



مقالات پژوهشی:

- مطالعه عددی رفتار میراگرهای لانه زنبوری موجود در
طرش معرزی مهر طهران و مهاد جعفری
- مقایسه رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کنبه و بینتهی آرماتور کششی طولی
حمید حسن زاده و محمد کاظم شریزاد
- بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن میکندولنی حاوی باگاس و لیکا
طرش عاقل و سید احمد برسی
- شناسایی آسیب سازه های فولادی با استفاده از به روز رسانی مدل اجزاء محدود و بر پایه داده های کرنش
ترکین فلاح، سید روح الله حسینی واعظ و اکبر اسفندیاری
- بررسی اثر المان های موجود در پوست تقم مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر
آونسا وثیق، دانیال معظمی و شهرام پوراکبر
- تصفیه ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسما ی سرد
مسعود خجسته، محمد دلاز و حسن مهدیان
- تحلیل موانع پیاده سازی مدل سازی اطلاعات ساخت در پروژه های خصوصی صنعت ساخت ایران
حمیدرضا اطهری نیکو روان و محمود گلچینی
- کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه های بتن غلتکی حجیم با استفاده از زئولیت
علی صراف، امیرمحمد رضاییانپور و سید مهدی زهرانی
- ارزیابی ریزساختاری تأثیر نحوه ی عمل آوری در فرایند تثبیت/اجامه سازی پایه ی سیمانی در بتونیت آلوده به یون سرب
وحیدرضا ارحدی، بهنام یوسفی و ریحانه صفادوست
- تأثیر مودهای بالاتر از تعامی در ساختمان های دارای جداگر پایه 'پاندولی تکی' با پلان نامنظم
مهدی امیری، عبدالرضا سروقه مقدم، آرمن عطیعی زاده و محمدرضا منصوری
- بررسی اثر چرخه خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه ی رس دار
نگین فیادپور، محمود حسنوراد و فراد کیلانی

یادداشت فنی:

- بهینه سازی نیروی پیش کشیدگی کابل ها در پل های کابلی ایستا با ساده سازی مدل سازه به همراه مطالعه ی موردی: پل لالی
میت رون و امیررضا فانی آزاد

ARTICLES:

- Numerical Study of Corrugated Honeycomb Dampers
A.R. Moazzezi Mehrehtehran and M. Jafari
- Comparison of Flexural Behavior and Cracking Pattern of RC and SFRC Beams Reinforced with Minimum and Maximum Longitudinal Tensile Bars
H. Hasanzade and M.K. Sharbatdar
- Laboratory Study of Impact Effects on Lightweight Concrete Containing Bagasse and LECA
A.R. Khaloo and S.A. Borsi
- Damage Detection of Steel Structures Through FEM Updating Based on Strain Data
N. Fallah, S.R. Hoseini Vaez and A. Estandari
- Investigation of the Effect of Elements in Industrial Wastes Used in Clay Stabilization by Geopolymer Method
A. Vesigh, D. Moazami and SH. Pourakbar
- Treatment of Tartrazine Dye Wastewater by a Cold Atmospheric Plasma Process
M. Khojasteh, M. Delnavaz and H. Mehdian
- Analysis of Barriers to Implementing BIM in AEC Private Projects: An Iranian Approach
H.R. Athari Nikoosavan and M. Golabchi
- Reducing the Negative Effects of Construction Joints in Roller Compacted Mass Concrete Structures Using Zeolite
A. Sarafi, A.M. Ramezaniannipour and S.M. Zahrai
- Micro-Structural Evaluation of the Impact of Curing Method on the Process of Cement Based Stabilization/Solidification of Pb Ion-Contaminated Bentonite
V.R. Ouhadi, B. Yousefi and R. Safadoust
- Higher Mode Effects on Friction Pendulum Base Isolated Asymmetric Buildings
M. Amri, A. S. Moghadam, A. Aziminejad and M.R. Mansoori
- Study of Wetting and Drying Cycle Effect on the Clayey Sandy Soil Permeability
N. Ghobadpour, M. Hassanlourad and F. Kilanehei

RESEARCH NOTE:

- Optimization of Cable Pre-Tensioning Force in Cable-Stayed Bridges by Simplifying the Structural Model with a Case Study of Lali Bridge
M. Ravan and A.R. Ghiami Azad

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سردبیر: دکتر میرمصدق جمالی

سردبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

مدیر داخلی: پوران خیرمندی

مسئول روابط عمومی: محمدرضا یوسف خان

ویرایش: رزیتا رستمخیز پایدار

حروفچینی: ساناز نادری، راضیه قربانی و مریم علی کرمی

صفحه آرایی: غزل احمدی میرقائد

امور اجرایی: شیمیا آل اسداله، مریم پورابراهیمی باوفا

مجله‌ی مهندسی عمران شریف در پایگاه‌های DOAJ، ISC و SID نمایه می‌شود.

نشانی: تهران / صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۰ ۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰ ۹۳

نمابر: ۶۶۰ ۱۲۹۸۳

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

رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بیتا آیتی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر همایون استکانچی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی پاک

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیررضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر حسین رحامی

دانشکده علوم مهندسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دکتر فیاض رحیم زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیر صمیمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ناصر طالب بیدختی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

دکتر محسن قائمیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدجواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی صاحبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر حسن میرزابزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علی نورزاد

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

دکتر جواد واثقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه تخصصی

• سردبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احمد ابریشم‌چی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانچی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افشار

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخوردار

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسنیمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حسن حاجی کاظمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سیدمحسن حائری

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا خوبی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیم‌زاده

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیاپور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدمهدی زهرایی

دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدمهدی سعادت‌پور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه باهنر کرمان

دکتر مجید صادق آذر

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر ناصر طالب بیدختی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمجیدالدین 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 هانی اربابی

دانشکده‌ی هنر و معماری - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر امین ایرجی

دانشکده‌ی فنی خوی - دانشگاه ارومیه

دکتر فرهاد بهنام‌فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر مجید پرچی جلال

دانشکده‌ی معماری، پردیس هنرهای زیبا - دانشگاه تهران

دکتر عباس پوردیلمی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه دامغان

دکتر اکبر چشمی

دانشکده‌ی زمین شناسی - دانشگاه تهران

دکتر علی حیدری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهرکرد

دکتر حسین رحامی

دانشکده‌ی علوم پایه و مهندسی - دانشگاه تهران

دکتر فریدون رضایی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی‌سینا

دکتر احسان سقط فروش

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه آفریقای جنوبی

دکتر عباس سیوندی‌پور

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه کرمان

دکتر محمد شوشتری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی‌سینا

دکتر عباس قدمی بدرلو

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید مدنی

دکتر حسین خزیمه نژاد

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بیرجند

دکتر مجتبی لژکی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه حکیم سبزواری

دکتر شروین ملکی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی صاحبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید رجایی

دکتر علیرضا نگهدار

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه قم

مقالات پژوهشی:

- ۳ مطالعه‌ی عددی رفتار میراگرهای لانه‌زنبوری موجودار
علیرضا معززی مهر طهران و مهرداد جعفری
- ۱۵ مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمیت و بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی
حمید حسن‌زاده و محمدکاظم شریبتدار
- ۲۹ بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن سبک‌دانه‌ی حاوی باگاس و لیکا
علیرضا خالو و سید احمد برسی
- ۳۹ شناسایی آسیب سازه‌های فولادی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود و بر پایه‌ی داده‌های کرنش
نرگس فلاح، سید روح‌الله حسینی واعظ و اکبر اسفندیاری
- ۵۱ بررسی اثر المان‌های موجود در پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر
آتوسا وثیق، دانیال معظی و شهرام پوراکبر
- ۵۹ تصفیه‌ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد
مسعود خجسته، محمد دلنواز و حسن مهدیان
- ۶۹ تحلیل موانع پیاده‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌های خصوصی صنعت ساخت ایران
حمیدرضا اطهاری نیکوروان و محمود گلابچی
- ۸۱ کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از ژئولیت
علی صراف، امیرمحمد رمضانپور و سید مهدی زهرائی
- ۹۳ ارزیابی ریزساختاری تأثیر نحوه‌ی عمل‌آوری در فرایند تثبیت/جامدسازی پایه‌ی سیمانی در بنتونیت آلوده به یون سرب
وحیدرضا اوحدی، بهنام یوسفی و ریحانه صفادوست
- ۱۰۳ تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه «پاندولی تکی» با پلان نامنظم
مهدی امری، عبدالرضا سروقد مقدم، آرمین عظیمی‌نژاد و محمدرضا منصوری
- ۱۱۵ بررسی اثر چرخه‌ی خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار
نگین قبادپور، محمود حسناوراد و فواد کیلانه‌ای

یادداشت فنی:

- ۱۲۵ بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا با ساده‌سازی مدل سازه به همراه مطالعه‌ی موردی: پل لالی
میثم رون و امیررضا قیامی آزاد

ضمائم:

- ۱۴۱ چکیده مقالات به انگلیسی

مطالعه‌ی عددی رفتار میراگرهای لانه‌زنبوری موجدار

علیرضا معززی مهر طهران* (استادیار)

