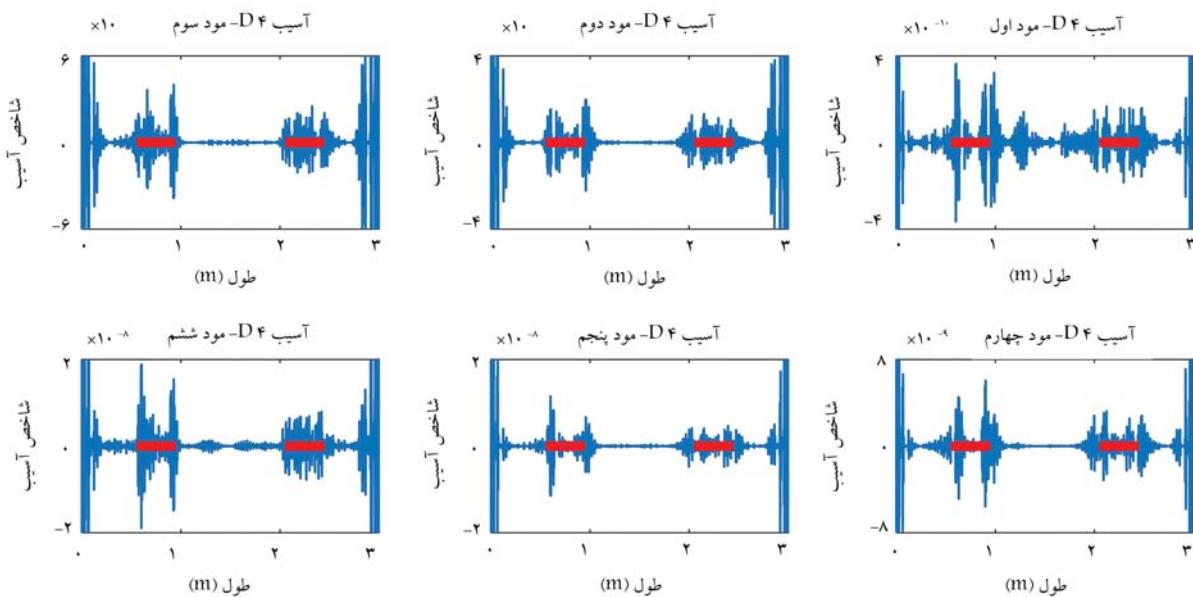
شکل ۳. نمودارهای شاخص مکانیاب آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۱.



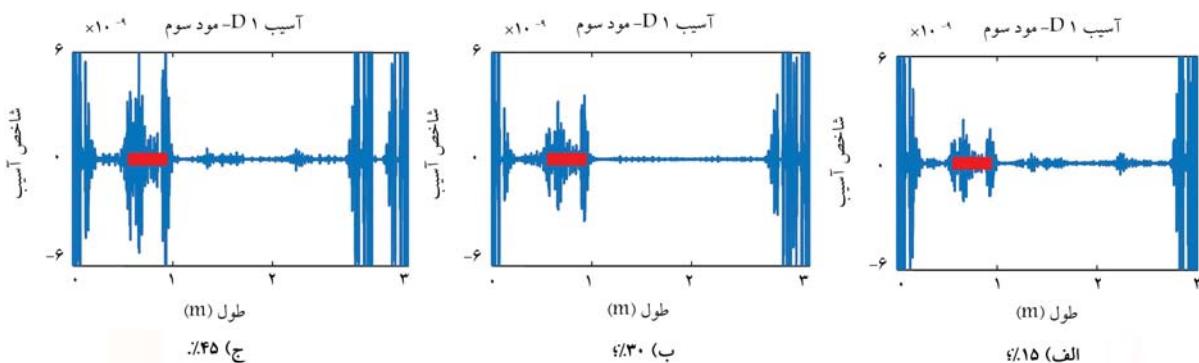
شکل ۴. نمودارهای شاخص مکانیاب آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۲.



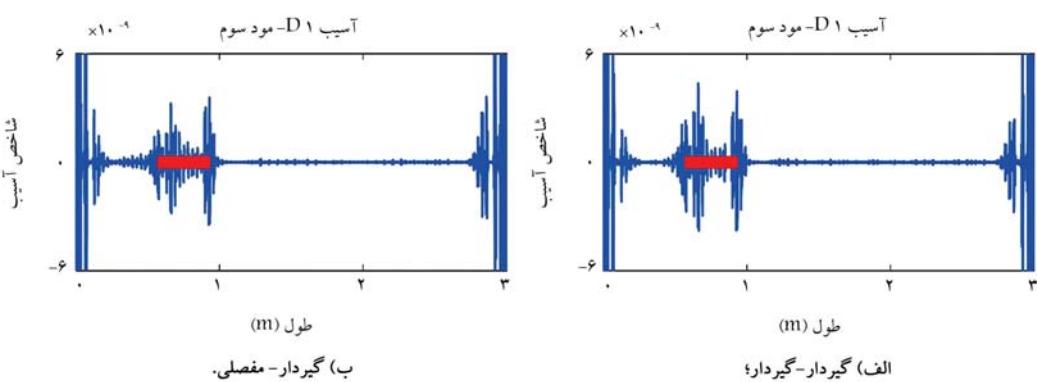
شکل ۵. نمودارهای شاخص مکانیاب آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۳.



شکل ۶. نمودارهای شاخص مکانیاب آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۴-D<sub>4</sub>.



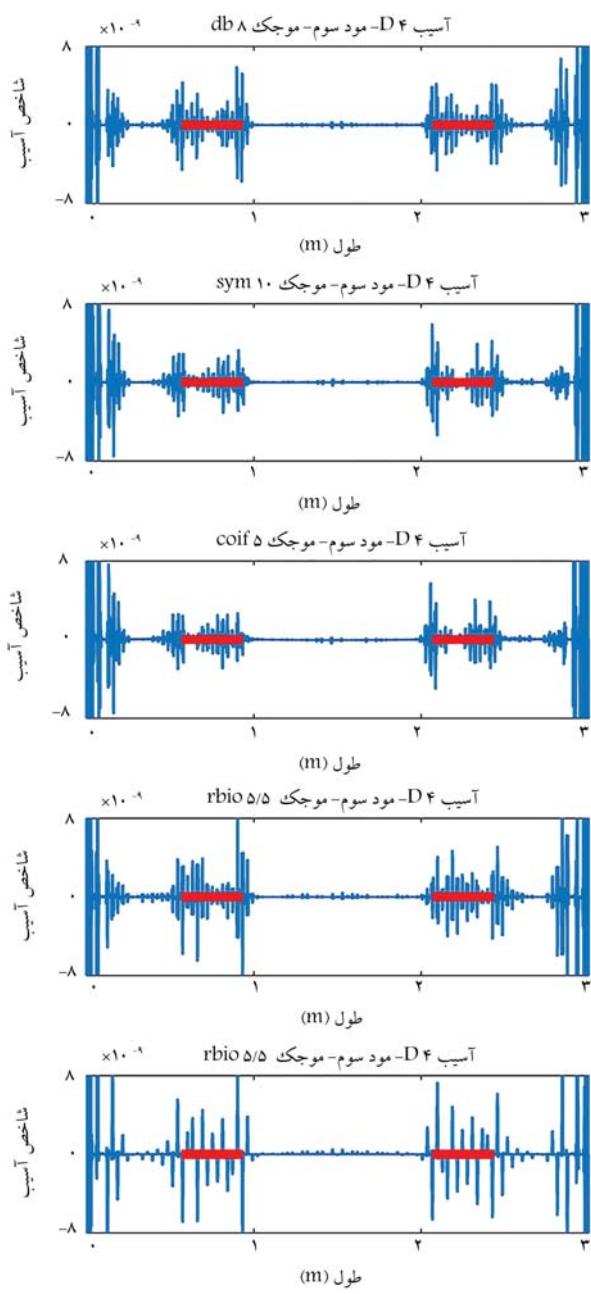
شکل ۷. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۱ با شدت آسیب.



شکل ۸. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی نظمی) حالت آسیب ۱ با شرایط تکیه‌گاهی.

فقط نتایج نموداری حالت آسیب ۱ D<sub>1</sub> 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 آسیب محاسبه می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد صفحه‌های نوشتار حاضر

نتایج نمودار تشخیص موقعیت آسیب نیز بود. بررسی‌های انجام شده در مودهای مختلف با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار و گیردار - مفصلی نشان می‌دهند که با تغییر شرایط تکیه‌گاهی، همچنان نتایج شناسایی موفقی 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) و ضعیت آسیب ۴ (مود سوم) با توابع موجک مختلف.

شاخص آسیب نواحی آسیب پیشین تعییری نمی‌کند و با تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است؛ به عبارتی، شاخص‌های آسیب موقعیت‌های مختلف جداشدگی 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 جداشدگی بر شناسایی سایر موقعیت‌های جداشدگی اثرگذار باشد و در نتیجه، برخی از موقعیت‌های جداشدگی قابل شناسایی نباشند. ۴. در حالت آسیب D<sup>4</sup>، دو منطقه‌ی جداشدگی کاملاً متقارن از نظر هندسه‌ی آسیب (سطح و عمق جداشدگی) و بیشگی 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 متعدد انجام شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص‌های مکانیاب آسیب محاسبه شده با تعداد زیادی از توابع موجک خانواده‌های دایچیز (Db<sup>۲۷</sup>، Symlets<sup>۲۸</sup>)، کویلتلس (Coif<sup>۲۹</sup>) توابع موجک بیورتوگوانال<sup>۳۰</sup>، پرش نسبی کمیته و بیشینه را در موقعیت‌های مختلف آسیب نشان می‌دهند. نتایج نموداری شاخص آسیب وضعیت D<sup>4</sup> (مود سوم) با تعدادی از توابع موجک در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین میزان بی نظمی و اختشاش با چشم‌پوشی از بی نظمی‌های 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 اعضاء سازه‌ی به خصوص تیرها و ستون‌های سازه‌ها، ستون‌های اعضا سازه‌ی هستند و انتظار می‌رود آخرین اعضاء آسیب دیده‌ی سازه‌ها، ستون‌ها باشند. امروزه استفاده از ستون‌های مقاطع مرکب به دلیل بهره‌مندی همزمان از ویژگی‌های دو ماده‌ی فولاد و بتون، 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 پُرشده با بتون (ستون‌های CFST)، یکی از ستون‌های مقاطع مرکب هستند، که مورد توجه طراحان است. جداشدگی هسته‌ی بتونی از جداره‌ی فولادی در ستون‌های CFST، یکی از رایج‌ترین نوع آسیب‌های بنابراین شناسایی منطقه‌ی جداشدگی بتون از جداره‌ی فولادی مورد توجه واقع شده است. تبدیل موجک، یکی از روش‌های ریاضیاتی توأم‌مند پردازش سیگنال‌های است 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 جداشدگی پیشنهاد شده است که براساس آن شاخص‌های تعیین بی نظمی محاسبه شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده برای سه حالت آسیب تکی و یک حالت آسیب دوتایی نشان داد که:

۱. مکانیاب آسیب در تمامی مودها در نواحی جداشدگی بی نظمی و اختشاش را نشان می‌دهد؛ به نحوی که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های جداشدگی را شناسایی کرد. لازم به ذکر است در مود اول با اینکه در منطقه‌ی آسیب، بی نظمی 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 جداشدگی جدید به یک حالت آسیب، مقدار

ب) با اضافه شدن یک منطقه‌ی جداسدگی جدید به ستون محتمل آسیب، میران کاهش مقادیر بسامدی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی، با افزایش میران خسارت، میران کاهش بسامد افزایش می‌یابد.

ج) در اثر جداسدگی بتن از جداره‌ی 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 جداسدگی بتن از جداره‌ی فولادی، شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی منطقی بر هم نیستند.

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

الف) در اثر جداسدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی، مقدار بسامد در تمام مودهای کاهش می‌یابد.

## پانوشهای

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. Abasnia
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., Radzienki, 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 Yousefbeik, 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., Akhavat, 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., Altabeyc, 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. "Debonding 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., Yousefbeik 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-Ghalehbahman, 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 Urbanity 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 چند ربعی برای آنالیز مسائل اندرکنش دینامیکی

## سد - مخزن - پی

رضا بابایی (دانشجوی دکتری)

احسان جباری\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه قم

مرتضی اسکندری فادی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهمنگی عمران شرف، (پاییز ۱۴۰۱) - ۳، شماره‌ی ۱ / ۲۵-۶۷، (پژوهشی)  
دوری ۲ - ۳، شماره‌ی ۱ / ۲۵-۶۷، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، روش بدون شبکه‌ی تابع پایه‌ی شعاعی چند ربعی برای حل مسائل اندرکنش لرزه‌ی 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 به طور 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. راستی آزمایی 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.

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

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

### ۱. مقدمه

(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>[۱]</sup> ایشان یک ایده‌ی خلاقانه برای تعیین متغیر شکل<sup>۷</sup> بهینه‌ی روش چند ربعی هم ارائه داده‌اند که حجم محاسبات را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. جو<sup>۸</sup> (۲۰۲۰)، نیز تابع پایه‌ی شعاعی را بر مبنای توزیع انتطباقی مراکز محاسباتی<sup>۹</sup> برای حل مسائل مقدار اولیه به کار برد و بر انتطباق پذیری آن‌ها تأکید کرد.<sup>[۱۰]</sup> اخیراً نیز چن<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۱)، ظرفیت قابل قبول روش چند ربعی را برای آنالیز مسائل مقدار مرزی دو و سه بعدی نیز نشان داده است. یک موضوع مهم چالش‌برانگیز در تابع پایه‌ی شعاعی، نحوه‌ی تعیین متغیر شکل بهینه در آن‌هاست.<sup>[۱۱]</sup> اگرچه پژوهشگران تاکنون روابط و الگوریتم‌های ارزشمندی را در این زمینه مطرح کرده‌اند، ولی این مسئله همچنان یک چالش جدی به شمار می‌رود و هنوز یک راه حل جامع برای آن معرفی نشده است.<sup>[۱۲]</sup> از این‌رو، پژوهشگران سعی داشته‌اند در حوزه‌های مختلف، بهترین پیشنهاد را برای آن ارائه دهند. به عنوان مثال، آذرپنی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۹)، یک الگوریتم را مطرح کرده‌اند که در آن، مسئله دوبار با استفاده از تعداد  $N$  و  $2 - N$  مرکز محاسباتی به ازاء متغیر شکل‌های مختلف حل و مقدار بهینه‌ی آن به گونه‌ی انتخاب شده است که دو جواب به دست آمده از مسئله، کمترین

روش پایه‌ی شعاعی چند ربعی (MQ-RBF)<sup>۱۴</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 به شمار می‌رود.<sup>[۱۵]</sup> لی<sup>۲</sup> و همکاران<sup>۲۰۰۳</sup>، روش چند ربعی را با روش المان محدود (FE)<sup>۱۶</sup> مقایسه کرده‌اند و دریافتند که روش چند ربعی ضمن کاهش حجم محاسبه‌ها، دقت بالاتری دارد. ترکیب سایر روش‌های عددی با تابع چند ربعی نیز به مزایای آن‌ها افزوده است.<sup>[۱۷]</sup> به عنوان مثال، سیلیمانی و همکاران<sup>۲۰۲۱</sup>، فرمولاسیون ترکیب روش تابع چند ربعی با روش اختلاف محدود (FD)<sup>۱۸</sup> را برای گسترش سازی انواع مشتق‌ها در معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۹]</sup> روش مذکور، که روش کانزا<sup>۲۰</sup> نیز نامیده می‌شود، در حوزه‌های وسیعی از علوم مهندسی، شامل آنالیز تیرها و صفحات نازک، محاسبه‌ی توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخازن سدهای صلب، و ... با موفقیت توسعه داده شده است.<sup>[۲۱]</sup> به علاوه، لیو<sup>۲۱</sup> و همکاران<sup>۲۰۱۹</sup>، با استفاده از تابع پایه‌ی شعاعی، روشی نوین برای آنالیز استاتیکی سازه‌ها پیشنهاد داده‌اند.<sup>[۲۲]</sup> همچنین کاهید باصیری و همکاران<sup>۲۳</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۴/۱۲/۱۴۰۰، اصلاحیه ۱۸/۱/۳، پذیرش ۲۸/۱/۳، ۱۴۰۰

DOI:10.24200/J30.2022.60113.3085

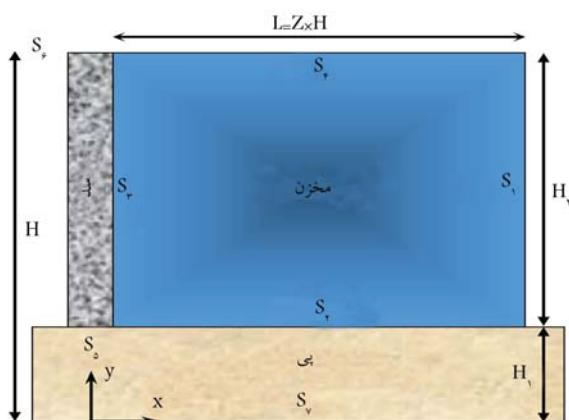
همان طور که اشاره شد، به علت برخی از ضعف های عنوان شده در روش های عددی پیشین که بعضاً ریشه در استفاده از شبکه نیز دارند، تلاش های پژوهشی برای اجتناب از شبکه در تحلیل مسائل اندرکنش لرزه بی سیستم سد - مخزن - پی در جریان هستند. در این راستا، در پژوهش حاضر، روش بدون شبکه چند ربعی برای اولین بار توسعه داده شده است که دارای ویژگی هایی مانند: ۱) ایجاد یکتابع پاسخ پیوسته در سراسر دامنه؛ ۲) عدم پیوستگی و ارتباطی خاص بین مراکز محاسباتی؛ ۳) قابلیت بالا در شبیه سازی هندسه های پیچیده؛ ۴) کاهش هزینه محاسبات در حل مسائل بزرگ مقیاس؛ ۵) تعیین آسان به مسائل با بعد بالاتر؛ و ... است. ویژگی های اخیر، برخی از نقاط ضعف روش های با شبکه را پوشش می دهند. در مطالعه ای حاضر، برای شبیه سازی رفتار سد و پی از معادله تیر برشی و برای مخزن از معادله دو بعدی هلمهولتز<sup>۲۲</sup> استفاده شده است. برای اعمال اندرکنش، یک فن نوین تجزیه دامنه با تعریف سه زیردامنه مجزا برای سازه، سیال و خاک پیشنهاد شده است. با این فن، هم امکان شبیه سازی اندرکنش بین سه زیردامنه موجود فراهم و هم تعداد قابل توجهی درایه صفر در ماتریس ضرباب کل ایجاد می شود. برای تعیین متغیر شکل بهینه نیز روابط جدیدی براساس بسامد باز زلزله پیشنهاد شده است که دقت کافی دارند و با استفاده از آن ها، حجم محاسبات به طور چشمگیری کاهش می یابد. به منظور راستی آزمایی و نمایش توانمندی رویکرد پیشنهادی، مثال های متنوعی همراه با حل دقیق ارائه و مزایای 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 می شود. معادله حاکم بر انتشار امواج فشار هیدرودینامیکی مخزن در حوزه بسامد با درنظر گرفتن زلزله های هارمونیک زمین بر سرعت امواج صوتی واحد است:  $\omega/C = u_g = 1$ <sup>[۱۸]</sup>

$$\nabla^T P + K^T P = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\nabla^T$  عملگر لابلائین<sup>۲۳</sup>،  $P$  مقدار فشار هیدرودینامیک و  $K$  عدد موج<sup>۲۴</sup> است که به صورت بسامد حرکت هارمونیک زمین بر سرعت امواج صوتی در محیط سیال ( $\omega/C = K$ ) تعریف می شود.



شکل ۱. هندسه و شرایط مرزی ( $S_v$  -  $S_r$  -  $S_b$ ) در سیستم سد - مخزن - پی.

