



مقالات پژوهشی:

- ارزیابی ظرفیت باربری قالب و نشت یک‌های پاک مستقر بر ماسه‌ی انباع
سید آزاده‌نیا، عباس‌حسین خادم و سید محمدحسین خاتمی
- امکان‌سنجی بهبود ارزش پرورزهای عمرانی بزرگ مکانیک با استفاده از تلقیق مهندسی ارزش و مدل پیش‌بینی استنتاج فازی
علی‌اکبریان، روزان‌علی‌پور، علی‌پايدار و سعید کاشانی
- نمط‌گذاری آزمایشگاهی اثر افزون‌الایاف شیشه در یعنی پودری و آکتشی‌پدیر
علی‌حسیری و فردی‌نادری شورانی
- تحلیل و تقویت اصلی ابر به سوتون یعنی آرمی کناری با در نظر گرفتن نیروی محوری متغیر در سوتون
سید محمدحسین سیاوش و محمد رضا اسفهانی
- پروسی شندیدگانهای متغلوب به عواین مواعظ باری کاهش امواج لرزه‌ی سطحی با استفاده از توری بلخ - فلوكه
شیخ‌الشیخ رضا رفیعی‌دهخوارانی
- نمط‌گذاری عددي تأثیر ندنسه سطوح جداری گروه شمع‌های مخروطی با مقاطع دائروی و مربعی در ظرفیت باربری محوری
فکاری و پرسی پارده‌ی گروه
- غیرضا شعابی و مسعود قلابی
- کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه مهک با بهره‌گیری از سیستم کنترل نیمه‌فعال و کنترل کننده فازی خودتنظیم
سجاد ابریشمی، عباس‌کرمانی و محمد رضا اکبرزاده نوین‌پور

پادداشت فنی:

- تثبیت اثر زیرساخت‌های مدیریت دانش از طریق فرایندهای مدیریت دانش در عملکرد تیمهای موقت در پروژه
سمیرا دهقانی، هایی اربابی و محمدحسین سبیله

ARTICLES:

- Evaluation of the Vertical Bearing Capacity and Settlement of Bucket Foundation in Saturated Sand
S. Aghedadsaz, A. Haddad and S.M.H. Khatami
- Feasibility Study on Promoting the Value of Large-Scale Construction Projects Using the Combination of Value Engineering and the Anfis Method
A. Tajaddod, P. Aalipour, A. Paydar and S. Kashani
- Laboratory Study of the Effect of Adding Glass Fibers on Reactive Powdered Concrete
A. Heidari and F. Naderi Shourabi
- Analysis and Strengthening of RC Exterior Beam-Column Joints Considering Column Axial Force Variation
S. Ziaaghagh and M. Esfahani
- Investigation of Periodic Resonators as Wave Barriers for Mitigating Surface Seismic Waves Using Bloch-Floquet Theory
Sh. Amanat and R. Rafiee-Dekharghani
- Numerical Investigation of the Effect of Shaft Surface Geometry of Tapered Pile Group with Circular and Square Cross-Sections on Bearing Capacity and Group Efficiency Inquiry
A. Shabanpour and M. Ghazavi
- Seismic Control of Benchmark Highway Bridge Using Semi-Active Control System and Self-Tuning Fuzzy Controller
S. Abriahami, A. Karamoddin and M.R. Akbarzadeh Tolouei

RESEARCH NOTES:

- The Effect of Knowledge Management Infrastructure through Knowledge Management Processes on the Performance of Temporary Teams in the Project
S. Dehghani, H. Arabi and M.H. Sobhiyeh

هیأت تحریریه‌ی تخصصی

• سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احمد ابریشم‌چی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانی‌چی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افشار

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخورداری

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تیریشی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و ابریزی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسینی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حسن حاجی کاظمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سید‌محمد بن حائری

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیرضا خوبی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیانپور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سید‌مهدی زهرابی

دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمد‌مهدی سعادت‌پور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان

دکتر ناصر طالب بیدختی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمد تقی کاظمی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاره

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سید‌محمد‌الدین میر‌محمد‌حسینی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سید‌شهاب الدین یثربی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

هیأت مشاوران

دکتر محمد‌حسین امین‌فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر ابراهیم افسردویج

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان

دکتر علیرضا باقری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر عباس پور‌دلیلی چوگانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه دامغان

دکتر شاهین دبیریان

دانشکده‌ی معماری و شهرسازی - دانشگاه هنر اصفهان

دکتر علی درخشانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شاهد

دکتر رسول دانشفرار

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مرااغه

دکتر حمید رحمنی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر فریدون رضماجی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی سینا

دکتر عبدالحسین حداد

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه سمنان

دکتر مهدی سلیمانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه اراک

دکتر مازیار فهیمی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه مرااغه

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر محمد‌حسین مجמודی ساری

دانشکده‌ی مهندسی عمران و شهرسازی - دانشگاه هنر تهران

دکتر حسن مقدم

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسین نقاش طوسی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

مطلوب این شماره

مقالات پژوهشی:

- ۳ ارزیابی ظرفیت باربری قائم و نشستت پی‌های باکت مستقر بر ماسه‌ی اشیاع سعید آقاداداشی، عبدالحسین حداد و سید محمدحسین خاتمی
- ۱۳ امکان‌سنجی بهبود ارزش پژوهه‌های عمرانی بزرگ مقیاس با استفاده از تلفیق مهندسی ارزش و مدل پیش‌بینی استنتاج فازی عباس تاج‌الدینی، پروین عالی‌پور، علی پایدار و سعید کاشیان
- ۲۵ مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر افزودن الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر علی حیدری و فرید نادری شورابی
- ۳۷ تحلیل و تقویت اتصال تیر به ستون بتون آرمه‌ی کتاری با در نظر گرفتن نیروی محوری متغیر در ستون سید محمد سعید ضیالحق و محمد رضا اصفهانی
- ۵۳ بررسی تشدیدکننده‌های متناوب به عنوان موانع موج برای کاهش امواج لرزه‌بی سطحی با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه شهاب امانت، رضا رفیعی دهخوارانی
- ۶۱ مطالعه‌ی عددی تأثیر هندسه‌ی سطوح جداری گروه شمع‌های مخروطی با مقاطع دایروی و مربعی در ظرفیت باربری محوری فشاری و بررسی بازدهی گروه علیرضا شعبانپور و محمود قضاوی
- ۷۳ کنترل لرزه‌بی پل بزرگراه محک با بهره‌گیری از سیستم کنترل نیمه‌فعال و کنترل‌کننده‌ی فازی خود تنظیم سجاد ابریشمی، عباس کرم‌الدین و محمد رضا اکبرزاده توتونچی

یادداشت فنی:

- ۸۵ تبیین اثر زیرساخت‌های مدیریت دانش از طریق فرایندهای مدیریت دانش در عملکرد تیم‌های موقت در پژوهه سعیدا دهقانی، هانی اربابی و محمدحسین صبیحیه

ضمائمه:

چکیده مقالات به انگلیسی

۱۰۳

ارزیابی ظرفیت باربری قائم و نشست پی‌های باکت مستقر بر ماسه‌ی اشبع

سعید آفادادشی (کارشناس ارشد)

عبدالحسین حداد* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

سید محمدحسین خانمی (مدرسی)

گروه هندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ی، تهران

مهمنگی عمران شرف، (زمین‌شناسی ۱۴۰) دری ۳ - ۲، شماره ۱/۳، ص. ۱۱۳ - ۱۰۷ (پژوهشی)

نیاز روزافزون به انرژی‌های نو در جهان و گسترش ساخت‌وسازهای موردنیاز در این رابطه در مناطق فراساحلی به منظور دستیابی به انرژی‌های نو، مانند انرژی باد، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. یکی از انواع پی‌هایی که برای احداث سازه‌های فراساحلی استفاده می‌شود، پی‌باکت یا سطحی است. مطالعه و بررسی ارتباط بین نیروی قائم وارد بر پی و جایه‌جایی قائم در اندرکشش خاک و پی ضروری است. در نوشتار حاضر، پی‌ها تحت بارگذاری قائم در خاک اشبع قرار گرفته‌اند. با مطالعه بر روی رفتار پی‌باکت و پی سطحی مشخص شد که ظرفیت باربری پی‌باکت تا بیش از دو برابر پی سطحی قابل دستیابی است. با افزایش دامنه‌ی پی‌باکت، ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند. افزون بر آن، با افزایش فشار آب منفذی ظرفیت باربری پی‌باکت و سطحی به یک نسبت کاهش می‌یابد. نتایج نشان داده است که عملکرد پی‌باکت مستقر بر خاک در شرایط روانگرایی در مقایسه با پی سطحی بهتر است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری قائم، پی‌های باکت، ماسه‌ی اشبع، سازه‌های فراساحلی.

۱. مقدمه

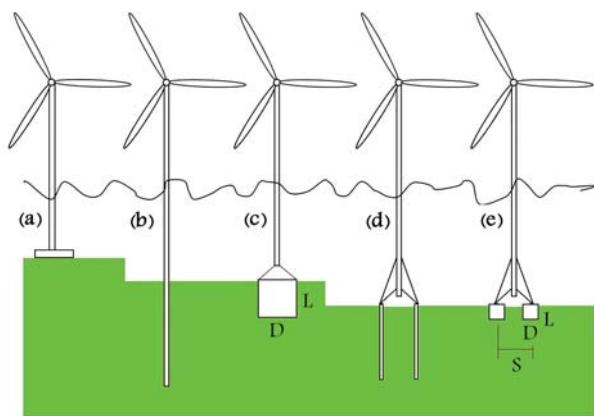
نصب کرد و نسبت به شمع‌ها به دلیل صرفه‌جویی قابل توجه که در مصالح مصرفی و زمان لازم برای اجرا دارد، ترجیح داده می‌شود. آنها همچنین با طبیعت بسیار سازگارتر هستند و به شیوه‌یی مشابه همان روش نصب می‌شوند؛ ولی با اعمال فشار در جهت عکس مکش اولیه، می‌توان آنها را برجیم. همچنین صندوقه‌ی مکشی را می‌توان با هر ابعادی و با هر ترکیبی (تعداد و چیزش دلخواه) اجرا کرد، که در نتیجه‌ی می‌توان سختی و ظرفیت پیچشی موردنظر را تولید کرد. به دلایل مذکور، پژوهشگران بسیاری بر مطالعه‌ی صندوقه‌های مکشی تمرکز کرده‌اند.^[۱] برخی از موارد کاربرد سیستم‌های پی کم‌زدایی فراساحلی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

در ابتدا، صندوقه‌های مکشی به طور وسیعی برای سکوهای نفت و گاز به عنوان نگهدارنده‌ی سکوهای شناور و یا تکیه‌گاهی برای زاکت‌ها استفاده می‌شوند. در طول دهه‌ی گذشته، به پی‌های باکتی تک‌پایه به عنوان پی مناسب برای توربین‌های دریایی توجه شده است. در نوامبر ۲۰۰۲، اولین پی‌باکتی برای استفاده در توربین بادی در یک تأسیسات آزمایشی فراساحلی در فردریکشان^۱ در بخش شمالی دانمارک نصب شده است.^[۲] پی‌باکتی مکشی، شامل یک استوانه‌یی جدار نازک با قطر D، زرفاوی دامنه‌ی L و ضخامت جداره‌ی t با رویه‌یی بسته و انتهای باز است، که تحت اثر وزن خود و مکش اعمالی به داخل بستر دریا نفوذ می‌کنند. بخش

پی‌باکت در سازه‌های ساحلی و فراساحلی به دلیل ظرفیت باربری قابل توجه آن و رفتارش در برابر بارهای جانبی نسبت به سایر انواع پی‌های سطحی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. پی‌باکت، که بسته به کاربرد و ابعاد آن، شمع مکشی، شالوده‌ی سطلی، مهارمکشی و یا شالوده‌ی حاشیه‌یی نیز خوانده می‌شود، یک نمونه از پی‌های سطحی است، که با این‌که پیدا شدن اولیه‌ی مفهوم آن به اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی بر می‌گردد، به دلیل نیاز کمی که در آن زمان به پی‌باکت بوده است، عملاً مطالعه و استفاده از آنها از آغاز دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی صورت جدی به خود گرفته است. استفاده از پی‌های باکت به دلیل مزایایی که نسبت به سایر انواع پی‌ها دارند، به سرعت در حال افزایش بوده و به جای شمع‌های معمولی استفاده شده‌اند. پی‌باکت، استوانه‌یی فلزی توانالی با قطر زیاد است، که از پایین باز و از بالا توسط ورقه‌یی مسطح و یا گشیدی‌شکل، بسته است. همان گونه که از نامشان پیدا است، با اعمال مکش مختص‌صری از درون آنها و پس آب درون آنها به بیرون، در حالی که به اندازه‌ی کافی آب بندی شده باشند، نصب می‌شوند. این سیستم جدید پی سازه‌های دریایی را می‌توان در کمتر از یک روز

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۲۳ اکتبر ۱۴۰۰، اصلاحیه ۱۳۶۱، پذیرش ۲۰ اکتبر ۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.58608.2986



شکل ۱. انواع گوناگون پیهای توربینهای بادی فراساحلی با اعماق گوناگون آب.

آمریکا (API)، فونداسیون‌های باکتی تحت بارگذاری جانبی را پوشش نمی‌دهند؛ بنابراین، اندرکنش خاک - سازه و رفتار آنها باید با استفاده از الگوسازی عددی ارزیابی شود (عبدالرحمان و همکاران ۱۱۰۲).^[۷] در حالت بارگذاری قائم، فرض می‌شود که فونداسیون باکتی مشابه با فونداسیون دایره‌ی فرو رفته عمل می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که خاک محصور شده داخل باکت مشابه یا نزدیک به یک توده‌ی فشرده‌ی صلب عمل کند. دامنه‌ی فونداسیون باکتی، که به طور جانبی خاک زیر فونداسیون را احاطه می‌کند، از ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ زیر باکت جلوگیری می‌کند.

کسیدی و همکاران (۲۰۰۲)، هولسپی و کسیدی (۲۰۰۲) و کسیدی (۲۰۰۷) یک مدل رفتاری خمیری سخت‌شونده برای رفتار پیهای دایره‌ی صلب روی ماسه‌ی کربناتی سست ارائه کرده‌اند. این مدل رفتاری برآیند نیروهای قائم، لنگر و افقی و جابه‌جایی‌های متناظر پیه را ترکیب می‌کرد و پاسخ ایجاد شده برای هر ترکیب بار و جابه‌جایی را پیش‌بینی می‌کرد.^[۸-۱۰] کلی ۵ و همکاران (۶۰۰۲) آزمایش‌های آزمایشگاهی با اعمال بارهای قائم و لنگر به صندوقه‌های مکشی قرار گرفته در ماسه و رس، برای شبیه‌سازی مجموعه‌های معادل آزمایش‌های میدانی انجام داده‌اند. صندوقه‌های استفاده شده در آزمایشگاه قطرهای ۱۵/۰، ۰/۲ و ۰/۳ متر داشته و نتایج آزمایش‌ها به شکل داده‌های بی‌بعد ارائه شده است.^[۱۱] باری ۴ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۲] نیز ظرفیت باربری پیهای باکتی را برای استفاده در توربین‌های بادی ساحلی به صورت فیزیکی و عددی بررسی و بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی شده، روابطی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ارائه کردند و دریافتند که مقدار تغییر شکل، تأثیر بهسزایی در رابطه‌ی بین ظرفیت باربری و چگالی نسبی دارد. همچنین ظرفیت باربری بر روی خاک با مقاومت یکنواخت مدل شده‌اند، داشته و به صورت پیه صلب بر روی خاک در رفتار پیهای باکت کمتر از انتظار است. تأثیر شرایط بارگذاری و نوع خاک در رفتار پیهای باکت توسط دینگ ۷ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۳] بررسی شده است. شبیه‌سازی‌های المان محدود نشان داده است زمانی که خاک با مقاومت بالا و ورق‌های محافظه وجود داشته باشد، رفتار پیه توسط درپوش کنترل می‌شود. در حالت دیگر، زمانی که ورق‌های محافظه وجود نداشته باشند، دیوارهای باکت، ظرفیت باربری را کنترل می‌کنند.

ایسین و همکاران (۲۰۱۴)، بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی، رفتار و ظرفیت باربری پیهای بر روی ماسه‌ی اشیاع در معرض بارگذاری ترکیبی را تجزیه و تحلیل کردند و با کالیبراسیون معيارگسیختگی و به کارگیری داده‌ها از آزمایش‌های کوچک مقایسه بر روی پیهای باکتی در معرض بارهای استاتیکی، یک معيار سخت‌شوندگی کرنش جدید را توسعه دادند و دریافتند که شکل سطح تسیلیم، سطح پتانسیل و سطح گسیختگی به نسبت ژرفای (ارتفاع دامنه به قطرا) و مسیر بار وابسته است. برای الگوهای آزمایش شده، در سطح شعاعی، جریان وابسته و در صفحات محور قائم، جریان غیروابسته مشاهده شده است.^[۱۴] پارک و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۵] نیز ظرفیت باربری قائم پیهای باکت ژرفه کرده بر روی ماسه را ارزیابی کردند و دریافتند که نسبت ضخامت به قطر پیه و زاویه اصطکاک می‌تواند تا ۷ برابر یک شمع در ظرفیت باربری پیهای باکت تأثیر بگذارد. عملکرد بلندمدت پیهای باکت به ندرت بررسی شده است. لیان و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۶] تأثیر بارهای چرخه‌ی افقی را در عملکرد پیهای باکت در بلندمدت بررسی کردند و دریافتند که بیش از ۸۰٪ دوران در پی در ۱۰° چرخه‌ی اول اتفاق می‌افتد. همچنین مقدار بسامد طبیعی در ابتدای چرخه‌ها کاهش، سپس به صورت پایدار و نهایتاً کمی افزایش می‌یابد. در حالی که میرایی ابتدا کاهش و سپس پایدار می‌شود. به

از مزایای فونداسیون‌مکشی می‌توان به قابلیت استفاده در آب‌های ژرف (۵۰ متر) (ینگ لی و همکاران ۲۰۱۶)،^[۱۶] فرایند ساخت آسان و تجهیزات نصب ساده، جابه‌جایی آسان، سادگی در نصب از طریق استفاده از مکش، اعمال فوری با، قابلیت نگهدارندگی زیاد در همه‌ی جهت‌ها، توانایی پیش‌بینی بهتر برای افرایش یافته است. همچنین درپوش باکت بیشترین سهم را در ظرفیت باربری پیهای باکت دریافت کرده است. یان ۳ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۵] نیز نشان دادند پیهای باکت ژرفه کرده بر روی ماسه، عموماً به صورت برشی دچار شکست می‌شوند. آنها در مطالعه‌ی خود، یک پیهای باکت ترکیبی متشکل از یک مکنده‌ی باکت و پی گستره را پیشنهاد دادند و دریافتند که پیهای پیشنهادی، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به پیهای معمولی دارد.

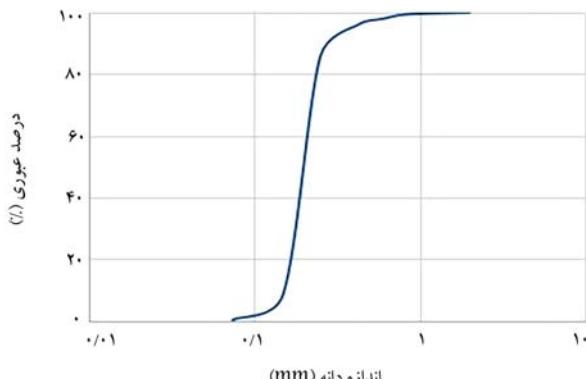
از مزایای فونداسیون‌مکشی می‌توان به قابلیت استفاده در آب‌های ژرف (۵۰ متر) (ینگ لی و همکاران ۲۰۱۶)،^[۱۶] فرایند ساخت آسان و تجهیزات نصب ساده، جابه‌جایی آسان، سادگی در نصب از طریق استفاده از مکش، اعمال فوری با، قابلیت نگهدارندگی زیاد در همه‌ی جهت‌ها، توانایی پیش‌بینی بهتر برای افرایش یافته است. همچنین زیاد است و میزان ظرفیت باربری در برایر بار افقی در نتیجه‌ی مقاومت دامنه‌ی غلاف محیطی اشاره کرد. این فونداسیون‌های مکشی در مقایسه با فونداسیون‌های شمعی سنتی، موجب صرف‌جویی به میزان نصف وزن فولاد می‌شوند. نصب آنها آسان‌تر است و هنگام خراب شدن توربین بادی به آسانی برچیده می‌شوند. در مقایسه با شمع‌ها، که مشکلات اجرایی در بردارند و نیاز به ماشین‌های کوشش شمع دارند، فونداسیون‌های مکش فقط نیاز به یک دستگاه پمپاژ نسبتاً ساده دارند، تا آب را به خارج از محافظه‌ی فونداسیون پمپاژ کنند. به عنوان مثال، یک فونداسیون باکتی با قطر ۲ متر و ارتفاع ۳ متر، با استفاده از یک پمپ، فقط ظرف مدت ۱ تا ۳ ساعت نصب می‌شود. از مزایای دیگر فونداسیون باکتی، بسیج کردن باربری انتهایی معکوس یا مکش مقاوم در برایر نیروی بالابرند است. روش‌های طراحی معمول مطابق آینه‌نامه‌ی مؤسسه‌ی نفت



شکل ۳. مدل‌های پی باکت استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر.



شکل ۴. قاب باگذاری.



شکل ۵. دانه‌بندی ماسه‌ی بابلسر.

جدول ۱. مشخصات شاخصی ماسه‌ی بابلسر.

e_{max}	e_{min}	G_s	$D 50\text{ (mm)}$	C_u
۰/۸۰۴	۰/۵۷۳	۲/۷۳	۰/۲۴	۱/۸

۲. ماسه‌ی مصرفی

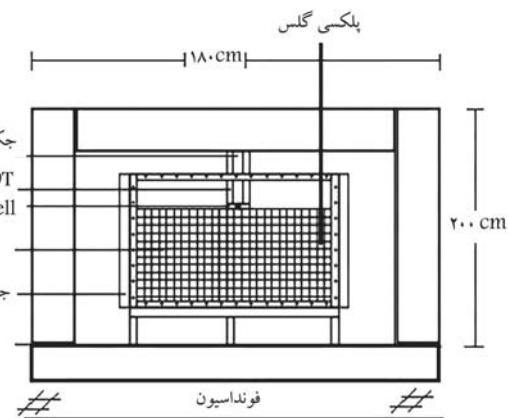
۱.۲. تجهیزات و ابزار آزمایش

برای انجام آزمون‌ها، یک جعبه‌ی آزمایش به طول ۱۲۰ سانتی‌متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر ساخته شد، که شامل: چهار قاب فلزی بود که از نیشی نمره ۵ ساخته شده بودند. سطح دو قاب 90×90 با ورق‌های فلزی به ضخامت ۲ میلی‌متر و سطح یکی از دو قاب 120×90 توسط ۱۰ میلی‌متر و سطح دیگر توسط یک ورق به ضخامت ۲ میلی‌متر پوشیده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، از یک سیستم بار استاتیکی شامل قاب و جک باگذاری استاتیکی مستقر بر قاب فولادی، جعبه‌ی آزمایش با یک وجه شفاف، ابزار اندازه‌گیری، دستگاه جمع‌آوری داده‌ها و مدل پی باکت استفاده شده است، که در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب انواع پی‌ها و قاب باگذاری نمایش داده شده‌اند.

همچنین از سه نوع ابزار اندازه‌گیری مختلف جهت محاسبه‌ی مقدار نیرو، جا به جایی و فشار آب حفره‌یی استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ۱ عدد لودسل^۸ (یا حسگر وزن) جهت اندازه‌گیری نیروی قائم، ۲ عدد LVDT^۹ جهت اندازه‌گیری نشست دو سر پی و ۵ عدد پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌یی در ارتفاع‌های مختلف زیر پی استفاده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، خاک استفاده شده، ماسه‌ی تمیز بابلسر بوده است، که بخش وسیعی از سواحل جنوبی دریای خزر را پوشانده است. ماسه‌ی بابلسر بر طبق سیستم طبقه‌بندی متحده، در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار دارد و منحنی توزیع دانه‌بندی آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. تمامی مشخصات شاخصی ماسه‌ی بابلسر در آزمایشگاه تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است:



شکل ۲. جعبه‌ی آزمایش، قاب فولادی و جک هیدرولیکی.

منظور طراحی پی‌ها، باید به دو عامل ظرفیت باربری و نشست ایجاد شده توجه کرد. هر سازه‌یی در نهایت بارهای موجود را به خاک منتقل می‌کند. از این رو تعیین ظرفیت باربری، یکی از کلیدی‌ترین گام‌های طراحی در هر نوع سازه‌یی به منظور تأمین اینمی و خدمت‌دهی است. بنا به توسعه‌ی پی‌های باکت و عملکرد مناسب آنها، لزوم تعیین ظرفیت باربری و نشست آنها بیش از پیش احساس می‌شود.

با توجه مطالعات محدود صورت پذیرفته (به وزن درون کشور)، پژوهش حاضر به تعیین رفتار پی‌های باکت اختصاص یافته است. بدین منظور آزمایش‌هایی بر روی پی‌های باکت دایره‌یی با قطرها و عمق‌های گوناگون صورت پذیرفته است، تا تأثیر آنها در ظرفیت باربری قائم، نشست، نسبت بهبود رفتار و مدول عکس العمل بسته ارزیابی شود. همچنین بررسی دقت روابط موجود برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های باکت، از دیگر اهداف پژوهش حاضر است..

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۱.۲. تجهیزات و ابزار آزمایش

در اینجا از مطالعات آزمایشگاهی در مطالعه‌ی حاضر، از یک سیستم بار استاتیکی شامل قاب و جک باگذاری استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، جعبه‌ی آزمایش با یک وجه شفاف، ابزار اندازه‌گیری، دستگاه جمع‌آوری داده‌ها و مدل پی باکت استفاده شده است، که در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب انواع پی‌ها و قاب باگذاری نمایش داده شده‌اند.

همچنین از سه نوع ابزار اندازه‌گیری مختلف جهت محاسبه‌ی مقدار نیرو، جا به جایی و فشار آب حفره‌یی استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ۱ عدد لودسل^۸ (یا حسگر وزن) جهت اندازه‌گیری نیروی قائم، ۲ عدد LVDT^۹ جهت اندازه‌گیری نشست دو سر پی و ۵ عدد پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌یی در ارتفاع‌های مختلف زیر پی استفاده شده است.

جدول ۲. ابعاد و آزمایش‌های انجام گرفته بر پی‌ها.

شماره	D (cm)	L/D	r_u
۱	۵	۰	۰
۲	۵	۰/۵	۰
۳	۵	۱	۰
۴	۱۰	۰	۰/۱
۵	۱۰	۰/۵	۰/۱
۶	۱۰	۱	۰/۱
۷	۱۵	۰	۰
۸	۱۵	۰/۵	۰
۹	۱۵	۱	۰
۱۰	۲۰	۰	۰/۱
۱۱	۲۰	۰/۵	۰/۱
۱۲	۲۰	۱	۰/۱

۴.۲. مراحل انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌های مرتبط، احتیاج به ساخت نمونه با قابلیت تکرارپذیری و ثابت ماندن مشخصات عمومی است. در اینجا، روند نمونه‌سازی و کار با جعبه‌ی آزمایش، گام‌به‌گام توضیح داده شده است:

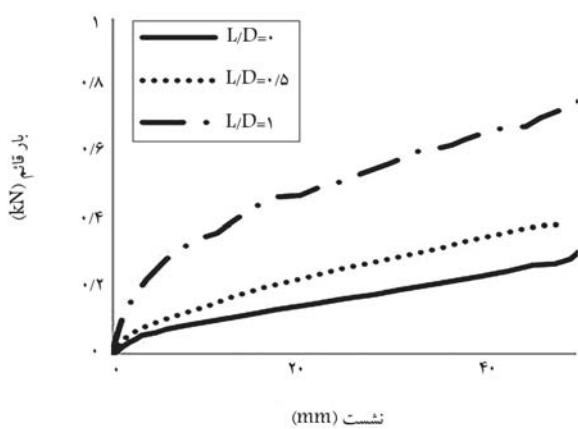
- ماسه‌ی تهیه شده از ساحل بر یک سطح تمیز و صاف زمین پخش شد، تا توسط هوا خشک شود.
- ماسه‌ی خشک شده از الک شماره‌ی ۱۶ گذرانده شد، تا مواد اضافی نظیر مواد زائد موجود در ساحل و همچنین صدف‌ها از ماسه جدا شود، تا این‌که ماسه‌ی تمیز حاصل شود.
- جعبه‌ی آزمایش زیر قاب فولادی قرارگرفت و چک هیدرولیکی توسط اتصال‌های تعییه شده بر روی تیر فولادی افقی مستحکم شد. در هنگام اتصال چک به تیر فولادی، به این نکته توجه شود که فاصله‌ی مرکز چک از دیواره‌های متناظر جعبه‌ی آزمایش به یک اندازه باشد، تا باز اعمالی در وسط سطح خاک اعمال شود. این امر توسط شاقول و متر انجام‌پذیر است.
- جعبه‌ی پیزومتر در محل مناسب نصب و ارتفاع آن نسبت به سطح مبنی، که کف جعبه‌ی آزمایش است، تنظیم شد؛ سپس، شلنگ‌های شفاف ارتباطی بین پیزومترها و خروجی‌های روی بدنه‌ی باکس متصل شدند.
- جعبه‌ی آزمایش تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از آب پر و پیزومترهای متصل هواگیری شدند. در این قسمت باید توجه شود که لوله‌ی سرریز و شیر ورودی آب از زهکش بسته باشد.
- ماسه‌ی در هوا خشک شده وزن و سپس از ارتفاع صفر سطح آب به صورت پاششی در داخل جعبه‌ی آزمایش به صورت یکنواخت پخش شد.
- روند ماسه‌ریزی به قدری ادامه یافت تا ارتفاع لایه‌ی خاک به ۱۰ سانتی‌متر برسد. لوله‌ی ارتباطی بین پیزومتر تا زیر پی از داخل جعبه‌ی آزمایش وصل و لایه‌ی بعدی ماسه ریخته شد.
- در زمان ریختن ماسه، لوله‌های ارتباطی باید در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر از کف جعبه آزمایش متصل شوند. ماسه تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از کف جعبه‌ی آزمایش ریخته و مازاد آب از سرریز تخلیه شد و محیط ماسه‌ی با تراکم حدود ۳۰٪ پدید آمد. مقدار چگالی ماسه با اندازه‌گیری وزن ماسه‌ی ریخته شده

۳.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

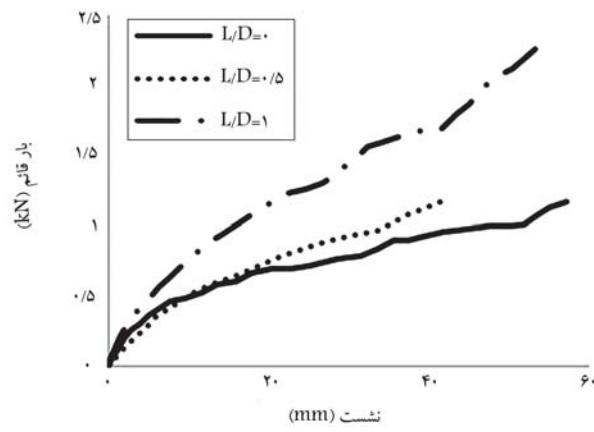
در مطالعه‌ی حاضر از نوع پی به شکل‌های باکت و سطحی با سطح مقطع دایره استفاده شده است، که ابعاد و آزمایش انجام گرفته روی آن در جدول ۲ آرایه شده است؛ که در آن، به ترتیب ردیف شماره‌ی آزمایش، قطر پی (D)، نسبت طول به قطر پی (L/D)، و ستون r_u اطلاعات لازم برای درک آزمون‌های انجام شده ارائه شده است. r_u از نسبت اضافه فشار آب منفذی (Δu) بر تنش مؤثر (σ') به دست می‌آید و به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود. از این پس r_u نسبت فشار آب منفذی نامیده می‌شود.

$$(1) \quad r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'}$$

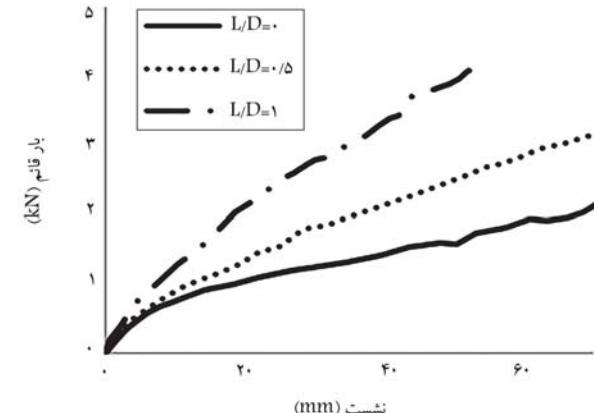
در واقع، هدف از تغییرات نسبت فشار آب منفذی بررسی این موضوع بوده است که ظرفیت باربری به چه میزان به پارامتر مذکور وابسته است. ایشی‌هارا^{۱۰} و همکاران^{۱۱} نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مونوتونیک و سیکلیک - مونوتونیک را روی ماسه‌ی توپورا در شرایط زهکشی نشده مقایسه کردند و نشان دادند که مسیر تنش - کرینش برای کرنش‌های متوسط تا بزرگ در دو بارگذاری اخیر منطبق می‌شود. بنابراین، این فرض منطقی خواهد بود که رفتار خاک پس از بارگذاری لرزه‌بی می‌تواند به خوبی با بررسی مشخصات تغیرشکل‌پذیری خاکی که تحت شرایط بارگذاری مونوتونیک انجام شده است، به دست آید.^{۱۲} روان‌گرایی استاتیکی در اصطلاح به شرایطی که می‌شود که تنش مؤثر تحت اثر بارگذاری زهکشی نشده‌ی استاتیکی صفر شوند. شرایط اخیر که بیان‌گر روان‌گرایی استاتیکی کامل است، فقط در ماسه‌های اشتاب اینجا شرایطی و تحت فشارهای همچجانبه‌ی بسیار کم، ممکن است رخ دهد. کاسترو^{۱۳}، آزمایش‌های استاتیکی مختلفی روی نمونه‌های تحقیم‌یافته‌ی ناهمسان انجام داد و سه حالت است مختلف برای ماسه که به ترتیب شامل: روان‌گرایی، روان‌گرایی محدود و حالت اتساع است را مشخص کرد.^{۱۴} با ایجاد تراویش رو به بالا و افزایش فشار آب منفذی در ماسه‌ی سیستم، می‌توان شرایطی مشابه با حالت روان‌گرایی کامل در خاک به وجود آورد. از این رو به کمک



شکل ۷. نمودار بار - نشست پی باکت و سطحی با قطر ۱۰ سانتی‌متر ($r_u = 0$).



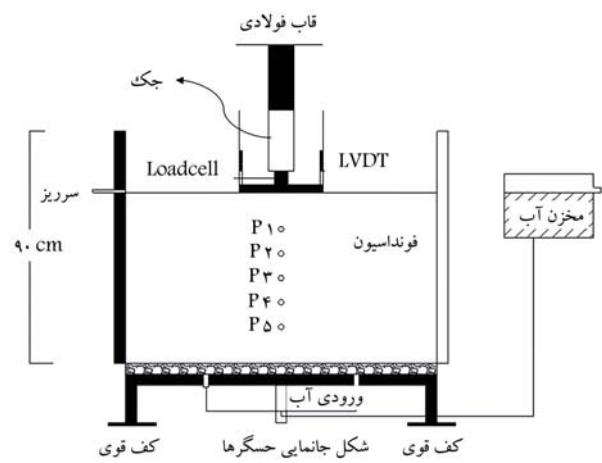
شکل ۸. نمودار بار نشست پی باکت و سطحی با قطر ۱۵ سانتی‌متر ($r_u = 0$).



شکل ۹. نمودار بار نشست پی باکت و سطحی با قطر ۲۰ سانتی‌متر ($r_u = 0$).

الی ۹، نمودار بار - نشست برای پی باکت مذکور به ازاء قطرها و دامنه‌های مختلف برای نسبت فشار آب متفاوتی صفر نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۷ الی ۹، مشاهده می‌شود که طبق انتظار با افزایش میزان بار اعمالی، نشست پی افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند و شیب نمودارها متفاوت است. مطابق نمودارهای مذکور تا ۱۰ میلی‌متر نشست، سه متحننی بار - نشست برای سه نوع پی انتظاق داشته و با افزایش میزان نشست، عملکرد پی باکت بهبود یافته است؛ به طوری که لبه‌های پی، ظرفیت باربری پی سطحی را با ضریب بیش از $1/5$ برای $d/D = 0/5$ و



شکل ۶. جانمایی حسگرها.

و حجم فضای اشغال شده تعیین و مقدار تراکم نسبی با توجه به وزن مخصوص کمینه و بیشینه ماسه محاسبه شد. محل قرارگیری ابزارها در شکل ۶ مشاهده می‌شود، که در آن P_1 نشان دهنده لوله‌های پیزومتر، L_c نشان دهنده ابزار قرائت نیرو یا Load cell است. برای قرائت جابه‌جایی از LVDT استفاده شده است.

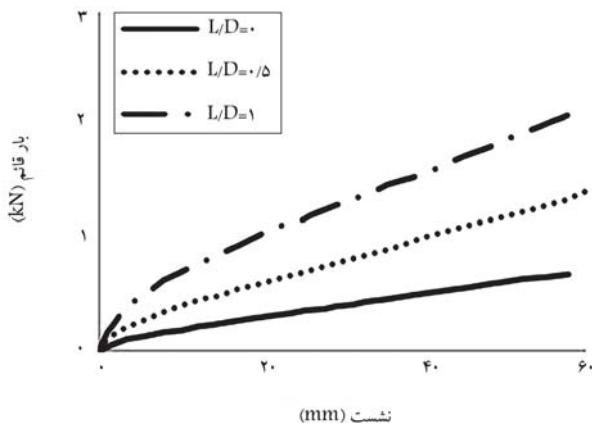
- سطح نهایی خاک به آرامی و توسط یک تخته، صاف و سپس سطوح پی برای قرارگیری بر روی ماسه تمیز شد.
- پی در مرکز جعیه به نحوی قرار گرفت که فاصله‌ی آن از دیواره‌ها به یک اندازه باشد. جهت اطمینان از هم‌مرکز بودن محور جک و آکس پی‌سطحی، از ساقول استفاده شده است، تا بارگذاری خروج از محوریت نداشته باشد.
- Load cell بین سطح پی و جک هیدرولیکی قرار گرفت. پایه‌ی آهن را بی LVDT ها به بدنی فازی یا هر تکیه‌گاه فازی دیگری متصل و LVDT ها در دو سر یکی از اقطار پی تنظیم شدند.
- در هنگام اتصال و نصب دقیق شد که به پی سطحی، ضربه‌یی وارد نشود یا از حالت تراز خارج نشود.
- کابل‌های اتصال حسگرها به دیتالاگر و شیلنگ هیدرولیک جک متصل و پی‌آمده‌ی بارگذاری شد.
- تنظیمات مربوط به دیتالاگر انجام و ثبت داده‌ها در فاصله‌ی زمانی ۱ ثانیه آغاز شد. پی توسط جک بارگذاری و نتایج حاصل توسط دیتالاگر ثبت و تغییرات فشار آب متفاوتی توسط پیزومتر مشخص شد.
- بعد از اتمام آزمایش، حسگرها و جک جدا شدند. همچنین جعبه‌ی آزمایش، تخلیه، تمیز و آماده‌ی آزمایش دیگر شد.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

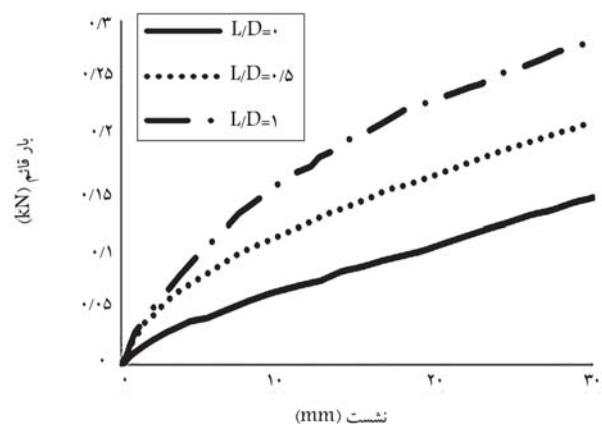
بارگذاری اعمالی بر پی‌ها از نوع استاتیکی و زهکشی شده است. این بدان معناست که بارگذاری، سرعتی ثابت دارد و در عین حال، سرعت بارگذاری با توجه به سرعت نفوذپذیری ماسه، زمان لازم را برای زهکشی خواهد داشت. جهت اطمینان پیدا کردن از نتایج آزمایش‌ها، هر آزمایش ۲ الی ۳ سری تکرار شده است. در شکل‌های ۷

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری.

نسبت قطر پی (سانتی متر)	ظرفیت باربری محاسبه شده (مگاپاسکال)	نسبت عمق به قطر پی	ظرفیت باربری اندازه گیری شده	ظرفیت باربری محاسبه شده	
				ترزاقی	هانسن
۱۰	۰	۰/۲۶	۱۴/۷۶	۶/۲۲	۶/۶۱
۱۰	۰/۵	۱۳/۷۵	۵۳/۳۳	۳۲/۰۲	۱۷/۶۴
۱۰	۱	۴۷/۰۴	۵۳/۱۸	۵۷/۸۲	۲۸/۶۶
۱۵	۰	۴۱/۷۵	۲۲/۱۴	۹/۳۴	۹/۹۲
۱۵	۰/۵	۴۰/۶۲	۵۲/۹۹	۴۸/۰۲	۲۶/۴۶
۱۵	۱	۸۵/۸۰	۷۹/۷۷	۸۶/۷۳	۴۲/۱۰
۲۰	۰	۴۸/۱۴	۲۹/۵۲	۱۲/۴۵	۱۳/۲۳
۲۰	۰/۵	۷۴/۰۴	۷۰/۶۶	۶۴/۰۴	۳۵/۲۸
۲۰	۱	۱۳۹/۶۷	۱۰۶/۳۶	۱۱/۶۴	۵۷/۲۳



شکل ۱۱. نمودار بار- نشست پی های با قطر ۲۰ سانتی متر ($r_u = 1$).



شکل ۱۵. نمودار بار- نشست پی های با قطر ۱۰ سانتی متر ($r_u = 1$).

فشار آب منفذی به شدت از ظرفیت باربری کاسته شده است، که به علت اثر افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر خاک بوده است.

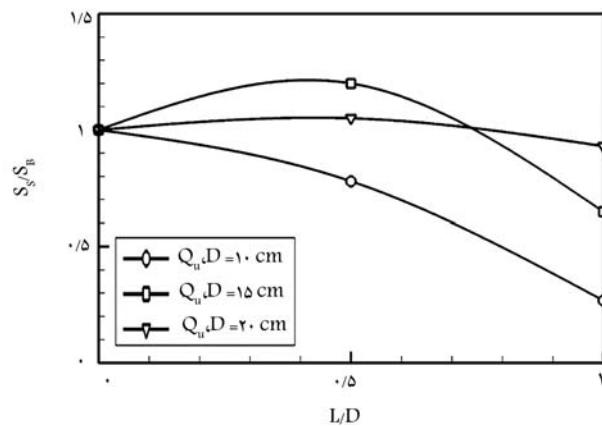
در پژوهش حاضر، مقایسه بین مقادیر بارگستاختگی هر آزمون با روش های متداول تعیین ظرفیت باربری (ترزاقی^{۱۲}، هانسن^{۱۳} و مایرهوف^{۱۴}) انجام شده است. روش های اخیر بر اساس تئوری تعادل حدی با برخی تفاوت ها در فرضیات سطح گستاختگی و شرایط بارگذاری، ظرفیت باربری نهایی را پیش بینی می کنند. خاک درون بی باکت، صلب فرض شده و ظرفیت باربری بی باکت با روش های کلاسیک برآورد شده است. در جدول ۳، نتایج آزمون های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری ارائه شده است.

مقایسه بین نتایج ظرفیت باربری در جدول ۳ نشان می دهد که اختلاف بین نتایج تقریباً زیاد است و ظرفیت باربری بین مقادیر برآورد شده با روش های هانسن (۱۹۷۰) و مایرهوف (۱۹۶۳) قرار دارد. مقایسه نتایج نشان می دهد که مدل سازی آزمایشگاهی با دقت مناسبی انجام پذیرفته است. مطالعات پیشین مشخص می سازد که روش مایرهوف می تواند به عنوان روش مناسبی برای تعیین ظرفیت باربری بی باکت مدنظر قرار گیرد.^{۱۲}

۱.۳. ۱.۳. ظرفیت باربری و نسبت بهبود ظرفیت باربری
بررسی نمودارهای تنش - نشست آزمایش های صورت پذیرفته در پژوهش حاضر نشان می دهد که بیشینه ای مقاومت واضح در رفتار مشاهده نشده است. از این رو

۲/۵ برای $D/d = 1$ افزایش داده اند. نکته ای قابل توجه این است که نشست بیشتر برای بی های با عمق مدفون، کمتر است. در تمام نمودارها مشخص است که میزان قطر و دامنه بی، نقش اساسی در افزایش ظرفیت باربری خاک داشته اند؛ زیرا وجود دامنه در بی، باعث ایجاد اندرکشی بین دو سطح دامنه و خاک و همچنین ایجاد مقاومت لبه در بی می شود، که در نتیجه موجب افزایش ظرفیت باربری خاک می شود. همچنین با افزایش قطر پی، متعاقباً سطح نیز افزایش می یابد، که این خود یکی از عوامل اصلی افزایش ظرفیت باربری است. نمودارهای اشاره شده در شرایط نسبت فشار آب منفذی صفر و در حالت اشباع شده در زمانی که فشار نسبی وجود ندارد، به دست آمده اند. در شکل های ۱۰ و ۱۱، نمودارهای بار - نشست در حالت نسبت فشار آب منفذی مساوی ۱، برای بی باکت به ترتیب به ازاء قطرهای ۱۰ و ۲۰ سانتی متر مشاهده می شود. نتایج نشان دادند که با افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری بی ها به دلیل کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک کاهش یافته است. نتیجه هم قابل ذکر این است که با وجود کاهش محسوس مقاومت خاک نسبت به نتایج آزمایش ها، در نسبت فشار آب منفذی صفر، ماسه هنوز مقاومت قابل توجهی دارد و بی ها دارای ظرفیت باربری هستند.

با مقایسه دو دسته ای آزمون در شرایط نسبت فشار آب منفذی ۰ و ۱ مشخص می شود که در هر دو دسته ای آزمون ها، بهبود عملکرد بی سطحی با اضافه شدن دامنه در اطراف بی کاملاً مشهود است. در دسته ای دوم آزمون ها، با افزایش نسبت



شکل ۱۳. نسبت نشست پی باکت به پی سطحی.

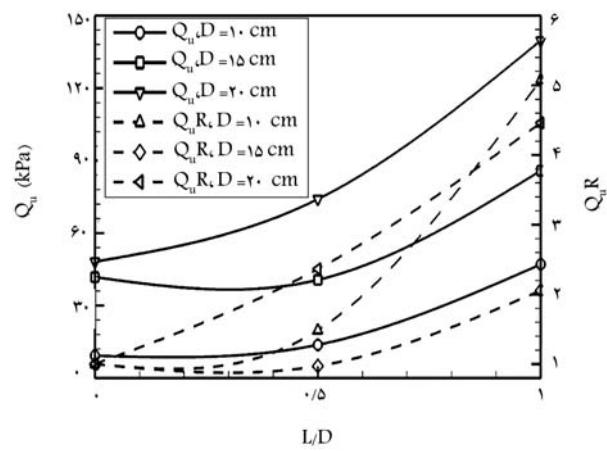
خود شود و پی به همراه خاک درون خود به مانند یک پی واحد عمل کند. در این حالت، پی سطحی رفتاری مشابه با پی نیمه عمیق دارد و در نتیجه می‌توان انتظار رشد بیشتری در افزایش ظرفیت باربری پی داشت. پژوهشگران دیگری نیز مقادیر متفاوتی را برای پی‌های گوناگون ارائه کردند. اید^{۱۵} و همکاران^(۲۰۰۹) آزمایش‌هایی را روی پی مربعی با قطر ۱۰ سانتی‌متر مستقر بر ماسه با تراکم ۵۷٪ انجام داده و برای پی با L/D برابر ۱، نسبت بهبود ظرفیت باربری را برابر با $2/7$ گزارش کردند.^[۲۱] الاقبایری و محمدزادن^(۲۰۰۴)، با انجام آزمایش‌هایی روی پی دایره‌یی با قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۶۴٪ به نسبت بهبود ظرفیت باربری در محدوده‌ی $1/5$ و $8/1$ دست یافته‌اند.^[۲۲] صوف و ناظر^(۲۰۰۵)، با انجام آزمایش‌هایی روی پی دایره‌یی با قطر $7/5$ سانتی‌متر و L/D برابر ۲ واقع بر ماسه با تراکم نسبی ۷۶٪، نسبت بهبود ظرفیت باربری در حدود 10 را گزارش کردند.^[۲۳] که دلیل تفاوت نسبت بهبود ظرفیت باربری می‌تواند وابسته به تراکم نسبی متفاوت خاک، قطر گوناگون، و زبری غیریکسان پی‌ها باشد.

در پژوهش حاضر، رابطه‌یی به منظور تخمین نسبت بهبود ظرفیت باربری بر حسب D/L به صورت رابطه 2 ارائه شده است:

$$Q_u R = 1 - 0.85 \left(\frac{L}{D} \right) + 2.34 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \quad (2)$$

۲.۳. مقایسه‌یی نشست پی باکت با پی سطحی

یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی رفتار پی‌ها، نشست است. در طراحی‌های پی به منظور کاهش نشست و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بارگذاری وارد و مقاومت خاک، ضریب اطمینانی در حدود 2 تا 3 در بحث ظرفیت باربری در نظر گرفته می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی نسبت D/L بر نشست پی، نشست متناظر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی هم‌فطر، برای تمامی پی‌ها محاسبه شده است. در شکل ۱۳، نسبت نشست پی باکت به پی سطحی (در تراز تنشی برابر با نصف ظرفیت باربری پی سطحی) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، به طور کلی افزایش نسبت D/L موجب کاهش نشست پی شده است. این موضوع برای پی با قطر 10 سانتی‌متر به وضوح مشاهده می‌شود. برای پی‌ها با قطرهای 15 و 20 سانتی‌متر در یک نسبت عمق به قطر ثابت، احتمال دارد به دلیل شرایط کارگذاری پیچیده‌تر، امکان تماس مناسب کف پی با خاک ذراهم نشود. از این رو، شیب اولیه‌ی منحنی بار-نشست در ابتدای بارگذاری



شکل ۱۴. تغییرات ظرفیت باربری (Qu) و نسبت بهبود ظرفیت باربری (QuR): نسبت ظرفیت باربری پی باکت به پی سطحی بر حسب نسبت عمق به قطر پی $(Q_u/5, ۰)$ و $(Q_u R/5, ۰)$.

به منظور تعیین ظرفیت باربری بر طبق «راهنمای آزمایش بارگذاری صفحه‌یی روی خاک و سنگ نرم»، روش‌های دیگری باید استفاده شود. در پژوهش حاضر، بنا به توصیه‌ی راهنمای یاد شده، از روش تقاطع مماس‌ها یا شیب مماسی منحنی با صفر (یا دسته‌یابی به شیب تقریباً ثابت) استفاده شده است. با توجه به نزدیک بودن مقادیر نتایج دو روش یاد شده، از شیوه‌ی صفر یا ثابت شدن شیب مماسی منحنی تنش - نشست (صفر شدن یا ثابت شدن تغییرات تنش بر تغییرات نشست) استفاده شده است. در نمودارهای بار-نشست با افزایش بار میزان نشست افزایش یافته است و نقطه‌یی بیشینه‌ی واضحی وجود ندارد، که بیان‌گر تراکم کم خاک است. لذا، نتیجه گرفته می‌شود که پی‌ها در وضعیت برشی پانچ دچار گسیختگی شده‌اند. در این حالت، وسیک^(۲۴) پیشنهاد کرده است نقطه‌یی از منحنی که شیب منحنی تقریباً ثابت می‌شود، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شود. با استفاده از شیب منحنی تقریباً ثابت شده است، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شده است.

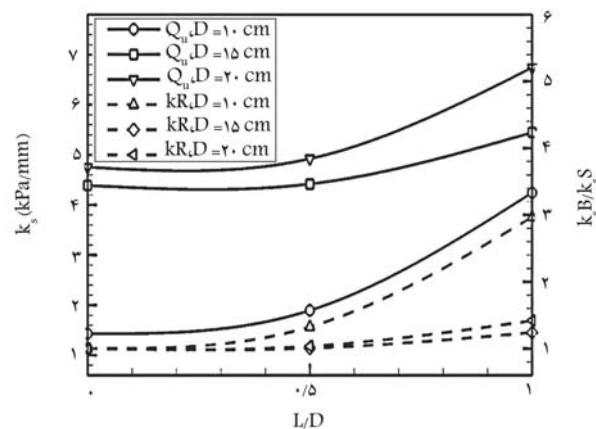
در شکل ۱۲، نسبت ظرفیت باربری پی باکت به پی سطحی بر حسب نسبت عمق به قطر پی $(Q_u/5, ۰)$ و $(Q_u R/5, ۰)$ برای حالت نسبت فشار آب منفذی برابر 0 مشاهده می‌شود. بررسی نمودار ارائه شده پیرامون ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش ظرفیت باربری برای تمامی پی‌ها با قطرهای گوناگون شده است. به طور مثال، برای پی با قطر 20 سانتی‌متر، افزایش نسبت عمق به قطر پی از 0 به 1 موجب افزایش ظرفیت بار از $0/76$ کیلوپاسکال به $2/2$ کیلوپاسکال شده است، که یکی از دلایل آن، قرار گرفتن عمق تراز پی در نقاط پایین تر و همچنین نیروی اصطکاک بیشتر بسیج شده در پیرامون قسمت مدفعون پی باکت است. از سوی دیگر، ارزیابی نسبت بهبود ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش غیرخطی در بهبود ظرفیت باربری شده است. به طور مثال، برای پی با قطر 10 سانتی‌متر و نسبت اضافه فشار آب منفذی 0 ، نسبت بهبود ظرفیت باربری برای حالت‌های D/L برابر با $0/5$ و 1 به ترتیب برابر با $1/48$ و $5/08$ شده است؛ که این موضوع، افزایش غیرخطی در نسبت بهبود مقاومت در اثر افزایش عمق پی را نشان می‌دهد. دلیل رفتار اخیر را می‌توان در پذیده‌ی محصورشده‌ی پی جستجو کرد. در حقیقت، افزایش عمق پی باکت موجب می‌شود تا لبه‌های پی باکت، موجب محصورشده‌ی ماسه‌ی درون

ناشی از جوشش و تحکیم ناشی از زوال فشار آب حفره‌بی اضافی در نشستهای ناشی از جوشش اثربارند. نشست فونداسیون‌های سطحی و سازه‌های روی آن می‌تواند به علت کمیود جزئی یا کلی ظرفیت باربری یا نشستهای تجمعی ناشی از نوسان سازه (اندرکش خاک - سازه) رخ دهد. مدل‌هایی که در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند، فقط نشستهای سطح آزاد را به عنوان نشستهای ناشی از جوشش گزارش می‌کنند و بر اساس مشاهده رفتار خاک در آزمایشگاه و مطالعات موردنی، نشستهای ناشی از جوشش را تخمین می‌زنند. به علت تعداد محدود مطالعات موردنی، تخمین این نسبت‌ها با عدم قطعیت بالای همراه است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش مدل‌سازی فیزیکی با شرایط تراویش رو به بالا در خاک ماسه‌یی با پلیمر استفاده شده است. پی‌باکت تحت بار افزایشی قائم در نسبت فشار آب متفاوتی 0° و 1° قرار گرفته است. از سه نسبت مختلف برای عمق مدفون شدگی پی‌باکت استفاده شده است، که عبارت‌اند از: $5^{\circ}/5^{\circ}$ و 1° . در این دسته از آزمایش‌ها از پی‌باکت با قطرهای 10° ، 15° و 20° سانتی‌متر استفاده شده است. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده به این شرح است:

- افزایش نسبت عمق به قطر پی، موجب افزایش ظرفیت باربری برای تمامی پی‌ها می‌شود. برای پی با قطر 20° سانتی‌متر، نسبت بهبود ظرفیت باربری به 1° موجب افزایش ظرفیت باربری از 76° کیلوپاسکال به $2/2$ کیلوپاسکال شده است.
- افزایش نسبت عمق به قطر پی موجب افزایش غیرخطی در بهبود ظرفیت باربری شده است. برای پی با قطر 10° سانتی‌متر، نسبت بهبود ظرفیت باربری با $1/48$ ، $1/1$ و $5/8$ شده است. این موضوع افزایش غیرخطی در نسبت بهبود مقاومت در اثر ایجاد مخصوص‌شدن پی با افزایش عمق پی را نشان می‌دهد.
- به طور کلی افزایش نسبت عمق به قطر پی موجب کاهش نشست شده است. در حقیقت، با افزایش عمق پی‌باکت، نیروی مقاوم ناشی از افزایش اصطکاک خاک بالههای پی افزایش یافته است، که منجر به کاهش نشست شده است. بنابراین در شرایطی که عامل نشست، معیار کنترل‌کننده در ظرفیت باربری باشد، استفاده از پی‌های باکت می‌تواند موجب دست‌یابی به ظرفیت مشابه با پی سطحی و نشست بسیار کمتر از آن شود.
- مقدار بهبود ضریب عکس‌العمل بستر در پی‌باکت وابسته به قطر پی و نسبت عمق به قطر پی در محدوده 1 تا 3 تغییر کرده است. افزایش نیروی اصطکاک بسیج شده و ایجاد مخصوص‌شدن پی در ماسه‌ی زیر پی و همچنین کاهش نشست، دلیل رفتار اخیر است.
- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی ظرفیت باربری مشخص می‌سازد که روش مایه‌هوف می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای تعیین ظرفیت باربری پی‌باکت مدنظر قرار گیرد.
- با توجه به عملکرد بهتر پی‌باکت نسبت به پی سطحی می‌توان این شالوده‌ی نوآورانه به صورت تک‌پایه و یا چندپایه برای استقرار توربین‌های بادی در مناطق فراساحلی استفاده کرد.



شکل ۱۴. مدل عکس‌العمل بستر در زمان گسیختگی.

قدرتی کمتر از شیب پی سطحی است. این موضوع با ادامه‌یی با رارگذاری و ایجاد تماس کامل کف پی با خاک مرتفع شده است (مطابق با شکل‌های ۷ الی ۱۱). در ادامه‌یی با رارگذاری همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازاء یک سطح نتش اعمالی مشخص، در پی سطحی نشست بیشتری ایجاد شده است. این در حالی است که افزایش نسبت L/D موجب کاهش نشست شده است. در حقیقت، با افزایش، به ازاء یک سطح نتش اعمالی مشخص، در ظرفیت باربری تأثیرگذار هستند، استفاده از پی‌های باکت می‌تواند موجب دست‌یابی به ظرفیت مشابه با پی سطحی و نشست بسیار کمتر از آن شود.

۳.۳. مدل عکس‌العمل بستر

پیکی از پارامترهایی که رابطه‌ی فشار - نشست در شالوده‌ها را مرتبط می‌سازد، مدل عکس‌العمل بستر است، که از تقسیم فشار بر سطح مورد نظر بر نشست متناظر با آن به دست می‌آید. در پژوهش حاضر، مدل عکس‌العمل بستر در زمان گسیختگی پی‌باکت برای حالت‌های مختلف آزمایش، در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل اخیر، نسبت مدل عکس‌العمل بستر پی‌باکت ($k_s B$) به مدل عکس‌العمل بستر پی سطحی ($k_s S$)، به صورت ($k_s B = k_s B / k_s S$)، نیز ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده مشخص می‌سازد که افزایش قطر پی و همچنین نسبت L/D موجب افزایش مدل عکس‌العمل بستر و همچنین نسبت $k_s B / k_s S$ شده است. مقدار بهبود عکس‌العمل بستر وابسته به قطر پی و نسبت L/D در محدوده 1 تا 3 تغییر می‌کند. پیرامون تبیین این رفتار می‌توان به دو عامل اشاره کرد: ۱) افزایش عمق پی‌باکت به دلیل بیشتر شدن سطح تماس پی با خاک و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک به شده موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود. ۲) مطابق نمودار پار - نشست، به دلیل افزایش دامنه‌ی پی و ایجاد مخصوص‌شدن پی بیشتر در ماسه‌ی زیر پی‌باکت، سختی بیشتر شده است. به عبارت دیگر، نفوذ پی به عمق بیشتر موجب کاهش نشست ایجاد شده به ازاء یک سطح مشخص می‌شود. بنابراین دو عامل ذکر شده، افزایش ظرفیت باربری با افزایش نسبت L/D منطقی است.

عوامل مختلفی چون تغییر شکل‌های ناشی از نتش‌های برشی، خروج ماسه

1. Frederikshavn
2. Gourvenec & Randolph
3. Wang
4. Yan
5. Kelly
6. Barari
7. Ding
8. Loadcell
9. linear variable differential transformer
10. Ishihara
11. Castro
12. Terzaghi
13. Hansen
14. Meyerhof
15. Eid
16. Al-Aghbari & Mohamedzein
17. Sawwaf & Nazer

مراجع (References)

1. Hammar, L., Andersson, S., Rosenberg, R. and et al. "Adapting offshore wind power foundations to local environment", *Naturvardsverket* (2010).
2. Larsen, K.A. "Static behaviour of bucket foundations", *DCE Thesis, Dep. Civ. Eng.* Aalborg Univ. Denmark (2008).
3. Gourvenec, S. and Randolph, M. "Effect of strength non-homogeneity on the bearing capacity of circular skirted foundations subjected to combined loading", *In: 12th Int. Offshore Polar Eng. Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers* (2002).
4. Wang, X., Zeng, X. and Li, J. "Vertical performance of suction bucket foundation for offshore wind turbines in sand", *Ocean Eng.* **180**, pp. 40-48 (2019).
5. Yan, Z., Fu, D.F., Zhang, B.H. and et al. "Large-scale laboratory tests of a new type of bucket foundation in sand subjected to vertical loading", *Appl. Ocean Res.*, **97**, 102072 (2020).
6. Li, Y., Yang, S. and Zou, X. "Advanced concept design and numerical study of suction bucket foundation in deep ocean," *Ocean Eng.* **54**, pp. 142 -149 (2012).
7. Abdel-Rahman, K. and Achmus, M. "Behaviour of monopile and suction bucket foundation systems for offshore wind energy plants," *in Proceedings of 5th International Engineering Conference*, **12**(July), pp. 317 -321 (2006).
8. Cassidy, M.J., Byrne, B.W. and Houlsby, G.T. "Modelling the behaviour of circular footings under combined loading on loose carbonate sand," *Gotechnique*, **52**(10), pp. 705 -712 (2002).
9. Houlsby, G.T. and Cassidy, G.T. "A plasticity model for the behaviour of footings on sand under combined loading," *Gotechnique*, **52**(2), pp. 117 -129, (2002).
10. Cassidy, M.J. "Experimental observations of the combined loading behaviour of circular footings on loose silica sand," *Gotechnique*, **57**(4), pp. 397 -401 (2007).
11. Kelly, R.B., Houlsby, G.T. and Byrne, B.W. "A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay" *Gotechnique*, **56**, pp. 617-626 (2006).
12. Barari, A., Ibsen, L.B., Taghavi Ghalesari, A. and et al. "Embedment effects on vertical bearing capacity of offshore bucket foundations on cohesionless soil", *Int. J. Geomech.*, **17**, 4016110 (2017).
13. Ding, H., Hu, R., Zhang, P. and et al. "Load bearing behaviors of composite bucket foundations for offshore wind turbines on layered soil under combined loading", *Ocean Eng.*, **198**, 106997 (2020).
14. Ibsen, L.B., Larsen, K.A. and Barari, A. "Calibration of Failure Criteria for Bucket Foundations on Drained Sand under General Loading", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **140**(7), p. 4014033, Jul. (2014).
15. Park, J.-S., Park, D. and Yoo, J.-K. "Vertical bearing capacity of bucket foundations in sand", *Ocean Eng.*, **121**, pp. 453-461 (2016).
16. Lian, J., Zhao, Y., Dong, X. and et al. "An experimental investigation on long-term performance of the wide-shallow bucket foundation model for offshore wind turbine in saturated sand", *Ocean Eng.*, **228**, 108921 (2021).
17. Ishihara, K., Verdugo R. and Acacio, A.A. "Characterization of cyclic behavior of sand and postseismic stability analysis", *Proc., 9th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, London, pp. 45-70 (1991).
18. Ishihara, K. "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, **43**(3), pp. 349-415 (1993).
19. Castro, G. "Liquefaction of sand", *PhD thesis, Division of Engineering and appliedPhysics*, Harvard University (1969).
20. Calvetti, F., Prisco, C. and Nova, R. "Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction", *J. Geotech. Geoenvir. Eng.*, **130**, pp. 1292-1299 (2004).
21. Jafarian Y., Haddad, A. and Mehrzad, B. "Load-settlement mechanism of shallow foundations rested on saturated sand with upward seepage", *International Journal of Geomechanics*, **17**(3), 04016076 (2017).
22. Meyerhof, G.G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Can. Geotech. J.*, **1**, pp. 16-26 (1963).
23. Vesic, A.S. "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations," *J. Soil Mech. Found. Div.*, **99**(1), pp. 45 -73 (1973).
24. Eid, H.T., Alansari, O.A., Odeh, A.M. and et al. "Comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand", *Can. Geotech. J.*, **46**, pp. 438-453 (2009).
25. Al-Aghbari, M.Y. and Mohamedzein, Y.E.A. "Bearing capacity of strip foundations with structural skirts", *Geotech. Geol. Eng.*, **22**, pp. 43-57 (2004).
26. El Sawwaf, M. and Nazer, A. "Behavior of circular footings resting on confined granular soil", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **131**, pp. 359-366 (2005).
27. El Sawwaf, M. and Nazer, A. "Behavior of circular footings resting on confined granular soil," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, bf 131, pp.359-366 (2005).

امکان‌سنجی بهبود ارزش پژوهه‌های عمرانی بزرگ مقیاس با استفاده از تلفیق مهندسی ارزش و مدل پیش‌بینی استنتاج فازی

عباس تاج‌الدینی* (استادیار)

پرویز عالی‌پور (استادیار)

علی پایدار (استادیار)

سعید کاشیان (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج

با استفاده از مفاهیم مهندسی ارزش و بررسی مشکلات و موانع کاربرد روش ذکر شده در ساختار مجموعه‌های کارفرمایی، پیمانکاری و مشاوره‌یی، پژوهش حاضر سعی دارد معیارهای اصلی و میزان تأثیرگشان در بهبود ارزش ابرپژوهه‌ها را بسنجد. هدف اصلی، پیش‌بینی میزان تأثیر عامل‌های مرتبط با کیفیت، زمان و هزینه در ارزش ابرپژوهه‌ها با استفاده از یک مدل استنتاج فازی - عصبی تطبیقی است. جهت ساخت مدل پیش‌بینی مذکور، اطلاعات لازم توسط یک پرسشنامه جمع‌آوری شده است، که روانی و پایابی آن نیز بررسی و تأیید شده است. براساس نظرات خبرگان موضوع و انجام مصاحبه، ارزیابی میزان تأثیر معیارهای اصلی مهندسی ارزش در کیفیت، زمان و هزینه‌ی یک ابرپژوه (مطالعه‌ی موردی: پژوهه‌ی ایران‌مال) انجام شده و مدل مذکور توسعه یافته است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشترین و کمترین میزان تأثیر در بین معیارهای انتخابی در مدیریت کارآمد ابرپژوه‌ها، هر دو مربوط به عامل زمان با معیارهای «برنامه‌ریزی صحیح» و «چالوگیری از تداخل مسئولیت‌ها» بوده است.

a.tajaddini@kiau.ac.ir
aalipour@kiau.ac.ir
a.paydar@iaumalard.ac.ir
s.kashian@yahoo.com

وازگان کلیدی: مهندسی ارزش، مدل پیش‌بینی، پژوهه‌های ساختمانی
بزرگ مقیاس، سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی.

۱. مقدمه

ساخت و بهره‌برداری از پژوهه می‌شوند، که در نهایت به کاهش ارزش پژوهه منجر می‌شوند.

بررسی‌ها نشان می‌دهند در صد قابل ملاحظه‌ی از طرح‌های عمرانی در کشورهای در حال توسعه، مانند ایران، مشکلات اساسی در مرحله‌ی طراحی دارند. این امر موجب می‌شود بسیاری از طرح‌های عمرانی ناقص اجرا شوند و بسیاری دیگر نیز در مرحله‌ی بهره‌برداری مشکل داشته باشند. با در نظر گرفتن واقعیات ذکر شده، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی به لزوم اجرای مهندسی ارزش در بند «ج» ماده‌ی ۶۱ قانون برنامه‌ی سوم توسعه‌ی کشور توجه کرده است. همین طور ماده‌ی ۳۱ قانون برنامه‌ی چهارم توسعه‌ی کشور دولت را مکلف کرده است که به منظور افزایش کارآمدی و اثربخشی طرح‌های سرمایه‌گذاری را با رویکرد نتیجه‌گرا، استقرار نظام مدیریت کیفیت و مهندسی ارزش در پژوهه‌های تسلیک دارایی‌های سرمایه‌ی از سال اول برنامه‌ی چهارم توسعه فراهم کند. با توجه به اهمیت موضوع و لزوم بهره‌مندی از مفاهیم مهندسی ارزش در ابرپژوهه‌های ساختمانی در کشور، پژوهش حاضر با تلفیق منطق فازی و مؤلفه‌های تأثیرگذار مهندسی ارزش، یک مدل پیش‌بینی ANFIS^۱ ارائه

همه ساله، بخش عمده‌ی از درآمدهای کشورها، صرف سرمایه‌گذاری در پژوهه‌های عمرانی می‌شود، که پژوهه‌های بزرگ مقیاس در آن سهم بهسازی دارند. پژوهه‌های بزرگ مقیاس به دلیل پیچیدگی طراحی، تعدد سازمان‌ها و افراد درگیر در پژوهه و توع فعالیت‌ها عموماً در چارچوب هزینه و زمان تعیین شده‌ی اولیه قرار نمی‌گیرند. لذا به کارگیری مفهوم مهندسی ارزش جهت بهینه‌سازی هزینه‌ها و تخصیص صحیح منابع ضروری است. از سوی دیگر، تأخیر در پیشرفت فیزیکی پژوهه، نه فقط موجب طولانی شدن زمان اجرا و صرف هزینه‌های قابل ملاحظه برای تکمیل آن‌ها می‌شود، بلکه نارضایتی‌های زیاد و مشکلات متعددی را نیز ایجاد خواهد کرد. دلایل و عوامل زیادی، از جمله: تفکر مبتنی بر عادت‌ها و سنت‌ها، محدودیت در زمان، ضعف در روابط انسانی و همایشگی و فقدان یا کمیاب منابع مالی هستند، که موجب تحمیل هزینه‌های اضافی بر پژوهه‌ها در طی فرایند طراحی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱/۱۴، اصلاحیه ۳۱/۵/۱، پذیرش ۱۴۰۱/۱/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2022.60060.3082

به کار می رود.^۷ بر اساس تعریف مؤسسه‌ی بین‌المللی مدیریت پروژه، مهندسی ارزش به عنوان یک ابزار قدرتمند حل مسئله‌ی شمار می‌رود، که قادر است هزینه‌ها را در حالی که عملکرد و کیفیت بهبود می‌یابند، کاهش دهد.^[۸] هدف عالیه‌ی مهندسی ارزش، برگشت بیشترین ارزش برای مقدار پول هزینه شده است. مهندسی ارزش برای حصول اطمینان از دسترسی به هدف مذکور، بر ارزش پروژه در کلیه‌ی مراحل آن، از جمله: طراحی، مشخصات فنی، ساخت، خرید، بسته‌بندی، حمل و نقل، فروش، خدمات و غیره دخالت و نظارت دارد. مهندسی ارزش عملکرد محصول، خدمات و یا سیستم را با این هدف که با صرف کمترین هزینه به بهترین وضع خود بررسی، تحلیل می‌کند.^[۹]

لازم به ذکر است که بیشتر مطالعات انجام شده در حوزه‌ی مهندسی ارزش،^[۱۰-۱۲] در پروژه‌های ساختمانی تأکید دارند که معیارهای اصلی، شامل: کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، کاهش زمان اجرا، افزایش کیفیت برای با حفظ اینمی، کارایی، عملکرد، قابلیت تعمیر و نگهداری، دوام و زیبایی پروژه است. با این حال، در برخی مطالعات،^[۱۳] به عوامل دیگری، چون: رضایت ذی‌نفعان (شامل: کارفرما، مشاور، مجری، و یا کاربر) یا انتظارهای ایشان اشاره و البته تأکید شده است که عوامل اخیر، از جمله شاخص‌های ارزیابی عملکرد و موقیت پروژه هستند، که به طور مجزا از بحث مهندسی ارزش، قابل مطالعه هستند. همچنین، باید اشاره شود که در حوزه‌ی مهندسی عمران، چهار حوزه‌ی مطالعاتی بسیار نزدیک به هم در یکی دو دهه‌ی اخیر مطرح و بررسی شده‌اند، که عبارت‌اند از: ۱. ارزیابی عملکرد و کنترل پروژه؛ ۲. ارزیابی پیشرفت و موقیت پروژه؛ ۳. تحلیل ریسک، شکست و عدم قطعیت در پروژه؛ و نیز^[۴] ۴. سنجش و ارتقاء ارزش پروژه. پژوهش حاضر فقط با نگاه سنجش ارزش ابرپروژه‌ها انجام شده و از بیان مفاهیمی چون زنجیره‌ی ارزش یا تولید ارزش، که عمدتاً به صباحث سنجش موقیت پروژه مربوط می‌شوند، به دلیل پرهیز از پیچیدگی امر، جلوگیری به عمل آمده است. در مجموع، می‌توان حوزه‌های کاربردی مهندسی ارزش را به سه بخش: پروژه، محصول و فرایند تقسیم کرد، که در مسیر پژوهش حاضر به آن‌ها توجه شده است.

لازم به توضیح است که دامنه‌ی کاربرد مهندسی ارزش، معمولاً به واسطه‌ی ذهنیت کاربران محدود می‌شود. مهندسی ارزش در تمام مراحل یک پروژه، قابل اجراست؛ اما بیشترین سود حاصل از آن در مراحل ابتدایی پروژه - یعنی برنامه‌ریزی و طراحی - صورت می‌گیرد، که انعطاف‌پذیری بیشتر کارفرما و طراح، موجب اعمال تغییرات ساده‌تر و تأثیرگذار در تغییر زمان‌بندی پروژه است و هزینه‌ی کمتری را نیز به پروژه تحمیل می‌کند.