مهرداد جعفری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریفمهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۳-۳، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی به نام میراگر لانه‌زنبوری موجدار ارائه شده است. از مزایای میراگر پیشنهادی می‌توان به سادگی در ساخت و اجرای آن ضمن ارائه‌ی رفتار پایدار تحت بارگذاری جانبی اشاره کرد. شکل پایه‌ی میراگر لانه‌زنبوری متشکل از دو ورق خم‌کاری شده به شکل دوزنقه است، که با استفاده از جوش به یکدیگر متصل می‌شوند و هندسه‌ی لانه‌زنبوری را ایجاد می‌کنند. در پژوهش حاضر، ابتدا رابطه‌ی تحلیلی سختی اولیه‌ی میراگر به دست آمده است. سپس در شبیه‌سازی عددی با اعمال بارگذاری یکنواخت و چرخه‌یی، رفتار میراگر در ناحیه‌های خطی و غیرخطی بررسی شده است. به منظور برآورد تأثیر مشخصه‌های هندسی در رفتار میراگر، مطالعه‌ی پارامتری بر روی دوازده نمونه انجام و نتایج متناظر ارائه شده است. همچنین، براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی، سختی مؤثر، میرایی معادل و مدل سه‌خطی رفتار میراگر جهت استفاده در طرح عملی سازه‌ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی: میراگر فلزی تسلیمی، هندسه‌ی لانه‌زنبوری، تحلیل غیرخطی، رفتار چرخه‌یی، روش اجزاء محدود.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های بهبود عملکرد سازه‌ها در مقابل زلزله، کنترل غیرفعال سازه است. کنترل غیرفعال، شامل استفاده از ابزارهای مختلفی، مانند: جداسازهای پایه، میراگرهای جرمی، میراگرهای اصطکاکی و تسلیمی است. میراگرهای تسلیمی، انرژی ورودی زلزله را با استفاده از رفتار خمیری مصالح خود مستهلک می‌کنند. از مزیت‌های میراگر تسلیمی می‌توان به هزینه‌ی ساخت پایین، رفتار پایدار در شرایط محیطی مختلف و نیز آشنایی مهندسان با مصالح و رفتار پایه‌ی آنها اشاره کرد. مفهوم اولیه‌ی استفاده از میراگرها برای جذب انرژی در سال ۱۹۷۲، توسط کلی^۱ و همکاران،^۱ ارائه و استقبال قابل توجهی از آن شده است. برگمن^۲ (۱۹۸۷)،^۲ میراگر ADAS^۳ را ارائه کرد، که یکی از شناخته شده‌ترین میراگرهای تسلیمی است. تسای^۴ و همکاران،^۳ نیز با بهینه‌سازی شکل ADAS، میراگر TADAS^۵ را در سال ۱۹۹۳ ارائه کردند. میراگر TADAS از چند ورقه‌ی مثلی، که به شکل موازی به هم وصل شده‌اند، تشکیل و در بارگذاری جانبی با استفاده از رفتار خمشی ورق‌های مذکور، انرژی ورودی اتلاف می‌شود. ناکاشیما^۶ و همکاران (۱۹۹۴)،^۴ با استفاده از ورق فولادی ساخته شده از مصالح با تنش تسلیم پایین^۷، میراگر SPD^۸ را ارائه داده‌اند، که با رفتار برشی، انرژی ورودی را تلف می‌کند. چن^۹ و همکاران

* نویسنده مسئول

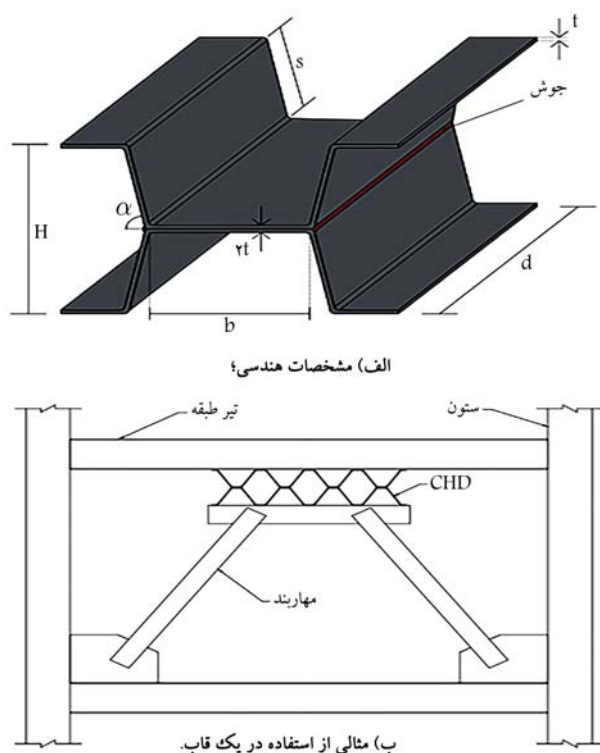
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2022.60894.3130

استناد به این مقاله:

معززی مهر طهران، علیرضا و جعفری، مهرداد، ۱۴۰۲. مطالعه‌ی عددی رفتار میراگرهای لانه‌زنبوری موجدار. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۳-۳.

(۲۰۰۶)،^۵ با به کارگیری بهینه‌ی سخت‌کننده‌های قائم و افقی، رفتار میراگر SPD را بهبود بخشیده و میراگر SSPD^{۱۰} را معرفی کرده‌اند؛ که با آن، تغییر جذب انرژی بیشتر شده و همچنین هیچ نشانه‌یی از باریک‌شدگی^{۱۱} و افت مقاومت در میراگر SSPD مشاهده نشده است. ملکی و باقری (۲۰۱۰)،^۶ میراگر PD^{۱۲} را ارائه دادند. در ادامه، برای بهبود برخی از مشخصه‌های مکانیکی PD، ملکی و محجوبی (۲۰۱۳)،^۷ میراگر DPD^{۱۳} را معرفی کردند، که در ساخت آن از دو لوله‌ی فولادی، که در نقاط مشخصی به یکدیگر جوش شده‌اند، استفاده شده است. چراغی و همکاران (۲۰۱۷)،^۸ میراگر PIP^{۱۴} را ارائه داده‌اند، که از دو لوله‌ی درون هم تشکیل شده است؛ که با توجه به هندسه آن می‌تواند به شکل دوسطحنی عمل کند. در زمین‌لرزه‌های کوچک، فقط لوله‌ی بیرونی تغییرشکل خواهد داشت و اگر تغییرمکان‌ها از حدی که در طراحی در نظر گرفته شده است فراتر برود، سختی و مقاومت نیرویی لوله‌ی داخلی نیز وارد عمل خواهد شد. این موضوع باعث می‌شود در تغییرمکان‌های نسبتاً بزرگ، میراگر PIP سختی مضاعفی داشته باشد، که در زلزله‌های بزرگ مفید خواهد بود. امیری و همکاران (۲۰۱۸)،^۹ میراگر BSD^{۱۵} را معرفی کردند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی آنها نشان داد که میراگر BSD، جذب انرژی بالایی دارد و با برآورده کردن شرایط هندسی مشخصی، می‌تواند به شکل کمانش‌تاب عمل کند، که این امر موجب بهبود رفتار چرخه‌یی میراگر می‌شود. لی و همکاران (۲۰۱۹)،^{۱۰} میراگر SBC^{۱۶} را ارائه کرده‌اند، که پیکربندی آن ترکیبی



شکل ۲. میراگر لانه‌زنبوری موجودار.

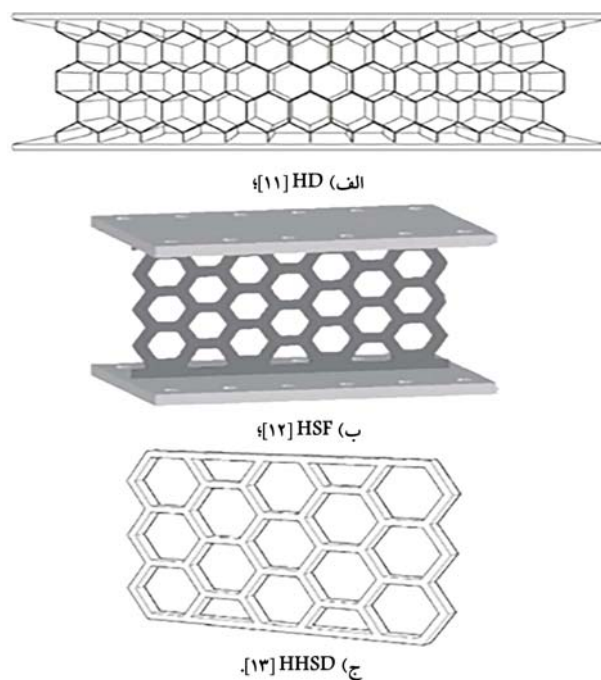
عمق در بازه ۵ الی ۱۲ میلی‌متر بوده است. در واقع عملکرد میراگرهای HSF [۱۲] و HHSD [۱۳] غالباً به شکل صفحه‌یی بوده است، در حالی که میراگر CHD در خمش و کشش عمل می‌کند. ماحصل شکل انتخابی برای میراگر لانه‌زنبوری موجودار منجر به بهبود رفتار چرخه‌یی میراگر شده است، که در قسمت‌های آتی با جزئیات بیشتر به آن پرداخته شده است.