اختلاف را داشته باشند. الگوریتم مذکور، هزینه محاسباتی بالایی دارد، چرا که از سعی و خط استفاده می شود و در هر سعی و خط باید مسئله را دو بار حل کند.<sup>[۱۴]</sup>

همچنین کوشکی و همکاران<sup>(GA)</sup> ۲۰۱۹، برای بهینه سازی متغیر شکل از الگوریتم رنگی<sup>[۱۱]</sup> استفاده کرده و با شبیه سازی پدیده تراوش<sup>۱۲</sup> نشان داده اند که متغیر شکل بهینه می تواند مستقل از تعداد نقاط محاسباتی با توزیع های مختلف باشد.<sup>[۱۵]</sup> ایشان در مطالعه دیگری از توزیع مراکز محاسباتی براساس روش پادوا<sup>۱۳</sup> توانم با کاهش تعداد آن ها استفاده کردن و حجم محاسبات در شبیه سازی متغیر شکل را کاهش دادند.<sup>[۱۶]</sup> روش چند ربعی علی رغم ویژگی های منحصر به فرد خود تاکنون در شبیه سازی عددی مسائل اندرکنش آب - خاک - سازه (FSSI)<sup>۱۴</sup> علی المخصوص سیستم های سد - مخزن - پی به کار نرفته است. در این راستا و مشخصاً برای آنالیز مسائل اندرکنش سد - مخزن - پی، روش های مفید دیگری توسعه یافته اند. عطارنژاد و فرساد<sup>۲۰۰۵</sup>، بدنده سد را با یک تیر با مقطعه متغیر شبیه سازی کردن. مبنای کار آن ها تعریف توابع شکل جدیدی بود که از حل معادله دیفرانسیل تیر اوپلر - برنولی به دست می آمد. آن ها با مدل خود توانستند تأثیر اندرکنش بین سد - مخزن را نشان دهند و توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنده سد را با دقت قابل قبولی به دست آورند.<sup>[۱۷]</sup> کیوانی<sup>۲۰۱۳</sup> نیز یک حل بسته برای آنالیز لرزه بی سیستم سد - مخزن شامل مخزن نیمه بی نهایت دو بعدی و مدل تیر بر شی تخت بر زلزله های هارمونیک افقی در حوزه بسامد ارائه داده است. راه حل دقیق پژوهش ایشان، اگرچه حالت خاصی از انواع مسائل سد - مخزن است، ولی می تواند مبنای خوبی برای راستی آزمایی روش های عددی جدید باشد.<sup>[۱۸]</sup>

روش توانمند المان محدود مشکلاتی، مانند: ۱) هزینه زیاد برای ساخت شبکه ها؛ ۲) ضرورت ایجاد شبکه های درشت تر و در ترتیجه کاهش دقت در شبیه سازی میدان های بزرگ مقیاس، مانند سد - مخزن - پی؛ ۳) تعیین دشوار به مسائل سه بعدی مخصوصاً در هندسه های پیچیده و ... را با خود به همراه دارد.<sup>[۱۹]</sup>

روش تقاضل محدود به شبکه منظمی از خطوط متقطع کمکی نیاز دارد و عموماً فقط برای هندسه و شرایط مرزی منظم کاربرد دارد. به علاوه به دلیل مدل سازی کل فضای هزینه محاسباتی بالایی نیز به دنبال دارد.<sup>[۲۰]</sup> در روش المان مرزی (BE) با هدف اجتناب از شبکه، فقط مرزهای میدان محاسباتی شبکه بندی می شوند. برگسته ترین 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 ویژگی های روش المان محدود و المان مرزی بهره می برد. استفاده از توابع شکل کلاسیک روش المان های محدود می تواند برخی از مشکلات آن روش را با خود به همراه داشته باشد. همچنین این روش به حل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل با ماتریس ضرباب پر منجر می شود که نیازمند حل اساسی و هزینه محاسبات بالاست.<sup>[۲۲]</sup> روش المان مرزی محدود مقیاس شده مجزا (DSBFE)<sup>۱۸</sup> با ایجاد ویژگی های 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 شبیه سازی هندسه های پیچیده ضعف دارد، چون همهی مرزها باید از محل مرکز مختصات محلی (LCO)<sup>۱۹</sup> آن قابل رؤیت باشند. یو<sup>۲۰</sup> و همکاران، روش بدون شبکه های هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)<sup>۲۱</sup> را برای آنالیز پدیده های شکست سد با لحاظ کردن اثر فشار هیدرودینامیک بر بدنده سد به کار برده اند، ولی روش ذکرشده فقط برای شبیه سازی امواج فشاری مخزن استفاده شده و برای شبیه سازی سد از سایر روش های کمکی بهره برده اند.<sup>[۲۲]</sup>

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

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

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

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

که در آن ها،  $(y_j, x_j)$  مؤلفه های مراکز محاسباتی هستند.  $\lambda_j^D$  و  $\lambda_j^R$  و  $\lambda_j^F$  نیز ضرایب مجهولی هستند که برای بدست آوردن آن ها باید تعداد  $N_1$ ،  $N_2$  و  $N_3$  مرکز برهم نهی در میدان محاسباتی در نظر گرفته شوند. مراکز مذکور به دو گروه مرزی و درون میدانی تقسیم می شوند، مراکز روی مرز برای اعمال شرایط مرزی مسئله و مراکز داخل میدان برای ارضاء معادلات حاکم در نظر گرفته می شوند.  $c_D$  و  $c_F$  نیز متغیرهای شکل بهینه برای ترتیب برای زیردامنه های سد - مخزن - پی هستند.

در پژوهش حاضر، روابط جدیدی برای متغیرهای شکل بهینه بر حسب بسامد باز 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 پاسخ های سیستم کافی است. ویژگی های مذکور، یعنی فرموله شدن متغیر شکل بهینه و یکتا بودن آن برای هر سه فاز آب - خاک - سازه بر کارایی روش چند ربعی می افزاید و حجم محاسبات را به دلیل بی نیازی به یک الگوریتم ثانویه برای متغیر شکل بهینه به طور چشم گیری کاهش می دهد. پس از تعیین متغیر شکل بهینه و جایگذاری روابط ۱۲ الی ۱۴ به همراه مشتقهای آن ها در معادلات حاکم، یک دستگاه معادلات جبری خطی حاصل می شود. با حل چنین دستگاهی، ضرایب مجهول و در نتیجه توابع تخمین پاسخ ها به دست می آیند. در ادامه، فن جدید تجزیه دامنه<sup>۲۵</sup> و نحوه تشکیل ماتریس ضرایب بیان شده است.

### ۳.۱. فن تجزیه دامنه

فن اعمال تجزیه دامنه برای اولین بار در پژوهش حاضر به منظور آنالیز مسائل اندرکنشی توسعه داده شده است که در آن، میدان مسئله به زیرمیدان های کوچک تر شامل: زیردامنه سد - مخزن - پی تجزیه می شوند. سپس روش چند ربعی برای هر زیرمیدان<sup>۲۶</sup>، اعمال و ماتریس های ضرایب هر کدام به طور جداگانه محاسبه می شوند. نکته ای 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 زیرمیدان های مجاورش در نظر گرفته شود. مثلاً باید دو ضرایب 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 زیردامنه سد - مخزن - پی در روابط ۱۵ الی ۱۷ محاسبه می شوند.

که در آن ها  $N_{bD}$ ،  $N_{bF}$ ،  $N_{dbR}$ ،  $N_{dbF}$ ،  $N_{NRi}$  و  $N_{RFi}$  به ترتیب: تعداد مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای سد، درون زیردامنه سد، کل مخزن به جز مرز اندرکنشی آن، مرز مشترک مخزن - سد، مرزهای پی و درون زیردامنه پی هستند. واضح است که:  $N_2 = N_{bF} + N_{RFi}$ ،  $N_1 = N_{bD} + N_{Di}$  ماتریس ضرایب کل نیز با ترکیب ماتریس هر زیردامنه، محاسبه و دستگاه معادلات جبری حاکم بر کل سیستم مطابق رابطه ۱۸ تشکیل می شود. همان طور که ملاحظه می شود، با اعمال فن پیشنهادی، تعداد قابل توجهی درایه صفر در ماتریس ضرایب کل ایجاد می شود که این امر سرعت پردازش را افزایش می دهد.

اگر سیال مخزن تراکم ناپذیر باشد ( $C \rightarrow \infty$ )، معادله های هلمهولتز به معادله لaplas ( $\nabla^2 P = 0$ ) تبدیل می شود. هنگامی که سازه هی سد با یک تیر برشی با مقاطع ثابت و همگن شبیه سازی شود، معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن در حوزه هی بسادم به شکل رابطه ۲ خواهد بود:

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

که در آن، صلیبت برشی سد با  $G_1 A_1$ ، جرم واحد طول آن با  $\rho_{s1}$  و تغییر مکان نسبی آن در نقطه هایی با مختصه مکانی  $(y, 0)$  در بسامد  $w$  با  $u$  بیان می شود. اگر برای پی نیز رفتاری مشابه با سد در نظر گرفته شود، معادله حاکم بر تغییر شکل آن مطابق رابطه 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 مدل برشی و چگالی پی هستند. شرایط مرزی مخزن، شامل  $S_1$  تا  $S_4$ ، نیز به ترتیب روابط ۴ الی ۷ تعریف می شوند:

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

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

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

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

که در آن ها،  $\rho_F$  جرم واحد حجم سیال است. شبیه در تاج سد و جایه جایی در کتف پی یا محل سنگ بستر صفر در نظر گرفته می شوند؛ بنابراین برای شرایط مرزی  $S_6$  و  $S_7$ ، روابط ۸ و ۹ تعریف می شوند:

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

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

در محل اتصال سد - پی (S<sub>5</sub>) باید جایه جایی و شبی در هر دو زیردامنه مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ برابر در نظر گرفته شود:

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

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

همان طور که مشخص است، برای آنالیز سیستم سد - مخزن - پی باید ۳ معادله و ۸ شرط مرزی به طور همزمان حل شوند تا جایه جایی های سد - پی و فشار هیدرودینامیک در مخزن به دست آیند. معادله های ۶، ۱۰ و ۱۱ شرایط مرزی اندرکنشی هستند که سه محیط آب - خاک - سازه را از یکدیگر متأثر می سازند. در ادامه، اینده های جدید و راهکارهای لازم برای حل معادله های مذکور و نحوه اعمال اندرکشی بین زیردامنه ها با روش چند ربعی بیان شده است.

### ۳. روش چند ربعی

در پژوهش حاضر، برای تخمین جایه جایی سد، جایه جایی پی و فشار هیدرودینامیک

$$A^{DRF} = \begin{Bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,N_1} & \circ & \dots & \circ & \circ & \dots & \circ \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_b D,1} & \dots & a_{N_b D,N_1} & \circ & \dots & \circ & c_{1,1}''' & \dots & c_{1,N_\tau}''' \\ a'_{1,1} & \dots & a'_{1,N_1} & b'_{1,1} & \dots & b'_{1,N_\tau} & \circ & \dots & \circ \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{N_D i,1} & \dots & a'_{N_D i,N_1} & b'_{N_D i,1} & \dots & b'_{N_D i,N_\tau} & \circ & \dots & \circ \end{Bmatrix}_{N_1 \times (N_1 + N_\tau + N_\tau)} \quad (15)$$

$$A^{RD} = \begin{Bmatrix} \circ & \dots & \circ & b_{1,1} & \dots & b_{1,N_\tau} & \circ & \dots & \circ \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \circ & \dots & \circ & b_{N_{db R},1} & \dots & b_{N_{db R},N_\tau} & \circ & \dots & \circ \\ a''_{1,1} & \dots & a''_{1,N_1} & b''_{1,1} & \dots & b''_{1,N_\tau} & \circ & \dots & \circ \\ \dots & \ddots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a''_{N_{Ri},1} & \dots & a''_{N_{Ri},N_1} & b''_{N_{Ri},1} & \dots & b''_{N_{Ri},N_\tau} & \circ & \dots & \circ \end{Bmatrix}_{N_\tau \times (N_1 + N_\tau + N_\tau)} \quad (16)$$

$$A^{FD} = \begin{Bmatrix} \circ & \dots & \circ & \circ & \dots & \circ & c_{1,1} & \dots & c_{1,N_\tau} \\ \circ & \dots & \circ & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'''_{1,1} & \dots & a'''_{1,N_1} & \circ & \dots & \circ & c_{N_b F,1} & \dots & c_{N_b F,N_\tau} \\ \circ & \dots & \circ & \circ & \dots & \circ & c'_{1,1} & \dots & c'_{1,N_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \circ & \dots & \circ & \circ & \dots & \circ & c'_{N_F i,1} & \dots & c'_{N_F i,N_\tau} \end{Bmatrix}_{N_\tau \times (N_1 + N_\tau + N_\tau)} \quad (17)$$

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

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

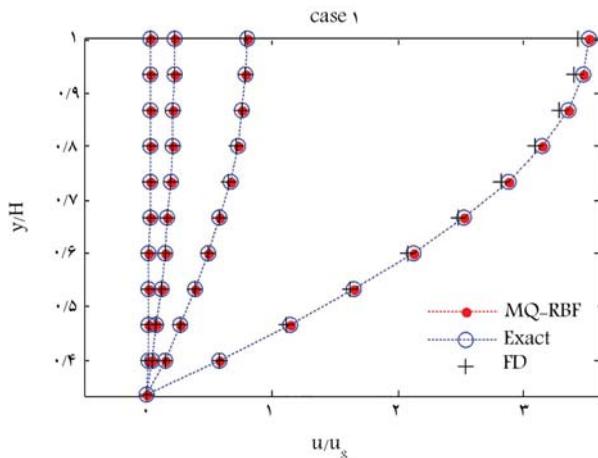
نوع سیال مخزن	نوع سد	شرایط مخزن	وضعیت پی	شماره‌ی مثال
-	منعطف	خالی	صلب	۱
-	منعطف	خالی	$t = 1$	۲
-	منعطف	خالی	$t = 10$	۳
-	منعطف	خالی	$t = 50$	۴
تراکم‌پذیر	صلب	پر	صلب	۵
تراکم‌ناپذیر	صلب	پر	صلب	۶
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	صلب	۷
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	$t = 10$	۸
تراکم‌پذیر	منعطف	پر	$t = 50$	۹

(اندرکشش 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 بر حسب تغییرات بسامدهای بار زلزله، منظم و قابل فرمول‌بندی بوده است. این امر نشان‌دهنده‌ی کارایی خوب روش چند ربعی در حل مسائل دینامیکی مورد بحث است. در پژوهش

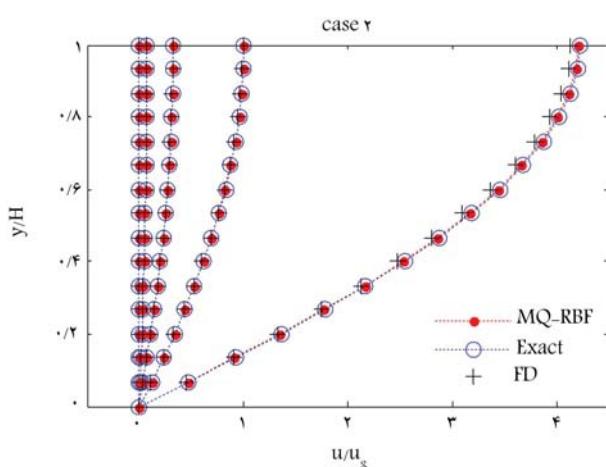
مشخصات هندسی مثال‌های عددی حاضر با توجه به شکل ۱، شامل:  $H_1 = 50m$ ,  $A_1 = 1 \times 20m^2$ ,  $H_2 = 100m$  هستند. همچنین خواص فیزیکی سد، شامل:  $\rho_s = 2500 kg m^{-3}$  و  $\rho_{s1} = 2500 kg m^{-3}$ ,  $G_1 = 8/33 \times 10^6 N m^{-1}$  حاوی سیال، شامل:  $C = 1400 ms^{-1}$ ,  $\rho_F = 1000 m^3 s^{-1}$ ,  $\rho_{s2} = 1250 kg m^{-3}$  هستند. برای نمایش بهتر نقاط ضعف و قوت رویکرد حاضر، ۹ مثال مختلف از سیستم دینامیکی مورد بحث 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 برهم‌نیه 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 خطأ ایجاد نشود.

مثال ۱، شامل سد با پی صلب و مثال‌های ۲ الی ۴، شامل سد با پی انعطاف‌پذیر

#### ۴. مثال‌های عددی

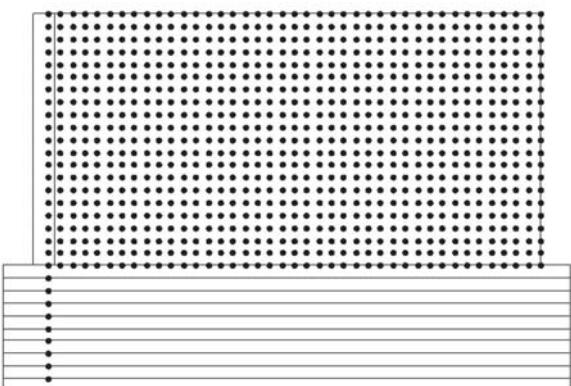


شکل ۳. جابه‌جایی‌های سد در مثال ۱ برای بسامدهای ۲۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ از چپ به راست.



شکل ۴. جابه‌جایی‌های سد و پی در مثال ۲ برای بسامدهای ۳۹، ۲۱، ۳، 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 تعیین 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 اوپلار - برنوی<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 خطأ در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شوند. به منظور راستی آزمایی، پاسخ روش‌های دقیق<sup>[۱۸]</sup> و اختلاف محدود نیز علاوه‌بر 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.

روش	شماره‌ی مثال	اختلاف محدود	چند ربعی
		$N_1 = 81$	$N_1 = 21$
		$N_1 + N_2 = 301$	$N_1 + N_2 = 31$
		$N_1 + N_2 = 19602$	$N_1 + N_2 = 882$
		$N_1 + N_2 + N_3 = 19903$	$N_1 + N_2 + N_3 = 893$

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، رابطه‌یی 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:

$$c_D(\omega) = -0,0000017\omega^4 + 0,00001012\omega^3 - 0,000036549\omega^2 + 0,0000059690397\omega + 59,56982517 \quad (19)$$

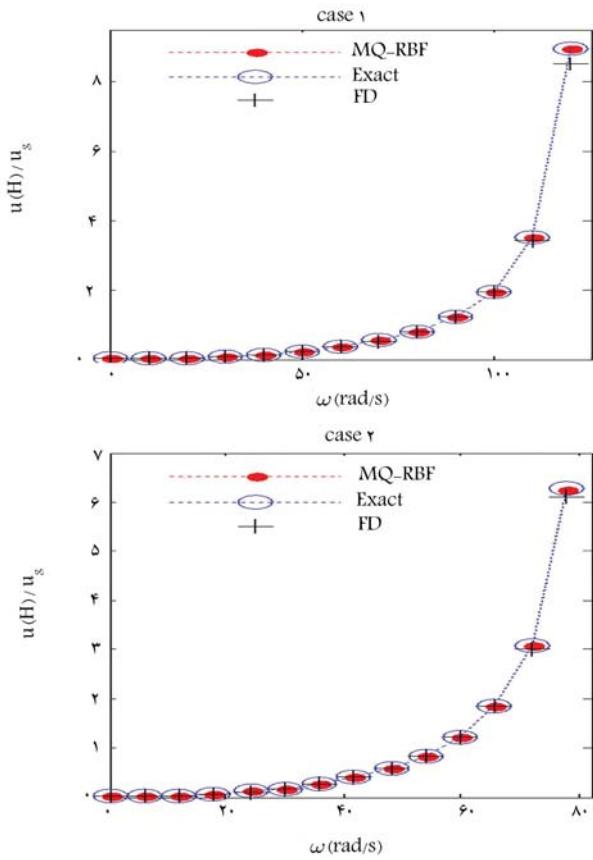
$$c_D(\omega, t) = c_F(\omega, t) = 90 \quad (20)$$

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 به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

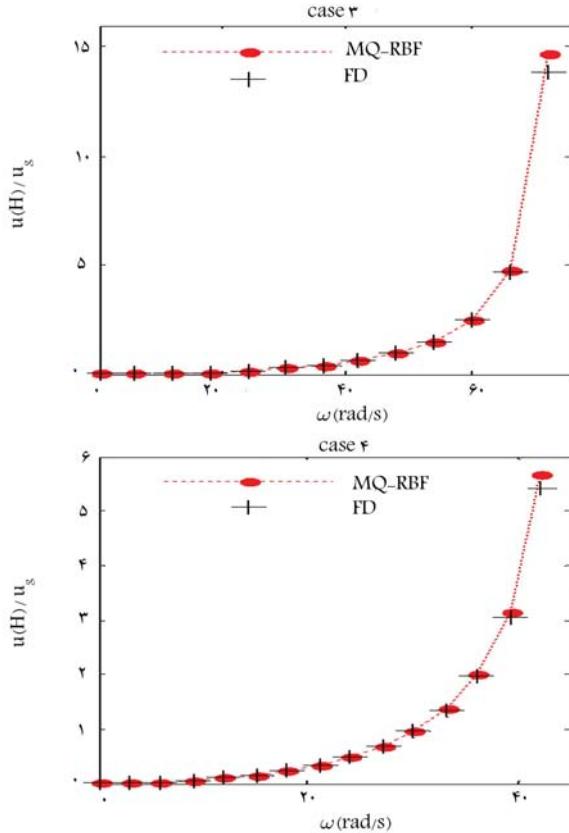
یک نکته‌ی قابل توجه در ارتباط با معادله‌ی ۲۰ این است که متغیر شکل بهینه به نسبت سختی برشی سد و پی ( $t$ ) وابسته نیست، یعنی با یافتن آن در یک نسبت سختی، استفاده از آن برای حل مسائل با نسبت سختی‌های متفاوت امکان‌پذیر است. این موضوع نیز به خودی خود حجم محاسبات را کنترل می‌کند.

$$c_R(\omega) = 0,000014994\omega^3 - 0,00003561\omega^2 + 0,00001327\omega + 25,9976796 \quad (21)$$

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



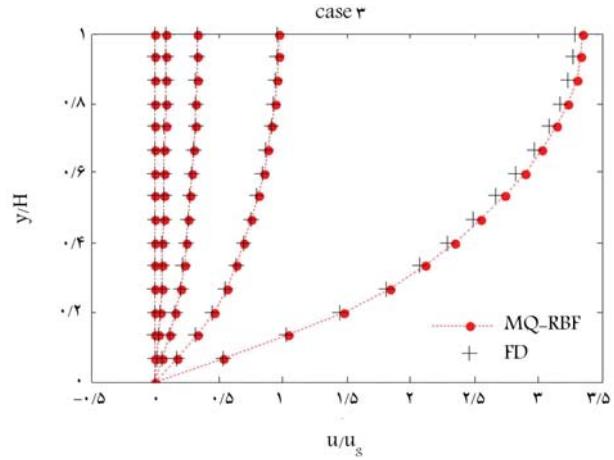
شکل ۷. جابه‌جایی‌های سد در ( $H, \omega$ ) برای مثال‌های ۱ و ۲.