روش‌های مهندسی ارزش را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: نگاه صفرم، نگاه اول و نگاه دوم مهندسی ارزش.^[۱۵] نگاه صفرم مهندسی ارزش، در مرحله‌ی توسعه‌ی محصول استفاده می‌شوند، که هدف آن توسعه‌ی یک راه حل به عنوان عملکردی یکپارچه در مرحله‌ی طراحی محصول، به منظور بهبود عملکرد محصول است. نگاه اول، در انتهای مرحله‌ی توسعه‌ی محصول و در تمامی مراحل برنامه‌ریزی استفاده می‌شود، که هدف آن طراحی و توسعه‌ی محصولات جدید با ارزشی افزایش یافته، افزایش عملکرد برای مشتری و بدون افزایش هزینه‌های است. نگاه دوم، در بخش آخر مرحله‌ی برنامه‌ریزی و بخش اول مرحله‌ی آماده‌سازی محصول رخ می‌دهد، که هدف آن خلق ارزش و عملکرد بهتر محصول‌های موجود است. برنامه‌ی کاری، یکی از روش‌های مهندسی ارزش است. روش مهندسی ارزش در کارگاه‌های مهندسی ارزش استفاده می‌شود و شامل ۵ گام است. در واقع، ۵ فاز مجزا در روش برنامه‌ی کاری مهندسی ارزش وجود دارد، که عبارت‌اند از: ۱. اطلاعات، ۲. حدس و گمان،^[۳]

۲. مرور ادبیات و پیشنهادی پژوهش

بر اساس آخرین ویرایش استاندارد PMBOK،^[۲] پروژه^[۳] عبارت از تلاشی موقتی است، که به منظور تولید محصول، خدمت، یا تیجه‌ی بی منحصر به فرد انجام می‌گیرد. ماهیت موقتی یک پروژه، نشان‌دهنده‌ی وجود یک آغاز و یک پایان برای پروژه و یا هر مرحله از پروژه است. پروژه می‌تواند یک فرایند مجزا و یا بخشی از یک طرح یا فعالیت بزرگ‌تر باشد. بر اساس تعریف استاندارد ICB،^[۴] پروژه یک عملکرد محدود شده توسط زمان و هزینه برای دستیابی به محدوده‌ی تعریف شده برای برآوردن موضوعات پروژه و بر اساس استانداردهای کیفیت و الزامات فنی است. قابل توجه است که همه‌ی استانداردهای مذکور، به موارد محدودیت زمان، هزینه (منابع مالی) و موقتی بودن در کار تولید یک محصول مشخص و منحصر به فرد توجه کرده‌اند.^[۱۶]

مدیریت پروژه، عبارت از برنامه‌ریزی و هدایت پروژه در چهارچوب زمان، هزینه و کیفیت مشخص در جهت حصول نتایج مشخص آن است.^[۲] به بیانی دیگر، مدیریت پروژه را می‌توان به کارگردانی، مهارت‌ها، ابزارها و روش‌های لازم در اداره‌ی جریان اجرای فعالیت‌ها، به منظور رفع نیازها و انتظارات متوالیان از اجرای پروژه دانست. در نگاه اول، ممکن است ابزارها و روش‌های استفاده شده در مدیریت پروژه، به صورت اضافی، زمان بروز هزینه را به نظر بیانند؛ اما باید توجه داشت که مدیریت پروژه تنها راهی است که می‌تواند انجام به موقع پروژه را مطمئن سازد.

زمان محدودیتی است که نه به عنوان هزینه و نه به عنوان منابع پروژه منظور می‌شود. بنابراین، مدیر پروژه نمی‌تواند تغییرات آن را کنترل کند. این خصوصیت زمان، آن را از سایر موارد و همچنین بخش‌های هزینه‌یی متمایز می‌سازد. باید مذکور شد که

صرف هیچ تلاشی مهم‌تر از تلاش برای کاهش هزینه‌ها نیست.^[۱۷] یکی از مؤلفه‌های مهم پروژه، کیفیت محصول نهانی است. مقدار زمانی که برای هر فعالیت تعیین می‌شود، ارتباط تنگاتنگی با کیفیت کلی پروژه دارد. بعضی از فعالیت‌ها برای این‌که به طور مناسبی اجرا شوند، به مقدار زمان مشخصی نیاز دارند؛ اما اختصاص زمان بیشتر، باعث ارتقاء کیفیت می‌شود. در پروژه‌های بزرگ مقیاس، کیفیت بالا عامل مهمی بر روی میزان زمان و هزینه‌ی پروژه است و بر عکس، در مجموع و به طور خلاصه می‌توان همه‌ی محدودیت‌های اخیر را در زمان مشخص، کیفیت مشخص و بودجه‌ی مشخص خلاصه کرد.^[۱۵]

طبق نوشتار آتابای^[۵] و همکارش^[۶] ارزش یک پروژه عبارت از سبک کارکرد (یا همان عملکرد مطلوب) پروژه به هزینه‌ی انجام شده است. بنابراین، برای افزایش ارزش یک پروژه یا باید کیفیت عملکرد را بالا برد و یا باید کیفیت مطلوب مدنظر را با کمیته‌ی هزینه محقق کرد. تمرکز و هدف اصلی مهندسی ارزش، افزایش ارزش یک پروژه در مدت زمان پیش‌بینی شده است. مجموعه‌ی مفاهیم مهندسی ارزش،^[۷] رویکردی سازمان یافته و خلاق است، که هدف آن تعیین دقیق و کارآمد هزینه‌های غیرضروری سازمان است. هزینه‌هایی که صرف آن‌ها هیچ‌یک از جمیع‌های کیفی، کاربردی، مشتری‌داری و ظاهری را بهبود نمی‌بخشد. یکی از اهداف عمده‌ی مهندسی، ارزش حذف هزینه‌های غیرضروری است.^[۷] مهندسی ارزش، روشی خلاقانه است که برای حل مسئله، کاهش هزینه و بهبود عملکرد، و کیفیت پروژه

ارزیابی، ۴. توسعه و ۵. ارائه.^[۱۶] در نظریه‌ی دیگر بر اساس نظر کافمن^[۸] (۲۰۰۸)،^[۱۷] مراحل اصلی مهندسی ارزش عبارت‌اند از: ۱. جمع‌آوری اطلاعات، ۲. یافتن ایده‌های خلاقانه، ۳. تجزیه و تحلیل راه حل‌های ارائه شده و انتخاب راه حل نهایی، ۴. آزمون راه حل نهایی؛ ۵. اجرا و ۶. بررسی نتایج و انجام اصلاحات لازم.

اگوستین و بودا^[۹] (۲۰۱۶)،^[۲] در پژوهش خود به بررسی همیستگی بین زمان و هزینه در تجزیه و تحلیل کمپیوچر های ساختمانی با استفاده از منطق فازی پرداختند و دریافتند که پروژه‌های ساختمانی معمولاً با تأخیر و هزینه‌های مازاد مواجه هستند، که باعث کاهش سود شرکت می‌شود و می‌تواند منجر به ورشکستگی آن شود. بنابراین، رویکرد کارآمدتری مثل مهندسی ارزش باید استفاده شود که بتواند خطر حوادث مذکور، عدم اطمینان و محدودیت منابع در برنامه‌ریزی و نظرات بر پروژه‌های ساختمانی و نیز همیستگی بین پارامترهای زمان، هزینه و منابع محدود را لحاظ کند.

در یک پژوهش جامع، گاناراتنی^[۱۰] و همکارانش (۲۰۲۰)،^[۱۱] با ادغام مهندسی

ارزش و مفهوم ساخت پایدار، به بررسی پیامدهای مشتث استفاده از مهندسی ارزش در صنعت ساختمان پرداختند و نشان دادند که مهم‌ترین نتایج اشاره شده در ادبیات موضوع عبارت‌اند از: بهینه‌سازی هزینه، افزایش بهره‌وری، صرفه‌جویی در زمان اجر، بهبود عملکرد، افزایش اینمنی و حصول یک محیط سالم برای زندگی ساکنان است. گاناره و چادری^[۱۲] (۲۰۱۵)،^[۱۳] مطالعه‌ی بر روی شناسایی ریسک، تحلیل کیفی و تحلیل کمی پروژه‌ها انجام دادند، که اهداف اصلی آن عبارت بودند از: شناسایی عوامل اصلی ریسک‌آور، که در برنامه‌ی زمان‌بندی یک پروژه تأثیر می‌گذارد و تعیین احتمال اجرای کامل پروژه در زمان از پیش تعیین شده. یک فرم پرسش‌نامه در میان ۳۱ نفر صنعت کار با تجربه‌ی اجرایی متفاوت از ۱ سال تا ۱۷ سال توزیع و تحلیل کیفی با ماتریس تأثیر (PI) و تحلیل کمی توسط روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است.

ونقا^[۱۴] و همکارش (۲۰۱۴)،^[۱۵] نیز در نوشتار خود به ارائه‌ی مدل موازنی مثبت طلایی مدیریت پروژه (عنی: هزینه، کیفیت و زمان) در پروژه‌های ساختمانی با رویکرد تخصیص منابع پرداخته‌اند؛ که نکته‌ی حائز اهمیت در آن، ارائه‌ی تعریف مناسب‌تری از کیفیت در پروژه‌های ساختمانی بوده است. در واقع، عملیات اجرایی یک پروژه‌ی عمرانی از لحاظ اجرایی با توجه به هزینه، کیفیت و زمان فعالیت از ۴ موضع: ۱. مواد اولیه، ۲. تجهیزات، ۳. نیروی کار و ۴. مدیریت اجرا بررسی شده است.

باک و پوتز^[۱۶] (۲۰۱۶)،^[۲۰] در مطالعه‌ی خود یک روش جدید کنترل کیفیت را برای مهندسی ارزش ارائه کرده‌اند. راجوان^[۱۷] و همکارانش (۲۰۱۶)،^[۲۱] نیز در یک مطالعه‌ی موردنی از برنامه‌های کاربردی مهندسی ارزش در یک پروژه‌ی سکونتی واقعی با مقیاس بزرگ، استفاده و روش‌ها و محساباتی از مطالعات معیارهای مهندسی ارزش و پایداری آن‌ها ارائه کرده‌اند. صرفه‌جویی کلی برآورد شده‌ی پروژه، ناشی از مطالعه‌ی مهندسی ارزش در محدوده‌ی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد از هزینه کل بوده و از این‌رو، کاهش قابل توجهی را در هزینه‌های کلی پروژه و همچنین صرفه‌جویی در مصرف انرژی که در حدود ۷٪ رسیده است، شاهد بوده‌اند. در پژوهش اخیر، همچنین نحوه‌ی اعمال مهندسی ارزش و پایداری پروژه و چگونگی تأثیر اقتصادی و زیست محیطی آن‌ها مطالعه شده است.

چان^[۱۷] و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۲] به بررسی عوامل هزینه‌آور مؤثر در پروژه‌های ساختمانی پرداختند. هدف از مطالعه‌ی ایشان، استخراج عوامل مؤثر در هزینه با ارائه‌ی یک مفهوم و روش جدید برای کنترل هزینه‌ها بوده است. در پژوهش اخیر، از روش دلفی اصلاح شده برای تثبیت نظرهای کارشناسان و شناسایی و

رتبه‌بندی عوامل کلیدی، که در هزینه‌های پروژه تأثیر دارند، استفاده شده است. نتایج نشان داده است که ۱۶ عامل کلیدی، هزینه‌زا هستند. سپس محاسبه‌ی شاخص شدت به منظور تعیین عوامل کلیدی ذکر شده برای تأمین هزینه انجام شده است. مطالعه‌ی اخیر نشان داد که دامنه‌ی پروژه در قرارداد بهوضوح تعریف شده و کنترل هزینه‌ها، عامل تعیین‌کننده برای افزایش هزینه بوده است.

بهنکه^[۱۸] و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۲۳] در مطالعه‌ی خود یک مدل برای مهندسی ارزش یکپارچه ارائه کرده‌اند. مدل مذکور با در نظر گرفتن فرایندهای ساخت و همچنین شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین توسعه یافته و به آن دسته از عواملی که به عنوان محرك هزینه و ارزش در شرکت‌های تولیدی هستند، توجه شده است. الایص و قندیل^[۱۹] (۲۰۰۵)،^[۲۴] در نوشتار خود به بررسی موازنی سه عامل: هزینه، زمان و کیفیت با رویکرد مهندسی ارزش در پروژه ساخت آزاده پرداخته‌اند، که در آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل مدل سه هدفه با رویکرد کاهش هزینه، زمان پروژه و افزایش کیفیت پرداخته شده است.

خالدیان (۲۰۲۱)،^[۲۵] اشاره می‌کند که بسیاری از مطالعات به جای نگاه به ارزش پروژه‌ها به ارزیابی عملکرد و بررسی میزان موفقیت پروژه‌ها پرداخته‌اند. همچنین ایشان اشاره کرده است که اگرچه موارد محدودی بررسی و مطالعه شده است، ولی نشان داده شده است که موفقیت پروژه در گروی تحقق زمان، هزینه و کیفیت مطلوب است. خاموشی و گل‌افشانی^[۲۶] (۲۰۱۴)،^[۲۷] بیان کرده‌اند که تحلیل زمان و هزینه در تعیین شکسته یا موفقیت پروژه، نقش اساسی دارند.

طی یک مطالعه‌ی مروری جامع، چن^[۱۸] و همکارانش (۲۰۲۲)،^[۲۸] نشان داده‌اند که به کارگیری مهندسی ارزش، روشی مؤثر در بهبود ارزش پروژه‌های ساختمانی دارد. به بیان ایشان، روش‌ها و ابزارهای متعددی برای سنجش و پیاده‌سازی مهندسی ارزش در صنعت ساختمان طی ۵۰ سال اخیر استفاده شده است، که این روش فازی استنتاجی در میان آن‌ها نیست. در پژوهش اخیر همچنین بیان شده است که بررسی ارزش پروژه‌های بزرگ در کشورهای در حال توسعه (مانند ایران)، بسیار ضروری و مؤثر خواهد بود. در یک پژوهش دیگر، الحجازی^[۱۹] (۲۰۲۰)،^[۲۹] با مرور دقیق ادبیات موضوع تیجه گرفته است که مطالعه‌ی مهندسی ارزش با نگاه به مؤلفه‌های هزینه، زمان و کیفیت در پروژه‌های بزرگ و مهم، بسیار اهمیت دارد. وی اشاره می‌کند که جای به کارگیری یک روش تضمیم‌گیری هوشمند، که بتواند به طور جامع معیارهای اصلی مهندسی ارزش را در بر بگیرد، در میان روش‌های تاکنون استفاده شده خالی است.

لذا پژوهش حاضر سعی دارد با بررسی جامع مؤلفه‌های مؤثر در بهبود ارزش ابرپروژه‌ها، میزان اهمیت آن‌ها را بسنجد. دلیل انتخاب ابرپروژه‌ها، بزرگی حجم و پیچیدگی اجرای آن‌هاست. طبق تعریف حاجی علیخانی و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۲۹] پروژه‌های بزرگ مقیاس پروژه‌هایی با هزینه‌ی بسیار بالا (بیش از ۱۰ میلیون دلار)، مدت ساخت طولانی (بیش از ۲ سال)، به کارگیری تعداد زیادی پرسنل اجرایی و تدارکاتی، اشتغال هم‌زمان تعداد زیادی از شرکت‌ها، ذی‌نفعان و پیمانکاران و اثکاری در زندگی هزاران نفر هستند، که موجب پیچیدگی و اهمیت آن‌ها می‌شود. درصد زیادی از ابرپروژه‌های ذکر شده با چالش‌های زیادی دست به گریان هستند و بعض‌اً دچار شکست می‌شوند. لذا بررسی چگونگی افزایش ارزش آن‌ها، بسیار مورد نیاز است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر سعی شده است تا معیارهای تحقیق جامع و متناسب با شاخص‌های پروژه‌های بزرگ مقیاس انتخاب شود. همچنین، همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، استفاده از یک مدل پیش‌بینی استنتاجی فازی برای سنجش میزان تأثیر و اهمیت معیارهای پژوهش در بهبود ارزش پروژه به عنوان راهکاری نوین و کاربردی در نظر گرفته شده و کارایی آن مطالعه شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پاسخ‌گویی به سوال‌های پژوهش حاضر را دارند؛ زیرا که پژوهه‌های مشابه، ماهیت و خصوصیات مشابهی خواهند داشت و رفتار آن‌ها به طور مشابه قابل پیش‌بینی خواهد بود. این موضوع به دفعات در برخی ادبیات پژوهش،^{۲۰ و ۲۱} به کار رفته و شرایط تعمیم‌پذیری آن تأیید شده است، که اعتبار مدل پیشنهادی حاضر را تأیید می‌کند.

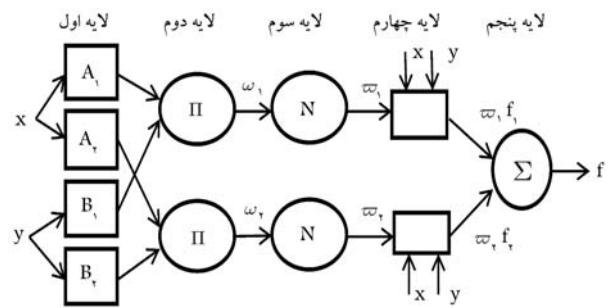
بر اساس ادبیات موضوع رنگ‌آمیز^{۲۲} (۲۰۰۸)،^{۲۳} ابزار اندازه‌گیری پژوهش باید قادر باشد اطلاعات و داده‌های لازم جهت تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری‌های نهایی را در اختیار پژوهش‌گر بگذارد و بدین منظور باید پایابی و روایی لازم را داشته باشد. روایی پژوهش عبارت از توانایی ابزار استفاده شده در اندازه‌گیری صفتی است که آزمون برای اندازه‌گیری آن ساخته شده است. در مقابل، پایابی پژوهش عمده‌ای به دقت، اعتمادپذیری و ثبات نتایج حاصل اشاره می‌کند. در پژوهش حاضر، اعتبار پرسش‌نامه یا روایی با استفاده از روش محتوایی بررسی شده است. روایی محتوایی به این مطلب اشاره می‌کند که پرسش‌های استفاده شده در یک آزمون تا چه حد معرف کل جامعه‌ی پرسش‌های ممکن است، که می‌توان از محتوای موضوع موردنظر تهیه کرد. این موضوع با استفاده از دو روش بررسی اعتبار سازه‌یی و اعتبار صوری و بر اساس اخذ نظر از متخخصان حوزه‌ی مرتبط تأیید شده است. نظر خبرگان در مورد ارتباط‌گویه‌ها با شاخص موردنظر و نحوه‌ی طرح‌گویه‌ها و انسجام درونی آن‌ها لحاظ شده است. همچنین از طریق به‌کارگیری روش آلفای کرونباخ،^{۲۴} پایابی پرسش‌نامه نیز اندازه‌گیری شده است. میزان پایابی کل سوال‌های پرسش‌نامه با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای ۲۵ سوال طرح شده بررسی شده و مقدار آن برای کل سوال‌ها برابر با عدد ۷۱۸^۰ بوده است، که نشان‌دهنده‌ی همسو بودن سوال‌های پرسش‌نامه است. بعد از اطمینان از روایی و پایابی، پرسش‌نامه‌ای در میان خبرگان موضوع توزیع شدند. پس از جمع‌آوری پاسخ‌ها، به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از دو روش تحلیل آماری توصیفی و استنباطی استفاده شد. برای گردآوری داده‌های مربوط به میانی نظری و طراحی مدل اولیه‌ی پژوهش از متابع کتابخانه‌یی و اینترنتی، شامل: نوشتارهای علمی، پایان‌نامه‌ها بازدیدهای میدانی و مطالعات موردي استفاده شده است. همچنین به‌منظور ساخت مدل خبره‌ی فازی برای امکان‌سنجی بهبود ارزش پژوهی عمرانی بزرگ‌مقیاس از روش ANFIS استفاده شده است. عوامل پژوهش به صورت کمی و کیفی ارائه و سپس ضمن مصاحبه با افراد با تجربه در این زمینه، عوامل مؤثر شناسایی و بر اساس آن‌ها، یک پرسش‌نامه‌ی استاندارد تدوین شد. پرسش‌نامه‌ی مذکور طی چند مرحله انجام تحلیل عاملی اصلاح شد، که طی مراحل مذکور، سوال‌های کم‌اهمیت از آن خارج و درنهایت عوامل و زیرعوامل اصلی دارای اهمیت زیاد شناسایی شدند. برای تفسیر سوال‌ها و درجه‌ی اهمیت آن‌ها از طیف ۵ گزینه‌یی لیکرت^{۲۵} استفاده شده است (جدول پیوست ۱). از پرسش‌شوندگان خواسته شد تا میان رأی‌گذاری هر میان رأی را با انتخاب گزینه‌ی مناسب مشخص کنند. معیارهای پژوهش برگرفته از مفاهیم شناخته شده‌ی مهندس ارزش و موارد گزارش شده در مطالعات پیشین بودند، که به سه گروه اصلی: کیفیت، زمان و هزینه دسته‌بندی شدند. در واقع تلاش شد تا با مطالعه‌ی جامع ادبیات موضوع، که بسیاری از آن‌ها در بخش متابع معرفی شده‌اند، جامعیت و به روز بودن معیارهای انتخابی پژوهش مناسب با هدف پژوهش لحاظ شود. از این رو، تقریباً تمامی موارد مهم، از قبیل: کمبود اعتبار یا منابع مالی، ضعف در برنامه‌ریزی، عدم زمان‌بندی مناسب، ضعف تدارکاتی و... در معیارهای انتخابی گنجانده شده‌اند. در نهایت، گروه «کیفیت» با ۸ معیار، گروه «زمان» با ۷ معیار و گروه «هزینه» با ۱۰ معیار تعیین و مجموعاً ۲۵ معیار اصلی در پژوهش حاضر بررسی شدند. جامعیت و پالایش متغیرهای بررسی شده در پژوهش حاضر از نقاط قوت آن است.

در مرحله‌ی اول، با بررسی جامع منابع اینترنتی و ادبیات نوشتاری موجود و نیز برگزاری جلسات متعدد طوفان فکری و اخذ نظرات خبرگان امر، تعداد ۵۱ مورد به عنوان معیارهای ارزش مرتبط با موضوع پژوهش شناسایی شدند. سپس، با تهیه‌ی یک پرسش‌نامه‌ی اولیه، معیارهای اخیر در بین برخی از متخصصان برگزیده‌ی حوزه‌ی ساخت، که آشنا به مبانی مهندسی ارزش بودند، به پرسش گذشته شدند و پس از غربال‌گری اولیه، تعداد ۲۵ مورد از آن‌ها به عنوان معیارهای مؤثر تعیین شدند. به بیان بهتر، نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان در مرحله‌ی اول با استفاده از روش شناخته شده‌ی تحلیل عاملی (PCA)^{۲۶} آنالیز شده است. برای اساس، معیارهای کم‌اهمیت حذف و درنهایت، تعداد ۲۵ معیار که بیشترین اهمیت را داشتند، تعیین شدند. با توجه به مطالب اشاره شده در بخش قبلی، نگاه غالب در پژوهش حاضر بر روی شاخص‌های ارزش در ابر پژوهه‌ها بوده است. لذا برای تکمیل فاز اصلی پژوهش، جامعه‌ی خبرگان هدف در پژوهش حاضر باید از افراد شاغل در ابر پژوهه‌ها انتخاب می‌شدند. از این رو، برای مطالعه‌ی موردی، پژوهشی (ایران‌مال) در شهر تهران به عنوان پژوهشی هدف انتخاب شد، زیرا در زمان انجام پژوهش، مناسب‌ترین گرینه‌ی از جهت مطابقت با معیارهای استاندارد تعریف شده در پژوهش حاضر بوده است. در واقع، پژوهشی ایران‌مال هم در دسترس بوده و هم جامعیت شرایط لازم برای بررسی و سنجش معیارهای پژوهش را داشته است. لذا، جامعه‌ی خبرگان هدف از بین کارشناسان پژوهشی حاضر، که اشراف کافی به مبانی مهندسی ارزش و آشنا بی مناسب با مشکلات طرح و اجرای ابر پژوهه‌ها را داشتند، انتخاب شدند. در ادامه، داده‌های به دست آمده از پرسش‌نامه‌ای نهایی تحلیل و بررسی شده‌اند. سپس، الگویی جهت بهبود ارزش ابر پژوهه‌های عمرانی بر اساس معیارهای برگرفته از مهندسی ارزش ارائه شده است. به این صورت که ابتدا داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شده و سپس با استفاده از روش ANFIS یک مدل تحلیلی تουشه یافته است، به طوری که از الگوریتم عصبی و منطق فازی به‌منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده شده است. در یک مدل عصبی - فازی، خروجی مدل مناسب با داده‌های ورودی، درجه‌ی عضویت، قوانین و توابع درجه‌ی عضویت انتخاب می‌شود.^{۲۷}

برای تعیین حجم مناسب نمونه‌ی آماری در پژوهش حاضر، پس از بررسی‌های جامع، تعداد ۵۵ نفر کارشناس خبره‌ی موضوع شناسایی شدند. با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری تصادفی و فرمول کوکران،^{۲۸} طبق رابطه‌ی ۱، حجم لازم برای جامعه‌ی آماری تعیین شد، که برابر با ۴۸ نفر به دست آمد:

$$n = \frac{N t^* p q}{N d^* + t^* p q} \quad (1)$$

که در آن، n حجم نمونه‌ی آماری، N جمعیت جامعه‌ی آماری و t^* مقدار توزیع نرمال، q نسبت نبود صفت در جامعه‌ی آماری، p نسبت وجود صفت در جامعه‌ی آماری و d^* سطح خطاست. در رابطه‌ی اخیر، جمعیت شناسایی شده ۵۵ نفر، مقدار سطح خطاب برابر ۵٪ یعنی ۹۵٪ سطح اطمینان، مقدار توزیع نرمال از جدول سطح زیر منحصري نرمال با ۹۵٪ اطمینان برابر با ۱,۹۶ و مقدار p و q از آمار و اطلاعات گذشته با مقداری برابر با ۵٪ جایگزین شده‌اند. مجدداً یادآوری می‌شود که با توجه به حساسیت انتخاب صحیح خبرگان طرح و بر اساس شرایط موجود در زمان انجام پژوهش، پژوهشی ایران‌مال به عنوان تنها پژوهشی مناسب با هدف پژوهش، شناسایی و نسبت به انتخاب خبرگان هدف اقدام شد. به‌نظر می‌رسد که نتایج پژوهش حاضر گرچه منحصر به پاسخ‌های خبرگان یک پژوهه بوده است، اعتبار لازم و کافی باست.



شکل ۱. نمای کلی ساختار یک مدل استنتاج فازی. [۲۴]

برای شروع مدل سازی، توابع به کار رفته در مدل استنتاجی فازی تطبیقی بررسی شده‌اند؛ که از مشهورترین آن‌ها می‌توان از توابع مثلثی، Δ ، Δ و زنگولی Δ نام برد. لازم به ذکر است که تعداد لایه‌های ورودی نیز می‌تواند متغیر باشد. خاطرنشان می‌شود که با زیاد شدن تعداد لایه‌های ورودی، به‌وضوح تعیین وزن آن‌ها با مشکل رویرو می‌شود. روند تعیین وزن‌های بهینه و تنظیم مقادیر آن‌ها، عمدتاً به صورت بازگشتی انجام می‌شود. بدین منظور، شبکه‌ی مدل سازی با استفاده از بخشی از داده‌های ورودی آموزش داده شد و قواعد لازم با استفاده از قابلیت یادگیری شبکه بر اساس الگوریتم‌های متنوع پیشنهاد شد، که همگی قصدشان تزدیک کردن خروجی تولید شده توسط شبکه به خروجی ایده‌آل و مورد انتظار هدف پژوهش بوده است.

در ادامه، به صورت خودکار، مدل سیستم استنتاج فازی تطبیقی داده‌ها، نرمالایز و به تولید نزون‌ها Δ پرداخته شده است. برای هر فاز عملیاتی، فرایند آموزش و آزمون داده‌های ورودی در شبکه به ترتیب با نسبت Δ/Δ به 20% داده‌ها صورت پذیرفته است، که البته انتخاب شان تصادفی بوده است. در پژوهش حاضر، با توجه به این‌که از 48 داده‌ی ورودی (که برابر با تعداد خبرگان پرسش‌شونده است) استفاده شده است، که 38 داده، عنوان داده‌های آموزش و 10 داده نیز به عنوان داده‌های آزمون در مدل سیستم استنتاج فازی تطبیقی وارد شده‌اند. البته این تذکر لازم است که جهت تعیین بهترین مدل برازش از بین مدل‌های مطرح شده، مقادیر جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در هر یک از مدل‌ها محاسبه و یکدیگر مقایسه شده‌اند.

گام اول تحلیل، شامل بررسی و مقایسه‌ی ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطأ در هر یک از مدل‌های آزمون شبکه بوده است، چرا که اگر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطأ در آزمون شبکه‌ی مدل سازی، مقادیر مناسب‌تری باشند، آموزش شبکه نیز به نحو مناسب‌تری انجام می‌گیرد. شایان ذکر است که مناسب‌ترین پاسخ در یک مدل استنتاج فازی، همانی است که کمترین مقادیر جذر میانگین مربعات خطأ و پیشترین مقادیر ضریب تبیین در مدل سازی را دارد، تا بهترین مدل برازش انتخاب شود.

در گام بعدی، مدل‌های ساخته شده در سیستم استنتاج فازی تطبیقی، حذف و غربال شده‌اند و در مجموع 25 مدل در سیستم استنتاج فازی تطبیقی بررسی شده‌اند، که دارای مناسب‌ترین مقادیر جذر میانگین مربعات خطأ و ضریب تبیین آزمون شبکه بوده‌اند. نتایج به دست آمده از مدل استنتاج فازی برای محاسبه‌ی پیش‌بینی میزان تأثیر معیارها در افزایش ارزش ابرپژوهه‌ها در جدول 2 ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در مدل‌های ایجاد شده در سیستم استنتاج فازی برای توابع $gbellmf$ ، $trapmf$ ، $trimf$ و mf با لایه‌های پنهانی و توابع عضویت مختلف، تفاوت معناداری وجود داشته است.

نتایج حاصل از جدول 2 نشان می‌دهد که مدل استنتاج فازی برای معیار 11 با عنوان «برنامه‌ریزی صحیح برای قدم و تأخیر فازهای مختلف اجرائی» با تابع $trimf$ ، با 3 لایه‌ی پنهان، بهترین جواب را به لحاظ ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE) به دست داده است، به طوری که ضریب تبیین مدل آزمون و مدل آموزش پیشترین مقدار و مجموع مربعات خطاهای نیز کمترین مقدار را داشته است. مقادیر جذر میانگین مربعات خطأ و ضریب تبیین برای معیار 11 در حالت آزمون برابر با 0.801 و 0.801 و برای حالت آموزش 0.591 و 0.540 بوده است. از این‌رو، معیار 11 در بین معیارهای پرسشنامه، عملکرد و تأثیر بالاتری در بهبود ارزش پژوهی عمرانی بزرگ مقیاس داشته است.

۱۰.۳. سیستم استنتاج فازی تطبیقی

روش ANFIS، نوعی شبکه‌ی عصبی مصنوعی است، که بر اساس منطق سیستم فازی تاکاگی Δ - سوگنو Δ است. این شیوه در اوایل دهه 1990 ایجاد شده است. از آنجایی که سیستم ANFIS، شبکه‌های عصبی و مقاومی منطق فازی را یکپارچه می‌سازد، می‌تواند از امکانات هر دوی آن‌ها در یک قالب بهره برد. سیستم استنتاجی آن مطابق با مجموعه‌ی قوانین فازی «اگر - آنگاه» است، که قابلیت یادگیری برای تقریب زدن توابع غیرخطی را دارد. ساختار یک مدل استنتاجی از 5 لایه تشکیل شده است (شکل ۱). لایه‌ی اول، گروه داده‌های ورودی هستند، که درجه عضویت آن‌ها با استفاده از تابع عضویت‌شان توسط کاربر مشخص می‌شود. عملیات مدل سازی در لایه‌های دوم الی چهارم انجام شده است. با ضرب مقادیر ورودی هر گره در یکدیگر، وزن آن در لایه‌ی دوم به دست می‌آید. در لایه‌ی سوم، وزن نسبی محاسبه می‌شود. در لایه‌ی چهارم، هر گره دارای تابع می‌شود و به تمام ورودی‌ها در لایه‌ی سوم متصل می‌شود و در لایه‌ی آخر خروجی شبکه به دست می‌آید. [۲۳]

در پژوهش حاضر، تعیین مدل ANFIS با توجه به بهترین شرایط برآشی بر اساس تعیین مقادیر ضرایب تبیین مدل‌ها و جذر میانگین مربعات خطأ آن‌ها بدست آمده است.

۴. نتایج و بحث

پرسشنامه‌ی پژوهش، در دو قسمت الف (تعیین اطلاعات جمعیت‌شناختی) و ب (تعیین میزان تأثیر معیارهای پژوهش در بهبود ارزش پژوهی عمرانی بزرگ مقیاس)، برای محاسبه‌ی میزان تأثیر هر یک از معیارها طراحی شده است. بر همین اساس، یافته‌های این مدل توصیفی و نتایج مدل ANFIS تقسیم‌بندی شده‌اند، که در ادامه مشاهده می‌شود. زیسته‌ی فعالیت پاسخ‌دهنگان به سه بخش، با عنوانی پیمانکاران، کارفرمایان و مشاوران دسته‌بندی شده‌اند. فراوانی جمعیت‌شناختی پژوهش حاضر در جدول 1 ارائه شده است.

از نرم‌افزار مدل سازی Δ برای پیاده‌سازی مدل استنتاج فازی تطبیقی استفاده شده است؛ که در آن، 48 داده‌ی ورودی به عنوان متغیرهای وابسته و مستقل به کار رفته‌اند. داده‌ی ورودی همان میزان تأثیر مؤلفه‌های مهندسی ارزش در افزایش ارزش ابرپژوهه با اعمال ضرایب مرتبط است؛ که به صورت فازی برای مدل ANFIS به شکل گزینه‌های خیلی کم (0.01 ، کم (0.03 ، متوسط (0.05 ، زیاد (0.07 ، و خیلی زیاد (0.09) تعریف شده است. همچنین داده‌ی خروجی، مجموع میزان تأثیر معیارها در بهبود ارزش پژوهه به ازاء هر معیار است، که وارد مدل سیستم استنتاج فازی تطبیقی شده است.

جدول ۱. فراوانی جمعیت‌شناختی پرسش‌شوندگان پژوهش حاضر.

فراآنی تجمعی نسبی		فراآنی	درصد نسبی	فراآنی تجمعی نسبی	فراآنی	درصد نسبی	زیسته‌ی فعالیت پرسش‌شوندگان
۳۹,۵۸	۳۹,۵۸	۱۹		کارفرما			
۶۲,۵۰	۲۲,۹۲	۱۱		پیمانکار			
۱۰۰,۰۰	۳۷,۵۰	۱۸		مشاوران			
	۱۰۰,۰۰	۴۸		کل			
فراآنی تجمعی نسبی		فراآنی	درصد نسبی	فراآنی	درصد نسبی	جنسيت پرسش‌شوندگان	
۷۷,۰۸	۷۷,۰۸	۳۷		مرد			
۱۰۰,۰۰	۲۲,۹۲	۱۱		زن			
	۱۰۰,۰۰	۴۸		کل			
فراآنی تجمعی نسبی		فراآنی	درصد نسبی	فراآنی	درصد نسبی	سن پرسش‌شوندگان	
۰,۰۰	۰,۰۰	۰		۳۰ تا ۲۰ سال			
۳۱,۲۵	۳۱,۲۵	۱۵		۳۰ تا ۴۰ سال			
۸۲,۳۳	۵۲,۰۸	۲۵		۴۰ تا ۵۰ سال			
۱۰۰,۰۰	۱۶,۶۷	۸		بیش از ۵۰ سال			
	۱۰۰,۰۰	۴۸		کل			
فراآنی تجمعی نسبی		فراآنی	درصد نسبی	فراآنی	درصد نسبی	میزان سابقه‌ی کار در رابطه با مهندسی ارزش	
۴۵,۸۳	۴۵,۸۳	۲۲		کمتر از ۵ سال			
۹۱,۶۷	۴۵,۸۳	۲۲		۵ تا ۱۵ سال			
۱۰۰,۰۰	۸,۳۳	۴		۲۵ تا ۱۵ سال			
۱۰۰,۰۰	۰,۰۰	۰		بیش از ۲۵ سال			
	۱۰۰,۰۰	۴۸		کل			
فراآنی تجمعی نسبی		فراآنی	درصد نسبی	فراآنی	درصد نسبی	میزان تحصیلات	
۱۰,۴۲	۱۰,۴۲	۵		کارданی			
۳۵,۴۲	۲۵,۰۰	۱۲		کارشناسی			
۷۵,۰۰	۳۹,۵۸	۱۹		کارشناسی ارشد			
۱۰۰,۰۰	۲۵,۰۰	۱۲		دکتری و بالاتر			
	۱۰۰,۰۰	۴۸		کل			

درک بهتر موضوع، نمودارهای مربوط به حالت‌های آموزش و آزمون معیار ۱۱، که بهترین گزینه‌ی مدل‌سازی شده است، در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شوند. در شکل‌های مذکور خط راهنمای شیب ۴۵ درجه نیز رسم شده است، تا مقایسه‌ی پراکندگی نقاط شبیه‌سازی شده‌ی عددی با مدل استنتاج فازی تطبیقی را بهتر نمایش دهد.

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، مشاهده می‌شود که پراکندگی نقاط شبیه‌سازی شده‌ی عددی مدل ANFIS برای محاسبه‌ی میزان تأثیر معیارهای مهندسی ارزش در اطراف خط با شیب ۴۵ درجه بیشتر است؛ که نشان می‌دهد مدل استنتاج فازی، میزان تأثیر معیارها را با دقت مناسبی تخمین زده است. در ادامه، نمودارهای مربوط به حالت‌های آموزش و آزمون معیار ۱۲، که بدترین پاسخ مدل را داشته است، در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند. در شکل‌های مذکور نیز خط راهنمای شیب ۴۵ درجه رسم شده است، تا مقایسه‌ی پراکندگی

همچنین، در مقابل برای معیار ۱۲ با عنوان «جلوگیری از تداخل مسئولیت‌ها و وظایف افراد» با تابع $gbellmf$ با لایه‌ی پنهان ۱۱، نامناسب‌ترین پاسخ‌ها برای محاسبه‌ی میزان تأثیر مهندسی ارزش به دست آمده است؛ به طوری که مقادیر جذر میانگین مربعات خطأ و ضریب تبیین برای حالت آزمون برابر با $۰,۱۰, ۰,۱۸, ۰,۱۵$ و برای حالت آموزش برابر با $۰,۲۱, ۰,۴۵$ بوده است. مطابق جدول ۳ ملاحظه می‌شود که مدل استنتاج فازی تطبیقی در پژوهش حاضر به خوبی قادر به محاسبه‌ی میزان تأثیر مؤلفه‌های مهندسی ارزش در بهبود ارزش پروژه بوده است. در جدول ۳ بهترین گزینه‌های مدل‌سازی شده برای محاسبه‌ی میزان تأثیر معیارها برای درک بهتر مطلب ارائه شده است.

نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل سیستم استنتاج فازی تطبیقی به ترتیب برای معیارهای ۱۱، ۱۱، ۲۲ و ۱۸، به ترتیب رتبه‌های اول تا چهارم را به لحاظ مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطأ به دست داده است. جهت

جدول ۲. نتایج حاصل از مدل‌های سیستم استنتاج فازی تطبیقی.

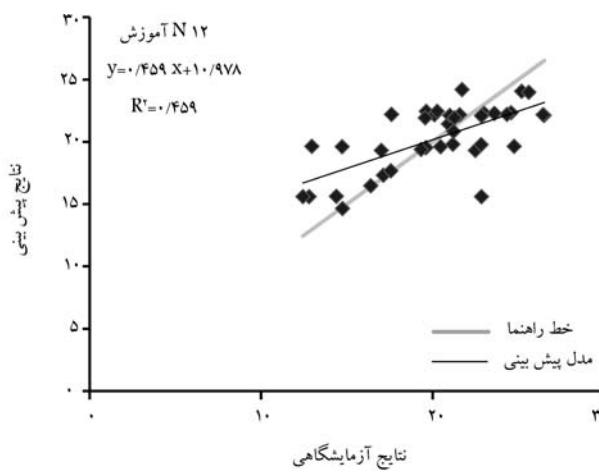
آموزش		آزمون		Number of MF	MF type	شماره‌ی سؤال
R ^r	RMSE	R ^r	RMSE			
۰/۳۵۹	۳/۰۶۷	۰/۷۰۳	۲/۷۷۷	۳	trapmf	۱
۰/۵۳۸	۲/۶۰۹	۰/۶۲۶	۵/۲۹۷	۷	gbllmf	۲
۰/۴۹۳	۲/۷۲۰	۰/۶۲۶	۴/۷۸۱	۷	gbllmf	۳
۰/۵۵۱	۲/۵۵۷	۰/۱۸۸	۴/۱۲۸	۱۱	gbllmf	۴
۰/۵۱۷	۲/۶۶۷	۰/۱۰۱	۴/۵۸۶	۱۱	gbllmf	۵
۰/۳۷۶	۳/۰۱۷	۰/۵۴۸	۵/۴۳۰	۱۱	gbllmf	۶
۰/۶۱۵	۲/۳۶۰	۰/۳۲۸	۳/۶۵۵	۱۱	gbllmf	۷
۰/۲۴۷	۲/۳۱۰	۰/۴۹۱	۳/۳۵۰	۳	trimf	۸
۰/۳۱۷	۳/۱۷۵	۰/۲۵۲	۴/۰۵۸۱	۳	trimf	۹
۰/۴۷۳	۲/۷۷۳	۰/۱۰۴۶	۵/۵۲۹	۱۱	gbllmf	۱۰
۰/۵۴۱	۲/۵۹۱	۰/۸۰۱	۲/۲۹۴	۳	trimf	۱۱
۰/۴۹۰	۲/۸۱۰	۰/۰۱۸	۵/۱۰۲	۱۱	gbllmf	۱۲
۰/۲۲۵	۳/۳۶۵	۰/۴۱۳	۳/۵۱۸	۴	trapmf	۱۳
۰/۱۶۷	۳/۴۹۴	۰/۱۰۴	۵/۳۵۰	۸	trimf	۱۴
۰/۳۱۶	۳/۱۶۶	۰/۴۵۶	۵/۴۴۸	۵	trimf	۱۵
۰/۴۰۷	۲/۹۵۸	۰/۳۰۱	۳/۷۸۲	۱۱	gbllmf	۱۶
۰/۴۰۱	۲/۹۵۴	۰/۲۶۸	۶/۱۶۴	۱۱	gbllmf	۱۷
۰/۴۳۶	۲/۸۶۵	۰/۶۳۷	۲/۷۹۰	۱۱	trimf	۱۸
۰/۱۹۳	۳/۴۲۸	۰/۴۳۹	۳/۶۷۴	۳	gbllmf	۱۹
۰/۱۵۵	۳/۵۰۵	۰/۴۱۴	۴/۱۴۲	۳	gbllmf	۲۰
۰/۵۱۹۸	۲/۶۴۸	۰/۵۵۳	۳/۰۴۷	۵	gbllmf	۲۱
۰/۱۹۰۰	۳/۴۴۰	۰/۶۴۷	۳/۲۴۰	۵	gbllmf	۲۲
۰/۲۷۲۹	۳/۲۵۸	۰/۵۳۵	۳/۶۵۶	۱۱	gbllmf	۲۳
۰/۲۹۹۵	۳/۱۹۸	۰/۲۶۶	۴/۴۷۳	۹	gbllmf	۲۴
۰/۵۲۷	۲/۶۴۲	۰/۱۸۴	۳/۹۸۴	۹	trapmf	۲۵

جدول ۳. نتایج بهترین مدل‌های حاصل از سیستم استنتاج فازی.

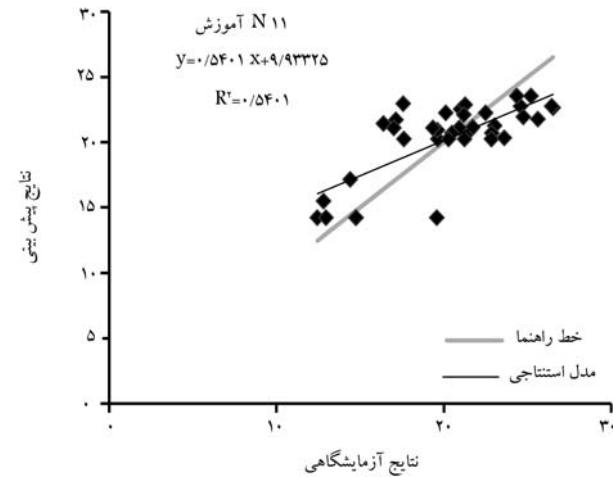
آموزش		آزمون		Number of MF	MF type	معیار
R ^r	RMSE	R ^r	RMSE			
۰/۵۴۰۱	۲/۵۹۱	۰/۸۰۱۵	۲/۲۹۹	۳	trimf	۱۱
۰/۳۵۵۹	۲/۰۶۷	۰/۷۰۲۳	۲/۷۷۴	۳	trapmf	۱
۰/۱۹۰۰	۳/۴۴۰	۰/۶۴۹۷	۳/۲۴۰	۵	gbllmf	۲۲
۰/۴۳۷۶	۲/۸۶۵	۰/۶۳۷۷	۲/۷۹۲	۱۱	trimf	۱۸

نقاط شبیه‌سازی شده‌ی عددی با مدل استنتاج فازی تطبیقی را بهتر نمایش دهد. پروژه‌بر می‌شمارد. البته باید توجه شود در پژوهش حاضر به‌طور خاص نشان داده شده است که بحث اجتناب از تأخیر زمانی در اجرا و کنترل دقیق پروژه، بالاترین وزن را از گروه زمان به خود اختصاص داده است؛ که بیانگر میزان وقوع بالای مشکل تأثیرگذار مربوط به گروه هزینه هستند. این موضوع در تطابق با پژوهش‌های چن و اخیر در صنعت ساختمان در ایران است و اهتمام ویژه در جهت رفع آن را می‌طلبید. همچنین، در پژوهش حاضر، مواردی از گروه کیفیت و هزینه، که با نگاه ویژه به ارزش ابرپروژه‌ها و مشکلات‌شان انجام شده است، نیز بررسی شده است.

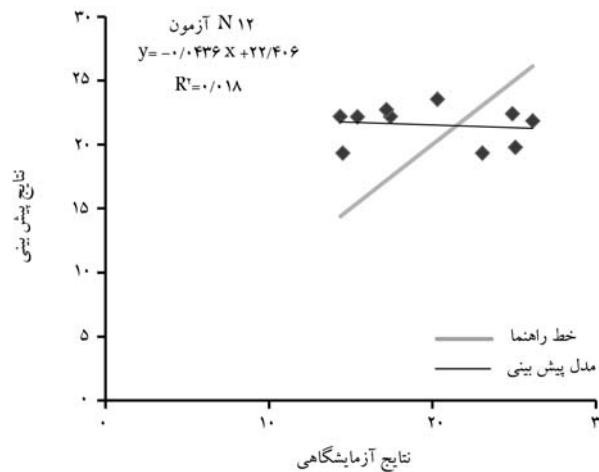
نتایج حاصل از مدل فازی نشان می‌دهد که بیشترین تعداد عامل‌های تأثیرگذار مربوط به گروه هزینه هستند. این موضوع در تطابق با پژوهش‌های چن و اخیر در صنعت ساختمان در ایران است و اهتمام ویژه در جهت رفع آن را می‌طلبید. همکاران (۲۰۲۲)، (۲۰۲۰)، (۲۰۱۹)، (۲۰۱۸) و (۲۰۱۷) در تأیید تعریف اصلی مهندسی ارشد است، که رسیدن به کیفیت مورد نظر با صرف کمترین هزینه را اولویت هر



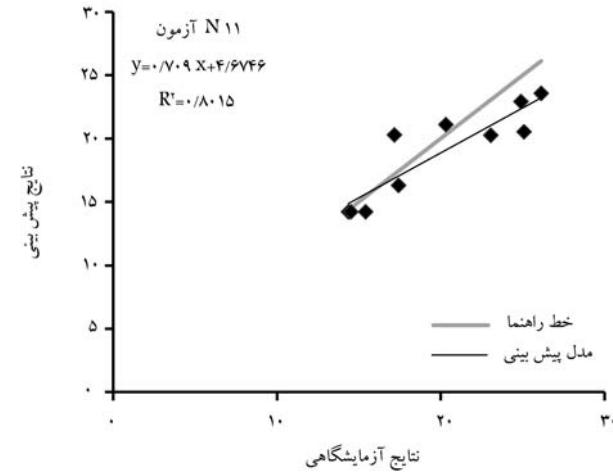
شکل ۴. نتایج حالت آموزش مدل ANFIS برای عامل ۱۲ با تابع gbellmf و ۱۱ لایه‌ی پنهان.



شکل ۲. نتایج حالت آموزش مدل ANFIS برای عامل ۱۱ با تابع trimf و ۳ لایه‌ی پنهان.



شکل ۵. نتایج حالت آزمون مدل ANFIS برای عامل ۱۲ با تابع gbellmf و ۱۱ لایه‌ی پنهان.



شکل ۳. نتایج حالت آزمون مدل ANFIS برای عامل ۱۱ با تابع trimf و ۳ لایه‌ی پنهان.

پروژه و رعایت برنامه‌ی زمان‌بندی (کنترل پروژه) با تابع trimf، با ۳ لایه‌ی پنهان، بهترین جواب حاصل شده است. پس از آن، معیار ۱ با عنوان «دسترسی کامل به تمامی اطلاعات پروژه و همکاری و هماهنگی سازمان‌های ذی‌ربط با عوامل پروژه» با تابع trapmf، با ۳ لایه‌ی پنهان، بهترین پاسخ و بیشترین تأثیر را در بهبود ارزش پروژه داشته است. همچنین، برای معیار ۱۲ با عنوان «جلوگیری از تداخل مسئولیت‌ها و وظایف افراد در بخش‌های مختلف اجرائی و تغییر وظایف نیروها در جهت کاهش تداخلات کاری» با تابع gbellmf، با تابع trimf و ۳ لایه‌ی پنهان، نامناسب‌ترین مقدار برآذش به دست آمده است. نتایج حاصل، کارآمدی مدل فازی پیشنهادی را برجسته می‌سازد. برای توسعه‌ی آنی پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود روش‌های دیگر محاسبات نرم، از قبیل: رگرسیون میانگین متحرک، الگوریتم زنیک، شبکه‌های عصیانی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان و یا ترکیبی از روش‌های مذکور استفاده شود تا امکان مقایسه‌ی بهتر نتایج را فراهم سازد. بررسی شاخص‌های ارزش پروژه در ساختمان‌های هوشمند و سبز با استفاده از چنین مدل استنتاجی فازی نیز مفید است. پیشنهاد دیگر، به کارگیری مفاهیم جدید ساخت و ساز ناب و نیز ساخت و ساز پایدار در سنجش مجدد معیارهای تأثیرگذار مهندسی ارزش در احداث بهینه‌ی ابرپروژه‌هاست.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مهندسی ارشد، روشی هدفمند و کارآمد است، که به دنبال ارتقاء کارکردهای یک محصول، خدمت، یا سیستم با صرف کمترین متابع و هزینه در طول عمر آن است و با استفاده از ایده‌های خلاقانه‌ی یک تیم مخصوص و مدرج حاصل می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی و ساخت یک مدل خبره‌ی استنتاج فازی برای امکان‌سنجی بهبود ارزش پروژه‌ی عمرانی بزرگ مقیاس است. یک پرسشنامه‌ی استاندارد طراحی شد، که در آن میزان تأثیر معیارهای مهندسی ارزش از تعدادی از خبرگان نظرسنجی شده است. پس از یک مرحله‌ی غربال‌گری معیارهای شناسایی شده با استفاده از روش تحلیل عاملی، ۲۵ زیرمعیار مهم‌تر در ۳ گروه: کیفیت، هزینه و زمان دسته‌بندی شدند. نتایج مدل فازی استنتاجی نشان داد که به ترتیب برای معیارهای ۱۱، ۱۸ و ۲۲، بهترین پاسخ‌ها به لحاظ مقادیر ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE) (RMSE) به دست آمده و بدترین پاسخ‌ها مربوط به معیار ۱۲ پژوهش بوده است. در واقع، برای معیار ۱۱، با عنوان «برنامه‌ریزی صحیح برای تقدم و تأخیر فازهای مختلف اجرائی و ثبات در برنامه‌ریزی در طول

- adaptive neuro-fuzzy inference system
- project management body of knowledge, 7th edition (2021).
- a temporary endeavor undertaken to create a unique product, service, or result. the temporary nature of projects indicates a beginning and an end to the project work or a phase of the project work. projects can stand alone or be part of a program or portfolio.
- IPMA individual competence baseline (It is an international standard of project management skills, i.e. of project manager and project team).
- Atabay
- value engineering
- Kaufman
- Augustin & Bodeab
- Gunarathne
- Ganame & Chaudhari
- Wenfa
- Bock & Pütz
- Rachwan
- Chan
- Behncke
- El-Rayes & Kandil
- Chen
- Elhegazy
- principal component analysis
- cochran formula
- Rangamiz
- chronbach's alpha coefficient
- Likert
- Takagi
- Sugeno
- Matlab
- trimf
- trapmf
- gbellmf
- nerons

۷. مرجع دانش مهندسی ارزش ایران

Congress on Advances in Civil Engineering, Turkiye (17-19 Oct, 2012).

- Miles, L.D., *Techniques of Value Analysis and Engineering*, (4), New York, McGraw-Hill (1972).
- Garomsa, T., Agon, E.D.C. and Assefa, S. "Concept of value engineering and current project management practice in ethiopian building construction projects", *American Journal of Civil Engineering*, 7(1), pp. 1-8 (2019).
- Miraj, P., Dofir, A., Andreas, A. and et al. "Systematic review of value engineering research studies in indonesia", *CSID Journal of Infrastructure Development*, 2(2), pp. 192-197 (2019).
- Gunarathne, A.S., Zainudeen, N., Perera, C.S.R. and et al. "A framework of an integrated sustainability and value engineering concepts for construction projects", *International Journal of Construction Management*, pp. 1-13 (2020).
- Rane, N.L. and Attarde, P.M. "Application of value engineering in construction projects", *Int. J. Eng. Manag. Res.*, 6(2), pp. 671-674 (2016).
- Tom, N. and Gowrisankar, V. "Value engineering in residential house construction", *International Journal of Civil Engineering*, 6(6), pp. 46-52 (2015).
- Bhokare, S.A., Chavhan, B.R., Kolhe, S.G. and et al. "Value engineering in construction", *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.*, 4(3), pp. 54-59 (2017).
- Hamadan, R.S., Hassan, A.Y., Mohammed, S.M. and et al. "The key performance indicator for five construction projects in khartoum state: case study", *Journal of Engineering and Computer Sciences (ECS)*, 21(2), pp.56-63 (2020).
- Cooper, R. "When Lean Enterprises Collide", Boston, Harvard Business School Press (1995).
- Abdel-Raheem, M., Burbach, V., Abdelhameed, A. and et al. "Value engineering and its applications in civil engineering", In Construction Research Congress, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 263-272 (2018).
- Kaufman, J.J. "Value management", Etobicoke Ontario, Sakura House Publications (2008).
- Ganamel, P. and Chaudhari, P. "Construction building schedule risk analysis using Monte-Carlo simulation", *IRJET*, 02(04), pp. 1402-1406 (July 2015).
- Hu, W. and He, X. "An innovative time-cost-quality tradeoff modeling of building construction project based on resource allocation", *The Scientific World Journal*, (2014). DOI: 10.1155/2014/673248.
- Bock, S. and Pütz, M. "Implementing value engineering based on a multidimensional quality-oriented control calculus within a target costing and target pricing approach", *International Journal of Production Economics*, In Press, Accepted Manuscript (2016).
- Rachwan, R., Abotaleb, I. and Elgazouli, M. "The Influence of value engineering and sustainability considerations on the project value", *Procedia Environmental Sciences*, 34, pp. 431-438 (2016).
- Chan, F.T.S. and Kumar, N. "Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach", *Omega*, 35(4), pp. 417-431 (2015).

منابع (References)

- Emamjomezade, M. "Comparison of some projects constructed with various construction systems", *First Conference on Project Management*, Ariana Group, Tehran (2004).
- Hajiheidari, N. and Rahmati, F. "Risk analysis for it projects using system dynamics", *Journal of Production and Operations Management*, 9(1), pp. 119-137 (2018).
- Purnusa, A. and Bodeab, C.-N. "Correlation between time and cost in a quantitative risk analysis of construction projects", *Procedia Engineering* (2016).
- Zayed, T., Amer, M. and Pan, J. "Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP", *Int. J. Proj. Manag.*, 26(4), pp. 408-419 (2017).
- Lyons, T. and Skitmore, M. "Project risk management in the queensland engineering construction industry: a survey", *Internashnal Journal of Project* , 22(1), pp. 51-60 (2003).
- Atabay, S. and Galipogullari, N. "Application of value engineering in construction projects", 10th International

23. Behncke, F.G.H., Maisenbacher, S. and Maurer, M. "Extended model for integrated value engineering", *Procedia Computer Science*, **28**, pp. 781-788 (2014).
24. El-Rayes, K. and Kandil, A. "Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**(4), pp. 477-486 (2005).
25. Khaleidian, F. and Momeni, M. "Measuring the performance of time and quality of project execution under uncertainty", *Journal of Production and Operations Management*, **12**(2), pp. 71-91 (2021).
26. Khamooshi, H. and Golafshani, H. "EDM: earned duration management, a new approach to schedule performance management and measurement", *International Journal of Project Management*, **32**(6), pp. 1019-1041 (2014).
27. Chen, W.T., Merrett, H.C., Liu, S.S. and et al. "A decade of value engineering in construction projects", *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-13 (2022).
28. Elhegazy, H. "State-of-the-art review on benefits of applying value engineering for multi-story buildings", *Intelligent Buildings International*, pp. 1-20 (2020).
29. Hajialikhani, M., Azizi, M. and Sobhieh, M. "A review on the challenges of megaprojects and their inducing factors", *13th Conference on Project Management*, Tehran (2017).
30. Kargar, Sh.H. "Vulnerability study of mehr housing projects from contract-making point of view", Master Thesis, Yazd Islamic Azad University (2014).
31. Tsang, E.W. "Generalizing from research findings: the merits of case studies", *International Journal of Management Reviews*, **16**(4), pp. 369-383 (2014).
32. Wikfeldt, E. "Generalising from case studies", Halmstad University (2016).
33. Rangamiz, M. "Risk management in water and sewage projects using Monte Carlo simulation method", MSc Thesis, Khavarani Higher Education Institute, Mashhad (2008).
34. Nabizade, M., Mosaedi, A., Hesam, M. and et al. "Forecasting of River flow using ANFIS", *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, **5**(17), pp. 7 -14 (2011).

پیوست ۱. جدول پرسش نامه‌ی پژوهش، حاوی معیارهای انتخاب شده.

ضریب تاثیر	تاثیر معیارهای عملکرد مهندسی ارزش در ارتقاء ارزش پژوهی عمرانی بزرگ مقیاس	معیار	نمره		
معیارها	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۱	دسترسی کامل به تمامی اطلاعات پژوهه و همکاری و هماهنگی سازمان های ذیربطری با عوامل پژوهه	دسترسی کامل به تمامی اطلاعات پژوهه و همکاری و هماهنگی سازمان های ذیربطری با عوامل پژوهه	۱		
۲	مدیریت مناسب و تعدد ریز پژوهه ها در اجرای کل پژوهه و ایجاد هماهنگی ها و استفاده از پیمانکاران جزء به جای اجرای یکپارچه	مدیریت مناسب و تعدد ریز پژوهه ها در اجرای کل پژوهه و ایجاد هماهنگی ها و استفاده از پیمانکاران جزء به جای اجرای یکپارچه	۲		
۳	تجهیز کامل و مناسب کارگاه در کلیه مراحل	تجهیز کامل و مناسب کارگاه در کلیه مراحل	۳		
۴	آموزش مستمر و مناسب کارکنان و نیروی انسانی متخصص	آموزش مستمر و مناسب کارکنان و نیروی انسانی متخصص	۴		
۵	تناسب مؤلفه های پژوهه با نیازهای اقتصادی و اجتماعی منطقه ای احداث	تناسب مؤلفه های پژوهه با نیازهای اقتصادی و اجتماعی منطقه ای احداث	۵		
۶	دسترسی به اطلاعات لازم مشاوره و طراحی	دسترسی به اطلاعات لازم مشاوره و طراحی	۶		
۷	اجرای مطلوب سازی هی و معماری پژوهه و به کارگیری داشن	اجرای مطلوب سازی هی و معماری پژوهه و به کارگیری داشن	۷		
۸	مدیریت پژوهه، نرم افزارهای تخصصی کنترل و برنامه ریزی پژوهه تهییه ای بانک اطلاعاتی جامع در پژوهه از صفر تا صد و به رو زمانی گزارش های فنی روزانه	مدیریت پژوهه، نرم افزارهای تخصصی کنترل و برنامه ریزی پژوهه تهییه ای بانک اطلاعاتی جامع در پژوهه از صفر تا صد و به رو زمانی گزارش های فنی روزانه	۸		
۹	انجام مطالعات پایه ای، امکان سنجی و ضرورت اجرای پژوهه و ثبات در نقشه ها و جزئیات و عدم تغییرات زیاد در کار	انجام مطالعات پایه ای، امکان سنجی و ضرورت اجرای پژوهه و ثبات در نقشه ها و جزئیات و عدم تغییرات زیاد در کار	۹		
۱۰	بررسی دقیق معارضان طرح و عدم تأخیر در تحویل زمین به پیمانکار برنامه ریزی تا خریدار فازهای مختلف اجرایی و ثبات در برنامه ریزی در طول پژوهه و رعایت برنامه های زمان بندی	بررسی دقیق معارضان طرح و عدم تأخیر در تحویل زمین به پیمانکار برنامه ریزی تا خریدار فازهای مختلف اجرایی و ثبات در برنامه ریزی در طول پژوهه و رعایت برنامه های زمان بندی	۱۰		
۱۱	(برنامه ریزی و کنترل پژوهه)	(برنامه ریزی و کنترل پژوهه)	۱۱		
۱۲	جلوگیری از تداخل مستولیت ها و وظایف افزاید در بخش های مختلف اجرایی و تغییر وظایف نیروها در جهت کاهش تداخلات کاری	جلوگیری از تداخل مستولیت ها و وظایف افزاید در بخش های مختلف اجرایی و تغییر وظایف نیروها در جهت کاهش تداخلات کاری	۱۲		
۱۳	نظرات مستمر در تمام طول انجام پژوهه و حذف تأخیرهای اجرایی عدم تأخیر در تأمین و تهییه نقشه ها و جزئیات طرح	نظرات مستمر در تمام طول انجام پژوهه و حذف تأخیرهای اجرایی عدم تأخیر در تأمین و تهییه نقشه ها و جزئیات طرح	۱۳		
۱۴	برگزاری جلسات منظم تخصصی بین ارکان مختلف پژوهه و به کارگیری مشاورین خبره و کارشناس در طول پژوهه	برگزاری جلسات منظم تخصصی بین ارکان مختلف پژوهه و به کارگیری مشاورین خبره و کارشناس در طول پژوهه	۱۴		
۱۵	۱۵				
۱۶	تخصیص صحیح بودجه در بخش های مختلف پژوهه و تأمین و تدارک تعداد نیروی انسانی مناسب با حجم پژوهه وجود دستورالعمل ها و بخش نامه های فنی لازم و یا نقص در آینه نامه های اجرایی	تخصیص صحیح بودجه در بخش های مختلف پژوهه و تأمین و تدارک تعداد نیروی انسانی مناسب با حجم پژوهه وجود دستورالعمل ها و بخش نامه های فنی لازم و یا نقص در آینه نامه های اجرایی	۱۶		
۱۷	۱۷				
۱۸	انتخاب مشاور ناظر و پیمانکار مناسب برای پژوهه و تعیین حیطه کامل مستولیت مشاور، ناظر و پیمانکار	انتخاب مشاور ناظر و پیمانکار مناسب برای پژوهه و تعیین حیطه کامل مستولیت مشاور، ناظر و پیمانکار	۱۸		
۱۹	تأمین شرایط مناسب و الزامی اجرایی (بهداشتی، درمانی، زیست محیطی و ...) و تأمین منابع مالی لازم تا پایان پژوهه	تأمین شرایط مناسب و الزامی اجرایی (بهداشتی، درمانی، زیست محیطی و ...) و تأمین منابع مالی لازم تا پایان پژوهه	۱۹		
۲۰	جهانگیری مناسب بر اساس نوع پژوهه و موقعیت جغرافیائی توجه و ملاحظه ای تورم اقتصادی در بودجه بندی و برآوردهای پژوهه و برآورد دقیق هزینه ها و محاسبه های ریزاقلام کار در ابتدا	جهانگیری مناسب بر اساس نوع پژوهه و موقعیت جغرافیائی توجه و ملاحظه ای تورم اقتصادی در بودجه بندی و برآوردهای پژوهه و برآورد دقیق هزینه ها و محاسبه های ریزاقلام کار در ابتدا	۲۰		
۲۱	انعقاد قرارداد صحیح و کارآمد حقوقی با مشاور، ناظر و پیمانکار (تدوین نظام مناسب مناقصه)	انعقاد قرارداد صحیح و کارآمد حقوقی با مشاور، ناظر و پیمانکار (تدوین نظام مناسب مناقصه)	۲۱		
۲۲	به کارگیری تکنولوژی نوین در ساخت و برنامه ریزی مناسب تأمین و تدارک مصالح و ابزار لازم در هر مرحله از پژوهه	به کارگیری تکنولوژی نوین در ساخت و برنامه ریزی مناسب تأمین و تدارک مصالح و ابزار لازم در هر مرحله از پژوهه	۲۲		
۲۳	ثبت مدیریتی کلان و جزء در پژوهه و توجه به زمان بندی به موقع	ثبت مدیریتی کلان و جزء در پژوهه و توجه به زمان بندی به موقع	۲۳		
۲۴	پرداخت ها در کارگاه	پرداخت ها در کارگاه	۲۴		
۲۵	ارتقاء وضع رفاهی نیروی انسانی و ارتقاء انگیزه و فرهنگ کار گروهی و بهره بردن از خرد جمعی	ارتقاء وضع رفاهی نیروی انسانی و ارتقاء انگیزه و فرهنگ کار گروهی و بهره بردن از خرد جمعی	۲۵		

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر افزودن الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر

علی حیدری ^{*}(دانشیار)

فرید نادری شورابی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه هندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و هندسی، دانشگاه شهرکرد

مهمنگی
دروی ۳ - ۲، شماره ۱ / ۳، ص. ۲۵-۲۶، (پژوهشی)
مهمنگی عمران شرتف، (جمهوری اسلامی ایران ۱۴۰۱)

بتن پودری واکنش‌پذیر، یکی از انواع بتن‌های پر مقاومت است، که با توجه به تراکم مناسب ریزساختار، مقاومت فشاری بالایی در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ مکاپسکال دارد. از دیگر ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر، مدول کشسانی بالا، تخلخل کم و جذب آب پایین آن است. در پژوهش حاضر، با بررسی رفتار مقاومتی و ریزساختار بتن مشاهده شد که با افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر از ۱/۲ به ۱/۲، شرایط تشکیل ژل سیلیکات‌کلسیم هیدراته بهبودیافت و ریزترک‌ها کاهش پیدا کرده است. همین امر موجب بهبود خواص بتن، نظیر: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب در نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ در مقایسه با نسبت ماسه به سیمان ۱ شده است. همچنین مطابق نتایج به دست آمده، افزودن ۴ تا ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه، ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر نظیر: مقاومت‌های فشاری، خمی و کششی و رفتار دامی بتن در برابر نفوذ آب بهبود یافته است. این در حالی است که افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه، خواص مقاومتی بتن پودری واکنش‌پذیر را تضعیف کرده است.

heidari@sku.ac.ir
Fariidnaderii@gmail.com

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنش‌پذیر، الیاف شیشه، ماسه‌ی سیلیسی، میکروسکوپ الکترونی.

۱. مقدمه

(۱۸) بیان کرد که بتن پودری واکنش‌پذیر در برابر بخی زدگی و نفوذ یون‌ها مقاوم است. [۶-۷] میهربان (۲۰۲۰) گزارش کردند که به دلیل عدم استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت، بتن پودری واکنش‌پذیر در نظر بخی پژوهشگران به عنوان ملات شناخته می‌شود، اما در مقابل بخی دیگر از آنها بر این باورند که وجود الیاف و مقدار بالای سیمان، دلیل کافی برای نام‌گذاری بتن بر ماده‌ی مذکور است. [۸]

در مطالعات دیگری، حیدری و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مکاپسکال را بتن پرمقاومت می‌نامند. یکی از انواع بتن‌های پرمقاومت، بتن پودری واکنش‌پذیر است، که با هزینه‌ی قابل توجیه می‌تواند به مقاومت بالای ۱۰۰ مکاپسکال برسد. [۹]

از عوامل مؤثر در رسیدن به چنین مقاومت‌های بالایی در بتن پودری واکنش‌پذیر را می‌توان به استفاده از شن و ماسه با دانه‌بندی و شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن بزرگ‌ترین دانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت ماسه به سیمان مناسب برای همگنی بیشتر را نام برد، که طبق گزارش‌های ریچارد و همکاران (۱۹۹۵)، بتن پودری واکنش‌پذیر را به یک بتن قدرتمند تبدیل کرده‌اند. [۱۰]

مطالعات باقری و همکاران (۲۰۰۷)، در زمینه‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن، رفتار آن ترددتر می‌شود؛ لذا رفتار بتن

بتن بدون شک پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی مصرفی عصر حاضر در دنیاست و بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ ساختمانی و نیز بسیاری از سازه‌های بندری و دریایی، اسکله‌ها و پل‌ها از بتن ساخته می‌شوند. ضمن آن‌که حتی در ساختمان‌های با اسکلت فولادی نیز، بسیاری از قسمت‌ها از جمله: پی‌ها، کف‌ها و اندودها از بتن و یا ملات تشکیل شده‌اند. بنا بر این لازم است مهندسان عمران و دست‌اندرکاران صنعت ساختمان، به خوبی بتن و خصوصیات آن را شناخته و درک کاملی از عوامل تأثیرگذار در رفتار و کیفیت بتن داشته باشند. [۱۱]

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه‌ی فناوری بتن در دهه‌ی نود میلادی در فرانسه رخ داده است، ابداع بتن پودری واکنش‌پذیر است. عمل توجه پژوهشگران به بتن پودری واکنش‌پذیر، ویژگی‌های رفتاری و مکانیکی عالی آن است. بتن پودری واکنش‌پذیر از ماسه‌ی سیلیسی، پودر سیلیس، سیمان، میکروسیلیس، پودر کوارتز، آب، فوق روانکننده و در صورت نیاز به مقاومت کششی یا جذب انرژی بالا، الیاف فولادی تشکیل شده است. بتن پودری واکنش‌پذیر علاوه بر مقاومت‌های فشاری و کششی بالا، دارای خصوصیات عملکردی بالایی، نظیر: مقاومت سایشی و خوردگی بالا، نفوذپذیری کم و تخلخل پایین، و نیز دام زیاد است. [۱۲] همچنین عادل قسمی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲، ۱۴۰۱، ۱۴۰۱، اصلاحیه ۱۹، ۱۴۰۱، پژوهش ۲۹، ۱۴۰۱، ۶، ۲۹

DOI:10.24200/J30.2022.60199.3098

طی گزارش تام و همکاران (۱۲۰۲)، گرمای هیدراتاسیون بالا در بتن پودری واکنش‌پذیر می‌تواند مشکلاتی را از لحاظ مقاومت و دوام ایجاد کند؛ همچنین بالا رفتن گرمای هیدراتاسیون سبب مشکلات در جمع‌شدگی بتن پودری واکنش‌پذیر می‌شود.^[۲۳] به منظور امتداد مطالب بیان شده در پژوهش حاضر، ابتدا افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر ارزیابی و پس از آن با افزودن مقادیر مختلف نسبت الیاف شیشه به نمونه‌های ساخته شده، رفتار بتن بررسی شده است.

۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

افزایش نسبت ماسه به سیمان تا میران نسبت مخصوصی موجب اصلاح رفتار بتن در برخی ویژگی‌ها می‌شود.^[۲۴] جهت بررسی رفتار بتن پودری واکنش‌پذیر در افزایش نسبت ماسه به سیمان، ابتدا ۵ طرح با نسبت‌های ماسه به سیمان ۱/۱، ۱/۲، ۱/۲۵ و ۱/۳ ارزیابی شده و سپس با الیاف شیشه به میران ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن به هر کدام از نسبت‌های ذکر شده، مناسب‌ترین نسبت جایگزینی ماسه به سیمان و درصد الیاف افزوده شده به بتن پودری واکنش‌پذیر مشخص شده است.

۱.۲ مواد مصرفی و طرح‌های اختلاط

مصالح مصرفی در طی فرایند ساخت آزمایشگاهی، شامل: سیمان، ماسه‌ی سیلیسی، آب، فوق روان‌کننده و الیاف شیشه بوده است. به جهت میران بالای سیمان، سیمان مصرف شده جهت ساخت نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ و ۱-۵۲۵ بوده است. در پژوهش حاضر، از سیمان ۱-۵۲۵-۱ شهربکرد استفاده شده است. ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده از معادن شرکت ماسه‌ی ریخته‌گری چیروک طبیعی است. از آنجایی که میران سیمان استفاده شده در طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنش‌پذیر زیاد بوده است، سیمان به عنوان یکی از تأثیرگذارترین مواد در ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر شناخته می‌شود؛ لذا شناخت دقیق ترکیب‌های شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی مصرفی در بتن، موجب تحلیل دقیق تر رفتار آن می‌شود. مشخصات شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. جهت بررسی مواد تشکیل‌دهنده‌ی ماسه‌ی سیلیسی، نتایج آزمون XRF مطابق استاندارد ASTM E ۱۶۲۱-۵ بیان شده است.^[۲۵]

استفاده از سنگ‌دانه‌های ریز با اندازه‌ی بیشینه‌ی مشخص، موجب رسیدن به یک بتن همگن با ساختار میکروسکوپی عالی می‌شود. اندازه‌ی دانه‌ها در بتن

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی.

سیمان شهربکرد	ماسه‌ی سیلیسی
-	0.79 ± 0.62 Insol
۹۷-۹۹	$20/30 \pm 0/20$ SiO _۲
۰/۴-۱/۷	$5/65 \pm 0/15$ Al _۲ O _۳
۰/۲-۰/۶	$2/30 \pm 0/15$ Fe _۲ O _۳
۰/۰۷-۰/۲	$65/70 \pm 0/20$ CaO
-	$\leq 1/6$ MgO
-	$\leq 2/8$ SO _۲
۰-۰/۰۱	$0/27 \pm 0/03$ Na _۲ O
۰/۰۲-۰/۰۶	$0/58 \pm 0/04$ K _۲ O

پودری واکنش‌پذیر نسبت به بتن مقاومت بالای معمولی ترددتر است.^[۱۱]

در ادامه، بررسی خواص بتن پودری واکنش‌پذیر ژیان زین^۲ و همکارانش (۲۰۰۴)، طی مطالعات خود نشان داده‌اند که در بتن مذکور برای رسیدن به تخلخل کمتر و یک بتن مترادف تر می‌توان از برخی مواد پوزلزنی استفاده کرد.^[۱۲] لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی تأثیر سنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌های مختلف در بتن پودری واکنش‌پذیر انجام شده است، که به عنوان مثال، تأثیر افزودن و جایگزینی پودر سنگ آهک، ضایعات سنگ گرانیت، افزودن سنگ‌دانه‌های سبک جهت رسیدن به بتن پودری واکنش‌پذیر اشاره کرد.^[۱۳-۱۴]

بهبود خواص به بتن پودری واکنش‌پذیر اشاره کرد.^[۱۵-۱۶] بتن پودری واکنش‌پذیر از جمله مواد ساختمانی است که تا امروزه در صنعت ساخت و ساز بسیار کم استفاده شده و تاکنون به صورت عملی فقط در تیرهای پیش‌تیهدهی x شکل، حفاظت و نگهداری از زباله‌های هسته‌ی و ایزوله کردن ضایعات هسته‌ی بی در چندین پروژه در اروپا به کار رفته است. به عنوان نمونه‌ی دیگر جهت کاربرد بتن پودری واکنش‌پذیر در صنعت ساخت و ساز، می‌توان به ساخت یک پل با مقاطع بتنی بهینه به علت مقاومت بالای بتن پودری واکنش‌پذیر در کبک اشاره کرد.^[۱۷]

با بررسی ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر در مطالعات سایر پژوهشگران، باید توجه کرد که در کنار داشتن ویژگی‌های مناسب ذکر شده، بتن پودری واکنش‌پذیر در مقابل تنش‌های کششی، عملکرد ضعیفی دارد، که ضعف اخیر در بتن‌های معمولی با مسلح کردن آن به وسیله‌ی میلگرددهای فولادی و این فرض که بتن و فولاد، یک ماده‌ی همگن و ایزوتrop را تشکیل می‌دهند، رفع می‌شود؛ در حالی که چنین فرضی به علت عدم گسترش میلگرد در کل مقطع، صحیح به نظر نمی‌رسد. برای رفع مشکل اخیر، باید بتن پودری واکنش‌پذیر به یک کامپوزیت تبدیل شود. کامپوزیت ترکیبی است که از مخلوط کردن مواد با خصوصیات مختلف جهت تولید ماده‌ی جدید با خصوصیات بهبودیافته به وجود می‌آید.