درگام نخست پژوهش حاضر، رابطه‌ی تحلیلی سختی میراگر در ناحیه‌ی کشسان به دست آمده است. در ادامه، برای بررسی رفتار میراگر، از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن مؤلفه‌های هندسی مشخص شده در شکل ۲ - الف، نمونه‌های مختلفی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌یی تحلیل شده‌اند. بدین ترتیب، ضمن مطالعه‌ی رفتار میراگر تحت بارگذاری جانبی، تأثیر هر یک از مؤلفه‌های هندسی جهت دست‌یابی به هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر مشخص شده است. همچنین براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی انجام شده، سختی مؤثر، میرایی معادل و مدل سه‌خطی رفتار میراگر جهت امکان استفاده در طرح عملی سازه‌ها ارائه شده است.

۲. مطالعه‌ی تحلیلی

رابطه‌ی تحلیلی سختی اولیه‌ی میراگر CHD با استفاده از تحلیل ماتریسی به دست آمده است. برای این کار، مدل ساده شده‌ی میراگر CHD مطابق شکل ۳ انتخاب شده است. با توجه به محل جوش بین دو قطعه‌ی میراگر، صفحه‌های محل تماس دو قطعه‌ی میراگر به شکل مجزا از هم عمل می‌کردند و در نتیجه لازم بود بین دو گره ۳ و ۴، از دو آلان مجزا با عرض d و ارتفاع t استفاده شود.

برای مدل‌سازی اعضاء میراگر از آلان‌های تیر - ستون با ماتریس سختی ارائه شده در رابطه ۱ و منطبق بر درجه‌های آزادی (DOF) [۲۳] در شکل ۴ استفاده

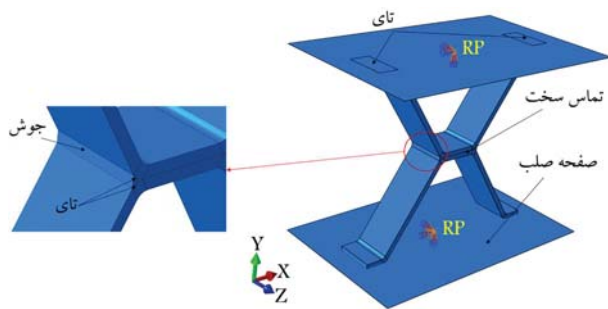


شکل ۱. میراگرهای پیشین مبتنی بر هندسه‌ی لانه‌زنبوری.

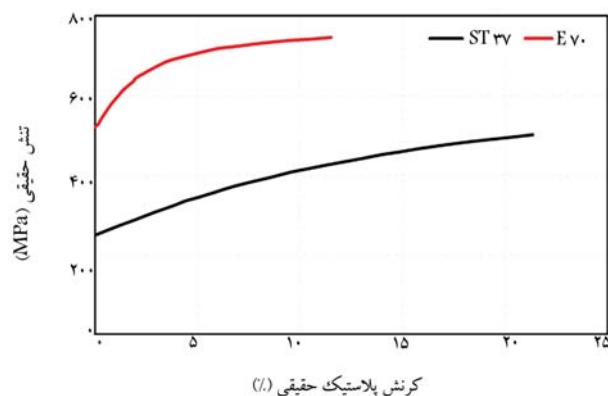
از میراگرهای ADAS و SP [۱۷] است و بدین ترتیب، هم‌زمان از دو مکانیزم رفتار خمشی و برشی بهره می‌گیرد. در میراگر SBC، مقاومت خارج از صفحه‌ی عنصر برشی (SP) با به کارگیری ورق‌های فولادی عنصر خمشی (ADAS)، بهبود یافته و بدین ترتیب میراگر ارائه شده، عملکرد مناسب‌تری نسبت به هر کدام از میراگرهای پایه به تنهایی داشته است.

یکی از پیکر بندی‌هایی که اخیراً برای میراگرهای تسلیمی به آن توجه شده است، استفاده از هندسه‌ی لانه‌زنبوری است. در همین راستا، لی و همکاران [۱۷] (۲۰۱۷)، [۱۸] میراگر HD را ارائه داده و با شبیه‌سازی عددی، رفتار میراگر مذکور را مطالعه و امکان استفاده از آن در بهبود مشخصه‌های لرزه‌یی سازه‌های جدید و موجود را بررسی کرده‌اند. یانگ و همکاران [۲۰] (۲۰۲۰)، [۲۱] میراگر HSF را ارائه داده و جهت بررسی رفتار آن، ۹ نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار داده‌اند. نتایج به دست آمده‌ی ایشان، بیان‌گر جذب انرژی مناسب میراگر HSF تا نسبت گریز ۴۰٪ هدف بود. در نهایت، جوانمردی و همکاران [۲۰] (۲۰۲۰)، [۲۲] میراگر HHSD را معرفی کردند. ایشان برای ایجاد هندسه‌ی لانه‌زنبوری در میراگر ذکر شده، از برش‌کاری ورق فولادی استفاده و طی مطالعات عددی و آزمایشگاهی، اثر مشخصه‌های هندسی را در رفتار میراگر HHSD بررسی کرده‌اند. در شکل ۱، نمای میراگرهای پیشین مبتنی بر هندسه‌ی لانه‌زنبوری مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای لانه‌زنبوری، به نام میراگر لانه‌زنبوری موجودار (CHD) [۲۲] معرفی شده است، که نمای آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. شکل پایه‌ی میراگر CHD، متشکل از دو ورق خم‌کاری شده به شکل ذوزنقه است، که با استفاده از جوش به یکدیگر متصل شده و هندسه‌ی لانه‌زنبوری را ایجاد کرده‌اند. جهت قرارگیری سلول‌های لانه‌زنبوری میراگر پیشنهادی CHD، ۹۰ درجه با میراگر لی و همکاران [۱۷] (۲۰۱۷)، [۲۱] تفاوت دارد (بنا به تحلیل‌های انجام شده توسط نویسندگان، این امر باعث بهبود رفتار میراگر می‌شود). ساخت میراگر CHD با استفاده از خم‌کاری ورق‌های فولادی، امکان اعمال عمق‌های متفاوت (مؤلفه‌ی d در شکل ۲ - الف) را فراهم می‌کند. شایان توجه است در پژوهش‌های پیشین، پیشینه‌ی



شکل ۵. مدل اجزاء محدود میراگر لانه زنبوری موجدار.



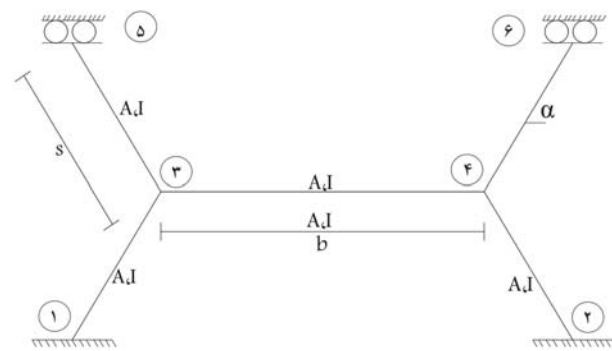
شکل ۶. نمودار تنش - کرنش حقیقی مصالح. [۱۵ و ۱۶]

جوش به یکدیگر متصل شده‌اند. برای برآورد دقیق‌تر رفتار میراگر، جوش دو ورق دوزنقه‌بی به یکدیگر به شکل سه‌بُعدی در نظر گرفته شده است. شعاع خم ورق‌های فولادی به اندازه‌ی ضخامت ورق انتخاب شده است. صفحه‌های اتصال‌دهنده‌ی میراگر به قاب اصلی با المان صفحه‌بی صلب و ورق‌های دوزنقه‌بی میراگر و جوش با المان‌های حجمی C3D8R مدل‌سازی شده‌اند. همچنین اتصال میراگر به صفحه‌های صلب با استفاده از قید تای^{۲۴} و مدل‌سازی برهم‌کنش صفحات میراگر در ناحیه‌ی اتصال با یکدیگر به کمک قید تماس سخت^{۲۵} صورت گرفته است.

بر اساس مطالعات حساسیت‌سنجی، از اندازه‌ی مش ۱ الی ۲/۵ میلی‌متر در راستای طولی و عرضی (۴ المان در ضخامت ورق) و ۱۰ میلی‌متر در راستای عمق میراگر استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی نمونه در صفحه‌های صلب پایین و بالا به صورت کاملاً گیردار اعمال شده و تنها امکان حرکت جانبی هم‌راستا با بارگذاری (محور x در شکل ۵) در صفحه‌ی فوقانی وجود داشته است.

مصالح استفاده شده برای فولاد از جنس ST-۳۷ با مدول یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال و الکتروود از نوع E70 بوده است، که نمودار تنش - کرنش آنها از پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین استخراج شده است (شکل ۶). [۱۵ و ۱۶]

برای شبیه‌سازی خرابی مصالح، در پژوهش حاضر از مدل خرابی شکل‌پذیر^{۲۶} استفاده شده است. در روش مذکور فرض بر این است که شکست در اثر رشد، گسترش و به هم پیوستن حفره‌هایی که به صورت اجتناب‌ناپذیری در هر ماده‌یی وجود دارند، ایجاد می‌شود. در معیار خرابی اخیر، کرنش شروع خرابی به عنوان تابعی از



شکل ۳. مدل تحلیلی ساده شده‌ی میراگر لانه زنبوری موجدار.



شکل ۴. درجه‌های آزادی المان تیر - ستون.