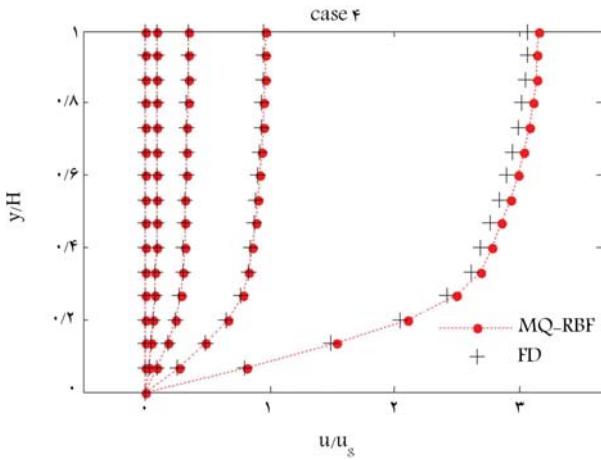
شکل ۸. جابه‌جایی‌های سد در ( $H, \omega$ ) برای مثال‌های ۳ و ۴.

جدول ۳. خطای جزء میانگین مربوطات جابه‌جایی‌های سد در ( $\omega, H$ ).

شماره‌ی مثال	روش	چند ربعی	اختلاف محدود
۱	MQ-RBF	۰/۰۳۳۹	۰/۰۰۰۰۰۴۷
۲	MQ-RBF	۰/۰۱۴۲	۰/۰۰۳۴
۷	MQ-RBF	۰/۰۲۰۵	۰/۰۰۸۵

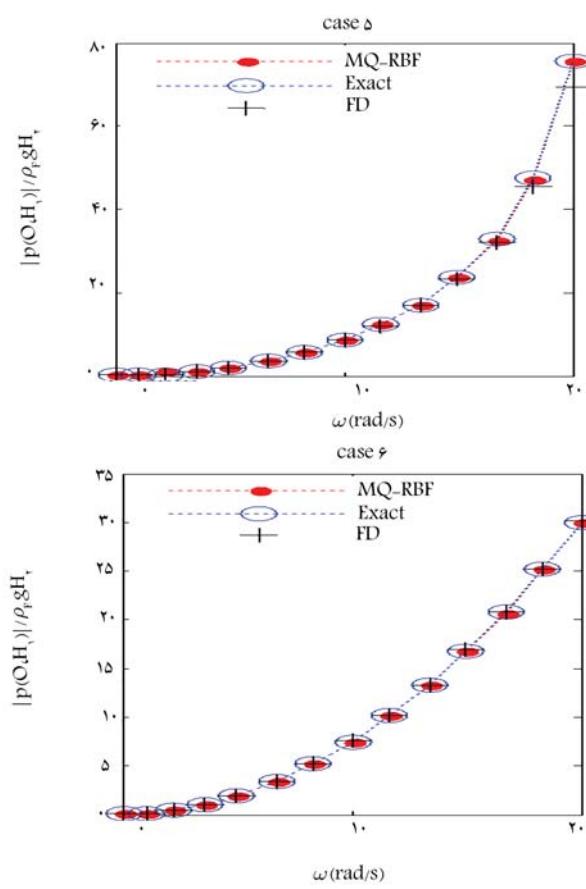


شکل ۵. جابه‌جایی‌های سد و پی در مثال ۳ برای بساده‌های ۳، ۱۸، ۳۳، ۴۸، ۶۳ از چپ به راست.

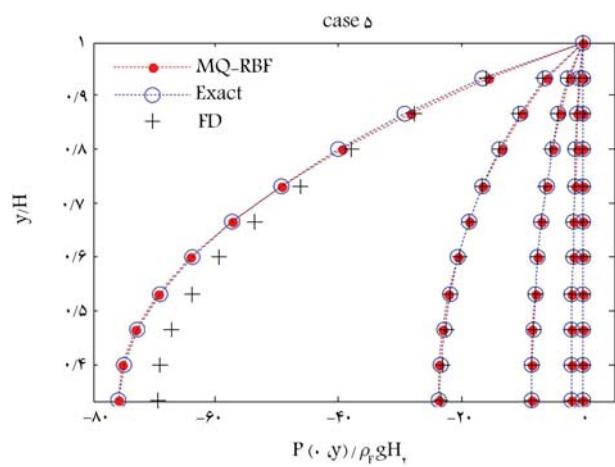


شکل ۶. جابه‌جایی‌های سد و پی در مثال ۴ برای بساده‌های ۳، ۱۲، ۲۱، ۳۰ و ۳۹ از چپ به راست.

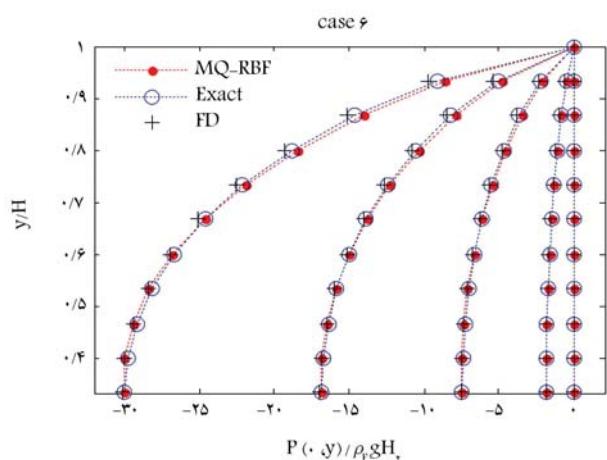
همچنین روش اختلاف محدود علی‌رغم استفاده از مراکز محاسباتی خیلی زیادتر طبق جدول ۲، خطای بیشتری نسبت به روش حاضر داشته است. خطای هر دو روش با افزایش بساده بار زلزله افزایش یافته است، ولی خطای روش اختلاف محدود برخلاف روش حاضر در بساده‌های نزدیک به بساده تشدید ۳۱ قابل قبول به نظر نمی‌رسد. مثال‌های ۵ و ۶، شامل دو سیستم اندرکش سد صلب - مخزن در حالت تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر با پی صلب هستند. رابطه‌ی ۲۱، برای تعیین متغیر شکل بهینه در این حالت‌ها پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر متغیر شکل بهینه به تراکم‌پذیری سیال نیز حساس نیست. این امر نیز دلیلی بر کارا بودنتابع چند ربعی تحت الگوریتم پیشنهادی بوده و عدم قطعیت‌ها را در تعیین متغیر شکل بهینه کاهش داده است. فشارهای هیدرودینامیکی واردہ بر بدنہ سد



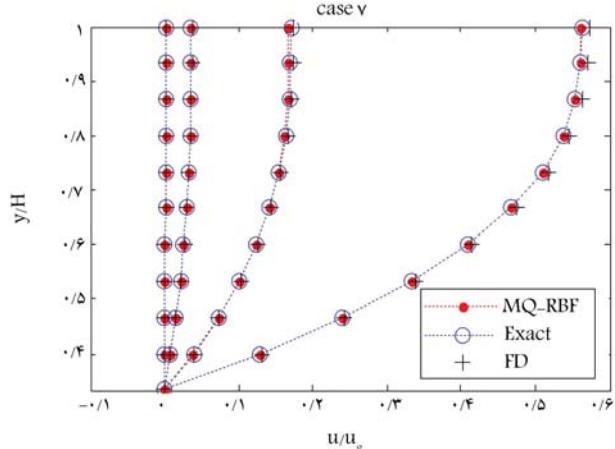
شکل ۱۱. قدرمطلق فشار هیدرودینامیک در  $(\omega, \omega)$  برای مثال‌های ۵ و ۶.



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



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



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، رویکرد حاضر و روش اختلاف محدود پرداخته شده است. شکل‌های مرتبه و جداول‌های 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

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، تراکم پذیری سیال باعث می‌شود که میزان استهلاک امواج فشاری با دورشدن از سد کاهش و فشار هیدرودینامیکی 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 بازیله در این حالت مطابق با رابطه‌ی ۲۲ است:

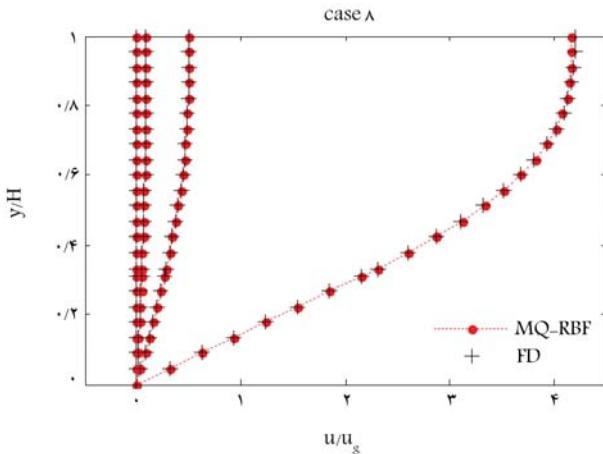
$$c_D(\omega) = c_R(\omega) = \frac{0/0000107\omega^3 - 0/000098\omega^2}{+0/005385\omega^3 - 0/00871653\omega + 24/8388} \quad (22)$$

نکته‌ی قابل توجه این است که متغیر شکل بهینه برای زیردامنهای سد و مخزن یکسان به دست آمده است ( $c_D = c_R$ ). این ویژگی به طور قابل توجهی 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 بدنی سد و فشار هیدرودینامیک وارد بر آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و نیز بیشینه‌ی جابه‌جایی در تاج سد و فشار هیدرودینامیک در پاشنه‌ی

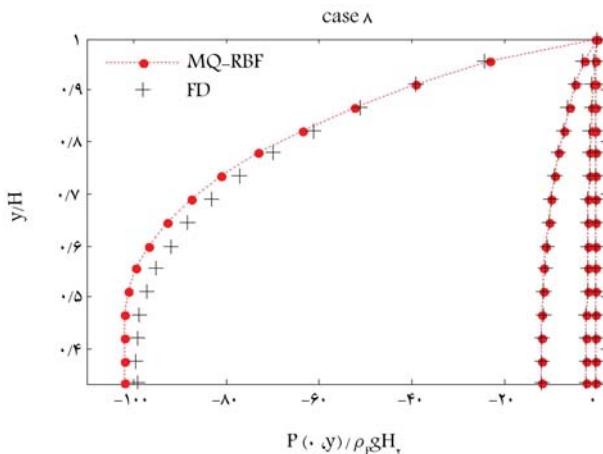
به ترتیب برابر مقادیر دلخواه  $10$  و  $50$  هستند و سیال مخزن هم تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی پیشنهادی برای تعیین متغیر شکل بهینه برای بسامدهای کمتر از بسامد مدل اول، مطابق معادله‌ی  $23$  است:

$$\begin{aligned} c_D(\omega) = c_R(\omega) = c_F(\omega) = & 0.00002661\omega^4 \\ & + 0.001078\omega^3 - 0.018125\omega^2 \\ & + 0.0220074\omega + 23.438619 \end{aligned} \quad (24)$$

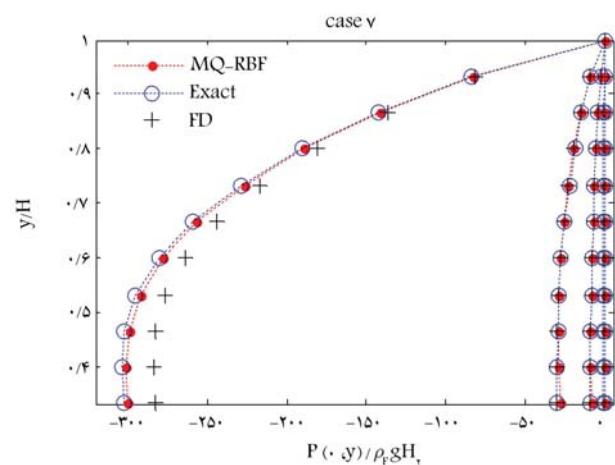
طبق انتظار یک متغیر شکل بهینه برای هر سه زیردامنه‌ی سد، مخزن و پی کفایت می‌کند و نیازی به صرف هزینه‌ی محاسباتی بالا برای بهینه‌سازی همزمان سه متغیر شکل وجود ندارد. اگر در مسائل مشابه چنین اتفاقی نیافتد، الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک  $22$  می‌توانند مؤثر باشد. پاسخ‌های مثال  $8$  شامل جابه‌جایی سد و بی در شکل  $15$  و فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنی سد در شکل  $16$  مشاهده می‌شوند. به طور مشابه، برای مثال  $9$  نیز شکل‌های  $17$  و  $18$  ارائه شده است. در شکل‌های  $19$  الی  $22$  نیز جابه‌جایی در تاج سد و فشار وارد بر پایه‌ی آن در بسامدهای مختلف برای هر دو مثال  $8$  و  $9$  مشاهده می‌شود. از آنجایی که حل دقیقی جهت محاسبه‌ی خطای برای این قبیل



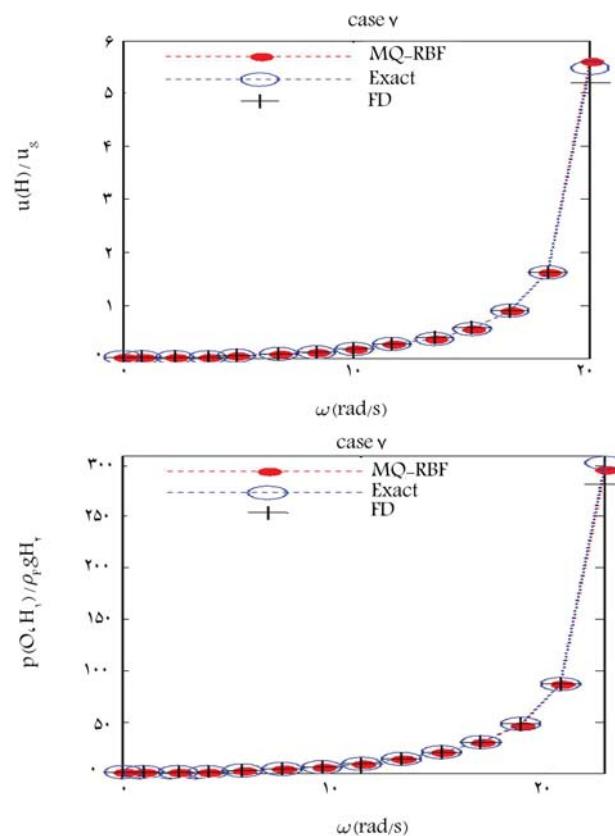
شکل ۱۵. جابه‌جایی‌های سد در مثال  $8$  برای بسامدهای  $1$ ،  $5$ ،  $10$ ، و  $15$  از راست.



شکل ۱۶. فشار هیدرودینامیک وارد بر سد در مثال  $8$  برای بسامدهای  $1$ ،  $5$ ،  $10$ ، و  $15$  از راست به چپ.



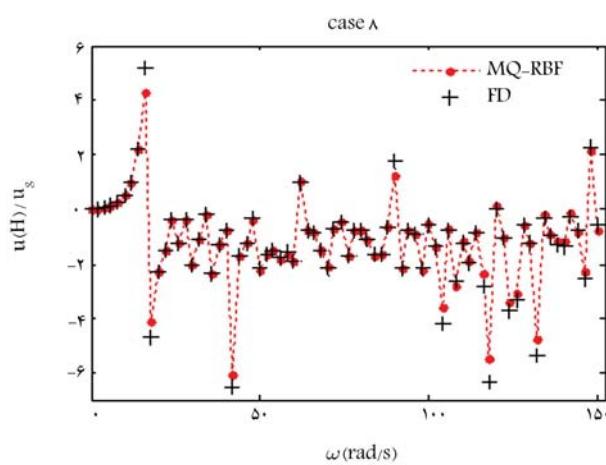
شکل ۱۳. فشار هیدرودینامیک وارد بر سد در مثال  $7$  برای بسامدهای  $1$ ،  $5$ ،  $10$ ، و  $20$  از راست به چپ.



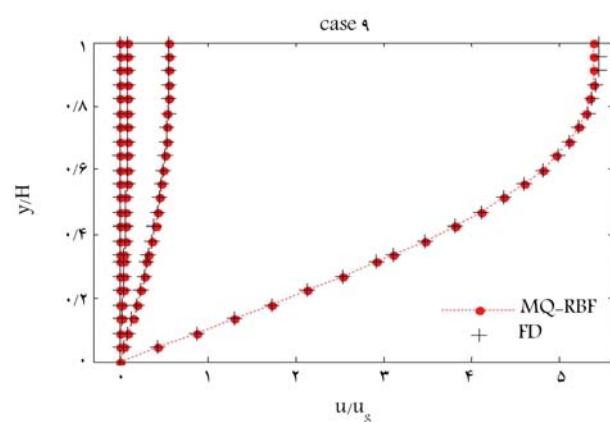
شکل ۱۴. جابه‌جایی‌های سد در  $(H, \omega)$  و قدرمطلق فشار هیدرودینامیک در  $(H_1, \omega)$  برای مثال  $7$ .

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

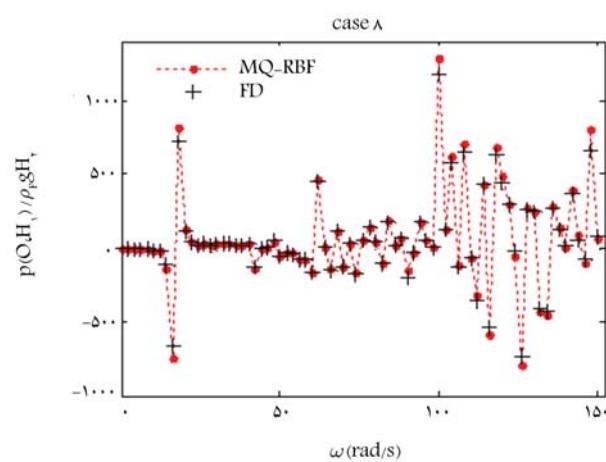
روش	شماره مثال	اختلاف محدود
	چند ربعی	
$\circ/04825$	$\circ/0644$	$5$
$\circ/0114$	$\circ/0019$	$6$
$1/4936$	$\circ/4933$	$7$



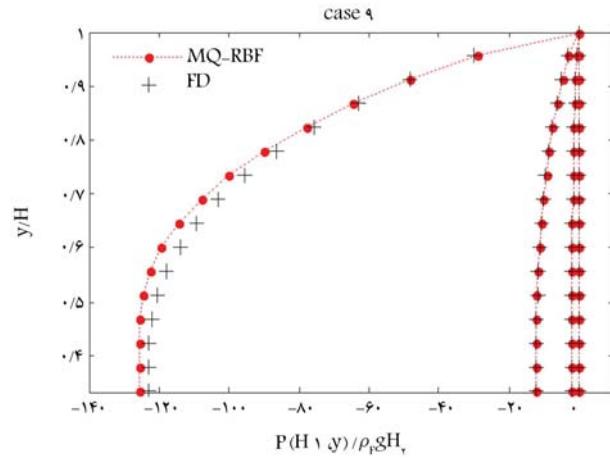
شکل ۱۹. جابه‌جایی‌های سد در ( $\omega$ ,  $H$ ) برای مثال هشت.