ناصر و همکاران (۱۹۱۹-۲۰)، در گزارش‌های خود بیان کردند که بتن حاوی الیاف در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با به کارگیری الیاف تقویت‌کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت‌های کششی و فشاری آن را افزایش می‌دهد. ترکیب اخیر، امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده‌ی شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پرالنخا را فراهم می‌آورد.^[۱۸]

کرنچل و استانگ^۴ (۱۹۸۹)، نیز در گزارش‌های خود بیان کردند که با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل‌پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند.^[۱۹]

مطالعات انجام شده توسط سروشیان و همکاران (۱۹۹۰)، نشان می‌دهد که فاصله‌ی بین الیاف‌ها و مقاومت کششی، تعداد میانگین الیاف‌ها در واحد سطح و مقاومت فشاری بتن ارتباط وجود دارد. البته این ارتباط در تعداد میانگین الیاف‌ها و مقاومت فشاری تأثیر بیشتری دارد.^[۲۰]

تاکنون مصالح بسیاری جهت بهبود خواص بتن پودری واکنش‌پذیر به آن افزوده شده‌اند. الیاف شیشه با توجه به خواص مناسبی که به بتن معمولی می‌بخشد، می‌تواند در بتن پودری واکنش‌پذیر نیز عملکرد مناسبی نشان دهد. از این رو در پژوهش حاضر، به بررسی عملکرد الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر پرداخته شده است. در پژوهش حاضر به این نکته توجه شده است که بتن پودری واکنش‌پذیر، علاوه بر داشتن مزایای بسیار، یک نقطه ضعف اساسی دارد. میران بالای مصرف سیمان در فرایند تولید بتن پودری واکنش‌پذیر علاوه بر افزایش هزینه‌ی ساخت بتن مذکور سبب ایجاد گرمای هیدراتاسیون زیادی می‌شود.

جدول ۳. مشخصات الیاف شیشه‌ای مصرفی.

مقدار	ویژگی
$2/68 \text{ g/cm}^3$	وزن مخصوص
$14 \mu\text{m}$	قطر الیاف
کم	رسانایی الکتریکی
زیاد	مقاومت شیمیایی
15%	بیشینه‌ی 3%
5%	خروبی
$86^\circ\text{C} - 158^\circ\text{C}$	تخربی در آثر جرقه
$10 \times 10^6 \text{ psi} - 72 \text{ Gpa}$	نقله‌ی نرم شدن
$250 \times 10^3 \text{ psi} - 1700 \text{ Mpa}$	مدول کشسانی
$\leq 16\%$	مقاومت کششی
$15^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$	ZrO_2
	شرايط نگهداري

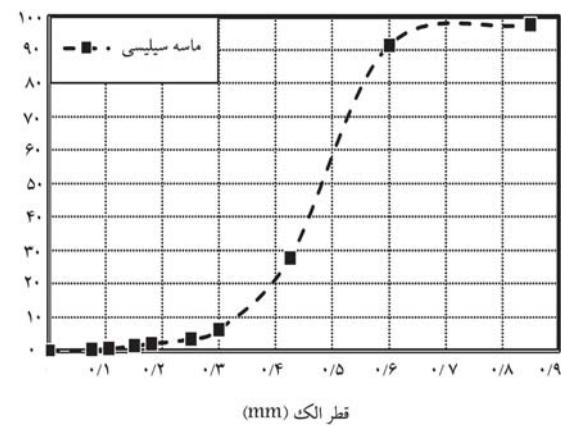
مختلف، تفاوت دارد. همچنین اضافه کردن الیاف شیشه به شدت در کاهش کارایی بتن تأثیرگذار است.^[۲۷، ۲۸] به همین منظور در طرح های حاوی الیاف شیشه با افزایش درصد الیاف شیشه در ساخت نمونه های بتن پودری واکنش پذیر با توجه به افزایش حجم مصالح خشک، نسبت فوق روان‌کننده به سیمان به منظور حصول کارایی در مقایسه با طرح های فاقد الیاف شیشه افزایش پیدا کرده است.

۳. روش انجام آزمایش

بتن پودری واکنش پذیر، یک بتن ایزوترب و همگن با روانی بالا است.^[۲۹] به منظور ساخت نمونه های بتنی مناسب با ویژگی های مطلوب، در مرحله ای اول، مصالح خشک، شامل سیمان و ماسه‌ی سیلیسی به طور کامل با یکدیگر مخلوط شده‌اند. در مرحله‌ی دوم، 80% از آب موردنیاز طرح به همراه دوز کامل فوق روان‌کننده به مخزن همزن اضافه و به مدت ۴ الی ۵ دقیقه، عملیات اختلاط انجام شده است. در مرحله‌ی سوم، الیاف شیشه (در طرح های حاوی الیاف) به مخلوط اضافه و با اضافه کردن 20% آب باقیمانده طرح، عملیات اختلاط ۱۰ دقیقه با سرعت 100 دور بر دقیقه ادامه یافته است.^[۲۹] سپس نمونه های بتن به قالب ها منتقل و به مدت 24 ساعت فرایند گیرش اولیه انجام شده است.

جهت بررسی رفتار بتن پودری واکنش پذیر در افزایش نسبت ماسه به سیمان و همچنین تأثیر افزودن الیاف شیشه به آن، آزمایش های مکانیکی نظری: مقاومت فشاری (ASTM C۳۹)،^[۳۰] مقاومت کششی (ASTM C۴۹۶)،^[۳۱] مقاومت خمی (ASTM C۲۹۳)،^[۳۲] نفوذناپذیری (EN ۱۲۳۹۰-۸)^[۳۳] و جذب آب (ASTM ۴۶۲-۹۷)^[۳۴] انجام شده است.

جهت انجام آزمون مقاومت فشاری از قالب های مکعبی به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی متر استفاده شده است. برای آزمون های مقاومت کششی، نفوذناپذیری و جذب آب از قالب های استوانه‌ی 10×20 سانتی متر و برای آزمون مقاومت خمی از قالب مکعبی $4 \times 4 \times 4$ سانتی متر استفاده شده است. نمونه های آزمایشگاهی پس از ساخت به قالب ها منتقل و پس از 24 ساعت از قالب ها خارج شدند. نمونه ها مطابق شکل ۲ تا زمان انجام آزمون به استخراج آب آهک اشیاع منتقل شدند. لازم به ذکر است که تمام نمونه ها طبق استاندارد C۱۹۲ ASTM^[۳۵] از زمان قالب گیری تا لحظه‌ی انجام آزمون در دمای (23 ± 2) درجه‌ی سلسیوس به صورت مرتبط در استخراج مطابق شکل ۳، عمل آوری و با توجه به شرايط آزمون مدنظر استخراج و بررسی شده‌اند.



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی.

جدول ۲. مشخصات فوق روان‌کننده‌ی مصرفی.

مشخصه	شرح
شکل ظاهری	مایع
رنگ	شفاف یا شیری
pH	$5 \sim 7$
Na ₂ O	کمتر از $1/5\%$
مقادیر کلراید	کمتر از 1%
چگالی	$1/0.1 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
میزان مصرف	5% الی 2% درصد وزن سیمان

پودری واکنش پذیر در بازه‌ی 200 تا 600 میکرومتر است.^[۱۰] به همین منظور ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر باید ابعاد مجاز سنج دانه‌ی بتن پودری واکنش پذیر باشد. دانه‌بندی ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده در فرایند ساخت نمونه های آزمایشگاهی در شکل ۱ مشاهده می شود، که مطابق آن، $89/1$ دانه های ماسه سیلیسی در بازه‌ی مجاز جهت ساخت بتن پودری واکنش پذیر قرار دارد. فوق روان‌کننده استفاده شده در پژوهش حاضر، Carboxal SR 5100 بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اتر تهیه شده از شرکت البرز شیمی آسیا بوده است، که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

الیاف شیشه‌ای مصرف شده از نوع AR بوده است، که به جهت کارایی مناسب، به ابعاد 15 میلی متر برش خورده است. مشخصات الیاف شیشه در جدول ۳ ارائه شده است. الیاف شیشه AR باید همراه با سیمان پرتابند استفاده شوند، زیرا زیرکونیوم موجود در آن، مانع برای واکنش میان سیمان و الیاف است.^[۲۵]

۲.۲. معرفی طرح های اختلاط

مطابق جدول ۴، در پژوهش حاضر مجموعاً 20 طرح اختلاط، شامل 5 طرح بدون الیاف شیشه با نسبت های ماسه به سیمان $1/3$ و $1/2$ و $1/1$ و $1/5$ طرح با نسبت ماسه به سیمان $1/3$ حاوی 4 ، 5 و 6 درصد حجم بتن الیاف شیشه ساخته و ارزیابی شده‌اند.

به منظور یکسان بودن کارایی طرح های ساخته شده، نمونه ها تحت آزمایش کارایی با میز سیلان مطابق با استاندارد BS ۱۸۸۱^[۳۶] قرار گرفته و تمام نمونه ها با کارایی در محدوده 190 میلی متر ساخته شدند. افزایش نسبت ماسه به سیمان موجب کاهش روانی بتن می شود،^[۳۶] از این رو نسبت آب به سیمان در ساخت طرح های

جدول ۴. معرفی طرح اختلاط نمونه‌های بتن.

نام طرح	سیمان	ماسه	آب	مصالح (kg/m ³)		الیاف شیشه	فوق روان‌کننده	الیاف شیشه	نسبت ماسه به سیمان	نسبت آب به سیمان	الیاف شیشه (%) در حجم بتن)								
				Cs1	Cs1/1	Cs1/2	Cs1/25	Cs1/3	Cs1G4	Cs1/1G4	Cs1/2G4	Cs1/25G4	Cs1/3G4	Cs1G5	Cs1/1G5	Cs1/2G5	Cs1/25G5	Cs1/3G5	
۰	۰/۲	۱	۰	۹/۷۳	۱۹۴/۵۷	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵
۰	۰/۲۱	۱/۱	۰	۹/۲۷	۱۹۴/۶۱	۱۰۱۹/۴۰	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲	۹۲۶/۷۲
۰	۰/۲۳	۱/۲	۰	۸/۸۱	۲۰۲/۶۶	۱۰۵۷/۳۸	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵	۸۸۱/۱۵
۰	۰/۲۴	۱/۲۵	۰	۸/۹	۲۰۶/۴	۱۰۷۵	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰	۸۶۰
۰	۰/۲۶	۱/۳	۰	۸/۳۷	۲۱۷/۵۱	۱۰۸۷/۵۵	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸	۸۳۶/۵۸
۴	۰/۲	۱	۷۴/۹۵	۱۴/۰۵	۱۸۷/۳۶	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲
۴	۰/۲۱	۱/۱	۷۱/۵۲	۱۳/۴۱	۱۸۷/۷۳	۹۸۳/۲۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷	۸۹۳/۹۷
۴	۰/۲۳	۱/۲	۶۸/۱۲	۱۲/۷۷	۱۹۵/۸۴	۱۰۲۱/۷۸	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹	۸۵۱/۴۹
۴	۰/۲۴	۱/۲۵	۶۶/۵۴	۱۲/۴۸	۱۹۹/۶۱	۱۰۳۹/۶۵	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲	۸۳۱/۷۲
۴	۰/۲۶	۱/۳	۶۴/۷۸	۱۲/۱۵	۲۱۰/۵۵	۱۰۵۲/۷۲	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹	۸۰۹/۷۹
۵	۰/۲	۱	۹۲/۷۹	۱۵/۷۷	۱۸۵/۵۸	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲
۵	۰/۲۱	۱/۱	۸۸/۵۹	۱۵/۰۶	۱۸۶/۰۳	۹۷۴/۴۵	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷	۸۸۵/۸۷
۵	۰/۲۳	۱/۲	۸۴/۴۱	۱۴/۳۵	۱۹۴/۱۵	۱۰۱۲/۹۶	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳	۸۴۴/۱۳
۵	۰/۲۴	۱/۲۵	۸۲/۴۷	۱۴/۰۲	۱۹۷/۹۳	۱۰۳۰/۸۸	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰	۸۲۴/۷۰
۵	۰/۲۶	۱/۳	۸۰/۳۱	۱۳/۶۵	۲۰۸/۸۲	۱۰۴۴/۰۸	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴	۸۰۳/۱۴
۶	۰/۲	۱	۱۱۰/۳۰	۱۷/۴۶	۱۸۳/۸۴	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰
۶	۰/۲۱	۱/۱	۱۰۵/۳۵	۱۶/۸۸	۱۸۴/۳۶	۹۶۵/۷۰	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱	۸۷۷/۹۱
۶	۰/۲۳	۱/۲	۱۰۰/۴۳	۱۵/۹۰	۱۹۲/۴۹	۱۰۰۴/۲۸	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰	۸۳۶/۹۰
۶	۰/۲۴	۱/۲۵	۹۸/۱۴	۱۵/۵۴	۱۹۶/۲۷	۱۰۲۲/۲۵	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰	۸۱۷/۸۰
۶	۰/۲۶	۱/۳	۹۵/۵۹	۱۵/۱۴	۲۰۷/۱۱	۱۰۳۵/۵۷	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹	۷۹۶/۵۹

راهنمایی: در نامگذاری طرح عدد پس از Cs بیانگر نسبت ماسه به سیمان و عدد پس از G درصد الیاف طرح را مشخص می‌کند.

۳. ارائه‌ی نتایج

۱.۳. نتایج مقاومت فشاری

جهت بررسی مقاومت فشاری بتن، ابتدا نمونه‌ها در سنین ۱۴، ۷، ۱ و ۰ روز از استخراج خارج شدن و درحالی اشباع با سطح خشک در محفظه‌ی جک بتن شکن قرار گرفتند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری، ۹۰ نیوتون بر ثانیه بوده است. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری و اکتشن‌پذیر، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان بارگذاری شده بودند. و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصدی‌های مختلف الیاف شیشه در شکل ۴ و اکتشن‌پذیر، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵، ۶ و ۷ درصد الیاف شیشه به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۷ مشاهده می‌شوند.

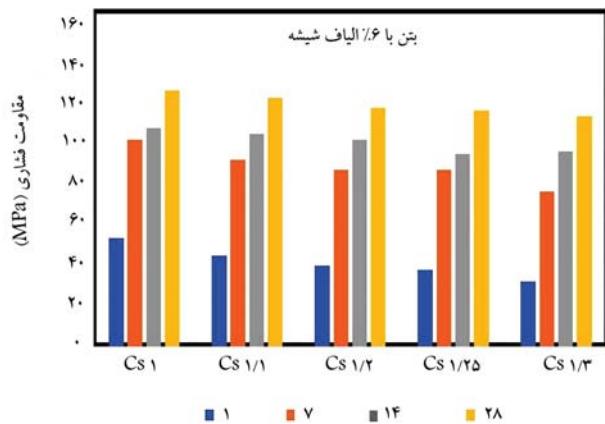
به منظور بررسی دوام نمونه‌ها هنگام خارج شدن از قالب در سن ۱ روز بر این نتایج تأثیر می‌گذارد، با افزایش نسبت ماسه به سیمان از نسبت ۱ تا $1/3$ مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است، که بر این مبنای نمونه‌های حاوی سیمان بیشتر به عمل گیرش اولیه سیمان $525-1$ جهت خارج شدن از قالب، دوام مناسب‌تری دارد. در سن ۷ روز، اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی سیمان بیشتر می‌شود. سایر نمونه‌ها کاهش یافته است. پس از سن ۱۴ روز، افزایش نسبت ماسه به سیمان $1/2$ (حاوی نسبت ماسه به سیمان $1/2$)، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن را افزایش داده و پس از آن، به ازاء مقداری بیشتر ماسه به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. در سن ۲۸ روز، بیشترین مقاومت فشاری مربوط



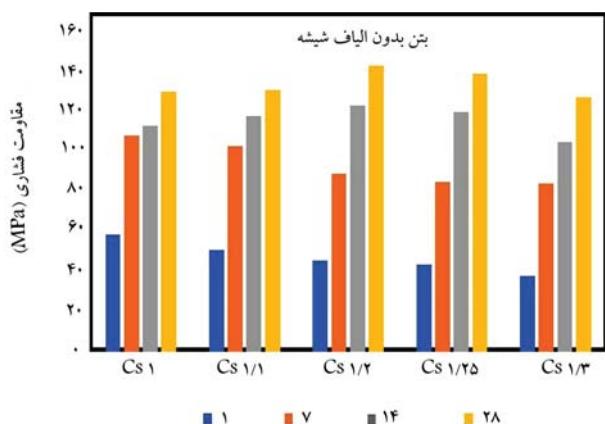
شکل ۲. تصویر سه طرح از نمونه‌های ساخته شده.



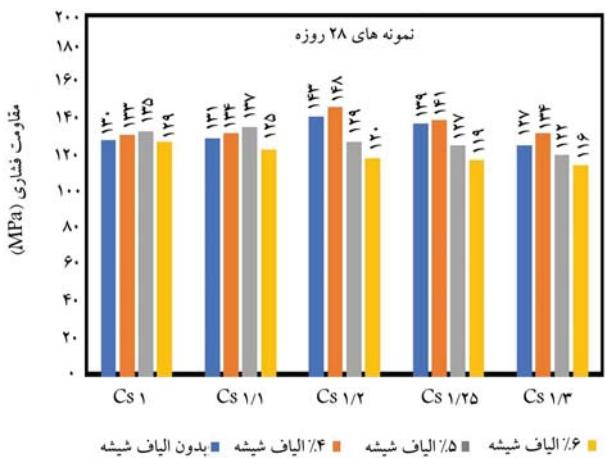
شکل ۳. استخراج عمل آوری نمونه‌های بتن.



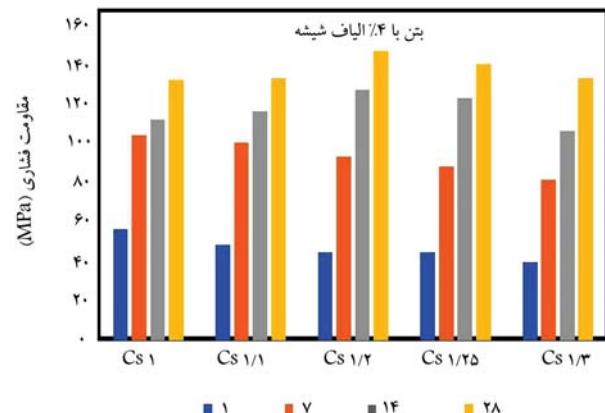
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۶٪ الیاف شیشه.



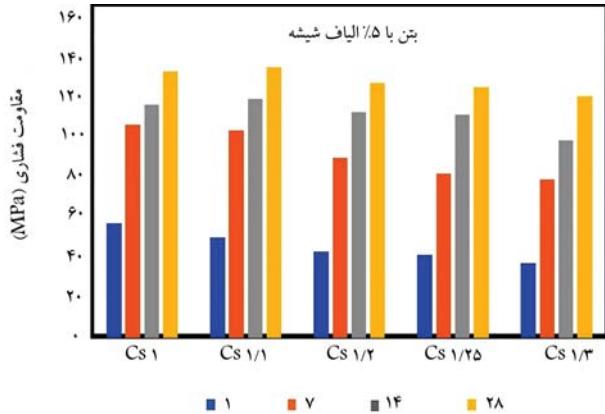
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



شکل ۸. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بنن.



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۴٪ الیاف شیشه.



شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵٪ الیاف شیشه.

نشان داده شده است. در سن ۱۴ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۱ تقریباً مشابه با نمونه فاقد الیاف شیشه بوده و پس از آن به ازاء نسبت ماسه به سیمان بیشتر، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است. در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتن نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه، افزایش پیدا کرده است؛ که بهترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه Cs 1/2 G ۴ با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ۱۴۸ مگاپاسکال بوده است.

بر مبنای نتایج شکل ۶، مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با افزودن ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر در سن ۱ روزه نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش یافته است. در سن ۷ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ی Cs 1G ۵ با نمونه‌ی Cs 1G ۵ برابر بوده و پس از آن مقاومت فشاری نمونه‌ها تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ افزایش یافته است و به ازاء مقادیر بیشتر ماسه به سیمان در نمونه‌های Cs 1/2G ۵، Cs 1/3G ۵ و Cs 1/25G ۵ مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه (Cs 1/۲ و Cs 1/۳) کاهش پیدا کرده است. در سنین ۱۴ و ۲۸ روز فقط در نمونه‌های Cs 1G ۵ و Cs 1/1G ۵ مقاومت فشاری افزایش یافته است، که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه Cs 1/1G ۵ با ۱۳۷ مگاپاسکال بوده است. بر مبنای نتایج شکل ۷، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر در سنین مختلف نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش یافته است. به طور کلی، مطابق آنچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در نسبت ماسه به

به نمونه Cs 1/۲ با ۱۴۳ مگاپاسکال بوده است، که به میزان ۱۰٪ از مقاومت فشاری نمونه ۱ Cs 1/۲ بیشتر است. از طرف دیگر، نمونه Cs 1/2G ۴ با ۱۴۰ مگاپاسکال بوده است، که به نمونه Cs 1/۲ با ۱۰٪ افزایش نسبت ماسه به سیمان رفتار مشابه با نمونه Cs 1/۲ داشته است. بنابراین تأثیر گام افزایشی ۱۰٪ در مقایسه با گام افزایشی ۵٪ قابل توجه است. مطابق شکل ۵، افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر مقاومت فشاری نمونه‌های ۱ و ۷ روزه را نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش داده است. در سن ۷ روز، مقاومت فشاری نمونه‌های Cs 1/۲ G ۴ و Cs 1/25 G ۴ به میزان ۵/۶ و ۴/۶ درصد، بیشتر از نمونه‌های فاقد الیاف شیشه

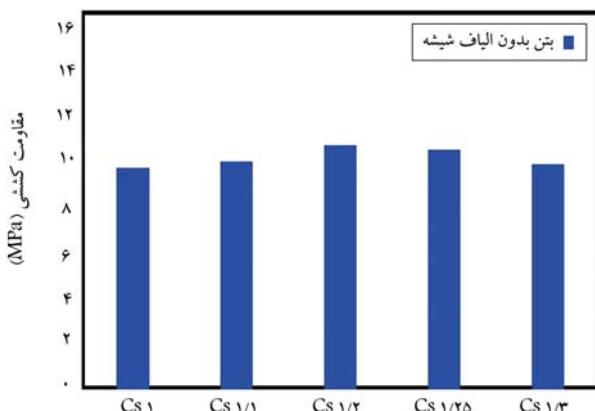
بن الیاف شیشه بیشتر بوده است. مطابق با نتایج بیشترین افزایش مقاومت خمی در نمونه های حاوی افزودن ۴٪ حجم بن الیاف شیشه، مربوط به نمونه های $CS_1/3G_4$ و $CS_1/2G_4$ با افزایش $11/7$ و $14/34$ درصد نسبت به نمونه های $CS_1/25$ و $CS_1/3$ بوده است. این مقادیر برای نمونه های $CS_1/2G_5$ و $CS_1/3G_5$ به میزان $21/4$ و $24/03$ درصد نشان داده شده است. همچنین در تمام نسبت های ماسه به سیمان مطابق با نتایج شکل ۱۰، افزودن ۶٪ حجم سیمان الیاف شیشه موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه ها شده است.

٣.٣ نتایج مقاومت کششی

جهت بررسی مقاومت کششی بتن، نمونه های با سن ۲۸ روزه پس از خارج شدن از استخیر، با قرارگیری زیر جک به روش بربزیلین بررسی شدند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه های استوانه ای 10×20 سانتی متر، بر روی 90 نیوتون بر ثانیه تنظیم شده بود. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش پذیر، نتایج مقاومت کششی نمونه های فاقد الیاف شیشه در شکل ۱۱ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد های مختلف الیاف شیشه در بتن پودری واکنش پذیر، نتایج مقاومت کششی نمونه های حاوی 4 ، 5 و 6 درصد الیاف شیشه در شکل ۱۲ مشاهده می شود.

افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتون پودری واکنش پذیر مطابق با نتایج شکل ۱۱، موجب افزایش مقاومت کششی نمونه های بتون شده است. افزایش نسبت ماسه به سیمان نا نسبت ۱/۲ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت کششی نمونه های بتون داشته است. مطابق با نتایج، نمونه $\text{Cs1}/2$ مقاومت کششی $10/95$ مگاپاسکال را نشان داده است، که به میزان $10/5$ ٪ بیشتر از نمونه Cs1 بوده است. پس از آن با افزایش نسبت ماسه به سیمان در نمونه های بتون، مقاومت فشاری نسبت به نمونه $\text{Cs1}/2$ کاهش یافته و مطابق نتایج در نمونه $\text{Cs1}/3$ ، به میزان $1/5$ ٪ نسبت به نمونه Cs1 مقاومت فشاری بیشتر بوده است.

در شکل ۱۲، مقاومت کششی نمونه های حاوی الیاف شیشه مشاهده می شود؛ که مطابق آن، افزودن الیاف شیشه به نمونه های بتون پودری واکنش پذیر به ازاء تمام درصد ها موجب افزایش مقاومت کششی شده است. بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه های G5 ، Cs1/G5 ، Cs1/2G5 ، Cs1/1G5 و Cs1/3G5 به وزن سیمان الیاف شیشه با $10/9$ ٪، $12/25$ ، $13/75$ ، $15/5$ و $13/2$ مگاپاسکال بوده است.



شکل ۱۱. مقاومت کششی نمونه‌های فاقد الیاف ششمه.

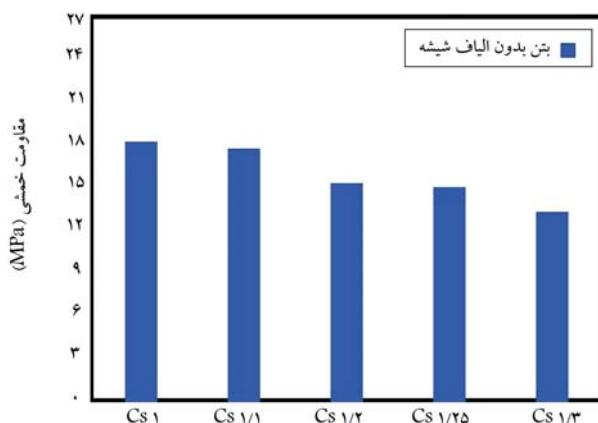
سیمان ۱ و ۱/۱، افزودن ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه و در نسبت های ۱/۲، ۱/۲۵ و ۱/۳، افزودن ۴٪ حجم سیمان الیاف شیشه، موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها شده است.

٢.٣. نتایج مقاومت خمشی

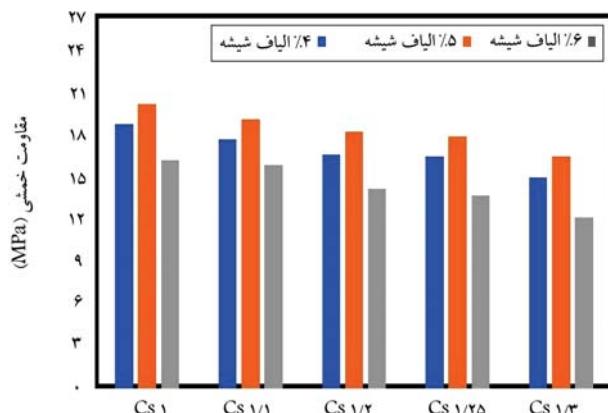
جهت بررسی مقاومت خمیشی بتن، طبق استاندارد، نمونه‌ها در سن ۲۸ روز پس از عمل آوری بررسی شدند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های $4 \times 4 \times 16$ سانتی‌متر بر روی ۵۵ نیوتن بر ثانیه تنظیم شده بود. نتایج مقاومت خمیشی نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۹ و نتایج مقاومت خمیشی نمونه‌های حاوی افزودن ۳، ۴ و ۵ درصد حجم بتن، الیاف شیشه‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۹، افزایش نسبت ماسه به سیمان در بن پودری واکنش پذیر موجب کاهش مقاومت خمشی نمونه های بتن شده است. بیشترین کاهش مربوط به افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱/۲ به میزان ۱۳/۴۲٪ بوده است. به طور کلی، کاهش میزان سیمان با افزایش نسبت ماسه به سیمان در طرح ها موجب کاهش چسبندگی بین ریزدانه ها در بتن می شود، همین این امر موجب پایین آمدن تحمل ریزدانه ها و کاهش مقاومت خمشی در نمونه های بتن شده است. [۴۹]

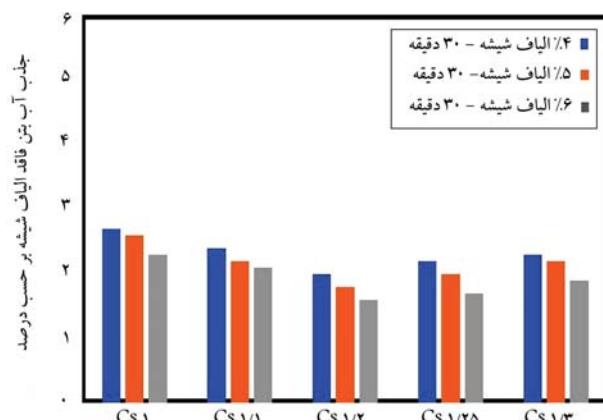
مطابق شکل ۱۰، در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان، افزودن ۴ و ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه شده است، که افزایش اخیر در نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم



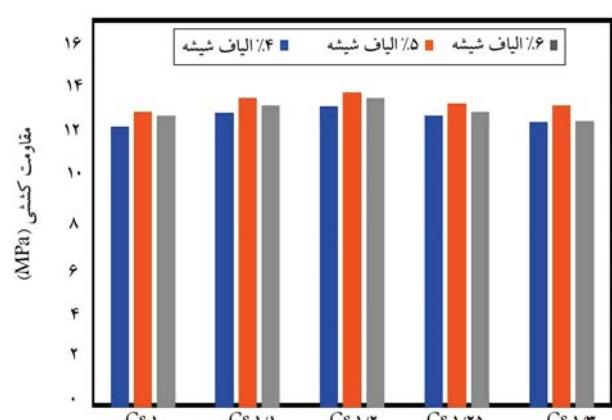
شکل ۹. مقاومت خمینی، نمونه‌های فاقد الایاف ششته.



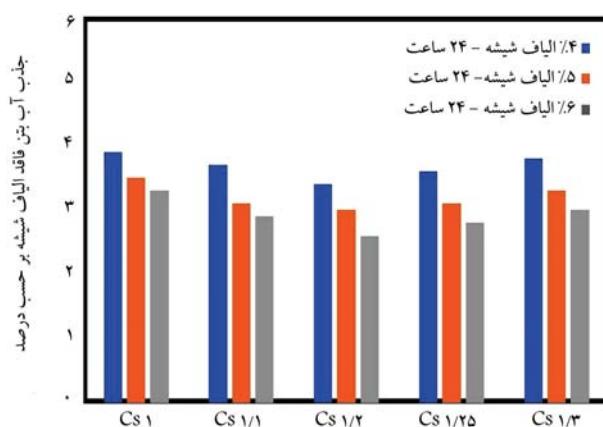
شکل ۱۰. مقاومت خمشی، نمونه‌های حاوی الیاف ششته.



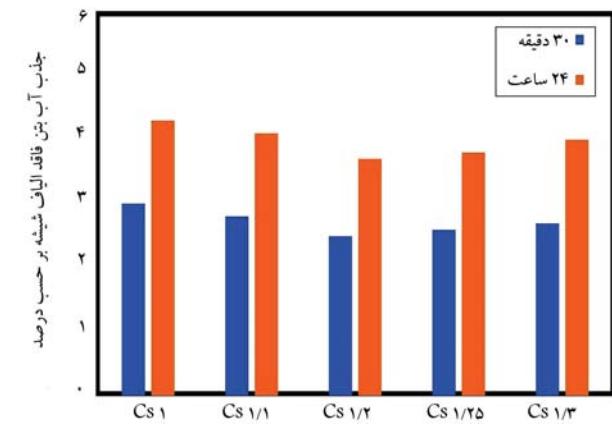
شکل ۱۴. جذب آب کوتاه‌مدت نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



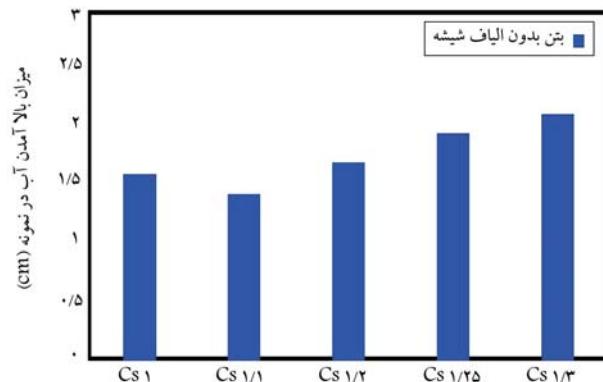
شکل ۱۲. مقاومت کشی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



شکل ۱۵. جذب آب بلند‌مدت نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



شکل ۱۳. جذب آب نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



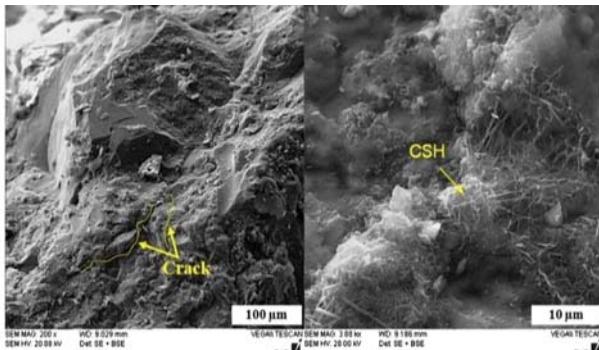
شکل ۱۶. نفوذناپذیری آب نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.

۵. نتایج نفوذناپذیری آب نمونه‌ها

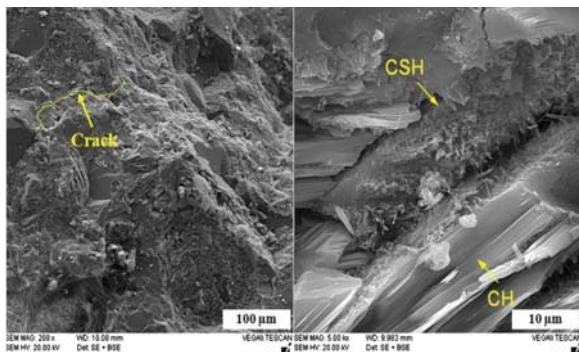
جهت بررسی نفوذناپذیری آب در بتن، نمونه‌های استوانه‌ای 10×20 سانتی‌متر با سن ۲۸ روزه پس از خارج شدن از استخراج، در دستگاه نفوذناپذیری آب در بتن با فشار، ۵ بار تحت آزمایش قرار گرفتند. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری و اکشن‌پذیر، نتایج نفوذناپذیری نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۱۶ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف الیاف شیشه در بتن پودری و اکشن‌پذیر نتایج نفوذناپذیری نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۳، با افزایش نسبت ماسه به سیمان در نمونه‌ی CS 1/2 آب بلند‌مدت (۲۴ ساعت) نماینده ۳/۸٪ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، به طور کلی جذب آب نمونه‌های بتن تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ کاهش و پس از آن، جذب آب نمونه‌های بتن مجدد افزایش یافته و در نمونه‌ی CS 1/3 جذب آب برابر با ۴٪ مشاهده می‌شود. بیشترین جذب آب با ۴/۳٪ مریبوط به نمونه‌ی CS 1 با کمترین نسبت ماسه به سیمان بوده است.

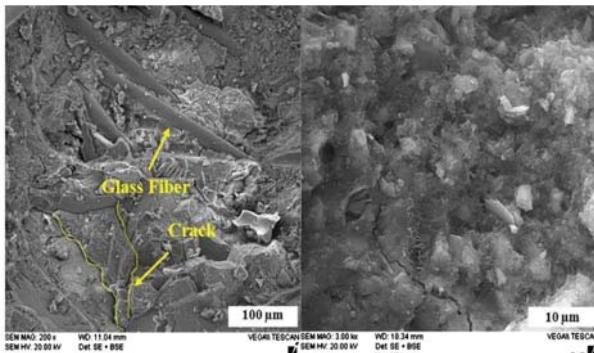
در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نتایج جذب آب کوتاه‌مدت و بلند‌مدت نمونه‌های بتن پودری و اکشن‌پذیر حاوی الیاف شیشه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها، جذب آب نمونه‌های بتن حاوی الیاف شیشه، در مقایسه با جذب آب نمونه‌های بتن ساخته شده با مصالح مشابه ولی فاقد الیاف شیشه کاهش یافته است، که علت این امر عدم جذب آب الیاف شیشه بوده است.^[۳۵] با افزایش درصد الیاف شیشه، جذب آب کاهش یافته و کمترین درصد جذب آب مریبوط به نمونه‌های حاوی ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه بوده است.



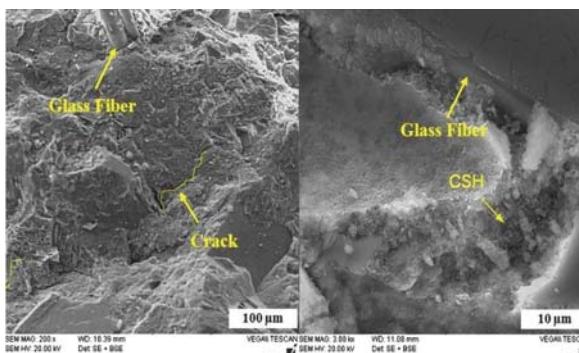
شکل ۱۸. تصاویر SEM طرح Cs1 با بزرگنمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



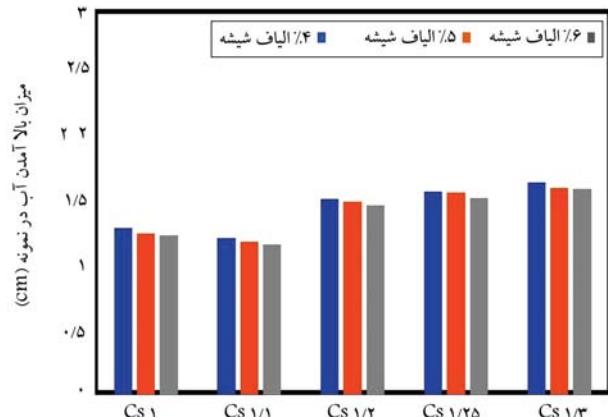
شکل ۱۹. تصاویر SEM طرح Cs1/2 با بزرگنمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۲۰. تصاویر SEM طرح Cs1G4 با بزرگنمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۲۱. تصاویر SEM طرح Cs1/2G4 با بزرگنمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۱۷. نفوذناپذیری آب نمونه‌های حاوی الاف شیشه.

مطابق تاییج شکل ۱۶، با افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نسبت ۱/۱ نفوذناپذیری آب در بتن پودری واکنش‌پذیر کاهش یافته است. سپس با افزایش نسبت ماسه به سیمان، به علت پایین آمدن میران چسبندگی ریزدانه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر، حفره‌ها و ریزترک‌ها افزایش و میران پیش روی آب نیز در نمونه‌های بتن افزایش یافته است.^[۲۶, ۲۷]

مطابق شکل ۱۷، در بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی الاف شیشه، افزایش نسبت ماسه به سیمان سبب شده است تا نسبت ۱/۱ موجب افزایش نفوذناپذیری آب در بتن شود. همچنین، افزایش درصد الاف شیشه در نمونه‌های بتن موجب افزایش میران نفوذناپذیری آب شده است. مشاهده می‌شود که افزایش درصد الاف شیشه مطابق آنچه در جذب آب نمونه‌های بتن رخ داده است، موجب دوام بهتر نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ آب شده است.

۳. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های Cs1/2، Cs1، Cs1G4 و Cs1/2G4 مشاهده می‌شود. فاز سیلیکات‌کالسیم هیدراته (C-S-H) بیش از ۵۰٪ حجم مواد جامد خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده را تشکیل داده و بنابراین، مهم‌ترین بخش مواد جامد خمیر در تعیین خواص آن بوده است. بلورهای هیدروکسیدکالسیم با پرتلندایت (CH) نیز حدود ۲۰ الی ۳۰٪ درصد حجم قسمت جامد خمیر هیدراته شده را تشکیل می‌دهند. برخلاف ناحیه‌ی C-S-H، هیدروکسیدکالسیم ترکیبی با فرمول مشخص $Ca(OH)_2$ است. نقش فاز CH به علت نیروهای واندروالسی در مقاومت بتن نسبت به نقش C-S-H محدود است. دوز بالای سیمان در RPC منجر به تشکیل مقدار زیادی ژل C-S-H بین افزایش سطح پودر و در نتیجه، افزایش بسته‌بندی ذرات آن می‌شود.^[۲۸] به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های بتن، نمونه‌های Cs1/2 و Cs1/2G4 با توجه به مناسب‌ترین رفتار مکانیکی و مقایسه با نمونه‌های Cs1 و Cs1G4 تصویربرداری شده است.

مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده شده در شکل‌های ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱، شرایط تشکیل ژل C-S-H در نمونه‌ی Cs1/2 مناسب‌تر از شرایط تشکیل ژل در نمونه‌ی Cs1 بوده و همین امر موجب افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی اخیر شده است. از طرف دیگر، کاهش جذب آب در نمونه‌ی Cs1/2، به علت کاهش ریزترک‌های نمونه‌ی بتن نسبت به نمونه‌ی Cs1 بوده است.

مطابق آنچه در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود، افزودن ۴٪ حجم بتن الاف شیشه به نمونه‌های Cs1 و Cs1/2، موجب کاهش ریزترک‌ها و هموارتر شدن

جدول ۵. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی فاقد الیاف شیشه نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

نوع رفتار	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
مقاومت فشاری	۲/۳	۶/۹۲	۱۰/۷۵	۰/۷۷	—
مقاومت خششی	-۲۶/۸۹	-۱۷/۵۱	-۱۵/۶۹	-۲/۶	—
مقاومت کششی	۱/۵	۸/۰۴	۱۰/۰۵	۳/۰۱	—
جذب آب	-۶/۹۷	-۱۱/۶۲	-۱۳/۹۵	-۴/۶۵	—
نفوذناپذیری آب	۳۱/۸۷	۲۱/۸۷	۶/۲۵	-۱۰/۶۲	—

جدول ۶. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

حاوی % الیاف	$Cs\frac{1}{1}/3/Cs\frac{1}{1}/3$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}/25$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}/2$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}/1$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
حاوی ۴% الیاف	۵/۵۱	۱/۴۳	۳/۴۹	۲/۲۹	۲/۳
حاوی ۵% الیاف	-۳/۹۳	-۸/۶۳	-۹/۷۹	۴/۵۸	۳/۸۴
حاوی ۶% الیاف	-۸/۶۶	-۱۴/۳۸	-۱۶/۰۸	-۴/۵۸	-۰/۷۶

جدول ۷. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت خمی نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

حاوی % الیاف	$Cs\frac{1}{1}/3/Cs\frac{1}{1}/3$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}/25$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}/2$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}/1$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
حاوی ۴% الیاف	۱۴/۲۳	۱۱/۷	۱۰/۲۷	۱/۷	۵/۱
حاوی ۵% الیاف	۲۶/۰۳	۲۱/۴	۲۰/۷۴	۹/۹۱	۱۳/۱
حاوی ۶% الیاف	-۷/۱۷	-۷/۳۵	-۶/۰۸	-۹/۰۶	-۹/۵۱

جدول ۸. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

حاوی % الیاف	$Cs\frac{1}{1}/3/Cs\frac{1}{1}/3$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}/25$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}/2$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}/1$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
حاوی ۴% الیاف	۲۳/۲۶	۱۸/۶	۲۰/۰۹	۲۵/۳۶	۲۳/۱۱
حاوی ۵% الیاف	۳۰/۶۹	۲۲/۲۵	۲۵/۵۷	۳۱/۷	۲۹/۶۴
حاوی ۶% الیاف	۲۳/۷۶	۲۰	۲۲/۲۸	۲۸/۷۸	۲۸/۱۴

جدول ۹. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

حاوی % الیاف	$Cs\frac{1}{1}/3/Cs\frac{1}{1}/3$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}/25$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}/2$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}/1$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
حاوی ۴% الیاف	-۵	-۵/۲۶	-۸/۱	-۹/۷۵	-۹/۳
حاوی ۵% الیاف	-۱۷/۵	-۱۸/۴۲	-۱۸/۹۱	-۲۴/۳۹	-۱۸/۶
حاوی ۶% الیاف	-۲۵	-۲۶/۳۱	-۲۹/۷۲	-۲۹/۲۶	-۲۴/۲۵

جدول ۱۰. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش نفوذپذیری آب نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

حاوی % الیاف	$Cs\frac{1}{1}/3/Cs\frac{1}{1}/3$	$Cs\frac{1}{1}/25/Cs\frac{1}{1}/25$	$Cs\frac{1}{1}/2/Cs\frac{1}{1}/2$	$Cs\frac{1}{1}/1/Cs\frac{1}{1}/1$	$Cs\frac{1}{1}/Cs\frac{1}{1}$
حاوی ۴% الیاف	-۲۱/۸	-۱۸/۹۷	-۱۰/۵۸	-۱۴/۶۸	-۱۸/۷۵
حاوی ۵% الیاف	-۲۳/۶۹	-۱۹/۴۸	-۱۱/۷۶	-۱۶/۷۸	-۲۱/۲۵
حاوی ۶% الیاف	-۲۴/۱۷	-۲۱/۵۳	-۱۳/۵۲	-۱۸/۱۸	-۲۲/۵

۴. تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

در جدول‌های ۵ الی ۱۰، مقادیر مقایسه‌ی نتایج خروجی آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری، خمی و کششی، جذب آب و نفوذ ناپذیری آب بتن نمونه‌های فاقد الیاف شیشه و نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه ارائه شده است. از مقایسه‌ی آنها می‌توان به صورت خلاصه، به این موارد اشاره کرد:

سطح نمونه‌های بتن شده است. همچنین با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲ در بتن حاوی الیاف شیشه، کاهش ریزترک‌ها موجب کاهش جذب آب و افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی $Cs\frac{1}{1}/2G\frac{4}{4}$ نسبت به نمونه‌ی $Cs\frac{1}{1}/G\frac{4}{4}$ شده است. کریستال‌های اترینگیت بین مواد هیدراته‌ی ناقص و ژل C-S-H تشکیل می‌شود.^[۲۹] مطابق شکل‌های اخیر، محصول اصلی هیدراتاسیون همگن، ژل C-S-H است. کریستال‌های $Ca(OH)_2$ یافت نشده و اترینگیت تشکیل شده است.^[۲۰]

۱۱. به طور کلی، مطابق با نتایج به دست آمده، الیاف شیشه بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان نداده‌اند. از طرف دیگر، در بتن حاوی الیاف شیشه، مقاومت کششی و خمی با طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. علت این امر مطابق مطالعات پیشین توانایی الیاف شیشه در مقاومت در برابر ترک هاست.^[۲۷]

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی مطالعات پیشین و اهمیت روزافزون بتن پودری واکنش‌پذیر در صنعت ساخت و ساز، در مطالعات حاضر به جهت بررسی امکان بهبود خواص و کاهش معایب بتن مذکور در ۵ طرح، ابتدا تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر و سپس در ۱۵ طرح، تأثیر افزودن مقادیر مختلف الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر با نسبت ماسه به سیمان مختلف بررسی شده و این نتایج به دست آمده است.

۱. افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱/۲ تا ۱/۲، موجب بهبود خواص بتن، نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب شده است. با توجه به ریزاسختار بتن، شرایط فاز سیلیکات‌کلسیم هیدراته نیز در این نسبت بهبود یافته و بیشترین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی ۱/۲ CS1 با نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ در مقایسه با نمونه‌ی CS1 بوده است، که با ۱۰٪ افزایش به ۱۴۳ مگاپاسکال رسیده است.

۲. افزودن الیاف شیشه به میزان ۴ و ۵ درصد حجم بتن موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن شده است. بیشترین افزایش در نسبت‌های ماسه به سیمان ۱ و ۱/۱ مربوط به افزودن ۵٪ الیاف شیشه بوده است، که به ترتیب مقاومت‌های ۱۳۵ و ۱۳۷ مگاپاسکال در نمونه‌های مکعبی به دست آمده و پس از آن در نسبت‌های ماسه به سیمان بالاتر، فقط افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت فشاری شده است، که میزان الیاف مذکور، موجب رسیدن مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی شده است، که میزان الیاف مذکور، موجب رسیدن مقاومت CS1/۲G ۴ به ۱۴۸ مگاپاسکال، نمونه‌ی ۴ CS1/۲G ۴ به ۱۴۸ مگاپاسکال، نمونه‌ی ۴ CS1/۲G ۴ به ۱۴۱ مگاپاسکال و نمونه‌ی CS1/۳G ۴ به ۱۳۴ مگاپاسکال شده است.

۳. افزایش نسبت ماسه به سیمان با کاهش چسبندگی بین ریزدانه‌ها موجب کاهش مقاومت خمی بتن پودری واکنش‌پذیر شده است؛ اما در نمونه‌های حاوی الیاف شیشه، افزودن ۴ و ۵ درصد الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت خمی در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان شده است. نمونه‌ی CS1G ۴ با مقاومت خمی ۲۰/۵ مگاپاسکال، بیشترین مقاومت خمی را داشته است.

۴. با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲، مقاومت کششی بتن به میزان ۱۰/۰٪ افزایش یافته است. همچنین افزودن الیاف شیشه به میزان ۵٪ حجم بتن، موجب بیشترین افزایش مقاومت کششی در بتن پودری واکنش‌پذیر شده است.

۵. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ تا ۱/۲ موجب کاهش ریزترک‌های بتن و بهبود شرایط تشکیل ریزاسختار بتن شده است. همین امر موجب کاهش جذب آب نمونه‌های بتن شده است، به طوری که به میزان ۱۳/۹۵٪ در نمونه‌ی CS1/۲ نسبت به نمونه‌ی CS1 جذب آب کاهش یافته است.

۶. در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان، افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه موجب تضعیف خواص مقاومتی بتن، نظیر مقاومت فشاری، مقاومت خمی و مقاومت کششی شده است.

۱. مطابق جدول ۵، در نمونه‌های بتن فاقد الیاف شیشه، با افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نمونه‌ی CS1/۲ (حاوی نسبت ماسه به سیمان ۱/۲)، مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن افزایش یافته است. با توجه به مقایسه‌ی درصد جذب آب نمونه‌های بتن، کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌ی CS1/۲ بوده است. بنابراین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی اخیر به تراک مناسب سنگ‌دانه‌ها و همچنین با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی به کاهش ریزترک‌ها مربوط بوده است.

۲. با افزایش نسبت ماسه به سیمان، مقاومت خمی کاهش یافته است، که علت آن کاهش میزان سیمان مصرف شده در ساخت نمونه‌های بتن بوده است.

۳. مطابق با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲، نمونه‌ی CS1/۲ بیشترین مقاومت کششی را با ۱۰/۷۵ مگاپاسکال داشته است.

۴. کمترین کاهش جذب آب در نمونه‌های بتن، مربوط به نمونه‌ی CS1/۲ با نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ بوده است. مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی، کاهش اخیر درصد جذب آب مربوط به کاهش ریزترک‌های نمونه بوده است. همچنین مطابق با نتایج جدول ۵، پس از نسبت ۱/۱ با افزایش نسبت ماسه به سیمان به علت بایین آمدن میزان چسبندگی ریزدانه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر میزان پیشروی آب در نمونه‌های بتن افزایش یافته است، که بیشترین میزان پیشروی آب در بتن به نمونه‌ی ۳/۳۱ CS1 با ۸۷٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی CS1 مربوط بوده است.

۵. مطابق نتایج جدول ۶، در نسبت ماسه به سیمان ۱ و ۱/۱، افزودن الیاف شیشه به میزان ۵٪ حجم بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن به میزان ۳/۸۴ و ۴/۵۸ درصد شده است. با توجه به کاهش جذب آب نمونه‌های CS1/۱G ۵ و CS1/۱G ۵ در نسبت ۲/۴ و ۳/۹ در نسبت ۱۸/۶ در برابر نیروی فشاری شده است.

۶. در نسبت‌های ماسه به سیمان ۱/۲ و ۱/۲۵، افزایش مقاومت فشاری به نمونه‌های حاوی ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه با افزایش ۱/۴۳، ۳/۴۹ و ۱/۴۳ در نسبت ۵/۵۱ مربوط بوده است.

۷. با توجه به جدول ۷، با افزودن الیاف شیشه به میزان ۴ و ۵ درصد حجم بتن، مقاومت خمی نمونه‌ها در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان افزایش یافته است، که این افزایش در نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه بیشتر بوده است.

۸. با توجه به کاهش مقاومت خمی در افزودن الیاف شیشه به میزان ۶٪ حجم بتن، خواص مقاومتی بتن تضعیف یافته است. بیشترین کاهش مقاومت خمی در نمونه‌ی CS1G ۶ با مقاومت خمی ۱۶/۴ مگاپاسکال افقاً افتاده است.

۹. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۸، مقاومت کششی نمونه‌ها به ازاء تمام درصدهای الیاف شیشه افزایش یافته است. بیشترین کاهش مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه بوده است.

۱۰. با توجه به فاقد جذب آب بودن الیاف شیشه، افزودن الیاف شیشه به بتن، موجب کاهش درصد آب جذب شده است. همچنین نفوذ آب در نمونه‌های بتن با افزودن الیاف شیشه کاهش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی در نمونه‌ی CS1/۲G ۴، کاهش ریزترک‌های سطح بتن موجب کاهش جذب آب نسبت به نمونه‌ی CS1G ۴ شده است.

بنابر موارد بیان شده با افزایش نسبت ماسه به سیمان به میران ۱/۲ (طرح ۲/۱ Cs۱) می‌توان خواص مقاومتی بتن پودری واکنش‌پذیر را به ازاء مقادیر کمتر سیمان و همچنین کاهش حرارت هیدراتاسیون به واسطه‌ی کاهش مصرف سیمان، نسبت به نمونه‌ی حاوی ماسه به سیمان ۱ (طرح Cs۱) بهبود بخشیده است. همچنین در صورت نیاز به مقاومت کششی، مقاومت فشاری و نفوذناپذیری بیشتر و جذب آب کمتر می‌توان از ۴ تا ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه جهت بهبود خواص بتن پودری واکنش‌پذیر بهره برد.

۷. مطابق با نتایج به دست آمده، خصوصیات نمونه‌ی ۲/۲۵ Cs۱/۲۵ بسیار به خصوصیات نمونه‌ی ۲/۲ Cs۱/۲ نزدیک بوده است. به عنوان مثال، تفاوت مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ی ۲/۲۵ Cs۱/۲۵ با نمونه‌ی ۲/۲ Cs۱/۲ مگاباسکال و برابر با ۲/۸٪ اختلاف بوده است. این تفاوت برای نمونه‌های ۱/۱ و ۱/۳ Cs۱/۱ و Cs۱/۳ به ترتیب برابر با ۱۱/۸ و ۱۱/۱ درصد بوده است. بنابراین، گام افزایشی ۱۰٪ جهت بررسی تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر از گام افزایشی ۵٪ مناسب تر است.

پانوشت‌ها

1. Qasim, A.
2. Mayhoub
3. JianXin
4. Krenchel & Stang

منابع (References)

1. Mostofinejad, D. "Concrete technology & mixing design", *Arkandanesh, P.*, 2nd Edn., pp. 159-210, Isfahan, IR (In Persian) (205).
2. Malik, A.R. and Foster, S.J. "Carbon fiber reinforced polymer confined reactive powder concrete columns-experimental investigation", *ACI Structural Journal*, **107**(3), pp. 263-271 (2010).
3. Heidari, A. and Tavakoli, D. "Introduction to concrete technology", *Shahrekord University P.*, pp. 1-10, Chaharmahal va Bakhtiari, IR (In Persian) (2017).
4. Lee M.-G., Wang, Y.-C. and Chiu, C.-T. "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", *Construction and Building Materials*, **21**(1), pp. 182-189 (2007).
5. Voo, J., Foster, S.J., Gilbert, R.I. and et al. "Design of disturbed region in reactive powder concrete bridge girders", *(ASCE) Bridge Materials*, pp. 117-127 (2004).
6. Qasim, O.A. "Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultrahigh strength concrete", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **454**(1), p.012067 (2018).
7. Qasim, O.A. and Ahmed, A.S. "Different variable effects on bond strength of normal, high and ultra-high strength concrete", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, **9**, pp. 1923-1945 (2018).
8. Mayhoub, O.A., Nasr, A.R., Ali, Y.A. and et al. "The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review", *Ain Shams Engineering Journal*, **12**(1), pp. 145-158 (2020).
9. Heidari, A. and Tavakoli, D. "Production of high-strength concrete based on reactive powder concrete", *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, **2**(4), pp. 111-120 (In Persian) (2016).
10. Richard, P. and Cheyrez, M. "Composition of reactive powder concretes", *Cement Concrete Research*, **25**(7), pp. 1501-1511 (1995).
11. Bagheri, A. and Zanganeh, H. "Energy absorption of reactive powder concrete (RPC) in static and impact loadings", *CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference, Yellowknife 4 Northwest Territories* (2007).
12. JianXin, M. and Orgass, M. "Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates", *In International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, **9**, pp.205-212 (2004).
13. Liu, J.H., Song, S.M., Sun, Y.M. and et al. "Influence of ultrafine limestone powder on the performance of high volume mineral admixture reactive powder concrete", *Advance Material Research*, **152-153**, pp. 1583-1586 (Oct 2010).
14. Savadkoohi, M.S. and Reisi, M. "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in reactive powder concrete", *Journal of Cleaner Production*, **266**, p.121973 (Sep 2020).
15. Grzeszczyk, S. and Janus, G. "Reactive powder concrete with lightweight aggregates", *Construction Building Material*, **263**, p.120164 (Dec 2020).
16. Xiaoying, L., Jun, L., Zhongyuan, L. and et al. "Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates", *Construction Building Material*, **234**, p.117342 (Feb 2020).
17. Masoumi, H., Nezhati, S. and Nejati, F. "Investigating the properties and advantages of reactive powder concrete", *6th Trans-regional Conference on Novel Advances in Engineering Sciences, Ayandegan Higher Education Institute, Tonekabon, Iran* (In Persian) (2013).
18. Blais, P.Y. and Couture, M. "Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete structure", *PCI Journal*, **44**(5), pp. 60-71 (1999).
19. Naser, M.Z., Hawileh, R.A. and Abdalla, J.A. "Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review", *Engineering Structures*, **198**, 109542 (2019).

20. Krenchel, H. and Stang, H. "Stable microcracking in cementitious materials", *In Brittle Matrix Composites 2, Brandt, A.M. and Marshall, J.H. eds.*, pp. 20-33 (1989).
21. Soroushian, P. and Lee, C. "Tensile strength of steel fiber reinforced concrete: correlation with some measures of fiber spacing", *ACI Material Journal*, **87**(6), pp. 541-546 (1990).
22. Tam, C.M., Tam, V.W.Y. and Ng, K.M. "Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong", *Construction and Building Materials*, **26**(1), pp. 79-89 (2012).
23. Heidari, A and Naderi Shourabi, F. "New Concrete", *Arkandanesh P., 1st Edn.*, pp. 75-76, Isfahan, IR (In Persian) (2022).
24. ASTM E1621-05, "Standard guide for elemental analysis by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States (2014).
25. Iskender, M. and Bekir, K. "Glass fibre reinforced concrete (GFRC)", *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 5, 1, pp. 136-162 (2018).
26. Naderi Shourabi, F. and Heidari, A. "Laboratory investigation of the change of sand-cement ratio in the mechanical behavior of reactive powder concrete", *The 13th National Congress of Civil Engineering*, Iran, (In Persian) (May 2022).
27. 27. Soroushian, P. "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", *American Concrete International (ACI)*, **19**(6), pp. 28-34 (1997).
28. Swamy, R.N. "Fibre reinforced cement and concrete: proceedings of the fourth RILEM international symposium", *CRC Press, 1st Edn.*, London, GB (1992).
29. Hiremath, P.N. and Yaragal, S.C. "Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of reactive powder concrete", *Construction and Building Materials*, **141**, pp. 271-288 (2017).
30. ASTM C39/C39 M-12, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania (2012).
31. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, west Conshohocken, PA, pp. 469-490 (2011).
32. ASTM C293, "Standard test method for flexural strength of Concrete (using simple beam with centerpoint loading)", *American Society for Testing and Materials*, **100**, pp. 19428-2959 (2010).
33. BS. EN, 12390-8, "Testing hardened concrete, depth of penetration of water under pressure", *BSI* (2006).
34. ASTM C 642-97, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials* (1997).
35. ASTM C192, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", *ASTM International*, West Conshohocken (2006).
36. Zhang, Z., Feng, Q. Zhu, W. and et al. "Influence of sand-cement ratio and polycarboxylate superplasticizer on the basic properties of mortar based on water film thickness", *Materials*, **14**(17), 4850 (2021).
37. Ahmad, González-Lezcano, R.A., Majdi, A., Ben Kahla N. and et al. "Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis", *Materials*, **15**(15), 5111 (2022).
38. Mayhoub, O.A., Naser, A.R., Yehia, A. and et al. "The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review", *Ain Shams Engineering Journal*, **1**(12), pp. 145-58 (2021).
39. Wang, D., Shi, C., Wu, Z. and et al. "A review on ultra high performance concrete: Part II. hydration, microstructure and properties", *Construction and Building Materials*, **96**, pp. 368-77 (2015).
40. Wang, C., Yang, C., Liu, F. and et al. "Preparation of ultra high performance concrete with common technology and materials", *Cement Concrete Composite*, **34**(4), pp. 538-44 (2012).

تحلیل و تقویت اتصال تیر به ستون بتون بتن آرمه‌ی کناری با در نظر گرفتن نیروی محوری متغیر در ستون

سید محمدسعید ضیالحق (دانشجوی دکتری)

محمد رضا اصفهانی* (استاد)

گروه عمران، دانشکده فنی و هندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

در پژوهش حاضر، یک روش تحلیلی برای ارزیابی رفتار اتصال تیر به ستون بتون بتن آرمه پس از مقاوم سازی ارائه شده است؛ که در آن، با استفاده از روابط تش و کرنش‌های اصلی در ناحیه‌ی اتصال، انواع مختلف شکست تغمیم زده شده است. در ادامه، روند کسب مقاومت و نحوه‌ی شکست اتصال تیر به ستون به کمک نمودارهای اندرکرنش (M-N) به عنوان معیاری برای تعیین روش و مقدار تقویت ارائه شده است. در بخش آزمایشگاهی، ۳ نمونه با بار محوری متغیر و ۳ نمونه با بار محوری ثابت، با در نظر گرفتن روش‌های تقویت نصب در نزدیک سطح (NSM) با میلگردهای فولادی و روش نصب روی سطح (EBR) با CFRP. ساخته و آزمایش شدند. در انتها، روش تحلیلی پیشنهادی با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی سایر پژوهش‌ها و نمونه‌ای آزمایشگاهی در پژوهش حاضر مقایسه شده است. نتایج آزمایش تأیید کرد که نمونه‌های تقویت شده با میلگردهای فولادی، رفتار شکل‌پذیرتری دارند و همچنین مقایسه نتایج آزمایش‌ها با مقادیر روش تحلیلی نشان داد که روش تحلیلی پیشنهادی، به طور قابل قبولی می‌تواند رفتار اتصال تیر به ستون را پیش‌بینی کند.

واژگان کلیدی: تقویت اتصال تیر به ستون بتن آرمه، بار محوری متغیر، تحلیل اتصال تیر به ستون، روش NSM.

s.zia.civil@gmail.com
esfahani@um.ac.ir

۱. مقدمه

است منجر به نتایج غیرصحیحی شود. این موضوع در تعداد اندکی از پژوهش‌های آزمایشگاهی و نظری موجود، بررسی و تأیید شده است.^[۷-۹] در پژوهش‌های اخیر، چندین روش برای تقویت اتصال‌های بتون آرمه پیشنهاد و اجرا شده است، که در میان راه حل‌ها و فناوری‌های جایگزین، استفاده از مصالح FRP توجه ویژه‌ی را به خود جلب کرده است.^[۹,۱۰] به طور کلی، در تمامی پژوهش‌های اخیر، از نظر مقاومت، سختی و انعطاف‌پذیری، نمونه‌های تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های تقویت نشده، پیشرفت قابل توجهی داشته است. علی‌رغم این که تعداد زیادی از مطالعات و پژوهش‌ها به صورت آزمایشگاهی بوده است، ولی در مقابل کار نسبتاً کمتری در زمینه‌ی توسعه‌ی روش تحلیلی و طراحی ساده برای اتصال‌های تقویت شده اختصاص داده شده است.^[۱۰]

۲. اهمیت پژوهش

همان‌طور که از پیش گفته شد، بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه‌ی بررسی اتصال کناری، با بار محوری ثابت انجام شده است، که بعضی از آن‌ها برای در نظر گرفتن تأثیر بار محوری، سطوح مختلف بار محوری ثابت را بررسی کرده‌اند.^[۱] یکی از اهمیت‌های پژوهش حاضر، در نظر گرفتن تأثیر بار محوری متغیر در رابطه‌سازی‌ها و نحوه‌ی آزمایش است.

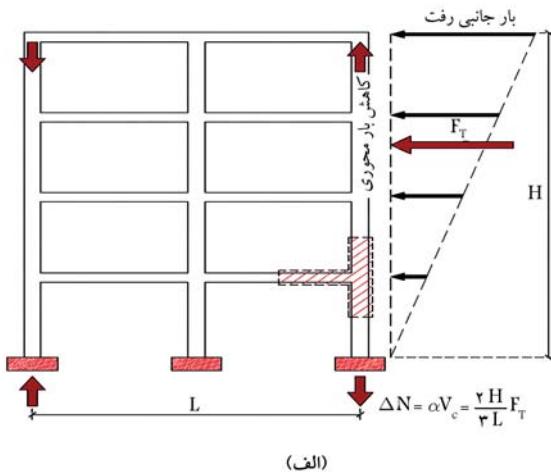
امروزه علی‌رغم وجود آینه‌نامه‌های دقیق و کامل در زمینه‌ی تأمین شکل‌پذیری کافی در سازه‌های بتون آرمه و ارائه‌ی جزئیات لزجی برای اتصال‌های تیر به ستون بتون آرمه، باز هم ممکن است جزئیات لزجی ناحیه‌ی اتصال به درستی اجرا نشود. در این حالت، ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون بتون آرمه، اصطلاحاً ناقص نامیده می‌شود. این خطا منجر به عدم شکل‌پذیری کافی در سازه می‌شود، زیرا به جای تشکیل مفصل خمیری در تیر، ممکن است خراپی در ناحیه‌ی اتصال اتفاق بیافتد، که منجر به نابوداری در سازه می‌شود. به همین دلیل، پژوهش‌های زیادی در خصوص مقاوم سازی ناحیه‌ی اتصال ناقص انجام گرفته است، که هدف آن‌ها ایجاد رفتاری شکل‌پذیر برای اتصال بوده است.^[۱-۳]

در بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته، بار محوری ستون در حین اعمال بار جانبی به اتصال، ثابت فرض شده است، که مقدار آن همان وزن بارهای نقلی است؛ در حالی که برای یک اتصال کناری، به علت رفت و برگشت بار جانبی ناشی از زلزله، ستون‌ها تحت بار محوری متغیر قرار می‌گیرند. کاهش نیروی فشاری ستون ناشی از تغییرات بار محوری، منجر به کاهش ظرفیت برخی در ناحیه‌ی اتصال می‌شود. در نتیجه، ثابت فرض کردن بار محوری فشاری روی ستون در یک اتصال کناری، ممکن

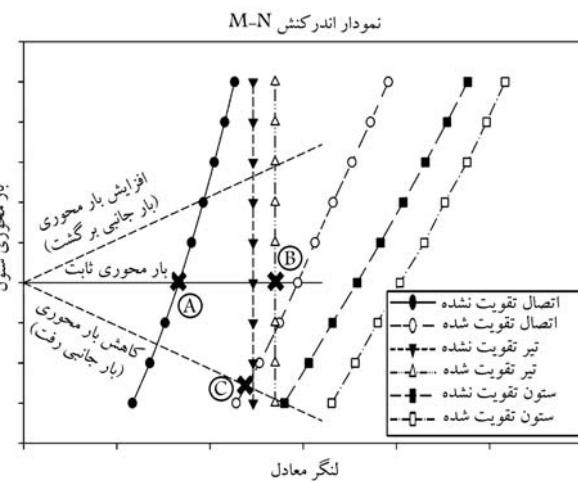
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۹/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۲/۵/۱۴۰۱، پذیرش ۷/۶/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60213.3097



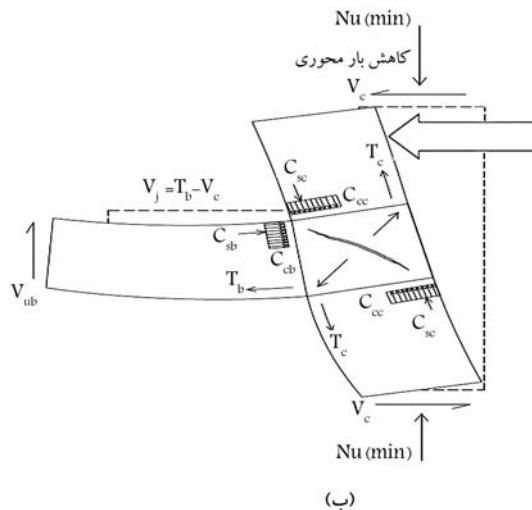
(الف)



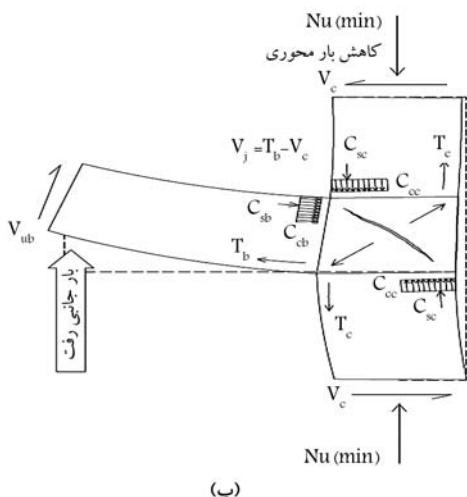
شکل ۱. نمودار اندکشش شماتیک نیروی محوری - ظرفیت خمشی اعضای اتصال
کناری (M - N) برای نمونه‌های تقویت شده و تقویت نشده.

روش‌های تقویت ناحیه‌ی اتصال در بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته به وسیله‌ی نصب روی سطح با مصالح FRP با جهت‌ها و چیدمان‌های مختلف است (روش EBR). یکی از تفاوت‌های پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها، استفاده از روش نصب در نزدیک سطح (روش NSM) با میلگرد‌های فولادی است. در نوشتار ونگ و همکارانش (۲۰۱۹)،^[۱] از روش NSM با میلگرد‌های CFRP برای تقویت اتصال در پژوهش آزمایشگاهی استفاده شده است.

در پژوهش حاضر، سعی شده است با هدف ارائه یک روش گام به گام منطقی و نسبتاً ساده برای پیاده‌سازی در یک برنامه‌ی رایانه‌یی، ارزیابی اتصال‌های تیر به ستون بن‌آرمه‌ی تقویت شده انجام پذیرد.



(ب)



(ب)

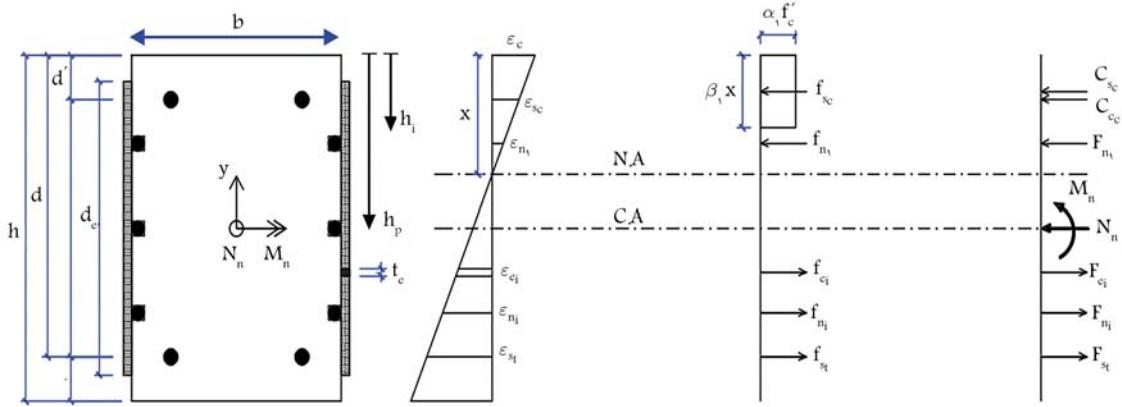
شکل ۲. (الف) اعمال بار جانبی به قاب، (ب) اعمال بار جانبی به ستون در اتصال
کناری، (پ) اعمال بار جانبی معادل به تیر در اتصال کناری.

مطابق شکل ۱، در وضعیتی که بار محوری ستون ثابت فرض شود، با افزایش لنگر به علت اعمال بار جانبی، اولین خسارت‌ها در ناحیه‌ی اتصال برای یک نمونه‌ی تقویت نشده ایجاد شده است (نقطه‌ی A در شکل ۱)؛ در حالی که در نمونه‌ی تقویت شده با افزایش لنگر ناشی از بار جانبی در وضعیت بار محوری ثابت، خرابی

۳. پیش‌بینی نوع شکست و اثر بار محوری متغیر

به عنوان یک مرحله‌ی مهم قبل از طراحی روش مقام‌سازی اتصال تیر به ستون، ارزیابی رفتار و عملکرد مورد انتظار (خسارت‌ها تحت بارگذاری مشخص) باید به درستی انجام شود. این بدين معنی است که سطوح مختلف مقاومت در اعضاء یک اتصال، به گونه‌یی تعیین شود که توالی مورد انتظار خسارت‌ها، قابل پیش‌بینی باشد. یک روش ساده برای ارزیابی سطوح مختلف مقاومت در اعضاء اتصالی، با نام نمودارهای اندکشش M-N (لنگر - بار محوری) است، که در سال ۲۰۰۷، در پژوهش پامپینین^[۲] و همکاران،^[۳] معرفی شده است.

در پژوهش حاضر، نمودارهای M-N برای نمونه‌ها، در شکل ۱ و تغییرات نیروی محوری ستون در یک قاب خمشی در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. در شکل ۱، خطوط مستقیم خطچین، خطوط بارگذاری جانبی به سازه هستند، که در واقع هنگام افزایش بار جانبی سازه در جهت رفت (Pull)، مقدار نیروی فشاری محوری ستون کاهش و لنگر اتصال افزایش یافته است. همچنین هنگام افزایش بار جانبی سازه در جهت برگشت (Push)، مقدار نیروی فشاری محوری ستون افزایش و لنگر اتصال افزایش یافته است. خط مستقیم ممتد در شکل ۱، بارگذاری جانبی در اتصال نیز افزایش یافته است. درین حال فرض شده است که با افزایش لنگر اتصال ناشی از بارگذاری جانبی، تغییرات محوری ستون وجود ندارد. در نهایت، محل تلاقي خطوط بارگذاری ذکر شده با خطوط ظرفیت اعضاء اتصال، شکست آن عضو نشان داده می‌شود.



شکل ۳. تحلیل لایه به لایه مقطع عضو خمی تیر و ستون بتن آرمه‌ی تقویت شده به روش‌های EBR و NSM.

استفاده شده است.^[۱۲-۱۴] برای بررسی مقاومت ناحیه‌ی اتصال و استفاده‌ی آن در نمودارهای اندکش M-N در کنار ظرفیت‌های محاسبه شده برای تیر و ستون، باید ظرفیت ناحیه‌ی اتصال به صورت لنگر ارائه شود.