شده است. درگام نخست، لازم است ماتریس سختی هر یک از اعضا به دست آید. ماتریس سختی کل سازه نیز با سرهم‌بندی ماتریس‌های سختی تمامی اعضا تشکیل شده است.

$$k_{el} =$$

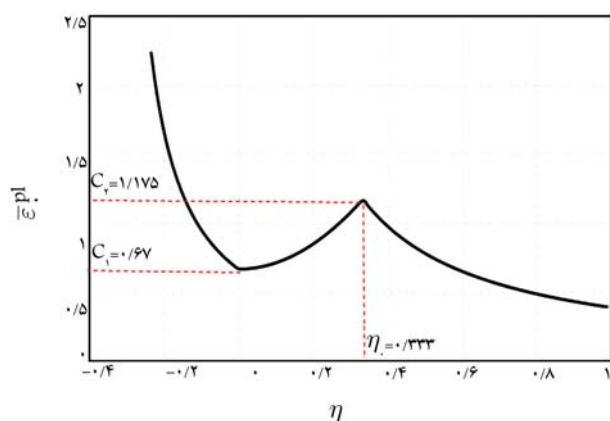
$$\begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، $A = d \times t$ ، مساحت و $I = \frac{dt^3}{12}$ ، ممان اینرسی اعضا هستند. با داشتن ماتریس سختی کل سازه و اعمال بار واحد به دو درجه‌ی آزادی انتقالی گره‌های ۵ و ۶ سازه در شکل ۳، می‌توان سختی میراگر را به دست آورد، که معادله‌ی آن در رابطه‌ی ۲ ارائه شده است. همچنین در صورتی که از چند سلول میراگر در راستای افق استفاده شود: (n_x تعداد سلول‌ها)، عملکرد مجموعه به شکل موازی و سختی معادل آنها نیز برابر با مجموع سختی سلول‌ها خواهد بود.

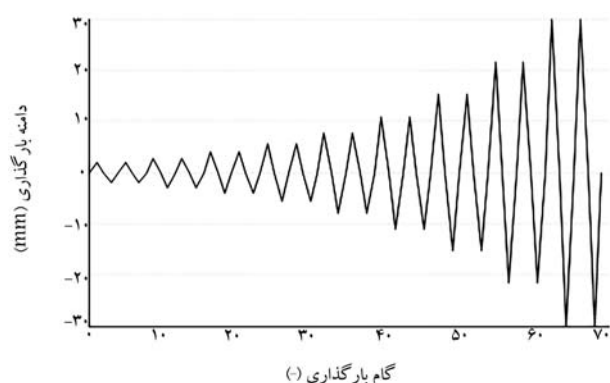
۳. شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی جامع رفتار میراگر پیشنهادی CHD از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس^[۱۴] استفاده شده است. در شکل ۵، نمای مدل کامپیوتری ساخته شده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، دو ورق دوزنقه‌بی در لبه‌های کناری به وسیله‌ی

$$K_{el,t} = n_x \times \frac{dt^3 E [(\lambda s^2 - \tau t^2) \times \cos(\alpha) + 12sb \times \cos(\alpha) + 6b^2 + \tau t^2 + b^2/s]}{b^2 \times \cos^2(\alpha) (bt^2 + 6st^2 - \tau bs^2 - 6s^2) + 12s^2 bt^2 \times \cos(\alpha) + (6b^2 + 12t^2)s^2 + 3s^2 b^2} \quad (2)$$



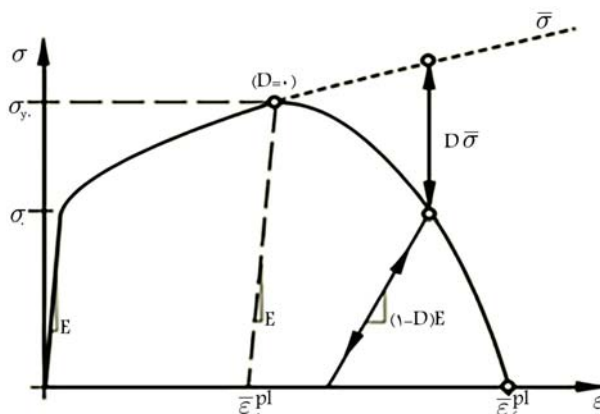
شکل ۸. مکان هندسی شروع خرابی.



شکل ۹. تاریخچه‌ی بارگذاری طبق دستورالعمل FEMA ۴۶۱.^[۲۰]

موارد دیگری که در معرفی خرابی مصالح باید تعیین شوند، مسیر خرابی و نیز کرنش خمیری گسیختگی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$) است. در پژوهش حاضر از مسیر خطی برای مدل‌سازی رفتار مصالح بین دو نقطه‌ی متناظر با کرنش $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ و $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ استفاده شده است. همچنین نرم‌افزار آباکوس برای کاهش وابستگی مدل‌سازی خرابی مصالح به اندازه‌ی مش، از تغییر طول گسیختگی (\bar{u}_f^{pl}) به جای $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ استفاده می‌کند. روش اندازه‌گیری مستقیم آزمایشگاهی برای \bar{u}_f^{pl} وجود ندارد؛ اما به عنوان معیاری برای آن می‌توان از حاصل ضرب درصد افزایش طول نمونه‌ی کششی تک‌محوری در طول گنج نمونه استفاده کرد.^[۱۹] در پژوهش حاضر، از مقدار ۰/۰۵ متر برای تغییر طول گسیختگی استفاده شده است. از آن‌جا که کرنش‌های خمیری قابل توجهی در مصالح جوش مشاهده نشده است، از اعمال خرابی مصالح برای مدل‌سازی مصالح جوش صرف‌نظر شده است.

برای بارگذاری چرخه‌ی نمونه‌ها از تاریخچه‌ی بارگذاری پیشنهادی FEMA ۴۶۱،^[۲۰] با جابه‌جایی هدف ۳۰ میلی‌متر مطابق شکل ۹ استفاده شده است. هر دامنه‌ی بارگذاری، دو چرخه تکرار می‌شود و این روند با افزایش ۴۰ درصدی دامنه‌ها ادامه خواهد داشت تا به جابه‌جایی هدف دست یابد. بدین ترتیب از دامنه‌های بارگذاری ۲/۰۳، ۲/۸۵، ۳/۹۸، ۵/۵۸، ۷/۸۱، ۹۳/۱۰، ۱۵/۳۱، ۲۱/۴۳ و ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. این میزان جابه‌جایی هدف متناظر با نسبت گریز ۱٪ برای ساختمانی با ارتفاع متعارف هر طبقه به میزان ۳ متر است. لازم به توضیح است که محل اعمال بارگذاری چرخه‌ی (از نوع جابه‌جایی کنترل) در نقطه‌ی مرجع صفحه‌ی صلب فوقانی شکل ۵ بوده است. مضافاً با توجه به انجام تحلیل شبه‌استاتیکی، نرخ بارگذاری موضوعیت ندارد.



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش با در نظر گرفتن خرابی مصالح.^[۱۴]

تنش سه‌محوری^{۲۷} مطرح است، که مقدار آن مطابق رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (3)$$

که در آن، تنش هیدرواستاتیک معادل σ_m و تنش فون - مایسز معادل $\bar{\sigma}$ به ترتیب از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5)$$

که در آنها، σ_i ها ($i=1-3$) تنش جهات اصلی هستند.

پس از رسیدن مقدار کرنش به کرنش خمیری، شروع خرابی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$)، مقدار پارامتر خرابی (D) از صفر شروع به افزایش می‌کند. مطابق شکل ۷، که با افزایش آن، میزان سختی (تانسور E) و ظرفیت تنش مصالح (تانسور σ) مطابق روابط ۶ و ۷ کاهش می‌یابد. در نهایت، زمانی که پارامتر خرابی در کرنش خمیری گسیختگی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$) برابر با مقدار واحد شود، المان کاملاً گسیخته می‌شود.

$$E = (1 - D) \times E \quad (6)$$

$$\sigma = (1 - D) \times \bar{\sigma} \quad (7)$$

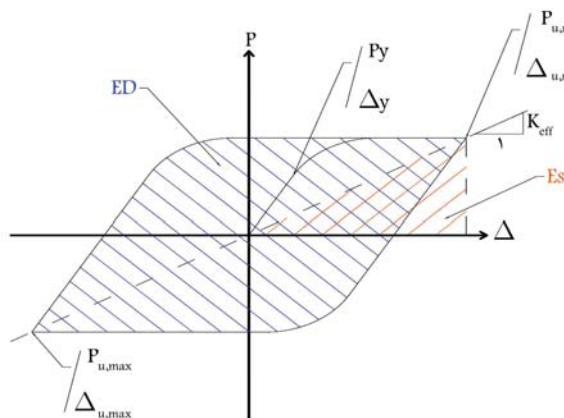
که در آنها، $\bar{\sigma}$ تانسور تنش مؤثر (تانسور تنش در غیاب خرابی) است، که در لحظه‌ی فعلی تحلیل، محاسبه شده است.