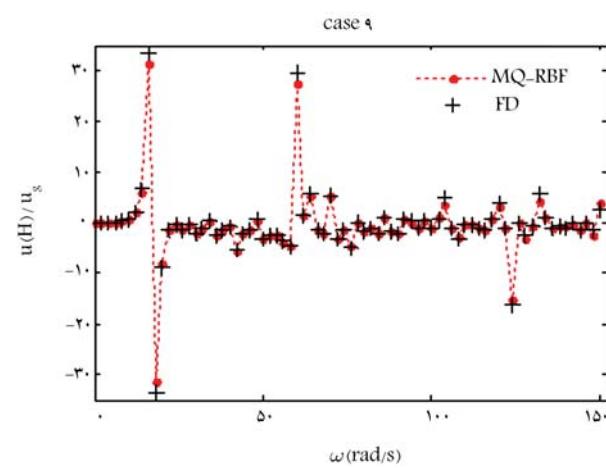
شکل ۱۷. جابه‌جایی‌های سد در مثال ۹ برای بسامدهای ۱، ۵، ۱۰، و ۱۵ از چپ به راست.



شکل ۲۰. فشار هیدرودینامیک وارده بر سد در ( $\omega$ ,  $P$ ) برای مثال ۸.



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



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

یک چالش جدی پژوهشی به شمار می‌رود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در مسئله‌ای موردهبحث، تغییرات متغیر شکل بهینه برحسب افزایش بسامد با راهنمایی زلزله‌ای 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

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 – پی – 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، دوتابع شکل چند ربعی متفاوت برای مراکز محاسباتی واقع بر مراکز اندرکنشی درنظر 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 چرئی 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 ۲۰۰ 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 نویسندهان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) که پژوهش حاضر را طی طرح پژوهشی شماره‌ی ۹۸۰۰۱۷۲۱ حمایت کرده‌اند، سپاسگزاری می‌کنند.

## فهرست علامت

$\bar{u}_g$  : جابه‌جایی زمین در حوزه‌ی زمان ( $m$ )؛

$T$  : زمان ( $s$ )؛

$P$  : فشار هیدرودینامیک ( $Pa$ )؛

$K$  : عدد موج ( $(radm)^{-1}$ )؛

$C$  : سرعت صوت در محیط آب ( $ms^{-1}$ )؛

$G_1 A_1$  : مدلول برشی سد (N)؛

$u$  : جابه‌جایی سد و پی در حوزه‌ی فرکانس ( $m$ )؛

$(x_j, y_j)$  : مختصات مراکز محاسباتی روش چند ربعی؛

$G_2 A_2$  : مدلول برشی پی (N)؛

$N_1$  : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه سد؛

$N_2$  : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه مخزن؛

$N_3$  : تعداد مراکز محاسباتی زیردامنه پی؛

$c_D$  : متغیر شکل زیردامنه سد ( $m$ )؛

$c_F$  : متغیر شکل زیردامنه پی ( $m$ )؛

$c_R$  : متغیر شکل زیردامنه مخزن ( $m$ )؛

$A^{DRF}$  : ماتریس ضرایب زیردامنه سد؛

$A^{RD}$  : ماتریس ضرایب زیردامنه مخزن؛

$A^{FD}$  : ماتریس ضرایب زیردامنه پی؛

$B^{DRF}$  : ماتریس معلومات زیردامنه سد؛

$B^{RD}$  : ماتریس معلومات زیردامنه مخزن؛

$B^{FD}$  : ماتریس معلومات زیردامنه پی؛

$N_{bD}$  : تعداد مراکز محاسباتی واقع بر مرزهای سد؛

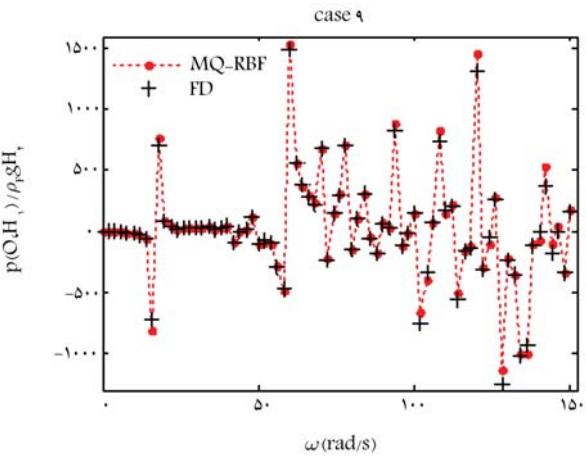
$N_{Di}$  : تعداد مراکز محاسباتی درون زیر دامنه سد؛

$N_{dR}$  : تعداد مراکز محاسباتی مخزن به جز مرز مشترک؛

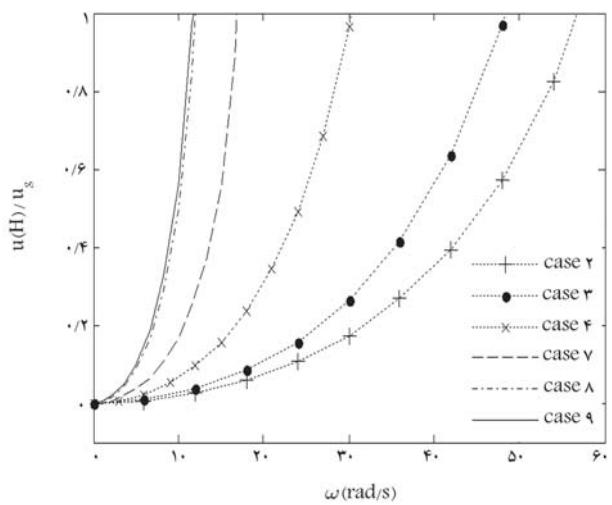
$N_{Ri}$  : تعداد مراکز محاسباتی مرز مشترک سد و مخزن؛

$N_{RF}$  : تعداد مراکز محاسباتی روی مرزهای پی؛

$N_{Fi}$  : تعداد مراکز محاسباتی درون زیردامنه پی؛



شکل ۲۲. فشار هیدرودینامیک در ( $\omega$ ,  $H^1$ ) برای مثال ۹.



شکل ۲۳. جابه‌جایی‌های سد در ( $w$ ,  $H$ ) 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 قابل توجه 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 راستی آزمایی 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،

$t$  : نسبت سختی برشی سد به پی؛  
 $\omega$  : فرکانس بار زلزله ( $\text{rad s}^{-1}$ )؛  
 $\rho_s^F$  : چگالی سد ( $\text{kgm}^{-3}$ )؛  
 $\rho_s^R$  : چگالی پی ( $\text{kgm}^{-3}$ )؛

$\rho_F$  : چگالی سیال مخزن ( $\text{kgm}^{-3}$ )؛  
 $\lambda_j^D$  : ضرایب مجھول توابع شکل چند ربعی سد؛  
 $\lambda_j^F$  : ضرایب مجھول توابع شکل چند ربعی پی؛  
 $\lambda_j^R$  : ضرایب مجھول توابع شکل چند ربعی مخزن.

## پانوشت‌ها

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. "Multiquadratics-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. Omidi, 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 هندسی، واحد سیستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیستان، ایران

\* رضا رهگذر<sup>\*</sup> (استاد)

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

محسن محمدی زاده (استادیار)

گروه «مهندسی عمران، دانشکده فنی و هندسی، واحد سیستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیستان، ایران

امیرسعادی داریان (استادیار)

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

کامبیز نژادشیری (استادیار)

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

در نوشتار حاضر، به بررسی عملکرد ستون‌های فولادی قوطی‌شکل دارای خوردگی در دماهای مختلف و مقاومت‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. بنابراین، ستون‌هایی با جانمایی‌های مختلف نقص (۶ حالت) ساخته شده و تحت اعمال حرارت در ۲۰ و ۷۰ ° درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند؛ در ادامه، جهت بهبود رفتار ستون‌ها، با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی در محل نقص، مقاومت‌سازی شده‌اند. سپس ظرفیت باربری کالیه‌ی 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 به‌علت نقص در حدود ۲۲٪ و در اثر حرارت ناشی افزایش دما، در حدود ۳۵٪ بوده است. همچنین مقایسه‌ی روش‌های مقاومت‌سازی نشان داد که استفاده از CFRP، تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد ستون‌های فولادی داشته است. درنهایت، جهت بررسی بیشتر، ۵ نمونه از ستون‌ها با نرم افزار آباکوس، مدل‌سازی و راستی آزمایی شده‌اند.

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

## ۱. مقدمه

وزن کمتر ساختمان‌های فولادی از ساختمان‌های بتُنی و در نتیجه نیروی اینرسی کمتر وارد به سازه‌های فولادی در هنگام زمین‌لرزه نسبت به سازه‌های فولادی و اجرای آسان‌تر به طور وسیعی در سراسر دنیا استفاده می‌شوند.<sup>[۱]</sup> با توجه به بروز اشتباه‌ها در طراحی، ضعف و اشکال در اجرای سازه‌ها، جزئیات نامناسب می‌گردد، محل قرارگیری سخت‌کننده‌ها، تغییر در کاربری ساختمان، خسارت‌های ناشی از خوردگی فولادها (در محیط‌های خورنده) و خسارت دیدگی سازه‌ها در اثر بلایای طبیعی و غیرطبیعی، مثل: باد، زلزله و آتش‌سوزی، نیاز به بهسازی و ترمیم برای رسیدن به عملکرد اولیه اعضاء 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>[۲]</sup>

استفاده از فولاد به عنوان مصالح ساختمانی از اوایل قرن ۲۰ آغاز شد و در حین جنگ دوم جهانی به صورت قابل توجهی گسترش یافت. پس از جنگ دوم جهانی، تهییه 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>[۳]</sup> سازه‌های فولادی یکی از رایج‌ترین سازه‌ها هستند که امروزه استفاده می‌شوند. اعضاء سازه‌های فولادی عموماً 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 بتُنی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱/۱۴۰۱، اصلاحیه ۹/۳/۱۴۰۱، پذیرش ۳۱/۳/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60114.3086

داشته است. بیستروم<sup>۴</sup> و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۴)،<sup>[۸]</sup> به بررسی نحوه افزایش دمای ستون‌های دایره‌بی تخلی فولادی تحت افزایش حرارتی محلی پرداختند و نتایج آن را با دستورالعمل Eurocode ۹۹۱-۱-۲ مقایسه کردند. فن<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۹]</sup> نیز در بررسی آزمایشگاهی مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی تخلی با مقطع مربع شکل (قوطی شکل) با فولاد S<sub>۳۵۰۴۰۸</sub>، تأثیر پارامترهای مختلف، مانند: نسبت بار<sup>w</sup>، 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 برخانی و نحوه عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی بدون مهار محوری هستند. ایشان در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸<sup>[۱۰]</sup> همانند پژوهش قبلی شان (۲۰۱۶)، مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی تخلی با مقطع مربع شکل (قوطی شکل) را این بار با درنظر 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 می‌کنند: پیش‌کمانش و پس‌کمانش.

برای گسترش نمونه از حالت کمانش به حالت گسیختگی نهایی، مدت زمانی سپری می‌شود و ظرفیت باربری مرحله‌ی پس‌کمانش می‌تواند به طور مؤثر عملکرد مقاومت در برابر آتش ستون‌های فولادی مقید را بهبود بخشد. زینگ<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<sup>۷</sup> نسبت به مبانی طراحی حریق ستون‌ها در برابر آتش در دستورالعمل EN ۱۹۹۳-۱-۲، قابلیت اطمینان پیشتری دارد. برای مقاومت‌سازی 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 دور پیچ کردن اعضاء قابی با آن‌ها و پوشش سطح آسیب‌دیده با ورق فولادی اشاره کرد. دور پیچ FRP سبب بهبود رفتار مکانیکی فولاد می‌شود؛ کامپوزیت‌های FRP از مصالح نوین برای مقاومت‌سازی (مصالح کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف) هستند. FRP مصالحی است که برای بهسازی و مقاومت‌سازی 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، سیلوها، کانال‌ها، مخازن آب و سدها است.

کریمیان و همکاران<sup>۱۷</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۱۲]</sup> رفتار سازه‌بی و تأثیر CFRP در تقویت ستون‌های کوتاه فولادی مقطع دایره‌بی تخلی (CHS) با نقص افقی و عمودی را بررسی کردند. شهرکی و همکاران اثرات الیاف پلیمری کربنی (CFRP) و همچنین صفحه‌های فولادی را برای مقاومت‌سازی ستون‌های فولادی مقطع مربعی تخلی (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<sup>۲۰۲۰</sup><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 ویه 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 دور پیچ FRP، این موارد تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کنند. یوسفی و

پس دو بحران کلی پیش رو 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 آینه‌ها و خوردگی ناشی از عوامل محیطی در سازه‌های فولادی رخ می‌دهد.

-- آسیب به علت حرارت بالا و آتش: به عقیده طراحان فولاد، علی‌رغم مزیت‌های بسیار بالای آن، در برابر حرارت بالا و آتش سوزی به شدت آسیب‌پذیر است. حرارت بالا و آتش موجب وقوع آسیب‌های گاهی 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 به تدریج از دست می‌دهد؛ درنتیجه، ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری اعضاء فولادی با افزایش دما کاهش می‌یابد.<sup>[۱۴]</sup> حتی با وجود تدبیر حفاظت در برابر آتش، به دلایل مختلفی همچون: قرار گرفتن در معرض آتش‌های شدیدتر از حالت پیش‌بینی شده یا ازین رفتن مواد محافظ در برابر آتش به دلیل اعمال ضربه (در مورد ساختمان‌های تجارت جهانی)، ریسک از دست رفتن مقاومت برخی از اعضاء، بسیار بالاست. در صورتی که سازه در برابر خرابی پیش‌روند، دوام انگشتی داشته باشد، روش‌های مختلف بسیار گزایدی برای حفظ مقاومت و پایداری سازه‌های فولادی در برابر حرارت وجود دارد. پس از خرابی بعضی از اعضاء، امکان وقوع خرابی‌های پیش‌روندی فاجعه‌باری که منجر به تلفات جانی، مالی و تبعات اجتماعی غیرقابل جبران می‌شوند، وجود خواهد داشت.<sup>[۱۵]</sup>

اما دانش بسیار کمی در باره‌ی رفتار حقیقی اعضاء فولادی با وضعیت تکیه‌گاهی و المکوهای 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 قوع خرابی‌های پیش‌روند دارد. درخصوص رفتار عضوهای فولادی به ویه ستون‌های فولادی در حرارت بالا و یا آتش، مطالعاتی انجام شده است که به برخی از آن‌ها در اینجا اشاره شده است. یانگ<sup>۱</sup> و همکاران<sup>۲۰۰۵</sup><sup>[۱۶]</sup> آزمایش‌هایی را بر روی مقاومت آتش ستون‌های کوتاه جعبه‌بی 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<sup>۲۰۰۹</sup><sup>[۱۷]</sup> در بررسی رفتار ستون‌های فولادی محافظت شده در برابر آتش که بخشی از قسمت‌های محافظت شده آسیب دیده بود، دریافت‌های که طول آسیب پوشش ضد حریق، مقاومت زیادی در برابر حفاظت ستون‌های فولادی دارد و خرابی نمونه‌ها عمده‌تاً به دلیل کمانش و یا تسلیم قسمت پوشش ضدحریق آسیب دیده است. کوریا<sup>۳</sup> و همکاران<sup>۲۰۱۰</sup><sup>[۱۸]</sup> به بررسی پاراشریک 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

سلسیوس قرار گرفته و پس از سرد شدن، آزمون فشاری بر روی ۱۴ نمونه‌ی بدون مقاوم سازی ۷ نمونه در دو تراز دمایی (انجام شده است. سپس ۲۴ نمونه‌ی دارای نقص ۶ حالت نقص - دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد - دو روش مقاوم سازی) توسط الیاف ورق‌های فولادی CFRP مقاوم سازی شدند؛ همچنین نمونه‌های ذکر شده تحت آزمایش فشاری (همانند نمونه‌های بدون مقاوم سازی) قرار گرفتند. درنتیجه می‌توان گفت تأثیر مواردی، همچون: نوع نقص، تراز دمایی و نحوه مقاوم سازی، در عملکرد ستون‌های فولادی بررسی و مقایسه شده‌اند.

## ۲. مشخصات نمونه‌های ستون بررسی شده

در پژوهش حاضر، ستون‌های فولادی قوطی‌شکل توانایی به ابعاد  $32 \times 10 \times 10 \times 3$  در سانتی‌متر (ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر، ابعاد مقطع ۱۰ سانتی‌متری و ضخامت ۳ میلی‌متر) در ۲ درجه حرارتی مختلف (۰ و ۷۰ 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 مقاوم سازی ستون‌ها در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های تقویت شده به وسیله‌ی الیاف CFRP و ورق فولادی محل نقص به این شرح، بررسی و آزمایش شده‌اند.

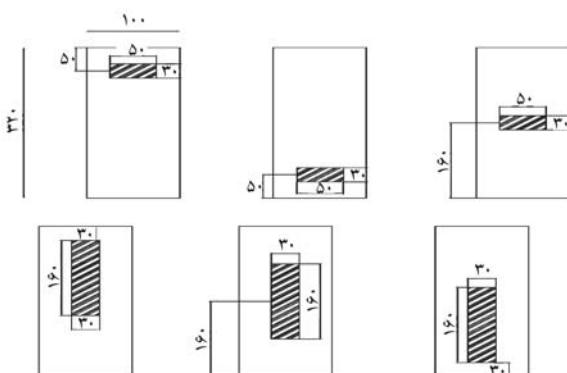
ج) نمونه‌های دارای نقص با تقویت FRP دولایه: ۱۲ عدد.

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

نقص‌های ذکر شده ستون در کارخانه توسط دستگاه‌های برش CNC (کتترل عددی رایانه‌ی) ایجاد شده‌اند. تصاویر برش نمونه‌ها و نمونه‌های نقص دار در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شوند.