مطابق با شکل ۲ - ب، رابطه‌ی بین نیروی کششی نهایی میلگرد‌های تیر (T_b) و برش موجود در ستون (V_c) به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$V_j = T_b - V_c \quad (1)$$

در صورتی که جهت ساده‌سازی روابط، بازوی لشکرخمی در مقطع تیر $\frac{d}{9}$ فرض شود، لنگر خمی در تیر به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$M_b = \frac{d}{9} T_b \quad (2)$$

از طرفی دیگر، با توجه به نیروهای خارجی در یک اتصال کناری جدا شده از محل نقطه عطف در ستون و تیر (شکل ۲ - الف)، لنگر تیر در بر اتصال به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$M_b = V_b (l_b - \frac{5}{9} h_c) \quad (3)$$

با برقراری تعادل لنگر در مرکز ناحیه‌ی اتصال در یک اتصال کناری جدا شده از نقاط عطف تیر و ستون (مطابق شکل ۴)، رابطه‌ی ۴ بین نیروهای برشی در تیر و ستون برقرار است:

$$V_c l_c = V_b l_b \quad (4)$$

با برابری رابطه‌های ۲ و ۳ و سپس جایگذاری V_b از رابطه‌ی ۴، نیروی کششی میلگرد‌ها (T_b) مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$T_b = V_c \left(\frac{l_c}{l_b} \right) \frac{(l_b - \frac{5}{9} h_c)}{\frac{d}{9}} \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۱، مقدار نیروی برشی ستون (V_c) بر حسب نیروی برشی ناحیه‌ی اتصال (V_j) به صورت رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$V_c = \frac{1}{\left(\frac{l_c}{l_b} \right) \frac{(l_b - \frac{5}{9} h_c)}{\frac{d}{9}}} V_j - 1 \quad (6)$$

در تیر و تشکیل مفصل خمیری در آن مشاهده می‌شود (نقطه‌ی B در شکل ۱). در نتیجه، با لحاظ کردن بار محوری ثابت، سیستم مقاوم سازی مناسب در نظر گرفته می‌شود. حال در صورتی که تغییرات بار محوری ستون لحاظ شود، نتیجه می‌تواند متفاوت باشد. با رجوع به شکل ۱، در وضعیت بار جانبه رفت (Pull) و افزایش لنگر، نیروی محوری ستون کاهش یافته و ظرفیت ناحیه‌ی اتصال و همچنین ظرفیت ستون در این وضعیت کاهش پیدا کرده است. در این شرایط، نمونه‌ی تقویت شده در شکل ۱، دچار خرابی در ناحیه‌ی اتصال شده است (نقطه‌ی C در شکل

۱). این موضوع نشان می‌دهد که نمونه‌ی تقویت شده با فرض بارگذاری محوری ثابت، یک طرح این است؛ در حالی که با فرض بارگذاری محوری متغیر، یک طرح تقویت مناسب در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن تغییرات بار محوری در نوحوی مقاوم سازی اتصال کناری تأثیرگذار است. مطالعات آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، اهمیت در نظر گرفتن تغییرات بار محوری را تأیید کرده است؛ که در ادامه، به عنوان اعتبار سنجش روش تحلیلی و روش مقاوم سازی استفاده شده است.

۴. ارزیابی ظرفیت مقاطع تیر و ستون در نمونه‌ها

جهت بررسی مقاومت در یک اتصال، که مجموعه‌ی از تیر، ستون و ناحیه‌ی اتصال است، باید ظرفیت مقاطع تیر و ستون قبل و بعد از مقاوم سازی محاسبه شود. در روش مقاوم سازی استفاده شده در پژوهش حاضر، سیستم‌های مقاوم سازی در ناحیه‌ی اتصال جهت تأمین طول مهاری، روی محدوده‌ی از تیر و ستون نیز وارد شده‌اند، که باعث شده است در مقاومت آن‌ها نیز تأثیر بگذارد. با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به شکل ۳ و توزیع خطی کرنش‌ها، تنش‌های مقطع محاسبه شده‌اند.

قابل ذکر است در صورتی که کرنش مسلح‌کننده‌های EBR و NSM از حد مجاز (شامل شرایط شکست یا جداشدن) بیشتر شود، تنش در آن‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. بعد از محاسبه‌ی تنش‌ها، با برقراری تعادل نیروها، مقاومت محوری اسمی N_n و مقاومت خمی اسمی M_n نیز محاسبه شده است.

۵. معادل سازی ظرفیت ناحیه‌ی اتصال به صورت لنگر

در پژوهش حاضر، برای تحلیل و بررسی ناحیه‌ی اتصال از روش‌های حالت‌های حدی بر پایه‌ی سطوح بحرانی تنش‌های اصلی کششی و فشاری در راستای قطری

مطابق روابط ۱۰ الی ۱۳ به دست می‌آید:

$$M_j = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \frac{N_n}{h_c b_c}}}{\Omega} \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{2l_c l_b' - \gamma \lambda d l_b}{\gamma d l_b b_j h_c (l_c - h_b)} \quad (11)$$

$$b_j = \min(b_c, b_c + 0.5h_c) \quad \text{if} \quad b_c \geq b_b \quad (12)$$

$$b_j = \min(b_b, b_c + 0.5h_c) \quad \text{if} \quad b_c < b_b \quad (13)$$

۶. ارزیابی و محاسبه‌ی ظرفیت ناحیه‌ی اتصال تقویت شده

برای یک اتصال بتن‌آرم، که با سیستم‌های EBR و NSM مقاوم‌سازی شده است، هنگامی که ریزترک‌های قطری ناحیه‌ی اتصال شروع می‌شود، سیستم‌های مسلح‌کننده به صورت کششی عمل می‌کنند و در نتیجه ترک‌خوردگی قطری اصلی ناحیه‌ی اتصال و شکست نهایی به تأخیر می‌افتد. برای محاسبه‌ی ظرفیت اتصال تقویت شده باید تنش کششی اصلی مقاوم نهایی (σ_{1F}) را به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول، بیشینه‌ی تنش کششی اصلی مقاوم ناحیه‌ی اتصال تقویت نشده (σ_{1C}) و بخش دوم، بیشینه‌ی تنش کششی اصلی مقاوم تأمین شده توسط مسلح‌کننده‌های سیستم تقویت (σ_{1T}) هستند.

$$\sigma_{1F} = \sigma_{1T} + \sigma_{1C} \quad (14)$$

برای محاسبه‌ی σ_{1C} لازم است تنش برشی مقاوم افزایش یافته به واسطه‌ی مسلح‌کننده‌ها (v_j) در المان وسط ناحیه‌ی اتصال تقویت شده (مطابق شکل ۶) محاسبه شود.

با فرض سازگاری تغییرشکل‌ها بین سیستم مسلح‌کننده‌ها و بتن ناحیه‌ی اتصال، با برقراری تعادل در شکل ۶ - ب، روابط ۱۵ و ۱۶ برقرار است:

$$\sigma_t = -\sigma_{et} - \sigma_{st} \quad (15)$$

$$\sigma_l = -\sigma_{el} - \frac{N_n}{h_c b_c} \quad (16)$$

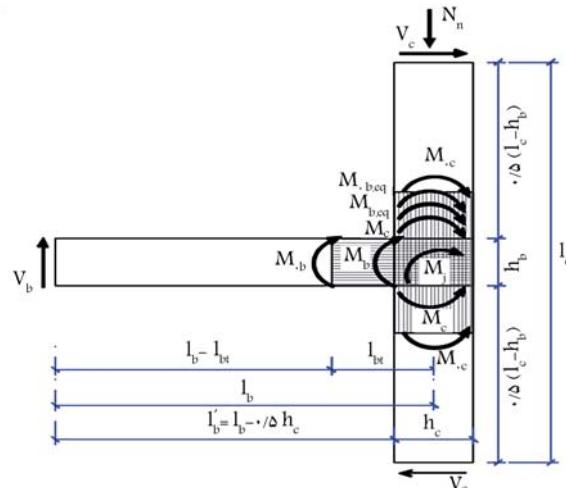
رابطه‌های اخیر، گویای این موضوع هستند که کشش ایجاد شده در مسلح‌کننده‌ها، باعث ایجاد فشار در ناحیه‌ی اتصال می‌شود. به علت سازگاری تغییرشکل، کرنش در المان موردنظر (مطابق روابط ۱۷ و ۱۸) یکسان فرض شده است:

$$\sigma_t = \varepsilon_t (-\rho_{et} E_{et} - \rho_{st} E_s) \quad (17)$$

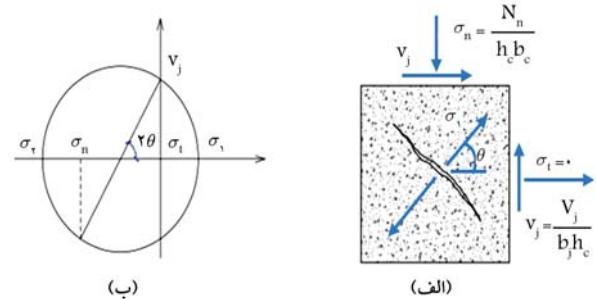
$$\sigma_l = -\varepsilon_l \rho_{el} E_{el} - \frac{N_n}{h_c b_c} \quad (18)$$

با فرض این‌که در آستانه‌ی ترک‌خوردگی‌های قطری، تنش اصلی ایجاد شده در راستای عمود بر ترک، صفر ($\sigma_1 = 0$) در نظر گرفته شود، آن‌گاه دایره‌ی مور تنش‌ها (مطابق روابط ۱۹ الی ۲۴)، برای المان شکل ۶ - ب، به صورت شکل ۷ ترسیم می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma_t + \sigma_l \quad (19)$$



شکل ۴. نام‌گذاری نیروها و ابعاد هندسی اتصال کناری تقویت شده.



شکل ۵. (الف) المان وسط ناحیه‌ی اتصال تحت تنش‌های خارجی، (ب) دایره‌ی مور المان.

در نتیجه، مقدار لنگر در مرکز ناحیه‌ی اتصال با توجه به برش در ستون به کمک رابطه‌ی ۶ به صورت رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$M_j = 0.5(l_c - h_b) V_c = \frac{0.5(l_c - h_b)}{\left(\frac{l_c}{l_b}\right) \left(\frac{l_b - 0.5h_c}{0.5d}\right) - 1} V_j \quad (7)$$

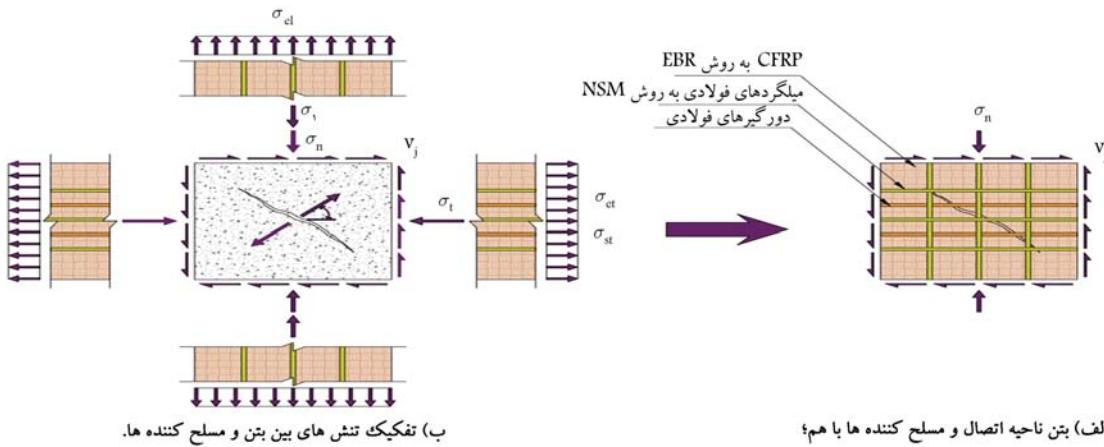
در صورتی که مقدار نیروی برشی ناحیه‌ی اتصال (V_j) بر حسب تنش‌های اصلی در ناحیه‌ی اتصال اخیر نوشته شود، مقدار M_j به کمک رابطه‌ی ۷ بر حسب تنش‌های اصلی قابل محاسبه است. در نتیجه با اعمال محدودیت‌های شکست بر حسب تنش‌های اصلی، مقدار ظرفیت خمی ناحیه‌ی اتصال برآورد می‌شود. برای تحقق هدف مذکور، یک المان از ناحیه‌ی اتصال به صورت شکل ۵ استخراج شده است: بیشترین تنش کششی اصلی در المان (مطابق شکل ۵ - الف) با توجه به دایره‌ی مور (شکل ۵ - ب)، از طریق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_1 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{2}\right)^2 + v_j^2} - \left|\frac{\sigma_n}{2}\right| \quad (8)$$

که در آن، $\sigma_n = \frac{N_n}{h_c b_c}$ و مقدار نیروی محوری فشاری در ستون (N_n)، مشتث در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی ۸، تنش برشی در ناحیه‌ی اتصال (v_j) از طریق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$v_j = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \sigma_n} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \frac{N_n}{h_c b_c}} \quad (9)$$

با جایگذاری نیروی برشی ناحیه‌ی اتصال ($V_j = v_j b_j h_c$) در رابطه‌ی ۷ و بعد از ساده‌سازی، لنگر در مرکز ناحیه به دست می‌آید، که در آن، مقادیر M_j ، Ω و b_j



شکل ۶. المان وسط ناحیه‌ی اتصال تقویت شده.

الف) بتن ناحیه اتصال و مسلح کننده‌ها با هم؛

ب) تکییک تنش‌های بین بتن و مسلح کننده‌ها.

با قرارگیری رابطه‌ی ۲۳ در رابطه‌ی ۲۷، رابطه‌ی ۲۸ به دست می‌آید:

$$\tan^r \theta = \frac{-v_j \frac{1 + \tan^r \theta}{\tan \theta} - E_c \varepsilon_l}{-v_j \frac{1 + \tan^r \theta}{\tan \theta} - E_c \varepsilon_t} \quad (28)$$

بعد از ساده‌سازی رابطه‌ی اخیر و بازنویسی آن بر حسب v_j و $\tan \theta$ ، معادله‌ی خلاصه‌شده‌بی به صورت رابطه‌ی ۲۹ استخراج می‌شود:

$$Ax^r + Bx^r + C = 0 \quad (29)$$

که در آن، پارامترهای A ، B و C مطابق روابط ۳۰ الی ۳۲ محاسبه می‌شوند:

$$A = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{\rho_{et} E_{et} - \rho_{st} E_s} \quad (30)$$

$$B = \frac{N_n}{h_c b_c (\rho_{el} E_{el}) (\rho_{et} E_{et} + \rho_{st} E_s) \varepsilon_t} \quad (31)$$

$$C = - \left(\frac{1}{E_c} + \frac{1}{\rho_{el} E_{el}} \right) \quad (32)$$

در نتیجه، پارامترهای x و $\tan \theta$ مطابق روابط ۳۳ و ۳۴ محاسبه می‌شوند:

$$x = \tan^r \theta = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (33)$$

$$\tan \theta = \sqrt{x} = \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (34)$$

با محاسبه‌ی مقدار $\tan \theta$ ، سایر پارامترها مطابق روابط ۳۵ الی ۳۹ محاسبه می‌شوند:

$$\varepsilon_1 = \frac{(\rho_{el} E_{el}) \varepsilon_t + (\sigma_l + \frac{N_n}{h_c b_c}) \tan^r \theta}{(\rho_{el} E_{el}) (1 - \tan^r \theta)} \quad (35)$$

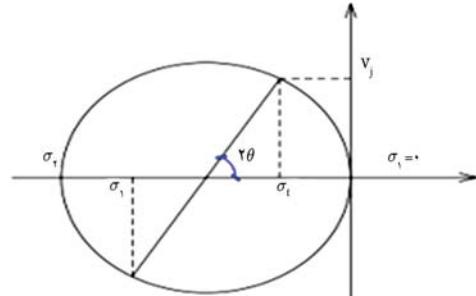
$$\sigma_l = \frac{\varepsilon_t (-\rho_{et} E_{et} - \rho_{st} E_s)}{\tan^r \theta} \quad (36)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\varepsilon_1 (\tan^r \theta - 1) + \varepsilon_t}{\tan^r \theta} \quad (37)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_t \tan^r \theta - \varepsilon_l}{\tan^r \theta - 1} \quad (38)$$

$$v_j = \frac{\rho_{et} \varepsilon_t E_{et} + \rho_{st} \varepsilon_l E_s}{\tan \theta} \quad (39)$$

که در آن، v_j تنش برشی ایجاد شده در المان شکل ۶ - ب (رابطه‌ی ۳۹)، درواقع تنش برشی مقاوم ایجاد شده توسط مسلح کننده‌های سیستم تقویت است. با در نظر



شکل ۷. دایره‌ی مورد تنش‌های المان شکل ۶ - ب.

$$\sigma_t = -v_j \tan \theta \quad (20)$$

$$\sigma_l = \frac{-v_j}{\tan \theta} \quad (21)$$

$$\tan^r \theta = \frac{\sigma_2 - \sigma_l}{\sigma_2 - \sigma_t} \quad (22)$$

$$\sigma_2 = -v_j \frac{1 + \tan^r \theta}{\tan \theta} \quad (23)$$

$$\gamma_j = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_t)}{\tan \theta} \quad (24)$$

از برابری روابط ۱۷ با ۲۰ و روابط ۱۸ با ۲۱، روابط ۲۵ و ۲۶ به دست می‌آیند:

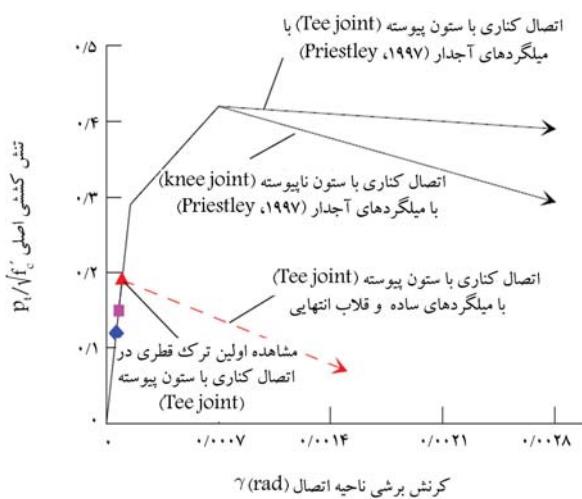
$$\varepsilon_t = \frac{v_j \tan \theta}{\rho_{et} E_{et} - \rho_{st} E_s} \quad (25)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\frac{v_j}{\tan \theta} - \frac{N_n}{h_c b_c}}{\rho_{el} E_{el}} \quad (26)$$

۱.۶. تعیین زاویه‌ی جهت‌های اصلی تنش در المان شکل ۶ - ب (با فرض جاری نشدن میلگردی‌های فولادی NSM ناحیه‌ی اتصال)

با استفاده از روابط محاسبه شده در بخش قبل، معادله‌ی برای محاسبه‌ی زاویه‌ی تنش‌های اصلی، استخراج شده است. در صورتی که رابطه‌ی ۲۲ به صورت رابطه‌ی ۲۷ نوشته شود:

$$\tan^r \theta = \frac{\sigma_2 - \sigma_l}{\sigma_2 - \sigma_t} = \frac{\sigma_2 - E_c \varepsilon_l}{\sigma_2 - E_c \varepsilon_t} \quad (27)$$



شکل ۸. نمودار پیشنهادی برای پیش‌بینی مقدار بیشینه‌ی 51% بر حسب کرنش بر پرشی.^[۱۴]

تصال، تنش های کششی اصلی، که منجر به اولین ترک های قطری در ناحیه ای اتصال می شوند، را می توان در شکل ۸ معرفی و مشاهده کرد.

در پژوهش پاپینیان^۵ و همکارانش (۲۰۰۲)،^[۱۴] برای کرنش برنشی σ_{zz} تا

$98,275 \times 10^{-6}$ = 77 را بطوری 50 ارائه شده است:

و برای کرنش برشی از $\gamma_j = 0, 2, 4, 6, 8, 10$ رابطه‌ی ۵۱ را راهه کرده‌اند:

$$\frac{\sigma_{\text{in}}}{\sqrt{f'_c}} = -9.048911(\gamma_j - 0.02) \quad (51)$$

مشاهدات آزمایشگاهی در پژوهش حاضر و سایر پژوهش‌ها و وارسی آن‌ها با مدل تحلیلی پیشنهادی نشان داد که در نظر گرفتن مقدار ظرفیت بیشینه‌ی نتش اصلی کششی ۵۰٪ برای نمونه‌های بدون تقویت طبق نظر پرستلی و همکاراش (۱۹۹۶)،^[۱۲] و برای نمونه‌های تقویت شده، طبق نظر پامپین و همکاراش (۲۰۰۲)،^[۱۳] به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است.

۶.۴. محاسبه‌ی لنگ ناحیه‌ی اتصال تقویت شده

با برقراری تعادل استاتیکی بین نیروی های وارد شده در اتصال کناری همانند بخش ۵،
نشانگ مقاوم ناحیه اتصال تقویت شده مشابه رابطه $\sigma_{1F} = 10$ (جایگزینی σ_1 به جای
)، به صورت رابطه $\sigma_1 = 52$ محاسبه می شود:

$$M_{jr} = \frac{\sqrt{\sigma_{\setminus F} + \sigma_{\setminus F} \frac{N_n}{h_c b_c}}}{\Omega} \quad (54)$$

۷. کنترل شکست فشاری و پرسه در بتن ناچهی اتصال

برههش آزمایشگاهی پامپین و همکارانش (۲۰۰۷)،^{۱۵} نشان داد که نصب مسلح‌کننده‌های FRP روی سطح خارجی در ناحیه‌ی اتصال می‌تواند توسعه‌ی کافی برای عمل کردن نوار فشاری قطعی در ناحیه‌ی اتصال را همانند اتصال‌های میانی،

گرفتن المان کلی ناحیه‌ی اتصال تقویت شده (شکل ۶ - الف) و به کمک دایره‌ی مور شکل ۵ - ب (جاگزگرینی σ_{12} به جای σ_1 ، مقدار σ_{12} مشابه رابطه‌ی ۸، به دست می‌آید (رابطه‌ی ۴۰):

$$\sigma_{\text{var}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{\gamma}\right)^2 + v_j^2} - \left| \frac{\sigma_n}{\gamma} \right| \quad (40)$$

۲۶. تعیین زاویه‌ی جهت‌های اصلی تنش در المان شکل ۶ - ب (با

فرض تسليم میلگرد های فولادی NSM ناحیه ای اتصال

در این حالت، مقدار تنش σ_{st} در رابطه‌ی ۱۵ و σ_f مطابق رابطه‌ی ۴۱ در نظر گرفته می‌شوند:

$$\sigma_t = -\sigma_{et} - f_y \quad (41)$$

بنابراین، رابطه‌ی ۱۷ نیز مطابق رابطه‌ی ۴۲ تغییر می‌کند:

$$\sigma_t = \varepsilon_t (-\rho_{et} E_{et}) - \rho_{st} f_y \quad (44)$$

از برابری رابطه‌ی 42 با رابطه‌ی 20 و بعد از ساده‌سازی و بازنویسی بر حسب z و θ معادله‌ی خلاصه شده‌ی 43 به دست می‌آید:

$$A'x' + B'x' + C' = 0 \quad (43)$$

که در آن، پارامترهای A' , B' و C' مطابق روابط ۴۴ الی ۴۶ به دست می‌آیند:

$$A' = \frac{1}{E_c} + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t (\rho_{et} E_{et}) + \rho_{st} f_y} \quad (44)$$

$$B' = \frac{N_n}{h_c b_c (\rho_{el} E_{el}) (\varepsilon_t \rho_{et} E_{et} + \rho_{st} f_y)} \quad (45)$$

$$C' = - \left(\frac{1}{E_c} + \frac{1}{\rho_{el} E_{el}} \right) \quad (48)$$

در نتیجه، مقادیر x و θ مطابق روابط ۴۷ و ۴۸ محاسبه می‌شوند:

$$x = \tan^r \theta = \frac{-B' + \sqrt{B'^r - A'C'}}{rA'} \quad (\text{4v})$$

$$\tan \theta = \sqrt{x} = \sqrt{\frac{-B' + \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{4A'}} \quad (\text{Eq. 1})$$

دراین حالت، z^v تنش برشی ایجاد شده در المان شکل ۶ - ب به صورت رابطه‌ی محسوبه می‌شود:

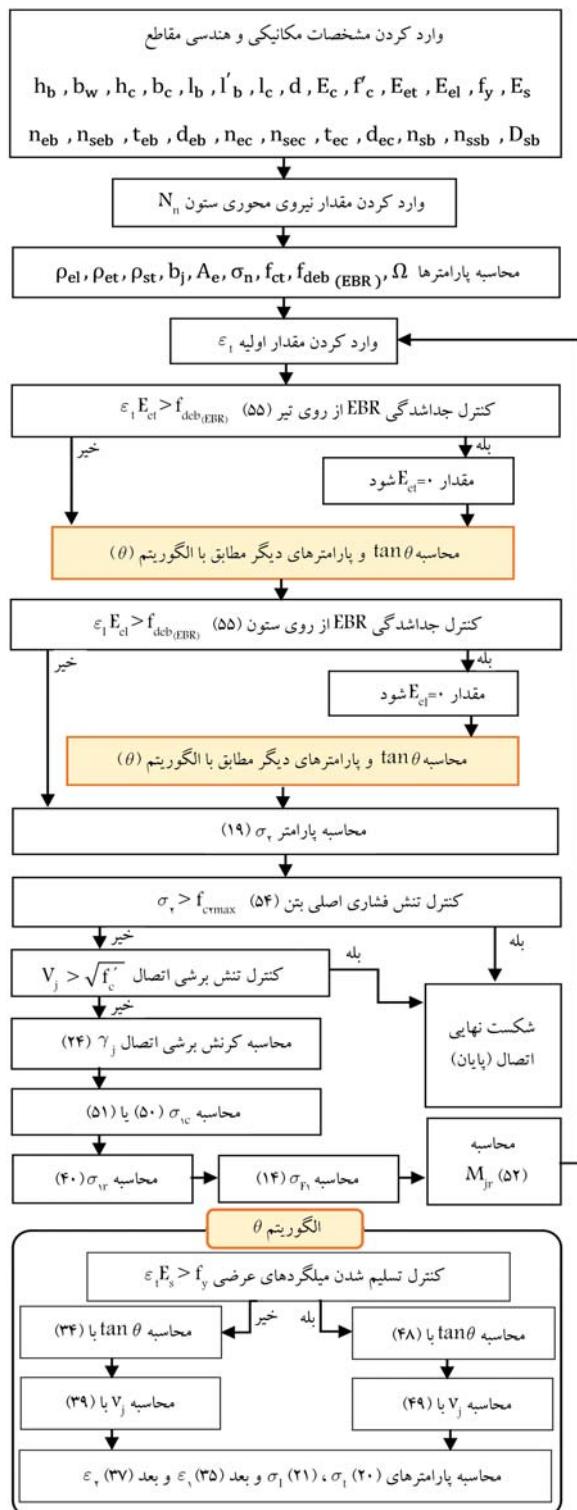
$$\varepsilon_t = \frac{v_j \tan \theta - \rho_{st} f_y}{\rho_{et} E_{et}} \rightarrow v_j = \frac{\varepsilon_t \rho_{et} E_{et} + \rho_{st} f_y}{\tan \theta} \quad (49)$$

۳.۶. میجاسبه‌ی بیشینه‌ی تنفس اصلی کششی مقاوم ناحیه‌ی اتصال تقویت نشده (σ_{1c})

طبق پژوهش‌های صورت گرفته، از جمله پژوهش‌های پریستلی^۴ و همکاراوش (۱۹۹۶)،^{۱۱} بیشینه‌ی تنش اصلی کششی مقاوم ناحیه‌ی اتصال تقویت نشده در اتصال کناری به $290 \sqrt{f' M Pa}$ محدود شده است (صفحه‌های ۳۵۷ و ۵۶۲).^{۱۲} اتصال کناری به این حدود نزدیک نیز نشان داد که اولین کتاب اخیر،^{۱۳} پژوهش کالالوی و همکاراوش (۲۰۰۲)، نیز نشان داد که اولین ترک‌های ناحیه‌ی اتصال هستگامی که تنش اصلی کششی حدود $290 \sqrt{f' M Pa}$ نداشتند.^{۱۴} با توجه به تغییرات کرنش پرسه، ناحیه‌ی پژوهش شده، اتفاق می‌افتد.^{۱۵}

۹. الگوریتم محاسبه‌ی لنگر مقاوم ناحیه‌ی اتصال به کمک مدل تحلیلی پیشنهادی

با توجه به روابط محاسباتی و معیارهای شکست، که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، المکوریتم محاسبه‌ی لنگر مقاوم ناچیه اتصال در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۹. الگوریتم محاسبه‌ی لنگر مقاوم ناحیه‌ی اتصال تقویت شده.

تامین کند؛ به این معنی که ایجاد سازوکار نوار فشاری قطری بعد از ایجاد ریزترک های کششی قطری در زیرلایه های FRP، به واسطه مقاومت سیستم های FRP می تواند منجر به تحمل نیروهای برشی بیشتری شود. در واقع وجود مسلح کشنده های FRP یا هر سیستم مقاوم سازی دیگر مانند NSM می تواند جلوی گسترش ریزترک کششی در ناحیه ای اتصال را بگیرد؛ در نتیجه، فشار در نوار قطری متعامد با نوار کششی بیشتر می شود و این ممکن است از حد مقاومت فشاری بتن فراتر رود و در نتیجه، ناحیه ای اتصال، دچار شکست فشاری شود. بنابراین، یکی از معیارهای طراحی می تواند جلوگیری از شکست در نوار فشاری در نظر گرفته شود.^[۱۵، ۱۶] که تنش فشاری اصلی در ناحیه ای اتصال را به مقدار رابطه ۵۳ محدود می کند:

$$\sigma_1 < \circ / \mathfrak{f}^l \quad (53)$$

مقایسه و بررسی نتایج مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت فشاری بتن در جهت اصلی ناچیه‌ی اتصال بسیار حساس به تنش کششی در جهت دیگر است. برای در نظر گرفتن این موضوع می‌توان از توری میدان فشاری اصلاح شده استفاده کرد.^[۱۴] در پژوهش اخیر،^[۱۵] رابطه‌ی ۵۴ برای بیشینه‌ی تنش فشاری قابل تحمل توسط بتن ($f_{c2\max}$) در جهت اصلی ارائه شده است:

$$\frac{f_{c\max}}{f'_c} = \frac{1}{\alpha/\Lambda - \alpha/\tau \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{cu}}} \leq 1 \quad (54)$$

در آینین نامه‌ی ۲۰۱۹ - ۳۱۸ ACI در بند ۱۸.۸.۴.۱، بیشینه‌ی تنش برشی قابل تحمل ناچیه‌ی اتصال در اتصال‌های کناری را $\sqrt{f'} MPa$ تعیین کرده است. بنابراین بهتر است تنش برشی اتصال نیز کنترل شود.

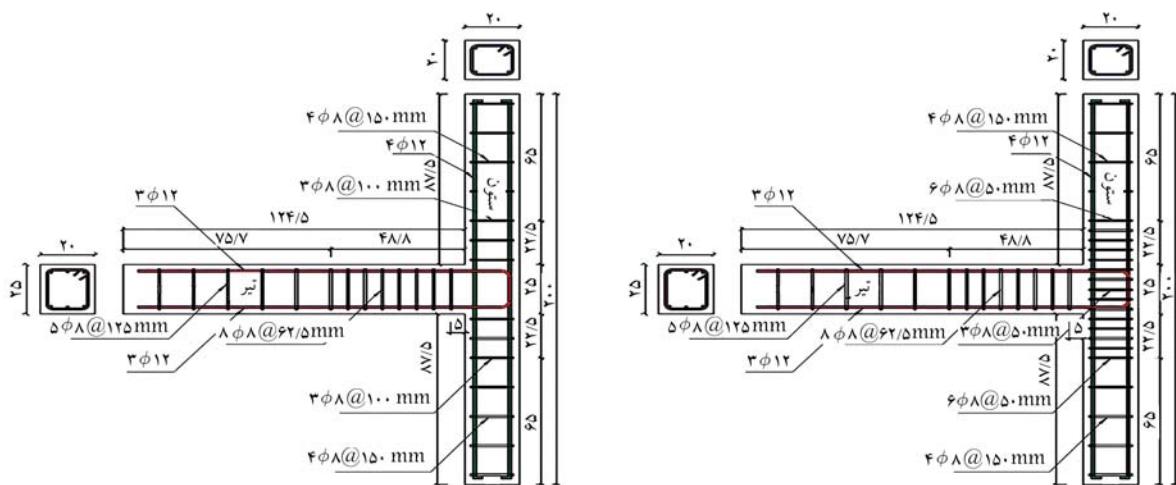
۸. معیارهای گسیختگی یا جداشده

مصالح سیستم‌های مسلح کنده‌ی تقویت روی سطح

به علت وجود حالت های جداشده^۶ و یا ورقه شدگی سطح بتن، ^۷ ظرفیت سیستم های مسلح کننده تقویت به صورت کامل استفاده نمی شود. به همین دلیل، تعداد زیادی از پژوهش گران بر روی حل مشکل اخیر مطالعه کردۀ اند.^[۱۸] در پژوهش حاضر، حالت های حدی نهایی مقاومت برای میلگرد های فولادی به روش NSM، به تسلیم رسیدن آن ها و معیار شکست در مسلح کننده های FRP به روش EBR نیز حالت های حدی نهایی مقاومت با فرض جداشده^۸ کی زودهنگام قبل از رسیدن کرنش آن ها به کرنش گسیختگی در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، برای پیش بینی ظرفیت جداشده^۹ FRP از روی سطح بتن از مدل ارائه شده در نوشتار هولزن کامفر^{۱۰} استفاده شده است، که بر اساس آن، بیشینه^{۱۱}ی تنش کششی ff_{max} در یک نوار FRP با ضخامت $t_f (mm)$ ، در هنگامی که جداشده^۹ اتفاق می افتد، از طریق رابطه^{۱۲} $55 \leq f_{t_f} \leq 60$ می آید:

$$f_{f,\max} = f_{f,deb} = c \sqrt{\frac{E_f f_{ct}}{t_f n f_b}} \quad \text{for} \quad l_{bt} \geq l_{b,\max} \quad (55)$$

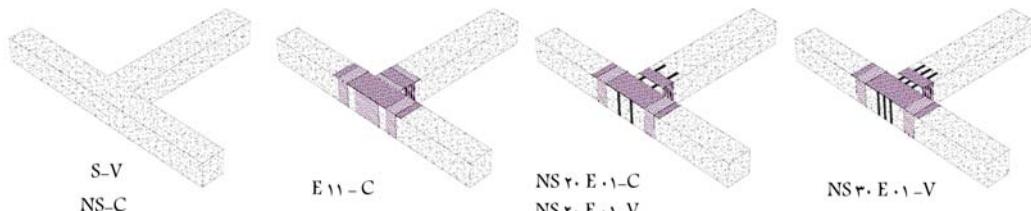
که در آن، c_1 یک ضریب تجربی است، که توسط نوبارو^۹ و همکارش (۱۹۹۷)،^{۱۰} برای CFRP مقدار 0.64% پیشنهاد شده است، با توجه به نتایج آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، به علت وجود مهارهای کافی به صورت دور پیچ CFRP، جدادشگی در محدوده طول مهاری تیر و ستون مشاهده نشده است، بلکه جدادشگی در ناحیه ای اتصال به علت خودرشدگی بین ناحیه ای اتصال اتفاق افتاده است؛ در نتیجه، مقدار c_1 مساوی 1 در نظر گرفته شده است.



ب) جزئیات لرزه بی در نظر گرفته نشده (سایر نمونه ها).

الف) طراحی لرزه بی شده نمونه S-V

شکل ۱۰. جزئیات آرماتورگذاری نمونه ها.



شکل ۱۱. هندسه های سه بعدی نمونه ها و الگوی مقاوم سازی.

۱۱. محاسبه های ظرفیت اتصال به کمک مدل تحلیلی پیشنهادی

در پژوهش حاضر، محاسبه های ظرفیت ناحیه ای اتصال طبق مدل تحلیلی پیشنهادی در الگوریتم شکل ۹ برای نمونه های تقویت شده (جدول ۱)، به کمک برنامه های رایانه بی برای چندین نیروی محوری مختلف روی ستون انجام شده است. مقادیر تنش اصلی کششی مقاوم نهایی (σ_{1F}) بر اساس افزایش تغییر شکل برشی ناحیه ای اتصال در شکل ۱۳ مشاهده می شود. بیشترین مقادیر Z_M در شکل ۱۴، همان ظرفیت خمی نهایی ناحیه ای اتصال است، که در نمودارهای M-N جهت مقایسه با ظرفیت خمی مقاطع تیر و ستون استفاده شده است. ظرفیت خمی نهایی اتصال در نمونه بی بدون تقویت (NS-C) طبق توضیح داده شده در بخش های قبل با فرض $f_c' = 29\sqrt{f_c} = 0.29\sigma_{1F}$ محاسبه شده است.

مطابق شکل ۱۳، با افزایش نیروی محوری فشاری روی ستون، تنش کششی اصلی مقاوم (σ_{1F}) ناحیه ای اتصال افزایش یافته است، که این موضوع تأثیر تغییرات فشار محوری ستون را نشان می دهد. همچنین یکی از نقاوت های اصلی روش های تقویت EBR و NSM با میلگرد های فولادی، در نوع شکست نهایی در ناحیه ای اتصال تقویت شده است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، در نمودارهای نمونه E ۱۱ بعد از رسیدن به بیشینه های ظرفیت، شکست ترد اتفاق افتاده است؛ در حالی که در نمونه های ۱ NS ۲۰ E ۰ و ۱ NS ۲۰ E ۱ بعد از رسیدن به بیشینه های ظرفیت، تغییر شکل برشی ناحیه ای اتصال به صورت شکل پذیر ادامه یافته است.

۱۰. طراحی و ساخت نمونه های آزمایشگاهی و تحلیلی

در پژوهش حاضر، از ۶ نمونه ای آزمایشگاهی برای راستی آزمایی مدل تحلیلی پیشنهادی استفاده شده است. برای تعیین ابعاد و آرماتور بندی نمونه ها، از طراحی یک ساختمان قاب خشکی ۴ طبقه طبق آینین نامه ACI ۳۱۹ - ۱۹ استفاده شده است. بعد از طراحی کامل ساختمان، اتصال کناری در طبقه ای اول با مقابس $\frac{1}{2}$ از وسط ستون ها و وسط تیر جدا شده است (شکل ۲). جزئیات هندسی نمونه ها در شکل ۱۰ مشاهده می شود.

لازم به ذکر است که از ۶ نمونه ای اخیر، فقط در یک نمونه به صورت کامل جزئیات لرزه بی در ناحیه ای اتصال رعایت شده (نمونه V-S) و در ۵ نمونه دیگر، هیچ گونه جزئیات لرزه بی در ناحیه ای اتصال در نظر گرفته نشده است. از بین ۵ نمونه دیگر، که از نظر طرح لرزه بی ناقص هستند، یک نمونه به عنوان شاهد بدون مقاوم سازی لحاظ شده است (نمونه C-NS) و ۴ نمونه دیگر، به روش های نصب میلگرد داخل شیارهای روی سطح (NSM) و نصب CFRP روی سطح (EBR) مقاوم سازی شده اند. در شکل ۱۱ و جدول ۱، هندسه های نمونه ها مشاهده و ارائه شده است. ساخت نمونه ها در شکل ۱۲ مشخصات مکانیکی مصالح با توجه به نتایج آزمایش، به این صورت است:

$$f'_c = 29.8 MPa, E_c = 27294 MPa, f_y = 420 MPa,$$

$$f_u = 60.2 MPa, E_s = 20000 MPa, E_{el} = E_{et} = 235000 MPa$$

جدول ۱. نامگذاری نمونه‌ها و نحوه اعمال بار محوری ستون.

نحوه اعمال پار	روش تقویت	نام نمونه ها
محوری به ستون		
متغیر	-	S-V
ثابت	-	NS-C
ثابت	یک لایه‌ی الیاف CFRP در راستای ستون و یک لایه در راستای تیر	E11-C
ثابت	یک لایه‌ی الیاف CFRP در راستای ستون و دو عدد میلگرد فولادی به روش NSM در راستای تیر	NS20E1-C
متغیر	یک لایه‌ی الیاف CFRP در راستای ستون و دو عدد میلگرد فولادی به روش NSM در راستای تیر	NS20E1-V
متغیر	یک لایه‌ی الیاف CFRP در راستای ستون و سه عدد میلگرد فولادی به روش NSM در راستای تیر	NS30E1-V

بارهای نقلی (مطابق با ساختمان ۴ طبقه) فرض طراحی اولیه با مقیاس ۵/۰٪ تابعی از بارگذاری اعمالی به کل سازه است.

$$N_u = N_g \pm \Delta N = N_g \pm \alpha V_c = \vartheta \circ kN \pm \alpha \frac{\gamma M_{u_c}}{l_c - h_b} \quad (58)$$

با فرض این که بار جانبی وارد به ساختمان ۴ طبقه به صورت مثلثی باشد (شکل ۲) و جمع کل بار جانبی (F_T) برابر با مجموع نیروی برشی تمام ستون‌ها فرض شود و همچنین در حالت حد نهایی، ستون‌ها از روی فونداسیون و همچنین تیرها در محل اتصال به ستون‌ها همگنی مفصل خمیری شوند، آنگاه ضریب α با برقراری تعادل لنگر برای کل سازه به راحتی قابل محاسبه است ($\alpha = 3/39 = 0.0789$) در واقع ضریب α به تناسب، مقدار بار جانبی وارد به سازه، مقدار کشش و فشار ایجاد شده در ستون‌های کناری را برآورد می‌کند.

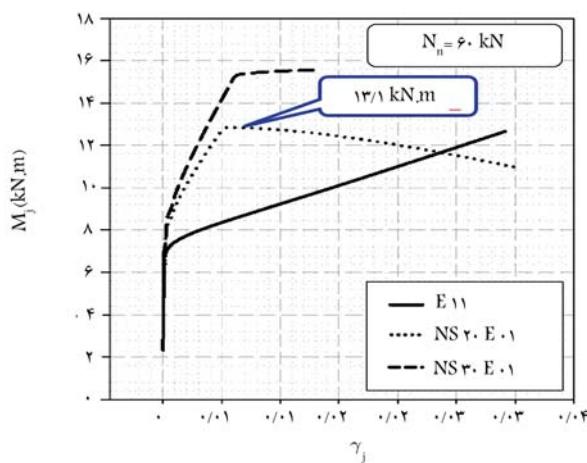
با کمک رابطه‌ی ۵۶ و لنگرهای مقاوم اجزاء اتصال در نیروهای محوری مختلف، نمودارهای اندرکش M-N برای نمونه‌های موردنظر در پژوهش حاضر به صورت ششکل ۱۵ تهیه شده‌اند. در شکل ۱۵ - a، در نمونه‌ی NS، هم در حالت بار محوری ثابت و هم در حالت بار محوری متغیر، شکست نهایی با ترک‌های قطری در تناحیه‌ی اتصال اتفاق افتاده است. در وضعیت بار محوری ثابت، ظرفیت بار جانشی اعمالی به تیر $V_b = 21,6 kN$ (نقطه‌ی ۱ - a) و در حالت بار محوری متغیر، $V_b = 18,8 kN$ (نقطه‌ی ۲ - a) پیش‌بینی شده است. در شکل ۱۵ - b، در نمونه‌ی E11 در حالتی که بار محوری ستون ثابت فرض شود، شکست نهایی با ایجاد خسارت در ناحیه‌ی اتصال است (نقطه‌ی ۱ - b)؛ ولی به دلیل نزدیک بودن به ظرفیت خمشی تیر، احتمالاً خسارت‌هایی نیز در تیر به وجود می‌آید، در حالی که در حالت بار محوری متغیر، در وضعیت Pull، شکست نهایی با خسارت‌های شدید در تناحیه‌ی اتصال ایجاد شده است (نقطه‌ی ۲ - b) و به علت وجود وضعیت Push و افزایش نیروی محوری فشاری ستون، ظرفیت اتصال نیز در این وضعیت افزایش یافته است و احتمالاً خسارت‌هایی نیز در تیر مشاهده می‌شود (نقطه‌ی ۳ - b) با این حال ظرفیت نهایی اتصال در نمونه‌ی E11 در حالت بار محوری متغیر، وضعیت بارگذاری Pull را تعیین می‌کند. در نمونه‌ی E1 در شکل ۱۵ - b در نقطه‌ی ۱ - c شکست نهایی با خسارت در ناحیه‌ی اتصال و تشکیل مفصل خمیری در تیر همراه است؛ در حالی که در حالت بار محوری متغیر در وضعیت Pull در نقطه‌ی ۲ - c، شکست در ناحیه‌ی اتصال در ظرفیت کمتری مشاهده می‌شود. در نمونه‌ی اخیر در وضعیت Push نیز ظرفیت نهایی توسط تیر با تشکیل مفصل خمیری همراه بوده است (نقطه‌ی ۳ - c). بنا براین برای نمونه‌ی E1 در حالت بارگذاری موجوری ثابت، ظرفیت اتصال کمی، سیستم از حالت بارگذاری



شکل ۱۲. الف) آرماتور بندی و قالب بندی، ب) شیار زنی جهت اجرای طرح تقویت به روش NSM، ج) نصب الیاف CFRP.

۱۱. تهیی نمودار اندرکنش $M - N$ نمونه‌ها و تعیین ظرفیت مجموعه‌ی اتصال

در پژوهش حاضر، لنگر مقاوم ناحیه‌ی اتصال به کمک مدل پیشنهادی و لنگرهای مقاوم اسیمی مقاطع ستون و تیر طبق بخش ۴ محاسبه شده است. برای تهیه‌ی نمودارهای اندکرکش $M-N$ همانند شکل ۱ و تخمین ظرفیت اتصال با در نظر گرفتن تغییرات بار محوری فشاری روی ستون، لازم است تغییرات نیروی محوری ستون متناسب با تغییرات لنگر ناشی از اعمال بار جانبی، به صورت خطوط مستقیم روی نمودارهای $M-N$ مشخص شود (راطیه ۵۶). تغییرات فشار محوری ستون حول



شکل ۱۴. نمودار ظرفیت لنگر معادل در ناحیه‌ی اتصال متناسب با افزایش کرنش برشی (فقط برای نیروی محوری N 60 kN).

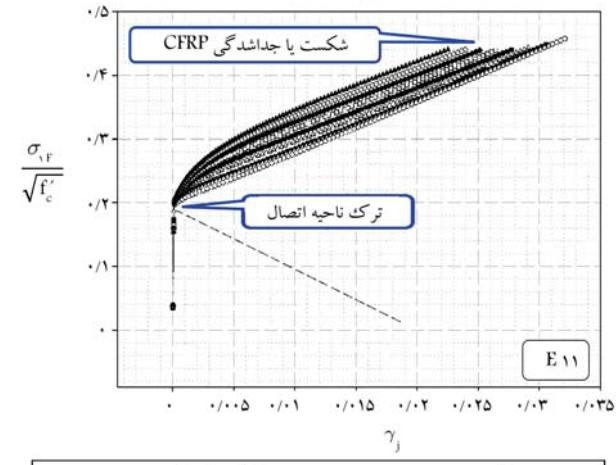
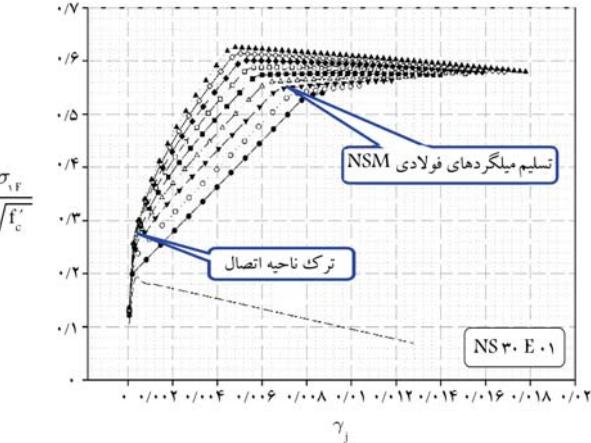
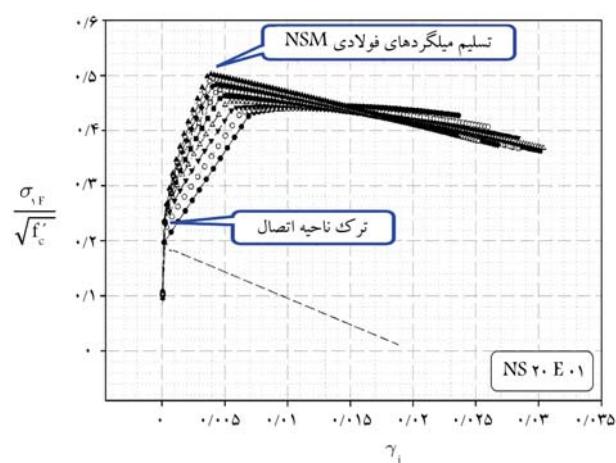
ناحیه‌ی اتصال باعث کاهش ظرفیت نهایی اتصال شده است. همچنین در وضعیت Push، بیشینه‌ی ظرفیت اتصال توسط تشکیل مفصل خمیری در تیر مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارهای اندرکنش شکل‌های ۱۵ - پ ۱۵ - ت، خسارت‌ها در تیر در محدوده‌ی بعد از ناحیه‌ی تقویت شده رخ داده است (تلاتی با نمودار ظرفیت $(M_{\text{b.eq}})$).

۱۲. راستی آزمایی مدل پیشنهادی با سایر پژوهش‌های آزمایشگاهی

جهت راستی آزمایی مدل پیشنهادی، از نتایج ۴ پژوهش آزمایشگاهی، استفاده شده است؛ که در آن‌ها، چندین نمونه‌ی اتصال کناری برسی و آزمایش شده‌اند و برای نمونه‌های موجود در آن‌ها، طبق مدل پیشنهادی، نوع شکست و بیشینه‌ی ظرفیت اتصال پیش‌بینی شده است. مدل پیشنهادی مطابق جدول ۲ نیز نتایج را در نمونه‌های دارای تقویت، بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی گزارش کرده است.

۱۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

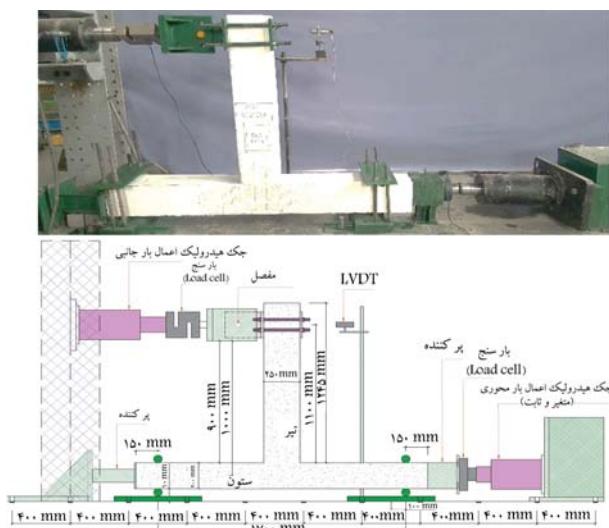
در پژوهش حاضر، نمونه‌های معرفی شده در جدول ۱، تحت بار جانبی متغیر تغییرشکل کنترل و همچنین بار محوری ستون (ثابت و متغیر) مطابق با دستگاه ارائه شده در شکل ۱۶ آزمایش شده‌اند. اتصال‌ها در انتهای تیر و ستون به صورت کاملاً مفصلی در نظر گرفته شده‌اند. بارگذاری جانبی به تیر به صورت رفت و برگشت با مقادیر تغییرمکان‌های نسبی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۵ و ۶ درصد از طریق یک لوله 10° انجام شده است. بارگذاری محوری ستون در نمونه‌هایی که ثابت در نظر گرفته شده بودند، همان بار ثقلی روی ستون (مطابق با ساختمان ۴ طبقه‌ی فرض طراحی اولیه) به مقدار $N_{\text{u}} = 60\text{ kN}$ در نظر گرفته شده بودند. بار محوری ستون در حالت متغیر نیز متناسب با تغییرات بار جانبی وارد به تیر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه‌ی مقادیر بار محوری ستون متناسب با تغییرات بار جانبی وارد به تیر، کافی است از جایگزینی $V_b = \frac{h}{l_c}$ به جای $\frac{2M_{\text{u,c}}}{l_c - h_b}$ در رابطه‌ی ۵۶، از رابطه‌ی مذکور بهره جست. مقادیر نیروی جانبی اعمالی به تیر و نیروی محوری



—□—	$N_u = 100\text{ kN}$	—●—	$N_u = 10\text{ kN}$
—●—	$N_u = 12\text{ kN}$	—○—	$N_u = 20\text{ kN}$
—○—	$N_u = 14\text{ kN}$	—▼—	$N_u = 40\text{ kN}$
—▲—	$N_u = 16\text{ kN}$	—△—	$N_u = 60\text{ kN}$
——	$\sigma_{\text{c}} \text{ (for all } N_u)$	—■—	$N_u = 80\text{ kN}$

شکل ۱۳. منحنی‌های تنش کششی اصلی مقاوم نهایی ناحیه‌ی اتصال با توجه به افزایش کرنش برشی.

محوری متغیر پیش‌بینی می‌شود. این موضوع به طور واضح، اثر در نظر گرفتن بار محوری متغیر را نشان می‌دهد. در نمونه‌ی ۱، در حالت بار محوری ثابت، خرایی کامل در تیر با تشکیل مفصل خمیری همراه است (نقطه‌ی ۱ - d) و در وضعیت بار محوری متغیر نیز در وضعیت Pull در نقطه‌ی ۲ - d خسارت در



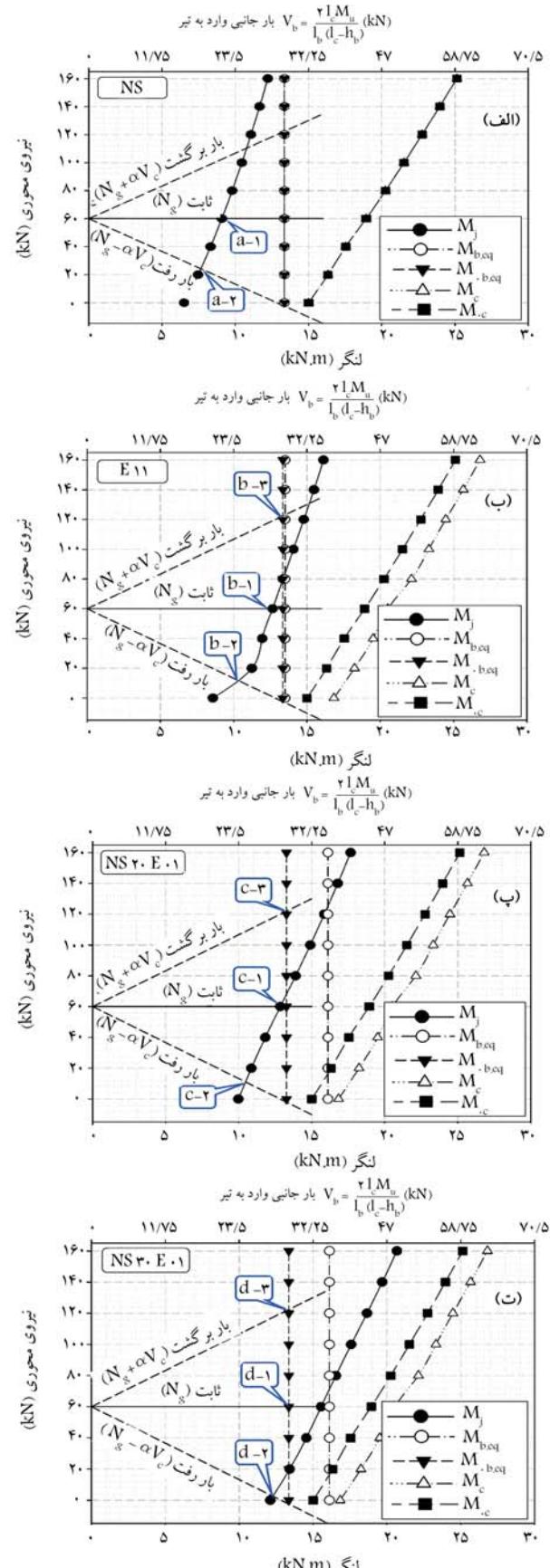
شکل ۱۶. دستگاه آزمایش نمونه‌ها.

به سه ستون توسط Load Cell و مقادیر تغییر مکان های انتهای تیر توسط LVDT، ندازه گذاری، کنترل و ثبت شده اند.

۱.۱۳. نتایج آزمایش

با توجه به منحني بار - تغییرمکان نمونه‌ی NS-C در شکل ۱۷، ظرفیت نهایی با شکست زودهنگام برشی در ناحیه‌ی اتصال اتفاق افتاده و در همان تغییرمکان‌های نسیم اولیه به شدت کاهش مقاومت ایجاد شده است.

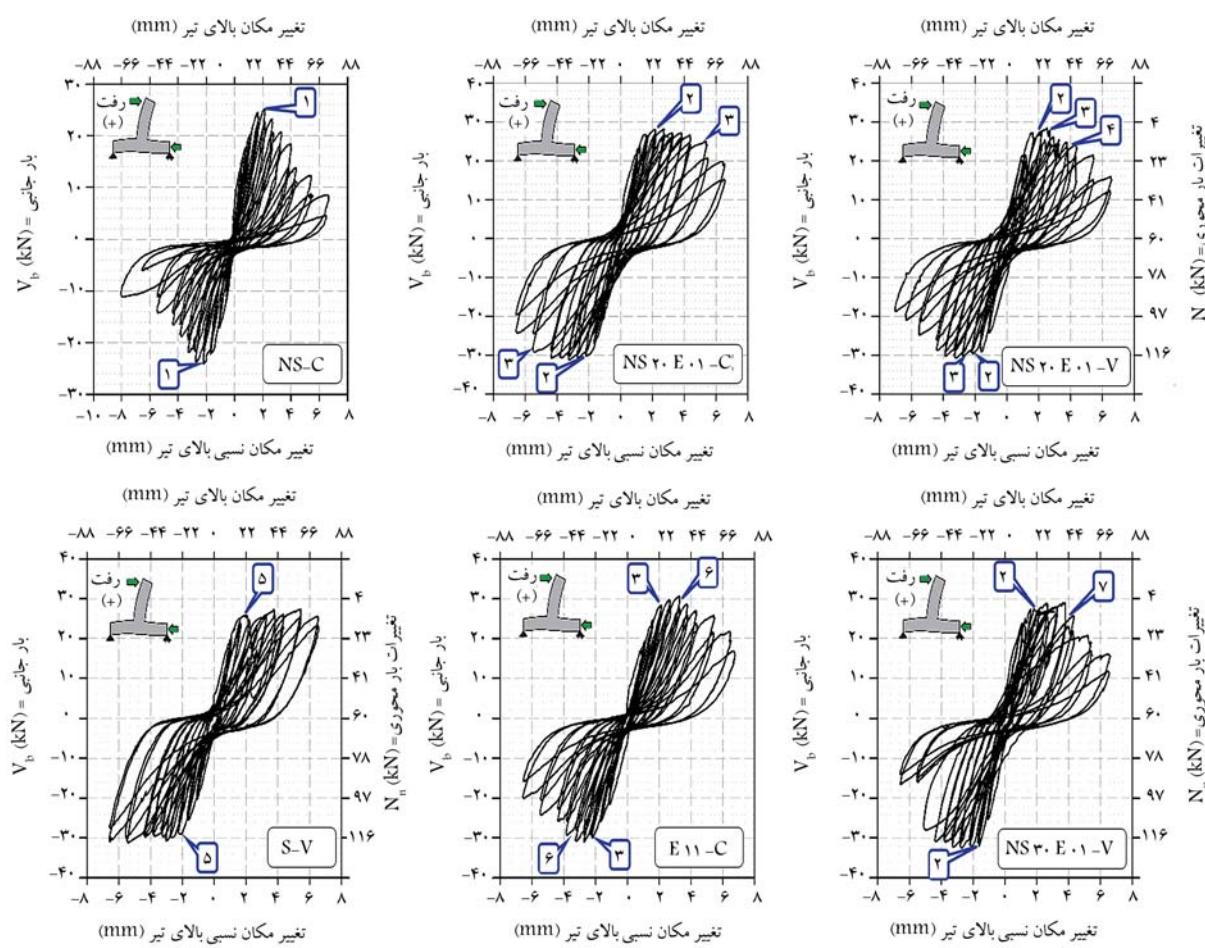
در نمونه V-S در شکل ۱۷، تشكیل مفصل خمیری در تیر و رفتاری کاملاً شکل پذیر مشاهده می‌شود. اثر بار محوری متغیر در نمونه‌ی S-V با کاهش مقادیر بیشینه‌ی متحسنی در وضعیت Pull نسبت به وضعیت Push کاملاً مشخص است؛ زیرا در وضعیت Pull، فشار محوری ستون در حال کاهش بوده و به همین دلیل گسترش ترک‌های قطری در ناحیه‌ی اتصال باعث افزایش تغییرمکان و در نتیجه کاهش پاره‌ی جانسی نمونه شده است. در نمونه‌ی تقویت شده‌ی E11 در شکل ۱۷ از حدود تغییرمکان نسبی ۱/۵٪ به بعد، ترک‌های خمیشی در تیر بر اتصال به ستون شروع شده و تا حدی میلگرد‌های تیر به حالت تسیلیم رسیده‌اند؛ ولی از تغییرمکان نسبی ۴٪، جداشدنگی CFRP در ناحیه‌ی اتصال کاملاً مشهود است و در نهایت با پارگی CFRP نصب شده در راستای تیر در ناحیه‌ی اتصال، کاهش مقاومت شدید مشاهده می‌شود. متحنی‌های بار-تغییرمکان نمونه‌ی C-۱ NS_{۲۰}E_{۰۱} در شکل ۱۷، تشكیل مفصل خمیری در تیر بعد از ناحیه‌ی تقویت شده را نشان می‌دهد و از حدود تغییرمکان نسبی ۵٪، ترک‌های خمیشی تیر در بر اتصال به ستون نیز مشاهده می‌شوند. همچنین در مورد نمونه‌ی اخیر در وضعیت فشار محوری متغیر باری ستون (نمونه V-NS_{۲۰}E_{۰۱})، تشكیل مفصل خمیری در تیر بعد از ناحیه‌ی تقویت شده و ترک‌های خمیشی تیر در بر اتصال به ستون، در تغییرمکان نسبی ۴٪، با جدا شدن CFRP در ناحیه‌ی اتصال در راستای ستون، ترک‌های قطری در ناحیه‌ی اتصال مشاهده می‌شوند، که این موضوع باعث کاهش ظرفیت بارهای اتصال شده است. در نمونه V-۱ NS_{۳۰}E_{۰۱} طبق متحنی، بار-تغییرمکان در شکل ۱۷، تشكیل مفصل خمیری در تیر بعد از ناحیه‌ی



شکل ۱۵. نمودارهای اندرکنش $N - M$ نمونه‌ها.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهش‌ها، [۲۱، ۲۲، ۸، ۴] با مدل پیشنهادی.

$\frac{V_A}{V_E}$	نتایج تحلیل مدل پیشنهادی (kN)			نتایج آزمایش (kN)			نوع تقویت	مقارضت بتن	نمونه‌ها
	پیش‌بینی شکست	بیشینه‌ی ظرفیت بار	بیشینه‌ی جانبی (VA)	پیش‌بینی نوع شکست	بیشینه‌ی ظرفیت بار	بیشینه‌ی محوری ستون			
۰/۹۲	شکست ناحیه‌ی اتصال	۳۹/۳۷		شکست ناحیه‌ی اتصال	۴۲/۷۱	۱/۱۵	CFRP Laminate	۲۲/۸	F11
۱/۱۲	شکست ناحیه‌ی اتصال	۴۹/۷		شکست ناحیه‌ی اتصال	۴۴/۴۱	۱/۱۵	CFRP Laminate	۲۹/۵	F12
۰/۹۸	شکست ناحیه‌ی اتصال	۴۹/۳۸		شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۰/۲۹	۱/۱۵	CFRP Laminate	۲۷	F21
۱/۰۶	شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۳/۲		شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۰/۰۴	۱/۱۵	CFRP Laminate	۲۷/۲	F22
۱/۰۷	شکست ناحیه‌ی اتصال	۶۱/۵۲		شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۷/۳۸	۲/۸۷	CFRP Laminate	۲۷/۸	F22A
۱/۱۵	شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۰/۸۱		شکست ناحیه‌ی اتصال	۴۴/۰۹	۱/۱۵	CFRP Laminate	۱۹	SF22
۰/۷۸	شکست ناحیه‌ی اتصال	۲۱/۰۸		شکست ناحیه‌ی اتصال	۲۷	۱/۱۵	None	۱۹/۵	CI
۱/۲۱	شکست ناحیه‌ی اتصال	۱۰/۴		شکست ناحیه‌ی اتصال	۸/۵۶	۰	None	۳۶/۵	NS
۱/۱۹	مفصل خمیری در تیر	۱۲/۰۴		مفصل خمیری در تیر	۱۰/۱	۰	CFRP Sheet	۳۶/۵	RNS - ۱
۰/۹۶	مفصل خمیری در تیر	۷۳/۷		مفصل خمیری در تیر	۷۷/۱۶	۳/۷	GFRP Sheet	۳۰	BWFRL
۰/۸۱	مفصل خمیری در تیر	۳۲/۵۸		مفصل در تیر و خراپی جزئی در اتصال	۴۰/۱۶	۳/۶۹	GFRP Sheet	۳۰	BWFMR
۱/۱۴	مفصل خمیری در تیر	۱۲/۴		مفصل در تیر و خراپی جزئی در اتصال	۱۰/۹۲	۴/۰۶	GFRP Sheet	۳۰	BWFSL
۰/۹	شکست ناحیه‌ی اتصال	۵۵/۹		شکست ناحیه‌ی اتصال	۶۲	۳/۳۳	None	۱۷/۹۵	J - ۰۱
۰/۹	شکست ناحیه‌ی اتصال	۷۱/۷		مفصل خمیری در تیر	۸۰	۳/۳۳	CFRP Sheet	۱۷/۹۵	J - ۰۲

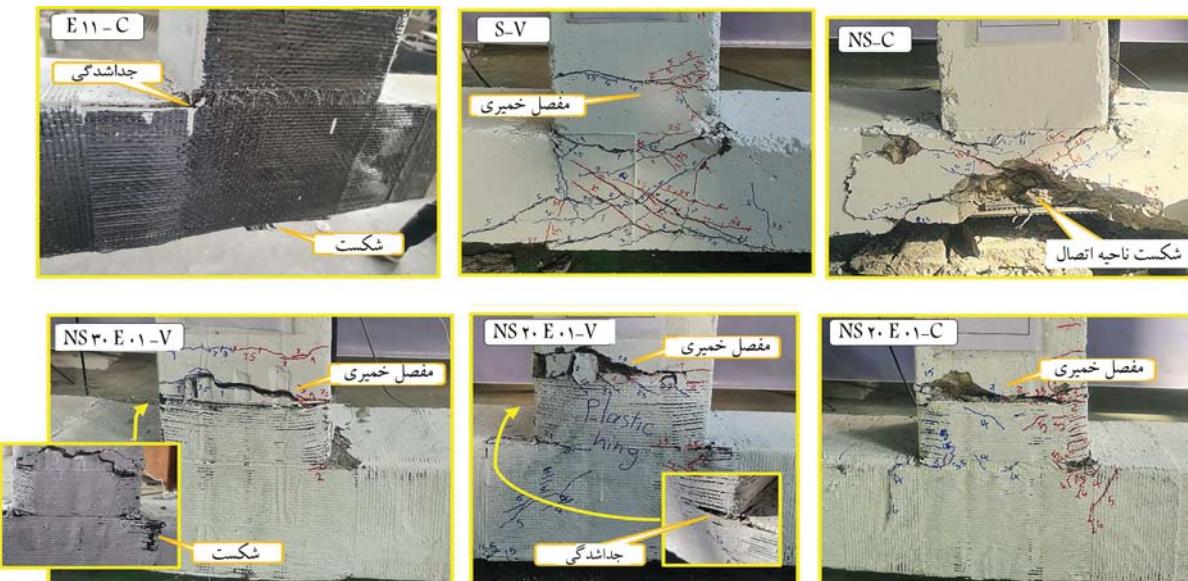


۱) شکست ترد بر پیشی در ناحیه اتصال؛ ۲) تشکیل مفصل خمیری در تیر بعد از تاجه های تقویت شده؛ ۳) ترک های خمیشی در تیر در بر اتصال به ستون؛

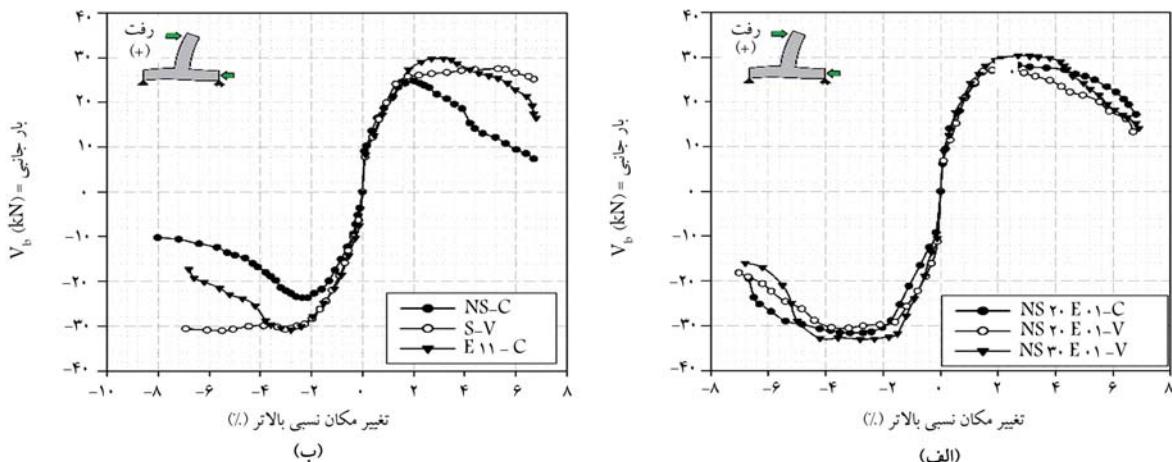
۴) ترک های قطری در ناحیه اتصال؛ ۵) تشکیل مفصل خمیری در تیر در بر اتصال به ستون؛ ۶) جداشدگی و پارگی CFPR در راستای تیر در ناحیه ای اتصال؛

۷) جداشدگی و پارگی CFRP در راستای ستون در ناحیه اتصال.

شکل ۱۷. منحنی‌های حرخه‌ی پارگذاری جانی اتصال در مقابل جایه‌چایچی.



شکل ۱۸. وضعیت نمونه‌ها در شکست نهایی.



شکل ۱۹. مقادیر بیشینه‌ی منحنی‌های چرخه‌ی بارگذاری جانبی نمونه‌ها.

در صورت وجود فشار محوری متغیر برای نمونه اخیر رفتاری ترددتر نسبت به حالت موجود از خود نشان داده‌اند. در شکل ۱۹، ظرفیت بار جانبی در نمونه‌ی NS^{۲۰}E^۱ – V کمی کمتر از نمونه‌ی C – NS^{۲۰}E^۱ گزارش شده و همچنین نمونه‌ی NS^{۲۰}E^۱ – C، شکست نرم‌تری نسبت به نمونه‌ی V – NS^{۲۰}E^۱ داشته است. این موضوع تأثیر بار محوری متغیر در ستون را نشان می‌دهد.

تقویت شده مشاهده می‌شود و رفتار خمیری تا تغییر مکان نسبی ۴٪ ادامه پیدا کرده است؛ ولی به علت سختی نسبتاً زیاد در ناحیه‌ی اتصال، بارگذاری در محدوده‌ی ناحیه‌ی اتصال در راستای ستون افق افتاده و رفتار اتصال بعد از آن با کاهش مقاومت همراه بوده است. توضیحات اخیر در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

برای نمایش بهتر بیشینه‌ی ظرفیت نمونه‌ها، از روی هم‌گذاشتن مقادیر بیشینه‌ی منحنی بار – تغییر مکان مطابق شکل ۱۹ استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۹ - الف، شکست نسبتاً تردی در نمونه‌ی C – E11 – NSM مشخص است؛ در حالی که نمونه‌های تقویت شده با میلگرد‌های فولادی به روش NSM، رفتار نسبتاً شکل‌پذیرتری از خود نشان داده‌اند (شکل ۱۹ - ب). همچنین در شکل ۱۹ - ب، نمونه‌های تقویت شده به روش NSM در وضعیت فشار محوری متغیر نسبتاً رفتار ترددتری در حالت بارگذاری ثابت محوری ستون از خود نشان داده‌اند. این نکته حائز اهمیت است که نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR (نمونه‌ی E11 – C) در وضعیت فشار محوری ثابت آزمایش شده و طبق توضیحات فوق،

۱۴. مقایسه و بررسی مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش

ظرفیت نهایی و نوع شکست نمونه‌ها با توجه به نتایج آزمایش (شکل ۱۹) و منحنی‌های اندکنش M-N مدل پیشنهادی (شکل ۱۵) به صورت خلاصه در جدول ۳ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، مقادیر ظرفیت نهایی و نوع شکست در مدل پیشنهادی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین برای تهیه‌ی یک طرح این جهت تقویت اتصال کناری ناقص می‌توان از مدل پیشنهادی بهره جست.

جدول ۳. خلاصه‌ی مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی.

$\frac{V_b(A)}{V_b(E)}$	نتایج مدل پیشنهادی				نتایج آزمایش				نام نمونه‌ها ستون	بارگذاری بارگذاری جانبی	ثابت	NS - C
	بیشینه‌ی بار جانبی (kN)	بار محوری ستون (kN)	شکست حاکم	بیشینه‌ی بار جانبی (kN)	بار محوری ستون (kN)	شکست حاکم	بیشینه‌ی اتصال	ناحیه‌ی اتصال				
	($N_{n(A)}$)	($V_b(A)$)	($N_{n(E)}$)	($V_b(E)$)			25/15	ناحیه‌ی اتصال	Pull	Push	Push	
۰,۸۵	۶۰	۲۱,۶۰	ناحیه‌ی اتصال	۶۰			-۲۴,۰۴	ناحیه‌ی اتصال				
۰,۹۰												
۰,۹۸	۶۰	۲۹,۳۸	ناحیه‌ی اتصال	۶۰			۲۹,۹۴	ناحیه‌ی اتصال	Pull	Push	Push	E11 - C
۰,۹۶							-۳۰,۶۱	ناحیه‌ی اتصال				
۱,۰۵	۶۰	۳۰,۳۱	مفصل خمیری در تیر و خسارت در ناحیه‌ی اتصال	۶۰			۲۸,۸۴	مفصل خمیری در تیر	Pull	Push	Push	NS ^۲ E ^۰ ۱ - C
۰,۹۷							-۳۱,۳۳	مفصل خمیری در تیر				
۰,۹۷	۱۲/۱۰	۲۶,۷۹	ناحیه‌ی اتصال	۸/۵۳			۲۷,۶۷	مفصل خمیری در تیر و خسارت در ناحیه‌ی اتصال	Pull	Push	Push	NS ^۲ E ^۰ ۱ - V
۱,۰۵	۱۲۰/۰۵	۳۱,۰۲	مفصل خمیری در تیر	۱۱۴,۸۷			-۲۹,۵۰	مفصل خمیری در تیر				
۰,۹۸	۳,۸۴	۲۹,۱۴	ناحیه‌ی اتصال و خسارت در تیر	۴,۵۵			۲۹,۸۱	مفصل خمیری در تیر و خسارت در ناحیه‌ی اتصال	Pull	Push	Push	NS ^۳ E ^۰ ۱ - V
۰,۹۷	۱۲۰/۰۵	۳۱,۴۹	مفصل خمیری در تیر	۱۲۰,۶۱			-۳۲,۵۹	مفصل خمیری در تیر				

۲. بر اساس نتایج تحلیل با مدل پیشنهادی، کاهش نیروی فشاری ستون باعث کاهش مقاومت ناحیه‌ی اتصال شده است. بنابراین تغییرات نیروی فشاری ستون در یک اتصال کناری در قاب خمیزی به شدت در مقاومت ناحیه‌ی اتصال تأثیرگذار بوده است.