یکی از نکات کلیدی در مدل‌سازی خرابی مصالح، یافتن کرنش خمیری شروع خرابی است. در رابطه‌ی ۸، مکان هندسی متناظر پیشنهادی توسط پژوهش‌های پیشین،^[۱۷] ارائه شده است؛ که در آن، C_1 برابر با $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ در برش خالص ($\eta = 0$) و C_2 برابر با $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ در کشش تک‌محوری است ($\eta = \eta_0 = \frac{1}{3}$). این مقادیر با استفاده از نتایج آزمون کشش استاندارد کالیبره می‌شوند، که برای این منظور می‌توان از گزارش‌های پیشین استفاده کرد.^[۱۸] نمودار مکان هندسی استفاده شده در پژوهش حاضر در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

$$\bar{\epsilon}_0^{pl} = \begin{cases} \infty & \eta \leq -\frac{1}{3} \\ C_1 / (1 + 3\eta) & -\frac{1}{3} < \eta \leq 0 \\ C_1 + (C_2 - C_1)(\eta / \eta_0)^2 & 0 < \eta \leq \eta_0 \\ C_2 (\eta_0 / \eta) & \eta_0 < \eta \end{cases} \quad (8)$$

جدول ۱. ابعاد نمونه‌ها.

نمونه	متغیر	t [mm]	d [mm]	b [mm]	H [mm]	s [mm]	a [deg]
CHD-۱	Base Model	۶	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۲	t	۴	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۳		۸	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۴		۶	۲۵	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۵	d	۶	۱۰۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۶		۶	۵۰	۲۵	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۷	b	۶	۵۰	۱۰۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۸		۶	۵۰	۵۰	۱۵۰	۸۷	۶۰
CHD-۹	H(s)	۶	۵۰	۵۰	۲۰۰	۱۱۵	۶۰
CHD-۱۰		۶	۵۰	۵۰	۳۰۰	۱۷۳	۶۰
CHD-۱۱	a	۶	۵۰	۵۰	۲۰۴	۱۴۵	۴۵
CHD-۱۲		۶	۵۰	۵۰	۲۸۰	۱۴۵	۷۵



شکل ۱۱. سختی مؤثر و انرژی تلف شده در یک چرخه‌ی کامل.

انجام شده، افزایش تعداد سلول میراگر در راستای افق، تأثیر خطی در رفتار میراگر دارد، لذا در نمونه‌های انتخابی، یک سلول بررسی شده است.

پس از بارگذاری نمونه‌ها، با استفاده از نمودار چرخه‌ی حاصل می‌توان اطلاعات مختلفی مانند: سختی مؤثر، میرایی و بسکوز معادل و منحنی چندخطی معادل را به دست آورد. سختی مؤثر (K_{eff}) را می‌توان طبق رابطه‌ی ۹ و میرایی و بسکوز معادل (ξ) میراگر را می‌توان از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد:

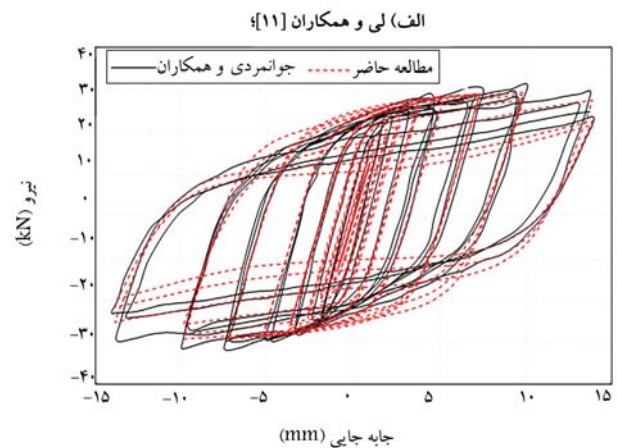
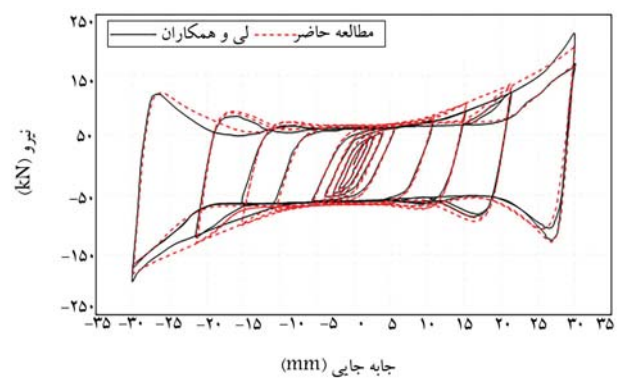
$$K_{eff} = \frac{|P_{u,max}| + |P_{u,min}|}{|\Delta u_{max}| + |\Delta u_{min}|} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \times \frac{E_D}{E_s} \quad (10)$$

که در آن، E_D انرژی جذب شده در یک چرخه‌ی کامل بارگذاری و E_s انرژی کرنشی کشسان در همان چرخه است. [۲۱] دیگر پارامترهای روابط اخیر در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

۱.۵. تأثیر ضخامت

برای بررسی تأثیر ضخامت در رفتار میراگر از سه نمونه با ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر استفاده شده است. نمودار بارگذاری چرخه‌ی نمونه‌ها در شکل ۱۲ - الف مشاهده می‌شود؛ که در آن، پاسخ مدل پایه (Base Model - (BM)) متناظر با ردیف اول جدول ۱ با رنگ مشکی و نمونه با ضخامت‌های ۴ و ۸ میلی‌متر به ترتیب با رنگ قرمز و آبی نشان داده شده‌اند. با افزایش ضخامت، میزان سختی اولیه



شکل ۱۰. راستی آزمایی پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر.

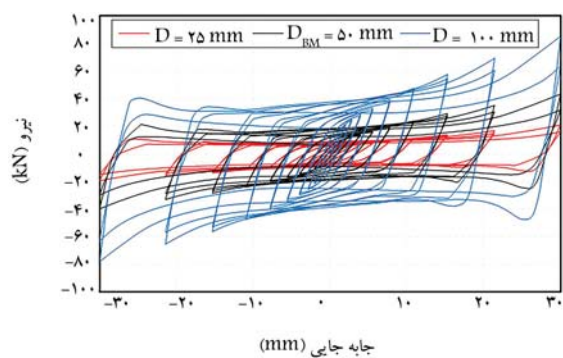
۴. راستی آزمایی مدل‌سازی

به منظور راستی‌آزمایی مدل‌سازی‌های انجام شده در مطالعه‌ی حاضر، از نتایج دو پژوهش به این شرح استفاده شده است:

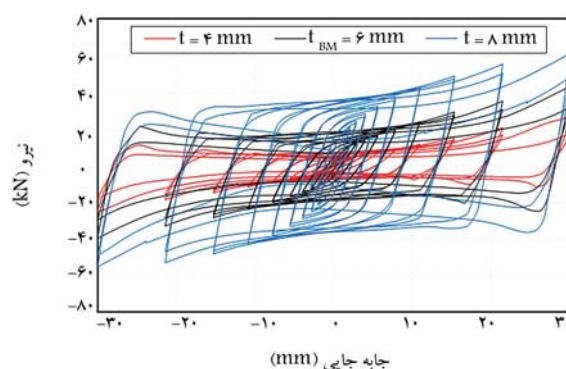
ابتدا مطالعه‌ی لی و همکاران (۲۰۱۷)، [۱۱] که از مدل مصالح غیرخطی استفاده کرده‌اند، بررسی شده است. سپس به پژوهش جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰)، [۱۳] که علاوه بر مصالح غیرخطی، خرابی مصالح را نیز در نظر گرفته‌اند، پرداخته شده است. مبنی بر توضیحات اخیر، درگام نخست، میراگر نمونه‌ی ۱ (HD-۱) پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷)، [۱۱] تحت بارگذاری چرخه‌ی بررسی شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ - الف؛ تطابق مناسبی بین مطالعه‌ی حاضر و پژوهش مذکور وجود داشته است. نمودار رفتار چرخه‌ی نمونه‌ی شماره‌ی ۱ (HHSD-۱) پژوهش جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰)، [۱۳] در شکل ۱۰ - ب مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن مدل خرابی مصالح نیز همچنان تطابق بسیار خوبی بین نتایج ملاحظه می‌شود.

۵. مطالعه‌ی پارامتری

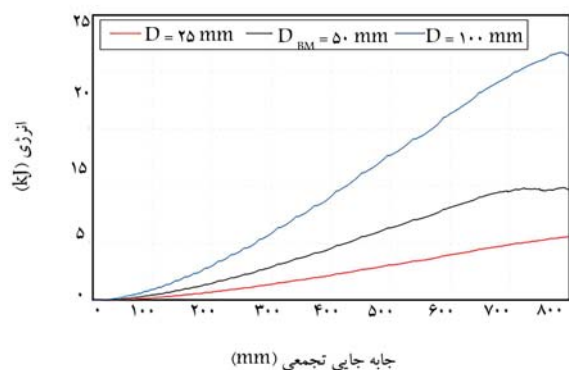
جهت بررسی عملکرد میراگر لانه‌زنبوری موجود، ۱۲ نمونه مطابق جدول ۱ انتخاب شده است. پارامترهای جدول مطابق با نامگذاری شکل ۲ - الف هستند. بدیهی است در صورت نیاز به تراز مقاومت یا جذب انرژی بالاتر می‌توان از نمونه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر یا ضخامت بیشتر استفاده کرد. لازم به ذکر است که با توجه به بررسی‌های