## ۳. 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 ( $\lambda = k \times l/r$ ,  $k = 0/0.5$ ) ضریب لاغری برابر  $2/5$  بوده



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

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

در خصوص تأثیر حرارت و متعاقباً مقاوم سازی اعضاء فولادی و بتئی مطالعات محدودی در دسترس است؛ تائو و هان<sup>[۱۶]</sup> (۲۰۰۷) به ترمیم تیرستون‌های فولادی لوله‌بی دارای هسته‌ی بتئی (CFST) که در معرض آتش بودند، با استفاده از دوربین‌های CFRP پرداختند و نمونه‌های دایره‌بی و مربعی با شرایط مذکور را بررسی کردند و دریافتند که دوربین CFRP سبب افزایش ظرفیت بازی بررسی تیرستون‌های مذکور (CFST) می‌شود؛ در حالی که ترمیم با مواد مذکور، تأثیری در سختی نمونه‌های اخیر نداشتند است. جیانگتاو<sup>[۱۷]</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد تیرهای بتئی آتش را ارزیابی کردند. ایشان ۱۵ تیر بتئی آرمه‌ی تقویت شده (NSM) تحت تأثیر آتش را ارزیابی کردند. ایشان ۱۵ تیر بتئی آرمه‌ی تقویت شده با میلگرد و دو تیر مرجع (بدون تقویت) را تحت شرایط آتش استاندار ISO ۸۲۴ و دمای محیط بارگذاری کردند و دریافتند که مواد ضدحرقین (محافظت‌کننده در برابر آتش)، مقاومت تیرهای تقویتی با روش NSM-FRP را افزایش می‌دهند؛ از طرفی، اجرای U شکل مواد ضدآتش، تأثیر موقت تری در مهار آتش نسبت به اجرای آن‌ها فقط دروجه زیر تیر داشته است.<sup>[۱۷]</sup> عمران<sup>[۱۸]</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، 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؛ درنتیجه جزئیات مدل‌های المان محدود انتقال حرارت و خواص گرمایی مهم CFRP و مواد عایق‌بندی ارائه شد. چن<sup>[۱۹]</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر الیاف FRP در رفتار ستون‌های فولادی حرارت دیده را ارزیابی کردند و به بررسی رفتار فشاری ستون‌های کوتاه فولادی قوطی‌شکل پر شده با بتئی CFRP که با الیاف CFRP تقویت شده بودند، پرداختند. ستون‌های مذکور قابل از تقویت، تحت تأثیر درجه‌های حرارت بالا (۸۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مثبت دوربین FRP در مقاومت و سختی ستون‌های فولادی بود و افزایش تعداد لایه‌ای FRP، سبب بهبود بیشتر پارامتر مذکور شده است. هی و چن<sup>[۲۰]</sup> (۲۰۲۰)، تأثیر درجه حرارت بالا و لایه‌های ورقه‌های CFRP یک، دو، سه و چهار لایه را در رفتار ستون‌های لوله‌بی فولادی بررسی کردند و دریافتند که ستون‌های فولادی دایره‌بی (CST) پس از تقویت ورق‌های CFRP، افزایش بارگردانی 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 مقاوم سازی مطالعه نکرده‌اند. همچنین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی عملکرد ستون‌های فولادی در دماهای بالا، محدودیت‌هایی نظری؛ عملکرد پس از آتش ستون‌ها، قابلیت بارگذاری مجدد بر روی آن‌ها پس از آتش، راهکارهای مقاوم سازی، ایجاد نقص در عملکرد ستون‌ها، نوع مقطع ستون‌ها و ... دارند. بنابراین در پژوهش حاضر، به بررسی ستون‌های فولادی قوطی‌شکل و مقاوم سازی آن‌ها با درنظر 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 ۷۰ درجه

جدول ۱. نتایج آزمونهای کششی.

نمونه طول نسبی	مقادیر کششی درصد افزایش	حد جاری (MPa)	شماره مشخصات شدن (MPa)
۳۶	۳۵۶	۲۴۴	۱ ورق
۳۰	۳۵۰	۲۲۱	۲ ورق
۳۶	۳۵۲	۲۲۳	۳ ورق

جدول ۲. مشخصات کامپوزیت های CFRP استفاده شده ضخامت.

ضخامت (mm)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مقادیر کششی کرنش نهایی (MPa)	مدول کشسانی (MPa)
۲۳۰۰۰	۱/۷	۳۹۰۰	۲۰۰

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

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

است. تنش تسلیم، مقاومت نهایی، و کرنش نهایی فولاد استفاده شده در ستون ها، میانگین نتایج به دست آمده به ترتیب  $a = ۳۵۳\text{ MPa}$ ,  $f_y = ۳۳۵\text{ MPa}$ ,  $f_u = ۲۵۲\text{ MPa}$  و  $E = ۲۷۰\text{ GPa}$  در نظر گرفته شده اند. همچنین مدول کشسانی  $E = ۲۷۰\text{ GPa}$  به دست آمده است.

### ۲.۳. مشخصات کامپوزیت های CFRP های استفاده شده

در پژوهش حاضر، جهت تقویت نمونه های ستون فولادی دارای نقص از الیاف کربن CFRP با مشخصات درج شده در جدول ۲ استفاده شده است. نحوه تقویت به صورت دور پیچ دولایه (دولایه طولی و دولایه 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 می شود. چسب به دو نوع اپوکسی و پلی استر تقسیم می شود. اپوکسی، بسیار گران تر از پلی استر است؛ ولی نوع بسیار معمول چسب های سازه بی بر پایه اپوکسی استوار است که نتیجه ای اختلاط رزین های اپوکسی با یک ماده سفت کننده (Hardener) است. کامپوزیت CFRP با استفاده از اپوکسی مخصوص به ستون فولادی چسبانده می شود. در جدول ۳، مشخصات چسب استفاده شده در پژوهش حاضر آرائه شده است.

### ۴.۳. مشخصات ورق های تقویتی

مشخصات مکانیکی ورق های تقویتی، همانند مشخصات ذکر شده جهت فولاد ستون ها در بخش ۱.۳ است.

## ۴. معرفی و نامگذاری نمونه های ستون فولادی

به طور کلی نمونه ها در دو درجه حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد تقسیم بندی شده اند که با توجه به نوع و جانمایی نقص، تقویت و یا عدم تقویت ستون ها



شکل ۲. تصاویر برش CNC نمونه ها در کارخانه.



شکل ۳. تصاویر نمونه های سالم و نقص دار در کارخانه پس از برش CNC محل نقص.



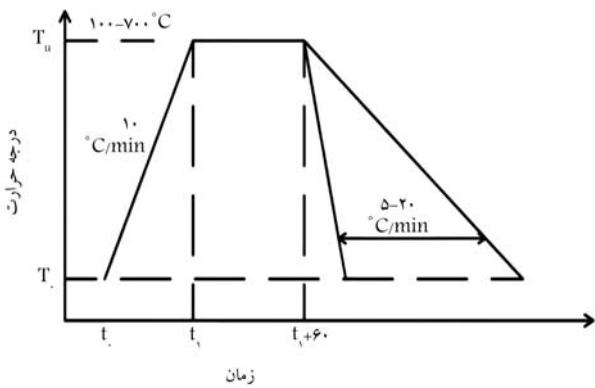
شکل ۴. تصاویر نمونه های آزمونهای کششی با نمایش طول آن ها.

است که نشان دهنده لاغری بسیار پایین است و کوتاه بودن ستون ها را تأیید می کند و لاغری در ستون های کوتاه، تأثیر زیادی ندارد.

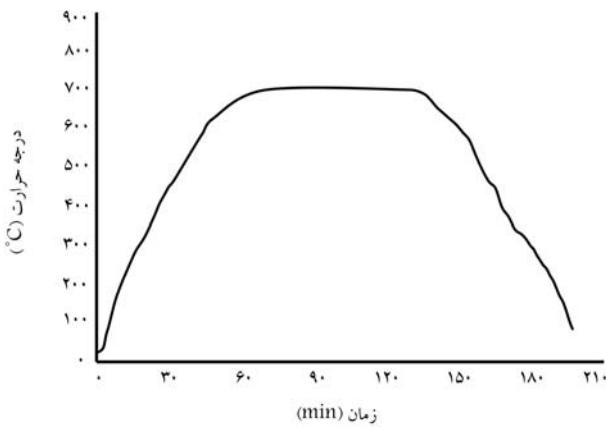
## ۳. مشخصات مصالح استفاده شده

### ۳.۱. مشخصات فولاد

با استفاده از آزمایش آزمونهای کششی ورق فولادی، مشخصات فولاد استفاده شده در ستون ها و ورق های تقویتی به دست آمده است. نمونه های دمبلی مطابق دستورالعمل ASTM ۳۷۰<sup>[۲۰]</sup>، جهت آزمون کششی با برش CNC آماده شده اند (شکل ۴). خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایش کششی نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده



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



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



شکل ۷. تصاویر کوره و نمونه‌ها بعد اعمال حرارت.



شکل ۸. نمونه‌ی سنتون DHM مقاوم‌سازی شده با CFRP.

با کامپوزیت‌های CFRP و ورق فولادی نمونه‌های سنتون نامگذاری شده‌اند:

V(Vertical)	H(Horizontal)	D(Defect)	Control
عمودی	افقی	نقص	نمونه کنترلی
B(Bot)	M(Middle)	T(Top)	
بالا	وسط	پایین	
DHB	DHM	DHT	
نقص افقی بالای سنتون	نقص افقی وسط سنتون	نقص افقی پایین سنتون	
DVB	DVM	DVT	
نقص قائم بالای سنتون	نقص قائم وسط سنتون	نقص قائم پایین سنتون	

نتیجه، انواع نقص‌ها با توجه به نوع نقص و محل نقص شامل این موارد است:

برای نمونه‌های تقویتی C2T2L که به معنی دولایه‌ی عرضی و دولایه طولی
CFRP با الیاف یک جهته است؛ و برای نمونه‌های تقویتی با ورق از PL استفاده شده است که به معنای نقص محل نقص با پلیت با ورق فولادی است.

## ۵. پروسه‌ی اعمال حرارت بر روی سنتون‌های فولادی

در آزمایش مذکور از یک کوره‌ی الکتریکی، با تنظیم دستی قدرت برای حرارت دهنده 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 حرارت دهنده 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 خنک‌شدن 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 اثاق برسد.<sup>[۲۲]</sup>

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 اعضاء سنتون فولادی با الیاف CFRP

در پژوهش حاضر نمونه‌های مطالعه شده دارای نقص ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط و بالاترین دمای اعمالی که حدوداً دمای شکست فولاد است) جهت بهبود عملکرد، به صورت دوربیچ کامل توسط الیاف CFRP احاطه و به صورت دولایه‌ی دوربیچ 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 سنتون مقاوم‌سازی شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



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



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

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

#### ۸. نتایج به دست 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 برابری و شکل‌بندی نمونه‌ها، نمودار نیرو - تغییرمکان قائم ستون‌ها استفاده شده است که از روی نمودار مذکور، بار بیشینه و تغییرمکان متناظر با آن به دست آمده است.

#### ۱۰. نتایج به دست آمده از نمونه‌های تقویت نشده‌ی ۲۰ و ۷۰۰ درجه و مقایسه‌ی نتایج

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

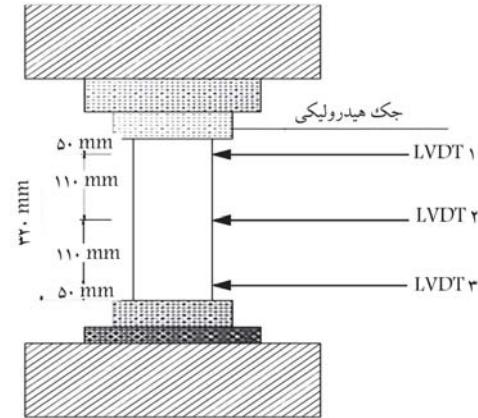
نتایج جدول اخیر نشان می‌دهد که:

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

(الف) کمترین ظرفیت بار برابر نمونه‌های ستون ۲۰ درجه را نمایه دارد نقص



شکل ۹. نحوه مقاومسازی نمونه‌ها به وسیله‌ی ورق‌های فولادی.



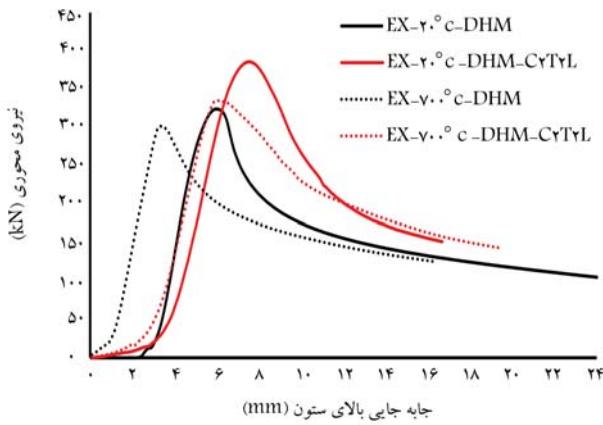
شکل ۱۰. نحوه قرارگیری نمونه‌ها زیر جک.

#### 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 جوش‌گوش 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 جک ۱۰۰ تی تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و در هر لحظه، نیرو و تغییرمکان قائم متناظر توسط سیستم نمایشی لودسل به صورت اوتومات ثبت شده است. همچنین جهت ثبت تغییرمکان افقی (عمود بر راستای عضو) از سه عدد LVDT (ترانسفورماتورهای تقاضایی متغیر جهت اندازه‌گیری جایه‌جایی خطی) در بالا، وسط و پایین ستون که عمود بر راستای عضو کارگذاشته شده‌اند، استفاده شده است. در شکل ۱۰، نحوه اعمال شرایط مرزی به همراه نصب LVDT‌ها 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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۵. نتایج نمونه‌های تقویت شده با CFRP و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

نحوه تقویت شده	بیشینه‌ی بار قائم		بیشینه‌ی بار قائم	
	نحوه تقویت شده	نحوه تقویت شده	نحوه تقویت شده	نحوه تقویت شده
۳۸۵/۱۶	۳۵۰/۹۷	DHT	۳۸۶/۵۶	۳۷۷/۳۴
۲۳۴/۷۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۸۵/۵۶	۳۲۴/۰۲
۴۲۷/۶۷	۲۹۵/۱۵	DHB	۴۴۴/۱۷	۳۵۳/۶۷
۳۴۲/۹۳	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۳۰/۴۴	۴۰۹/۶۴
۲۶۳/۱۲	۲۴۱/۶۰	DVM	۴۲۷/۵۴	۳۹۳/۳۰۲
۲۳۳/۵۸	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۹۱	۴۰۵/۹۳

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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

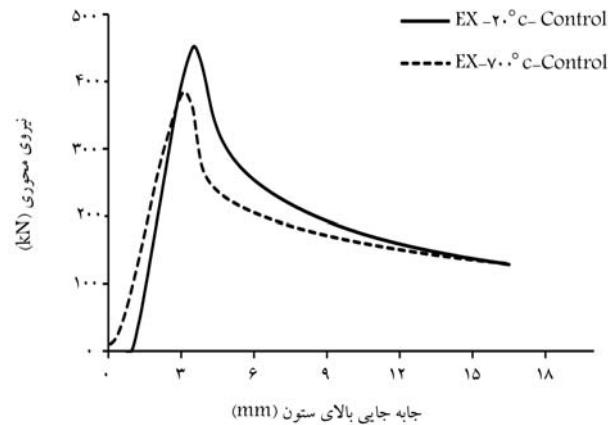
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود:

- در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تقویت و دوربیچ FRP سبب افزایش باربری و بهبود عملکرد ستون‌ها شده است. به صورتی 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 ۷۰ درجه داشته است که بیشترین میران 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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۴. نتایج نمونه‌های تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

درجه سانتی‌گراد	تغییرمکان متناظر		$P_{max}(KN)$	شرح نمونه
	با قائم	با بار		
۲۰°C	۲۰°C	۷۰°C	۴۵۱/۶۴	Control
۷۰°C	۳۲۷/۳۴	۴۹۱/۴۹	۳۸۳/۴۹	DHT
۲۰°C	۳۷۷/۳۴	۴۱۲/۴۱	۳۵۰/۹۷	DHM
۷۰°C	۳۲۴/۰۲	۴۷۷/۴۷	۳۷۷/۳۴	DHB
۲۰°C	۳۵۳/۶۷	۴۷۷/۴۷	۲۹۵/۱۵	DVT
۷۰°C	۳۰۲/۰۳	۴۸۴/۴۸	۳۰۱/۵۸	DVM
۲۰°C	۳۰۲/۰۳	۴۸۴/۴۸	۳۴۱/۶۰	DVB
۷۰°C	۴۰۵/۹۳	۴۱۰/۴۱	۴۶۱/۵۸	DVB

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

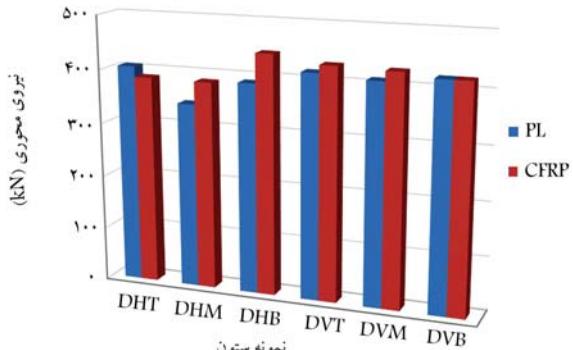
(ب) کمترین ظرفیت باربری نمونه‌های ستون ۷۰ درجه را نمونه‌ی دارای نقص قائم پایین ستون دارد (کاهش ۳۲ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترلی در ۷۰ درجه).

-- تمامی نمونه‌های ۷۰ 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 باید نمونه‌ی کنترلی در دمای ۷۰ 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.

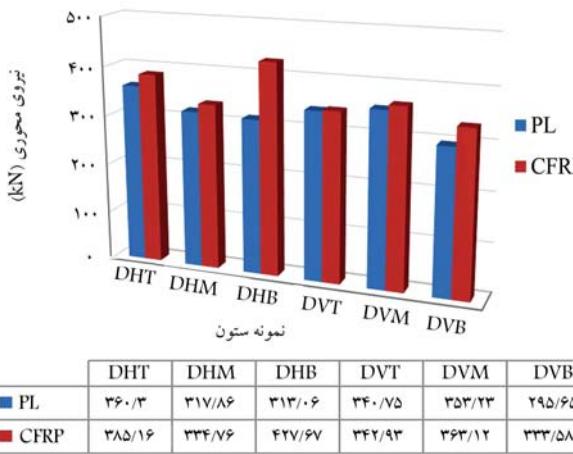
-- تغییرمکان محوری هنگام بار بیشینه، در نمونه با نقص افقی وسط در حرارت ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین مقدار را دارد.

## ۷.۸ نتایج به دست آمده از نمونه‌های تقویت شده ۲۰ و ۷۰ درجه و مقایسه با سایر نتایج

نمونه‌های دارای نقص به دو صورت: (۱) با دوربیچ 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.



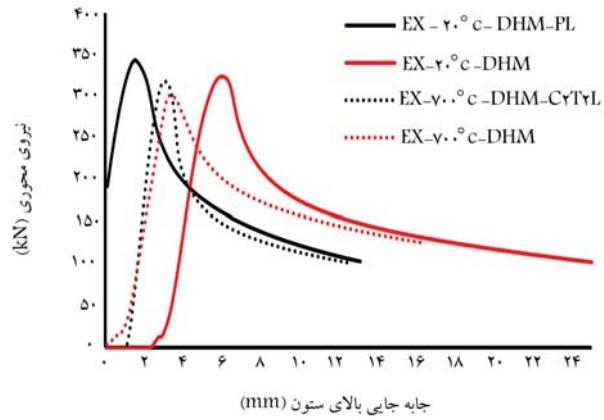
شکل ۱۷. مقایسه‌ی ظرفیت باربری (بیشینه‌ی نیروی محوری قابل تحمل) نمونه‌های تقویتی با ورق و CFRP در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

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:

حالات خرابی برای نمونه‌های کنترلی تسلیم و به دنبال آن کمانش محلی متقارن است، به نحوی که دو ضلع مخالف به سمت داخل و دو ضلع دیگر به سمت بیرون کمانش می‌کنند (شکل ۱۸(الف)). در نمونه‌های دارای نقص، در برخی نمونه‌ها با توجه به ضعیف شدن قسمتی از مقطع، کمانش موضعی اغلب در محل نقص به وجود آمده و موجب گسیختگی نمونه شده است (شکل ۱۸(ب))؛ 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 - تغییرمکان نمونه‌های تقویتی با ورق فولادی و بدون تقویت با نقص افقی وسط در ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

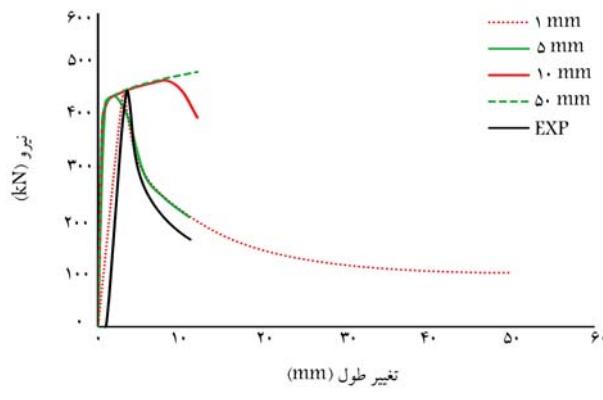
جدول ۶. نتایج نمونه‌های تقویت شده با ورق و تقویت نشده در دو حرارت ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

نمونه ستون	بیشینه‌ی بار قائم		بیشینه‌ی بار قائم	
	نمونه‌های ۷۰ درجه	نمونه‌های ۲۰ درجه	نمونه ستون	نمونه‌های ۷۰ درجه
نمونه ستون	نمونه‌های تقویت شده	نمونه‌های تقویت شده	نمونه ستون	نمونه‌های تقویت شده
۳۶۰/۳۰	۳۵۰/۹۷	DHT	۴۰۵/۶۴	۳۷۷/۳۴
۳۱۷/۸۶	۳۰۱/۵۸	DHM	۳۴۳/۴۲	۳۲۴/۰۲
۳۱۳/۰۶	۲۹۵/۱۵	DHB	۳۸۹/۵۳	۳۵۳/۶۷
۳۴۰/۷۵	۳۲۲/۰۳	DVT	۴۱۵/۸۵	۴۰۹/۶۴
۳۵۳/۲۲	۳۴۱/۶۰	DVM	۴۰۹/۲۰	۳۹۳/۳۰۲
۲۹۵/۵۶	۲۶۱/۵۸	DVB	۴۱۹/۸۷	۴۰۵/۹۳

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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

مطابق جدول ۶: در هر دو گروه ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، تقویت با ورق فولادی در محل نقص، نیز همانند روش دیگر تقویت (استفاده از دور پیچ (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 ۷۰ 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 دور پیچ CFRP نسبت به ورق فولادی محسوس تر است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مقایسه‌ی دو حالت تقویت باری هر نوع نقص، به ترتیب در دماهای ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. نمودارهای شکل ۱۶ نشان می‌دهد که بهجز حالت نقص افقی بالا (DHT)، در تمامی حالت‌ها نمونه‌های تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRP (دولایه)، ظرفیت باربری بیشتری



شکل ۱۹. آنالیز حساسیت مش.