۳. تحلیل با مدل پیشنهادی به کمک نمودارهای M-N نشان داد که ارائه‌ی طرح تقویت با فرض ثابت گرفتن نیروی محوری ستون می‌تواند منجر به یک طرح غیرایمن شود. به عنوان مثال، در نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR (E11) طرفیت اتصال با فرض ثابت گرفتن بار محوری ستون بار محوری ستون برابر با $۲۹,۳۸ kN$ و در حالت بار محوری متغیر برابر با $۲۵,۲۵ kN$ بوده است. همچنین برای نمونه‌ی تقویت شده به روش NSM (NS^۲ E^۰ ۱) نشان داد که ارائه‌ی اتصال با فرض ثابت گرفتن بار محوری ستون، شکست با تشکیل مفصل خمیری در تیر همراه بوده است. در حالی که با متغیر فرض کردن بار محوری، خسارت‌ها در ناحیه‌ی اتصال نیز به وجود آمده و ظرفیت نهایی نیز کمتر بوده است؛

۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های اتصال کناری در سایر پژوهش‌ها با نتایج تحلیل نمونه‌های حاضر با مدل پیشنهادی، تطابق قابل قبول نشان داده است. مقدار تفاوت مقاومت ارائه شده در آزمایش و مدل تحلیلی برای نمونه‌های بدون تقویت، به طور میانگین $۱۷ \pm ۱\%$ و برای نمونه‌های تقویت شده، به طور میانگین $۱۰ \pm ۱\%$ به دست آمده است؛

۵. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، منحنی‌های چرخه‌ی بارگذاری - جابه‌جایی نمونه‌ها

۱۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی نوع شکست و تعیین مقدار ظرفیت نهایی اتصال کناری تقویت شده ارائه شده است، که در آن از منحنی‌های M-N با درنظرگرفتن تأثیر بار محوری متغیر استفاده شده است. همچنین در پژوهش حاضر، یک روش تقویت ساده و مؤثر به کمک میلگرد‌های فولادی نصب شده در نزدیک سطح (NSM) معرفی شده است. در بخش آزمایشگاهی از ۵ نمونه‌ی اتصال ناقص و یک نمونه با جزئیات کامل لرزه‌یی استفاده شده است. از ۵ نمونه‌ی اتصال ناقص، یک نمونه به عنوان شاهد و بقیه به روش‌های EBR و NSM مقاوم سازی شده‌اند. شرایط بارگذاری نمونه‌ها در آزمایشگاه به گونه‌یی تنظیم شده است که بعضی نمونه‌ها با بار محوری ثابت و بعضی با بار محوری متغیر، تحت بارگذاری جانبی به تیر، در حالت تغییرشکل کنترل قرار گرفته‌اند. در نهایت، به کمک سایر پژوهش‌های آزمایشگاهی و همچنین ۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی در پژوهش حاضر، مدل پیشنهادی راستی آزمایی شده و نتایج مهمی بدین شرح به دست آمده است:

۱. تحلیل‌ها با مدل پیشنهادی نشان داد که با افزایش تغییرشکل برشی ناحیه‌ی اتصال، بعد از پارگی و جداشده‌ی CFRP در نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR، کاهش ظرفیت اتصال به صورت ناگهانی اتفاق افتاده است. در مقابل، نمونه‌های تقویت شده با میلگرد‌های فولادی به روش NSM، بعد از تسلیم شدن میلگردها، با شکستی نرم با ناحیه‌ی خمیری در نمودارهای چرخه‌یی همراه بوده‌اند؛

پانویسات ها

۱. تقویت به روش نصب در نزدیک سطح
۲. تقویت به روش نصب روی سطح

 - 3. Pampanin
 - 4. Priestley
 - 5. Pampanin
 - 6. debonding
 - 7. delamination
 - 8. Holzenkä mpfer
 - 9. Neubauer
 - 10. hinge

منابع (References)

1. Ruiz-Pinilla, J.G., Pallarés, F., Gimenez, E. and et al. "Experimental tests on retrofitted RC beam-column joints underdesigned to seismic loads: general approach", *Engineering Structures*, **59**, pp. 702-714 (2014).
 2. Roy, B. and Laskar, A.I. "Cyclic performance of beam-column subassemblies with construction joint in column retrofitted with GFRP", *Structures*, **14**, pp. 290-300 (2018).
 3. Shoukry, M.E., Tarabia, A.M. and Abdelrahman, M.Z. "Seismic retrofit of deficient exterior RC beam-column joints using steel plates and angles", *Alexandria Engineering Journal*, **61**(4), pp. 3147-3164 (2021).
 4. Antonopoulos, C.P. and Triantafillou, T.C. "Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints", *Journal of Composites for Construction*, **7**(1), pp. 39-49 (2003).
 5. Pampanin, S., Bolognini, D. and Pavese, A. "Performance-based seismic retrofit strategy for existing reinforced concrete frame systems using fiber-reinforced polymer composites", *Journal of Composites for Construction*, **11**(2), pp. 211-226 (2007).
 6. Akguzel, U. and Pampanin, S. "Effects of variation of axial load and bidirectional loading on seismic performance of GFRP retrofitted reinforced concrete exterior beam-column joints", *Journal of Composites for Construction*, **14**(1), pp. 94-104 (2010).
 7. Al-Osta, M.A., Khan, U., Baluch, M.H. and et al. "Effects of variation of axial load on seismic performance of shear deficient RC exterior BCJs", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **12**(1), p. 46 (2018).
 8. Le-Trung, K., Lee, K., Lee, J. and et al. "Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites", *Composites Part B: Engineering*, **41**(1), pp. 76-85 (2010).
 9. Singh, V., Bansal, P.P., Kumar, M. and et al. "Experimental studies on strength and ductility of CFRP jacked frame assessment", *Journal of Earthquake Engineering*, **6**(sup001), pp. 75-100 (2002).
 14. Pampanin, S., Calvi, G.M. and Moratti, M. "Seismic behaviour of RC beam-column joints designed for gravity loads", in *12th European Conference on Earthquake Engineering*, Citeseer (2002).
 15. Prota, A., Nanni, A., Manfredi, G. and et al. "Selective upgrade of beam-column joints with composites", *In Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, pp. 919-926 (2001).
 16. Vecchio, F.J. and Collins, M.P. "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI J*, **83**(2), pp. 219-231 (1986).
 17. ACI-440-2R. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", American Concrete Institute (2017).
 18. Saxena, P., Toutanji, H. and Noumowe, A. "Failure analysis of FRP-strengthened RC beams", *Journal of Composites for Construction*, **12**(1), pp. 2-14 (2008).
 19. Holzenkämpfer, P. "Ingenieurmodelle des verbunds geklebterbewehrung für betonbauteile", (1994).
 20. Neubauer, U. and Rostasy, F. "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates", *In Proceedings of The Seventh International Conference on Structural Faults and Repair*, **2**, Concrete and Composites (1997).
 21. Realfonzo, R., Napoli, A. and Pinilla, J.G.R. "Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems", *Construction and Building Materials*, **54**, pp. 282-297 (2014).
 22. Choudhury, A., Deb, S. and Dutta, A. "Study on size effect of fibre reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beam-column connections under cyclic loading", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **40**(4), pp. 353-360 (2013).

بررسی تشدیدکننده‌های متناوب به عنوان موانع موج برای کاهش امواج لرزه‌یی سطحی با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه

شهاب امانت (کارشناس ارشد)

رضا رفیعی دهخوارانی* (استادیار)

گروه هندسی عمران، دانشکده فنی و هندسی، دانشگاه تهران

مهمنگی عمران شرکت، (جمهوری اسلامی ایران) ۱۴۰/۳-۱/۳-۳۰-۰۷، (پژوهشی)

دوری ۲-۳، شماره ۱/۳، ص. ۳۰-۳۷، (پژوهشی)

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تشدیدکننده‌های متناوب به عنوان یک رویکرد برای کاهش امواج لرزه‌یی سطحی است. به این منظور، ابتدا با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه، شبکه‌یی تامحدودی از تشدیدکننده ارزیابی شده است. سپس با استفاده از مفهوم خط صوت برای تشخیص امواج شکافبازند مربوط به امواج سطحی تعیین شدند. مفهوم خط صوت برای تشخیص امواج سطحی خالص به کار می‌رود. سپس از آنچه‌یی که فرضیات تئوری بلاخ - فلوکه، براساس شبکه‌یی تامحدود است، اما شبکه‌یی امواج لرزه‌یی در واقعیت شبکه‌یی محدود است، راستی آنچه‌یی شکافبازند مذکور با دقت گرفتن یک مدل شبکه‌یی محدود در دو حوزه‌یی بسالم و زمان ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که تشدیدکننده‌ی طراحی شده در پژوهش حاضر، شکافبازند قابل توجهی برای کاهش امواج سطحی دارد. همچنین نتایج حاصل از بررسی شبکه‌یی محدود نشان می‌دهد که با استفاده از تشدیدکننده‌های مذکور، دامنه‌ی امواج سطحی در بازه‌ی متناظر با شکافبازند در حوزه‌ی بسالم و زمان به ترتیب ۴۴ و ۷۲ کاهش یافته‌اند.

amanat.shahab@ut.ac.ir
rezarafiee@ut.ac.ir

واژگان کلیدی: موانع لرزه‌یی، تشدیدکننده، شکافبازند، تئوری بلاخ - فلوکه، خط صوت.

۱. مقدمه

امروزه بررسی موانع لرزه‌یی، بخش عمده‌یی از مطالعات مهندسی زیوتکنیک را شامل می‌شود. در ادبیات فنی، پژوهشگران با به کارگیری تئوری‌ها و رویکردهای مختلف به طراحی و بررسی موانع لرزه‌یی پرداخته‌اند. یکی از رویکردهای مذکور، به کارگیری یک شبکه‌یی متناوب از موانع لرزه‌یی است که با توجه به ساختار موانع و آرایش شبکه‌یی اخیر، بخش قابل توجهی از امواج لرزه‌یی در برخورد با شبکه، بازتاب می‌شوند و به سازه‌ی موردنظر نمی‌رسند. به منظور بررسی شبکه‌یی متناوب اشاره شده، رویکردهای عددی و آزمایشگاهی متنوعی ارائه شده است. یکی از به روزترین روش‌های موجود، تحلیل شبکه با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه^۱ است که در اصل یکی از تئوری‌های موجود در فیزیک حالت جامد و رویکردی برای بررسی یک شبکه‌یی تامحدود از موانع است که در اصطلاح به آن سلول واحد^۲ می‌گویند.

با فرض یک شبکه از سلول‌های واحد در اطراف سازه، تئوری بلاخ - فلوکه این امکان را فراهم می‌کند که با مدل کردن یک سلول واحد و اعمال شرایط مرزی تناوب فلوکه^۳، شبکه به صورت تامحدود تحلیل شود. به این صورت که به ازاء بردار موج‌های مختلف در ناحیه‌ی بربلوبن اول^۴، سامدهای ویژه به دست می‌آیند و پس از پس‌پردازش‌های مناسب، وجود ناحیه‌یی که در آن هیچ بسامد ویژه‌یی نباشد، بررسی

امواج لرزه‌یی حاصل از زلزله، سالانه در سراسر جهان خسارت‌های جانی و مالی جبران‌ناپذیری را به جوامع بشری وارد می‌کنند. در نتیجه، مهندسان همواره در تلاش برای ارائه رویکردهای جدیدی به منظور کاهش امواج لرزه‌یی مخرب بوده‌اند. بسیاری از پژوهشگران با بهبود آینه‌های طراحی یا به کارگیری مصالح جدید، برای مقاوم‌سازی سازه‌ها تلاش کرده‌اند. اما یکی دیگر از رویکردهایی که در مهندسی زیوتکنیک از دیرباز مطالعه شده است، به کارگیری موانع لرزه‌یی در خاک اطراف سازه به منظور کاهش امواج لرزه‌یی منتقل شده به سازه است. شاید بتوان از اولین مطالعات صورت گرفته در این زمینه به مطالعات وودزا^۵ در پیش از نیم قرن پیش اشاره کرد. در سال‌های بعد، نیز بسیاری از پژوهشگران به بررسی دقیق‌تر موانع لرزه‌یی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی پرداخته‌اند. می و بولت^۶ (۱۹۸۲)، یکی از اولین مدل‌سازی‌های عددی را بر روی ترانشه‌های موجود در خاک به منظور کاهش امواج لرزه‌یی انجام داده‌اند.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۹/۳/۱۴۰۱، اصلاحیه ۳۱/۵/۱۴۰۱، پذیرش ۱۴/۶/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60363.3099

به این منظور، عده‌یی از پژوهشگران به بررسی ابعاد سلول واحدی به ابعادی تا ۱۰ متر پرداخته‌اند، که می‌توانند به شکاف‌باند در بسامد‌های پایین، دست پیدا کنند.^[۷]

یکی از دیگر روش‌های مؤثر برای دستیابی به شکاف‌باند در بسامد‌های پایین، استفاده از تشیدیکننده‌های سطحی است.^[۸] به طور کلی، تشیدیکننده‌ها با ایجاد تشیدید در یک بازه‌ی خاص بسامدی موجب ایجاد شکاف‌باند می‌شوند. تشیدیکننده‌ها به دو صورت محصور و غیرمحصور در خاک در نظر گرفته می‌شوند. از نمونه مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تشیدیکننده‌های محصور در خاک می‌توان به مطالعه‌ی پالرمو^[۹] و همکاران^[۱۰] اشاره کرد. آن‌ها به طراحی یک فرماهدی لرزه‌یی پرداخته‌اند که باعث تبدیل امواج لرزه‌یی سطحی را می‌یابند. هر ساختار تشیدیکننده‌ی در نظر گرفته شده توسط ایشان، از یک جرم استوانه‌یی تشکیل شده است که توسط فنرهای الاستومر در داخل یک بدنه‌ی بتنی معلق است و می‌توان آن را با بسامد تشیدید موردنظر تنظیم کرد. همچنین آن‌ها عملکرد هر فرماده را با یک مدل تجربی مقیاس‌یافته بررسی کرده و دریافت‌های این مدل را با استفاده از تئوری ۵۰٪ با استفاده از تشیدیکننده‌های اخیر در بسامد زیر ۱۰ هرتز کاهش داد. بازه‌ی بسامدی اشاره شده، برای حفاظت از ساختمانها و زیرساخت‌های عمرانی بسیار مناسب است.

محمد^[۱۱] و همکاران^[۱۲]،^[۱۳] به منظور کاهش امواج لرزه‌یی سطحی، از تشیدیکننده‌های فولادی غیرمحصور در خاک استفاده کردند و دو نوع ساختار فولادی برای تشیدیکننده‌ها در نظر گرفتند و آن‌ها را در خاک یک‌لایه و چندلایه ارزیابی کردند. با توجه به تشیدید صورت گرفته، آن‌ها توانستند به شکاف‌باند‌هایی با بسامد‌های پایین برای امواج سطحی دست پیدا کنند. همچنین ایشان نتایج به دست آمده از تحلیل شبکه‌یی محدود را که با استفاده از تئوری بلخ - فلوکه حاصل شده بود، با به کارگیری شبکه‌یی محدود در حوزه‌ی بسامد و زمان ارزیابی کردند و نتایج، نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای تشیدیکننده‌های مذکور در کاهش امواج لرزه‌یی در بسامد‌های پایین بوده است.

لیو^[۱۴] و همکاران^[۱۵]،^[۱۶] از هر دو مفهوم عمق انرژی^[۱۷] و خط صوت^[۱۸] به منظور به دست آوردن شکاف‌باند امواج سطحی استفاده کردند و نشان دادند که تشیدیکننده‌های در نظر گرفته شده با ارتفاع ۱۲ متر، توانایی تولید چندین شکاف‌باند را در بازه‌ی بسامد‌های پایین دارند. همچنین دریافتند که با ترکیب هر دو مفهوم عمق انرژی و خط صوت، می‌توان بازه‌ی شکاف‌باند را با دقت بالاتری محاسبه کرد. دو روش اصلی در پس‌پردازش امواج سطحی، روش‌های مبتنی بر توزیع انرژی^[۱۹] و روش خط صوت^[۲۰] هستند. در روش عمق مؤثر انرژی از این مفهوم استفاده می‌شود که بیشتر انرژی امواج سطحی در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند؛ پس می‌توان با توجه به انرژی کرنشی، مودهای سطحی را از هم جدا کرد. مطالعات در روش خط صوت نشان داده است که کمترین مود حجمی در حقیقت در مرز بین امواج سطحی خالص با امواج سطحی غیرخالص و حجمی است؛ در نتیجه می‌توان از آن برای پیدا کردن شکاف‌باند امواج سطحی استفاده کرد.

در پژوهش حاضر سعی شده است با توجه به تئوری بلخ - فلوکه و استفاده از خط صوت، یک ساختار از تشیدیکننده‌ها به منظور کاهش امواج سطحی ارائه شود. شایان ذکر است که برخلاف برخی مطالعات پیشین، که در آن‌ها عمدتاً از تشیدیکننده‌های فولادی استفاده شده است، در نوشتار حاضر حسنه‌ی شکاف‌باند، بتنی بوده است که نسبت به مطالعات موجود، علاوه بر هندسه‌ی ساده‌تر، ابعاد و ارتفاع کوچکتری دارد، در نتیجه از لحاظ عملی، کاربردی‌تر و اقتصادی‌تر است.

می‌شود که در اصطلاح به بازه‌ی بسامدی مذکور، شکاف‌باند^[۲] می‌گویند. شکاف‌باند در حقیقت بازه‌یی از بسامد است که در صورت داشتن یک شبکه‌ی نامحدود از موانع موردنظر، تمامی موج‌های دارای بسامدی در بازه‌ی شکاف‌باند در اثر برخورد با شبکه بازتاب می‌شوند و از شبکه عبور نمی‌کنند.^[۲]

یکی از اولین پژوهش‌های انجام شده برای به کارگیری تئوری بلخ - فلوکه در مهندسی عمران، توسط هوانگ و شی^[۲۱] صورت گرفته است. ایشان به بررسی زمین‌هایی شامل یک شبکه‌ی دو بعدی از سلول‌های واحد از شمع‌های پرداخته اند. هچچنین علاوه بر درنظر گرفتن آرایش‌های مربعی و مثلثی برای شبکه، به بررسی تأثیر جنس خاک و اندازه‌ی شعاع شمع‌ها بر روی شکاف‌باند پرداخته و دریافت‌های این ارتعاش‌های با بسامدی در بازه‌ی شکاف‌باند به کمک موانع اخیر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. یکی دیگر از مطالعات جامع در حوزه‌ی اشاره شده، توسط دریمیانیس^[۲۲] و همکاران^[۲۳] صورت گرفته است. ایشان سلول واحدی شامل یک هسته‌ی متراکم، یک پوسته‌ی نازک متشکل از یک ماده‌ی سبک، و تاندون‌های الاستومر را در نظر گرفتند و با استفاده از تئوری بلخ - فلوکه و تحلیل ارتعاش کلاسیک، آن را ارزیابی کردند. طرح پیشنهادی ایشان می‌توانست شکاف‌باندی در بازه‌ی بسامدی خیلی کم، ۰/۵ تا ۵/۰ هرتز ایجاد کند.

با توجه به قرار گرفتن بیشتر سازه‌ها در سطح و یا در نزدیکی سطح زمین، امواج سطحی دارای تأثیر مخرب بیشتری هستند. به این منظور در بخش عمدتی از مطالعات موجود در ادبیات فنی، پژوهشگران به دنبال یافتن شکاف‌باند امواج سطحی هستند. به این منظور پو^[۲۴] و شی^[۲۵] به بررسی انتشار امواج سطحی در ساختارهای یک‌بعدی و دو بعدی پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از روش اجزاء محدود و معرفی یک پارامتر توزیع انرژی، روش جدیدی برای شناسایی حالت‌های موج سطحی پیشنهاد دادند. سپس اثربخشی روش جدید ارائه شده را با مقایسه با برخی از مطالعات مرتبط تأیید کردند و از روش مذکور برای مطالعه‌ی یک سیستم متنابض خاک - شمع بر اساس مدل عددی سه‌بعدی استفاده کردند. سپس ایشان^[۲۶] در مطالعه‌ی دیگری به بررسی رفتار شمع برای کاهش امواج سطحی ناشی حرکت قطارها در یک زمین لایه‌یی پرداخته و علاوه بر جداسازی امواج سطحی، امواج رایلی را هم از امواج سطحی جدا کرده‌اند؛ زیرا امواج مذکور بیشترین آسیب را به سازه‌های عمرانی وارد می‌کنند. آن‌ها دریافتند که با استفاده از شمع‌هایی از جنس خاکستر بادی^[۲۷] می‌توان به یک شکاف‌باند برای امواج سطحی از نوع رایلی در بازه‌ی بسامدی ۴۶ تا ۳۹/۷ هرتز دست پیدا کرد که راستی‌آزمایی شکاف‌باند اخیر هم در حوزه‌ی بسامد و هم در حوزه‌ی زمان، به کمک شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود مدل شبکه‌ی محدود تأیید شده است.

نکته‌ی قابل توجه در طراحی موانع لرزه‌یی، محدوده‌ی بسامد شکاف‌باند است. شکاف‌باند باید بر بازه‌یی از بسامد منطقی باشد که در صورت اعمال امواج لرزه‌یی در بازه‌ی بسامدی ذکر شده، سازه دچار آسیب شود. بدون شک امروزه امواج لرزه‌یی ناشی از زلزله، یکی مخرب‌ترین امواج لرزه‌یی هستند که کاهش آثار آن هدف سیاری از مطالعات رشته‌ی مهندسی عمران در سراسر جهان است. بیشتر آسیب‌های ناشی از امواج لرزه‌یی ناشی از زلزله در بسامد‌های پایین، یعنی در محدوده‌ی زیر ۱۵ هرتز، رخ می‌دهد؛ در نتیجه اهمیت وجود شکاف‌باند در بسامد‌های پایین، بسیار زیاد است. به طور کلی، علاوه بر ساختار سلول واحد و نوع خاک، ابعاد سلول واحد یکی دیگر از عوامل مؤثر در کاهش بسامد شکاف‌باند است؛ به این صورت که معمولاً با افزایش ابعاد یک سلول واحد، بازه‌ی بسامدی شکاف‌باند کاهش می‌یابد.

۲. روش پژوهش

۱.۲. تعریف مسئله

بردار جابه‌جایی هستند. در یک ساختار متناوب میدان جابه‌جایی به صورت رابطه‌ی ۲ است: [۱۰]

$$u(r, t) = e^{(iK \cdot r - \omega t)} u_K(r) \quad (2)$$

که در آن، $u_K(r)$ میدان مدولاسیون جابه‌جایی^۱، ω سامد زاویه‌ی و K در k_x, k_y بردار موج است که k_x و k_y به ترتیب عدد موج^{۲۲} در راستای فضای بریلوئن متقابل^{۲۳} هستند. تمام واحدهای سازنده‌ی یک ساختار متناوب نامحدود که در اصطلاح به آن سلول واحد می‌گویند، دارای میدان‌های متناوبی هستند. در نتیجه میدان مدولاسیون جابه‌جایی، یک میدان متناوب در سلول واحد است. در نتیجه، اگر T بردار ثابت شبکه‌ی متناوب باشد، رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت: [۱۸]:

$$u_K(r + T) = u_K(r) \quad (3)$$

در اصل با استفاده از تعریف مذکور، شبکه‌ی اصلی به شبکه‌ی بریلوئن متقابل تبدیل می‌شود که بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی بریلوئن متقابل، فضای فوریه‌ی بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی اصلی هستند. در نتیجه، بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی بریلوئن متقابل را می‌توان به فرم رابطه‌ی ۴ تعریف کرد:

$$b_x = 2\pi \frac{\mathbf{a}_y \times \mathbf{a}_z}{\mathbf{a}_x \cdot (\mathbf{a}_y \times \mathbf{a}_z)}; b_y = 2\pi \frac{\mathbf{a}_z \times \mathbf{a}_x}{\mathbf{a}_x \cdot (\mathbf{a}_y \times \mathbf{a}_z)}; \quad (4)$$

که در آن، $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y$ و \mathbf{a}_z بردارهای پایه‌ی فضای شبکه‌ی اصلی هستند. در پژوهش حاضر، شبکه به صورت دو بعدی و دارای ساختار متناوب در نظر گرفته شده است، بنابراین بردارهای پایه‌ی فضای شبکه‌ی اصلی به صورت رابطه‌ی ۵ هستند:

$$\mathbf{a}_x = (a_x, 0, 0); \mathbf{a}_y = (0, a_y, 0); \mathbf{a}_z = (0, 0, 1) \quad (5)$$

که در آن \mathbf{a}_x و \mathbf{a}_y به ترتیب ابعاد سلول واحد در راستای محورهای مختصات و عناصر پایه‌ی سازنده‌ی بردار ثابت شبکه‌ی متناوب هستند. در نتیجه رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$b_x = (2\pi/a_x, 0, 0); b_y = (0, 2\pi/a_y, 0) \quad (6)$$

از طرفی با جایگذاری رابطه‌ی ۳ در رابطه‌ی ۲، شرایط مرزی متناوب برای سلول واحد مطابق رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$u(r + T, t) = e^{(iK \cdot T, t)} u(r, T) \quad (7)$$

به عبارتی دیگر، در واقع مطابق با شرایط مرزی به دست آمده، موج‌های ورودی و خروجی از یک سلول واحد، دارای اختلاف فاز $K \cdot T$ هستند. سلول واحد بعد از اعمال شرایط مرزی در رابطه‌ی ۷ در حقیقت نماینده‌ی یک شبکه‌ی نامحدود است؛ به عبارتی دیگر، با اعمال شرایط مرزی اخیر به یک سلول واحد، معادله‌ی تبدیل به یک مسئله‌ی مقدار ویژه برای شبکه نامحدود می‌شود. [۱۹] هر نقطه از شبکه‌ی بریلوئن متقابل، در حقیقت متناظر با یک مود از شبکه‌ی نامحدود اصلی است. از طرفی، با توجه به متناوب بودن شبکه فقط کافی است که سلول واحد در کوچک‌ترین واحد تکرارشونده که به اصطلاح به آن ناحیه‌ی بریلوئن اول می‌گویند، بررسی شود. از طرفی در یک سلول واحد متقابن به دلیل تقارن، فقط می‌توان شبکه‌ی نامحدود را با $\frac{1}{4}$ ناحیه‌ی بریلوئن اول بررسی کرد؛ که در اصطلاح به ناحیه‌ی اخیر، ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستنی اول^{۲۴} می‌گویند. ناحیه‌ی بریلوئن اول و ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستنی اول در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. با جایگذاری رابطه‌ی شرایط

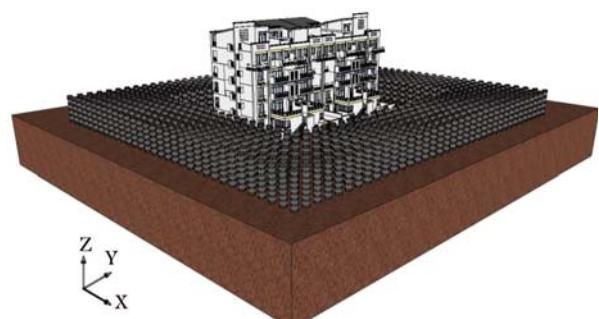
هدف اصلی در پژوهش حاضر، کاهش امواج لرزه‌ی سطحی با استفاده از یک شبکه از تشدیدکننده‌ها مانند شکل ۱ است. اما شبیه‌سازی یک شبکه‌ی کامل بدون استفاده از مفهوم سلول واحد و مرزهای متناوب به عمل گسترش بودن هندسه با استفاده از بیشتر نرم‌افزارهای موجود عددی، بسیار پر هزینه و تقریباً غیرممکن است. این در حالی است که با استفاده تئوری بلاخ - فلوکه می‌توان رفتار یک تشدیدکننده را به راحتی در یک شبکه‌ی نامحدود و با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کم بررسی کرد. بدین منظور در پژوهش حاضر، از تئوری بلاخ - فلوکه برای بررسی رفتار یک سلول واحد از یک تشدیدکننده استفاده و شکاف‌باند متناسب با امواج سطحی برای تشدیدکننده محاسبه شده است. همچنین از آمایه شبکه‌ی کامل موردنظر در یک شبکه‌ی محدود امکان‌پذیر نیست، راستی آزمایش کف باشد موردنظر در یک پژوهش حاضر، برای بررسی شبکه‌های محدود و نامحدود از نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول^{۲۵} استفاده شده است که به دلیل قابلیت بسیار بالای آن در شبیه‌سازی مرزهای متناوب براساس تئوری بلاخ - فلوکه بوده است. در نتیجه به جای شبیه‌سازی یک شبکه‌ی کامل می‌توان از مفهوم سلول واحد استفاده کرد و هزینه‌های محاسباتی را به طرز محسوسی کاهش داد. از آنجا که برای حل مسئله هم در شبیه‌سازی سلول واحد (شبکه‌ی نامحدود) و هم در شبکه‌ی محدود از روش عددی اجزاء محدود استفاده شده است، لذا هندسه‌ی مسائل با استفاده از مشبندی گستته شده‌اند.

۲.۲. تئوری بلاخ - فلوکه در ساختارهای متناوب

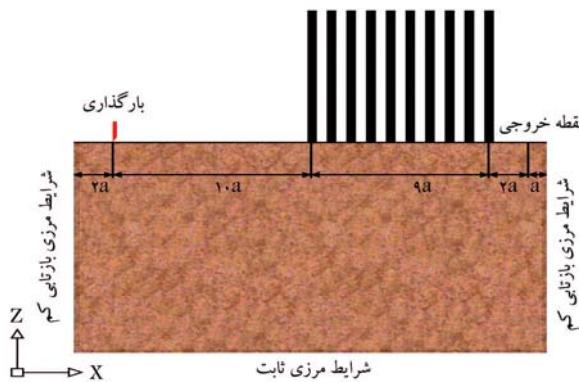
در مطالعه‌ی حاضر، رفتار مانع لرزه‌ی و خاک به صورت کشسان خطی، همگن و با صرف نظر کردن از میرایی، در نظر گرفته شده است؛ زیرا علاوه بر ساده کردن شبیه‌سازی، از کاهش دامنه‌ی امواج به دلیل میرایی مصالح صرف نظر شده است، تا کارایی مانع لرزه‌ی به صورت واضح‌تر مشخص شود. همچنین به منظور سادگی شبیه‌سازی، از رفتار ویسکوکشسان خاک و نیز رفتار غیرخطی بین خاک و مانع لرزه‌ی صرف نظر شده است. معادله‌ی انتشار موج در محیط همگن، ایزوتrop و بدون میرایی مطابق رابطه‌ی ۱ است: [۱۶]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla c \nabla u = 0 \quad (1)$$

که در آن، ∇ عملگر دیفرانسیلی، t پارامتر زمان، c تانسور کشسانی، ρ چگالی و



شکل ۱. یک مدل کامل از شبکه‌ی تشدیدکننده در اطراف سازه.



شکل ۳. شبکه‌ی محدود از تشدیدکننده برای بررسی در حوزه‌های بسامد و زمان.

که در آن، $|\mathbf{K}|$ بیانگر اندازه‌ی بردار موج و c_s سرعت موج بر Shi در خاک است که برابر با $c_s = \sqrt{G/\rho}$ است. همچنین G مدول بر Shi و ρ چگالی خاک هستند.

۴.۲. بررسی شبکه‌ی محدود در حوزه‌ی بسامد و زمان

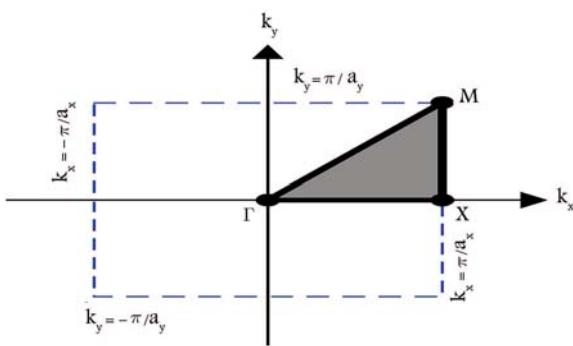
در حقیقت، شکاف‌باند بازه‌یی از بسامد را نشان می‌دهد که در صورت وجود یک شبکه‌ی محدود از موانع موردنظر، هیچ مودی با بسامد مذکور از شبکه عبور نمی‌کند و در واقع بازتاب می‌شود. اما در واقعیت، ساخت یک شبکه‌ی محدود میسر نیست. بنابراین همانند برخی مطالعات پیشین در ادبیات فنی^[۱۰، ۱۱] مانع لرزه‌یی و اعتیار شکاف‌باند آن باید در یک شبکه‌ی محدود ارزیابی شود. بدین منظور در پژوهش حاضر، شبکه‌یی سه‌بعدی از یک ردیف ۱۰ تایی از تشدیدکننده‌ها با ابعاد و شرایط مرزی مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است که بتوان شبکه‌ی محدود را در حوزه‌های بسامد و زمان ارزیابی کرد. شایان ذکر است که شرایط مرزی در جهت عمود بر صفحه به صورت متناوب در نظر گرفته شده است، تا شرایط مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در حقیقت فرض شده است در جهت عمود بر صفحه، به تعداد کافی، سلول واحد قرار گرفته است. همچنین در سمت راست و چپ مدل از شرایط مرزی جاذب استفاده شده است، تا امواج ارتعاشی از مدل خارج شوند؛ به عبارتی، یک محیط نیمه‌یی نهایت از خاک مدل‌سازی شده است. در انتهای مدل هم به دلیل فرض وجود سنگ بستر، از شرایط ثابت استفاده شده است.

به منظور بررسی راستی آزمایی شکاف‌باند به دست آمده در حوزه‌ی بسامد، از تحلیل دامنه‌ی بسامدی برای شبکه‌ی محدود استفاده شده است. به این صورت که یک مدل اجزاء محدود از شبکه‌یی شامل تعدادی سلول واحد موردنظر توسعه یک بارگذاری هارمونیک در نقطه‌ی ورودی برای مطابق شکل ۳ با بسامد متناسب با شکاف‌باند تحریک شده است. سپس با مقایسه‌ی جابه‌جایی نقطه‌ی خروجی در سمت دیگر تشدیدکننده، برای مدل با مانع لرزه‌یی و مدل بدون مانع لرزه‌یی، میزان کارایی مانع لرزه‌یی ذکر شده تعیین شده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، ابتدا ضریب کاهش دامنه^[۲۷] که در رابطه‌ی ۱۰ توسط وود^[۱۹۶۸] ارائه شده است، استفاده شده است:

$$AR = \frac{U_{\text{with barriers}}}{U_{\text{without barriers}}} \quad (10)$$

که در آن، $U_{\text{without barriers}}$ به ترتیب مقدار جابه‌جایی کل در مدل با مانع و بدون مانع هستند. سپس میزان طیف کاهش دامنه^[۲۸] مطابق رابطه‌ی ۱۱^[۲۹] محاسبه شده است:

$$ARS = 20 \log_{10} AR \quad (11)$$



شکل ۲. ناحیه‌ی خط‌چین، نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی بریوئن اول و ناحیه‌ی هاشورخورده، نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی بریوئن ناکاستنی اول است.

مرزی متناوب در رابطه‌ی انتشار موج، مسئله‌ی مقدار ویژه به صورت رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$(\Omega(\mathbf{K}) - \omega' M) \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (8)$$

که در آن (\mathbf{K}) ، ماتریس سختی به صورت تابعی از بردار موج، \mathbf{M} ماتریس جرم، ω بسامد زاویه‌یی و \mathbf{U} بردار جابه‌جایی هستند. رابطه‌ی ۸، در حقیقت یک مسئله‌ی مقدار ویژه اضمونی بین بردار مکان و بسامدی برقرار می‌کند که از آن می‌توان نمودار رابطه‌ی پراکندگی^[۲۵] را به دست آورد. سپس اگر بازه‌یی از بسامد در نمودار رابطه‌ی پراکندگی دارای هیچ مودی نیاشد، در اصطلاح به آن شکاف‌باند می‌گویند. شکاف‌باند در حقیقت بازه‌یی از بسامد را نشان می‌دهد که امواجی با بسامدی در بازه‌یی بسامدی شکاف‌باند نمی‌توانند از شبکه‌ی نامحدود سلول‌های واحد موردنظر عبور کنند و در واقع توسط شبکه‌ی مذکور، بازتاب می‌شوند.

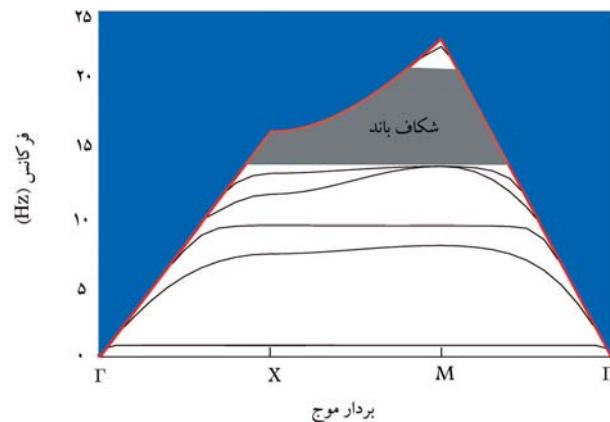
۳.۲. مفاهیم خط صوت و مخروط صوت

مطالعات صورت گرفته شده در ادبیات فنی در فیزیک حالت جامد نشان داده‌اند که می‌توان مرزی بین امواج سطحی خالص و امواج سطحی ناخالص در نمودار رابطه‌ی پراکندگی رسم کرد که در اصطلاح به مرز ذکر شده، خط صوت می‌گویند. خط صوت در حقیقت گندزترین مودهای حجمی در نمودار رابطه‌ی پراکندگی هستند. همچنین مخروط صوت، ناحیه‌ی بالایی خط صوت است که مودهایی که در درون آن قرار می‌گیرند، احتمالاً حالت‌های تشبعشی بسیار پرتفاوت هستند.^[۱۶] در نتیجه، فقط حالت‌های زیر خط صوت یا به عبارتی خارج از مخروط صوت، به عنوان سطحی خاص تلقی می‌شوند. در حقیقت مودهای سطحی خالص هستند که می‌توانند در سطح زمین در طول قابل ملاحظه‌ی ارتعاش پیدا کنند؛ اما مودهای سطحی ناخالص به سرعت در مسیر ارتعاش، از ریز خود را به لایه‌های پایینی منتقل می‌کنند و شدت آن‌ها در طول مسیر ارتعاش به سرعت کاهش می‌یابد. پس متدالوی است که در مطالعات این حوزه، از موج‌های سطحی ناخالص صرف نظر کرد و فقط مودهای بالای خط صوت، یعنی مودهای سطحی خاص تحلیل و بررسی شوند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که خط صوت را می‌توان با استفاده از مشخصات مصالح بستر در تشدیدکننده‌ها تعیین کرد. لیو و همکاران^[۲۰ ۱۹] خط صوت را با استفاده از رابطه‌ی ۹ رسم کردند و نشان دادند که مفهوم خط صوت به خوبی در کاربردهای مهندسی عمران کاربرد دارد:

$$\omega = |\mathbf{K}| \cdot c_s \quad (9)$$

جدول ۲. مشخصات مصالح تشدیدکننده و خاک بررسی شده.

عنوان	مدول کشسانی	چگالی	ضریب پواسون
بن	۲۵	گیگاپاسکال	۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب °/۲
خاک	۲۰	گیگاپاسکال	۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب °/۳



شکل ۵. نمودار رابطه‌ی پراکندگی برای تشیدیدکننده‌ی بررسی شده (ناحیه‌های آبی و طوسی رنگ به ترتیب متناظر با مخروط صوت و شکاف باند هستند).

به شعاع ۵۰ متر و ارتفاع ۶ متر از جنس پتن بوده و ثابت شیشه مربوط به ساولون واحد برابر ۲ متر فرض شده است. نکته قابل توجه در پژوهش حاضر این است که تشیدیکننده مذکور نسبت به تشیدیکنندهای در نظر گرفته شده در بسیاری از مطالعات موجود، ارتفاع بسیار کمتری دارد و همچنین در بسیاری از مطالعات موجود از مصالح فولادی یا خاصی استفاده شده است؛ اما در پژوهش حاضر، تشیدیکننده برسی شده از جنس پتن بوده است که موجب کاربردی تر شدن پژوهش حاضر شده است. در پژوهش حاضر، خاک به صورت یک لایه به عمق ۳۰ متر و مشابه مشخصات ارائه شده در پژوهش محمد و همکاران^{۱۰} در نظر گرفته شده است. مشخصات پتن و خاک در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

به منظور مدل سازی سلول واحد در نرم افزار کامسول از شرایط مرزی متناوب از نوع بلاخ - فلوکه با بردار موج متناسب در ناحیه بربیلوشن ناکاستی اول در چهار طرف مدل استفاده شده است تا شرایط نظیر شبکه که نامحدود برقار باشد. همچین شرایط مرزی سطح به صورت آزاد و شرایط مرزی انتهایی مدل ثابت در نظر گرفته شده است. تا مدل سازی با واقعیت مطابقت داشته باشد.

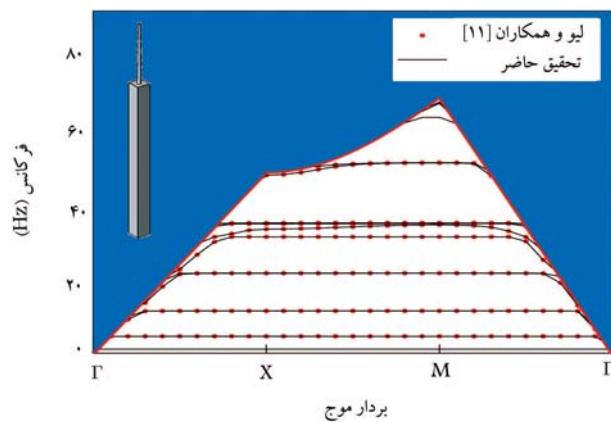
٣. نتایج و بحث

نمودار رابطه‌ی پراکندگی برای تشخیص دهنده‌ی بررسی شده مطابق شکل ۵ است که نشان دهنده‌ی یک شکاف باند در بازه‌ی ۱۴ تا ۲۱ هرتز در زیر خط صوت است. در نتیجه، مطابق با توضیحات بخش‌های قبلی، مودهای خارج از خط صوت مذکور، مود سطحی خالص نیستند و در صورت وجود یک شکاف باند در زیر خط صوت انتظار می‌رود که ناحیه‌ی مذکور همانند یک شکاف باند امواج سطحی عمل کند.

نتایج به دست آمده در حوزه‌ی بسامد در شکل ۶ مشاهده می‌شوند که مطابق آن، در ناحیه‌ی متناظر با شکاف‌بازنده، مقدار طف کاهش دامنه، منتهی

جدول ۱. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در تحقیق لیو و همکاران (۱۹۲۰) [۱۱].

عنوان	مدول کشمانی	چگالی	ضریب پواسون
تمثیل یک دنده	۱/۳۷	۷۰٪ گیگاپاسکال	۰/۳
حاک	۱۳۷٪	۱۷۰٪ گیگاپاسکال	۰/۳۵



شکل ۴. اعتبار سنجی پیاده‌سازی سلول واحد در نرم افزار کامسول با نتایج ارائه شده توسط لیو و همکاران^[11]. ناحیه آبی رنگ محدوده صوت را نشان می‌دهد.

اگر مانع لرزه‌ی کارایی مناسبی داشته باشد، انتظار می‌رود ضریب کاهش دامنه، کوچک‌تر از ۱ باشد و به طبع آن، طیف کاهش دامنه نیز باید منفی باشد. هر چه طیف کاهش دامنه منفی تر باشد، کارایی سلول واحد بیشتر است. به منظور بررسی در حوزه‌ی زمان از یک بارگذاری قائم با فرم $F(t) = \sin(2\pi f_B t)$ در نقطه‌ی ورودی استفاده شده است که در آن f_B بسامد بارگذاری است که در ناحیه‌ی شکاف باند قرار دارد. سپس برای مدل با مانع و بدون مانع، جایه‌جایی نقطه‌ی خروجی در جهت قائم به دست آمده و پس از نرمال کردن به بیشینه‌ی جایه‌جایی حالت بدون مانع در یک نمودار رسم شده است که نمودار مذکور به خوبی نشان‌دهنده‌ی کارایی مانع لرزه‌ی در حوزه‌ی زمان است.

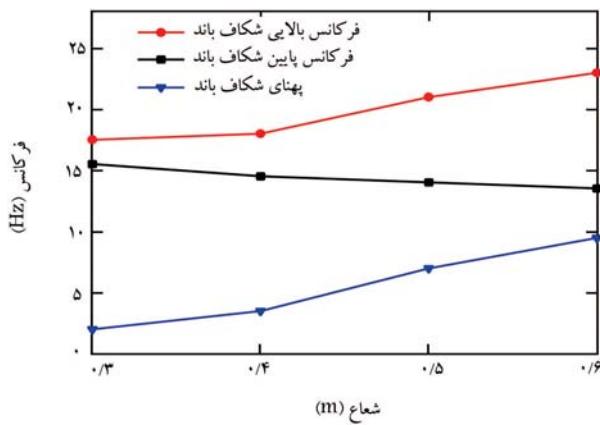
۵. انتیار سنگی

به منظور بررسی راستی آزمایی پیداسازی یک سلول واحد در نرم افزار کامسول، بخشی از تابع به دست آمده توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهش حاضر مجدد بررسی شده است تا با تطبیق تابع، اعتبار سایر مدل سازی های در پژوهش حاضر تأیید شوند. ایشان از تشدیدکننده هایی به فرم درخت به ارتفاع ۱۲ متر با شعاع پایینی $1/3$ متر و شعاع بالایی $1/5$ متر در یک سلول واحد با ثابت شبکه 2 متر متیشکل از 35 متر خاک تک لایه استفاده کردند. مشخصات تشدیدکننده و خاک در نظر گرفته شده توسط آن ها در جدول ۱ آراهه شده است.

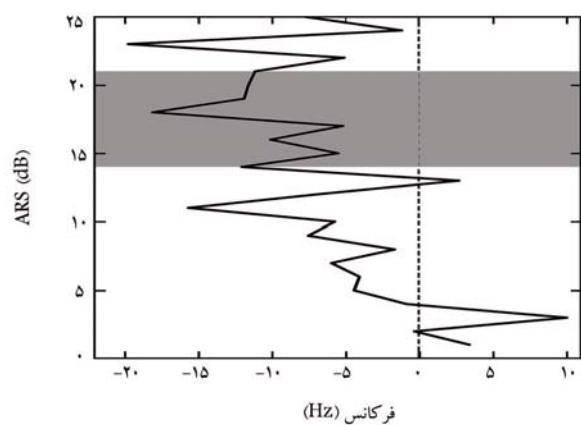
نتایج بدست آمده همراه با مخروط صوت در شکل ۴ مشاهده می‌شوند که مطابق آن با نتایج ارائه شده توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۱] تطابق دقیقی دارد و در نتیجه، راستی آزمایی مدل سازی‌های اجزاء محدود را نشان می‌دهد. شایان ذکر است برای اطمینان از درستی نتایج، اندازه‌ی مش و نمو مربوط به عدد موج با استفاده از تحلیل حساسیت انتخاب شده است.

۶.۲. تشدیدگذاری بررسی شد

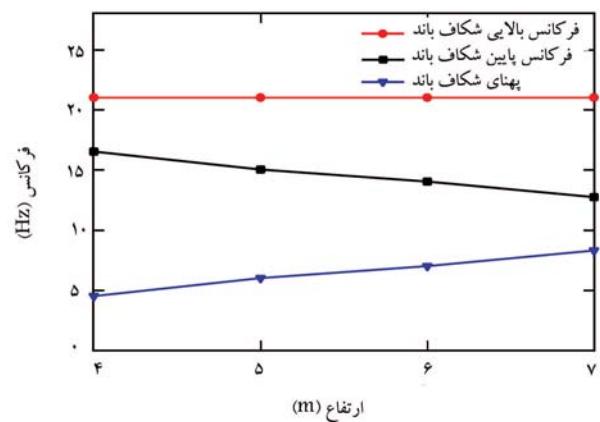
در پژوهش حاضر، مانع لرزه‌یی به صورت یک تشدید کننده با شکل استوانه‌یی و



شکل ۸. تغییرات پهنا، بسامدهای بالایی و پایینی شکاف باند به ازاء مقادیر مختلف شعاع تشدیدکننده.

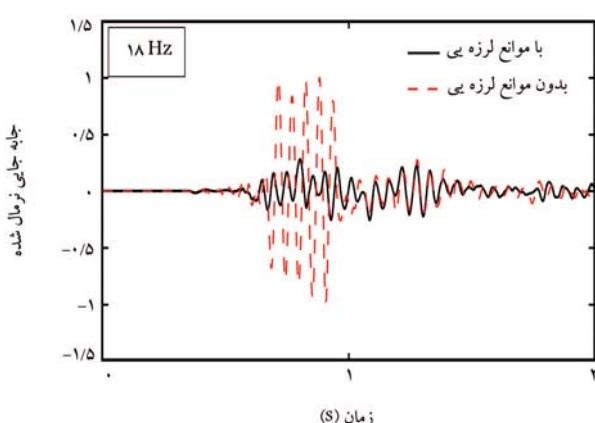


شکل ۶. طیف پاسخ دامنه در حوزه‌ی بسامد برای تشدیدکننده‌ی بررسی شده (ناحیه‌ی طوسی رنگ، ناحیه‌ی متناظر با شکاف باند است).



شکل ۹. تغییرات پهنا، بسامدهای بالایی و پایینی شکاف باند به ازاء مقادیر مختلف طول تشدیدکننده.

دو پارامتر اخیر در پهنا شکاف باند (BGW)، بسامد بالایی شکاف باند (UBG) و بسامد پایین شکاف باند (LBG) صورت گرفته است. نتایج حاصل به ازاء تغییرات بازه و عرض شکاف باند به ازاء شعاع و طول تشدیدکننده به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش شعاع تشدیدکننده به ترتیب باعث افزایش و کاهش بسامد بزرگ‌تر و کوچک‌تر در شکاف باند و در نتیجه افزایش پهنا شکاف باند شده است. این در حالی است که بسامد بزرگ‌تر در شکاف باند با افزایش طول تشدیدکننده، ثابت مانده است، اما بسامد کوچک‌تر کاهش و مجدد پهنا شکاف باند افزایش یافته است.



شکل ۷. نتیجه‌ی بررسی شبکه‌ی محدود تشدیدکننده‌ی بررسی شده در حوزه‌ی زمان.

است که نشانگر کارایی تشدیدکننده‌ی مذکور است. نکته‌ی قابل توجه، میزان منفی بودن طیف کاهش دامنه است، به طوری که در تمام ناحیه‌ی شکاف باند، مقدار آن تقریباً از $-5/1$ کمتر است که بیانگر کاهش قابل ملاحظه‌ی دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است. مطابق رابطه‌ی ۱۱، اگر مقدار طیف کاهش دامنه کمتر از $-5/1$ باشد، نشان دهنده‌ی بیش از $4/4$ کاهش در دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است که مقدار بسیار قابل توجهی است. همچنین شایان ذکر است که به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی، شبکه‌ی محدود فقط در یک راستای افقی ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستی اول بررسی شده است. از آنجایی که شکاف باندی که فقط متناسب با راستای اخیر است، متفاوت از بازه شکاف باند متناظر با ناحیه‌ی کامل بریلوئن ناکاستی اول است؛ لذا، در بسامدهای دیگر حوزه‌ی بسامد نیز کاهش مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، مدل‌سازی حوزه‌ی بسامد فقط به دلیل نشان دادن راستی آزمایی کارایی شکاف باند انجام شده است. نتایج بررسی شبکه در حوزه‌ی بسامد به ازاء $f_B = 18\text{ Hz}$ در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مطابق با نتایج اخیر تشدیدکننده‌ی بررسی شده در حوزه‌ی زمان نیز توانایی بسیار خوبی در کاهش امواج لرزه‌ی در محدوده‌ی شکاف باند دارد. مطابق با نتایج اخیر، میزان بیشینه‌ی دامنه‌ی ارتعاش ناحیه‌ی خروجی بعد از به کارگیری تشدیدکننده‌ها، $72/72$ کاهش یافته است.

۴. نتیجه‌گیری
استفاده از تشدیدکننده‌ها، یکی از روش‌های متدال در کاهش دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است. در حقیقت، تشدید به وجود آمده بین تشدیدکننده و امواج سطحی باعث می‌شود که در یک بازه بسامدی، امواج از شبکه عبور نکنند و در عمل بازتاب شوند. در پژوهش حاضر، نیز با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه، یک تشدیدکننده‌ی بتنی بررسی شده است که از دو جهت کاربردی است:

۱. مصالح تشدیدکننده‌ی در نظر گرفته شده، بنن است که برخلاف مطالعات موجود از فولاد یا مصالح خاص و گران قیمت استفاده نشده است.

دو پارامتر کلیدی تأثیرگذار در بازه و عرض شکاف باند در تشدیدکننده‌ها، طول و شعاع تشدیدکننده هستند. به این منظور در پژوهش حاضر، یک بررسی بر روی تأثیر

تشهدیدکننده، بسامد بالایی، شکاف باند ثابت مانده است.

نتایج به دست آمده، توانایی تشخیص دهنده مذکور را در ایجاد شکاف بازی در برازه‌ی بسامدی ۱۴ تا ۲۱ برای شبکه‌ی نامحدود موانع مطابق با تئوری بالاخ - فلوكه نشان می‌دهد. همچنین راستی آزمایی شکاف بازی اخیر با مدل سازی یک شبکه‌ی محدود در دو حوزه‌ی بسامد و زمان بررسی شده است که نتایج حاکی از توانایی تشخیص دهنده موردنظر در کاکهش امواج لرزه‌ی سطحی، در برازه‌ی متناسب با شکاف بازی بوده است.

۲. ارتفاع تشیدیکننده، ۶ متر بوده است. این در حالی است که در مطالعات موجود، ارتفاع تشیدیکننده معمولاً بین ۱۵ متر فرض شده است.

۳. با افزایش شعاع و طول شیدیدکننده، بازه‌ی شکاف باند افزایش و بسامد پایینی شکاف باند کاهش یافته‌اند. همچنین با افزایش شعاع شیدیدکننده، بسامد بالایی شکاف باند نز افزایش، یافته است. این در حالی است که به ازاء افزایش طول

یادنوشت‌ها

1. Woods
 2. May & Bolt
 3. Bloch-Floquet Theory
 4. unit cell
 5. floquet periodicity
 6. first brillouin zone
 7. Bandgap
 8. Huang & Shi
 9. Dertimanis
 10. Pu
 11. Flyash
 12. resonators
 13. Palermo
 14. Muhammad
 15. Liu
 16. depth of energy
 17. sound line
 18. frequency domain
 19. time domain
 20. Comsol
 21. displacement modulation function
 22. Wavenumber
 23. Brillouin reciprocal space
 24. first irreducible brillouin zone
 25. dispersion relation
 26. sound cone
 27. amplitude reduction factor (AR)
 28. amplitude reduction spectra (ARS)

مراجع (References)

1. Woods, R.D. "Screening of surface wave in soils", *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, **94**(4), pp. 951-979 (1968).
 2. May, T.W. and Bolt, B.A. "The effectiveness of trenches in reducing seismic motion", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**(2), pp. 195-210 (1982).
 3. Pu, X. and Shi, Z. "Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils", *Construction and Building Materials*, **180**, pp. 177-187 (2018).
 4. Huang, J. and Shi, Z. "Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for
 13. Liu, Z., Dong, H.-W. and Yu, G.-L. "Topology optimization of periodic barriers for surface waves", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **63**(1), pp. 463-478 (2021).
 14. Muzar, E. and Stotz, J.A. "Surface acoustic wave modes in two-dimensional shallow void inclusion phononic crystals on GaAs", *Journal of Applied Physics*, **126**(2), pp. 025104 (2019).
 15. Westafer, R.S., Mohammadi, S., Adibi, A. and et al. "Computing surface acoustic wave dispersion and band gaps", in *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference* (2009).

16. Benchabane, S., Khelif, A., Rauch, J.-Y. and et al “Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal”, *Physical Review E*, **73**(6), pp. 065601 (2006).
17. Khelif, A., Achaoui, Y., Benchabane, S. and et al. “Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface”, *Physical Review B*, **81**(21), pp. 214303 (2010).
18. Kittel, C. “Introduction to solid state physics”, *American Journal of Physics*, **35**(6), pp. 547-548 (1967).
19. Cheng, Z. and Shi, Z. “Composite periodic foundation and its application for seismic isolation”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **47**(4), pp. 925-944 (2018).

مطالعه‌ی عددی تأثیر هندسه‌ی سطوح جداری گروه شمع‌های مخروطی با مقاطع دایروی و مربعی در ظرفیت باربری محوری فشاری و بررسی بازدهی گروه

علیرضا شعبانپور* (دکتری)

محمد قضاوی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شمع‌های مخروطی یا باریک شونده به شمع‌هایی اطلاق می‌شود که سطح مقطع آنها به صورت تدریجی و با حرکت به طرف نوک شمع کاهش می‌یابد. این تغییر هندسه باعث می‌شود که با ثابت ماندن حجم مصالح مصرفی در مقایسه با یک شمع متبادل با سطح مقاطع ثابت، باربری محوری فشاری شمع افزایش یابد. در پژوهش حاضر، به شبیه‌سازی عددی دو مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های 2×2 تحت بار محوری فشاری با مقاطع دایروی و مربعی مخروطی و یکنواخت معادل در دستگاه سانتریفیوژ پرداخته شده است. نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام شده حاکی از برتری شمع و گروه شمع‌های مخروطی از منظر باربری محوری فشاری در مقایسه با مقطع یکنواخت معادل خود است. در مدل عددی شبیه‌سازی شده به بررسی ضرایب بازدهی گروه شمع‌های مخروطی و تحلیل توزیع تنش‌های برشی در محیط خاکی اطراف شمع‌ها و آثار هندسه‌ی سطوح جداری متفاوت شمع‌های دایروی و مربعی در میزان باربری آنها پرداخته و مشخص شد که کنج‌های محدب شمع‌های مربعی، اثر منفی در اصطکاک جداری شمع‌ها دارند.

ashabanzpour@mail.kntu.ac.ir
ghazavi_ma@mail.kntu.ac.ir

واژگان کلیدی: شمع مخروطی، گروه شمع، شبیه‌سازی عددی، هندسه‌ی سطوح جداری، بازدهی گروه.

۱. مقدمه

پی‌های عمیق (شمع‌ها)، در مواردی که پی‌های سطحی، امکان تحمل بار وارد از سازه را ندارند و یا در مواردی که نشست سازه، موضوع مهمی باشد و یا زمانی که سازه بر روی خاک ضعیفی قرار گرفته باشد، استفاده می‌شوند. در موارد مذکور از شمع جهت انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم در عمق بیشتری از زمین استفاده می‌شود. شمع‌های استفاده شده در کاربری‌های مهندسی عمده‌ای شمع‌های مقطع ثابت در طول (شمع‌های غیرمخروطی) هستند. شمع‌های مخروطی، شمع‌هایی هستند که سطح مقطع آنها در قسمت سر شمع بیشتر است و رفتارهای مقطع آن تا نوک شمع کاهش می‌یابد. در سه دهه‌ی اخیر، علاقه‌ای پژوهشگران به شمع‌های مخروطی بیشتر شده و بر اساس مطالعات انجام شده مشخص شده است که آنها، توزیع مصالح بهتر و مؤثرتری دارند و ظرفیت باربری بیشتری در بارگذاری‌های مختلف (نیز بارگذاری‌های محوری فشاری و جانبی) از خود نشان می‌دهند.

کاربری شمع‌ها در عمل عمده‌ای به صورت گروهی است، اما بیشتر مطالعات انجام شده در مورد شمع‌های مخروطی بر روی شمع‌های منفرد با مقطع دایروی

۲. مروری بر ادبیات فنی

رو بینسکی و ماریسون^۲ (۱۹۶۴)،^{۳۱} در مطالعات خود با استفاده از روش رادیوگرافی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۰۴/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۰۶/۱۳، پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2022.60712.3118

عددی انجام شده توسط مانندهار و یوسوفوکو^۹ [۱۲] که البته چند آزمون کوچک مقیاس آزمایشگاهی برای برسی‌های اولیه نیز در آن انجام شده است، سعی شده است در راستا و تکمیل پژوهش اخیر،^{۱۳} فرض ساده‌سازی شده‌ی ثابت ماندن زاویه‌ی اصطکاک داخلی و زاویه‌ی اتساع با معرفی روابط جدید اصلاح شود. در پژوهش عددی انجام شده توسط قضاوی و علیردانی^{۱۴} [۱۵] که بر پایه‌ی روش اختلاف محدود و با استفاده از نرم افزار *FLAC^{۳D}* انجام گرفته است، ظرفیت باربری محوری فشاری سه شمع سیلندری، مخروطی و مخروطی - پله‌ی معادل، برسی و ارزیابی شده است. هدف اصلی نوشتار اخیر، برسی امکان معادل‌سازی یک شمع مخروطی با قطعات منشوری است، که به صورت صلب در گره‌ها به هم متصل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که اختلاف ظرفیت باربری شمع مخروطی و مخروطی - پله‌ی کمتر از ۱۰٪ است. زان^{۱۰} و همکاران^{۱۱} [۱۶] نیز به منظور مطالعه‌ی رفتار ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی، مطالعات عددی بر پایه‌ی روش اجزاء محدود با نرم افزار آباکوس^{۱۲} انجام داده‌اند. روش اجرای شمع‌ها به صورت بتنی در جاریز با مقطع دایری و طول ۴ متر و ۲ سری تحلیل شمع بوده است. بر اساس پژوهش اخیر، ظرفیت باربری محوری فشاری شمع مخروطی در زاویه‌ی مخروطی بهینه، حدود ۱۲٪ بیشتر از شمع مقطع یکنواخت معادل خود است و دریافتند که شمع مخروطی برای شرایطی مناسب است که شمع در حالت شناور قرار داشته باشد.

هاتف و شفقت^{۱۳} [۱۷] به مطالعه‌ی عددی رفتار شمع و گروه شمع‌های مقطع دایری مخروطی و یکنواخت معادل و مقایسه‌ی ظرفیت باربری محوری فشاری آنها با استفاده از نرم افزار سه‌بعدی پلکسیس (*PLAXSIS^{۳D}*)^{۱۲} پرداخته و دریافتند که زاویه‌ی مخروطی بهینه برای شمع‌های منفرد جهت حصول بیشینه‌ی ظرفیت باربری محوری به طور کامل به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بستگی دارد. همچنین برای گروه شمع‌های مخروطی، افزایش ضریب فشار جانی خاک باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌شود و با افزایش زاویه‌ی مخروطی شمع‌ها، بازدهی گروه شمع مخروطی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی عددی انجام شده‌ی والی و همکاران^{۱۳} [۱۹] نیز به برسی و مقایسه‌ی عددی ظرفیت باربری و نتیجه شمع‌های مخروطی و شمع‌های آندر - رید^{۱۴} در خاک رس پرداخته شده است. در پژوهش تحلیلی دیگری که سورمه‌ی و قضاوی^{۱۵} [۲۰] انجام داده‌اند، یک روش توری مبتنی بر توری انبساط حفره در ارتباط با نظریه‌ی معادلات موج^{۱۶} برای تحلیل شمع‌های مخروطی رانده شده به خاک‌های چسبنده توسعه داده شده است. توسلی و قضاوی^{۱۷} [۲۱] نیز با مدل سازی و تحلیل‌های عددی توسط نرم افزار *FLAC^{۳D}* بر اساس روش تفاضل محدود، قابلیت رانده شدن شمع‌های با هندسه‌های مختلف به داخل خاک را برسی کرده‌اند. همچنین نصرالله‌زاده و هاتف^{۱۸} [۲۲] به برسی آزمایشگاهی و عددی ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های مخروطی و سیلندری یکنواخت پرداختند و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی را توسط نرم افزار *PLAXSIS^{۳D}* سه‌بعدی و اثر تعداد شمع‌ها و فاصله‌ی شمع‌های گروه در ظرفیت باربری محوری را به صورت عددی برسی کردند و دریافتند که بازدهی گروهی شمع‌های مخروطی در مقایسه‌ی با شمع‌های استوانه‌ی در فواصل بیشتر شمع‌های گروه به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. نهایتاً نشان داده شد که با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع، بازدهی گروه شمع‌های استوانه‌ی و مخروطی با فاصله‌ی شمع‌های ثابت، سه برابر قطر شمع و بیشتر، افزایش یافته است.

در مطالعات انجام شده بر روی شمع‌های مخروطی، کاستی‌ها و نقص‌هایی وجود دارد که نهایتاً باعث عدم تدوین نتایج جامع در مورد شمع‌های مخروطی شده

جایه‌جایی و تراکم، خاک اطراف مدل شمع مخروطی را بررسی کرده و نظریه‌ی بی در زمینه‌ی انتقال ناچیز نیرو در اثر اصطکاک سطح در اطراف شمع‌های استوانه‌ی و انتقال قابل توجه نیرو در اطراف شمع‌های مخروطی ارائه داده‌اند. کوریان و سرینوس^{۱۹} [۲۰] در پژوهش آزمایشگاهی - عددی خود به برسی تأثیر شکل مقاطع مختلف شمع‌های مخروطی و مزایای آنها در مقابل شمع‌های استوانه‌ی معادل پرداختند. شمع‌ها با مقاطع دایری، مربعی و مثلثی چوبی به طول و حجم بکسان در خاک ماسه‌ی بوده‌اند. روش اجرای شمع‌ها در پژوهش اخیر به صورت اجرای شمع‌های در جاریز (بدون جایه‌جایی) بوده است. براساس مطالعات انجام شده، بیشینه‌ی ظرفیت پاره‌ی ای در شمع‌های مخروطی، مربعی و مثلثی چوبی به طول و حجم بکسان در است. وی و لی‌نگار^{۲۱} [۲۰] در پژوهش خود به مطالعه‌ی عکس‌العمل شمع‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری در فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف پرداخته‌اند. در گروه اول آزمایش‌ها در خاک با تراکم کم، بیشترین افزایش باربری محوری فشاری شمع‌ها ناشی از مخروطی بودن شمع‌ها در فشار همه‌جانبه‌ی معادل ۲۰ کیلوپاسکال بوده است، که اختلاف باربری ۲۵ درصدی ایجاد کرده بود. در گروه دوم آزمایش‌ها در خاک با تراکم متوسط، بیشترین افزایش باربری محوری فشاری ناشی از مخروطی بودن شمع‌ها در فشار همه‌جانبه‌ی معادل ۴۰ کیلوپاسکال رخ داده است، که افزایش باربری معادل ۴۰٪ را در بی داشته است. ایشان در پژوهش دیگری^{۲۲} [۲۳] به منظور بررسی عملکرد شمع‌های مخروطی در خاک ماسه‌ی درشت‌دانه، که تحت بار جانی قدر گرفته‌اند، ۱۸ آزمون انجام دادند و دریافتند که شمع‌های مخروطی تا بیش از ۷۷٪، باربری جانی بیشتری در مقایسه با شمع‌های استوانه‌ی معادل تحت بار جانی از خود نشان داده‌اند. همچنین آنها در مطالعه‌ی دیگری^{۲۳} [۲۰۰۰] به برسی ظرفیت باربری کششی شمع‌های مخروطی پرداختند و نشان دادند که نسبت باربری کششی به فشاری در شمع‌های استوانه‌ی بین ۵۹٪ تا ۷٪ و در شمع مخروطی با زاویه‌ی مخروطی ۹۵٪ بین ۳۷٪ تا ۵۸٪ بوده است. در پژوهش‌النگار و سکر^{۲۴} [۲۰۰۰] نیز با هدف بررسی خصوصیات کارایی محوری شمع‌های با مقطع متغیر و توسعه‌ی طراحی آنها، یک سری آزمایش‌های ساترینیوز انجام و مشخص شده است که ظرفیت باربری محوری فشاری شمع مخروطی به شمع استوانه‌ی معادل، تا ۸۸٪ افزایش یافته است. پاک^{۲۵} [۲۰۱۳] نیز با هدف بررسی چگونگی تأثیرگذاری حالت خاک و زاویه‌ی مخروطی شمع در ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی، ۱۴ آزمایش آزمایشگاهی بر روی یک شمع استوانه‌ی و دو شمع مخروطی با زاویه‌ی مخروطی ۱ و ۱/۵ درجه انجام دادند و دریافتند که مقاومت نهایی واحد نوک شمع‌های مخروطی با افزایش میانگین تنش، تراکم نسبی خاک و زاویه‌ی مخروطی شمع‌ها افزایش یافته است. همچنین مقاومت نهایی واحد جداری شمع‌های مخروطی نیز با افزایش تنش‌های عمودی و افقی تراکم نسبی خاک و زاویه‌ی مخروطی افزایش یافته است.

برخی مطالعات بزرگ مقیاسی در محل نیز انجام شده‌اند،^{۲۶-۲۰} [۱۲] که تماماً برتری شمع مخروطی را در مقایسه با شمع مقطع یکنواخت معادل نشان داده‌اند. پژوهش‌های فوق‌الذکر، مربوط به مطالعات آزمایشگاهی و یا بزرگ مقیاسی هستند، که عمددهی آنها در مورد شمع‌های مخروطی آزمایشگاهی بوده و تعداد مطالعات تحلیلی و عددی محدودتری در ادبیات فنی در مورد شمع‌های مخروطی انجام شده است، که در ادامه، به تعدادی از آنها اشاره شده است.

در مطالعه‌ی تحلیلی - عددی دیکارا و مور^{۲۷} [۱۹۹۳] که نقطه‌ی عطفی در مورد شمع‌های مخروطی به حساب می‌آید، با استفاده از توری انبساط حفره (CEM)^{۲۸} و ارائه‌ی رابطه‌ی تحلیلی با معیارگسیختگی موهر - کلمب، به محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی پرداخته شده است. در مطالعه‌ی تحلیلی -

جدول ۱. برنامه‌ی آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده.

آزمایش	شماره	مقطع شمع منفرد	مقطع شمع	زاویه مخروطی	نسبت فاصله به قطر
۱		دایروی	-	۰	-
۲		دایروی	-	۱/۲۸	-
۳		مربعی	-	۰	-
۴		مربعی	-	۱/۲۸	-
۵	۵	دایروی	-	۰	-
۶		دایروی	-	۱/۲۸	-
۷		مربعی	-	۰	-
۸		مربعی	-	۱/۲۸	-
۹		دایروی	-	۰	-
۱۰		دایروی	-	۱/۲۸	-
۱۱		مربعی	-	۰	-
۱۲		مربعی	-	۱/۲۸	-

جدول ۲. جزئیات ابعادی شمعهای مدل و پروتوتاپ.

است. اولاً، ییشتر مطالعات بر روی شمع های منفرد بوده و مطالعات آزمایشگاهی و بزرگ مقیاس جامعی بر روی گروه شمع های مخروطی با مقاطع مختلف انجام نشده است. همچنین روش اجرا، که متغیر مهمی در نتایج حاصل از ظرفیت بار باری محوری شمع های مخروطی است، عمدتاً به صورت درجارتی این است، که با ماهیت اجرایی واقعی شمع های مخروطی تفاوت دارد. همچنین اثر مقیاس در مطالعات آزمایشگاهی شمع های مخروطی لحاظ نشده است، که این موضوع بدون تردید در تعیین نتایج آزمایشگاهی به بزرگ مقیاس با توجه به وابستگی ماهیت رفتار سازه های ژئوتکنیکی به تنش، ایجاد نقصان می کند. لذا نویسندها پژوهش حاضر، در مطالعاتی جداگانه،^[۱-۲] به بررسی و رفتار سنجی شمع های منفرد و گروه شمع های با مقاطع مختلف با اجرای کوبی و تحت بارگذاری محوری فشاری در دستگاه سانتی فیزیو و تحت شتاب گرافیش ۳۰ g اقدام کرده و بدین ترتیب نواقص موجود در مطالعات پیشین را پوشش داده اند. هدف از پژوهش حاضر، شیوه سازی مطالعات انجام شده در مورد دو مقاطع دایری و مربعی در نرم افزار $FLAC^3D$ و بررسی اثر هندسه ای سطح جانبی متفاوت شمع های گروه در ظرفیت بار باری محوری فشاری و همچنین بررسی بازدهی گروه شمع هاست. در ادامه، شرح مختصه ای در مورد مطالعات آزمایشگاهی ذکر شده اند. آنها شده است.

۳. شرح مختصری از آزمایش‌های آزمایشگاهی
ساده‌ترین فیزیوژوتکنیکی، ابراری قدرتمند برای مهندسی زوتکنیک است، که قادر است
تراباستنگی رفتار مصالح خاکی به تشن را شیشه‌سازی کند. در واقع به طور مصنوعی
می‌توان رفتاری از مصالح مدل را ایجاد کرد، که توزیع و مقدار تشن در مدل و
سازه‌ی اصلی یکسان باشد. در دو مطالعه‌ی آزمایشگاهی مذکور^{[۱] و [۲]} در مجموع
۱۲ آزمایش بارگذاری شمع در دستگاه سانتریفیوژ زوتکنیکی بر روی شمع‌های مقطع
دایری و مربعی تحت بارگذاری محوری فشاری انجام شده است، که ۴ مورد آن بر
روی شمع‌های منفرد و ۸ مورد دیگر بر روی گروه شمع‌ها با فاصله‌ی مرکز به مرکز
۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها (۳D و ۵D) بوده است. خلاصه‌ی از برنامه‌ی
آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

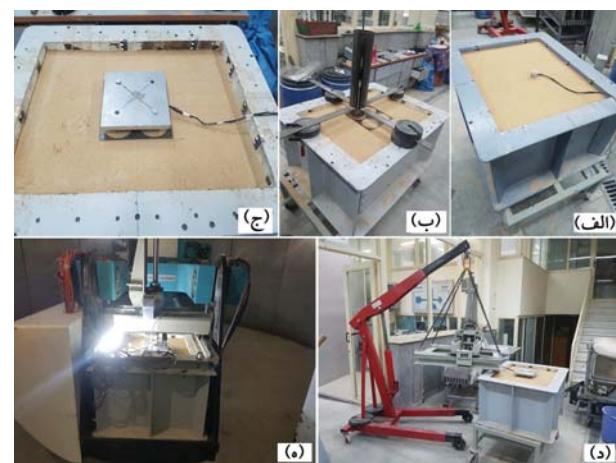
بر مبنای قوانین مقیاس در دستگاه سانتریفیوژ طول و ابعاد شمع با ضریب N
N و نیروی شمع با ضریب N^2 مقیاس می‌شود. تمامی آزمایش‌های تحت شتاب
گرانش ۸ (یعنی $N=3^0$) انجام پذیرفته است. شمع‌های استفاده شده از جنس
لولومیومی بودند، که مشخصات آنها در ابعاد مدل و مقیاس شده (پروتوتایپ)^[۱] در
جدول ۲ ارائه شده است. همچنین گروه شمع‌ها ۲ × ۲ بوده و تمامی شمع‌ها به

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

مقدار	پارامتر
ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه	اسم تجاري خاک
۰/۳	متوسط اندازه‌ی دانه‌های خاک (میلی‌متر)
۰/۵۳ و ۰/۸۹	نسبت تخلخل بیشینه و کمینه
۲/۶۵	چگالی ویژه‌ی ذرات جامد
٪۳۶/۹	تراکم نسبی خاک قبل و بعد از حرکت سانتریفیوژ (درصد)
۳۲	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (درجه)
۲۵	مدول کشسانی (MPa)
۰	چسبندگی (kPa)
۱۷۲۹	چگالی خشک بیشینه (kg/m ³)
۱۴۰۱	چگالی خشک کمینه (kg/m ³)
٪۰/۶	درصد رطوبت

است، که برای شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. نرم‌افزار مذکور بر اساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است، که برای مدل‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ نیز مناسب است. با نرم‌افزار آیتسکا می‌توان رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و یا سایر موارد را که دارای جریان خمیری در هشگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه‌سازی کرد. مدل‌های رفتاری متنوعی در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض تعریف شده است و همچنین می‌توان مدل‌های جدیدی را نیز به آن وارد کرد. هدف از تحلیل عددی یک پدیده‌ی ژئوتکنیکی، شبیه‌سازی تغییرات تنش کرنش محیط با بیشینه‌ی دقت ممکن است. به صورت مشخص در خصوص شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، علاوه بر پیچیدگی‌های ذاتی محیط خاک، از مدل‌سازی فرایند نصب شمع‌ها نیز صرف‌نظر شده است. لذا راهبرد تحلیل در پخش کنونی این بوده است که پارامترهای خاک برای بهترین اطباق ممکن بین نتایج حاصل برای شمع منفرد دایروی مقطع یکنواخت در آزمایشگاه با نتایج حاصل از تحلیل عددی تدقیق شود. سپس در ادامه، سایر تحلیل‌ها، که تماماً با پارامترهای ذکر شده به دست آمده‌اند، انجام شده‌اند. به عبارتی، کالیبره کردن پارامترها فقط برای شمع منفرد دایروی مقطع یکنواخت انجام شده و این کار در سایر تحلیل‌ها تکرار نشده است. توجه شود تغییرات پارامترها به میزان اندک و در بازه‌ی قابل قبول برای خاک بوده است. در واقع، اصلی‌ترین پارامتری که در تحلیل‌ها تغییر داده شده است، مقدار چگالی خاک است؛ که به دلیل تراکم ناشی از اعمال شتاب مصنوعی ۳۰g در دستگاه سانتریفیوژ در زمان بارگذاری آزمایش نیز مقدار آن بیش از مقدار استفاده شده در آماده‌سازی مدل فیزیکی بوده است. در واقع در مدل فیزیکی، خاک به صورت لایه‌لایه و با چگالی ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (تراکم نسبی ۰/۲۵/۸) اجرا شده است، که پس از اعمال شتاب سانتریفیوژ تراکم آن افزایش ٪۳۶/۹ یافته است. در جدول ۴، مقادیر پارامترهای استفاده شده در تحلیل‌ها در مقایسه با مقادیر استخراج شده برای آنها در آزمایشگاه مکانیک خاک ارائه شده‌اند.