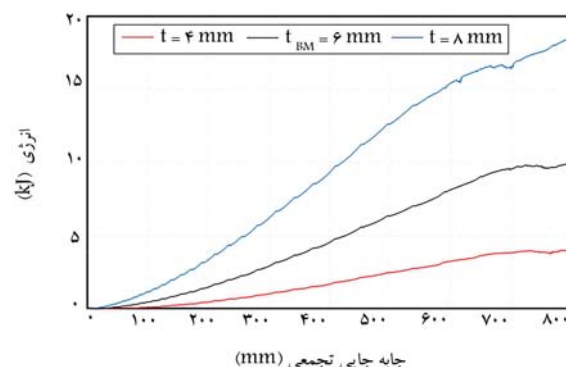
الف) رفتار چرخه‌یی؛



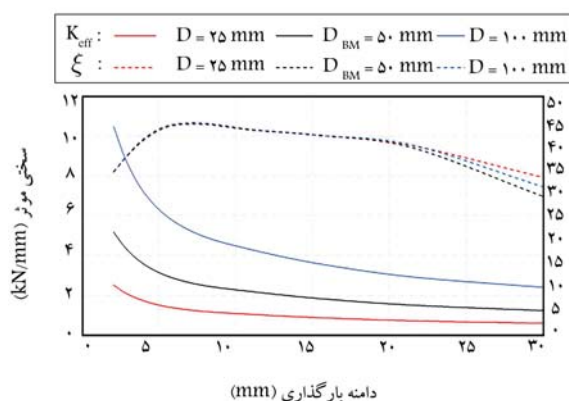
الف) رفتار چرخه‌یی؛



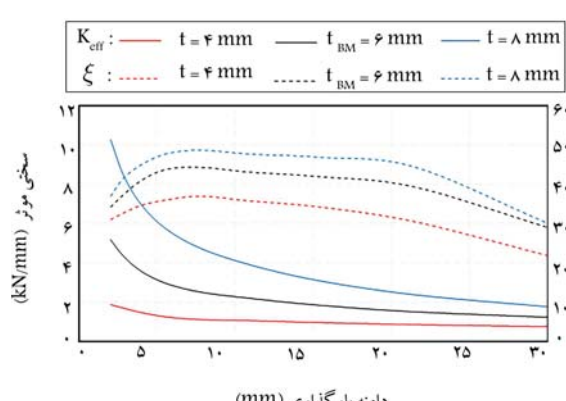
ب) انرژی جذب شده؛



ب) انرژی جذب شده؛



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.

شکل ۱۳. تأثیر عمق.

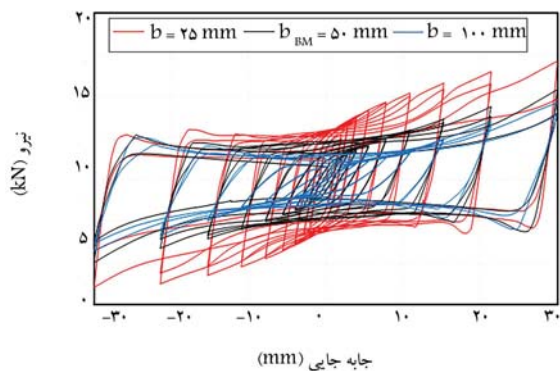
شکل ۱۲. تأثیر ضخامت.

در بازه‌ی ۲۰ الی ۵۰ درصد بوده و با افزایش ضخامت میزان میرایی و همچنین سختی معادل افزایش داشته است. سختی مؤثر میراگر پس از رسیدن به حد تسلیم، به شکل قابل توجهی کاهش یافته و با افزایش ضخامت میراگر، نسبت کاهش سختی مذکور، نمایان‌تر شده است.

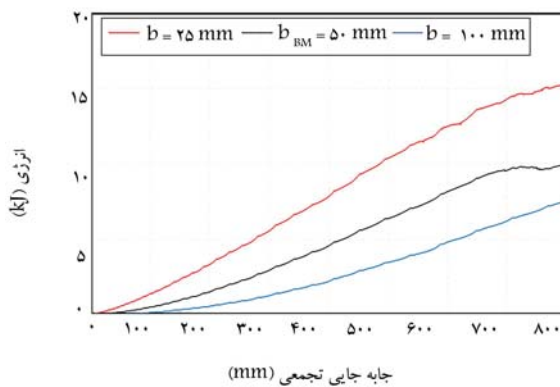
۲.۵. تأثیر عمق

در بخش حاضر، به بررسی اثر عمق در پاسخ‌های میراگر پرداخته شده است. نمودار نیرو - تغییرمکان بارگذاری چرخه‌یی نمونه‌ها در شکل ۱۳ - الف مشاهده می‌شود. هر سه نمونه، رفتار چرخه‌یی پایدار و متقارن داشته و با افزایش عمق، سختی و مقاومت نهایی میراگر افزایش یافته است. بیشینه‌ی نیروی مقاوم نمونه با عمق ۱۰۰

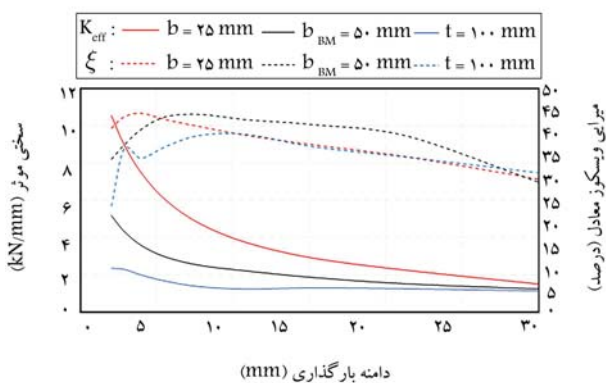
و مقاومت نهایی میراگر به شکل قابل توجهی افزایش یافته است. رفتار چرخه‌یی هر سه نمونه: پایدار، متقارن و بدون اثری از زوال مقاومت و سختی بوده است. عمده‌ی رفتار میراگر لانه‌زنبوری موجدار، عملکرد کششی و خمشی آن است. با افزایش ضخامت، میزان مصالح مشارکت‌کننده افزایش داشته و باعث چاق‌تر شدن نمودارهای چرخه‌یی شده است. مطابق شکل ۱۲ - ب، با افزایش ضخامت و چاق شدن نمودارهای چرخه‌یی، انرژی جذب شده نیز بهبود یافته است؛ به طوری که با افزایش ضخامت از ۴ به ۶ و از ۶ به ۸ میلی‌متر به ترتیب انرژی جذب شده ۱۴۱ و ۹۱ درصد افزایش داشته است. در شکل ۱۲ - ج، سختی مؤثر و میرایی و اسکور معادل مشاهده می‌شود؛ که از منحنی‌های بارگذاری چرخه‌یی به دست آمده و مقادیر آنها برای هر دامنه‌ی بارگذاری به شکل مجزا ارائه شده است. میرایی معادل نمونه‌ها



الف) رفتار چرخه‌ای؛



ب) انرژی جذب شده؛



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.

شکل ۱۴. تأثیر عرض.

طبق شکل ۱۵ - ب، با کاهش ارتفاع، میزان جذب انرژی میراگر افزایش یافته است؛ به طوری که با تغییر ارتفاع از ۳۰۰ به ۲۵۰، از ۲۵۰ به ۲۰۰ و از ۲۰۰ به ۱۵۰ به ترتیب انرژی جذب شده ۱۱، ۱۸ و ۲۳ درصد افزایش داشته است. همان‌طور که در شکل ۱۵ - ج مشاهده می‌شود، میرایی معادل نمونه‌ها در انتهای بارگذاری ۲۳ الی ۳۵ درصد بوده و همچنین با کاهش ارتفاع، سختی مؤثر نمونه‌ها افزایش داشته است.

۵.۵. تأثیر زاویه

در بخش حاضر، به بررسی نمونه‌ها با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه پرداخته شده است. با تغییر در زاویه نمونه‌ها، طول عضو مورب (s) ثابت نگه داشته

میلی‌متر برابر با ۸۷ کیلو نیوتن بوده است، که بیشترین مقدار در بین ۱۲ نمونه‌ی انتخابی بوده است. با توجه به شکل ۱۳ - ب، با افزایش عمق از ۲۵ به ۵۰ و از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌متر، انرژی جذب شده به ترتیب ۷۴ و ۱۲۲ درصد افزایش داشته است. همچنین مطابق با شکل ۱۳ - ج، با تغییر عمق، میرایی معادل تغییر محسوسی نداشته و برای همه‌ی نمونه‌ها در بازه‌ی ۳۰ الی ۴۸ درصد قرار گرفته است. از سوی دیگر، با افزایش عمق، میزان سختی مؤثر افزایش یافته و با ۲ برابر شدن عمق، سختی مؤثر نیز حدوداً ۲ برابر شده است.

۳.۵. تأثیر عرض

نمونه‌هایی با عرض ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر برای بررسی اثر مشخصه‌ی عرض در رفتار میراگر انتخاب شده‌اند. با کوچک شدن عرض، سختی عضو افقی نسبت به چرخش دو انتهای آن بیشتر شده و توانسته است مهار جانبی بیشتری برای اعضاء مورب در ناحیه‌ی اتصال‌شان ایجاد کند. در نتیجه با کاهش عرض، سختی میراگر به شکل قابل توجهی افزایش یافته است، که در شکل ۱۴ - الف مشهود است. از سوی دیگر، با افزایش عرض، طول ناحیه‌ی که میراگر به شکل کشسان رفتار می‌کند، افزایش خواهد داشت. همان‌طور که در شکل اخیر مشخص است که با کاهش عرض، رفتار چرخه‌ای بهبود داشته و نمونه‌ها، چرخه‌هایی بدون افت مقاومت و سختی را طی کرده‌اند.