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

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

- (الف) فاز اول: تحلیل کوبل سازه‌یی استاتیکی و حرارتی (ترکیب سازه‌یی و حرارتی).
- (ب) فاز دوم: تحلیل سازه‌یی استاتیکی.

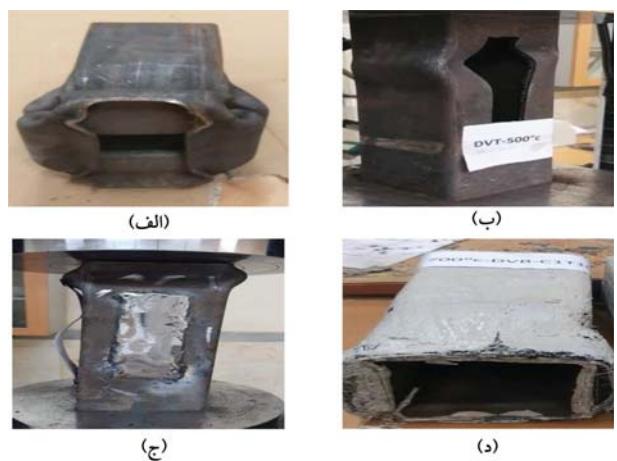
به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، ابتدا آنالیز حساسیت بر روی نمونه‌ی کنترلی انجام شده است و نتایج آن در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که مطابق آن، مشیندی با سایز ۵۰ میلی‌متر، دقت مناسبی نداشته و با کاهش سایز مش، دقت مدل‌سازی بهبود یافته است؛ به نحوی که سایز مش ۱ میلی‌متر، بهترین دقت را ایجاد کرده است. از طرفی دیگر،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

در شکل ۲۰، نمونه‌ی از نمودارهای بار - جابه‌جاوی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به نتایج عددی، مدل اجراء محدود، دقت و همگرایی مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی در راستی آزمایی پیش‌بینی ظرفیت باربری نمونه‌های فشاری فولادی دارد. همچنین به منظور مطابقت مود خارجی 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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. سپس آزمون فشار بر روی نمونه‌ها انجام شده و نمودارهای بار - جابه‌جاوی به دست آمده است. در ادامه، ۲۴ ستون دیگر جهت مقاوم‌سازی نقص‌ها به‌وسیله‌ی ورق‌های فولادی و کامپوزیت‌های FRP استفاده و در دو تراز دمایی ۲۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش مشابه شده‌اند. خلاصه‌ی نتایج ۳۸ آزمایش انجام شده 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 ۷۰ 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 درنهایت، با لایه‌لایه شدن ورق فولاد و CFRP در نواحی گوشه‌های ستون، پارگی رخ داده و نمونه گسیخته شده است. علاوه‌بر این، اگرچه موقعیت کمانش در دو ضلع دیگر ستون که در آن کمانش موضعی به بیرون از طریق محبوب‌شدن 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 ۷۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۱۲</sup> مدل‌سازی و راستی آزمایی شده‌اند که به این شرح هستند:

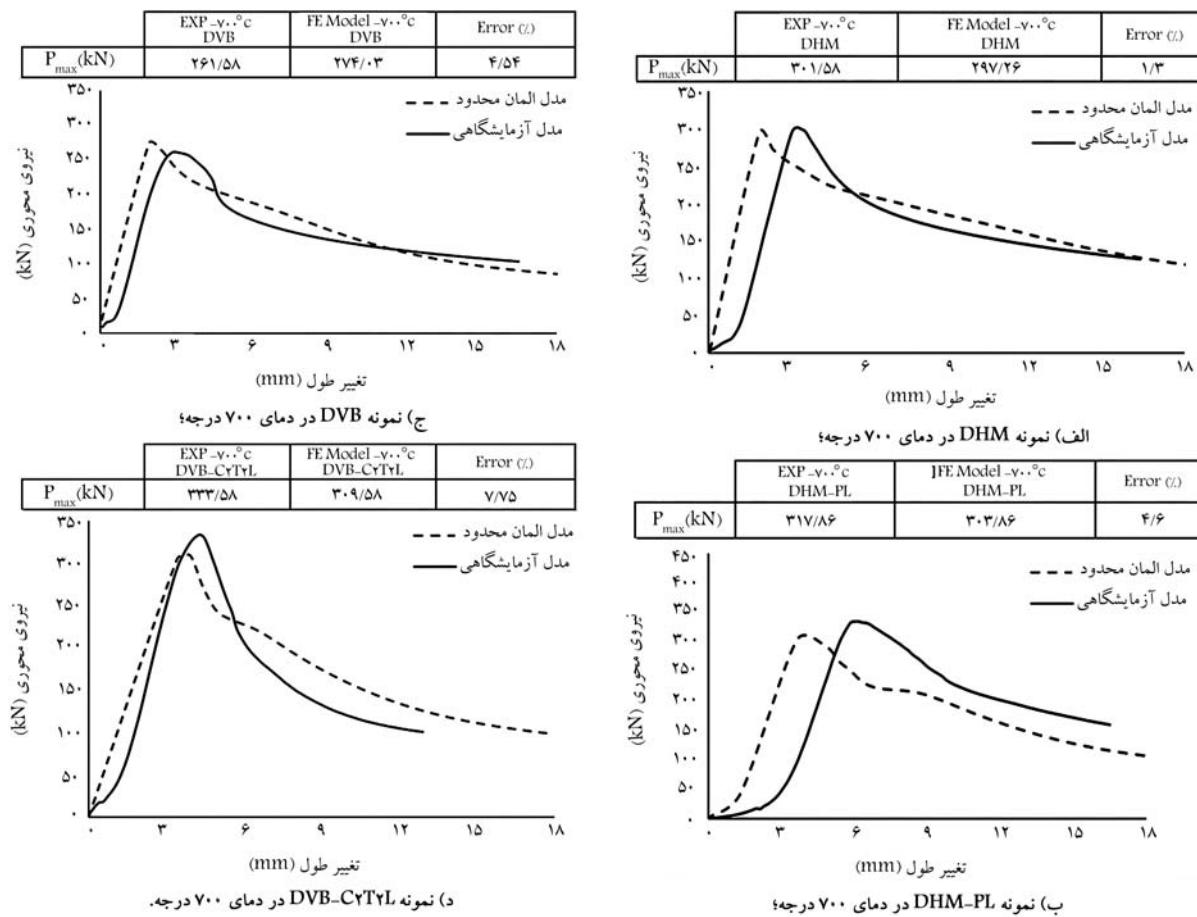
۱. نمونه‌ی بدون نقص (Control).
۲. نمونه با نقص قائم پایین نمونه (DVB).
۳. نمونه با نقص افقی وسط نمونه (DHM).
۴. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DHM-PL).
۵. نمونه با نقص افقی وسط نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با ورق فولادی (DVB-C2T2L).

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 گرادیان حرارتی (C3D8T) و از المان S4R (المان صفحه‌ی ۴ گرهی) که از المان‌های Shell است، برای مدل‌سازی CFRP استفاده شده است.

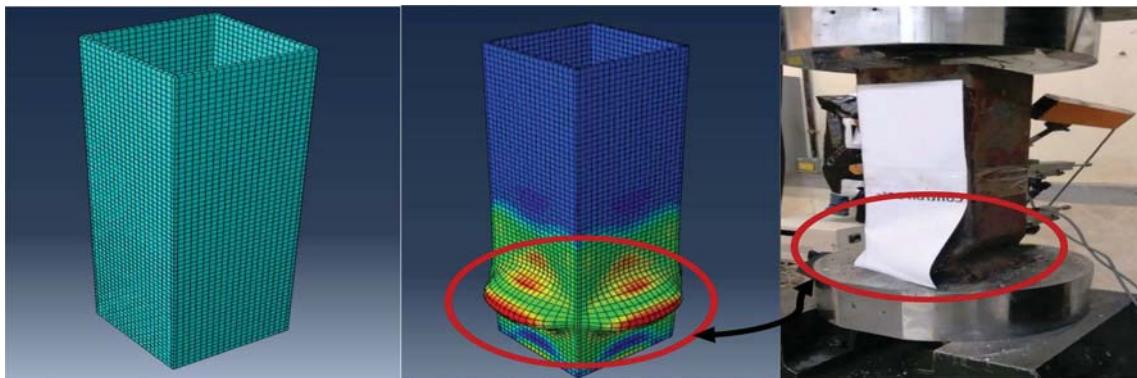
## ۱۱. پروسه‌ی اعمال حرارت و تحلیل

جهت اعمال حرارت همانند نمونه‌ی آزمایشگاهی (نمودار شکل ۵) از توابع ۱ و ۲ به ترتیب جهت گرمایش و سپس سرمایش استفاده شده است:

$$T(t) = 10t + T_0 \quad (1)$$



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابجایی در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.

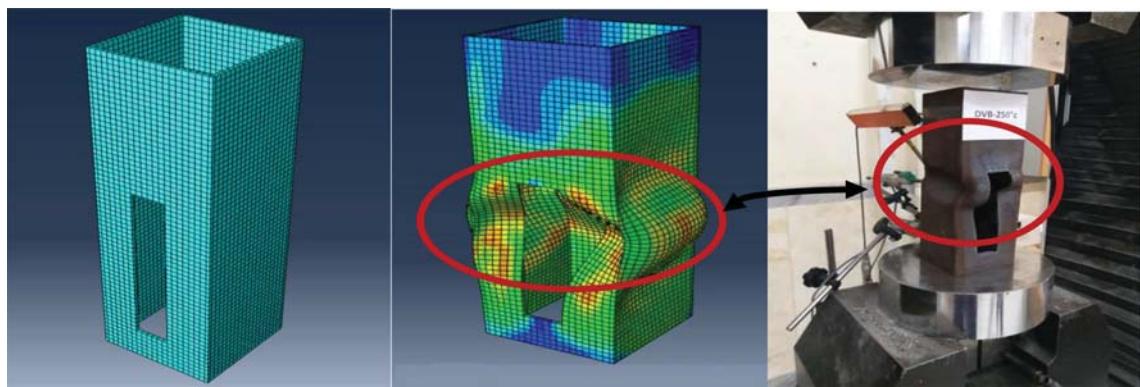


شکل ۲۱. مدل سازی نموده کنترلی در نرم افزار آباکوس، حالت تغییرشکل نرم افزاری و آزمایشگاهی.

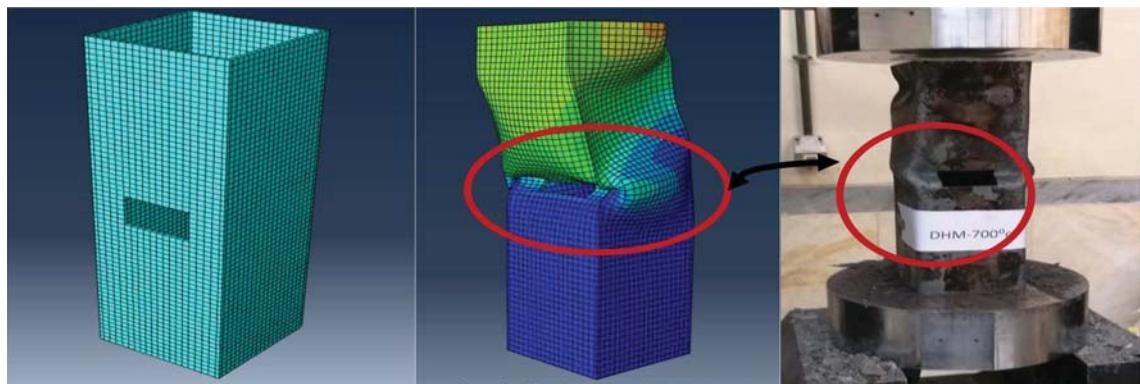
سانتی گراد مربوط به نموده با نقص قائم پایین ستون (کاہش ۳۲ درصدی) ج) جهت جبران ضعف باربری و کاهش مقاومت ستون های فولادی در اثر نقص و همزمان حرارت، یکی از بهترین روش ها بدون افزایش محسوس وزن، استفاده از الیاف CFRP به صورت دور پیچ است که تعداد لایه های بیشتر به علت محصور کنندگی نقش بیشتری داردند.

د) افزایش مقاومت نموده ها بعد از تقویت دور پیچ CFRP از نتایج بدست آمده در این تحقیق بود که این تأثیر در نموده های با دمای محولی محیط و دمای ۷۰ درجه سانتی گراد مشاهده شده است که برای نموده ها با نقص افقی پایین ستون

ب) حرارت و افزایش دما سبب کاهش مقاومت ستون های فولادی می شود، به طوری که با افزایش دما تا دمای ۷۰ درجه سانتی گراد، که تقریباً دمای شکست فولاد است، کاهش ۱۵ درصدی ظرفیت باربری در نموده کنترلی یا بدون نقص مشاهده می شود و بیشینه کاهش مقاومت مذکور در نموده با نقص قائم ستون رخ داده است (۳۵٪ کاہش 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  $70^{\circ}$  درجه سانتی گراد محسوس تر بوده است.

را به منظور گسترش نتایج در مطالعات آینده، مدل المان محدودی نمونه دارای سوراخ و نمونه می مقاوم سازی شده، مدل سازی و راستی آزمایش شده است. نتایج مدل المان محدودی، دقیق قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته است.

به میران پیشنهادی بوده است.

در کل نمونه ها، نمونه  $70^{\circ}$  درجه مذکور با  $45\%$  افزایش برابری نسبت به نمونه مشابه تقویت نشده آن، بیشترین تأثیر را از استفاده دور پیچ CFRP داشته است.

ه) استفاده از دولایه CFRP به علت محصور کنندگی ستون فولادی در مدهای خرابی و کمانش تأثیر داشته و کمانش پافیلی را به میران کمیته رسانده است.

## پانوشت ها

1. Yang
2. Wang
3. Correia
4. Bystr
5. Fan
6. Xing
7. Tao & Han
8. Jiangtao
9. Imran
10. Chen

11. He & Chen
12. Abaqus

## منابع (References)

1. Saedi Daryan, A. and Katabdari, 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. Katabdari, 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 مقاوم‌سازی شده با FRP

سهیل پالیزی (دانشجوی دکتری)

و هب توفیق \* (دانشیار)

دانشکدی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

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 راستی آزمایی و رائه شده است. با دقت‌گرفتن 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 دقت‌گرفتن ضربی مدل انجام شده است. خروجی نشان داد در حالتی که عدم قطعیت در طراحی قطعه در نظر گرفته شود، شاخص قابلیت اعتماد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، به طوری 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. رفتار<sup>۳</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>۴</sup> (۲۰۰۵)،<sup>[۸]</sup> پایداری حرارتی سیستم چوب - FRP را با استفاده از چسبینده‌های اپوکسی مطالعه کردند.

در مطالعه‌یی مشابه، کلیگر<sup>۵</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 پیش‌تییدگی 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 چسبینده قرار می‌گیرند. در صفحات FRP، کاهش مقاومتی که به طور طبیعی و به مرور زمان در چوب رخ می‌دهد، وجود ندارد. اساساً نوع آزمون برای بررسی چسب چوب - FRP استفاده می‌شود. پژوهشگران مختلف، آزمون‌های اصلاح شده‌ی از ۶۲۳۸ ISO،<sup>[۱۱]</sup> ASTM D۹۰۵-۰۵<sup>[۱۲]</sup> ارائه کردند.<sup>[۱۳]</sup> مقاومت برشی اتصال در طول صفحه‌ی متصل شده از آزمون‌های مذکور به دست 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 دوبل اتصال چوب به استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۴-۱۶]</sup> پیکربندی<sup>۶</sup> مذکور، به خصوص 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 به‌فرد 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 قادر به استفاده از آن در انواع مختلف سازه‌ها، مانند سازه‌های پتني، بنائي و چوبی کرده است. سه نوع FRP، شامل: کربن، شیشه و آراميد بيشترین كاربرد را در اين حوزه داشته‌اند. يكی از اهداف اصلی استفاده از FRP برای ارتقاء مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌های مختلفی، چون: پل‌ها، سدها، خطوط لوله و اعضاء سازه‌یی است. انواع مختلفی از سیستم‌های مقاوم‌سازی با FRP در ادبیات فنی موجود است که عمدتاً برای سازه‌های بنائي و پتني هستند.<sup>[۵-۶]</sup>

با وجود اینکه چوب به عنوان یک مصالح قابل بازیافت شناخته می‌شود و به طور گستردگی 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 خمس اشارة کرد. کامپوزیت‌های چوب - FRP این نقص‌ها را می‌توانند جبران کنند. ون<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۱۴]</sup> یک مطالعه‌ی آزمایشی ترتیب دادند و در آن سطح تناس چسب چوب FRP را مطالعه و با استفاده از انواع

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۶ اکتبر ۲۰۲۱، اصلاحیه ۵، ۱۴۰۱، پذیرش ۱۴ اکتبر ۲۰۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60571.3109

ادیبات فنی در حوزه‌ی اخیر جمع‌آوری شده است. همچنین داده‌های موجود مربوط به آزمایش کششی سیستم چوب - FRP برای ساخت و راستی آزمایی یک مدل المان محدود استفاده شده است. پنج مدل از مدل‌های 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 جدول‌ها و نمودارهایی ارائه شده است.