در شبیه‌سازی انجام شده از مدل رفتاری موهر - کلمب برای رفتار خاک و از مدل رفتاری کشسان خطی برای شبیه‌سازی رفتار شمع‌های مدل استفاده شده است. مرزاها در کتف مدل در هر سه امتداد Z, Y, X بسته شده‌اند. در طرفین (دیواره‌ها) نیز از قید غلتبکی استفاده شده است. به این معنی که امکان جابه‌جایی قائم به گره‌ها داده شده است، اما جابه‌جایی افقی ممکن نبوده است.



شکل ۱. (الف) آماده‌سازی جعبه‌ی خاک؛ (ب) نصب شمع‌ها با چکش شمع‌کوب؛ (ج) نصب سرشمیع در گروه شمع‌ها؛ (د) نصب سیستم بارگذاری و ابزارها؛ و (انقال مدل آماده شده به سبد سانتریفیوژ جهت شروع آزمایش.

صورت کوبشی و با چکش شمع‌کوب در جعبه‌ی خاک اجرا شده‌اند. آماده‌سازی هر آزمایش، شامل ۵ مرحله‌ی اصلی بوده است، که تماماً در شتاب گرنش ۱g انجام شده‌اند، که این مراحل عبارت اند از:

(الف) تهیه‌ی جعبه‌ی خاک با اجرای خاک به صورت لایه‌لایه و متراکم کردن هر لایه برای رسیدن به تراکم نسبی مطلوب؛ (ب) کوبیدن شمع (در آزمایش شمع‌های متفاوت) و یا ۴ شمع (در آزمایش‌های گروه) به صورت مجزا در محل تعیین شده توسط ضربه‌ی چکش و استفاده از سیلندر هادی برای هر شمع برای اطمینان از اجرای عمودی شمع‌ها؛ (ج) نصب سرشمیع (در مورد آزمایش‌های گروه شمع)؛ (د) آماده‌سازی سیستم بارگذاری و ابزار دقیق (کرنش‌سنج)؛ (ه) انقال مدل آماده شده به سبد سانتریفیوژ برای بارگذاری در شتاب گرنش ۳۰g، که تمامی مراحل اخیر در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. نحوه‌ی اعمال بارگذاری به صورت کشتل جابه‌جایی و با نیز ثابت اعمال بار ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفته است.

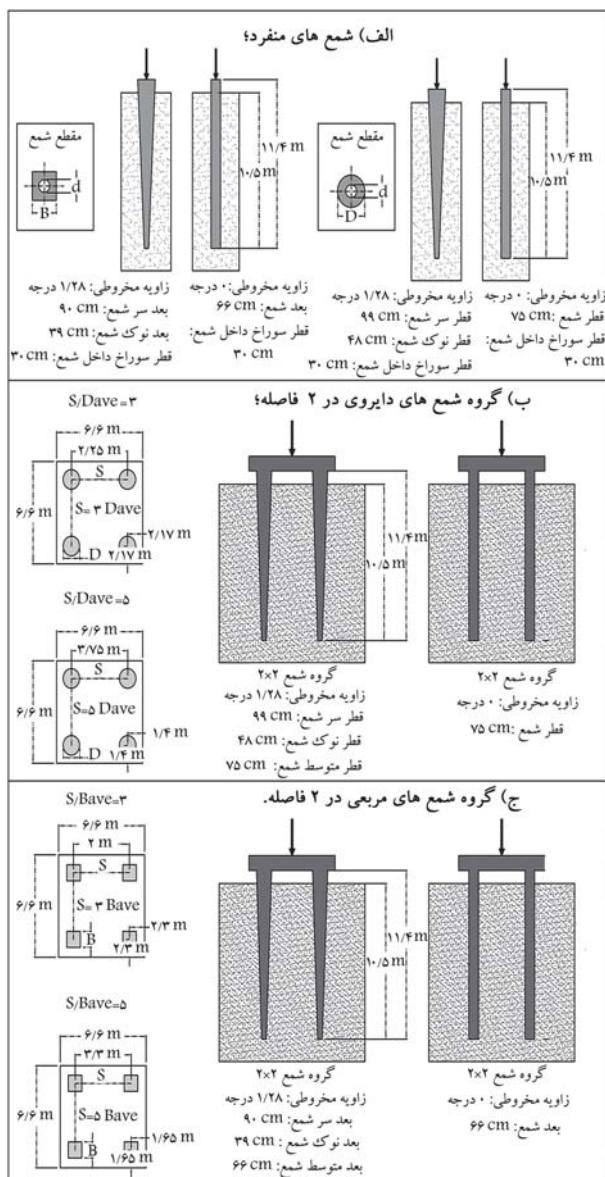
خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، نوعی ماسه‌ی سیلیسی معدنی موسوم به ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه بوده است، که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. خاک موردنظر به صورت لایه‌لایه در یک جعبه‌ی آزمایش مستطیلی با ابعاد ۷۸ × ۵۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۹ سانتی‌متر اجرا شده است. هر شمع منفرد با ۲ حرف لاتین، که حرف اول مربوط به مقطع شمع (دایروی: C و مربعی: S) و حرف دوم مربوط به مخروطی یا یکنواخت بودن مقطع شمع در طول (مخروطی: T) و یکنواخت (U) بوده، نام‌گذاری شده است. همچنین گروه شمع‌ها نیز با ۴ حرف لاتین، که دو حرف اول، نظیر شمع‌های منفرد و دو حرف دوم، مربوط به فاصله‌ی شمع‌های گروه است (D و ۳D) و (D و ۵D) نام‌گذاری شده‌اند.

۴. مطالعه‌ی عددی

با هدف بررسی دقیق تر رفتار شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های مخروطی و مقایسه‌ی آن با رفتار شمع‌های یکنواخت معادل (غیرمخروطی معادل)، مجموعه‌ی ای از تحلیل‌ها به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ (نسخه‌ی پنجم) انجام شده است. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، یک برنامه‌ی تفاضل محدود از مجموعه‌ی نرم‌افزارهای آیتسکا^{۱۶}

جدول ۴. مقایسه‌ی متغیرهای خاک استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی.

پارامتر	مقدار آزمایشگاه در تحلیل عددی	مقدار آزمایشگاه مکانیک خاک
زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۳۲	۳۱
چسبندگی (kPa)	۱	۴
مدول کشسان (MPa)	۲۵	۲۳
چگالی (Kg/m ³)	۱۶۰۰	۱۵۰۰



شکل ۲. شماتیک مشخصات ابعادی هندسه‌ی شمع و گروه شمع‌های شبیه‌سازی شده در ابعاد پروتوتاپ.

با نشست ۱۲ میلی‌متر (Q_{12}) برای یک شمع با مقطع یکنواخت دایره‌بی تحت بارگذاری محوری فشاری انتخاب شده است. برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرزها، با افزایش فاصله‌ی مرزهای مدل از مرکز شمع، مقدار پارامتر کنترلی پایش و ثبت شده است، که تغییرات آن با افزایش فاصله‌ی

جدول ۵. مشخصات مکانیکی مصالح شمع‌ها.

ویژگی	مقدار
مدل رفتاری کشسان خطی	۶/۴ e^4
مدول بالک (MPa)	۲/۶ e^3
مدول برشی (MPa)	۲۳۵۷
وزن مخصوص (Kg/m ³)	۱۶۰۰

جدول ۶. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک در مدل‌سازی.

ویژگی	مقدار
چگالی (Kg/m ³)	۱۶۰۰
مدول کشسان خاک (MPa)	۲۵
نسبت پواسون	۰/۳
زاویه اصطکاک (درجه)	۳۲
چسبندگی (kPa)	۱

۱.۴ مشخصات شمع‌ها در شرایط سازی

مشخصات شمع‌ها در حالت پروتوتاپ و برای شتاب گراش ۳۰g و با رعایت قوانین مقیاس در نظر گرفته شده است، که ابعاد آن در جدول ۲ ارائه شده است. طرح شماتیک شمع‌ها و گروه شمع‌ها با ۲ فاصله‌ی مختلف با ابعاد پروتوتاپ در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

تمامی نتایج ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر مربوط به شمع با مقیاس پروتوتاپ است. آلیاز مصرفی در ساخت شمع‌ها از جنس آلومینیوم بوده است، که خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این که رفتار شمع‌ها بر اساس مدل رفتاری کشسان خطی شبیه‌سازی شده است، فقط پارامترهای کشسان برای تعریف رفتار آلیاز مذکور کافی است. در شکل ۲، همان‌گونه که مشخص است، سوراخی به قطر ۱ سانتی‌متر در شمع‌های مدل (۳۰ سانتی‌متر در پروتوتاپ) به جهت عبور سیم‌های ابزار دقیق (کرنچ‌سنچ) و کاوش میزان خطای ناشی از آن بر میزان برابری جذاری شمع‌ها تعییه شده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای تعریف رفتار خاک استفاده شده در مدل عددی به کمک معیار موهر - کلمب در جدول ۶ ارائه شده است.

۲.۴ فاصله‌ی مرزها و ابعاد مش

برای اطمینان از عدم تأثیرگذاری فاصله‌ی مرزها و ابعاد مش در نتایج، از آنالیز حساسیت استفاده شده است. به این ترتیب که در دو مدل مجزای عددی، با افزایش تدریجی فاصله‌ی مرزها و کاوش تدریجی ابعاد مش از یک مقدار اولیه، منحنی بر - جایه‌جایی ترسیم و با هم مقایسه شده است. به عنوان پارامتر کنترلی، بار متناظر

جدول ۷. مقادیر متغیرهای مر بوط به اینترفیس استفاده شده.

مقدار	پارامتر
۲۰/۸	(MPa)K
۹/۶	(MPa)G
۱۵	(cm) Δz_{min}
۲۲۴	سختی ظاهری محیط (MPa)
۲/۲۴	(GPa)K _n , K _s

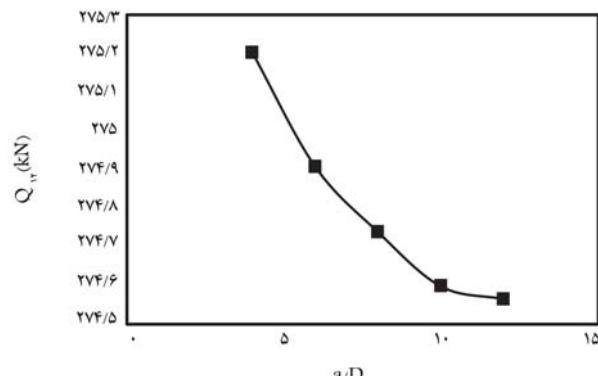
هر کدام با کمک ۳ گره تعریف می‌شوند، ارائه می‌کنند. هر المان سطح مشترک، سطح تحت پوشش خود را به صورت وزنی بین گره‌های خود توزیع می‌کند، بنا بر این هرگز، نماینده‌ی ویژگی‌های یک سطح مشخص است. باید توجه کرد که المان سطح مشترک در نرم افزار $FLAC^{3D}$ به صورت یک طرفه است. مدل رفتاری سطح مشترک مذکور با استفاده از معیار خطی مقاومت برشی کلمب تعریف می‌شود. پارامترهای لازم برای تعریف معیار اخیر در المان‌های سطح مشترک، شامل پارامترهای مقاومتی معیار کلمب (چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح لغزش، که در مثال حاضر بین خاک و جداره‌ی شمع ایست) و همچنین سختی برشی (k_s) و نرمال (k_n) سطح است. برای پارامترهای مقاومتی توصیه‌هایی جهت انتخاب مقادیر ذکر شده برای سطح مشترک خاک و مصالح دیگر نظری آهن و بنابراین مقداری دیگر ذائقی پارامترهای مذکور در خاک در مراجع فنی ارائه شده است. همچنین در مورد مقادیر سختی نرمال و برشی دستورالعمل نرم افزار پیشنهاد می‌کند که مقدار سختی‌های k_s و k_n را برابر سختی معادل محیط مجاور سطح مشترک باید اختیار کرد. مقدار سختی ظاهری محیط، که در واحد تنش بر واحد طول بیان می‌شود، را نیز مطابق رابطه ۱ پیشنهاد می‌دهد:

$$\max \left[\frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta z_{min}} \right] \quad (1)$$

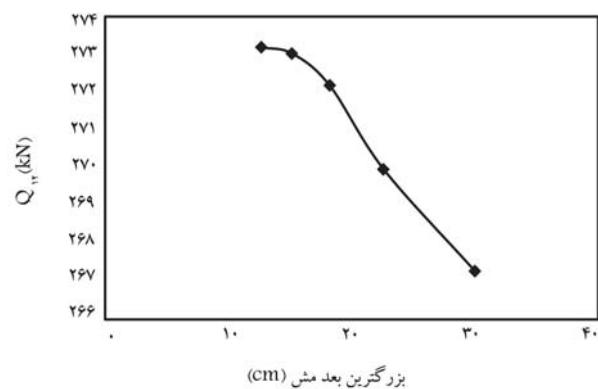
که در آن، K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی محیط و Δz_{min} کوچک‌ترین بعد زون‌های مجاور و درجه نرمال است. در جدول ۷، مقادیر پارامترهای سطح مشترک استفاده شده در تحلیل‌ها ارائه شده است.

۴.۴. راستی آزمایی نرم افزار

جهت بررسی درستی عملکرد نرم افزار از نتایج پژوهش وی وال نگار (۱۹۹۸) استفاده شده است. در پژوهش حاضر، مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس از شمع استوانه‌ی و مخروطی در صندوقه‌ی فشار با امکان اعمال فشارهای همه‌جانبه مختلف به کل نمونه‌ی خاکی مطالعه شده است. راستی آزمایی نرم افزار برای نتایج شمع T1 در پژوهش حاضر به طول تقریباً ۱/۵ متر و زاویه‌ی جداره‌ی ۹۵ درجه انجام شده است. قطر رأس شمع T1، ۲۰۳ میلی‌متر و قطر نوک آن ۱۵۲ میلی‌متر بوده است. خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، دارای چگالی ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۸ درجه، چسبندگی ۰ و مدول بالک ۵، مقایسه‌ی منحنی بار- جایه‌جایی مدل عددی ساخته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ با نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود، که انطباق قابل قبولی دارد.



شکل ۳. نتیجه‌ی آنالیز حساسیت نسبت به فاصله‌ی مرزها.



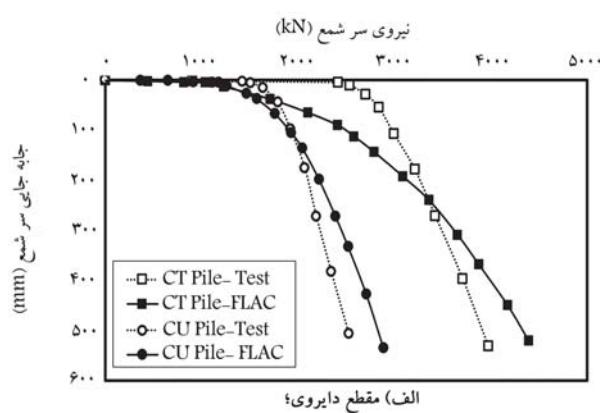
شکل ۴. نتیجه‌ی آنالیز حساسیت نسبت به ابعاد متش.

مرزهای مدل از شمع، در شکل ۳ مشاهده می‌شود. توجه شود که منحنی‌های بار- جایه‌جایی نیز از نظر مسیر و شکل مقایسه شده‌اند، اما جهت ترسیم نموداری حساسیت، از پارامتر Q_{12} استفاده شده است. مقدار a/D معرف نسبت فاصله‌ی دورترین نقطه‌ی مدل به قطر شمع است. همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است، با افزایش نسبت a/D حساسیت پارامتر کنترلی به فاصله‌ی مرزها کاهش یافته است، به نحوی که برای a/D بزرگ‌تر از ۸، مرزها تأثیر قابل ملاحظه‌ی در رفتار مدل ندارند. به این ترتیب در تمامی مدل‌های منفرد و گروهی، ابعاد توده‌ی خاک به نحوی تعریف شده است که مرزها دست‌کم ۹ برابر قطر متوسط شمع از جداره‌ی شمع ها فاصله داشته باشند.

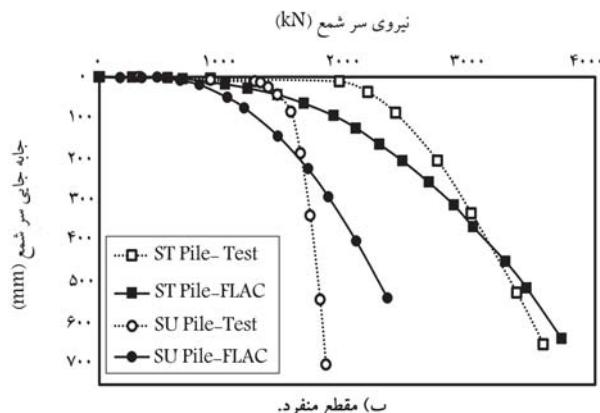
به طریق مشابه و برای ابعاد متش، بررسی نتایج ذکر شده نشان می‌دهد با کوچک‌تر شدن بزرگ‌ترین بعد متش از ۱۸ سانتی‌متر، حساسیت پارامتر کنترلی به ابعاد متش تا حد زیادی کاهش یافته است، که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود. بر این اساس، برای رعایت مسئله‌ی مذکور و در عین حال اجتناب از افزایش قابل ملاحظه‌ی زمان تحلیل، ابعاد متش‌ها در نواحی حساس (ازدیک به شمع) از ۱۵ سانتی‌متر تجاوز نکرده است؛ اما در نواحی دورتر از شمع (ازدیک مرزها)، بزرگ‌ترین بعد متش به مقدار بیشینه‌ی ۸۰ سانتی‌متر لحاظ شده است، که به این ترتیب مش بندی بهینه برای مدل حاصل شده است.

۴. المان‌های سطح مشترک

در پدیده‌های ژوتکنیکی، که امکان لغزش دو سطح روی هم وجود دارد، نرم افزار $FLAC^{3D}$ استفاده از المان‌های سطح مشترک را پیشنهاد می‌کند. نرم افزار $FLAC^{3D}$ سطح مشترک را با استفاده از مجموعه‌ی از المان‌های متشی، که

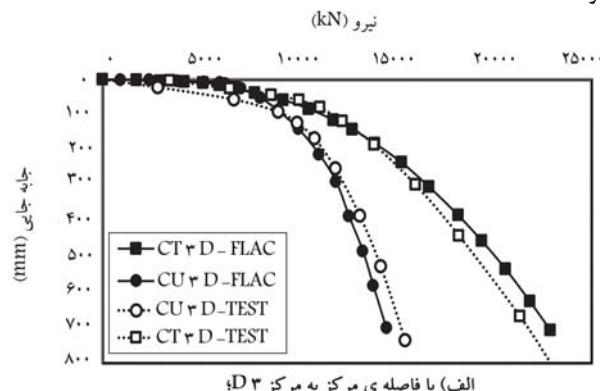


الف) مقطع دایروی؛

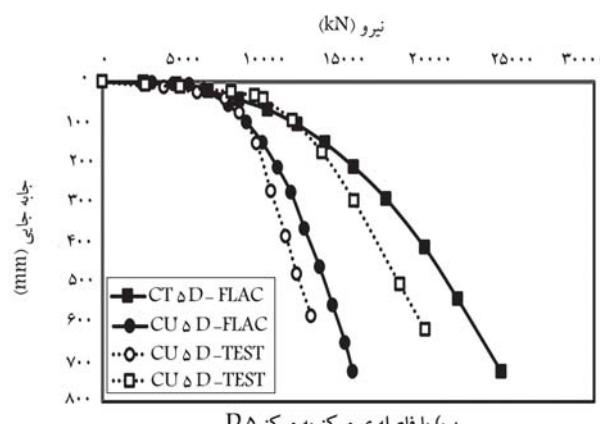


ب) مقطع منفرد.

شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی بار- جابه‌جایی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای شمع‌های منفرد.

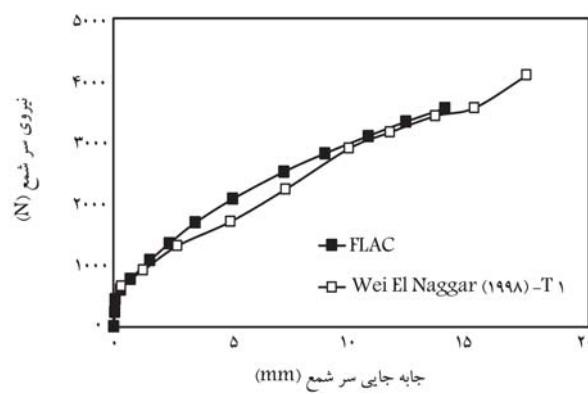


الف) با فاصله‌ی مرکز به مرکز $D/4$ ؛

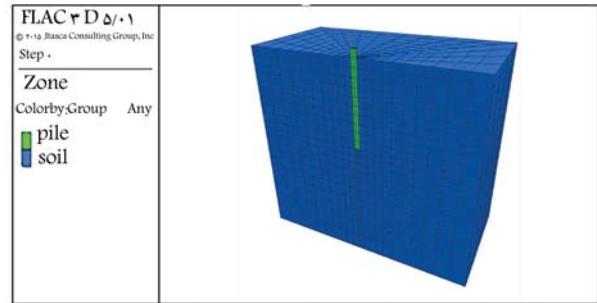


ب) با فاصله‌ی مرکز به مرکز $D/5$ ؛

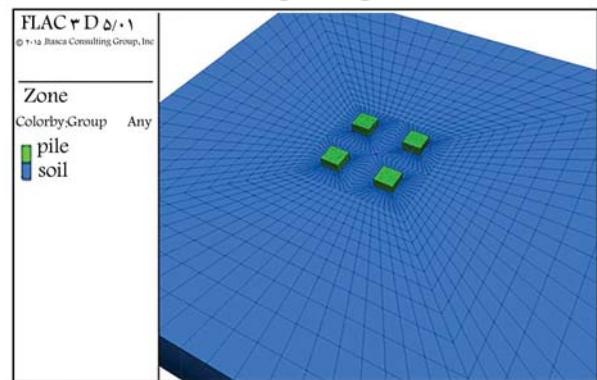
شکل ۶. نمونه‌ی مش‌بندی شمع‌ها: (شکل بالا) شمع منفرد مقطع دایروی.



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با شمع $T 1$ در پژوهش وی و ال نگار (۱۹۹۸).



الف) شمع منفرد مقطع دایروی؛



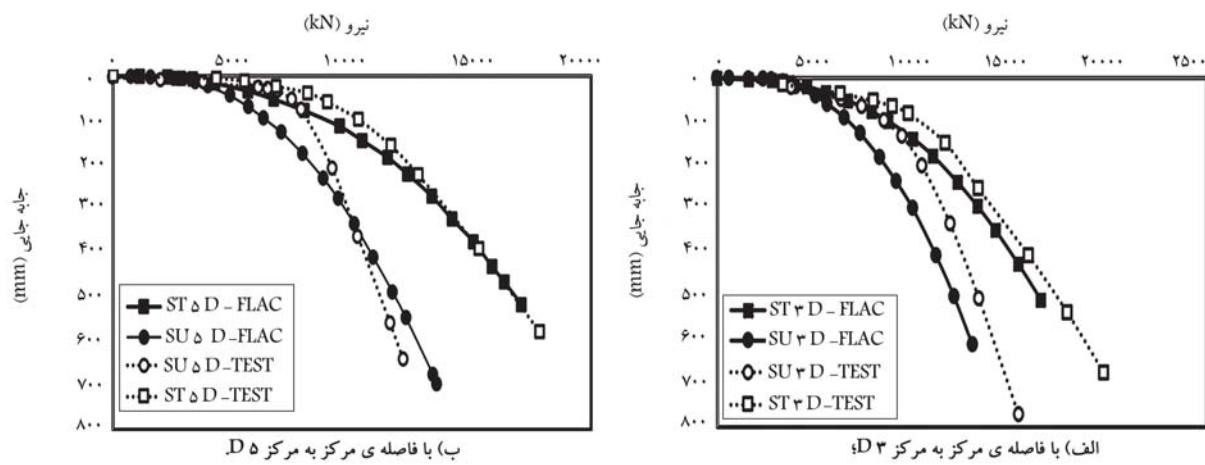
ب) گروه شمع مقطع مربعی بدون سر شمع.

شکل ۶. نمونه‌ی مش‌بندی شمع‌ها: (شکل بالا) شمع منفرد مقطع دایروی.

۵.۴. نتیجه‌ی شبیه‌سازی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌ها

در بخش حاضر، نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ۱۲ آزمایش آزمایشگاهی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌ها ارائه شده است. در شکل ۶، مش‌بندی یک نمونه از مدل‌های مربوط به شمع‌های منفرد و گروه شمع مشاهده می‌شود. در مورد مش‌بندی شمع منفرد، مقطع مدل مذکور از وسط نشان داده شده است، تا قرارگیری شمع در تراکم و چگالی مش‌ها بهتر ملاحظه شود.

در شکل‌های ۷ الی ۹، منحنی‌های بار- جابه‌جایی شمع‌های مختلف را که در آزمایش‌های آزمایشگاهی و همچنین تحلیل‌های عددی حاصل شده‌اند، مشاهده می‌شود. همان‌گونه که بیان شد، از آن جا که امکان مدل‌سازی فرایند اجرای شمع در شبیه‌سازی فراهم نبوده است، تلاش شد با در نظر گرفتن متغیر ضریب فشار جانبی خاک برای حالت روش اجرا با جابه‌جایی شمع‌ها، بهترین انطباق ممکن بین نتایج


 شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی بار-جایه‌جایی گروه شمع 2×2 با مقطع مربعی.

 جدول ۸. مقادیر ظرفیت باربری نهایی و ضریب کارایی گروه شمع 2×2 حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های سانتریفیوژ.

امام	ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی عددی	kN	ضریب کارایی آزمایشگاهی عددی	(Eg) آزمایشگاهی عددی	اثر مخروطی (Cr) آزمایشگاهی عددی	اثر سطح مقطع آزمایشگاهی عددی	جدول ۸. مقادیر ظرفیت باربری نهایی و ضریب کارایی گروه شمع 2×2 حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های سانتریفیوژ.	
							آزمایشگاهی عددی	آزمایشگاهی عددی
CU	۱۹۲۷	۱۸۰۲	-	-	-	-	۱	۱
CT	۲۹۲۲	۲۴۱۰	-	-	-	-	۱	۱
SU	۱۶۵۲	۱۱۹۴	-	-	-	-	۰/۶۶	۰/۸۶
ST	۲۴۸۶	۱۷۸۵	-	-	-	-	۰/۸۴	۰/۸۵
CU 5D	۸۵۶۰	۸۲۴۰	۱/۱۶	۱/۱۱	۱/۵۲	۱/۲۴	۱	۱
CT 5D	۱۱۱۹۰	۱۰۵۰۰	۱/۲۱	۱/۲۶	۱/۳۱	۱/۲۶	۱	۱
SU 5D	۷۸۸۰	۵۸۰۰	۱/۲۱	۱/۹۲	-	-	۰/۷	۰/۹۲
ST 5D	۹۷۱۰	۸۰۶۰	۱/۱۲	۰/۸۷	۱/۴۲	۱/۲۳	۰/۷۹	۰/۸۷
CU 3D	۸۳۷۰	۸۷۹۰	۱/۲۲	-	-	-	۱	۱
CT 3D	۱۱۰۳۰	۱۰۶۳۰	۱/۱۰	۱/۲۱	۱/۳۲	۱/۲۱	۱	۱
SU 3D	۷۷۲۰	۶۲۰۰	۱/۳۰	۰/۹۲	-	-	۰/۷	۰/۹۲
ST 3D	۹۵۹۰	۸۰۹۰	۱/۱۳	۰/۸۷	۱/۳۶	۱/۲۴	۰/۸	۰/۸۷

برای محاسبه‌ی مقادیر ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری از روی نمودار بار-نشست، مشابه آنچه در تفسیر نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی ارائه شده است،^{۱۱ و ۱۲} بار متناظر با جایه‌جایی 80 میلی‌متر، که تقریباً معادل 10% قطر متوسط شمع‌های دایره‌بی است، لحاظ شده است. این معیار بر اساس در نظر گرفتن پیشنهاد ترزاوی^{۱۳} است.

در جدول ۸، پارامتر C_{cs} به جهت بررسی کمی اثر مخروطی شمع تعریف شده و برای نسبت باربری یک شمع یا گروه شمع مخروطی به باربری شمع یا گروه شمع متناظر غیرمخروطی است. همچنین برای بررسی کمی اثر سطح مقطع، پارامتر C_{cs} تعریف شده است، که به صورت نسبت باربری شمع یا گروه شمع با مقطع مربعی به شمع یا گروه شمع متناظر با مقطع دایره‌بی است.

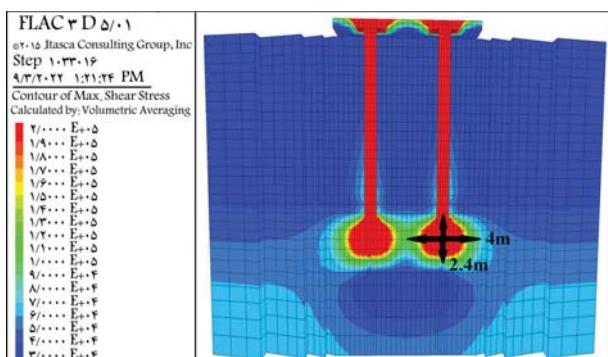
مطابق جدول ۸، هم نتایج آزمایشگاهی و هم عددی و هر دو مقطع شمع‌ها، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمع مخروطی در حالت‌های منفرد و گروه، از شمع معادل یکنواخت خود بیشتر است. در تمامی نتایج آزمایشگاهی و عددی، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمع‌های مقطع دایروی بیشتر از مقطع مربعی بوده است. همچنین میزان افزایش باربری در مورد شمع‌های منفرد در اثر زاویه‌ی

به دست آید و اثر روش اجرا تا حدی به صورت مصنوعی در متغیر ضریب فشار جانی خاک لحاظ شود. مطابق شکل‌های ۷ الی ۹، انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی حاضر به دست آمده و میزان اختلاف مشاهده شده به دلیل عدم مدل‌سازی کامل، روش اجرا منطقی و در حد قابل قبول است.

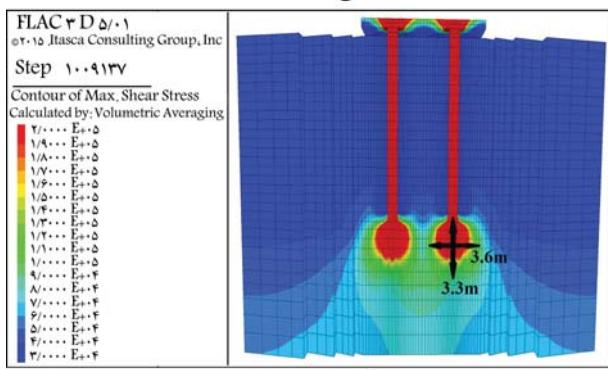
۴.۶. بحث در مورد نتایج

در جدول ۸، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل عددی، شبیه‌سازی شده و همچنین ضریب کارایی گروه شمع‌های حاصل از هر دو مطالعه ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده برای گروه شمع‌های 2×2 متشکل از 4 شمع است، رابطه‌ی محاسبه‌ی ضریب کارایی گروه شمع 4 تایی به صورت رابطه‌ی 2 است:

$$E_g = \frac{Q_{Group}}{4Q_{single}} \quad (2)$$



الف) مقطع دایروی؛



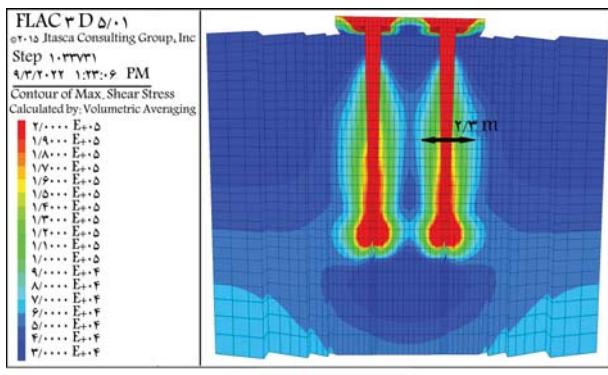
ب) مقطع مربعی.

شکل ۱۰. ابعاد حباب تنش‌های برشی اطراف شمع‌های یکنواخت در گروه شمع‌های با فواصل مرکز به مرکز ۵D.

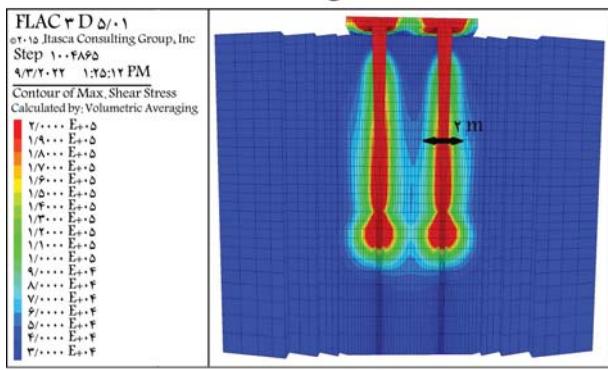
مخروطی، بیشینه‌ی ۵۲٪ بوده است، که مربوط به شمع مقطع دایروی است. این افزایش باربری در مورد گروه شمع‌ها کمتر از ۳۸٪ بوده است.

همچنین از نتایج مشخص است که مقادیر کمی ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمع‌ها در هر دو حالت منفرد و گروه در مدل آزمایشگاهی بیشتر از مدل عددی است، که این موضوع به علت عدم شبیه‌سازی کامل روش اجرای شمع‌ها بوده است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش باربری محوری فشاری شمع‌های منفرد مخروطی نسبت به مقطع یکنواخت معادل خود بیش از گروه شمع‌های مخروطی نسبت به مقطع یکنواخت معادل خود بوده است. نتیجتاً برتری شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های غیرمخروطی در بارگذاری محوری فشاری، در حالت منفرد آن مشهودتر از حالت گروهی است.

مطابق جدول ۸ مشخص است که مقادیر ضریب کارایی گروه شمع‌های با مقاطع مخروطی (غیریکنواخت) در هر دو فاصله‌ی ۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها، کوچک‌تر از مقدار متناظر برای شمع با مقطع یکنواخت است، که در نتایج آزمایشگاهی نیز مستلنه‌ی مذکور مشاهده شده است. دلیل این موضوع احتمالاً تداخل بیشتر حباب‌های تنش به دلیل اثر پدیده‌ی انبساط حفره استوانه‌ی در مورد جداره‌ی شمع‌های مخروطی بوده است، که در ادامه به بررسی این موضوع در مدل‌های عددی از روی کانتورهای توزیع تنش برشی اطراف شمع ها پرداخته شده است. همچنین مشخص است که با افزایش فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها، روند کلی تغییرات مقدار ضریب کارایی، کاهشی و در مسیر میل کردن به ۱ بوده است. مقدار ضریب کارایی گروه برای شمع‌های با مقطع مخروطی در تمامی حالت‌ها تقریباً نزدیک به ۱ بوده است. به این معنی که ظرفیت باربری گروه شمع مخروطی تقریباً برابر با مجموع باربری شمع‌ها منفرد مخروطی مشابه موجود در گروه است.



الف) مقطع دایروی؛



ب) مقطع مربعی.

شکل ۱۱. ابعاد حباب تنش‌های برشی اطراف شمع‌های غیریکنواخت در تراز ۵D با گروه شمع‌های با فواصل مرکز به مرکز ۵D.

۷.۴. بررسی اثر هندسه‌ی جداری شمع‌ها در ظرفیت باربری ماهیت افزایش ظرفیت باربری محوری شمع‌های مخروطی، افزایش ظرفیت باربری جداری آنها به علت پدیده‌ی انبساط حفره است، که اصطکاک جداری بیشتری را در دیواره‌ی شمع فعال می‌کند. اما علی‌رغم بیشتر بودن سطح جانبی شمع مربعی، ظرفیت باربری محوری شمع مقطع دایروی چه در حالت منفرد و چه در حالت گروهی بیشتر از شمع مقطع مربعی است. به همین جهت به ممنظور بررسی دلیل پدیده‌ی اخیر، بررسی توزیع تنش‌های برشی پیرامون شمع بعد از بارگذاری می‌تواند اطلاعات مفیدی ارائه کند. برای درک بهتر حدود ناحیه‌ی تأثیر حباب‌های تنش، ابعاد ناحیه‌ی تأثیر با تنش برشی بزرگ‌تر از ۸۰ کیلوپاسکال (رنگ آبی فیروزه‌ی) برای فواصل مرکز به مرکز ۵D برای هر دو مقطع در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است که در مورد شمع‌های با مقاطع یکنواخت، عمدۀ‌ی تنش‌های برشی بزرگ ایجاد شده در محیط خاک، پیرامون نوک شمع‌ها متمرکز است؛ اما در شمع‌های با مقاطع مخروطی، پیرامون جداره‌ی شمع و ناتشعاع قابل توجهی خاک، متحمل تنش‌های برشی بزرگ شده‌اند، که همین موضوع اصلی‌ترین دلیل بیشتر بودن ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی در مقایسه با شمع یکنواخت معادل است.

مطابق شکل ۱۰ مشخص است که در شمع‌های با مقطع یکنواخت، ناتشعاع تأثیر شمع مقطع دایروی بیشتر از شمع مقطع مربعی است، اما عمق تأثیر زیر نوک شمع در مورد مقطع مربعی بزرگ‌تر از مقطع دایروی است. همچنین با توجه به شکل ۱۱، در شمع‌های مخروطی پیرامون جداره‌ی شمع و در عمق ۵-۶ از سطح خاک،

شمع‌های مقطع یکنواخت، تنش‌های برشی ایجاد شده در پیامون شمع به جزء در سطح مشترک شمع - خاک، ناچیز است و ارائه‌ی مقطع عرضی تنش‌های برشی بیشینه برای شمع‌های مذکور، اطلاعات مفیدی ارائه نمی‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، شیوه‌سازی مطالعات آزمایشگاهی نویسنده‌گان نوشتار حاضر،^[۱۲] در مورد شمع‌های مخروطی منفرد و گروهی با مقاطع دایروی و مربعی تحت بارگذاری محوری فشاری در دستگاه ساتریفیوژ ژوئنکنیکی و نیز تحلیل‌های بر اساس مدل عددی شیوه‌سازی شده انجام شده است؛ که در ادامه، نتایج آن به طور خلاصه بیان شده است:

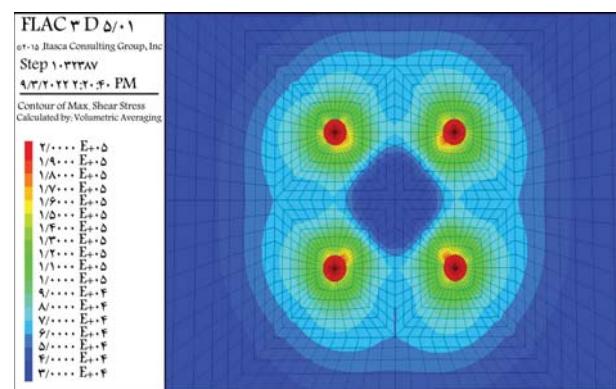
۱- ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی در تمامی نتایج (آزمایشگاهی و عددی)، در هر دو حالت منفرد و گروهی از شمع یا گروه شمع معادل یکنواخت خود بیشتر بوده است. همچنین مقادیر کمی ظرفیت باربری نهایی محوری شمع‌های منفرد و گروهی در مدل آزمایشگاهی بیشتر از مدل عددی بوده است، که این موضوع به علت عدم شیوه‌سازی کامل روش اجرای شمع‌ها در مدل عددی است.

۲- برتری شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های مقطع یکنواخت (غیرمخروطی) در بارگذاری فشاری، در حالت منفرد آن، مشهودتر از حالت گروهی بوده است.

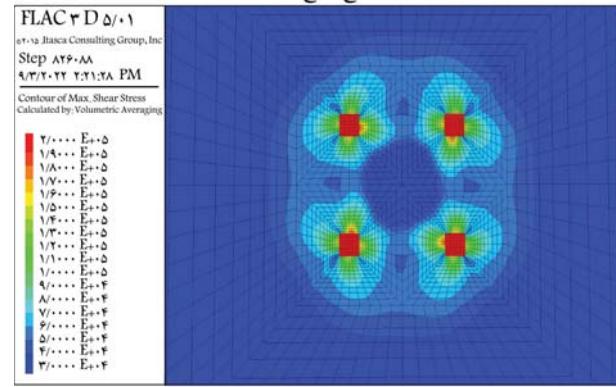
۳- مقادیر ضریب کارایی گروه شمع‌های با مقاطع مخروطی (غیریکنواخت) در هر دو فاصله‌ی ۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها، کوچک‌تر از مقدار متاظر برای شمع با مقطع یکنواخت بوده است.

۴- مقدار ضریب کارایی گروه شمع‌های با مقطع مخروطی در تمام حالت‌ها تقریباً نزدیک به ۱ بوده است، که نشان می‌دهد ظرفیت باربری گروه شمع مخروطی تقریباً برابر با مجموع باربری شمع‌های منفرد مخروطی مشابه موجود در گروه است.

۵- شمع با مقطع دایروی، توزیع تنش یکنواخت‌تری در خاک اطراف شمع از خود نشان داده است. در مورد شمع مقطع مربعی در طرفین کنج اضلاع (کنج‌های مدبب)، تنش برشی ایجاد شده در خاک به شدت کاهش یافته است. نتیجه‌تاً داشتن اضلاع قائم نسبت به هم (داشتن زوایای تند مدبب و شکستگی اضلاع) در مقطع شمع مربعی باعث شده است که عملکرد شمع در ایجاد مکانیزم‌های برشی در خاک پیامون و فعال کردن مقاومت جداری خاک کاهش یابد؛ که این موضوع، باعث بیشتر بودن ظرفیت باربری شمع و گروه شمع مقطع دایروی مخروطی از شمع و گروه شمع مقطع مربعی مخروطی علی‌رغم کمتر بودن مساحت سطح جانبی آن شده است.



الف) گروه شمع مقطع دایروی؛



ب) گروه شمع مقطع مربعی.

شکل ۱۲. مقطع عرضی توزیع تنش برشی بیشینه در خاک پیامون شمع‌های مخروطی در تراز ۶- و برای فاصله‌ی مرکز به مرکز ۵D (شکل بالایی) گروه شمع مقطع دایروی.

حباب تنش شمع با مقطع دایروی بزرگ‌تر از مقطع مربعی است. با توجه به این‌که تمام مقاطع فوق از محور تقارن گذرنده از مرکز شمع‌ها ترسیم شده‌اند، برای درک بهتر تأثیر هندسه‌ی سطح جدار مقطع شمع‌ها (سطوح محدب، تخت، و کنج‌های تیز) در انتقال تنش به خاک، مقاطع عرضی شمع‌های مخروطی (غیریکنواخت) در تراز ۶- متر و برای فواصل مرکز به مرکز ۵D در شکل ۱۲ ترسیم شده است، که مطابق آن، شمع با مقطع دایروی توزیع تنش یکنواخت‌تری در خاک اطراف شمع از خود نشان داده است.

در مورد شمع مقطع مربعی به وضوح مشخص است که در مورد شمع مقطع مربعی در طرفین کنج اضلاع (کنج‌های مدبب)، تنش برشی ایجاد شده در خاک به شدت کاهش یافته است. به تغییری به نظر می‌رسد تغییر زوایای تند مدبب در مقطع شمع باعث شده است که عملکرد شمع در ایجاد مکانیزم‌های برشی در خاک پیامون و فعال کردن مقاومت خاک کاهش یابد. لازم به ذکر است که در مورد

پانوشت‌ها

1. FLAC[®]D (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensional)

2. Robinsky & Morrison
3. Kurian & Srinivas
4. Wei & El Naggar
5. Sakr

6. Paik
 7. Kodikara & Moore
 8. cavity expansion method
 9. Manandhar & Yasufuku
 10. Zhan
 11. ABACOUS
 12. PLAXSIS
 13. Under-Reamed Piles
 14. wave equation theory
 15. Prototype
 16. Itasca

مراجع (References)

6. Paik
 7. Kodikara & Moore
 8. cavity expansion method
 9. Manandhar & Yasufuku
 10. Zhan
 11. ABACOUS
 12. PLAXSIS
 13. Under-Reamed Piles
 14. wave equation theory
 15. Prototype
 16. Itasca

A Symposium in honor of Professor James K. Mitchell, Marriott Crystal City, Arlington, Virginia, USA (2008).

12. Khan, M.K., El Naggar, M.H. and Elkasabgy, M. "Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(3), pp. 377-392 (2008).

13. Kodikara, J.K. and Moore, I.D. "Axial response of tapered piles in cohesive frictional ground", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **119**(4), pp. 675-693 (1993).

14. Manandhar, S. and Yasufuku, N. "Vertical bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory.", *Soils and Foundations*, **53**(6), pp. 853-867 (2013).

15. Ghazavi, M. and Lavasan, A.A. "Bearing capacity of tapered and step-tapered piles subjected to axial compressive loading", *In The 7th International Conference On Coasts, Ports & Marine Structures*, ICOPMAS, Tehran, Iran (2006).

16. Zhan, Y.G., Wang, H. and Liu, F.C. "Numerical study on load capacity behavior of tapered pile foundations", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17** (2012).

17. Hataf, N. and Shafaghat, A. "Numerical comparison of bearing capacity of tapered pile groups using 3D FEM", *Geomech. Eng.*, **9**(5), pp. 547-567 (2015).

18. Hataf, N. and Shafaghat, A. "Optimizing the bearing capacity of tapered piles in realistic scale using 3D finite element method", *Geotechnical and Geological Engineering*, **33**(6), pp. 1465-1473 (2015).

19. Vali, R., Mehrinejad Khotbehsara, E., Saberian, M. and et al. "A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and underreamed piles", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **13**(3), pp. 236-248 (2019).

20. Sormie, A. and Ghazavi, M. "Analysis of non-uniform piles driven into cohesive soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **109**, pp. 282-285 (2018).

21. Tavasoli, O. and Ghazavi, M. "Effect of tapered and semi-tapered geometry on the offshore piles driving performance", *Ocean Engineering*, **201**, p.107147 (2020).

22. Nasrollahzadeh, E. and Hataf, N. "Experimental and numerical study on the bearing capacity of single and groups of tapered and cylindrical piles in sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **16**(4), pp. 426-437 (2019).

23. Terzaghi, K. "Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations", *In Proceedings*, ASCE, **68**(2), pp. 311-323 (1942).

References مراجع

 1. Shabanpour, A. and Ghazavi, M. "Centrifuge tests on axially loaded tapered piles with different cross-sections under compressive and tensile loading", *Canadian Geotechnical Journal*, **99**(999), pp. 1-10 (2022).
 2. Shabanpour, A., Ghazavi, M. and El Naggar, M.H. "Behavior of axially loaded tapered pile groups using centrifuge test", *Innovative Infrastructure Solutions*, (Under Review) (2022).
 3. Robinsky, E.I. and Morrison, C.F. "Sand displacement and compaction around model friction piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **1**(2), pp. 81-93 (1964).
 4. Kurian, N.P. and Srinivas, M.S. "Studies on the behavior of axially loaded tapered piles by the finite element method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **19**(12), pp. 869-888 (1995).
 5. Wei, J. and El Naggar, M.H. "Experimental study of axial behavior of tapered piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(4), pp. 641-654 (1998).
 6. El Naggar, M.H. and Wei, J.Q. "Response of tapered piles subjected to lateral loading", *Canadian Geotechnical Journal*, **36**(1), pp. 52-71 (1999).
 7. El Naggar, M.H. and Wei, J.Q. "Uplift behavior of tapered piles established from model tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(1), pp. 56-74 (2000).
 8. Naggar, M.H.E. and Sakr, M. "Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp.1295-1308 (2000).
 9. Paik, K., Lee, J. and Kim, D. "Calculation of the axial bearing capacity of tapered bored piles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **166**(5), pp. 502-514 (2013).
 10. Rybnikov, A.M. "Experimental investigations of bearing capacity of bored-cast-in-place tapered piles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **27**(2), pp. 48-52 (1990).
 11. Ghazavi, M. and Ahmadi, H.A. "Time-dependent bearing capacity increase of uniformly driven tapered piles-field load test", *Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*,

کنترل لرزه‌یی پل بزرگراه محک با بهره‌گیری از سیستم کنترل نیمه‌فعال و کنترل کننده‌ی فازی خودتنظیم

سجاد ابریشمی (دانشجوی دکتری)

عباس کرم‌الدین* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمد رضا اکبرزاده توپونجی (استاد)

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهمنگی عمران شرف، (اصفهان ۱۴۰۱)،
دوری ۳ - ۸، شماره ۱ / ۴، ص. ۷۳-۸۴، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، به منظور کنترل لرزه‌یی پل بزرگراه محک، از کنترل کننده‌ی انطباق‌پذیر فازی خودتنظیم (STFC) و میراگرها نیمه‌فعال MR استفاده شده است. کنترل کننده‌ی STFC، با استفاده از یک ساختار دو قسمتی، مزایای سیستم‌های استنتاج فازی را با الگوریتم انطباق‌پذیر ترکیب می‌کند. ساختار خودتنظیم توابی تنظیم برخط کنترل کننده را با توجه به مشخصات تحریکات لرزه‌یی و شرایط سازه‌یی به دست می‌دهد. به منظور افزایش کارآمدی، برخی پارامترهای کنترل کننده‌ی پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شود. نهایتاً کنترل کننده‌ی پیشنهادی تحت تحریک‌های تعیین شده برای پل محک قرار گرفته و معيارهای سنجش رفتار پل محاسبه شده است. بررسی رفتار سازه‌ی کنترل شده و مقادیر معيارهای سنجش از یک سو نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی، توانمندی بالایی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی، به ویژه معيارهای مرتبط با خسارت، نظیر: جایه‌جایی میانه‌ی پل، تغییرشکل جدا سازها و انرژی اتلافی در اعضاء سازه‌یی و از سوی دیگر، توان انطباق با شرایط مختلف لرزه‌یی را دارد.

sajjadabrihami@mail.um.ac.ir
a-karam@um.ac.ir
akbazar@um.ac.ir

واژگان کلیدی: کنترل لرزه‌یی، کنترل نیمه‌فعال، میراگر MR، کنترل کننده‌ی فازی خودتنظیم، کنترل کننده‌ی انطباق‌پذیر پل بزرگراه محک، خسارت.

۱. مقدمه

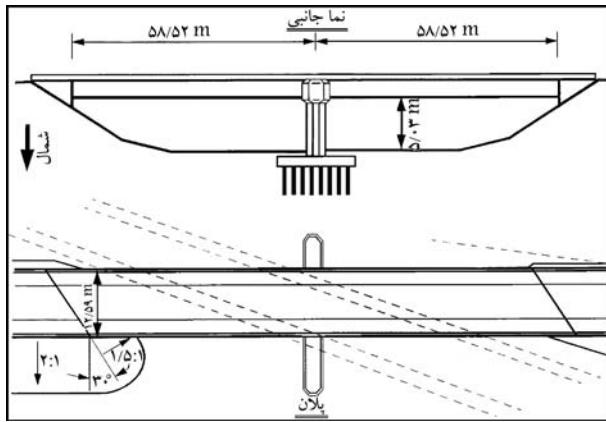
نظیر LQR، LQG، H_2 و H_∞ و الگوریتم‌های نوین یا مبتنی بر هوش، نظریه منطق فازی و شبکه‌های عصبی تقسیم‌بندی کرد.^[۱] در میان انواع سیستم‌های کنترل، سیستم‌های نیمه‌فعال به دلیل داشتن همزمان قابلیت اطمینانی مشابه سیستم‌های غیرفعال و قابلیت انطباق‌پذیری با شرایط مختلف مشابه با سیستم‌های غعال، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. باید افزود که سیستم‌های نیمه‌فعال می‌توانند کارایی مشابه و قابل رقابتی با سیستم‌های غعال داشته باشند، اگرچه در مقایسه با آن‌ها، دارای مزایایی نظریکم هزینه‌تر بودن و نیاز به منبع توان کوچکتر هستند.^[۲-۳] به منظور سنجش کارایی سیستم‌های مختلف کنترل لرزه‌یی و انجام یک مقایسه‌ی قاعده‌دار و هدفمند میان راهکارهای مختلف، تاکنون انواع سازه‌های محک به عنوان یک بسته‌ی آزمونی در محیط نرم‌افزار متلب^۱ ایجاد شده‌اند،^[۴-۵] که از جمله‌ی آن‌ها، پل بزرگراه جداسازی شده است.^[۶] از آنجا که پل‌ها نقشی اساسی در شبکه‌ی حمل و نقل ایفا می‌کنند، اختلال در سرویس دهی آن‌ها می‌تواند منجر به بروز خسارت‌های گسترده‌ی مالی و جانی شود. لذا محافظت از پل‌ها در برابر زلزله، به

امروزه حفاظت از سازه‌ها در برابر خطرهای طبیعی، نظری باد و زلزله، یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان سازه محسوب می‌شود. به همین جهت، در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی پیرامون کنترل ارتعاش‌های سازه‌ها در برابر باد و زلزله صورت گرفته است. براین اساس، انواع مختلفی از میراگرها و سیستم‌های کنترل برای سازه‌ها معرفی و ارزیابی شده‌اند که شامل: سیستم‌های فعال، نیمه‌فعال، غیرفعال و ترکیبی هستند.^[۶] در این میان، عملکرد و رفتار دستگاه‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال قابل تنظیم است. این مهم به وسیله‌ی یک کنترل کننده که فرمان مناسب را جهت تنظیم عملکرد رفتار دستگاه صادر می‌کند، صورت می‌گیرد. یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مؤثر در کارآمدی سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال، عملکرد مناسب الگوریتم‌های کنترل در تعیین دستور کنترل است. تاکنون انواع مختلفی از کنترل کننده‌ها در کنترل سازه‌ها استفاده شده‌اند که می‌توان آن‌ها را در دو دسته‌ی کلی الگوریتم‌های کلاسیک،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۵/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۲/۶/۱۴۰۱، پذیرش ۲/۷/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60707.3117



شکل ۱. پلان و برش پل بزرگراه محک.^[۱۰]

کنترل نصب در پل است. به منظور بررسی سیستم‌های کنترل در سازه‌ی پل بزرگراه محک، ۶ شتاب‌نگاشت مختلف در دو راستای افقی متعامد در نظر گرفته شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ارزیابی کارایی سیستم‌های کنترل از طریق ۲۱ معیار سنجش تعریف شده برای پل بزرگراه محک صورت می‌ذیرد. در این میان، معیارهای اول تا ششم مربوط به بیشینه‌ی پاسخ‌ها، معیارهای هفتم و هشتم مربوط به رفتار غیرخطی سازه، معیارهای نهم تا چهاردهم مربوط به نرم پاسخ‌ها (انتگرال مرباعات پارامتر پاسخ در طول زلزله) و سایر معیارها مربوط به ارزیابی امکانات موردنیاز برای سیستم کنترل است. باید افزود که مقدار معیارهای سنجش ۱ تا ۱۶، بیانگر نسبت پاسخ سازه‌ی کنترل شده به سازه‌ی کنترل نشده است. شرح بیشتر معیارهای سنجش پل بزرگراه محک در نوشتار آکراوال و همکارانش [۱۰] (۲۰۰۹)، ارائه شده است.

جهت وجود قابلیت سرویس دهی پس از وقوع زمین‌زلزله، حائز اهمیت است.^[۱۲]

تخریب‌های شدید پل‌ها در اثر وقوع زمین‌زلزله‌ای نظیر زلزله‌ی نورث‌ریچ (۱۹۹۴)، کوبه^۳ (۱۹۹۵) و چی^۴ (۱۹۹۹)، اهمیت این موضوع را بیش از پیش نشان داده است.^[۱۳] بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل لرزه‌ی در پل‌ها می‌تواند دستیابی به هدف اخیر را ممکن سازد. از دیگر مزایای استفاده از سیستم کنترل در پل‌ها می‌توان به کاهش جایه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌های زیاد در جداسازه‌ای لرزه‌ی در زمان بروز زمین‌زلزله‌ها محتمل است، اشاره کرد.

با توجه به آنچه بیان شد، هدف از پژوهش حاضر، طرح یک سیستم کنترل لرزه‌ی به منظور کاهش هر چه بیشتر پاسخ‌های لرزه‌ی مرتبط با خسارت در سازه‌های پل، نظیر جایه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌های در پل و جداگرها لرزه‌ی آن و نیز انرژی تلف شده در اعضاء سازه‌ی است. سنجش کارآمدی سیستم کنترل پیشنهادی پژوهش حاضر بر روی فاز نخست مطالعاتی سازه‌ی پل بزرگراه محک بررسی و ارزیابی شده است. برای این منظور و با توجه به مزایای ذکر شده برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، در پژوهش حاضر از میراگرهای نیمه‌فعال MR استفاده شده است. برای ارائه دستور کنترل مناسب به میراگرهای یک الگوریتم انطباق‌بندی فازی خود تنظیم طراحی و استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش کارایی کنترل کننده‌ی استفاده شده، بخشی از پارامترهای اجزاء تشکیل‌دهنده آن توسط الگوریتم زنگیک تنظیم شده‌اند. لازم به ذکر است به دلیل نقاوت اثر زمین‌زلزله‌ای مختلف در رفتار سازه‌ها، در کنترل کننده‌ی طراحی شده، علاوه بر شرایط رفتاری سازه، از مشخصات تحریک اعمالی نیز برای تعیین دستور کنترلی مناسب استفاده شده است. در ادامه، با معرفی پل بزرگراه محک و نیز کنترل کننده‌ی فازی خود تنظیم طراحی شده در پژوهش حاضر و مطالعه‌ی عددی آن بر سازه‌ی پل بزرگراه محک و بررسی پاسخ‌ها و معیارهای سنجش، کارایی سیستم کنترل پیشنهادی ارزیابی شده است.

۳. سیستم کنترل نیمه‌فعال

به دلیل مزایای موجود برای کنترل نیمه‌فعال، از قبیل قابلیت اطمینان بالا، هزینه‌ی اندک، عدم نیاز به منبع انرژی بزرگ و توان انطباق با شرایط،^[۱۴] در پژوهش حاضر از سیستم نیمه‌فعال استفاده شده است. سیستم کنترل نیمه‌فعال مشکل از سه بخش است:

۱. دستگاه‌های کنترل قابل تنظیم که نیروی مقاوم کنترل را براساس رفتار سازه و فرمان کنترلی تولید می‌کنند.

۲. حسگرهای که پاسخ‌های سازه را ثبت می‌کنند و در اختیار کنترل کننده قرار می‌دهند.

۳. کنترل کننده که وظیفه‌ی تعیین و صدور دستور کنترل (عموماً به شکل ولتاژ) را براساس اطلاعات حسگرها عهده‌دار است.

از جمله انواع دستگاه‌های کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای MR هستند. میراگرهای MR علاوه بر مزایای ذکر شده برای سیستم‌های نیمه‌فعال، به دلیل داشتن توان واکنش بسیار سریع، قابلیت اطمینان بالا، توانمندی در کنترل سازه و هزینه‌ی نسبتاً پایین ساخت،^[۱۵] در پژوهش حاضر استفاده شده است.

به منظور کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه محک، مشابه سیستم نیمه‌فعال نمونه‌ی فاز اول مطالعاتی پل^[۱۶] (۱۶ عدد میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتون در بیشینه‌ی ولتاژ ۱۰ ولت بین انتهای عرضه و کوله‌ها مدل شده است؛ به گونه‌ی که در محل هر یک از کوله‌ها، ۸ میراگر (نیمی در امتداد طولی و نیمی عمود بر امتداد طولی پل) در نظر گرفته شده است (شکل ۲).^[۲]

۲. سازه‌ی معیار پل بزرگراه

مدل پل بزرگراه محک، توسط آکراوال^۵ و همکارانش^[۶] (۲۰۰۹)،^[۱۰] و بر مبنای تقاطع غیر هم‌سطح ۹۱/۵ واقع در شهرستان اورنج^۶ در کالیفرنیای جنوبی تعریف شده است. تقاطع مذکور شامل یک پل جداسازی شده و پیوسته‌ی دو دهانه است که شاه تیری با مقطع قوطی شکل از جنس بتن پیش‌تینیده دارد. این پل، مشکل از دهانه، هر یک به طول ۵۸/۵ متر، دو کوله‌ی اریب با زاویه‌ی ۳۳ درجه است. عرضه مذکور برای پیش‌تینیده با ستون‌ها و تیر عمیق سرستون پیش‌تینیده با طول ۳۱/۴ متر است (شکل ۱).

در فاز نخست مطالعاتی پل بزرگراه محک، در مدل آن از ۸ جدایگر لرزه‌ی بی‌لاستیکی - سربی در محل اتصال عرضه به کوله‌های انتهایی استفاده شده است. همچنین مجموعاً از ۱۶ دستگاه کنترل نیز که در محل بین عرضه و کوله‌های انتهایی و در دو راستای متعامد نصب هستند، استفاده شده است. مدل اجزاء محدود سه‌بعدی پل محک با ۴۴۵ درجه آزادی، نخست در نرم افزار آباکوس^۷ ایجاد شده و سپس ماتریس‌های سختی، جرم و میرایی سازه به محیط نرم افزار مطلب انتقال یافته است. برای تحلیل لرزه‌ی سازه از آنالیز دینامیکی غیرخطی به روش انتگرال‌گیری نیومارک استفاده و مدل سازه‌ی پل به همراه سیستم کنترل پیشنهادی در محیط سیمولینک^۸ تهییه و قابل اجرا شده است. لازم به ذکر است منشأ رفتارهای غیرخطی در مدل اشاره شده، مربوط به رفتار غیرخطی جداسازه‌ای لرزه‌ی نسبت در تکیه‌گاه‌ها، عملکرد غیرخطی مصالح در ستون‌های میانی پل، و رفتار غیرخطی دستگاه‌های

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های انتخابی پل بزرگراه محک.

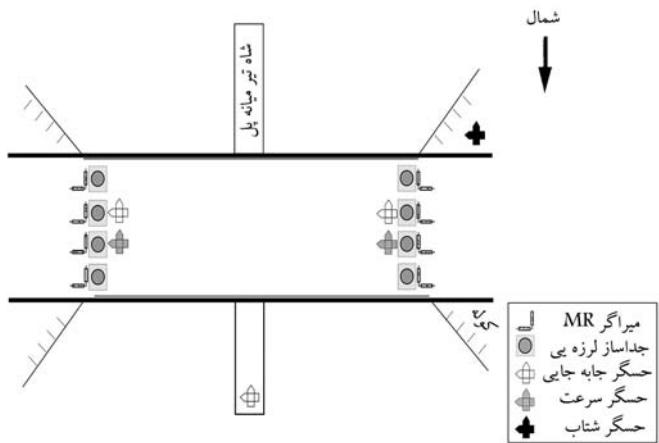
بیشینه‌ی زمین						زلزله	سال وقوع	برگز (Mw)	فاصله گسل (km)	شتاب (g)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s)	شمالی - شرقی - غربی	شمالی - شرقی - جنوبی	شمالی - شرقی - جنوبی
شمالی	شرقی	جنوبی	غربی	شمالی	شرقی										
۷۳/۳	۳۳/۸	۰/۴۹۲	۰/۶۱۲	۷/۳	۶/۰	۱۹۸۶	نورث پالم اسپرینگز								
۱۱۴/۷	۴۵/۶	۱/۱۵۷	۰/۴۱۷	۱۰/۳۹	۷/۶	۱۹۹۹	چی - چی								
۲۹/۸	۳۰/۲	۰/۳۱۳	۰/۲۱۵	۸/۳	۷/۰	۱۹۴۰	امپریال ولی								
۱۶۶/۱	۷۳/۰	۰/۸۳۸	۰/۴۷۲	۷/۱	۶/۷	۱۹۹۴	نورث‌ریچ								
۵۶/۴	۶۲/۱	۰/۷۲۸	۰/۸۲۲	۱۷/۶	۷/۱	۱۹۹۹	دوچه - ترکیه								
۳۷/۳	۳۶/۶	۰/۵۰۹	۰/۵۰۳	۱۱/۱	۶/۹	۱۹۹۵	کوبه								

جدول ۲. پارامترهای مدل بوك - ون میراگر MIR با بیشینه‌ی طرفیت ۱۰۰۰ KN و بیشینه‌ی ولتاژ ۱۰۵V [۱۱].

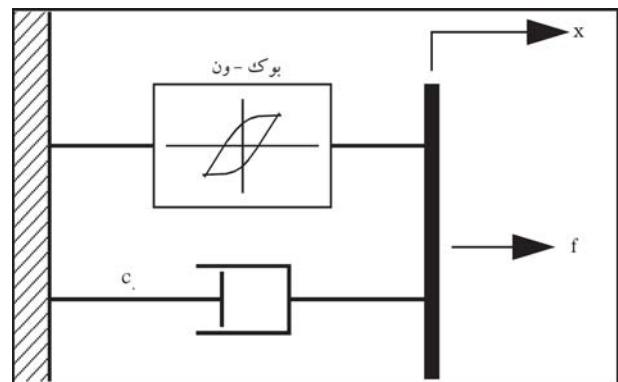
$$\begin{aligned}
 a_a &= ۱/۰.۸۷۲ \times ۱۰^۵ N/cm & A &= ۱/۲ \\
 a_b &= ۴/۹۶۱۶ \times ۱۰^۵ N/(cm.v) & \eta &= ۵۰ s^{-1} \\
 c_{a_a} &= ۴/۴۰ N.s/cm & \gamma &= ۳ cm^{-1} \\
 c_{b_b} &= ۴۴ N.s/(cm.v) & \beta &= ۳ cm^{-1} \\
 & & n &= ۱
 \end{aligned}$$

$$\dot{u}_c = -\eta(u_c - u_a) \quad (5)$$

که در آن‌ها، \dot{x} و c به ترتیب سرعت و میرایی ویسکوز میراگر، متغیرهای γ ، β ، n و A و η پارامترهای تنظیم‌کننده‌ی شکل حلقه‌های هیسترسیس میراگر، u_a و u_c به ترتیب ولتاژ روده و خروجی از فیلتر مرتبه‌ی اول، η ثابت زمان در فیلتر مرتبه‌ی اول و متغیرهای c_{a_a} ، c_{b_b} ، α_a ، α_b ، c_{a_a} ، c_{b_b} نیز پارامترهایی برای درنظر گرفتن وابستگی نیروی میراگر به ولتاژ اعمالی هستند.^[۱۱] به جهت تطابق با رفتار واقعی میراگر و برآورده ساختن طرفیت اشاره شده، پارامترهای مدل بوك - ون با مقیاس‌سازی نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در دانشگاه واشنگتن،^[۱۶] محاسبه و در جدول ۲ درج شده است.^[۱۱]



شکل ۲. محل قرارگرفتن دستگاه‌های کنترل و حسگرها در مدل پل بزرگراه محک.



شکل ۳. مدل رفتاری میراگر MIR.^[۱۶]

برای مدل‌سازی رفتار میراگرهای MIR از مدل بوك - ون مطابق شکل ۳ استفاده شده است. در این حالت، معادلات حاکم بر رفتار میراگر به صورت روابط ۱ الی ۵ خواهد بود.^[۱۱]

$$f = c_a \dot{x} + \alpha z \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{(n-1)} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u_c \quad (3)$$

$$c_a = c_{a_a} + c_{b_b} u_c \quad (4)$$

در سیستم کنترل طراحی شده برای پژوهش حاضر، از ۱۲ عدد حسگر شامل چهار دسته استفاده شده است (مطابق شکل ۲):

۱. چهار عدد جایه‌جایی سنج در دو راستای متعامد طولی و عرضی (۲ عدد برای هر یک از دو انتهای عرشه) به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نسبی در محل قرارگیری جداسازهای لرزه‌ی بی و میراگرهای MIR.

۲. چهار عدد سرعت‌سنج در دو راستای متعامد (۲ عدد در هر یک از دو انتهای عرشه) به منظور اندازه‌گیری سرعت انتهای عرشه که محل قرارگیری جداسازهای لرزه‌ی بی و میراگرهای MIR است.

۳. دو عدد جایه‌جایی سنج روی شاه‌تیر میانی در دو راستای متعامد طولی و عرضی پل، به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نسبی و ارائه اطلاعات از وضعیت رفتاری میانه‌ی پل.

برای سیستم، استفاده از عملگرها و نیز ترتیب قواعد، خروجی موتور استنتاج تعیین می‌شود. درنهایت، با استفاده از فرایند غیرفازی‌سازی، خروجی به عدد غیرفازی تبدیل می‌شود.

از معروف‌ترین مدل‌های استنتاج فازی می‌توان به مدل ممداňی و سوگنو اشاره کرد. در مدل ممداňی، بخش نتیجه‌هی قواعد از مجموعه‌های فازی با تابع عضویت مشخص شکل می‌شود؛ اما در مدل سوگنو، برخلاف مدل ممداňی، بخش نتیجه‌هی قواعد را تابع چندجمله‌ی درجه‌ی اول و یا مقادیر ثابت (درجه صفر) تشکیل می‌دهند.^[۱۹] این امر موجب افزایش سهولت و سرعت محاسبات در مدل سوگنو شده است که در کنترل‌کننده‌های لرزه‌ی می‌تواند اهمیت باشد.

الگوریتم‌های کنترل فازی، مزایایی نظیر: سادگی در مدل‌سازی و طراحی، قابلیت درنظر گرفتن رفتارهای غیرخطی و عدم قطعیت‌ها، کارآمدی بالا در صورت تنظیم مناسب دارند. تاکنون پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های فازی در زمینه‌ی کنترل لرزه‌ی سازه‌ها پرداخته‌اند که بیانگر عملکرد مطلوب این دسته از کنترل‌کننده‌ها در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی به ویژه در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک، نظیر LQG و الگوریتم بهینه‌ی مختصر شده^[۲۰-۲۱] بوده‌اند. باید افزود از جمله مهم‌ترین مشکلات در برپا کردن سیستم استنتاج فازی، تعیین پارامترهای مناسب برای تابع ورودی و خروجی و نیز تعیین پایگاه قواعد فازی به گونه‌یی است که اهداف کنترل هر چه بeter برآورده شود. پژوهش‌های متعددی ضمن تأکید بر این مشکل، استفاده از الگوریتم رزیک به جهت بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ی فازی از طریق تعیین مقادیر بهینه برای تابع عضویت و یا قواعد فازی را در بهبود عملکرد و افزایش کارایی کنترل‌کننده‌ی فازی مؤثر دانسته‌اند.^[۲۲-۲۴]

۲.۵. مبانی کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر خودتنظیم

یکی از چالش‌های مهم در بحث طراحی الگوریتم‌های کنترل برای سازه‌های تحت زلزله، وجود عدم قطعیت‌های مختلف، نظیر: تغییر در مشخصات سازه (مانند سختی) در طول رخداد زلزله و ساختار غیرقابل پیش‌بینی تحریک لرزه‌ی است که کارآمدی بسیاری از الگوریتم‌های کنترل به ویژه کنترل‌کننده‌های خطی را با مشکل مواجه می‌سازد.^[۲۵] یکی از انواع الگوریتم‌های کنترل، که به منظور ارائه‌ی عملکرد مناسب در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات مشخصات سازه پیشنهاد می‌شوند، کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر^[۱۱] هستند. در علم کنترل، عبارت انطباق‌پذیر به آن دسته از الگوریتم‌های کنترلی اطلاق می‌شود که دارای پارامترها و یا ساختاری با قابلیت تغییر و تنظیم در طول زمان استفاده و از طریق مکانیزم‌های خودکار باشد.^[۲۶-۲۷] در این دسته از الگوریتم‌ها، پس از تشکیل ساختار کنترل‌کننده، قواعدی تطبیق به گونه‌یی تعریف می‌شود که پایداری و همگرایی به پاسخ مطلوب را نصیمن کند. تاکنون پژوهش‌های متعددی بر قابلیت‌ها و توانمندی‌های انواع الگوریتم‌های انطباق‌پذیر در کنترل سازه‌ها دلالت کرده‌اند.^[۲۸-۲۹]

ارائه‌ی قاعده‌ی تطبیق مناسب، چالشی است که موجب پیچیده شدن طراحی کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر می‌شود. از همین رو، دسته‌یی دیگر از کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر، با نام خودتنظیم^[۲۰] پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها از یک کنترل‌کننده‌ی فرعی به منظور تضمین و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی اصلی استفاده می‌شود. با رویه‌ی اخیر، ضمن حفظ انطباق‌پذیری، از پیچیدگی‌های ساختاری الگوریتم نیز کاسته می‌شود. در مبحث کنترل لرزه‌ی نیز با وجود پیچیدگی‌های رفتاری سازه‌ها، ساختار خودتنظیم می‌تواند ضمن کاستن از دشواری‌های ارائه‌ی قاعده‌ی تطبیق، با کاهش حجم و زمان محاسبات، مانع بروز آثار منفی تأخیر زمانی شود.

۴. دو عدد شتاب‌سنج در محل پی کوله‌ی غربی در دو راستای طولی و عرضی پل، برای اندازه‌گیری شتاب لحظه‌ی زمین در حین زلزله و ارائه‌ی اطلاعات از تحریک زمین‌لرزه. گفتنی است با انتگرال‌گیری از شتاب ثبت شده توسط دو شتاب‌سنج اخیر، می‌توان سرعت زمین را تعیین کرد.

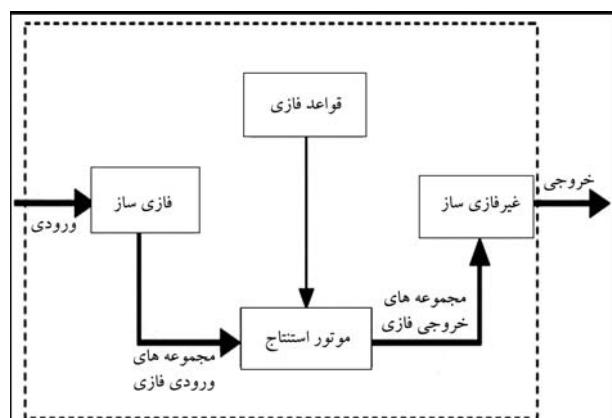
لازم به ذکر است که جانمایی و تعداد حسگرها به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که با تعداد کمینه‌ی حسگر، دست‌یابی به رفتار سازه صورت گیرد و اطلاعات کاربردی را برای اخذ تصمیم مناسب در اختیار کنترل‌کننده قرار دهد. باید افزود که ظرفیت خروجی حسگرها و دامنه‌ی مبدل A/D برابر با 10 ± 0 ولت بوده و هر یک از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده، اغتشاشی از نوع پالس مستطیلی گوسی با مقدار مؤثر (جذر میانگین مربعات) 0.3 ± 0 ولت داشته‌اند (معادل $1/3$ دامنه‌ی مبدل A/D).