در شکل ۱۴ - ب، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها مشاهده می‌شود. با کاهش عرض از ۱۰۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۲۵ میلی‌متر، انرژی جذب شده به ترتیب ۲۹ و ۵۷ درصد افزایش داشته است. طبق شکل ۱۴ - ج، نمونه‌ها با عرض ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌متر به جز چند چرخه‌ی ابتدایی، میرایی معادل یکسانی داشته‌اند؛ اما نمونه‌ی پایه با عرض ۵۰ میلی‌متر در تمام چرخه‌ها، اندکی میرایی بالاتری از دو نمونه‌ی اخیر داشته است. همچنین با کاهش عرض، میزان سختی مؤثر میراگر در بارگذاری چرخه‌ای افزایش یافته است.

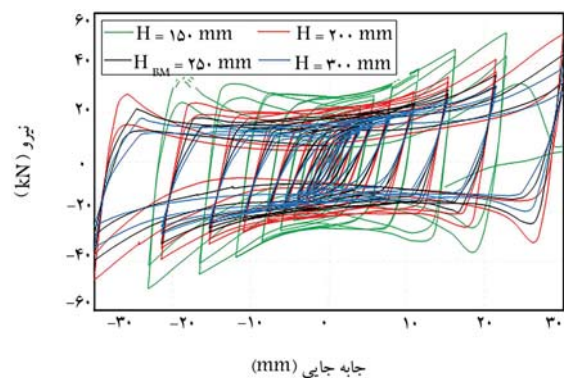
۴.۵. تأثیر ارتفاع

تأثیر تغییرات ارتفاع با افزایش مقدار آن از ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر بررسی شده است. لازم به ذکر است که با تغییر ارتفاع، طول اعضاء مورب (s) نیز مطابق مقادیر جدول ۱ تغییر کرده است. با توجه به شکل ۱۵ - الف، با کاهش ارتفاع، سختی و بیشینه‌ی نیروی مقاوم میراگر افزایش یافته و میراگر، نمودارهای چرخه‌ای چاق‌تری داشته است. نکته‌ی که در نمودار اخیر بارگذاری چرخه‌ای مورد توجه است، وقوع خرابی کامل در نمونه با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر است. نمای میراگر ذکر شده، در آخرین گام پایدار بارگذاری چرخه‌ای در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. که مطابق آن، بیشترین تنش و متعاقباً کرنش خمیری در دو انتهای قسمت افقی رخ داده است. لذا شروع و گسترش خرابی میراگر نیز در همین ناحیه متمرکز بوده است. این نوع گسیخته شدن اعضا در نمونه‌های آزمایشگاهی جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰)، [۱۳] نیز مشاهده شده است.

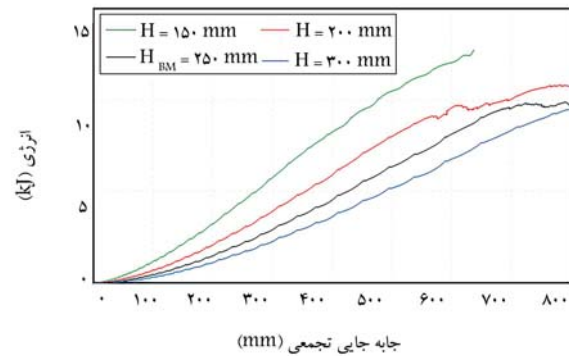
با بررسی‌های انجام شده، مشخص شد نمونه‌هایی که گریز نسبی (نسبت جابه‌جایی جانبی دو سر میراگر به ارتفاع میراگر) در آنها بیشتر از حدود ۱۵٪ بوده است، نتوانسته‌اند بارگذاری چرخه‌ای را تا انتها (با دامنه‌ی ۳۰ میلی‌متر) طی کنند. با در نظر گرفتن این موضوع، کمیته‌ی ارتفاع مجاز میراگر لانه‌زنبوری موجد برای جابه‌جایی هدف ۳۰ میلی‌متر را می‌توان برابر با ۲۰۰ میلی‌متر در نظر داشت، که این موضوع یکی از ملاک‌های انتخاب نمونه‌های جدول ۱ بوده است.

شده است. در نتیجه با تغییر زاویه، ارتفاع میراگر نیز تغییر خواهد کرد. مطابق شکل ۱۷ - الف، کاهش زاویه، تأثیر قابل توجهی در سختی اولیه داشته است. زیرا هر چه زاویه‌ی اعضای مورب با افق کمتر شده است، سختی محوری اعضای مذکور، سهم بیشتری از سختی کل را داشته‌اند (عملکرد مهاربندگونه)؛ در حالی که هر چه زاویه‌ی اعضای مورب به قائم نزدیک‌تر بوده است، سختی محوری کمتر وارد عمل شده و فقط سختی خمشی عضوهای مورب اثرگذار بوده است.

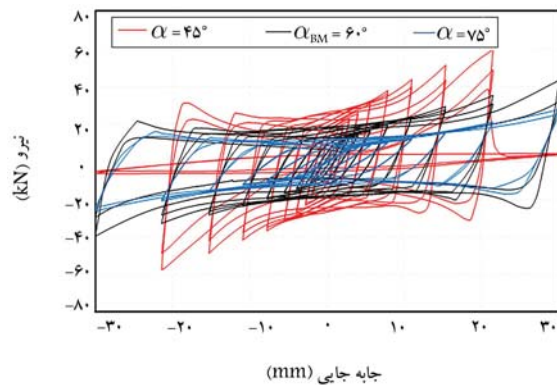
همچنین با کاهش زاویه، نیروی مقاوم میراگر افزایش یافته است. رفتار چرخه‌یی میراگر نیز با کاهش زاویه، بهبود یافته است. از سوی دیگر، نمونه با زاویه ۴۵ درجه تا انتهای چرخه با دامنه‌ی ۲۲ میلی‌متر رفتار مناسبی داشته است، اما پس از طی



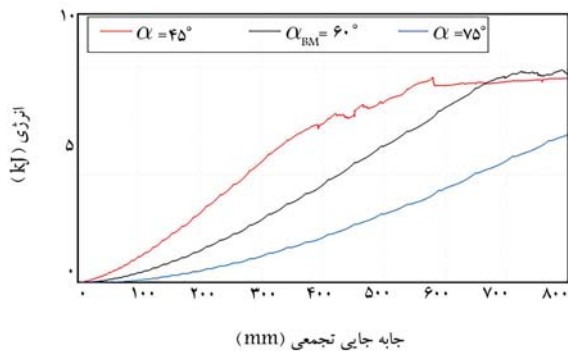
الف) رفتار چرخه‌یی؛



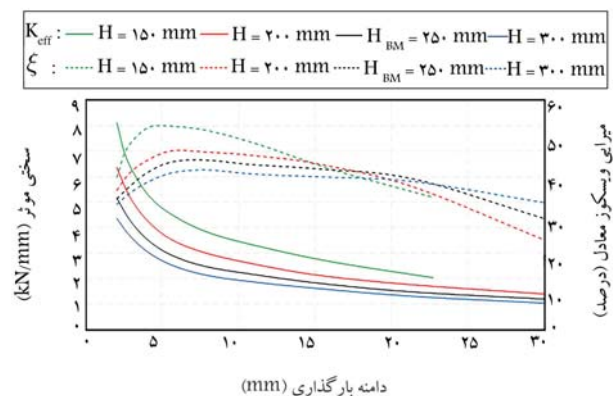
ب) انرژی جذب شده؛



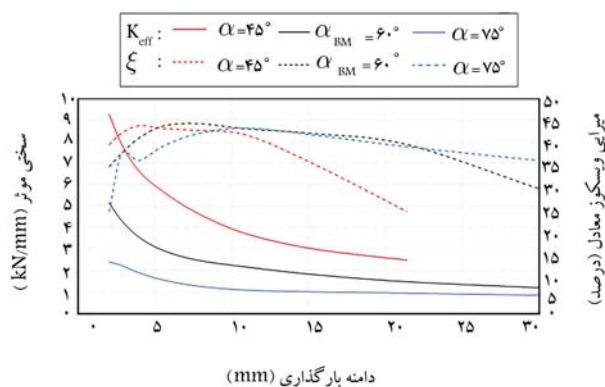
الف) رفتار چرخه‌یی؛



ب) انرژی جذب شده؛

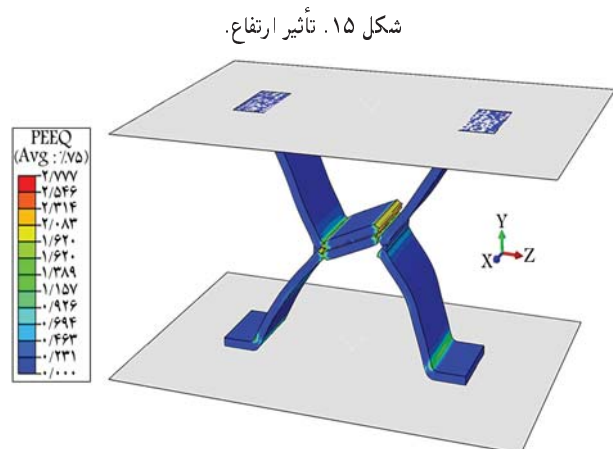


ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.