## ۲. مدل‌های موجود در سیستم چوب - FRP

مطابق آنچه که در بخش ۱ بیان شد، مزایایی که روش اتصال چوب - FRP فراهم می‌کند، شامل: ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی<sup>[۲۴]</sup>، تعیین مود شکست<sup>[۲۰]</sup>، انتخاب ماده‌ی چسبنده<sup>[۲۱]</sup> و انتخاب نوع FRP توسط مطالعاتی بررسی شده است. ویژگی‌های اخیر تا حدی مقیول بوده است، حتی در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۶<sup>[۲۳]</sup> نشان داده شد که سطح اتصال چوب FRP مقاومت پیشتری نسبت به اتصال سایر مصالحی مثل بتون و فولاد به FRP دارد. بنابراین کارایی استفاده از سیستم چوب برای مقاوم‌سازی بر کسی پوشیده نیست. با وجود این، یکی از رایج‌ترین شکست‌های موجود در سیستم چوب FRP، شکست ناشی از جداشدن چسب کامپوزیت FRP است که در آن از تمام ظرفیت FRP استفاده نشده و شکل‌بزیری مدنظر سیستم سازی‌بی صورت نگرفته است. بنابراین نتیجه می‌شود که عملکرد چسب، مستقیماً در عملکرد کامپوزیت تأثیرگذار است. در همین راستا، مدل‌های زیادی براساس روابط تجربی و یا تئوری‌های شکست ارائه شده است. با وجود این، همچنان که مدل‌های کارا در سیستم چوب - FRP نسبت به سیستم بتون احساس می‌شود. در جدول ۱، مدل‌های ارائه شده برای سیستم چوب ارائه شده است. در جدول ارائه شده در جدول ۱،  $P_u$  بیشینه‌ی بار اعمال شده است.  $t_f$  و  $b_f$  به ترتیب: عرض، ضخامت و مدول کشسانی صفحه‌ی FRP هستند.  $b_w$  و  $E_w$  و  $t_w$  به ترتیب عرض، ضخامت و مدول کشسانی چوب هستند.  $f_{ts}$  مقاومت کششی بلوك چوبی،  $G_a$  و  $t_a$  مدول برشی و ضخامت چسب و  $L_a$  و  $L_c$  هم به ترتیب طول اتصال و طول مؤثر اتصال هستند.  $\tau$  و  $(max)$   $\tau$  بیانگر نتش اتصال و بیشینه‌ی نتش برشی اتصال هستند.  $A$  و  $B$  و  $C1$  تا  $C8$  ثوابت هستند.  $k_c$  و  $c_1$  به صورت تجربی برابر با  $7/0$  و  $10$  در نظر گرفته می‌شوند. ضریب  $k_e$  مشخص‌کننده‌ی اثر آماده‌سازی سطحی است و در بازه‌ی بین  $7/6$  تا  $1$  قرار دارد. ضریب  $k_\mu$  درجه مقاوم‌سازی را مشخص می‌کند که می‌تواند برابر با  $1$  فرض شود.  $C_f$  و  $C_w$  و  $\gamma_w$  و  $\gamma_a$  جهت چوب و نوع چسب را مشخص می‌کنند.  $C_N$  و  $C_O$  به ترتیب: سختی کشسان، ضریب سختی محوری چوب و ضریب سختی محوری را مشخص می‌کنند.  $S_{ad}$  و  $E_{ad}$  پیانگر مدول کشسانی و نتش تسلیم چسب هستند. همچنین  $E_f$  و  $S_f$  پارامترهای مدول کشسانی و نتش تسلیم برای FRP را نشان می‌دهند. ضرایب  $C1$  تا  $C5$  در رابطه‌ی  $5$  ضرایب ثابتی هستند که در نوشتار مرجع، مقدار آن‌ها موجود است.

## ۳. مدل المان محدود سیستم چوب - FRP

به‌منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در این راستا، از بخشی از داده‌های آزمایشی موجود در ادبیات فنی برای راستی آزمایی مدل استفاده شده است.<sup>[۲۵]</sup> به‌طور کلی، یک تحلیل المان محدود، شامل سه مرحله‌ی:

بر سطح FRP را تسهیل می‌کند که می‌تواند منجر به توسعه‌ی مدل‌های سطحی شود.

پیکربندی آزمون‌های برشی تکی و دوبل در صفت پژوهشگران این حوزه به عنوان معرف مود دو شکست از سطح اتصال شناخته می‌شود. آزمون‌های اشاره شده منجر به استخراج نتایج آزمایشی بسیار مفیدی، مانند: مقاومت اتصال، توزیع کرنش، توزیع نتش برشی و پاسخ نتش لغزشی اتصال می‌شود. مورد آخر برای شیوه‌سازی‌های عددی سطح اتصال و شکست اتصال بسیار مهم است.<sup>[۱۹]</sup> آزمایش بر روی مقاومت و رفتار اتصال FRP به بتون 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 آزمون‌های برشی تکی و دوبل انجام داده‌اند.<sup>[۲۱]</sup> در هر دو اتصال FRP به مصالح مختلف، رفتار اساسی اتصال (حتی با وجود مطالعات کمتر فولاد نسبت به بتون) استخراج شده است. در این راستا، شکست ناشی از جدا شدن چسب در بتون، غالباً در لایه‌ی بتونی رخ می‌دهد، زیرا چسب معمولاً قوی‌تر از بتون است. در اتصال فولاد، گسیختگی غالباً در چسب، سطح فولاد و چسب و سطح FRP و چسب رخ می‌دهد.<sup>[۲۲]</sup> آزمایش بر روی اتصال FRP به چوب با استفاده از آزمون‌های برشی تکی و دوبل بسیار محدود است و در نتیجه مدل‌های نتش - لغزش در حال حاضر نیز در حال توسعه هستند.

تعییرات با استفاده از سیستم‌های مختلفی از اتصال صورت می‌گیرد. در روش چیدمان مرتبط<sup>۷</sup> که در آن صفحات فیبری، خشک یا اصطلاحاً پارچه‌هایی آغازته به رزین می‌شوند، به صورت اجرا در محل هستند. روش اخیر توسط ACI<sup>۸</sup> بیان شده است.<sup>[۲۳]</sup> رزین و پایه‌ی آن، صفحات FRP را به سطح مصالح موردنظر می‌چسبانند و سیستم در محل عمل آوری می‌شود. عمددهی مطالعات انجام شده مربوط به اتصال صفحات FRP به قطعات بتونی است. در همین راستا، کایزر و کارباری<sup>[۲۴]</sup> برای نخستین بار تأثیر عدم قطعیت‌ها را در کامپوزیت‌های ساخته شده به روش چیدمان مرتبط مطالعه کردند. بدین ترتیب، نقص‌های بالقوه در سیستم، شامل: پارگی در رشته‌های 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 قطعیت‌های زیاد موجود در روش اخیر که باعث می‌شود بازه‌ی تعییرات نتایج گسترده باشد، روش چیدمان مرتبط غالباً در تعییرات استفاده می‌شود، زیرا انعطاف پذیری بیشینه‌ی برای استفاده در محل را فراهم می‌کند و به لحاظ هزینه‌های اجرایی، کمترین مقادیر را در مقایسه با سایر روش‌ها دارد.<sup>[۲۵]</sup> در مهندسی عمران، تحلیل قابلیت اعتماد در موارد متعددی استفاده شده است که یکی از آن‌ها در کامپوزیت‌های FRP است. واگاوس و آنادرو<sup>[۲۶]</sup> در مطالعه‌ی تأثیر سازه‌های موجود و عدم قطعیت‌های FRP بر تعییرات سازه پرداختند و دریافتند که مهم‌ترین عدم قطعیت در مرمت سازه مربوط به مساحت آرماتورهای فولادی و همچنین مقاومت سازه‌ی موجود است. زانگ<sup>[۱]</sup> و همکاران<sup>[۲۷]</sup> با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مدل، به بررسی تحلیل احتمالاتی اتصال‌های بتونی و پرداختند و با استفاده از ۸ مدل موجود در ادبیات فنی، درنهایت پیشنهادهایی مفید در رابطه با مقاوم‌سازی سازه‌های بتونی ارائه کردند. عمددهی مطالعات این حوزه هم در رابطه با قطعات بتونی است. لکن در جست‌وجوی انجام شده توسط نویسنده‌گان، مطالعه‌ی 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 خلاً موجود در زمینه‌ی طراحی آین نامه‌ی قطعات چوبی مقاوم‌سازی شده با FRP، تمامی مدل‌های تجربی و تحلیلی موجود در

### جدول ۱. مدل‌های موجود در تعیین مقاومت اتصال سیستم چوب - FRP

ردیف	نام	شماره	مدل
۱	بندتی و کولا (۲۰۱۰) [۲۳]	۱	$P_u = \frac{1}{\tau} b_f f_{ts} \sqrt{\frac{E_f t_f}{\tau f_{ts}}}$
۲	یواندوس و باربوسا (۲۰۱۲) [۲۴]	۲	$\begin{aligned} P_u &= P_{max} \frac{L_b}{L_e} \left( 2 - \frac{L_b}{L_e} \right) \\ P_{max} &= c_1 k_b k_c K_\mu b_f \sqrt{E_f t_f \tau_{max}} \\ L_e &= \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_1 \tau_{max}}} \\ k_b &= \sqrt{\frac{1 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{b_f}{b_w}}} \quad 1 \leq k_b \leq 1/2 \end{aligned}$
۳	ون و همکاران (۲۰۱۴) [۵]	۳	$\begin{aligned} P_u &= 0.12 \gamma_w \gamma_a b_f L_e^{1/4} \sqrt{E_f t_f} \\ \tau(x) &= \frac{\partial J}{\partial \delta} = A^\tau B C_N e^{-B s} (1 - e^{-B s}) \\ J &= \frac{1}{\tau} C_N P^\tau \\ C_N &= \left( \frac{1}{b_f} \right) \left( \frac{1}{C_w} + \frac{1}{C_f} + \frac{(t_w + t_f + t_a)^\tau}{\tau D_w} \right) \\ P &= A (1 - e^{-B s}) \\ P_u &= \gamma_w \sqrt{L_e f_{ts} E_f t_f \left( \frac{b_f}{b_w} \right)^\tau} \end{aligned}$
۴	واحدیان (۲۰۱۷) [۳۵]	۴	$\begin{aligned} \tau(x) &= \frac{\tau P}{b_f L_e^\tau} \left( 1 - \frac{x}{L_e} \right) x \\ \tau(max) &= \frac{\tau P_u}{b_f L_e^\tau} \\ L_e &= \alpha \beta (f_{ts})^{1/4} \ln(E_f t_f) \\ \beta &= \frac{1.75 + \frac{b_f}{b_w}}{1.75 - \frac{b_f}{b_w}} \end{aligned}$
۵	پالیزی و توفیق (۲۰۲۲) [۳۶]	۵	$\frac{P_u}{E_t A_t} = \left\{ \begin{array}{l} \left( \left( \frac{E_{ad}}{E_f} \right)^c (C^4 C^0 C^1) \frac{S_{ad}}{S_f} \left( \left( \frac{S_{ad}}{S_f} - C^2 \right)^\tau - \sqrt{C^3 \frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \right)^\tau \\ + \left( \left( C^4 + \frac{A_{ad}}{A_f} + \frac{E_{ad}}{E_f} \frac{A_{ad}}{A_f} \right) \sqrt{\frac{E_{ad}}{E_f}} \right) \left( C^{5\tau} + \left( \frac{S_{ad}}{S_f} \right)^\tau \right)^\tau \end{array} \right\}$

جدول ۲. مشخصات مصالح چوب در مدل راستی آزمایی.

مصالح	مدول کشسانی - GPa	مقاومت فشاری - MPa	(انحراف معیارا)
چوب نرم*	۶/۳۴ (۱/۵۵)	۳۲/۸ (۲/۱)	
چوب سخت**	۱۰/۰۱ (۱/۶۷)	۴۹/۳ (۶/۶)	

\*\* Hardwood

\* Softwood

هندسه‌ی مدل، شامل: سه بخش: قطعه‌ی چوبی، چسب و FRP است، که در نرم‌افزار آباکوس مطابق ابعاد ذکر شده تعريف 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 بینتند 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 انگشت‌گیری 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، 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 آزمایش.

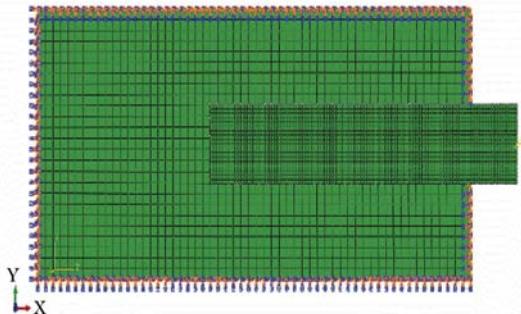
مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیارا)	مدول کشسانی - MPa (انحراف معیارا)	مقاومت کشسانی - MPa (انحراف معیارا)	کرنش نهایی (انحراف معیارا)
صفحه‌ی نوع ۱	(۱۴) ۲۳۱	(۱۷۸) ۲۷۶۸	(۰/۰۹) ۰۱۲۰	(۰/۰۹) ۰۱۲۰
صفحه‌ی نوع ۲	(۲۲) ۲۴۴	(۳۱۰) ۲۶۰۱	(۰/۰۰۶) ۰۱۰۴	(۰/۰۰۶) ۰۱۰۴
* پروفائل‌های پالترود شده*	(۳) ۱۹۲	(۳۱۳۳) ۸۷	(۰/۰۰۵) ۰۱۶۳	(۰/۰۰۵) ۰۱۶۳

\*Pultruded

جدول ۴. مشخصات مصالح چسب در مدل راستی آزمایش.

مصالح	مدول کشسانی - GPa (انحراف معیارا)	مدول کشسانی - MPa (انحراف معیارا)	مقاومت کشسانی - MPa (انحراف معیارا)	کرنش نهایی (انحراف معیارا)
۳۰	(۰/۱۴) ۸/۸۹	(۱/۲) ۲۶/۹	(۰/۰۰۵) ۰۰۳۶	(۰/۰۰۵) ۰/۰۰۳۶
۳۰۰	(۰/۰۳) ۳/۴۳	(۶/۲) ۴۸/۳	(۰/۰۳) ۰/۰۱۷۳	(۰/۰۳) ۰/۰۱۷۳
۳۳۰	(۰/۱۱) ۴/۲۷	(۱/۵) ۲۸/۳	(۰/۰۰۴) ۰/۰۰۶۷	(۰/۰۰۴) ۰/۰۰۶۷
۴۲۰	(۰/۰۳) ۱/۷۲	(۰/۵) ۲۱/۵	(۰/۰۰۱۵) ۰/۰۱۸۴	(۰/۰۰۱۵) ۰/۰۱۸۴
۲۰۱۵	(۰/۱۵) ۱/۷۵	(۲/۱) ۱۶/۴	(۰/۰۰۲۸) ۰/۰۱۸۵	(۰/۰۰۲۸) ۰/۰۱۸۵
تایفو*	(۰/۰۷) ۱/۱۸	(۱/۳) ۱۵/۲	(۰/۰۰۸۸) ۰/۰۳۷۲	(۰/۰۰۸۸) ۰/۰۳۷۲

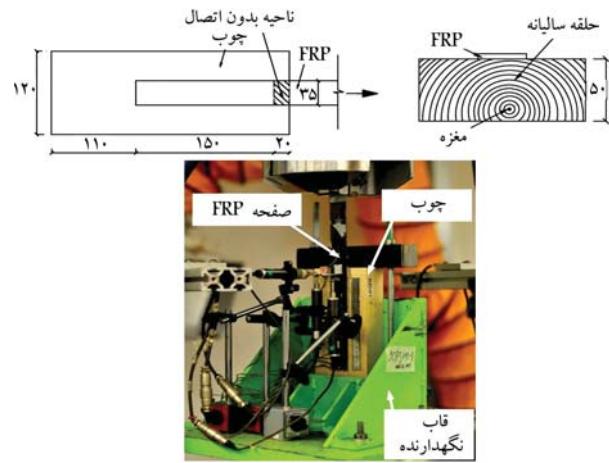
Tyfo\*



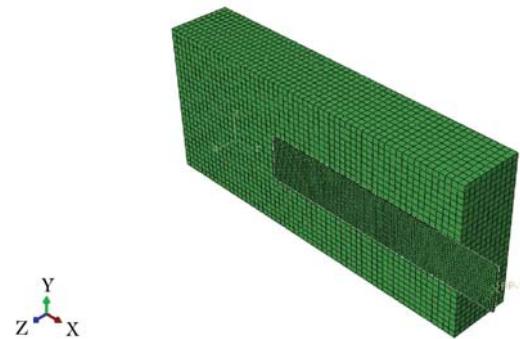
شکل ۳. شرایط مرزی مدل المان محدود.

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 دورتا دور قطعه‌ی FRP، یک نقطه چوبی به صورت گیردار در نظر گرفته شده و در ابتدای قطعه‌ی FRP، یک نقطه به عنوان نقطه‌ی مرتع انتخاب و شرایط مرزی به آن اعمال شده است. این شرایط مرزی به صورت سته شدن نقطه‌ی مرتع در همه‌ی درجه‌های آزادی به جز چهت 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 خط 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  $9/۳$  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  $45^\circ$  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 نتش مدنظر نیست، راهکار مناسبی خواهد بود. ابعاد مشن با آزمون و خطای 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 (رابطه‌ی ۳):

$$R = P_u^m \quad (3)$$

همچنین، از منظر طراحی، بار اسمی و مقاومت با هم مرتبط‌اند و بنابراین بارهای اسمی مرده و زنده بر حسب مقاومت به صورت رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شوند:

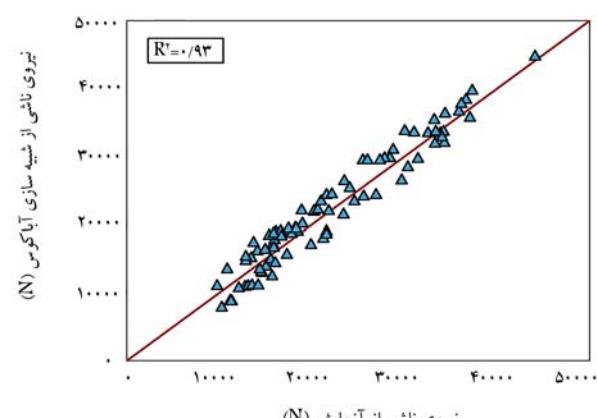
$$S_d = \psi \times P_u^c \quad (4)$$

که در آن  $S_d$  بار طراحی و  $\psi$  ضریب کاهشی برای یافتن یک تراز مناسب از شاخص قابلیت اعتماد است. در صورت نبودن ضریب مدل، ضریب کاهشی می‌تواند در بازه‌ی بین  $2/8$  تا  $8/0$  باشد.<sup>[۲۹]</sup> در پژوهش حاضر، به منظور دستیابی به ضریب قابلیت اعتماد،  $\beta = 3$  و براساس ضریب محاسبه شده در هر شش مدل، ضریب کاهشی با آزمون و خطأ حدوداً برابر با  $6/0$  در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقاومت‌سازی چوب - FRP با توجه به سناریوهای مختلف بارگذاری می‌تواند انجام شود، سه سطح بارگذاری براساس نسبت بار زنده به بار مرده ( $\eta$ ) برابر با  $1/75$ ،  $1/50$  و  $1/25$  انتخاب شده است.

با مراجعه به نوشتارهای موجود در ادبیات فنی مشاهده شد که توزیع‌های نرمال، لگنرمال<sup>[۱۲]</sup> و واپیول<sup>[۱۴]</sup> برای مدل کشسانی چوب و FRP و همچنین برای تنش تسلیم آن‌ها بیشترین کاربرد را داشته‌اند. برای مسئله‌ی پیش رو از توزیع لاغرمال برای آن‌ها که بیشترین کاربرد را داشته‌اند، برای مدل انتحراف 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  $64 \times 24$  اجبار می‌شود. با توجه به وجود سه تراز بارگذاری، تعداد حالت‌های انجام تحلیل قابلیت اعتماد  $192 \times 3$  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 هاووسوفر- لیند<sup>[۲۰]</sup> به جهت کاهش هزینه 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 ضابطه شکست تعریف کرد، که به صورت رابطه‌ی 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 آید. 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  $4/88$  شده است. با وجود این، نتایج به دست آمده برای بتا برای هر ۶ مدل تقاضاً فاقدی با یکدیگر دارند. بیشترین میانگین بتا مربوط به مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به دست آمده بود. همچنین مدل شماره‌ی 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 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، ضریب 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  $0/58$  و  $0/94$  (مدل پالیزی و توفیق)،<sup>[۲۸]</sup> و  $0/24$  (مدل بندتی و کولا)،<sup>[۲۹]</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، سیار کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین در مورد مدل المان محدود نیز پارامتر مذکور محاسبه شده و عدد  $0/74$  به دست آمده است، که نشان‌گر دقت قابل قبول مدل است.

#### ۵. تحلیل قابلیت اعتماد

مشابه فرمول بندی ACI و همچنین سایر مطالعات مشابه در این حوزه،<sup>[۳۶، 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،  $D$  تقاضای ناشی از بارهای مرده و زنده هستند. تابع مقاومت  $R$  در حالت عادی، ظرفیت اعضاء سازه‌ی مانند ظرفیت خمی یک تیر را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تابع مقاومت برابر با

جدول ۵. شاخص قابلیت اعتقاد در ۶۴ حالت بدون درنظر گرفتن ضریب مدل.