۵. کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم

در طراحی الگوریتم کنترل برای سیستم پیشنهادی، هدف ارائه‌ی کنترل‌کننده‌یی است که بتواند از یک سو، پاسخ‌های لرزه‌ی سازه را به منظور کمینه‌سازی خسارت کاهش دهد و از سوی دیگر، در شرایط مختلف لرزه‌ی سازه قابلیت و کارایی خود را حفظ کند. برای این منظور از کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم استفاده می‌شود. کنترل‌کننده‌ی ذکر شده، می‌تواند با بهره‌گیری همزمان از مزایای سیستم‌های استنتاج فازی و الگوریتم‌های انتطباق‌پذیر خودتنظیم (که در ادامه بیان شده است)، اهداف سیستم کنترل را برآورده سازد. در ادامه‌ی بخش حاضر، نخست به مبانی سیستم‌های استنتاج فازی و کنترل‌کننده‌های انتطباق‌پذیر خودتنظیم و قابلیت‌های آن‌ها پرداخته و سپس ارکان کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی شرح داده شده است.

۵.۱. مبانی سیستم‌های استنتاج فازی

از جمله شیوه‌های نوین در علم کنترل، استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی است. تئوری مجموعه‌های فازی نخستین بار توسط زاده (۱۹۶۵)^[۱۷] مطرح شده و تکامل آن، شکل‌گیری منطق فازی و سیستم‌های استنتاج فازی را به دنبال داشته است. یک سیستم استنتاج فازی از چهار جزء: فازی ساز، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی ساز تشکیل شده است (شکل ۴).^[۱۸] که در آن، نخست درجه شمول ورودی‌های مختلف در مجموعه‌های فازی تعریف شده از طریق تابع عضویت مشخص می‌شود. در گام بعد، با بهره‌گیری از قواعد «اگر- آنگاه»^۹ فازی تعیین شده



شکل ۴. سیستم استنتاج فازی.^[۱۸]

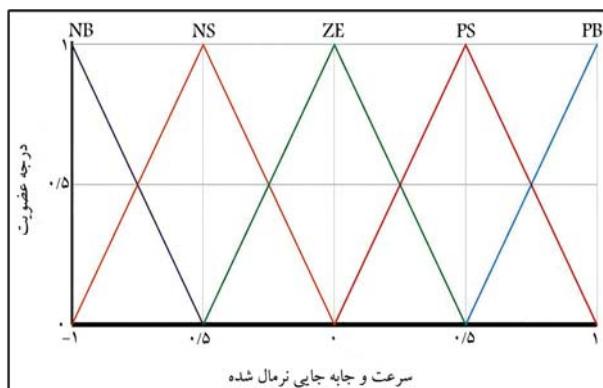
کنترل کننده های فازی خودتنظیم، از جمله انواع کنترل کننده های انطباق پذیر هستند، که از یک کنترل کننده ای اصلی FIS_4 فازی به همراه یک کنترل کننده فرعی FIS_1 که می تواند فازی، عصبی، یا از انواع دیگر باشد، تشکیل شده اند. در کنترل کننده های فازی خودتنظیم رایج، کنترل کننده فرعی از طریق تنظیم ضرایب مقیاس برای متغیرهای فازی خودتنظیم خروجی کنترل کننده ای اصلی (ویا هردو) قابلیت انطباق پذیر بودن را مهیا می سازد.^[۲۹] مطالعات انجام شده در حوزه کنترل کننده های فازی خودتنظیم حاکی از توانمندی آن ها در کاهش پاسخ های لرزه بی سازه ها و نیز مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت در مشخصات سازه ها و در شرایط مختلف لرزه بی است.^[۳۰-۳۱]

سیستم های استنتاج فازی است. چنانچه ضریب مقیاس بیشینه برای خروجی سیستم استنتاج فازی مشابه با وضع موجود انتخاب و ضرایب مقیاس خروجی سایر سیستم های استنتاج کمینه شود. دستیابی به پاسخ بهینه و حرکت صحیح مکانیزم تطبیق درجهت افزایش کارآمدی کنترل کننده تضمین می شود. لازم به ذکر است در هر لحظه، به نسبت شباهت شرایط موجود به شرایط بهینه سازی هر یک از سیستم های استنتاج کنترل کننده ای اصلی، ضرایب مقیاس خروجی سیستم های استنتاج متغیر خواهد بود. در ادامه، ساختار کنترل کننده های اصلی و فرعی تشکیل دهنده الگوریتم کنترل پیشنهادی معرفی شده است:

۱. کنترل کننده ای اصلی: این کنترل کننده، از FIS_4 سیستم استنتاج فازی سوگنو با نام های FIS_4 تا FIS_1 تشکیل شده است که ورودی سیستم های فازی سوگنو سرعت و جایه جایی نرمال شده در بازه $[1, -1]$ است (که از تقسیم خروجی حسگرها بر بیشینه ای مقدار ولتاژ دائمی خروجی حسگر، یعنی 10 ولت، به دست می آید) که از حسگرها نصب شده در محل بین عرضه و کوله پل به دست می آید. در شکل 6 ، توابع عضویت مرتبط با فضای ورودی FIS ها مشاهده می شود که براساس توزیع یکنواخت بین 5 تابع عضویت مثبتی انتخاب شده اند. با توجه به استفاده از مدل سوگنو خروجی هر یک از FIS ها به صورت یک عدد ثابت در بازه $[1, -1]$ است که به عنوان ولتاژ نرمال شده استفاده می شود و از ضرب آن در بیشینه ای ولتاژ قابل اعمال (10 ولت)، ولتاژ کنترلی میراگر MR به دست می آید.

پایگاه قواعد سیستم های استنتاج مذکور در جدول 3 ارائه شده است؛ که مطابق آن، مقادیر 1 تا 25 پارامترهای ثابت بخشن خروجی هستند که با استفاده از الگوریتم زنیک تنظیم می شوند. به منظور افزایش کارآمدی در شرایط مختلف لرزه بی، هر یک از FIS ها برای شرایط خاصی از زمین لرزه بهینه شده اند.

بر این اساس، FIS_1 تا FIS_4 به ترتیب برای زلزله های نورث بالم اسپرینگر با



شکل ۶. توابع عضویت فازی ورودی در سیستم های استنتاج فازی 1 تا 4 .

جدول ۳. پایگاه قواعد سیستم های استنتاج فازی FIS .

جایه جایی نرمال شده					
PB	PS	ZE	NS	NB	
r ₅	r ₄	r ₃	r ₂	r ₁	N
r ₁₀	r ₉	r ₈	r ₇	r ₆	NS
r ₁₅	r ₁₄	r ₁₃	r ₁₂	r ₁₁	Z
r ₂₀	r ₁₉	r ₁₈	r ₁₇	r ₁₆	PS
r ₂₅	r ₂₄	r ₂₃	r ₂₂	r ₂₁	PB

۳.۵. طراحی کنترل کننده های فازی خودتنظیم پیشنهادی

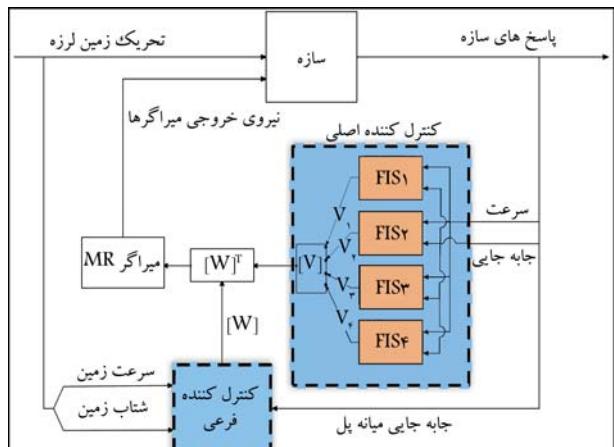
با توجه به مزایای ذکر شده برای سیستم های فازی و نیز الگوریتم های انطباق پذیر خودتنظیم، در پژوهش حاضر به عنوان الگوریتم کنترل سیستم پیشنهادی از کنترل کننده های فازی خودتنظیم (STFC) استفاده شده است. اگرچه در برخی پژوهش های صورت گرفته در زمینه کنترل لرزه بی سازه ها با استفاده از کنترل کننده های فازی خودتنظیم، تلاش شده است که تنظیم ضرایب مقیاس متغیرهای ورودی و خروجی کنترل کننده های اصلی با استفاده از مشخصات تحریک اعمالی به سازه زمین پذیرد.^[۳۲-۳۴] اما راهکاری قاعده مند که تضمین کننده های عملکرد مکانیزم تطبیق (با استفاده از تنظیم ضرایب مقیاس) در جهت افزایش کارآمدی کنترل کننده باشد، ارائه نشده است.

به جهت رفع نقطه ضعف ذکر شده، در طراحی کنترل کننده های فازی خودتنظیم پیشنهادی در پژوهش حاضر که ساختار کلی آن به صورت دیاگرام بلوکی در شکل 5 مشاهده می شود، دو ویژگی مضاعف در نظر گرفته شده است:

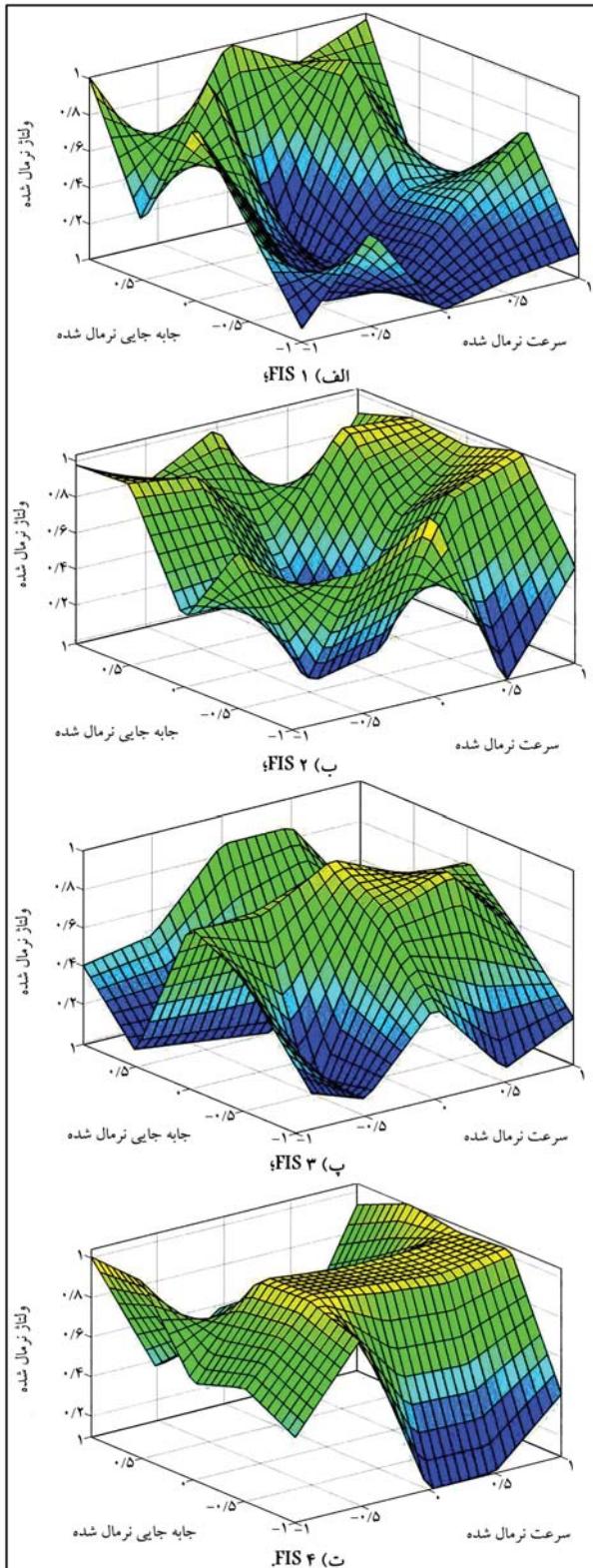
۱. در بخشن کنترل کننده ای اصلی، از FIS_4 سیستم استنتاج فازی مجرأ استفاده شده است که هر یک برای شرایط لرزه بی و سازه بی متفاوتی توسط الگوریتم زنیک بهینه شده اند.

۲. در کنترل کننده های فرعی فازی، برای انجام فرایند تنظیم ضرایب مقیاس، علاوه بر استفاده از پارامترهای مرتبط با تحریک لرزه بی (که در کنترل کننده های فازی خودتنظیم لرزه بی پژوهش های پیشین معمول بوده است)، شرایط رفتاری سازه نیز در تصمیم گیری دخیل می شود.

به کمک پارامترهای استفاده شده در کنترل کننده های فرعی تعیین می شود که شرایط سازه و تحریک اعمالی به آن در هر لحظه، مشابه کدامیک از حالت های بهینه سازی



شکل ۵. نمودار بلوکی کنترل کننده های فازی خودتنظیم پیشنهادی.



شکل ۷. خروجی سیستم استنتاج فازی.

به منظور متمایز کردن نوع تحریک لرزه‌یی و اخذ تصمیم صحیح در کنترل کننده‌ی فرعی، با استفاده از دو شتاب‌سنج، شتاب زمین در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود و با انتگرال‌گیری، سرعت زمین در این دو جهت نیز به دست

ضریب شدت ۵/۵، نورث پالم اسپرینگز با ضریب شدت ۱/۵، نورث‌ریج با ضریب شدت ۵/۵ و نورث‌ریج با ضریب شدت ۱/۵ بهینه شده‌اند. همچنین با توجه به اینکه هدف در استفاده از کنترل کننده‌ی پیشنهادی، کاهش پاسخ‌های مرتبط با خسارت است، تابع هدف در استفاده از الگوریتم رتیک، باید از معیارهای سنجش مرتبط با خسارت در سازه‌ی پل بزرگراه محک تشکیل شود. یکی از پاسخ‌های سازه‌ی پل، که با خسارت حین زلزله مرتبط است، جابه‌جایی‌های رخداده در میانه‌ی پل است. براین اساس از دو معیار بیشینه‌ی جابه‌جایی میانه‌ی پل (J_۱) و نرم جابه‌جایی میانه‌ی پل (J_{۱۱}) در تابع هدف استفاده شده است. همچنین انتخاب ناشی از لنگر خمی رخ داده در ستون‌های میانی پل نیز از جمله پاسخ‌های سازه‌ی می‌مرتبط با خسارت است که با استفاده از وارد کردن دو معیار بیشینه‌ی شکل‌پذیری رخداده (J_۲) و نرم شکل‌پذیری (J_{۱۲}) در تابع هدف لحاظ شده است. بیشینه‌ی شتاب میانه‌ی پل (معیار J_۴) نیز به جهت احتمال تأثیر در خسارت ادوات غیرسازه‌ی در تابع هدف استفاده می‌شود. با توجه به آنچه بیان شد، تابع هدف طبق رابطه‌ی ۶ تعیین شده است:

$$CF = \sqrt{۰/۲۵(J_۳^۳ + J_۴^۳ + J_۴^۴) + ۰/۱۲۵(J_{۱۱}^۳ + J_{۱۲}^۳)} \quad (6)$$

که در آن، CF مقدار تابع هدف و J_۲، J_۴، J_{۱۱} و J_{۱۲} معیارهای سنجش سازه‌ی پل هستند که پیش‌تر معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است به دلیل تأثیرگذاری بیشتر بیشینه‌ی پاسخ‌ها در خسارت وارد به سازه‌ی پل در مقایسه با نرم پاسخ‌ها، ضریب وزن معیارهای مرتبط با بیشینه‌ی پاسخ‌ها در تعریف تابع هدف، دو برابر معیارهای نرم در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷، نمودار خروجی سیستم‌های استنتاج فازی ۱ تا FIS ۴ پس از بهینه‌سازی با الگوریتم رتیک مشاهده می‌شود. بر این اساس، برای هر ورودی کنترل کننده‌ی اصلی با استفاده از ۴ سیستم استنتاج فازی مختلف، عدد ۴ دستور کنترل (ولتاژ) در قالب بردار [۰^T] = [v_۱, v_۲, v_۳, v_۴] ارائه شده است.

۲. کنترل کننده‌ی فرعی: همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، به منظور دستیابی به ساختاری انطباق‌پذیر و تعیین فرمان کنترل مناسب از میان خروجی FIS‌ها، از کنترل کننده‌ی فرعی استفاده می‌شود. در واقع در کنترل کننده‌ی فرعی، هدف تشخیص شباهت وضع سازه تحت تحریک به وضعیت‌های بهینه‌سازی صورت گرفته برای FIS‌های موجود در کنترل کننده‌ی اصلی و بر مبنای آن وزن‌دهی به ولتاژ‌های خروجی هر یک از FIS‌ها به منظور تعیین پاسخ مطلوب است. تأثیرگذاری ویژگی‌های زمین‌لرزه در عملکرد کنترل کننده‌ها به حدی است که در برخی مواقع مشاهده می‌شود که پاسخ‌هایی نظری شتاب یا جابه‌جایی در زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک و پالس‌گونه در سازه‌ی کنترل شده نسبت به کنترل نشده افزایش یافته است.^[۲۵-۲۲، ۲۳، ۲۸] به همین جهت مشخصات زلزله به عنوان پارامتر تمايزدهنده و اثرگذار در کنترل کننده‌ی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. از جمله مواردی که رفتار لرزه‌یی سازه‌ها و به دنبال آن کارایی سیستم کنترل تحت تأثیر قرار می‌دهد، ماهیت میدان دور یا میدان نزدیک زمین‌لرزه است.^[۲۴] به عنوان وجه تمايز زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک، سرعت زمین انداختن می‌شود.^[۲۵] وجود پالس‌های بزرگ شتاب و سرعت در تحریک لرزه‌یی نیز اثر قابل توجهی در رفتار سازه و عملکرد سیستم کنترل خواهد داشت. به عنوان وجه تمايز برای مشخص کردن پالس‌های ذکر شده و کلاً زلزله‌های پالس‌گونه می‌توان از نسبت بیشینه‌ی سرعت زمین به بیشینه‌ی شتاب زمین (PGV/PGA) استفاده کرد.^[۲۶]

به عنوان «اندک» و مشابه تحریکات میدان دور فرض شده است. برای بیشینه‌ی جابه‌جایی میانه‌ی پل (mD) نیز مقادیر بیش از $4/0$ m به عنوان «زیاد» و نشان‌دهنده‌ی شرایط آستانه‌ی خسارت سازه و مقادیر کمتر از $2/0$ m/s به عنوان «اندک» و بیان‌گر شرایط عادی سازه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، از آنجاکه در کنترل‌کننده‌ی فرعی تشخیص شباخت وضع سازه تحت تحریک به وضعیت‌های بهینه‌سازی FIS‌ها نجات می‌گیرد، بنابراین تعیین کران‌های توابع عضویت متغیرهای PV و PV/PA با توجه به وضعیت شتاب نگاشت زلزله‌های استفاده شده در بهینه‌سازی صورت گرفته است. همچنین کران‌های توابع عضویت دو پارامتر PV و PV/PA به گونه‌ی انتخاب شده است که بتوان با استفاده از آن‌ها تقسیم‌بندی زمین‌لزه‌های میدان‌زدیک، و پالس‌گونه‌ی بررسی شده در پژوهش کالکان و کونا^{۱۵} [۲۰۰۶] را مشابه پژوهش مذکور انجام داد. همچنین تعیین کران متغیر mD نیز با توجه به شرایط سازه‌ی پل بوده است، که در آستانه‌ی بروز خسارت و رفتار غیرخطی قرار می‌گیرد. بنابراین، کران‌های پارامترهای مذکور براساس انتخاب نویسنده‌گان پژوهش حاضر بر مبنای ارائه‌ی عملکرد مناسب فقط در پژوهش فعلی صورت گرفته است و تعیین آن در سایر سازه‌ها و پژوهش‌های مرتبط نیازمند بررسی و مطالعه جامع تر خواهد بود.

در جدول ۴، پایگاه قواعد کنترل‌کننده‌ی فازی فرعی ارائه شده است. تنظیم پایگاه قواعد نیز به گونه‌ی صورت گرفته است که چنانچه شرایط لزبی و سازه‌ی مشابه شرایط بهینه‌سازی هریک از چهار FIS بود، ضریب وزن خروجی مربوط به آن FIS برابر با ۱ باشد و ضریب وزن خروجی سایر FIS‌ها صفر شود. از عملکرد ترکیبی کنترل‌کننده‌های اصلی و فرعی، ساختار خودتنظیم به گونه‌ی به دست خواهد آمد که با تنظیم برخط خروجی کنترل‌کننده‌ی اصلی، بتواند در شرایط مختلف لزبی و رفتاری سازه، دستور مناسب کنترلی را ارائه دهد.

۶. مطالعه‌ی عددی کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم (STFC) در پل بزرگراه محک (STFC)

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی با کنترل‌کننده‌ی STFC، مدل سازی عددی سیستم کنترل نیمه‌فعال با میراگر MR و کنترل‌کننده‌ی STFC بر روی برنامه‌ی تهیه شده برای سازه‌ی پل بزرگراه محک در محیط نرم‌افزارهای متلب و سیمولینک انجام شده است، سازه‌ی پل تحت شتاب نگاشتهای ذکر شده در جدول ۱ قرار

جدول ۴. پایگاه قواعد کنترل‌کننده‌ی فازی فرعی.

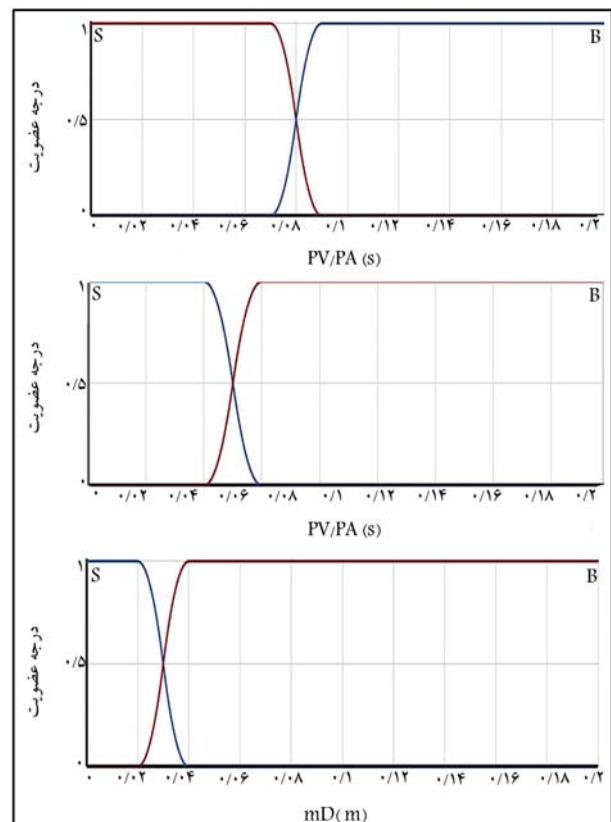
بعض خروجی (فرضی)				قاعده		
w_4	w_3	w_2	w_1	mD	PV	PV/PA
۰	۰	۰	۱	S	S	S
۰	۰	۱	۰	B	S	S
۰	۱	۰	۰	S	B	S
۰	۱	۰	۰	B	B	S
۰	۱	۰	۰	S	S	B
۱	۰	۰	۰	B	S	B
۱	۰	۰	۰	S	B	B
۱	۰	۰	۰	B	B	B

می‌آید. سپس با استفاده از جذر مجموع مربعات دو راستای متعامد، برآیند شتاب و سرعت زمین محاسبه و برای ۳ ثانیه‌ی اخیر ذخیره می‌شود و بیشینه‌ی سرعت ثبت شده‌ی زمین (PV) و نیز نسبت بیشینه‌ی سرعت به بیشینه‌ی شتاب زمین (PV/PA) در این مدت به عنوان پارامتر تکیکی کننده‌ی تحریک لرزه‌ی تعیین می‌شود. همچنین از جابه‌جایی میانه‌ی پل (mD)، به عنوان معیاری که نشان‌دهنده‌ی شرایط پاسخ‌های سازه‌ی است در کنترل‌کننده‌ی فرعی استفاده می‌شود. درنهایت از یک سیستم استنتاج فازی سوگو با ۳ ورودی (PV/PA و mD) و ۴ خروجی که شامل ضرایب وزن هر یک از FIS‌ها است (با مقداری بین $0/0$ و $1/0$) استفاده می‌شود. بنابراین خروجی کنترل‌کننده‌ی فرعی در $[w]^T = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ (برداری از ضرایب مقیاس) خواهد بود که برای تنظیم دستور مطلوب از کنترل‌کننده‌ی اصلی در رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود:

$$V = [w]^T [v] \quad (7)$$

که در آن، V ولتاژ نهایی خروجی کنترل‌کننده‌ی STFC، $[v]$ بردار خروجی کنترل‌کننده‌ی اصلی و $[w]$ بردار خروجی کنترل‌کننده‌ی فرعی هستند. برای هر یک از ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی فرعی، دو تابع عضویت Z و S شکل در نظر گرفته شده است که در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

در تعریف توابع عضویت ورودی، برای PV/PA ، مقدار بزرگتر از $9/0$ ثانیه به عنوان «زیاد» و مشابه زلزله‌های پالس‌گونه و مقدار کمتر از $7/0$ ثانیه به عنوان «اندک» و مشابه تحریکات زمین‌لزه‌ی غیرپالسی در نظر گرفته شده است. همچنین برای سرعت زمین حین زلزله (PV)، مقدار بیش از $0/60$ m/s به عنوان «زیاد» و مشابه زلزله‌های میدان‌زدیک و مقدار کمتر از $0/40$ m/s به عنوان «اندک» می‌شود.



شکل ۸. توابع عضویت ورودی کنترل‌کننده‌ی فازی فرعی.

کنترل پیشنهادی در کاهاش پالس های جابه جایی میانه پل است، که حاکی از قابلیت کنترل کننده STFC در کاهاش جابه جایی های سازه ای پل و خسارت های ناشی از آن است. همچنین در جدول ۵، معیارهای سنجش محاسبه شده برای سیستم کنترل پیشنهادی پژوهش حاضر در کلیه زمین لرزه های بررسی شده و میانگین هر معیار از آن شده است. مقادیر معیارهای سنجش مربوط به سیستم کنترل دیگری با میراگرهای مشابه و کنترل کننده فازی متشکل از FIS^۲ معرفی شده در بخش قبل (بهینه شده برای مشابه و کنترل کننده فازی اسپرینگر با ضریب شدت ۱/۵) نیز در جدول ۵ با عنوان GFLC درج شده است. علاوه بر این، معیارهای سنجش به دست آمده از سیستم کنترل پژوهش نینگ^{۱۶} و همکاران^{۲۰،۲۱} با میراگرهای نیمه فعال MR و کنترل کننده فازی اطباقی پذیر ترکیب شده با مود لغزش (AFSMC^{۱۷}) نیز در جدول ۵ ارائه شده است. از بررسی مقادیر معیارهای سنجش برای کنترل کننده پیشنهادی STFC و مقایسه ای آن با دو سیستم GFLC و AFSMC در زلزله های مختلف، می توان دریافت که:

۱. کنترل کننده STFC، بیشینه و نرم برش پایه پل تحت زلزله های مختلف (به جز نورث پالم اسپرینگر) را کاهاش داده است. این کاهاش در زلزله های نورث ریچ و چی - چی قابل ملاحظه است. همچنین بیشینه و نرم لنجگرهای واژگونی نیز کاهاش یافته است.

۲. بیشینه و نرم جابه جایی میانه پل توسط سیستم پیشنهادی در زلزله های مختلف کاهاش چشم گیری داشته اند (به طور میانگین به ترتیب در حدود ۴۵ و ۵۵ درصد). بیشینه و نرم تغییر شکل در جداسازه ای لرزه بی دو انتهای پل نیز تحت زلزله های مختلف به طور میانگین نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب در حدود ۶۰ و ۷۳ درصد کاهاش یافته اند.

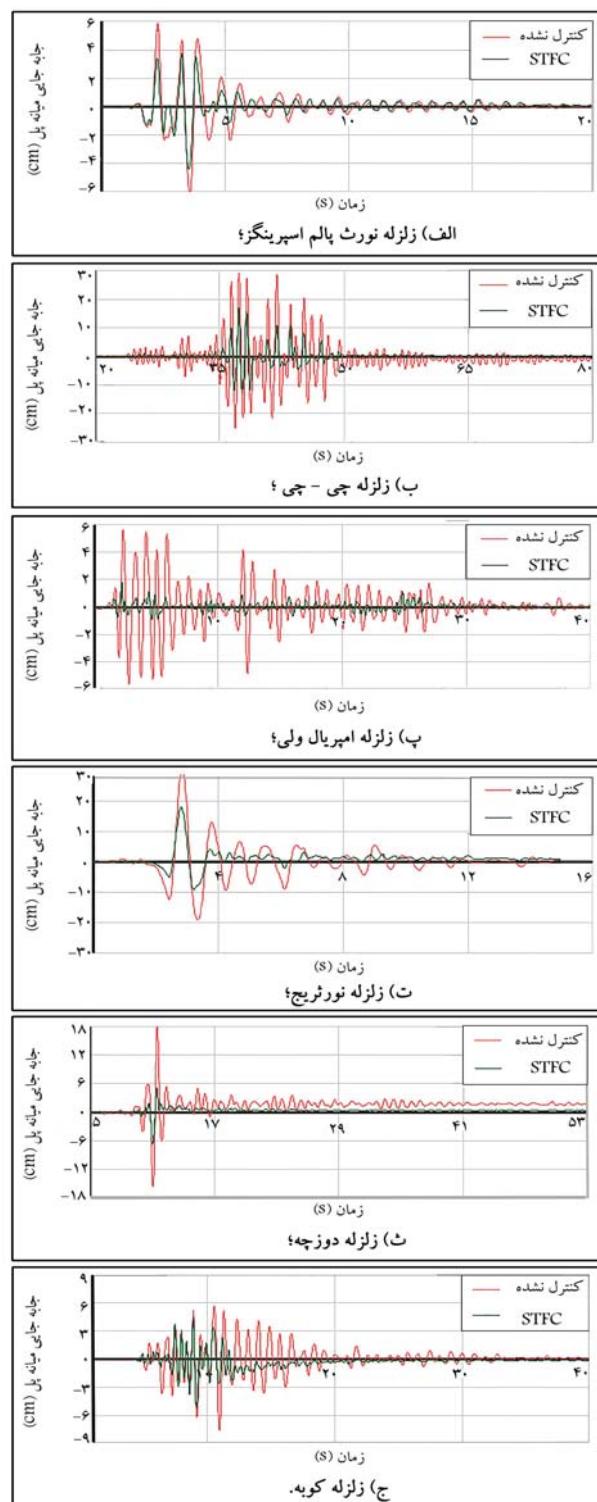
۳. به جز زمین لرزه های نورث ریچ و چی - چی، در سایر زلزله ها، کنترل کننده پیشنهادی STFC در کاهاش بیشینه شتاب موقوف نبوده است. تعدد معیارهای مرتبط با تغییر شکل (J_۲, J_{۱۱}, J_{۱۲} و J_{۱۳}) در تابع هدف بهینه سازی را می توان علت این امر دانست. البته امر اخیر در سازه ها با جداسازه ای لرزه بی دور از انتظار نیست و مشاهده می شود که کنترل کننده های GFLC و AFSMC نیز در کاهاش بیشینه ای شتاب پل وضعیت مشابه داشته و موفق نبوده اند.

۴. کاهاش بیشینه و نرم انحنای پایه های پل (معیار شکل پذیری) نیز توسط STFC به طور میانگین بیش از ۵۰٪ بوده است. حتی در زلزله دوزچه هی ترکیه، کاهاش بیشینه ای شکل پذیری به ۸۷٪ رسیده است.

۵. سیستم کنترل پیشنهادی تعداد مفاصل خمیری تشکیل شده در زلزله های چی - چی و نورث ریچ را به نصف حالت کنترل نشده و در زلزله دوزچه هی ترکیه از ۳ عدد در حالت کنترل نشده،^{۱۸} به صفر کاهاش داده است. انرژی تلف شده در سازه نیز نسبت به حالت کنترل نشده بیش از ۸۳٪ کاهاش یافته است.

۶. از مقایسه معیارهای سنجش به دست آمده از کنترل کننده STFC با کنترل کننده AFSMC، مشاهده می شود که کنترل کننده STFC در کاهاش عموم پاسخ ها در زمین لرزه های مختلف توانمندتر بوده است. به ویژه برتری مذکور در معیارهای مرتبط با خسارت (مانند: جابه جایی میانه پل، تغییر شکل در تکیه گاه ها، شکل پذیری، انرژی تلف شده در سازه، و تعداد مفاصل خمیری ایجاد شده) مشهود است.

۷. از مقایسه معیارهای سنجش به دست آمده از کنترل کننده STFC با کنترل کننده فازی GFLC نیز مشاهده می شود که اگرچه عملکرد هر دو کنترل کننده در کاهاش پاسخ ها تحت زلزله نورث پالم اسپرینگر تقریباً مشابه



شکل ۹. تاریخچه جابه جایی میانه پل.

گرفته است. درنهایت پاسخ های لرزه بی سازه با انجام آنالیز غیرخطی و معیارهای سنجش پل محاسبه شده اند. در شکل ۹، تاریخچه جابه جایی میانه دهانه پل را در زمین لرزه های مختلف برای دو حالت سازه کنترل نشده و کنترل شده با کنترل کننده STFC مشاهده می شود. بررسی و مقایسه تصاویر مذکور به خوبی نشانگر توانمندی سیستم

جدول ۵. معیارهای سنجش پل بزرگراه محک کنترل شده به وسیله‌ی میراگر MR و کنترل‌کننده‌های GFLC، STFC و AFSMC

میانگین	کوبه	دوزجه ترکیه	نورث‌تریج	امپریال ولی	جی جی	نورث پالم اسپرینگر	کنترل کننده	معیارهای ارزیابی
۰/۱۸۳۴۷	۰/۱۸۸۹۸	۰/۱۸۸۰۱	۰/۷۷۵۸	۰/۷۲۶۴	۰/۷۰۰۳	۱/۰۳۵۹	GFLC AFSMC STFC	J _۱ (بیشینه برش پایه)
۰/۱۸۳۹۵	۰/۱۸۷۱۹	۰/۱۸۹۰۰	۰/۱۸۱۱۵	۰/۷۳۲۵	۰/۷۵۶۲	۰/۹۷۴۷		
۰/۱۸۰۶۲	۰/۱۸۲۲۹	۰/۹۶۲۵	۰/۷۰۰۱	۰/۶۶۷۳	۰/۶۴۶۸	۱/۰۳۷۲		
۰/۱۸۰۸۴	۰/۱۸۳۰۷	۰/۹۷۰۸	۰/۹۵۹۰	۰/۶۵۳۳	۰/۹۵۹۱	۰/۶۷۷۲	GFLC AFSMC STFC	J _۲ (بیشینه لنگر واژگونی)
۰/۱۸۰۹۰	۰/۱۸۸۶۸	۰/۹۷۲۲	۰/۹۶۰۸	۰/۶۷۷۷	۰/۹۷۲۸	۰/۶۸۲۴		
۰/۱۸۸۳۶	۰/۱۸۰۵۸	۰/۵۶۹۷	۰/۹۳۸۶	۰/۳۶۳۹	۰/۹۵۱۵	۰/۶۷۲۰		
۰/۱۷۰۳۸	۰/۷۲۵۲	۰/۱۸۷۳۵	۰/۷۰۶۳	۰/۷۳۲۸	۰/۶۷۸۰	۰/۷۰۶۹	GFLC AFSMC STFC	J _۳ (بیشینه جایه جایی میانه‌ی پل)
۰/۱۷۲۹۳	۰/۱۸۷۵۵	۰/۱۸۷۲۷	۰/۷۴۹۵	۰/۷۵۴۰	۰/۷۹۶۶	۰/۷۲۷۵		
۰/۱۵۴۳۵	۰/۱۸۹۱۲	۰/۱۳۷۶۵	۰/۱۵۸۲۷	۰/۱۳۱۷۳	۰/۱۵۸۰۵	۰/۷۱۴۹		
۰/۱۹۸۱۶	۰/۱۹۷۶۵	۰/۱۸۹۱۱	۰/۹۳۲۴	۱/۱۰۵۹	۰/۹۷۶۱	۱/۰۰۷۴	GFLC AFSMC STFC	J _۴ (بیشینه شتاب میانه‌ی پل)
۰/۱۹۸۴۰	۱/۰۰۴۰	۰/۹۰۳۸	۰/۹۵۷۳	۰/۹۵۵۰	۱/۰۳۰۴	۱/۰۵۳۲		
۰/۱۹۶۹۹	۱/۰۳۲۲	۱/۱۹۸۴	۰/۷۶۴۳	۱/۰۲۱۴	۰/۸۲۳۰	۰/۹۸۰۰		
۰/۱۵۵۵۹	۰/۱۷۷۲۰	۰/۱۶۴۶۵	۰/۶۶۴۶	۰/۳۹۱۷	۰/۶۲۸۷	۰/۶۳۲۰	GFLC AFSMC STFC	J _۵ (بیشینه تغییر شکل در تکیه گاه)
۰/۱۵۴۶۷	۰/۱۳۰۵۴	۰/۱۶۱۸۷	۰/۷۰۰۷	۰/۴۱۷۳	۰/۷۴۱۹	۰/۴۹۴۸		
۰/۱۴۱۴۶	۰/۱۳۵۱۳	۰/۲۱۲۸	۰/۱۵۰۵	۰/۱۲۲۹	۰/۵۴۳۶	۰/۱۶۱۸		
۰/۱۵۵۳۸	۰/۱۶۳۰۷	۰/۱۲۴۴۳	۰/۱۵۹۵۴	۰/۱۵۰۳۳	۰/۱۵۲۱۸	۰/۶۷۷۲	GFLC AFSMC STFC	J _۶ (بیشینه شکل پذیری)
۰/۱۵۹۷۴	۰/۱۵۸۶۸	۰/۱۲۵۴۵	۰/۱۶۵۷۳	۰/۱۶۷۷۷	۰/۷۲۵۴	۰/۶۸۲۴		
۰/۱۴۳۰۸	۰/۱۸۰۵۸	۰/۱۲۵۵	۰/۱۳۹۳۷	۰/۱۳۶۳۹	۰/۴۲۴۲	۰/۶۷۲۰		
۰/۰۹۸۵	۰	۰/۰۱۶۱	۰/۱۳۴۸۷	۰	۰/۲۲۶۴	۰	GFLC AFSMC STFC	J _۷ (بیشینه انرژی تلف شده)
۰/۱۱۲۷۴	۰	۰/۰۲۱۳	۰/۱۴۱۸۷	۰	۰/۳۲۴۶	۰		
۰/۰۴۱۰	۰	۰	۰/۱۶۷۴	۰	۰/۰۷۸۴	۰		
۰/۱۲۹۱۷	۰	۰/۱۳۲۲۳	۰/۱۷۵	۰	۰/۶۶۶۷	۰	GFLC AFSMC STFC	J _۸ (تعداد مفصل پلاستیک)
۰/۱۳۳۳۳	۰	۰/۱۳۳۳۳	۱	۰	۰/۶۶۶۷	۰		
۰/۱۶۶۷	۰	۰	۰/۱۵	۰	۰/۱۵	۰		
۰/۱۷۴۰۷	۰/۷۲۵۶	۰/۷۴۷۵	۰/۷۳۵۱	۰/۵۸۱۸	۰/۷۶۵۱	۰/۸۸۹۲	GFLC AFSMC STFC	J _۹ (نرم برش پایه)
۰/۱۷۴۵۸	۰/۱۱۴۳	۰/۷۵۸۶	۰/۷۵۷۱	۰/۵۳۷۷	۰/۷۷۷۲	۰/۹۲۹۹		
۰/۱۸۸۴۸	۰/۱۷۳۵۵	۰/۱۸۵۸۹	۰/۱۵۸۶۵	۰/۱۵۵۶۹	۰/۱۰۹۵	۰/۸۶۱۲		
۰/۱۶۱۳۷	۰/۱۶۷۷۹	۰/۱۴۱۱۸	۰/۷۴۰۳	۰/۱۵۳۲۳	۰/۷۴۸۹	۰/۶۲۱۳	GFLC AFSMC STFC	J _{۱۰} (نرم لنگر واژگونی)
۰/۱۶۱۰۴	۰/۱۶۰۰۸	۰/۱۴۲۰۶	۰/۷۸۱۱۷	۰/۴۹۵۰	۰/۷۴۳۱	۰/۶۲۱۴		
۰/۱۴۶۰۸	۰/۱۵۳۴۴	۰/۱۲۲۸۲	۰/۱۶۳۶۹	۰/۲۸۱۴	۰/۴۶۸۱	۰/۶۰۵۶		
۰/۱۶۰۷۷	۰/۱۶۶۱۴	۰/۱۴۹۲۸	۰/۱۶۵۸۵	۰/۱۵۵۵۴	۰/۱۶۲۲۵	۰/۶۵۵۶	GFLC AFSMC STFC	J _{۱۱} (نرم جایه جایی میانه‌ی پل)
۰/۱۶۰۷۷	۰/۱۶۳۱۲	۰/۱۴۹۷۸	۰/۱۶۸۹۷	۰/۱۵۱۴۷	۰/۶۶۱۵	۰/۶۵۱۴		
۰/۱۴۳۳۹	۰/۱۵۷۱۱	۰/۱۲۹۱۶	۰/۱۵۱۲۰	۰/۱۱۹۳۶	۰/۱۳۹۰۵	۰/۶۴۴۸		
۰/۱۸۴۲۲	۰/۱۹۵۳۷	۰/۱۹۲۴۴	۰/۱۷۹۷۲	۰/۷۴۱۰	۰/۷۹۲۱	۰/۱۸۴۴۵	GFLC AFSMC STFC	J _{۱۲} (نرم شتاب میانه‌ی پل)
۰/۱۸۷۴۴	۰/۱۹۷۰۰	۰/۱۹۴۸۶	۰/۱۶۴۰	۰/۱۶۹۸۹	۰/۱۸۵۵۷	۰/۹۰۹۰		
۰/۱۹۰۱۳	۱/۰۳۶۲	۱/۲۱۴۴	۰/۱۷۹۷۰	۰/۱۸۵۱۵	۰/۱۶۵۱۸	۰/۱۸۵۶۹		
۰/۱۴۰۵۲	۰/۱۲۴۶۳	۰/۱۲۲۹۶	۰/۱۶۳۰۳	۰/۱۳۴۶۸	۰/۱۸۸۹۶	۰/۲۸۸۶	GFLC AFSMC STFC	J _{۱۳} (نرم تغییر شکل در تکیه گاه)
۰/۱۴۱۵۵	۰/۱۲۲۴۵	۰/۱۲۲۷۰	۰/۱۶۵۱۴	۰/۱۳۲۱۱	۰/۱۶۰۰۷	۰/۱۳۳۸۰		
۰/۱۲۷۵۷	۰/۱۲۲۳۹	۰/۱۲۰۴۵	۰/۱۴۷۲۸	۰/۱۱۰۴	۰/۱۳۵۶۱	۰/۲۸۶۴		
۰/۱۵۱۶۷	۰/۱۶۲۷۹	۰/۱۰۶۱۵	۰/۱۸۷۹۰	۰/۱۵۳۲۳	۰/۳۷۸۲	۰/۶۲۱۳	GFLC AFSMC STFC	J _{۱۴} (نرم شکل پذیری)
۰/۱۴۶۸۲	۰/۱۸۰۰۸	۰/۱۰۷۳۱	۰/۱۵۷۴۰	۰/۱۴۹۵۰	۰/۱۴۴۵۰	۰/۶۲۱۴		
۰/۱۴۲۱۴	۰/۱۵۳۴۴	۰/۱۰۲۲۹	۰/۱۸۲۴۰	۰/۲۸۱۴	۰/۲۶۰۱	۰/۶۰۵۶		

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پس از اشاره به مزایای سیستم‌های استنتاج فازی و نیز الگوریتم‌های کنترل انتقالی پذیر، کنترل‌کننده‌ی فازی خودتقطیم بهینه شده به عنوان الگوریتم کنترل انتقالی پذیر برای کنترل لرزه‌ی پیشنهاد شده است. به منظور سنجش کارایی الگوریتم

است، اما کنترل‌کننده‌ی STFC در کاهش عموم پاسخ‌ها و به ویژه معیارهای مرتبط با خسارت، در دیگر زمین‌لرزه‌ها (اعم از زمین‌لرزه‌های میدان‌نزدیک، نظری نورث‌تریج و میدان‌دور، نظری کوبه) کارآمد تر بوده است. لذا می‌توان نتیجه‌گرفت که فرایند تطبیق در کنترل‌کننده‌ی STFC به خوبی عملکرد کنترل‌کننده را در جهت کاهش پاسخ‌ها و رسیدن به هدف (کاهش خسارت) پیش می‌برد.

ادامه‌ی جدول ۵

میانگین	کوبه	دوزجه ترکیه	نورث‌ریج	امبریال ولی	چی چی	نورث پالم اسپرینگز	کنترل کننده	معیارهای ارزیابی
۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۲۱	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۵۱	۰/۰۱۰۶	۰/۰۲۵۳	۰/۰۱۳۷	GFLC AFMSC STFC	J _{۱۵} (بیشینه نیروی کنترل)
۰/۰۱۶۹	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۸۸	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۹۲	۰/۰۲۴۱	۰/۰۱۲۸		
۰/۰۲۳۴	۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۴۹	۰/۰۲۳۰	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۰۴		
۰/۰۵۳۰۶	۰/۰۳۶۶۸	۰/۰۶۴۰۹	۰/۰۶۰۵۴	۰/۰۳۶۰۲	۰/۰۶۰۲۰	۰/۰۶۰۸۴	GFLC AFMSC STFC	J _{۱۶} (بیشینه حرکت دستگاه کنترل)
۰/۰۵۲۰۸	۰/۰۳۱۱۱	۰/۰۶۱۱۴	۰/۰۶۳۸۲	۰/۰۳۸۳۸	۰/۰۷۱۰۴	۰/۰۴۷۹۷		
۰/۰۳۹۶۰	۰/۰۳۴۶۳	۰/۰۳۱۰۰	۰/۰۴۹۲۳	۰/۰۱۱۳۰	۰/۰۵۲۰۵	۰/۰۵۹۳۷		
-	-	-	-	-	-	-	GFLC AFMSC STFC	J _{۱۷} (بیشینه توان مورد نیاز)
-	-	-	-	-	-	-	GFLC AFMSC STFC	J _{۱۸} (انرژی توان مورد نیاز)
۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	GFLC AFMSC STFC	J _{۱۹} (تعداد دستگاه‌های کنترل)
۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶		
۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶		
۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	GFLC AFMSC STFC	J _{۲۰} (تعداد حسگرها)
۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸		
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲		
-	-	-	-	-	-	-	GFLC AFMSC STFC	J _{۲۱} (بعد منع محاسباتی)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-

AFSMC، توانمندی‌های الگوریتم انطباق‌پذیر خودتنظیم پیشنهادی در پژوهش حاضر را بیش از پیش اثبات می‌کند.

• توانایی و کارایی بیشتر کنترل کننده‌ی فازی خودتنظیم پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده‌ی فازی GFLC در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌ی پل محک، علاوه بر اینکه بیانگر صحت عملکرد کنترل کننده‌های اصلی و فرعی در STFC است، نشان می‌دهد که فرایند تطبیق‌پذیری در کنترل کننده‌ی پیشنهادی، دستور کنترل را به درستی در شرایط مختلف در جهت کمینه‌سازی پاسخ‌های سازه، اصلاح و صادر می‌کند. باید افزود که بررسی کاهش معیارهای نرم پاسخ در کنار معیارهای بیشینه‌ی پاسخ تحت تحریک‌های مختلف، می‌تواند گواه مضاعفی بر این ادعا باشد.

• قابلیت کنترل کننده‌ی پیشنهادی (با توجه به استفاده از سیستم نیمه‌فعال) در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی پل، مقاوم بودن آن نسبت به عدم قطعیت در تحریک زمین لرزه است. مضاف براینکه برتری کنترل کننده‌ی پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده‌ی انطباق‌پذیر

پیشنهادی، کنترل کننده‌ی موردنظر به همراه میراگرها نیمه‌فعال MR برای کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه محک استفاده شده است. از بررسی نتایج و محاسبه‌ی معیارهای سنجش مرتبط به سازه‌ی پل محک، می‌توان دریافت که:

• با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی معیارهای مرتبط با خسارت (نظریه جابه‌جایی میانه‌ی پل، تغییرشکل جداسازها، شکل‌پذیری، انرژی تلف شده، و تعداد مفاصل خمیری تشکیل شده در سازه)، می‌توان سیستم پیشنهادی را در دستیابی به هدف طراحی شده برای آن که کاهش خسارت سازه‌ی پل بزرگراه محک است، توانمند ارزیابی کرد.

• کارآمدی چشمگیر کنترل کننده‌ی فازی خودتنظیم پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی در انواع زمین لرزه‌ها، بیانگر عملکرد مطلوب سیستم انطباق‌پذیر الگوریتم ذکر شده و مقاوم بودن آن نسبت به عدم قطعیت در تحریک زمین لرزه است.

5. Agrawal
6. Orange
7. ABAQUS
8. SIMULINK
9. if-then
10. clipped-optimal algorithm
11. adaptive controller

پانوشت‌ها

1. Matlab
2. Northridge
3. Kobe
4. Chi-Chi

12. self-tuning
13. primary controller
14. secondary controller
15. Kalkan & Kunnath
16. Ning
17. adaptive fuzzy sliding mode controller

منابع (References)

1. Bathaei, A. and Zahrai, S.M. "Improving semi-active vibration control of an 11-story structure with non-linear behavior and floating fuzzy logic algorithm", *Structures*, **39**, pp. 132-146, (2022).
2. Bozorgvar, M. and Zahrai, S.M. "Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm", *Journal of Vibration and Control*, **25**(2), pp. 273-285 (2019).
3. Gkatzogias, K.I. and Kappos, A. "Semi-Active control systems in bridge engineering: A review of the current state of practice", *Structural Engineering International*, **26**(4), pp. 290-300 (2016).
4. Ou, J. and Li, H. "Design approaches for active, semi-active and passive control systems based on analysis of characteristics of active control force", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **8**(4), pp. 493-506 (2009).
5. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J. and Deoskar, H.S. "Benchmark problems in structural control-part I: Active mass driver system", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(11), pp. 1127-1139 (1998).
6. Ohtori, Y., Christenson, R.E., Spencer Jr., B.F. and et al. "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 366-385 (2004).
7. Yang, J.N., Agrawal, A.K., Samali, B. and et al. "Benchmark problem for response control of wind excited tall buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 437-446 (2004).
8. Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G. and et al. "Phase I benchmark control system for seismic response of cable-stayed bridges", *Journal of Structural Engineering*, **129**(7), pp. 857-872 (2003).
9. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Gavin, H. and et al. "Smart base-isolated benchmark building. Part I: Problem definition", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 573-588 (2006).
10. Agrawal, A.K., Tan, P., Nagarajaiah, S. and et al. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge-Part I: Problem definition", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(5), pp. 509-529 (2009).
11. Tan, P. and Agrawal, A.K. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge-Part II: Phase I sample control designs", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(5), pp. 530-548 (2009).
12. Bhowmik, K. and Saha, P. "Seismic response control of benchmark highway bridge using passive hybrid control systems", *International Journal of Materials and Structural Integrity*, **11**(4), pp. 155-174 (2017).
13. Hosseini, R., Rashidi, M., Bulajić, B. and et al. "Multi-Objective optimization of three different SMA-LRBs for seismic protection of a benchmark highway bridge against real and synthetic ground motions", *Applied Sciences*, **10**(12), pp. 4076-4101 (2020).
14. Soto, M.G. and Adeli, H. "Semi-active vibration control of smart isolated highway bridge structures using replicator dynamics", *Engineering Structures*, **186**, pp. 536-552 (2019).
15. Takin, K., Doroudi, R. and Doroudi, S. "Vibration control of structure by optimizing the placement of semi-active dampers and fuzzy logic controllers", *Australian Journal of Structural Engineering*, **22**(3), pp. 222-235 (2021).
16. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and et al. "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, **127**(11), pp. 1152-1164 (2001).
17. Zadeh, L.A. "Fuzzy Set", *Journal of Information and Control*, **8**, pp. 338-353 (1965).
18. Mendel, J.M., John, R.I. and Liu, F. "Interval type-2 fuzzy logic systems made simple", *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, **14**(6), pp. 808-821 (2006).
19. Kia, S.M. "Soft computing in MATLAB", Tehran: Rayane Sabz, 5th Ed., (in Persian) (2018).
20. Baghban, A., Karamodin, A. and Kazemi, H.H. "The effect of fuzzy controller on damage of steel structure considering structural uncertainties", *Journal of Scientia Iranica C*, **23**(6), pp. 2441-2450 (2016).
21. Bozorgvar, M. and Zahrai, S.M. "Semi-active seismic control of a 9-story benchmark building using adaptive neural-fuzzy inference system and fuzzy cooperative co-evolution", *Smart Structures and Systems*, **23**(1), pp. 1-14 (2019).
22. Datta, T.K. and Madan, A. "Semi-active fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(1), pp. 99-118 (2012).
23. Bathaei, A., Zahrai, S.M. and Ramezani, M. "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and -2 fuzzy algorithms", *Journal of Vibration and Control*, **24**(13), pp. 2938-2953 (2017).
24. Lakhani, M.T. and Soni, D.P. "Comparative study of smart base-isolation using fuzzy control and neural network", *Procedia Engineering*, **173**, pp. 1825-1832 (2017).
25. Reigles, D.G. and Symans, M.D. "Supervisory fuzzy control of a base isolated benchmark building utilizing a neuro-fuzzy model of controllable fluid viscous dampers", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 724-747 (2006).
26. Azadvar, M., Hajkazemi, H. and Karamodin, A. "A Study on the optimization of the performance of type 1 fuzzy controller based on the IDA method", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **43**, pp. 807-819 (2019).

27. Ali, S.F. and Ramaswamy, A. "GA-optimized FLC-driven semi-active control for phase-II smart nonlinear base-isolated benchmark building", *Journal of Structural Control & Health Monitoring*, **15**(5), pp. 797-820 (2008).
28. Karamodin, A., Irani, F. and Baghban, A. "Effectiveness of a fuzzy controller on the damage index of nonlinear benchmark buildings", *Journal of Scientia Iranica A*, **19**(1), pp. 1-10 (2012).
29. Bathaei, A., Ramezani, M. and Zahrai S.M. "Comparing fuzzy type-1 and -2 in semi-active control with TMD considering uncertainties", *Smart Structures and Systems*, **23**(2), pp. 155-171 (2019).
30. Venazi, I. "A review on adaptive methods for structural control", *The Open Civil Engineering Journal*, **10**(1), pp. 653-667 (2016).
31. Ozbulut, O.E., Bitaraf, M. and Hurlebaus, S. "Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers", *Journal of Engineering Structures*, **33**(12), pp. 3143-3154 (2011).
32. Soares, R.W., Barroso, L.R. and Al-Fahdawi, O.A. "Simple adaptive control to attenuate bridge's seismic responses considering parametric variations", *Advances in Structural Engineering*, **23**(1), pp. 1-14 (2019).
33. Bitaraf, M. and Hurlebaus, S. "Semi-active adaptive control of seismically excited 20-story nonlinear building", *Journal of Engineering Structures*, **56**(11), pp. 2107-2118 (2013).
34. Hosseini, A., Taghikhany, T. and Yeganeh Fallah, A. "Direct adaptive algorithm for seismic control of damaged structures with faulty sensors", *Journal of Vibration and Control*, **24**(24), pp. 5854-5866 (2018).
35. Hosseini, A., Taghikhany, T. and Jahangiri, M. "Optimal tuned direct adaptive controller for seismic protecting of structures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **32**(18-19), pp. 2139-2152 (2021).
36. Rahmani, B., Ziaiefar, A. and Hashemi, Sh. "Output feedback-based adaptive fuzzy sliding mode control for seismic response reduction of base-isolated buildings", *ISA Transactions*, **126**, pp. 94-108 (2022).
37. Ning, X.L., Tan, P., Huang, D.Y. and Zhou, F.L. "Application of adaptive fuzzy sliding mode control to a seismically excited highway bridge", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(6), pp. 639-656 (2009).
38. Zhu, H., Chen, Z., Wang, J. and et al. "Fuzzy adaptive compensation control for uncertain building structural systems by sliding-mode technology", *Complexity*, **2018**, pp. 1-6 (2018).
39. Mosè, G. and Bartolomeo, C. "Adaptive type-2 fuzzy control of non-linear systems", *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, pp. 705-709 (2009).
40. Zamani, A.A., Tavakoli, S. and Etedali, S. "Control of piezoelectric friction dampers in smart base-isolated structures using self-tuning and adaptive fuzzy proportional-derivative controllers", *Journal of Fuzzy Sets and Systems*, **28**(10), pp. 1-16 (2016).
41. Saeed, M.U., Sun, Z. and Elias, S. "Semi-active vibration control of building structure by self tuned brain emotional learning based intelligent controller", *Journal of Building Engineering*, **46**(2), pp. 1-24 (2022).
42. Hosseini, A. and Taghikhany, T. "Online self-tuning mechanism for direct adaptive control of tall building", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **32**(3), pp. 424-446 (2018).
43. Guclu, R. and Yazici, H. "Self-tuning fuzzy logic control of a non-linear structural system with ATMD against earthquake", *Journal of Nonlinear Dynamic*, **56**, pp. 199-211 (2009).
44. Zhao, D. and Li, Y. "Fuzzy control for seismic protection of semiactive base-isolated structures subjected to near-Fault earthquakes", *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, **1**, pp. 1-17 (2015).
45. Zhao, D., Liu, Y. and Li, H. "Self-tuning fuzzy control for Seismic protection of smart base-isolated buildings subjected to pulse-type near-Fault earthquakes", *Journal of Applied Sciences*, **7**(2), pp. 185-206 (2017).
46. Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S. "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(9), pp. 1023-1049 (2004).
47. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).

تبیین اثر زیرساخت‌های مدیریت دانش از طریق فرایندهای مدیریت دانش در عملکرد تیم‌های موقت در پروژه

سمیرا دهقانی (کارشناس ارشد)

هانی اربابی^{*} (استادیار)

محمدحسین صبحیه (دانشیار)

گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده هنر، دانشگاه تربیت مدرس

امروزه با وجود افزایش رقابت جهانی در بازار، شیع شکل‌های موقت همکاری و کار پروژه محور در حال افزایش است. به همین ترتیب میران دانش مورد استفاده در کارها در حال رشد است. با این حال، ماهیت موقت پروژه‌ها از انتقال دانش بین پروژه‌ها پشتیبانی نمی‌کند. برخی پژوهشگران اذعان دارند که مدیریت دانش، یکی از راه‌های موفقیت‌آمیز بهبود عملکرد تیم است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل رابطه بین زیرساخت‌های مدیریت دانش، فرایندهای مدیریت دانش و عملکرد تیم پژوهش، که ماهیت موقت دارد، انجام شده است. راهبرد استفاده شده در پژوهش حاضر، پیمایش و واحد تحلیل، تیم‌های پروژه‌ها بوده است. جمع‌آوری داده‌ها از طریق ارسال نسخه‌ی تحت وب صورت گرفته است. تعداد ۸۶ پرسشنامه جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها با استفاده از تحلیل مسیر از طریق معادلات ساختاری انجام شده است. نتایج نشان داد که فرهنگ همکاری، اعتماد، حمایت مدیریت ارشد، انگیزش و پشتیبانی فناوری اطلاعات، که از مؤلفه‌های زیرساخت‌های مدیریت دانش هستند، در فرایندهای مدیریت دانش تأثیر دارند و فرایندهای مدیریت دانش نیز در مؤلفه‌های عملکرد تیم پژوهش، یعنی: اثربخشی، نوآوری و کارایی تأثیر مثبت دارند.

samira.dehghani@modares.ac.ir
arbabi@modares.ac.ir
sobhiyah@modares.ac.ir

وازگان کلیدی: عملکرد، تیم پژوهش، مدیریت دانش، زیرساخت‌های مدیریت
دانش، فرایندهای مدیریت دانش.

۱. مقدمه

همان زمان، اشتغال موقت به شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا در هزینه‌ها صرفه‌جویی کنند و از پایگاه دانش گسترشده‌ی کارکنان موقت بهره ببرند. در نتیجه، اشتغال موقت به طور مداوم در محبوبیت رشد کرده است.

به رغم مزایا و نتایج مثبت حاصل از به کارگیری کار تیمی موقت، بی‌توجهی به عوامل و مؤلفه‌های ایجاد تیم، موجب بروز مشکلات و مسائل عدیده‌ی می‌شود که نه فقط افزایش عملکرد را به همراه نخواهد داشت، بلکه در مواردی به شکست‌های اساسی نیز منجر می‌شود. بر این اساس، آسیب‌شناسی کار تیمی موقت، عوامل تشکیل‌دهنده و اثرگذار در ایجاد آن و دست‌یابی به تیم‌های کار و اثربخش بسیار ضروری است؛ به طوری که بدون شناخت عوامل مؤثر در عملکرد کار تیمی، نمی‌توان تیم‌های اثربخشی ایجاد کرد.^[۱]

دانمنه‌ی وسیع توانایی‌های موجود در یک تیم، از مزایای آن است؛ اما باید به این نکته توجه کرد که هر یک از توانایی‌های افراد به تنهایی درجهت افزایش کارایی تیم مؤثر واقع نخواهد شد. همان‌گونه که بسیاری از پژوهشگران خاطرنشان کرده‌اند، فقط حضور دانش افراد در تیم‌ها، عملکرد را بهبود نمی‌بخشد؛ چرا که اگر چنین دانشی

امروزه با وجود تغییرات سریع در فناوری اطلاعات و ارتباطات، سازمان‌ها برای انجام کارها به صورت بیویا از تیم‌های پژوهش کمک می‌گیرند؛ زیرا انتظار می‌رود کار در تیم‌ها با توجه به وجود مجموعه‌ی گسترشده‌تری از دیدگاه‌ها و امکان درهم آمیختن ایده‌ها، منجر به ایجاد دستاوردهای جدیدتر و نتایج خلاقالنه شود.^[۲] همچنین این باور وجود دارد که در تیم‌ها، دانمنه‌ی وسیع‌تری از توانایی‌ها وجود دارد و کارها با سرعت و انعطاف‌پذیری بیشتری انجام می‌شوند.^[۳] امروزه شرکت‌ها در سراسر جهان به طور فرازینده‌ی بیشتری انجام می‌شوند.^[۴] این اتفاق با کارکنان موقت در پژوهش‌ها ممکن است. برخلاف کارمندان دائم، رابطه‌ی شرکت با کارکنان موقت در سازمان‌های پژوهش محسوب شامل: توازن صریح برای استخدام طولانی‌مدت نیست. در پاسخ به بازارهای در حال تغییر، تقاضاهای نوسان و فناوری‌های در حال تحول، شرکت‌ها می‌توانند کارمندان موقت را برای مدت محدودی بدون خطر نقض قراردادهای قانونی یا روان‌شناسی استخدام کنند. در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۲/۸/۱۴۰۰، اصلاحیه ۱۰/۳/۱۰، پذیرش ۱۳/۶/۱۴۰۱

DOI:10.24200/J30.2022.59850.3071

مانند: کیفیت، بهرهوری یا قابلیت اطمینان پاسخگویی به نیاز مشتری و رسیدن به اهداف کیفیت بوده است.^[۱۱]

کارایی به توانایی تیم پروژه برای تحقق اهداف بودجه و برنامه‌ی زمانبندی و استفاده از منابع در محدودیت‌ها اشاره دارد.^[۱۲] می‌توان کارایی تیم را براساس واحد پول خرج شده یا واحد زمانی که صرف شده است، سنجید. بهرهوری تیم، معیاری کمی برای سنجش عملکرد تیم است.^[۱۳]

نواوری به پیشرفت خلاق تیم‌ها در تولید ایده‌های جدید، روش‌ها، رویکردها، اختلالات یا برنامه‌های کاربردی و درجه‌ی جدید بودن نتایج پروژه اشاره دارد.^[۱۴] نواوری، جنبه‌ی مهمی است که سازمان‌ها هنگام ایجاد راهبردهای تجاری خود برای ایجاد و حفظ مزیت رقابتی باید در نظر داشته باشند.^[۱۵] به نظر می‌رسد نواوری در تیم‌های پروژه در مقایسه با سایر تیم‌ها، معیار منحصر به فردی از عملکرد تیم است.^[۱۶]

۲. تیم‌های موقت و مدیریت دانش

از جمله عوامل اثرگذار در عملکرد تیم پروژه و متغیرهای آن، فرایندهای مدیریت دانش است. دانش به عنوان سلاح مهمی برای حفظ مزیت رقابتی شناخته می‌شود. مدیریت دانش به شناسایی و استفاده از دانش جمعی برای کمک به تیم‌ها و سازمان‌ها به رقابتی می‌پردازد. معمولاً، مدیریت دانش، شامل: فرایندهای مدیریت دانش به همراه زیساخت‌ها و یا توانمندسازهای مدیریت دانش است، که فرایندهای مدیریت دانش را پشتیبانی و تقویت می‌کنند.^[۱۷] ویژگی‌های اشتغال موقت، زمینه‌ی جالبی از تنش را فراهم می‌سازد. به نظر می‌رسد فعالیت‌های نواورانه‌ی یک شرکت از انعطاف‌پذیری کارگران موقت، سود کمتری می‌برد؛ اما دیدگاه مقابله نیز وجود دارد که اذعان دارد کارمندان موقت به شرکت‌ها اجازه می‌دهند تا از دانش بیرونی بهره ببرند و به شبیکه‌های مختلف دسترسی داشته باشند. استخدام موقت، ارتباط‌های سازمانی و روابط بین کارکنان را تضعیف می‌کند. علاوه بر این، با توجه به دوره‌ی تصدی سازمانی محدود خود، کارکنان موقت نه دارای عمق دانش هستند و نه همیشه می‌دانند چگونه اخلاق‌آموز را به اشتراک بگذارند.^[۱۸] بنابراین ضرورت پرداختن به مسئله‌ی مدیریت دانش و کارایی تیم‌های موقت در پروژه‌ها چالشی است که باید بیش از پیش به آن توجه کرد. در جدول ۱، خلاصه‌ی ادبیات در خصوص مدیریت دانش در تیم‌های موقت ارائه شده است.

۳. فرایندها و زیرساخت‌های مدیریت دانش

کوچا^۱ (۲۰۰۱)،^[۱۹] مدل فرایندهای مدیریت دانش را مبتنی بر دو بخش ارائه کرده است: بخش اول، مبتنی بر فرایندهای نظم‌دهی، یعنی آنچه را که برای پروژه شروع و کنترل فعالیت‌های مدیریت دانش باید انجام شود، توصیف کرده است. بخش دوم، فرایندهای عملیاتی آنچه را که هنگام انجام فعالیت‌های مدیریت دانش انجام می‌شود، توصیف کرده است. در حقیقت در بخش اول، زیرساخت‌های موردنیاز برای حمایت از مدیریت دانش ارائه شده است. میشرا و باسکر^۲ (۲۰۱۱)،^[۲۰] با تحلیل زمینه‌یی، چهار فرایندهای مدیریت دانش را ارائه کرده‌اند، که عبارت‌اند از: ایجاد دانش، اشتراک دانش، ارتقاء دانش و حفظ دانش. چنگ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۱] فرایندهای مدیریت دانش را در ۴ دسته طبقه‌بندی کرده‌اند: ایجاد، ذخیره‌سازی، انتقال و کاربرد. کارادشه^۳ و همکاران (۲۰۰۹)،^[۲۲] چارچوب فرایندهای مدیریت دانش را بررسی کرده‌اند، که عمدتاً بر مفاهیم مراحل توسعه، مانند: زیرساخت دانش، ترکیب دانش، فیلتر کردن دانش، مخزن دانش، اشتراک

اعمال و یا استفاده نشود، وجود آن برای موقیت پروژه، سودی نخواهد داشت.^[۲۳]

اما شواهد نشان می‌دهند تیم‌های فعال در سازمان‌های مختلف ایران، علی‌رغم پایین بودن شاخص فرهنگی فردگرایی هافستد^۱ و تجارب کارهای گروهی و قبیله‌یی در گذشته و همچنین حضور مختصه‌ان توامند، دچار ناکارآمدی فراوانی هستند. در سراسر دنیا با توجه به اهمیت حیاتی تیم‌ها و همچنین میزان موقیت کم پروژه‌ها، تیم پروژه توسط پژوهشگران سازمانی به طور گسترده مطالعه می‌شود.^[۲۴] همچنین پژوهش‌هایی در جهت بررسی تأثیر مدیریت دانش در نواوری به عنوان یکی از ابعاد عملکرد انجام شده است.^[۲۵] در گذگاری دیگر از پژوهش‌ها به بررسی تأثیر ابعاد مختلف توامندسازهای مدیریت دانش در کارایی تیم پرداخته شده است.^[۲۶] اما پژوهشی با هدف بررسی تأثیر مدیریت دانش در تیم‌های با ماهیت موقت پروژه توسط پژوهشگر یافته نشده و انجام پژوهشی با هدف شفافسازی وضعیت کوئنی عملکرد تیم‌های کاری، زیرساخت‌ها به عنوان توامندسازها و فرایندهای مدیریت دانش و در نهایت، بررسی حدود تأثیر سه مؤلفه‌ی اخیر در یکدیگر ضروری است.

در حالی که پیوندهای بین برخی عناصر زیرساخت‌های دانش و فرایندهای مدیریت دانش و بین فرایندهای مدیریت دانش و عملکرد تیم مستقل^۲ بررسی شده است، مطالعات کمی ارتباط بین سه مفهوم اخیر را بررسی کرده‌اند. لازم به ذکر است که پیوندهای پیش‌گفته عموماً در تیم‌های دائمی ابیات و به بررسی تیم‌های با ماهیت موقت، کمتر پرداخته شده است. بنابراین، هدف پژوهش حاضر عبارت از تبیین اثر متغیرهای زیرساخت‌های مدیریت دانش از طریق فرایندهای مدیریت دانش در متغیرهای عملکرد فنی تیم پروژه بوده است. در ادامه، پس از معرفی مبانی نظری و مدل مفهومی پژوهش، روش شناسی، یافته‌های پژوهش، بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و مدل مفهومی پژوهش

۲.۱. تیم و اثربخشی تیم

موقیت سازمان‌های امروزی وابسته به توانایی آنها برای پاسخگویی سریع به تغییرات در ابعاد جهانی، سرعت بادگیری آنها، میزان گسترش توانایی ارتباطات افقی در سازمان و میزان کارگروهی در آنهاست. محبوبیت تیم‌ها در قرن بیست و یکم در حال رشد است. سازمان‌ها کار خود را از طریق تیم‌های مختلف انجام می‌دهند. تیم‌ها ثابت کرده‌اند که عملکرد جمعی بیش از مجموع عملکردهای فردی است. هنگامی که گروه‌ها در تیم‌ها فعالیت می‌کنند، مزایای عمدی از قبیل: تبعیق دانش، ایده‌ها، مهارت‌ها و ابزارها و تفکر در بین اعضاء تیم را ارائه می‌دهند.^[۲۷] عملکرد ایده‌ها، مهارت‌ها و ابزارها و تفکر در بین اعضاء تیم را ارائه می‌دهند.^[۲۸] تیم را می‌توان به عنوان اجرایی یک عمل، چیزی که انجام شده یا آنچه در درون تیم اتفاق افتاده است، تلقی کرد.^[۲۹] اعضاء تیم باید مهارت‌های لازم برای حفظ تیم را داشته باشند؛ مانند اشتراک اطمینان در رابطه با به اشتراک گذاشتن اطلاعات مربوط به کار، توانایی حل و فصل اختلافات و همچنین تقویت انگیزش در بین خود.^[۳۰] برخی پژوهشگران در پژوهشی تلاش کرده‌اند تا مدلی جامع برای عملکرد تیم پروژه معرفی کنند.^[۳۱] مدل مذکور، معیارهای سنجش عملکرد را سه معیار: اثربخشی، کارایی و نواوری در نظر گرفته است.

اثربخشی گروه، تا حدودی به عنوان کمیت یا کیفیت خروجی تعریف شده است.^[۳۲] انتظارها معمولاً برای پروژه‌های مختلف و درین ذی نفعان مختلف متفاوت است؛ بنابراین معیارهای مختلفی برای ارزیابی اثربخشی در مطالعات پیشین استفاده شده است. بیشترین مواردی که استفاده شده‌اند، رسیدن به عملکرد فنی مورد نظر

جدول ۱. پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص مدیریت دانش در تیم‌های موقت.

مأخذ سال	موضوع/خلاصه
۲۰۱۸ [۱۵]	ساختن زمینه مشترک برای تیم‌های موقت در دنیای مجازی با تعامل غیررسمی.
۲۰۲۰ [۱۶]	نتایج شناخت می‌دهد که چگونه برخی مکانیسم‌های یکپارچه مانند تصمیم‌های تجمعی و تجربه رهبر تیم با ایجاد یک اثر تعلاملی، بر عملکرد موقت تیم تأثیر می‌گذاردن.
۲۰۲۲ [۱۷]	این پژوهش یادگیری در تیم‌های موقت را از طریق بررسی تأثیرات متفاوت قرار گرفتن در معرض شریک بر اساس نقش اعضا در تیم بررسی می‌کند.
۲۰۱۹ [۱۸]	ارزش اعتماد کم (سوء ظن سالم) برای پردازش اطلاعات و عملکرد تیم‌های موقت را بررسی می‌کند.

دارند، اشاره کرد. در خصوص کسب دانش از مرجع خارجی، ضرورت اعتماد به منبع، خارج از الایام است. زمان کدگذاری دانش در سیستم سازمانی، کارکنان باید از صحت و دقت سیستم سازمانی و قابلیت بازیابی آن اطمینان حاصل کشند.^[۲۸] به اشتراک گذاشتن دانش ممکن است موقعیت سلسله‌مراتبی کارکنان را به خطر اندازد، زیرا آنها می‌توانند موقعیت رقابتی خود را در سازمان از دست دهند. اما اعتماد بالا ممکن است به کاهش خطرهای از دست دادن رقابت فردی در نتیجه‌ی اشتراک دانش کمک کند.^[۲۷] در نتیجه، فرضیه‌های مورد نظر پژوهش عبارتند از:

- فرضیه‌ی اول: اعتماد بین اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

میکویوج^۸ و همکاران (۲۰۲۰)، به نقش مشارکت افراد و سیستم مدیریت دانش به منظور افزایش عملکرد سازمان‌ها^[۲۹] و همچنین پنالور^۹ و همکاران (۲۰۱۸)، به نقش ایجاد سیستم همکاری برای دست‌یابی به دانش سازمانی و دانش بین سازمانی اشاره کرده‌اند.^[۳۰] همکاری، به میزان کمکی که افراد یک گروه در کار خود به طور فعلی به یکدیگر می‌کنند، گفته می‌شود. این امر زمانی ممکن است که افراد، مایل به اشتراک‌گذاری اطلاعات و دانش باشند و مدیریت دانش مؤثر به فرهنگ همکاری نیاز دارد.^[۲۷]

• فرضیه‌ی دوم: همکاری بین اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

فرهنگ در پژوهش‌های مختلف به عنوان یکی از عوامل کلیدی موفقیت مدیریت دانش مطرح شده است. پژوهشگران، آثار فرهنگ سازمانی را در هر یک از فرایندهای مدیریت دانش به طور جداگانه بررسی کرده‌اند. آدینات و عبدالفتاح^[۳۱] (۲۰۱۹)،^[۳۰] نیاز داده‌اند که جمع‌گلایی یکی از عوامل فرهنگ سازمانی است و در ایجاد دانش تأثیر مثبت معنی داری دارد. اجمال و کوسکین^[۱۱] (۲۰۰۸)،^[۳۲] استدلال کرده‌اند که فرهنگ سازمانی می‌تواند ایجاد و انتقال دانش را در یک سازمان، محدود یا تسهیل کند. العادلیه و المطاوی^[۱۲] (۲۰۱۱)،^[۳۳] با استفاده از ۱۰ ویژگی فرهنگ سازمانی، اثر فرهنگ در توزیع دانش را بررسی کرده‌اند، که عبارت‌اند از: گشودگی به تغییر، نوآوری، اعتماد، کار تیمی، روحیه، جریان اطلاعات، مشارکت کارکنان، نظارت، خدمات مشتری و جهت‌گیری پاداش.

• فرضیه‌ی سوم: فرهنگ یادگیری بین اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

عدم تمرکز، نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی اختیارات تصمیم‌گیری است.^[۲۷] پراکندگی قدرت موجب افزایش خودانگیختگی و آزادی بیان می‌شود. تمرکز قدرت، مانع راه حل‌های خلاقانه می‌شود که می‌تواند برای ایجاد دانش بسیار مهم باشد. زانگ^{۱۳}

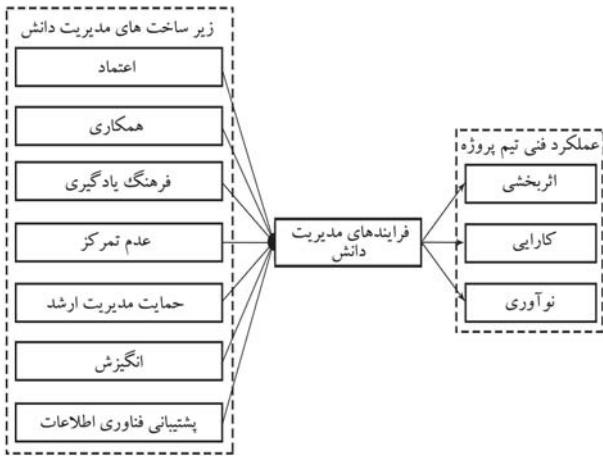
دانش، کاربرد دانش و در نهایت عملکرد دانش در فرایند مدیریت دانش تأکید داشته‌اند. ابوبکر و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۳] به فعالیت‌های بسترساز مدیریت دانش یا زیرساخت‌های مدیریت دانش، که می‌توانند ایجاد دانش، محافظت از دانش یا اشتراک‌گذاری دانش در یک سازمان را تسهیل کنند، اشاره کرده‌اند: ساختار سازمان، فرهنگ سازمان و فناوری اطلاعات.

با توجه به مرور ادبیات پیشین می‌توان به دو بخش مهم چارچوب‌های مدیریت دانش، یعنی فرایندهای مدیریت دانش و زیرساخت‌های مدیریت دانش بی برد. زیرساخت مدیریت دانش، پیش‌نیازی برای تقویت فرایندهای مدیریت دانش در یک سازمان در نظر گرفته می‌شود، که بر رویکرد پلندمدت دانش در سازمان تأکید دارد. زیرساخت مدیریت دانش به عنوان مکانیسم‌هایی برای توسعه‌ی دانش در سازمان تعریف می‌شود، که فرایند ایجاد و تولید دانش را تحریک می‌کند.^[۲۴]

عمران^۵ (۲۰۱۴)،^[۲۵] زیرساخت مدیریت دانش را به عنوان محیط سازمان تعریف کرد، که توسط آن دانش کسب، بازیابی، اعمال، محافظت و ذخیره می‌شود تا استفاده‌ی آسان شود. کوشواها و رائو^۶ (۲۰۱۵)^[۲۶] به این نتیجه رسیدند که زیرساخت مدیریت دانش، شامل دو عنصر اصلی است: زیرساخت‌های فنی و اجتماعی. آنها پیشنهاد کرده‌اند که زیرساخت فنی، شامل: زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، ابزارها و سخت‌افزار است. در حالی که زیرساخت اجتماعی، شامل: فرهنگ سازمانی، ساختار سازمانی و منابع انسانی است.

هر کدام از زیرساخت‌های اخیر به نوبه‌ی خود از زیرمولفه‌های دیگری تشکیل شده‌اند. از سوی دیگر، برخی پژوهشگران عامل مدیریت را، که پیشینه‌ی مهمی به عنوان قابلیت‌های مدیریت دانش دارد، به عوامل قبلي اضافه کرده‌اند. همکاری، از انتخاب متغیرهای مذکور، برای هر گروه، چند عامل را معرفی کرده‌اند. همکاری، اعتماد و فرهنگ یادگیری از عوامل متغیر فرهنگ بوده‌اند. برای متغیر ساختار، عدم تمرکز بر ساختار را در نظر گرفته‌اند. در مورد مدیریت، دو عوامل پشتیبانی مدیریت ارشد و تشویق و انگیزش را مهم دانسته و برای متغیر آخر، یعنی فناوری، عامل پشتیبانی فناوری اطلاعات را مهم معرفی کرده‌اند.^[۲۷] در ادامه، به تعریف عوامل اشاره شده و بررسی رابطه‌ی آنها با متغیرهای عملکرد تیم پژوهه پرداخته شده است.

بنابراین نظر برخی پژوهشگران، عامل اعتماد، رابطه‌ی تنگاتنگی با مدیریت دانش دارد. فورد^۷ (۲۰۱۱)، اثواب اعتماد را تعریف کرده و نشان داده است که چگونه هر نوع اعتماد در فرایندهای مدیریت دانش اثر می‌گذارد.^[۲۸] یکی از پرکاربردترین تعاریف اعتماد عبارت است از: «تمایل یک طرف برای آسیب‌پذیر بودن در برقراری اقدامات طرف دیگر، بر اساس این انتظار که طرف مقابل اقدام خاصی را انجام دهد که برای اعتمادکننده مهم است، صرف نظر از توانایی نظرات یا کنترل آن طرف دیگر». در خصوص رابطه‌ی اعتماد با ایجاد دانش می‌توان به اعتمادی که کارکنان در هنگام ایجاد دانش جدید بدون وجود ترس از تبیخ اشتباهات توسط سازمان



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش.

نتایج پژوهش استانستی^{۱۴} (۲۰۲۰)[۶] و ابوبکار^{۱۵} و همکارش (۲۰۱۹)[۲۳] نشان داد که بین متغیرهای مدیریت دانش و خلاصت سازمانی با کارایی کارکنان، رابطه‌ی معناداری وجود دارد. از میان ابعاد مدیریت دانش، بعد ذخیره‌ی دانش و ارمنی ابعاد خلاصت سازمانی، بعد صلاحیت منابع انسانی، بیشترین رابطه را با کارایی کارکنان داشته‌اند. پژوهش ایرانزاده (۲۰۱۵)[۱۰] نیز در بررسی رابطه‌ی مؤلفه‌های مدیریت دانش و کارایی نیروی انسانی دریافت‌های است که تمامی ابعاد مدیریت دانش در کارایی نیروی انسانی تأثیر می‌گذارند.

• فرضیه‌ی نهم: فرایندهای مدیریت دانش در کارایی تیم پژوهه، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

نوآوری در ادبیات به روش‌های مختلفی تعریف شده است. به طور کلی، نوآوری با دسته‌بندی‌های تثبیت شده‌ی مانند: نوآوری محصول، فرایند، سازمانی و بازاریابی مشخص می‌شوند، که بر حسب پیوندهایشان با نوآوری‌های تکنولوژیکی به توضیح آنها پرداخته و نظریه‌پردازی شده‌اند. با این حال، چالش‌های جهانی و تغییرات در ساختار تولید دانش منجر به نوآوری‌های متنوعی شده است.^[۱۱] مدیریت دانش فقط روی نوآوری متمرکز نیست؛ بلکه محیطی را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود نوآوری صورت گیرد. یافته‌های اده و آیبو^{۱۶} (۲۰۲۰)[۲۴] نشان می‌دهند که شیوه‌های مدیریت دانش به نوآوری شرکت، هم به صورت مستقیم و نیز غیرمستقیم کمک می‌کنند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهند که تولید، ذخیره و کاربرد دانش در نوآوری شرکت، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

• فرضیه‌ی دهم: فرایندهای مدیریت دانش در نوآوری تیم پژوهه، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

در نتیجه مدل مفهومی پژوهش مطابق شکل ۱ به دست آمده است.

۳. روش شناسی

پژوهش حاضر از روش پیمایش برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده کرده است. جامعه‌ی آماری، یتم‌های کاری پژوهه‌ی در شرکت‌های پیمانکاری رتبه یک رشته‌ی ابینه و ساختمان، راه و ترابری، صنعت و معدن، ارتباطات و نفت و گاز استان تهران بوده‌اند که افزاد شاغل در پژوهه‌ها به عنوان نماینده‌ی یتم‌ها در پرکردن پرسش‌نامه‌ها مشارکت داشته‌اند. علت انتخاب شرکت‌های پیمانکاری اخیر، اهمیت نقش کار یتمی در آنها

و همکاران (۲۰۱۰)، نشان داده‌اند وقتی ساختار سازمانی کمتر رسمی، غیرمتراکتر و یکپارچه‌تر باشد، تعامل اجتماعی مطلوب‌تر است. از سوی دیگر، ثابت شده است که تعامل اجتماعی، رابطه‌ی مثبتی با مدیریت دانش دارد.^[۲۵]

• فرضیه‌ی چهارم: عدم تمرکز ساختارهای سازمانی اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

بسیاری از پژوهشگران نیز بر اهمیت نقش حمایت مدیریت ارشد در مدیریت دانش تأکید کرده‌اند. حمایت مدیریت ارشد به چشم‌انداز و راهبردهای سازمانی بستگی دارد و به اعضاء سازمان کمک می‌کند تا میان خود را در اشتراک دانش و استفاده از دانش بیشتر کنند. بنابراین، مدیریت ارشد به شدت در فرهنگ، هنجارها و اقدام‌های راهبردی سازمان تأثیر می‌گذارد.^[۲۶]

• فرضیه‌ی پنجم: حمایت مدیریت ارشد تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

سیستم‌های تشویقی و انگیزشی، روش‌های معمولی برای تشویق در جهت تحقق اهداف سازمانی با ارائه‌ی پاداش‌های بیرونی و نیز تدبیری ضروری برای جذب مشارکت اعضاء در فعالیت‌های مؤثر مدیریت دانش هستند. سازمان‌ها ممکن است تحت فشار قرار گیرند تا انگیزه‌ی لازم را به وجود آورند، که دانش را به اشتراک گذارند و این مشوق‌ها، پایه‌ی برای حمایت از مدیریت دانش است.^[۱۷] در صورت وجود مزایای ذاتی، کارمندان دانش خود را به مخازن دانش انتقال می‌دهند؛ بنابراین، انتظارات و پاداش‌های مناسب منجر به مشارکت بیشتر در فعالیت‌های مدیریت دانش می‌شود.^[۲۵]

• فرضیه‌ی ششم: ایجاد انگیزش در جهت به اشتراک‌گذارتن دانش بین اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

بسیاری از پژوهشگران نیز اظهار داشته‌اند که فناوری اطلاعات، عامل مهمی در ایجاد و انتقال دانش است. فناوری اطلاعات از دو طریق مهم در فرایند مدیریت دانش تأثیر می‌گذارد: ۱) بانک اطلاعاتی و فناوری ذخیره‌ی اطلاعات، امکان جمع‌آوری سریع، ذخیره و تبادل دانش را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند. ۲) فناوری گردش کار و گروه‌های کاری، ادغام جریان‌های دانش جدا از هم را تسهیل می‌کند. فناوری اطلاعات با تسهیل فرایندهای مدیریت دانش، در بهبود یادگیری و عملکرد نقش دارد.^[۲۷]

• فرضیه‌ی هفتم: پشتیبانی فناوری اطلاعات بین اعضاء تیم پژوهه در فرایندهای مدیریت دانش، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

در پژوهش‌های بسیاری نیز به تأثیر فرایندهای مدیریت دانش در عملکرد تیم پژوهه اشاره شده است. مدیران به طور فزاینده، پایگاه داده‌های دانش و آموزش به اشتراک‌گذاری دانش را برای بهبود اثربخشی تیم پیاده‌سازی کرده‌اند.^[۲۸] اشتراک‌گذاری دانش، منجر به پیشرفت یادگیری سازمانی و در نهایت، غنی‌سازی اثربخشی خواهد شد.^[۲۷]

پژوهش منصوبی (۲۰۱۶)[۲۸] نشان می‌دهد مدیریت دانش با اثربخشی، رابطه‌ی معناداری دارد. به علاوه، مدیریت دانش، قابلیت پیش‌بینی اثربخشی سازمانی را دارد. در پژوهش صابری (۲۰۱۹)[۲۹] یافته‌ها نشان دادند که مدیریت دانش در اثربخشی سازمانی تأثیر مستقیم دارد و همچنین مدیریت دانش از طریق خرد سازمانی در اثربخشی سازمانی به صورت غیرمستقیم تأثیر دارد.

• فرضیه‌ی هشتم: فرایندهای مدیریت دانش در اثربخشی تیم پژوهه، تأثیر مثبت و معناداری دارد.

جدول ۲. آمار جمعیت شناختی پاسخ‌دهندگان به پرسش‌نامه.

ویژگی جمعیت شناختی	تعداد	فراوانی %	شاخص‌ها
سن	۲/۳	۲	۲۵ سال
	۶۰/۴	۵۲	۳۵ تا ۲۵ سال
	۳۲/۵	۲۸	۳۵ تا ۴۵ سال
	۴/۶	۴	بیشتر ۴۵ سال
جنسیت	۲۷/۹	۲۲	زن
	۷۲/۱	۶۲	مرد
میزان تحصیلات	-	-	کارشناسی
	۷	۶	کارشناسی ارشد
	۶۹/۸	۶۰	دکترا
	۲۳/۳	۲۰	
ماهیت پروژه	۴۶/۵	۴۰	ابنیه و ساختمان
	۲۳/۳	۲۰	راه و ترابری
	۱۶/۳	۱۴	صنعت و معدن
	۴/۷	۴	ارتباطات
	۹/۳	۸	نفت و گاز
آیا در شرکت شما واحد مدیریت دانش وجود دارد؟	۳۰/۲	۲۶	بلی
	۶۹/۸	۶۰	خیر
آیا در شرکت شما در انتهای پروژه، ارزیابی عملکرد تیم پروژه انجام می‌شود؟	۴۶/۵	۴۰	بلی
	۵۳/۵	۴۶	خیر

همچنین در پژوهش حاضر، در رابطه با مقیاس‌های گوناگون در پرسش‌نامه، از طیف فاصله‌یی (پنج تا یک) لیکرت (خیلی مخالف متعادل ۱، مخالف متعادل ۲، نه موافق و نه مخالف متعادل ۳، موافق متعادل ۴، خیلی موافق متعادل ۵) استفاده شده است. همچنین در پژوهش حاضر، واحد تحلیل، تیم‌های پروژه بوده و افراد پاسخ‌دهنده به سوال‌های پرسش‌نامه، به عنوان نماینده‌ی تیم‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در واقع، مشغولان به فعالیت در تیم‌های پروژه، پاسخ‌دهندگان به سوال‌های پرسش‌نامه بوده‌اند. شرط پاسخ‌گویی این بود که افراد مذکور با همکاری سایر هم‌تیمی‌های خود، در پروژه‌هایی مشغول باشند که تا حدود زیادی پیش‌رفت داشته و یا اینکه اخیراً به اتمام رسیده است. همچنین موقع ارسال پرسش‌نامه به شرکت‌های ذکر شده از آنها خواسته شد که پرسش‌نامه را در اختیار اعضایی از شرکت خود بگذارند که شروط پیش‌گفته‌ی اخیر را داشته باشند. اگر چند نفر از اعضاء شرکت در چند تیم از پروژه‌های مختلف مشغول بودند، هر کدام به نماینگی از تیم پروژه خود و به طور مجزا، پرسش‌نامه‌ها را پر کردند. روند جمع‌آوری داده‌ها با توجه به شیع ویروس کرونا و عدم امکان حضور در شرکت‌ها و همایش‌ها، به صورت آنلاین و از طریق ایمیل بوده است. به این صورت که ابتدا با مراجعه به سایت برنامه و بودجه (sajar.mporg.ir) و به کمک فیلترهای موجود در قسمت جستجویی پیش‌رفته و استفاده از فیلترهای وضعیت گواهی نامه، استان محل ثبت شرکت و نوع گواهی نامه، رشته و پایه، فهرستی از حدود ۴۰ شرکت پیمانکاری پایه یک، شاغل در تهران و با وضعیت گواهی نامه معتبر، که در حوزه‌های ساختمان و ابیه، راه و ترابری، صنعت و معدن، ارتباطات و نفت و

بوده و همچنین تیم‌های موقت در پروژه‌ها، برخلاف سازمان‌های کارفرمایی بسیار متداول است. برای حصول اطمینان از این‌که پرسش‌شوندگان، مفاهیم موجود در پرسش‌نامه را درک کرده باشند، معیارهای انتخاب‌شوندگان عضویت در دفتر مدیریت دانش و یا مدیریت پروژه سازمان و یا دست‌کم داشتن دانش مدیریت پروژه بوده است. ویژگی‌های جمعیت شناختی که در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند عبارت اند از: سن، جنسیت، میزان تحصیلات، ماهیت (نوع فعالیت) شرکت و نوع پروژه‌یی که پاسخ‌دهندگان در آن مشغول فعالیت بوده‌اند (جدول ۲). مطابق جدول ۲، در ۶۹/۸٪ از تیم‌های پروژه‌یی مشارکت‌کننده در پژوهش، واحد مدیریت دانش وجود نداشته و فعالیت‌های مدیریت دانش به صورت تخصصی و حرفه‌یی در شرکت، جاری نبوده است. همچنین در بیش از نیمی از تیم‌ها در انتهای پروژه، هیچ ارزیابی از عملکرد تیم پروژه صورت نگرفته است. پژوهشگر حاضر به گردآوری داده‌ها از طریق پرسش‌نامه‌یی ساختاریافته و با سوال‌های بسته پرداخته است. پرسش‌نامه از سه بخش: ۱) سوال‌های مربوط به عملکرد تیم پروژه که از نوشتار لیو و همکارش (۲۰۱۶)،^{۱۱} اقتباس شده بودند، ۲) سوال‌های مربوط به فرایندهای مدیریت دانش با اقتباس از نوشتار کیانتو^{۱۷} و همکارانش (۲۰۱۶)^{۲۲} و ۳) سوال‌های مربوط به زیرساخت‌های مدیریت دانش که از نوشتار لی و همکارانش (۲۰۱۲)،^{۲۳} اقتباس شده‌اند، تشکیل شده است. پرسش‌نامه‌ها به صورت آنلاین و از طریق ایمیل در اختیار افراد مورد نظر قرار گرفته‌اند.

عدد ۳ است و فقط در مورد مؤلفه‌های همکاری با توجه به نزدیکی عدد ۲/۹۱ با عدد ۳ می‌توان گفت در وضعیت متوسطی به سر می‌برد و بیان‌گر این موضوع است که وضعیت زیرساخت‌های مدیریت دانش کمتر از حد متوسط است و نیاز به فرهنگ‌سازی دارد. نتایج حاصل با آمار به دست آمده از اطلاعات دموگرافیک پاسخ‌دهندگان هم‌خوانی دارد؛ مشخص است که در شرکت‌هایی که واحد مدیریت دانش وجود ندارد، در زمینه‌ی زیرساخت‌های مدیریت دانش نیز ضعیف هستند. به بیان دیگر، شاید وجود واحد مدیریت دانش در هر شرکتی بتواند به عنوان یکی از زیرساخت‌های دانش عمل کند؛ در واقع، همان نقشی که دفتر مدیریت پروژه برای تقویت مدیریت پروژه در هر شرکتی می‌تواند ایفا کند. همچنین وضعیت آمار توصیفی مؤلفه‌های فرایند‌های مدیریت دانش در جدول ۴ ارائه شده است؛ که مطابق آن، در هر ۵ مؤلفه، میانگین آنها کمتر از حد متوسط یعنی عدد ۳ است و نشان می‌دهد که وضعیت فرایند‌های مدیریت دانش در تمامی ۸۶ نمونه‌ی بررسی شده، کمتر از حد متوسط و یا ضعیف است.

وضعیت مؤلفه‌های عملکرد فنی تیم پروژه نیز در تمامی ۸۶ نمونه‌ی بررسی شده در جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق جدول ۵ در دو مؤلفه‌ی کارایی و نوآوری، میانگین از عدد ۳ یعنی حد متوسط طیف پایین تراست و فقط در مؤلفه‌ی اثربخشی، میانگین معادل عدد ۳/۱۲ است و مقدار کمی از حد متوسط بالاتر است؛ بنابراین باید گفت وضعیت نوآوری و کارایی در تیم‌های پروژه، بسیار ضعیف بوده و فقط مؤلفه‌ی اثربخشی، وضعیت نسبتاً خوبی داشته است. در مورد دو متغیر کارایی و نوآوری می‌توان نتیجه گرفت وضعیت نوآوری از کارایی بهتر است. نتیجه‌ی اخیر با پاسخ‌های مشارکت‌کنندگان در پژوهش و در پاسخ به آخرین سؤال بخش دموگرافیک پرسش‌نامه، هم‌خوانی دارد؛ به عبارتی حدود ۵۴٪ پاسخ‌دهندگان به این نکته اشاره کرده‌اند که در انتهای پروژه‌های انجام نمی‌شود.

۲.۴. آمار استنباطی متغیرهای پژوهش

هدف بخش حاضر، آزمودن فرضیه‌های مدل مفهومی پژوهش است. در شکل ۲ و ۳، به ترتیب مقادیر ضرایب استاندارد شده‌ی بارهای عاملی و ضرایب t-value مشاهده می‌شود.

جدول ۴. آمار توصیفی مؤلفه‌های فرایند‌های مدیریت دانش

مؤلفه‌های فرایند‌های مدیریت دانش	میانگین	انحراف معیار
اکتساب دانش	۲/۲۳	۰/۷۴۶
اشتراك‌گذاري دانش	۲/۵۱	۰/۸۵۱
خلق دانش	۲/۲۶	۰/۸۷۰
کدگذاري دانش	۲/۲۱	۰/۸۲۸
حفظ دانش	۲/۴۰	۱/۱۷۱

جدول ۵. آمار توصیفی مؤلفه‌های عملکرد فنی تیم پروژه

مؤلفه‌های عملکرد فنی تیم پروژه	میانگین	انحراف معیار
اثربخشی	۳/۱۲	۰/۷۵۸
کارایی	۱/۹۳	۰/۷۶۴
نوآوری	۲/۴۰	۰/۸۱۶

گاز به دست آمد. حدود ۱۰۰ شرکت به نامه‌ی درخواست همکاری پاسخ دادند که در نهایت، لینک پرسش‌نامه برای آنها ارسال شد. با توجه به این نکته که برخی از پرسش‌نامه‌ها توسط افراد یک‌تیم پر شده بودند، لذا بین آنها میانگین گرفته شد و در نهایت، پرسش‌نامه‌ی معابر به دست آمد.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده از طریق توزیع پرسش‌نامه، با بررسی‌های انجام شده و مشورت با دو مشاور آماری، با توجه به نوع مدل پژوهش (تعداد متغیرها، تعداد روابط بین متغیرها و نوع روابط بین آنها)، حجم جامعه و نمونه‌ی پژوهش و تعداد گویه‌های پرسش‌نامه، مدل معادلات ساختاری (SEM) ^{۱۸} و شاخص‌های آماری آزمون مذکور در نرم‌افزارهای SPSS (آمار توصیفی) و همچنین Smart PLS (مدل‌سازی و سنجش روابط و متغیرهای مدل و دیگر آزمون‌های آماری خاص ابزار مذکور)، به عنوان بهترین ابزار بخش کمی استفاده شده است.

مدل سازی معادلات ساختاری و تحلیل مسیر از جمله روش‌هایی هستند که در تجزیه و تحلیل چندمتغیره به کار می‌روند. با توجه به این که مدل مفهومی پژوهش حاضر یک مدل چندمتغیره و با روابط پیچیده بین متغیرهای است، برای تأیید یا رد فرضیه‌های پژوهش از مدل معادلات ساختاری و تحلیل مسیر استفاده شده است. برای اجرای مدل معادلات ساختاری، روش‌هایی متنوعی وجود دارد که یکی از جدیدترین آنها، روش کمیه‌ی مربعات جزئی (PLS) ^{۱۹} است، که روشی واریانس محور است. روش PLS معمولاً زمانی استفاده می‌شود که حجم نمونه‌ی پژوهش کم و یا تعداد متغیرها زیاد باشد.^{۲۰} در پژوهش حاضر، با توجه به حجم کم نمونه‌ها (۸۶ نمونه) و روابط نسبتاً پیچیده‌ی متغیرها از ابزار PLS استفاده شده است.

جهت روایی ابزارهای استفاده شده، از جمله سؤال‌های پرسش‌نامه از اعتبار صوری استفاده شده است؛ به این منظور سؤال‌های ذکر شده پس از تنظیم، در اختیار دو استاد دانشگاهی، یک نفر از دانشجویان مدیریت پروژه و یک خبره‌ی صنعتی که تجربه‌ی مطالعاتی و فعالیت عملی خوبی در زمینه‌ی مدیریت دانش داشته باشد، قرار گرفت، که پس از اعلام نظر آنها، ایرادهای وارد شده به سؤال‌های پرسش‌نامه استفاده شد. همچنین از ضریب آلفای کرونباخ برای ارزیابی پایایی سؤال‌های پرسش‌نامه استفاده شد، که مقدار ۰/۸۷۶ به دست آمد، که مقدار مناسبی است.

۴. یافته‌ها

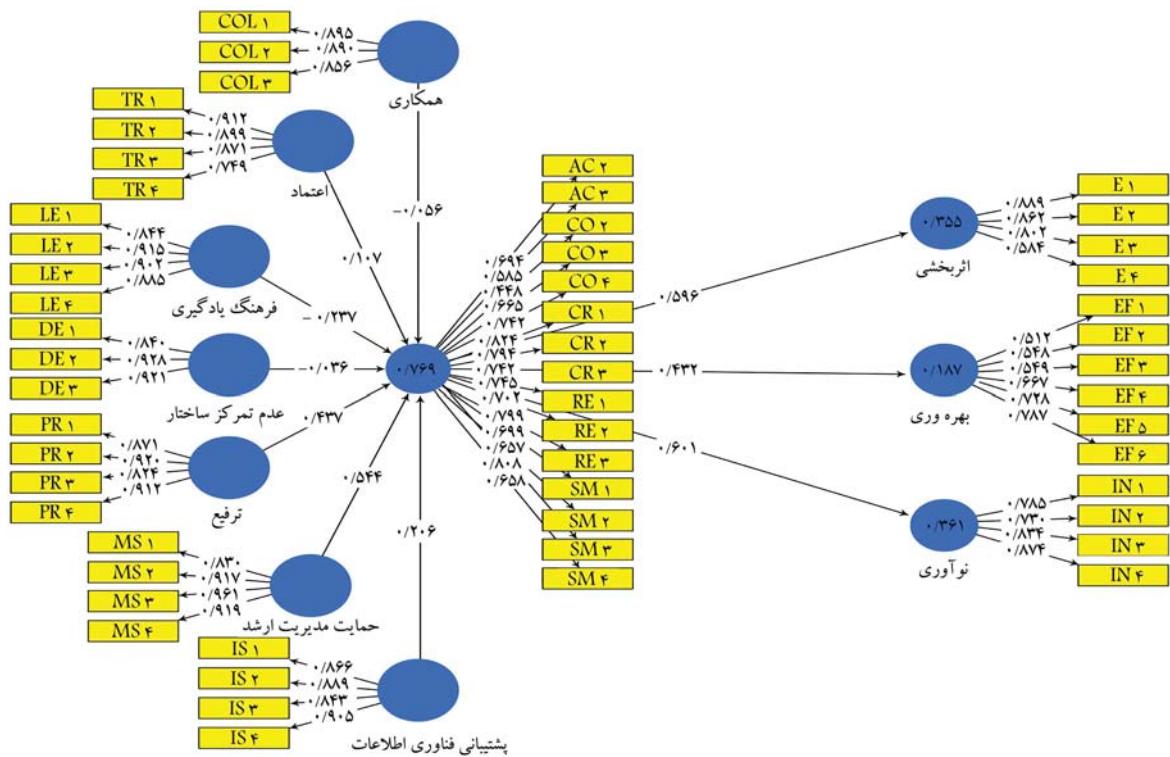
۱.۴. آمار توصیفی متغیرهای پژوهش

وضعیت آمار توصیفی متغیرهای زیرساخت‌های مدیریت دانش در تمامی تیم‌های پژوهشی که در پژوهش حاضر مشارکت داشته‌اند، در جدول ۳ ارائه شده است.

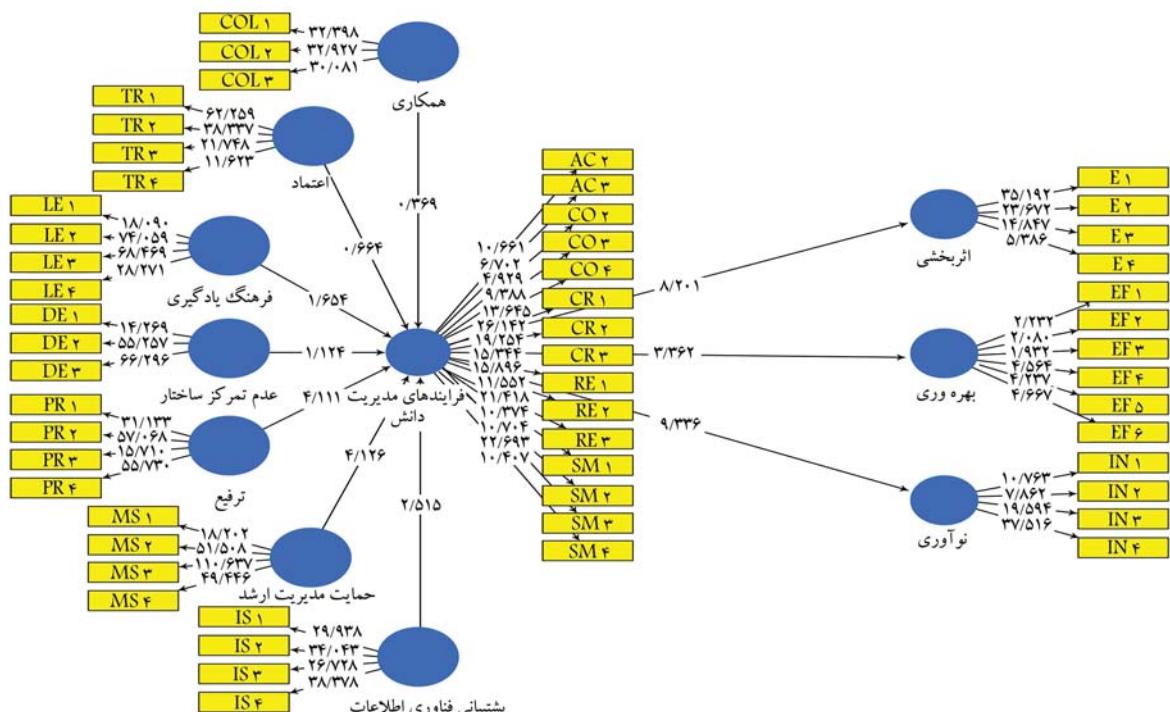
مطابق جدول ۳، در هر هفت متغیر، میانگین آنها کمتر از حد متوسط، یعنی

جدول ۳. آمار توصیفی مؤلفه‌های زیرساخت‌های مدیریت دانش

مؤلفه‌های زیرساخت‌های مدیریت دانش	میانگین	انحراف معیار
همکاری	۲/۹۱	۰/۹۶۶
اعتماد	۲/۶۷	۰/۹۸۷
فرهنگ یادگیری	۲/۰۰	۰/۹۷۰
عدم تمرکز	۲/۵۸	۱/۰۲۳
حمایت مدیریت ارشد	۲/۲۸	۰/۹۲۹
انگیزش	۲/۱۴	۰/۹۳۵
پشتیبانی فناوری اطلاعات	۲/۳۳	۱/۰۱۱



شکل ۲. مدل مفهومی پژوهش با ضرایب استاندارد شده بارهای عاملی.



شکل ۳. مدل مفهومی پژوهش با ضرایب t-values.

(با فاصله‌ی نسبتاً کمی از حد مطلوب)، در حد مناسبی هستند و مطابقیت مدل اندازه‌گیری را تأیید می‌کنند. همچنین با توجه به معیار روایی واگرا در جدول ۸ واگرا مدل در حد مناسبی است. مطابق جدول ۹، میزان شاخص پیش‌بین تعدیل شده برای ذرازینده‌ای مدیریت دانش، در حد قوی؛ برای اثربخشی و نوآوری، در حد متوسط

نتایج پایابی ترکیبی برای تمامی سازه‌های پژوهش (متغیرها)، نیز مطابق جدول ۶، قبول شده است. نتایج مربوط به بررسی روایی همگرا در جدول ۷ نشان می‌دهد که با توجه به حدود گفته شده برای معیار روایی، تمامی متغیرهای پژوهش به جز متغیر کارایی

جدول ۶. ضریب پایانی ترکیبی متغیرهای پژوهش.

متغیرها	ضریب پایانی ترکیبی (CR > ۰/۷)	نتیجه
همکاری	۰/۹۱۲	مطلوب
اعتماد	۰/۹۱۹	مطلوب
فرهنگ یادگیری	۰/۹۳۶	مطلوب
عدم تمرکز ساختار	۰/۹۲۵	مطلوب
حمایت مدیریت ارشد	۰/۹۴۹	مطلوب
انگیزش	۰/۹۳۵	مطلوب
پشتیبانی فناوری اطلاعات	۰/۹۳۰	مطلوب
فرایندهای مدیریت دانش	۰/۹۳۸	مطلوب
اثربخشی	۰/۷۸	مطلوب
کارایی	۰/۸۰۲	مطلوب
نوآوری	۰/۸۸۲	مطلوب

جدول ۷. نتایج بررسی روایی همگرا با معیار AVE.

متغیرهای پژوهش	AVE > ۰/۵	نتیجه
همکاری	۰/۷۸۶	مطلوب
اعتماد	۰/۷۴۰	مطلوب
فرهنگ یادگیری	۰/۷۸۶	مطلوب
عدم تمرکز ساختار	۰/۸۰۵	مطلوب
حمایت مدیریت ارشد	۰/۸۲۵	مطلوب
انگیزش	۰/۷۸۲	مطلوب
پشتیبانی فناوری اطلاعات	۰/۷۶۸	مطلوب
فرایندهای مدیریت دانش	۰/۵۰۷	مطلوب
اثربخشی	۰/۸۳۱	مطلوب
کارایی	۰/۴۸۰	نامطلوب
نوآوری	۰/۶۵۲	مطلوب

و برای نوآوری، ضعیف برآورد شده است. مقدار ۰/۷۶۹ برای فرایندهای مدیریت دانش به این معناست که مؤلفه‌های زیرساخت‌های مدیریت دانش ۷/۶٪ از تغییرات فرایند مدیریت دانش را پیش‌بینی می‌کنند و مابقی تغییرات متغیر مذکور وابسته به متغیرهای دیگری است که در پژوهش حاضر نیامده است. مقدار برای شاخص ارتباط پیش‌بین برای پژوهش حاضر در جدول ۱۰ ارائه شده است، که نشان از مطلوب بودن شاخص ذکر شده برای تمامی روابط موجود در مدل دارد.

مقدار شاخص اندازه اثر برای پژوهش حاضر در جدول ۱۱ ارائه شده است، که نشان از مطلوب بودن شاخص اندازه اثر برای تمامی روابط موجود در مدل دارد.

شاخص نیکویی برآش مدل در جدول ۱۲ ارائه شده است.

با توجه به این‌که شاخص GFI (بالای ۷۰٪) و ریشه‌ی خطای میانگین محدود رات تقریب (کمتر از ۸٪) قرار دارند، مدل از لحاظ شاخص‌های نیکویی برآش در سطح مطلوبی قرار دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر زیرساخت‌های مدیریت دانش در فرایندهای مدیریت دانش و در نتیجه تأثیر فرایندهای مدیریت دانش در عملکرد تیم پژوهه پرداخته شده است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داده است که وضعیت زیرساخت‌های مدیریت دانش، که شامل: همکاری، اعتماد، فرهنگ یادگیری، عدم تمرکز ساختار، حمایت مدیریت ارشد، انگیزش و پشتیبانی فناوری اطلاعات است، در تیم‌های پژوهه اصلًا مناسب نیست و از حد متوسط نیز پایین‌تر است. همچنین فرایندهای مدیریت دانش، شامل: مؤلفه‌های اکتساب دانش، اشتراک‌گذاری، خلاق

جدول ۸. روابی و اگر با روش فورنل و لارکر.

پشتیانی IT	همکاری نوآوری	فرهنگ	فرایند مدیریت	عدم تمرکز	حمایت مدیریت انگیزش	کارایی	اعتماد اثربخشی	متغیرها
یادگیری	دانش	ساختار	دانش	ارشد				
۰,۷۹۵								اثربخشی
۰,۷۶۵	۰,۶۰							اعتماد
۰,۴۱۰	۰,۳۷۰	۰,۶۴۰						کارایی
۰,۵۰۶	۰,۶۴۲	۰,۲۴۹	۰,۰۸۴					انگیزش
۰,۷۴۹	۰,۴۴۳	۰,۰۱۸	۰,۹۰۸					حمایت مدیریت ارشد
۰,۷۱۰	۰,۵۹۰	۰,۰۳۶	۰,۶۰۳	۰,۶۶۷	۰,۰۹۷			عدم تمرکز ساختار
۰,۵۹۶	۰,۴۶۱	۰,۰۴۲	۰,۷۰۷	۰,۸۱۴	۰,۵۲۱	۰,۷۱۲		فرایند مدیریت دانش
۰,۶۳۰	۰,۰۳۰	۰,۰۳۶	۰,۸۲۲	۰,۷۵۵	۰,۶۶۷	۰,۸۷		فرهنگ یادگیری
۰,۳۳۴	۰,۰۲۸۵	۰,۰۴۶۵	۰,۵۴۱	۰,۳۰۰	۰,۶۰۱	۰,۰۹۴	۰,۸۰۸	نوآوری
۰,۵۹۶	۰,۰۸۰۶	۰,۰۳۷۷	۰,۸۰۳	۰,۶۹۹	۰,۶۶۵	۰,۷۷۵	۰,۲۶۴	همکاری
۰,۵۳۱	۰,۰۱۷	۰,۰۶۹۸	۰,۶۲۴	۰,۶۰۰	۰,۶۹۲	۰,۶۰۶	۰,۲۸۲	پشتیانی IT
۰,۷۶	۰,۰۳۲	۰,۰۶۹	۰,۰۹۰	۰,۰۹۷	۰,۰۹۲	۰,۰۸۷	۰,۰۷۲	

جدول ۹. ضریب R^2 متغیرهای وابسته‌ی پژوهش.

متغیر وابسته	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	نتیجه
فرایندهای مدیریت و دانش	۰/۷۶۹	۰/۷۴۸	قوی
اثربخشی	۰/۳۵۵	۰/۳۴۸	متوسط
کارایی	۰/۱۸۷	۰/۱۷۷	ضعیف
نوآوری	۰/۳۶۱	۰/۳۵۴	متوسط

جدول ۱۰. ضریب Q^2 متغیرهای وابسته‌ی پژوهش.

متغیر	Q^2	نتیجه
فرایندهای مدیریت دانش	۰/۳۴۳	مطلوب (قدرت پیش‌بینی قوی)
اثربخشی	۰/۴۰۵	مطلوب (قدرت پیش‌بینی قوی)
کارایی	۰/۱۷۴	مطلوب (قدرت پیش‌بینی کم)
نوآوری	۰/۴۲۵	مطلوب (قدرت پیش‌بینی قوی)

جدول ۱۱. ضرایب β^2 متغیرهای پژوهش.

متغیر مستقل	متغیر وابسته	β^2	نتیجه
همکاری	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۰۰۲	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر کوچک)
اعتماد	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۰۰۷	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر کوچک)
فرهنگ یادگیری	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۰۳۹	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر متوسط)
عدم تمرکز ساختار	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۰۱۱	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر کوچک)
حمایت مدیریت ارشد	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۲۶۶	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر متوسط)
انگیزش	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۱۶۲	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر بزرگ)
پشتیانی فناوری اطلاعات	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۰۷۲	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر متوسط)
اثربخشی	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۵۵۱	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر بزرگ)
کارایی	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۲۳۰	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر بزرگ)
نوآوری	فرایندهای مدیریت دانش	۰/۵۵۶	مطلوب (اندازه‌ی تأثیر بزرگ)

جدول ۱۲. شاخص‌های نیکویی برازش مدل.

شاخص	SRMR	GFI
ضریب تبیین	۰/۰۴۵	۰/۰۴۴
ضریب تبیین اصلاح شده	۰/۸۹۷	۰/۹۲۹

جدول ۱۳. نتایج برآورد ضرایب معناداری تی و ضریب مسیر استاندارد شده.

متغیر مستقل	متغیر وابسته	B	t - value	سطح معناداری	نتیجه
همکاری	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۰۵۶	۲/۷۵۱	۰/۰۴	تأثیر
اعتماد	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۱۰۷	۴۵۶/۲	۰/۰۰	تأثیر
فرهنگ یادگیری	فرایندی‌های مدیریت دانش	-۰/۲۳۷	۱/۶۶۰	۰/۰۹۸	عدم تأثیر
عدم تمرکز ساختار	فرایندی‌های مدیریت دانش	-۰/۰۸۶	۱/۰۷۶	۰/۲۸۲	عدم تأثیر
حمایت مدیریت ارشد	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۵۴۴	۴/۱۸۵	۰/۰۰	تأثیر
انگیزش	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۴۳۷	۳/۸۹۵	۰/۰۰	تأثیر
پشتیبانی IT	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۲۰۶	۲/۶۳۰	۰/۰۰۹	تأثیر
فرایندی‌های مدیریت دانش	اثربخشی	۰/۵۹۶	۸/۳۹۱	۰/۰۰	تأثیر
کارایی	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۴۳۲	۳/۰۱۵	۰/۰۰۳	تأثیر
نوآوری	فرایندی‌های مدیریت دانش	۰/۶۰۱	۹/۳۴۴	۰/۰۰	تأثیر

پولیتیس ^{۲۰}، ^{۲۰۰۳}، ^[۴] به تأثیر اعتماد بین فردی در مدیریت دانش (اکتساب) اعضاء تیم و پیامدهای آن برای عملکرد تیم اطلاعات پرداخته است. یافته‌های ایشان حاکی از آن بود که بیشتر ابعاد اعتماد بین فردی به طور مثبت با متغیرهای کسب دانش مرتبط است. همچنین آثار اعتماد بین فردی در عملکرد تیم تا حد زیادی توسط متغیرهای مداخله‌گر کسب دانش میانجی‌گری شده است. در ضمن، کلیه‌ی زیرساخت‌هایی مدیریت دانش فراتر از اعتماد، بررسی شده و فرایندی‌های مدیریت دانش نیز محدود به اکتساب نشده است. همچنین یافته‌های پژوهش پولیتیس در رابطه با تأثیر اعتماد از طریق اکتساب دانش و تأثیر در عملکرد تیم با یافته‌های پژوهش حاضر سازگار بوده است.

به هر صورت آنچه ارزشمند است، این است که از یافته‌های پژوهش حاضر در محیط واقعی پژوهش‌ها استفاده شود، تا صنعت‌کاران بدانند با تقویت چه مؤلفه‌هایی می‌توانند عملکرد تیم‌های خود را ارتقاء بخشنند.

با این حال، پژوهش حاضر فقط در محیط تیم‌های پژوهشی خاص صنعت ساخت و ساز و مشغول به فعالیت در شرکت‌های پیمانکاری انجام شده و انجام مطالعات مجرایی در صنایع دیگر و حتی تیم‌های پژوهشی مشغول به فعالیت در شرکت‌های با ماهیت کارفرمایی، مشاوره، طرح و ساخت نیز می‌توانند نتایج ارزشمندی را به همراه داشته باشند؛ در نتیجه، انجام پژوهشی با موضوع تأثیر مدیریت دانش پرداخته است، تأثیر نشده است. شاید به صورت کلی، در تمامی ^{۸۶} نمونه‌ی بررسی شده، نوعی فرهنگ سلسله‌مراتبی قدرت حاکم باشد و افراد برای تبدیل و اشتراک دانش خود به دانش تیمی، اختیارات کافی نداشته نباشند. بعض‌فاصل قدرت، سطوح قدرت را در تیم‌های پژوهش حاکم می‌کند، که فرصت‌های نوآورانه را با موانع جدی مواجه می‌سازد.

همچنین فرضیه‌ی چهارم، که به بررسی عدم تمرکز ساختار در فرایندی‌های مدیریت دانش پرداخته است، تأثیر نشده است. شاید به صورت کلی، در تمامی ^{۸۶} نمونه‌ی بررسی شده، نوعی فرهنگ سلسله‌مراتبی قدرت حاکم باشد و افراد برای تبدیل و اشتراک دانش خود به دانش تیمی، اختیارات کافی نداشته نباشند. بعض‌فاصل قدرت، سطوح قدرت را در تیم‌های پژوهش حاکم می‌کند، که فرصت‌های نوآورانه را با داشتن پشتونه‌ی محکم محروم می‌دانند.

دانش، کدگذاری و حفظ دانش نیز وضعیت مناسبی ندارند و میانگین آنها از حد متوسط پایین‌تر است و در مورد مؤلفه‌های عملکرد تیم، یعنی: اثربخشی، کارایی و نوآوری، فقط اثربخشی تیم از حد متوسط بیشتر است و می‌توان گفت وضعیت قابل قبولی دارد.

نتایج حاصل از بررسی مدل اندازه‌گیری نشان داد که ۸ فرضیه تأثیر شده و دو فرضیه تأثیر نشده‌اند. فرضیه‌هایی که تأثیر نشده‌اند، هم‌خواهی خوبی با مطالعات پیشین را نشان می‌دهند. اما مهم‌تر فرضیه‌هایی هستند که تأثیر نشده‌اند.

فرضیه‌ی سوم، که رابطه‌ی فرهنگ یادگیری و فرایندی‌های مدیریت دانش را ارزیابی کرده است، تأثیر نشده است. به این معنا که لزوماً افزایش یادگیری فردی منجر به بهبود فرایندی‌های مدیریت دانش نمی‌شود. به نظر می‌رسد بر سر تبدیل دانش ضمنی افراد به دانش تیم و در نتیجه دانش شرکت‌ها، مانع بزرگی وجود دارد که دانش شرکت‌ها، یا به صورت دانش فردی باقی می‌ماند و در سطح محدودی بهره‌برداری می‌شود. توجه بیشتر به مواردی چون لزوم توسعه‌ی شغلی و موضوعات آموزش و اشتراک دانش در همایش‌ها و اجتماعات حرفه‌ی در شرایط فعلی احساس می‌شود.

همچنین فرضیه‌ی چهارم، که به بررسی عدم تمرکز ساختار در فرایندی‌های مدیریت دانش پرداخته است، تأثیر نشده است. شاید به صورت کلی، در تمامی ^{۸۶} نمونه‌ی بررسی شده، نوعی فرهنگ سلسله‌مراتبی قدرت حاکم باشد و افراد برای تبدیل و اشتراک دانش خود به دانش تیمی، اختیارات کافی نداشته نباشند. بعض‌فاصل قدرت، سطوح قدرت را در تیم‌های پژوهش حاکم می‌کند، که فرصت‌های نوآورانه را با موانع جدی مواجه می‌سازد.

فرضیه‌ی پنجم پژوهش، نیز که به بررسی رابطه‌ی حمایت مدیریت ارشد روی فرایندی‌های مدیریت دانش پرداخته است، تأثیر نشده است. به نظر می‌رسد مقاومت مدیریت دانش هنوز در بین مدیران پژوهش‌ها نیز غریب‌باشد. تا وقتی کارمندان سطوح پایین‌تر، تمايل رهبران خود به سمت این موضوعات را نبینند، ممکن است رغبتی نیز جهت تلاش برای پیاده‌سازی این مقاومت را نداشته باشند. در حقیقت خود را از داشتن پشتونه‌ی محکم محروم می‌دانند.

پابندها

1. Geert Hofstede
2. Kucza
3. Mishra & Bhaskar
4. Karadsheh
5. Imran
6. Kushwaha & Rao
7. Ford
8. Miković
9. Peñalver
10. Adeinat & Abdulfatah
11. Ajmal & Koskinen
12. Al-Adaileh & Al-Atawi
13. Zheng
14. Estanesti
15. Abubakar
16. Ode & Ayavoo
17. Kianto
18. Structure equation modeling
19. Partial least squares
20. Politis

منابع (References)

1. Fedor, D.B., Ghosh, S., Caldwell, S.D. and et al. "The effects of knowledge management on team members' ratings of project success and impact", *Decision Sciences*, **34**(3), pp. 513-539 (2003).
2. Liu, W.-H. and Cross, J.A. "A comprehensive model of project team technical performance", *International Journal of Project Management*, **34**(7), pp. 1150-1166 (2016).
3. Kheyrandish, M. "A comprehensive model of key factors of teamwork effectiveness and its measuring scales in organizational context", *Organizational Behaviour Studies Quarterly*, **4**(3), pp. 31-60 (2015).
4. Sung, S.Y. and Choi, J.N. "Effects of team knowledge management on the creativity and financial performance of organizational teams", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, **118**(1), pp. 4-13 (2012).
5. Huang, J.W. and Li, Y.H. "The mediating effect of knowledge management on social interaction and innovation performance", *International journal of Manpower*, **30**(3), pp.285-301 (2009).
6. Estanesti, S. and Sholibour, A. "Investigation of the relationship between knowledge management and organizational creativity with staff productivity (case study: iranshahr steam power plant)", *Management Researches*, **12**(46), pp. 305-328 (2020).
7. Taylor, T. "The challenge of project team incentives", *Compensation & Benefits Review*, **42**(5), pp. 411-419 (2010).
8. Henderson, S. and Walkinshaw, O. "Command team assessment: principles, guidance and observations", *Unpublished Report, QinetiQ, Fort Halstead* (2002).
9. Bell, S.T. "Deep-level composition variables as predictors of team performance: A meta-analysis", *Journal of applied psychology*, **92**(3), p. 595-615 (2007).
10. Kim, J. and Burton, R.M. "The effect of task uncertainty and decentralization on project team performance", *Computational & Mathematical Organization Theory*, **8**(4), pp. 365-384 (2002).
11. Liu, W.-H. "A comprehensive model of perceived project team performance", (2012).
12. Sudhakar, G. "Different dimensions of teams", *Ecoforum Journal*, **2**(2), pp. 29-35 (2013).
13. Lee, H. and Choi, B. "Knowledge management enablers, processes, and organizational performance: An integrative view and empirical examination", *Journal of Management Information Systems*, **20**(1), pp. 179-228 (2003).
14. Ritter-Hayashi, D., Knoben, J. and Vermeulen, P.A.M. "Temporary employment: Curse or blessing for a firm's absorptive capacity?", *Technological Forecasting and Social Change*, **173**, 121090 (2021).
15. Kohonen-Aho, L. and Tiilikainen, S. "Constructing shared context for temporary teams in virtual worlds with informal interaction", *Proceedings of the International Conference for Information Systems*, Seoul, South Korea: Association for Information Systems (2018).
16. Massaro, M., et al., "Intellectual capital and performance in temporary teams?", *Management Decision*, **58**(3), pp. 410-427 (2020).
17. Dai, H., Swaminathan, J.M. and Xu, Y. "Leveraging the experience: exploration and exploitation in gig worker learning process", *Available at SSRN 4106978* (2022).
18. Thommes, M.S. and Uitdewilligen, S. "Healthy suspicion: the value of low swift trust for information processing and performance of temporary teams", *Group Dynamics: Theory, Research, and Practice*, **23**(2), p. 124-139 (2019).
19. Kucza, T. "Knowledge management process model", *VTT Technical Research Centre of Finland* (2001).
20. Mishra, B. and Bhaskar, A.U. "Knowledge management process in two learning organisations", *Journal of Knowledge Management*, **15**(2), pp. 344-359 (2011).
21. Chang, C.L.-H. and Lin, T.-C. "The role of organizational culture in the knowledge management process", *Journal of Knowledge Management*, **19**(3), pp. 433-455 (2015).
22. Karadsheh, L., Mansour, E., Alhawari, S. and et al. "A theoretical framework for knowledge management process: towards improving knowledge performance", *Communications of the IBIMA*, **7**, pp. 67-79 (2009).
23. Abubakar, A.M., Elrehail, H., Alatailat, M.A. and et al. "Knowledge management, decision-making style and organizational performance", *Journal of Innovation & Knowledge*, **4**(2), pp. 104-114 (2019).
24. Abualoush, S., Bataineh, K. and Alrowwad, A.A. "The role of knowledge management process and intellectual capital as intermediary variables between knowledge management infrastructure and organization performance", *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, **13**, p. 279 (2018).
25. Imran, M.K. "Impact of knowledge management infrastructure on organizational performance with moderating

- role of KM performance: An empirical study on banking sector of Pakistan", *Information and Knowledge Management* (2014).
26. Kushwaha, P. and Rao, M.K. "Integrative role of KM infrastructure and KM strategy to enhance individual competence", *VINE*, **45**(3), pp. 376-396 (2015).
27. Lee, S., Kim, B.G. and Kim, H. "An integrated view of knowledge management for performance", *Journal of Knowledge Management*, **16**(2), pp.183-203 (2012).
28. Ford, D.P. "Trust and knowledge management: The seeds of success", In: Holsapple, C.W. (eds) *Handbook on Knowledge Management 1. International Handbooks on Information Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.553-575 (2004). DOI.org/10.1007/978-3-540-24746-3-29.
29. Miković, R., Petrović., D. Mihić, M. and et al. "The integration of social capital and knowledge management –The key challenge for international development and cooperation projects of nonprofit organizations", *International Journal of Project Management*, **38**(8), pp. 515-533 (2020).
30. Peñalver, A.J.B., Conesa, J.A.B., Santos, M.C. and et al. "Influence of cooperation and collaborative ICT in knowledge management", *Journal of Scientific and Industrial Research*, **77**(6), pp. 313-317 (2018).
31. Adeinat, I.M. and Abdulfatah, F.H. "Organizational culture and knowledge management processes: case study in a public university", *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*, **49**(1), pp. 35-53 (2019).
32. Ajmal, M.M. and Koskinen, K.U. "Knowledge transfer in project-based organizations: An organizational culture perspective", *Project Management Journal*, **39**(1), pp. 7-15 (2008).
33. Al-Adaileh, R.M. and Al-Atawi, M.S. "Organizational culture impact on knowledge exchange: Saudi Telecom context", *Journal of Knowledge Management*, **15**(2), pp. 212-230 (2011).
34. Zheng, W., Yang, B. and McLean, G.N. "Linking organizational culture, structure, strategy, and organizational effectiveness: mediating role of knowledge management", *Journal of Business Research*, **63**(7), pp. 763-771 (2010).
35. Kankanhalli, A., Tan, B.C.Y. and Wei, K.-K. "Contributing knowledge to electronic knowledge repositories: An empirical investigation", *MIS quarterly*, **29**(1), pp. 113-143 (2005). DOI.org/10.2307/25148670.
36. Child, J.T. and Shumate, M. "The impact of communal knowledge repositories and people-based knowledge management on perceptions of team effectiveness", *Management Communication Quarterly*, **21**(1), pp. 29-54 (2007).
37. Jaradat, N.M.S. and Al Maani, A.I. "The impact of knowledge management infrastructure on performance effectiveness in Jordanian organizations", *Arab Economic and Business Journal*, **9**(1), pp. 27-36 (2014).
38. Mansoori, V. and et al. "The relationship between knowledge management with organizational effectiveness in the youth and sports ministry's staff", *Contemporary Studies On Sport Management*, **6**(11), pp. 41-50 (2016).
39. saberi, A. and goodarzi, S. "The impact of knowledge management on the effectiveness of the ministry of youth and sports with emphasis on the role of mediator organizational wisdom", *Research on Educational Sport*, **7**(16), pp. 149-168 (2019).
40. Iranzadeh, S., Fakhimiazar, S. and Jedare Sefedgare, A. "Effect of KM components on labor productivity using factor analysis in finance and credit institution of Tabriz", *The Journal of Productivity Management*, **9**(33), pp. 27-45 (2015).
41. Edwards-Schachter, M. "The nature and variety of innovation", *International Journal of Innovation Studies*, **2**(2), pp. 65-79 (2018).
42. Ode, E. and Ayavoo, R. "The mediating role of knowledge application in the relationship between knowledge management practices and firm innovation", *Journal of Innovation & Knowledge*, **5**(3), pp. 210-218 (2020).
43. Kianto, A., Vanhala, M. and Heilmann, P. "The impact of knowledge management on job satisfaction", *Journal of Knowledge Management*, **20**(4), pp. 621-626 (2016).
44. Politis, J.D. "The connection between trust and knowledge management: What are its implications for team performance", *Journal of Knowledge Management*, **7**(5), pp. 55-66 (2003).

* مشخصات مقالات ارسالی:

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

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

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسمی نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه 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، عناوین بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه - با احتساب شکل و نمودار - باشد.

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

نکته: از آنجا که مطالب مجله در سنتون‌های ۸/۵ سانتی‌متری آرایسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژیتال) 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 600 Resolution با پسوند JPEG یا Tif امکان‌پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل مترادول فارسی می‌باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه‌ی لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل‌های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش...) 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 به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشهه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتهای واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

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

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preforation of circular plat with four sided 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

لنتریف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «لنتریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بسته مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعضا سطح داشت نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌ی مفید است چاپ مقالات در مجله‌ی شریف منوط به دارا بودن یکی از ویزگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدین در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشد؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۱. با تقدیم و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه‌ی دست یافته باشند.

۱.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۲.۱. پژوهش، تاخصیص و استنتاج از برخی آثار بر جسته‌ی علمی و فنی باشند.

© Sharif University of Technology

- Received 27 February 2022; received in revised form 31 May 2022; accepted 4 September 2022.

Abstract

Objective: Today, despite the increase in global competition in the market, the prevalence of temporary forms of cooperation and project-based work is increasing. Likewise, the intensity of knowledge of the content of the work is growing. However, the temporary nature of projects does not support the transfer of knowledge between and within projects. Some researchers acknowledge that knowledge management is one of the most successful ways to improve team performance. As a result, the present study analyzed the relationship among knowledge management infrastructure, knowledge management processes, and project team performance.

Research Methodology: The strategy used in the present study is survey-based. The statistical population comprises the project work teams in contracting companies ranked in construction, road, transportation, mining, communications, oil, and gas in Tehran province. People working on projects have participated as representatives of teams in filling out questionnaires. Data collection was done by sending a web-based version of the ques-

tionnaire via Email. Of 400 qualified companies, nearly 100 companies accepted to participate in research. Finally, 86 valid questionnaires were collected. Data analysis was performed using path analysis through structural equations.

Results: The results of data analysis showed that the state of knowledge management infrastructure including cooperation, trust, learning culture, decentralization, senior management support, motivation, and IT support is not appropriate in project teams and is below average. Moreover, knowledge management processes including the components of knowledge acquisition, sharing, knowledge creation, coding, and knowledge retention are not in good condition, and their average is lower than the average. The standard is higher and in an acceptable condition. The results show that the culture of cooperation, trust, support of senior management, motivation, and IT support, which are components of knowledge management infrastructure, affect knowledge management processes which affect such elements as project team performances, namely effectiveness and innovation. Performance has a positive effect.

Key Words: Performance, project team, knowledge management, knowledge management infrastructure, knowledge management processes.

cross-section impose negative effect on shear stress mobilized on the pile surface. In addition, the pile group efficiency of tapered piles is generally lower than corresponding values for uniform cross-section piles. Also, the group efficiency of all tapered pile groups was almost equal to unity, meaning that the load carried by the group is equal to the sum of the load carried by individual similar piles.

Key Words: Tapered pile, pile group, numerical simulation, geometry of surface area, group efficiency.

SEISMIC CONTROL OF BENCHMARK HIGHWAY BRIDGE USING SEMI-ACTIVE CONTROL SYSTEM AND SELF-TUNING FUZZY CONTROLLER

S. Abrishami

sajjadabrizhami@mail.um.ac.ir

A. Karamodin(corresponding author)

a-karam@um.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Ferdowsi University of Mashhad

M.R. Akbarzadeh Totonchi

akbazar@um.ac.ir

Dept. of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Ferdowsi University of Mashhad

DOI:10.24200/J30.2022.60707.3117

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 73-84, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 July 2022; received in revised form 13 September 2022; accepted 24 September 2022.

Abstract

During the past few decades, extensive damage to structures due to severe earthquakes has encouraged structural engineers to use seismic control systems. Bridges are critical nodes in transportation networks and must remain utilizable after an earthquake. Therefore, a higher level of performance with less structural damage is required for bridges. In the present research, a self-tuning fuzzy controller (STFC) with semi-active MR dampers is proposed to reduce the seismic response of the benchmark highway bridge. This controller combines the advantages of fuzzy inference systems and adaptive control in a two-part control architecture consisting of primary and secondary controllers. More specifically, the self-tuning mechanism considers different characteristics

of seismic excitations and structural conditions to increase the controller efficiency in different situations. The role of the primary controller is to determine the input damper voltage, while the secondary controller adjusts them online according to seismic excitations and structural conditions. In order to increase the effectiveness of the proposed controller, the output parameters of the Sugeno fuzzy inference systems in the primary controller were set by a genetic algorithm. Finally, the proposed STFC was employed under several patterns from actual benchmark earthquakes and the evaluation criteria of a seismically excited highway bridge benchmark were determined. The obtained results exhibited a higher ability of the proposed self-tuning fuzzy controller to improve the highway bridge benchmark criteria, especially those related to damage such as displacement at bridge midspan, deformation of bearings, curvature of bent columns, and dissipated energy at the structural members. On the other hand, the evaluation criteria suggest that the proposed self-tuning fuzzy controller could reduce seismic responses under different earthquakes and adapt to different seismic excitations. Moreover, comparing the proposed controller with another adaptive fuzzy controller indicates the higher efficiency of the proposed STFC approach, especially in improving damage-related performance measures.

Key Words: Seismic control, semi-active control, MR damper, self-tuning fuzzy controller, adaptive controller, benchmark highway bridge, damage.

THE EFFECT OF KNOWLEDGE MANAGEMENT INFRASTRUCTURE THROUGH KNOWLEDGE MANAGEMENT PROCESSES ON THE PERFORMANCE OF TEMPORARY TEAMS IN THE PROJECT

S. Dehghani

samira.dehghani@modares.ac.ir

H. Arbabi(corresponding author)

arbabi@modares.ac.ir

M.H. Sobhiyah

sobhiyah@modares.ac.ir

Dept. of Project Management and Construction Faculty of Arts

Tarbiat Modares University

DOI:10.24200/J30.2022.59850.3071

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 85-96, Research Note

INVESTIGATION OF PERIODIC RESONATORS AS WAVE BARRIERS FOR MITIGATING SURFACE SEISMIC WAVES USING BLOCH-FLOQUET THEORY

Sh. Amanat

amanat.shahab@ut.ac.ir

R. Rafiee-Dehkarghani (corresponding author)

rezarafiee@ut.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

University of Tehran

DOI:10.24200/J30.2022.60363.3099

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 53-60, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 May 2022; received in revised form 22 August 2022; accepted 5 September 2022.

Abstract

Every year around the world, earthquakes and other seismic waves cause damage to civil infrastructures. The most harmful waves for civil infrastructure are surface waves, as this study focused on it. Therefore, this study aims to investigate the behavior of resonators as an approach to reducing surface seismic waves based on both infinite and finite lattices for the proposed resonator. To this end, first, an infinite lattice is evaluated using the Bloch-Floquet theory by modeling the smallest repetition of the considering lattice. The dispersion relation of the considered resonator is obtained by an eigenfrequency analysis for each wave vector in the first irreducible Brillouin zone. Then, the bandgap for surface waves is defined using the sound line concept, a common approach in solid-state physics to find the pure surface modes of the dispersion relation for resonators. The sound line concept is used to distinguish between the pure surface and other waves, such as body waves. In Bloch-Floquet theory, the lattice is assumed to have an infinite number of unit cells; however, in real applications, the lattice needs to have a finite number of unit cells. Therefore, the accuracy of the bandgap obtained for the infinite lattice is evaluated by considering a finite lattice model in both frequency and time domains to consider a more realistic case. The results show that the considered resonator has a notable surface wave bandgap. Moreover, the results of the finite lattice conform well to the results of the infinite lattice in both frequency and time domains. The proposed resonator is made of concrete and has a height of six meters, and the unit cell constant is considered two meters. The obtained bandgap is between 14 and 21 Hz, confirmed by a finite model in both frequency and time domains. As a result, the proposed resonator can reduce surface seismic waves efficiently.

Key Words: Seismic barriers, resonator, bandgap, bloch-floquet theory, sound line.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHAFT SURFACE GEOMETRY OF TAPERED PILE GROUP WITH CIRCULAR AND SQUARE CROSS-SECTIONS ON BEARING CAPACITY AND GROUP EFFICIENCY INQUIRY

A. Shabanpour (corresponding author)

ashabanpour@mail.kntu.ac.ir

M. Ghazavi

ghazavi.ma@mail.kntu.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

K. N. Toosi University of Technology

DOI:10.24200/J30.2022.60712.3118

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 61-71, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 12 July 2022; received in revised form 4 September 2022; accepted 11 September 2022.

Abstract

Piles with a gradually decreasing cross-section area from pile top to the tip is called tapered piles. Making this change in pile geometry could improve pile behavior in terms of axial compression load bearing, compared to conventional uniform cross-section piles. The beneficial effect of shaft taper pile on the capacity and performance of axially loaded single piles is well documented in the literature. However, the behavior of tapered pile groups has been rarely investigated experimentally and numerically. In this study, a numerical investigation of single tapered pile and pile group behavior based on an experimental investigation in geotechnical centrifuge is conducted. This investigation included both circular and square cross-sections for tapered pile and 2x2 pile group. The results of experimental and numerical modeling highlight the considerable advantage of circular and square tapered piles over the uniform cross-section ones in terms of axial compressive load-bearing capacity. Although the surface area of the circular tapered piles is smaller than square ones, the results surprisingly imply upon an increase in the axial bearing capacity. In numerical simulation, pile group efficiency of tapered pile and shear stress distribution in the soil medium around the pile are investigated. Moreover, the effect of shaft surface geometry of tapered pile with circular and square cross-sections on axial compression load-bearing capacity is also investigated. The findings of numerical simulations indicate that the concave corners of the pile

- Received 23 May 2022; received in revised form 10 September 2022; accepted 20 September 2022.

Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) is a type of ultra-high-performance concrete (UHPC). Reactive powder concrete is composed of very fine aggregates (Cement, fine aggregate, quartz powder and Silica sand), strong superplasticizers, and a small amount of water. Improvement of microstructure, elimination of coarse aggregate, particle packing, and toughness enhancement are the main principles of RPC development. Reactive powder concrete has a high modulus of elasticity and low water absorption and also has a high compressive strength. Reactive Powder Concrete contains high amounts of cement. This high ratio increases the production cost of this concrete in addition to causing issues such as high hydration temperature and concrete shrinkage. In this study, due to the difference in material and composition of materials in Iran with other countries, one should use 5 ratios of silica sand to cement including 1, 1.1, 1.2, 1.25, 1.3 and, then, add 4%, 5%, and 6% of the volume of concrete Fiberglass to each ratio. Increasing the sand to cement ratio up to 1.2 can improve the concrete behavior by reducing the amount of cement used. Moreover, According to the SEM images, by increasing the sand-cement ratio to 1.2 with the improvement of concrete microstructure, the compressive strength increased..On the other hand, in this sand-cement ratio, microcracks were reduced compared to the sample with a sand-cement ratio of 1, and water absorption of concrete was reduced. Moreover, the tensile behavior of RPC must be improved using another material due to the limit set on the largest grain size in it. Adding glass fibers at the rate of 4-5% of concrete weight to the mix design and converting reactive powder concrete to composite reduces the number of microcracks, which improves the microstructure of concrete. As a result, the behavior of concrete is enhanced against tension and flexure. Moreover, with the addition of glass fibers, the behavior of concrete against water is strengthened and the water absorption of reactive powder concrete sample armed with glass fibers is appropriate.

Key Words: Reactive powder concrete, glass fiber, silica sand, scanning electron microscope.

ANALYSIS AND STRENGTHENING OF RC EXTERIOR BEAM-COLUMN JOINTS CONSIDERING COLUMN AXIAL FORCE VARIATION

S. Ziaalhagh
s.zia.civil@gmail.com

M. Esfahani (corresponding author)

esfahani@um.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

Ferdowsi University, Mashhad

DOI:10.24200/J30.2022.60213.3097

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 37-52, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 May 2022; received in revised form 13 August 2022; accepted 29 August 2022.

Abstract

In this study, an analytical method is developed to predict the behavior of deficient reinforced concrete beam-column joints after strengthening. Deficient joint is a joint without shear reinforcement. In this analytical method, different types of failure are estimated using principal stress-strain relationships in the joint and by determining the final capacity of beam and column. The use of relations between principal stresses in the joint accounts for the variation of the axial stress of the column in equations and joint capacities. The equations are obtained by considering the strength and deformation limit states in the joint, and a numerical method is employed to solve them. The proposed analytical method provides useful information regarding the strengthened joint capacity as well as how different types of strengthened methods work. This information can be used to select the strengthening method of the deficient joints. In the study, the calculation sequence of beam-column joints is illustrated using column axial force versus flexural capacity relationship of the joint members, employed as a criterion to determine the method and the amount of strengthening materials. In the experimental part of the study, 3 specimens with axial load variation and 3 specimens with constant axial load were conducted. The specimens were strengthened using either near-surface mounted steel reinforcement (NSM) or externally bonded reinforcement (EBR) with CFRP sheets. The experimental results indicated that the behavior of joints was significantly affected by considering the column axial force. Additionally, strengthening the joints by NSM method with steel bars rather than EBR method led to more ductile behavior. Finally, the proposed analytical method was compared with the results of the experimental specimens from other studies and 6 experimental specimens conducted in this study. Comparison of the experimental results with the values of the analytical method demonstrated that the proposed analytical method could adequately predict the behavior of beam-column joints.

Key Words: Beam-column joint, NSM strengthening, EBR strengthening, axial force variation.

different diameters 5, 10, 15, and 20 cm and three different ratios of skirt length to bucket diameter (d/D) were 0, 0.5, and 1. Similar to the first series, in the second series of experiments, the bucket foundation was subjected to a vertical loading at a ratio of saturated sand to excessive pore pressure ($ru = \Delta u/\sigma$). In these experiments, two kinds of bucket foundation with diameters of 10 and 20 cm and different buried foundation depths of 0, 0.5, and 1 were used. The results showed that skirt length and width of the foundation enhanced the bearing capacity of foundation. The bearing capacity of bucket foundation was twice more than the surface circular foundation at both ratios of pore water pressure. By increasing the ratio of pore water pressure, the reduction of bearing capacity of surface circular foundation was greater than that of bucket foundation.

Key Words: Vertical bearing capacity, bucket foundation, offshore constructions, saturated soil.

FEASIBILITY STUDY ON PROMOTING THE VALUE OF LARGE-SCALE CONSTRUCTION PROJECTS USING THE COMBINATION OF VALUE ENGINEERING AND THE ANFIS METHOD

A. Tajaddini (corresponding author)

a.tajaddini@kiau.ac.ir

P. Aalipour

aalipour@kiau.ac.ir

A. Paydar

a.paydar@iaumalard.ac.ir

S. Kashian

s.kashian@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering

Karaj branch, Islamic Azad University

DOI:10.24200/J30.2022.60060.3082

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 13-22, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 3 April 2022; received in revised form 22 August 2022; accepted 5 September 2022.

Abstract

Value Engineering (VE) enables project managers to discover the size and location of problems in a project and to mitigate any potential backwardness. The current

research aimed to find major impressive criteria and to measure their impact level on promoting the value of large-scale/mega projects using VE concepts. The hindrance and obstacles available in the application of VE in construction engineering were considered to ensure the accuracy. The main research objective was to forecast the effect of quality, cost, and time factors on the project value using an adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) model. To create the ANFIS model, the required data were collected through a five-point scale Likert questionnaire, by which the expert opinions were obtained, and pairwise comparisons of the items were accomplished. The model was created using MATLAB. The statistical population was adopted from the experts and managers working in a large-scale project who were familiar with the concepts and details of VE and project management. According to the literature, more than 50 VE criteria were found, which were then reduced to 25 criteria based on experts' opinions. These final criteria were categorized into three groups: cost, time, and quality. Afterwards, the data collected via the questionnaires were analyzed by the ANFIS model. Before completing the calculations, validity and reliability of the analytical model were investigated to ensure that the results are both valid and reliable enough for further use. The results showed that the criterion entitled 'proper programming ...' had the highest impact on promoting the projects value, while the criterion entitled 'prevention of work and responsibility interference ...' had the least influence. Both of the mentioned criteria were situated in the group of cost, indicating the higher importance of this group than that of the other groups.

Key Words: Value engineering; analytical model; large-scale construction projects; ANFIS method.

LABORATORY STUDY OF THE EFFECT OF ADDING GLASS FIBERS ON REACTIVE POWDERED CONCRETE

A. Heidari (corresponding author)

heidari@sku.ac.ir

F. Naderi

Fariidnaderi@gmail.com

Faculty of Civil Engineering

Shahrood University

DOI:10.24200/J30.2022.60199.3098

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 38, Issue 4.1, Page 25-36, Original Article

© Sharif University of Technology

Abstracts of Papers in English

EVALUATION OF THE VERTICAL BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT OF BUCKET FOUNDATION IN SATURATED SAND

S. Aghadadashi

sdaghadadashi@semnan.ac.ir

A. Haddad (corresponding author)

ahadad@semnan.ac.ir

Faculty of Civil Engineering
Semnan University

S.M.H. Khatami

mkhatami@tvu.ac.ir

Dept. of Civil Engineering
Technical and Vocational University
DOI:10.24200/J30.2022.58608.2986

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 38, Issue 4.1, Page 3-11, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 14 August 2021; received in revised form 4 September 2022; accepted 11 September 2022.

Abstract

The rapid growth of the demand for renewable energy and the development of infrastructure in offshore area in order to produce the green energy have attracted the attention of many researchers. One of the well-known foundations used for offshore wind turbines is bucket foundation. In this study, the behavior of bucket foundations in saturated sandy soil at different levels of pore water pressure ratios was investigated via physical modeling approach to reach a better understanding of such foundations.

A large soil container of 1.20 m in length, 0.9 m in width, and 0.9 m in height was selected. The Boblosar sand was chosen for experimental tests and is classified as poorly graded sand (SP) categorized by unified soil Classification system (USCS). Excessive pore water pressure could be applied in the soil medium by upward seepage. The problem was investigated for excessive pore water pressure ratios of 0 and 1. Two series of experiments were conducted to study the behavior of bucket foundation under vertical loading. In the first series of experiments, the bucket foundation was loaded by a vertical load in saturated sand without any excessive pore water pressure. Four kinds of bucket foundation were used with

Civil Engineering

Sharif

4.1

Winter
2023

Editor-in-Chief: Mohsen Ghaemian

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and 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 **EVALUATION OF THE VERTICAL BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT OF BUCKET FOUNDATION IN SATURATED SAND**
S. Aghadadadashi, A. Haddad and S.M.H. Khatami
- 13 **FEASIBILITY STUDY ON PROMOTING THE VALUE OF LARGE-SCALE CONSTRUCTION PROJECTS USING THE COMBINATION OF VALUE ENGINEERING AND THE ANFIS METHOD**
A. Tajaddini, P. Aalipour, A. Paydar and S. Kashian
- 25 **LABORATORY STUDY OF THE EFFECT OF ADDING GLASS FIBERS ON REACTIVE POWDERED CONCRETE**
A. Heidari and F. Naderi
- 37 **ANALYSIS AND STRENGTHENING OF RC EXTERIOR BEAM-COLUMN JOINTS CONSIDERING COLUMN AXIAL FORCE VARIATION**
S. Ziaalhagh and M. Esfahani
- 53 **INVESTIGATION OF PERIODIC RESONATORS AS WAVE BARRIERS FOR MITIGATING SURFACE SEISMIC WAVES USING BLOCH-FLOQUET THEORY**
Sh. Amanat and R. Rafiee-Dehkharghani
- 61 **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHAFT SURFACE GEOMETRY OF TAPERED PILE GROUP WITH CIRCULAR AND SQUARE CROSS-SECTIONS ON BEARING CAPACITY AND GROUP EFFICIENCY INQUIRY**
A. Shabanpour and M. Ghazavi
- 73 **SEISMIC CONTROL OF BENCHMARK HIGHWAY BRIDGE USING SEMI-ACTIVE CONTROL SYSTEM AND SELF-TUNING FUZZY CONTROLLER**
S. Abrishami, A. Karamodin and M.R. Akbarzadeh Totonchi

RESEARCH NOTE:

- 85 **THE EFFECT OF KNOWLEDGE MANAGEMENT INFRASTRUCTURE THROUGH KNOWLEDGE MANAGEMENT PROCESSES ON THE PERFORMANCE OF TEMPORARY TEAMS IN THE PROJECT**
S. Dehghani, H. Arbabi and M.H. Sobhiyah

APPENDIX

- 103 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**