شماره تحلیل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶
۱	۲,۱۱	۴,۱۹	۰,۹۰	۴,۳۲	۰,۷۶	۰,۶۴
۲	۳,۵۶	۳,۵۹	۰,۸۵	۴,۵۸	۰,۵۵	۰,۴۹
۳	۲,۳۲	۰,۰۶	۰,۸۳	۴,۴۴	۰,۶۲	۰,۷۶
۴	۲,۴۶	۳,۲۶	۰,۷۵	۴,۹۶	۰,۷۹	۰,۹۲
۵	۲,۹۵	۳,۱۱	۰,۱۱	۴,۷۶	۰,۲۶	۰,۱۱
۶	۳,۳۳	۳,۸۸	۰,۱۸	۴,۸۹	۰,۳۵	۰,۱۸
۷	۳,۷۰	۴,۷۸	۰,۲۲	۴,۵۵	۰,۴۶	۰,۲۱
۸	۲,۱۹	۴,۱۱	۰,۳۹	۴,۶۱	۰,۴۲	۰,۱۷
۹	۲,۸۱	۴,۰۶	۰,۴۴	۴,۷۷	۰,۷۸	۰,۱۵
۱۰	۲,۴۳	۳,۵۵	۰,۹۶	۴,۳۶	۰,۵۹	۰,۳۵
۱۱	۲,۳۹	۳,۱۸	۰,۰۲	۴,۳۹	۰,۹۶	۰,۳۲
۱۲	۱,۹۵	۳,۲۶	۰,۴۰	۴,۴۴	۰,۹۰	۰,۳۸
۱۳	۱,۸۶	۴,۰۵	۰,۳۱	۴,۲۹	۰,۰۶	۰,۴۱
۱۴	۱,۹۲	۴,۰۹	۰,۳	۰,۰۵	۰,۱	۰,۵۰
۱۵	۲,۶۳	۴,۱۱	۰,۲۳	۰,۱۱	۰,۰۹	۰,۴۶
۱۶	۲,۸۱	۳,۹۶	۰,۱۳	۰,۲۱	۰,۱۱	۰,۴۹
۱۷	۳,۳۵	۳,۶۲	۰,۱۷	۰,۲۵	۰,۱۸	۰,۵۶
۱۸	۳,۴۴	۳,۳۵	۰,۳۳	۰,۱۵	۰,۲۵	۰,۴۹
۱۹	۳,۰۲	۳,۴۵	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۳۴	۰,۷۶
۲۰	۲,۵۰	۳,۴۰	۰,۶۰	۴,۹۶	۰,۲۷	۰,۹۱
۲۱	۲,۱۱	۳,۶۳	۰,۷۳	۴,۹۲	۰,۵۰	۰,۸۵
۲۲	۲,۶۲	۴,۲۲	۰,۷۷	۴,۹۸	۰,۶۲	۰,۸۱
۲۳	۳,۱۸	۳,۵۵	۰,۸۰	۴,۸۸	۰,۶۶	۰,۹۷
۲۴	۱,۷۳	۳,۶۴	۰,۸۵	۴,۳۹	۰,۶۰	۰,۰۱
۲۵	۳,۱۳	۳,۷۸	۰,۹۱	۴,۷۵	۰,۵۸	۰,۳۲
۲۶	۴,۴۲	۳,۱۱	۰,۹۹	۴,۹۹	۰,۷۱	۰,۰۹
۲۷	۴,۰۳	۳,۲۶	۰,۸۴	۰,۱۰	۰,۹۵	۰,۹۶
۲۸	۴,۶۰	۲,۹۸	۰,۸۸	۰,۱۴	۰,۹۳	۰,۹۲
۲۹	۴,۲۱	۴,۱۶	۰,۹۵	۰,۰۲	۰,۰۵	۰,۶۲
۳۰	۲,۰۹	۴,۰۴	۰,۹۶	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۰۶
۳۱	۱,۹۶	۴,۳۲	۰,۳۹	۰,۰۵	۰,۱۱	۰,۰۲
۳۲	۱,۸۸	۴,۳۸	۰,۴۶	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۹۰
۳۳	۱,۹۱	۴,۴۵	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۰۴	۰,۱۳
۳۴	۳,۴۰	۴,۵۰	۰,۶۴	۰,۸۲	۰,۰۲	۰,۰۱

ادامه‌ی جدول .۵

۰,۹۲	۷,۵۹	۴,۹۲	۰,۱۱	۴,۶۴	۱,۸۷	۳۵
۰,۶۹	۷,۵۶	۴,۳۶	۰,۱۶	۴,۶۸	۲,۸۰	۳۶
۰,۳۶	۷,۶۳	۴,۲۱	۰,۲۲	۴,۷۰	۲,۷۶	۳۷
۰,۳۴	۶,۳۲	۴,۲۵	۰,۰۰	۴,۲۲	۲,۷۷	۳۸
۰,۲۰	۶,۵۸	۴,۲۸	۰,۰۳	۴,۳۲	۲,۸۵	۳۹
۰,۲۹	۶,۴۶	۴,۳۳	۰,۱۱	۴,۷۸	۲,۸۸	۴۰
۰,۲۱	۶,۴۹	۴,۱۶	۰,۱۶	۴,۹۶	۲,۱۱	۴۱
۰,۱۸	۶,۵۹	۴,۴۶	۴,۴۴	۰,۱۰	۲,۱۹	۴۲
۰,۴۶	۶,۴۱	۴,۴۹	۴,۴۹	۰,۱۹	۲,۳۴	۴۳
۰,۳۹	۶,۱۱	۴,۲۸	۴,۰۵	۰,۱۷	۲,۳۹	۴۴
۰,۱۴	۰,۹۵	۴,۳۵	۴,۰۹	۰,۲۳	۲,۰۱	۴۵
۰,۰۲	۶,۰۶	۴,۷۴	۰,۴۱	۰,۱۴	۱,۲۸	۴۶
۰,۶۶	۰,۹۰	۴,۱۶	۰,۴۶	۴,۱۰	۲,۳۱	۴۷
۰,۱۱	۰,۷۸	۴,۱۹	۰,۰۲	۴,۷۶	۳,۴۵	۴۸
۰,۱۹	۰,۸۶	۴,۱۲	۰,۰۹	۴,۴۴	۳,۱۸	۴۹
۶,۲۳	۰,۳۲	۴,۹۴	۰,۷۹	۴,۳۹	۴,۰۴	۵۰
۶,۳۶	۰,۳۶	۴,۹۹	۰,۱۴	۴,۶۷	۲,۲۳	۵۱
۶,۶۰	۰,۳۹	۴,۰۹	۰,۱۹	۴,۷۵	۲,۴۴	۵۲
۶,۰۲	۰,۴۴	۴,۶۵	۰,۹۲	۴,۸۲	۲,۹۶	۵۳
۶,۴۶	۰,۲۶	۴,۷۱	۴,۰۰	۴,۶۴	۲,۳۳	۵۴
۰,۹۵	۰,۲۹	۴,۱۸	۴,۰۶	۴,۴۰	۲,۱۹	۵۵
۰,۹۱	۶,۱۱	۴,۳۱	۴,۶۱	۴,۱۶	۳,۱۸	۵۶
۰,۹۰	۶,۲۶	۴,۳۵	۴,۶۷	۳,۷۶	۳,۲۵	۵۷
۰,۸۰	۶,۳۱	۴,۳۶	۴,۷۳	۳,۵۷	۲,۶۱	۵۸
۰,۷۵	۶,۳۵	۴,۴۴	۴,۷۸	۳,۲۲	۲,۶۴	۵۹
۰,۷۳	۰,۲۵	۴,۴۱	۴,۱۲	۳,۵۶	۱,۳۶	۶۰
۰,۴۵	۰,۱۸	۴,۷۲	۴,۳۶	۳,۴۹	۱,۹۶	۶۱
۰,۴۹	۰,۱۰	۴,۶۲	۴,۴۲	۳,۳۲	۱,۸۵	۶۲
۰,۰۱	۰,۲۱	۴,۶۳	۴,۴۴	۳,۷۱	۲,۲۲	۶۳
۰,۱۹	۰,۲۵	۴,۶۹	۴,۰۵	۳,۱۹	۳,۱۶	۶۴
۶,۲۴	۶,۰۲	۴,۶۹	۰,۱۱	۴,۰۹	۲,۶۷	میانگین
۴,۸۸						میانگین کل

جدول ۶. شاخص قابلیت اعتماد در ۶۴ حالت با درنظر 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	۲,۴۴	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	۲,۴۲	۴,۱۴	۳,۸۵
۲۲	۱,۶۱	۲,۴۱	۲,۵۸	۲,۵۴	۴,۲۱	۳,۸۳
۲۳	۱,۹۵	۲,۱۳	۲,۱۴	۲,۴۹	۴,۲۳	۳,۹۲
۲۴	۱,۰۶	۲,۱۸	۲,۰۴	۲,۲۴	۴,۲۰	۳,۸۹
۲۵	۱,۹۰	۲,۱۶	۲,۱۹	۲,۳۰	۴,۱۹	۴,۰۷
۲۶	۲,۷۱	۱,۸۶	۲,۲۴	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	۲,۰۰	۲,۳۵	۴,۱۷	۳,۴۸
۳۴	۲,۰۴	۲,۶۹	۲,۰۵	۲,۴۶	۴,۱۵	۳,۴۱

ادامه‌ی جدول ۶

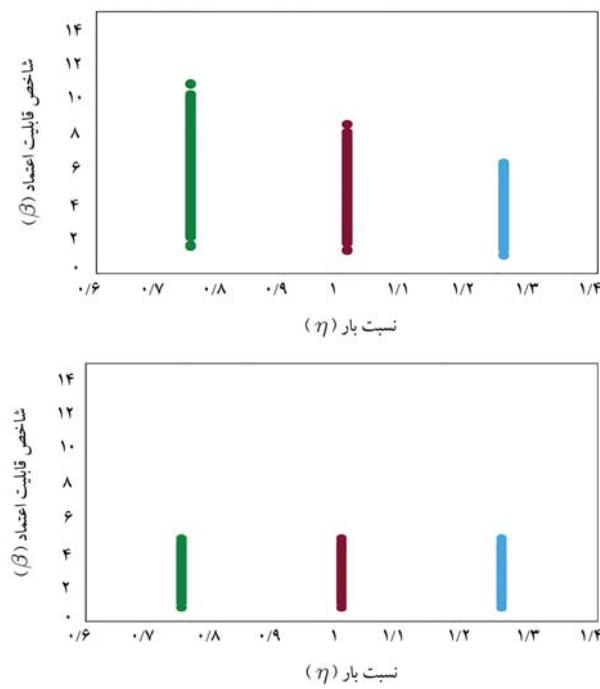
۳,۴۱	۴,۱۵	۲,۴۶	۳,۰۵	۲,۶۹	۲,۰۴	۳۴
۳,۳۶	۴,۱۹	۲,۰۱	۲,۷۰	۲,۵۶	۱,۱۱	۳۵
۳,۲۳	۴,۱۸	۲,۲۲	۲,۷۹	۲,۴۹	۱,۷۲	۳۶
۳,۰۵	۴,۲۲	۲,۰۵	۲,۸۲	۲,۸۱	۱,۶۹	۳۷
۳,۰۰	۳,۵۷	۲,۱۷	۲,۶۱	۲,۵۳	۱,۷۰	۳۸
۲,۹۲	۳,۷۲	۲,۱۸	۲,۶۶	۲,۵۹	۱,۷۵	۳۹
۳,۰۱	۳,۶۵	۲,۲۱	۲,۷۶	۲,۸۶	۱,۶۵	۴۰
۲,۹۶	۳,۶۷	۲,۰۴	۲,۷۹	۲,۹۰	۱,۲۹	۴۱
۲,۹۴	۳,۷۲	۲,۲۸	۲,۴۰	۳,۰۱	۱,۳۴	۴۲
۳,۱۰	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	۲,۰۵	۳,۰۲	۲,۶۱	۱,۹۵	۴۹
۳,۰۴	۲,۹۲	۲,۰۲	۳,۰۲	۲,۵۸	۲,۴۸	۵۰
۳,۶۱	۲,۹۵	۲,۰۱	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
۳,۰۷	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	۲,۰۲	۲,۲۵	۱,۹۲	۵۷
۳,۲۳	۳,۴۷	۲,۱۴	۲,۴۸	۲,۰۸	۱,۶۰	۵۸
۳,۱۸	۳,۴۹	۲,۲۷	۲,۰۸	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						کل

قابلیت اعتماد بتا با افزایش نسبت بار زنده به بار مرده برای حالت بدون درنظر گرفتن ضریب مدل نیز کاملاً مشخص است و یک روند کاهشی بهخصوصی در نمودار مخصوص آن مشاهده می‌شود. این در حالی است که با درنظرگرفتن ضریب بار، روند خاصی مشاهده نمی‌شود و بازه‌ی تغییرات شاخص بدون توجه به مدل مقدار یکنواختی را نشان می‌دهد. این نتیجه با توجهی حاصل از مطالعه‌ی ونگ و الینگوود<sup>[۱۶]</sup> (۲۰۱۵)، مطابقت دارد.<sup>[۲۱]</sup>

## ۶. نتیجه‌گیری

چوب به عنوان یکی از قدیمی‌ترین مصالحی است که همواره در ساخت و سازها، استفاده شده است و با وجود کاربرد گسترده و ویژگی‌های منحصر به فرد آن، نقاط ضعفی مانند رفتار نسبتاً ترد بهخصوص در خمش دارد. برای بهبود عملکرد چوب و همچنین یکی از راهکارها به منظور مقاوم سازی سازه‌های 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 آن‌ها، افزایش مقاومت و شکل‌بندی در قطعات سازه‌یی را مشاهده کرد.

در پژوهش حاضر، محدود مدل‌هایی که در استفاده از سیستم چوب - FRP موجود بوده است، جمع‌آوری 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  $1/5$ ،  $1/25$  و  $1/75$  در تابع بارگذاری طراحی قطعه در نظر گرفته شده است. آنچه در طی پژوهش حاضر بدست آمده است، این است که در فرایند طراحی قطعات مقاوم سازی شده با FRP، عدم قطعیت‌ها تأثیر شکری در قابلیت اعتماد مدل‌های موجود دارند. به طوری که میانگین شاخص قابلیت اعتماد تمامی ۶ مدل موجود، از  $1/88$  در حالت بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت به  $2/71$  با درنظر گرفتن عدم قطعیت کاهش یافته است. از میان ۵ مدل موجود ارائه شده در مطالعات پیشین، مدل پالیزی و توفیق<sup>[۲۰]</sup> (۲۰۲۲)، با میانگین شاخص قابلیت اعتماد  $3/61$  بهترین مدل پیشنهادی است که شاخص آن با شاخص مدل‌های موجود طراحی سازه‌یی 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 قطعیت‌های ذاتی یا شناختی می‌توانند در فرایند تحلیل سیستم چوب - FRP در مطالعات آتی مورد نظر باشد.



شکل ۵. شاخص قابلیت اعتماد در برایر تغییرات نسبت بارگذاری.

با  $6/24$  در رتبه‌ی دوم قرار گرفت. در حالی که اگر به داده‌های جدول دقت شود، پراکنندگی داده‌های هر تحلیل بسیار زیاد نیست و در یک محدوده‌ی مشخصی برای مدل اخیر قرار دارند. این در حالی است که در مدل‌های ۱ الی ۴، اختلاف بین تابع هر تحلیل با یکدیگر زیاد است. با اعمال عدم قطعیت در مدل، همان‌طور که انتظار می‌رفت، شاخص قابلیت اعتماد بتا کاهش یافته و میانگین آن برای هر ۶ مدل به  $2/71$  رسیده است. بنا براین می‌توان دریافت که در نظر نگرفتن عدم قطعیت در یک مدل طراحی می‌تواند نتایجی بسیار نامناسب را در پی داشته باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 قبل از تعریف شده بود، مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، سه نسبت بار  $1/5$ ،  $1/25$  و  $1/75$  ارائه شده است. مطابق شکل اخیر می‌توان دریافت که با درنظر گرفتن ضریب مدل، تراز شاخص قابلیت اعتماد بدون توجه به مدل‌های طراحی، بسیار یکنواخت‌تر شده است. کاهش ضریب

## پانوشت‌ها

1. fiber reinforced polymer (FRP)
2. Wan
3. Raftery
4. Richter & Steiger
5. Kliger
6. setup
7. wet layup
8. American concrete institute (ACI)
9. Kaiser & Karbhari
10. Wieghaus & Atadero
11. Zhang
12. normal Distribution
13. lognormal Distribution
14. weibull distribution
15. Hasofer & Lind

16. Wang & Ellingwood

## منابع (References)

16. Wang & Ellingwood

## مراجع (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).

- گزینه های  
نتیجه گیری
30. Ozkul, Z.H. and Baykal, G. "Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(7), pp. 767-781 (2007).
  31. Raftery, G.M. and Harte, A.M. "Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate", *Composites Part B: Engineering*, **42**(4), pp. 724-735 (2011).
  32. Biscaia, H.C., Chastre, C., Borba, I.S. and et al. "Experimental evaluation of bonding between CFRP laminates and different structural materials", *Journal of Composites for Construction*, **20**(3), pp. 04015070 (2016).
  33. Benedetti, A. and Colla, C. "Strengthening of old timber beams by means of externally bonded reinforcement", *In World Conf. on Timber Engineering, WCTE2010*, Trentino, Italy (2010, June).
  34. Juvandes, L.F.P. and Barbosa, R.M.T. "Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems", *Strain*, **48**(2), pp. 124-135 (2012).
  35. Vahedian, A., Shrestha, R. and Crews, K. "Effective bond length and bond behaviour of FRP externally bonded to timber", *Construction and Building Materials*, **151**, pp. 742-754 (2017).
  36. Palizi, S. and Toufigh, V. "Bond strength prediction of FRP-timber under standard and acidic/alkali environmental conditions based on gene expression programming", *European Journal of Wood and Wood Product*, **80**(6), pp.1457-1471 (2022).
  37. Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. "Characterisation of model uncertainties for laterally loaded rigid drilled shafts", *Geotechnique*, **55**(1), pp. 45-54 (2005).
  38. Wang, N., Ellingwood, B.R. and Zureick, A.H. "Reliability-based evaluation of flexural members strengthened with externally bonded fiber-reinforced polymer composites", *Journal of Structural Engineering*, **136**(9), pp. 1151-1160 (2010).
  39. Shi, J., Wu, Z. and et al. "Reliability analysis of intermediate crack-induced debonding failure in FRP-strengthened concrete members", *Structure and Infrastructure Engineering*, **11**(12), pp. 1651-1671 (2015).
  40. Hasofer, A.M. and Lind, N.C. "Exact and invariant second-moment code format", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **100**(1), pp. 111-121 (1974).
  41. Wang, N. and Ellingwood, B.R. "Limit state design criteria for FRP strengthening of RC bridge components", *Structural Safety*, **56**, pp. 1-8 (2015).

## \* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوستونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تسامی معادلات، علامت ریاضی، رابطه‌ها الزاماً فقط در محیط Mathtype) ارائه شود و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنمایی سایت مجله ایمپکت http://journal.sharif.ir به دفتر مجله ارسال شود.

\* ضمن معرفی نویسنده مسؤول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کالیه نویسنده‌گان قید شود.

\* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسمی نویسنده‌گان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کالیه نویسنده‌گان، 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، نظری مقدمه، عنوانی 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.

\* کلیه‌ی عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل‌ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

**نکته:** از آنجاکه مطالب مجله در ستون‌های ۸/۵ سانتی‌متری آراسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی‌متر با خصامت کادر ۸px و خط نمودار ۶px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 با پسوند Tif یا JPG است.

\* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متدالو 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 کالیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کاترور (فشار، سرعت، تنفس...) 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.

\* کلیه‌ی منابع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به طور مسلسل)، و در متن مقاله در داخل کروشه [ ] مشخص شود. در بعض مراجع کالیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انها واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, 4(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The perforation of circular plat with four sided pyramidal - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

## راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی



مجله‌ی علمی و پژوهشی «شرف» 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 اعیان سطح داشن 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 بدین در زمینه‌ی های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛  
مقالات‌های ارائه شده در کفاراس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفت، دارای یکی از مشخصات زیر:

- ۱.۲. با تقدیم و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به تابع تازیمی 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 بر جسته‌ی علمی و فنی باشند.

## 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.

**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°C and 700°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.

## INVESTIGATING AND COMPARING 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

## 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 MULTIQUADRIC MESH-LESS METHOD FOR ANALYZING THE DYNAMIC INTERACTION OF DAM-RESERVOIR-FOUNDATION PROBLEMS

**R. Babaee**

r.babaee@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 meshless 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. Ardestir-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

**3.1**

## Civil Engineering

**Sharif**

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**  
**E-mail: 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. Ardestir-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 MULTINUQUADRIC MESH-LESS METHOD FOR ANALYZING THE DYNAMIC INTERACTION OF DAM-RESERVOIR-FOUNDATION PROBLEMS**  
R. Babaee, 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**