شکل ۱۷. تأثیر زاویه.



شکل ۱۶. شاخص PEEQ میراگر نمونه‌ی ۱۰ پیش از گسیختگی کامل.

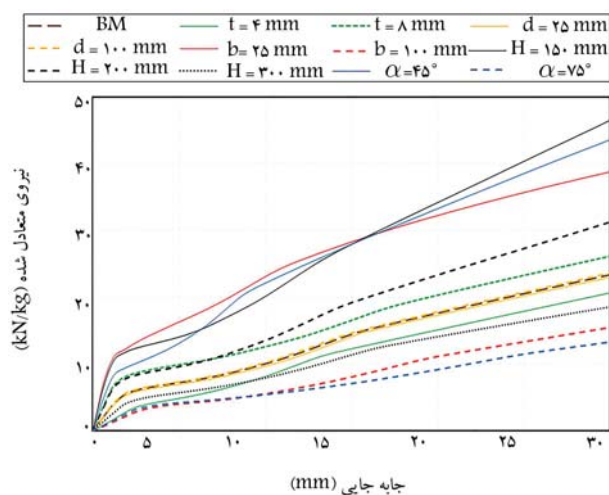
جدول ۲. مقایسه‌ی مشخصه‌های مکانیکی برخی از میراگرهای تسلیمی پیشین و میراگر لانه‌زنپوری موجدار.

مشخصه‌ی میراگر	CHD	DPD ^[۸]	TADAS ^[۱۴]	BSD ^[۱۵]	HHS ^[۲]	HSD ^[۲]
وزن (kg)	۱/۶	۴	۴۶	۱/۳	۱/۲	۰.۰۰
ارتفاع (mm)	۲۵۰	۱۱۰-۱۱۴	۳۰۴	۸۰	۱۴۰	۲۰۳
سختی کشسان (kN/mm)	۱۸/۷۱	۹/۷۵	۶۷/۵	۳۷/۶	۰.۰۰	۳۸/۳
میرایی (%)	۴۴	۴۵	۲۴۶	۳۷	۲۹/۵	۰.۰۰
ظرفیت تغییرشکل ^۳ (-)	۱۲	۳۰	۲۹	۲۸	۸	۱۳
جابه‌جایی تجمعی (mm)	۸۰۰	۸۰۰	۰.۰۰	۴۰۰	۲۱۵	۸۰۰
انرژی جذب شده (kJ)	۱۵/۳	۱۸/۷۵	۰.۰۰	۲۵	۵/۵۵	۰.۰۰
انرژی جذب شده‌ی متعادل به وزن (kJ/kg)	۹/۵۶	۴/۶۹	۰.۰۰	۱۹	۴/۶	۱۳/۵
بیشینه‌ی نیروی مقاوم (kN)	۵۷	۵۷/۵	۵۷۶	۱۶۲	۵۰	۴۸
بیشینه‌ی نیروی مقاوم متعادل به وزن (kN/kg)	۳۶/۶	۱۴/۴	۱۲/۵	۱۲۴	۴۱/۷	۰.۰۰
رفتار چرخه‌یی	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار

۱. موجود نیست.

۲. برگرفته از نوشتار ملکی و همکاران.^[۷]

۳. نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان قابل تحمل به ارتفاع میراگر.



شکل ۱۸. نیروی مقاوم متعادل شده به وزن میراگر CHD تحت بارگذاری یکنواخت.

ایجاد کرده است. به کارگیری زاویه‌ی کمتر از ۴۵ درجه نیز توصیه نمی‌شود؛ زیرا برای جلوگیری از گسیختگی کامل میراگر لازم است ارتفاع کمینه‌ی رعایت شود، که این امر باعث افزایش بیش از اندازه‌ی طول اعضاء مورب و احتمال کمانش در آنها خواهد شد. بنابر موارد ذکر شده، توصیه می‌شود برای مشخصه‌های عرض، زاویه و ارتفاع، مقدار کمینه‌ی در نظر گرفته شود و با تغییر ضخامت، عمق و تعداد سلول میراگر به مشخصات مکانیکی مورد نیاز طراحی دست یافت. از بین سه عامل اخیر، مشخصه‌ی ضخامت، بیشترین تأثیر را داشته و تغییر در عمق و تعداد سلول (درافق) به صورت خطی در رفتار میراگر اثرگذار بوده‌اند.

در جدول ۲، مقایسه‌ی بین میراگر لانه‌زنپوری موجدار (نمونه‌ی شماری ۶ در جدول ۱) و برخی از میراگرهای تسلیمی شناخته شده صورت گرفته است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، میراگر لانه‌زنپوری موجدار، قابلیت جذب انرژی، مقاومت نیرویی و میرایی مناسبی داشته و به خوبی می‌تواند از سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی محافظت کند.

اولین چرخه از دامنه‌ی بارگذاری ۳۰ میلی‌متر دچار گسیختگی شده است. این گسیختگی به دلیل زیاد بودن گریز نسبی دو سر میراگر بوده و با افزایش ارتفاع میراگر، نمونه با زاویه‌ی ۴۵ درجه نیز تا انتهای بارگذاری چرخه‌یی، می‌توانست رفتار مطلوبی داشته باشد.

جهت مقایسه‌ی انرژی جذب شده توسط سه میراگر مذکور، پارامتر اخیر تا جابه‌جایی تجمعی ۴۰۰ میلی‌متر مدنظر قرار گرفته است. براساس شکل ۱۷ - ب، با کاهش زاویه از ۷۵ به ۶۰ و از ۶۰ به ۴۵، انرژی جذب شده به ترتیب ۱۱۲ و ۶۲ درصد افزایش داشته است. منطبق بر نتایج، رفتار میراگر با زاویه‌ی ۴۵ درجه بهتر از دیگر نمونه‌ها ارزیابی شده است. مطابق شکل ۱۷ - ج، میرایی و اسکوز معادل نمونه‌ها در بازه‌ی ۲۵ الی ۴۵ درصد بوده و با کاهش زاویه، سختی مؤثر میراگر افزایش یافته است.

۶. بررسی و مقایسه‌ی نتایج

در بخش حاضر، به بررسی هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر پیشنهادی پرداخته شده است. برای این کار، علاوه بر استناد بر نتایج ارائه شده در بخش ۵، به نیروی مقاوم متعادل شده به وزن نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت نیز توجه شده است. بر این اساس و مطابق با شکل ۱۸، تغییر عمق، تأثیری در پاسخ متعادل شده به وزن نداشته است. از سوی دیگر، ارتفاع، زاویه، عرض و ضخامت بیشترین تأثیر را در پاسخ بارگذاری یکنواخت داشته‌اند.

با توجه به نتایج ارائه شده، برای عرض، ارتفاع، و زاویه‌ی میراگر می‌توان یک مقدار بهینه متصور بود. با کاهش عرض، به شکل پیوسته رفتار میراگر بهبود یافته است، لذا توصیه می‌شود یک عرض کمینه فقط برای تأمین کمینه‌ی فواصل خم‌کاری و دیگر مسائل اجرایی و ساخت میراگر در نظر گرفته شود. کاهش ارتفاع میراگر نیز باعث افزایش کارایی شده است، اما این مورد محدود به بازه‌ی مشخص بوده و کاهش بیش از اندازه‌ی ارتفاع منجر به گسیختگی کامل در پایان بارگذاری چرخه‌یی شده است (کاهش شکل‌پذیری). تأثیر زاویه نیز به همین ترتیب بوده و استفاده از زاویه‌ی ۴۵ درجه، رفتار مطلوب‌تری را

جدول ۳. مشخصه‌های مکانیکی نمونه‌ی میراگرهای لانه‌زنبوری موجدار.

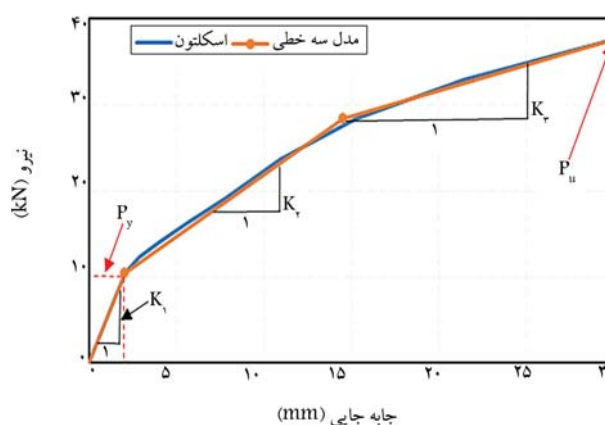
نمونه	مولفه متغیر	$K_{el,t}$ (kN/mm)	$K_{el,n}$ (kN/mm)	K_{el} (kN/mm)	K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	K_3 (kN/mm)	K_4 (kN/mm)	K_5 (kN/mm)	K_6 (kN/mm)	P_y (kN)	P_u (kN)	E_D (kJ)	Mass (kg)
CHD-۱	BM	۵/۳۵	۶/۰۰	۰/۸۹	۵/۱۴	۱/۳۵	۰/۶۳	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۱۲	۴۳/۳	۹/۷	۱/۸۴	۱/۸۷
CHD-۲	$t=۴$	۱/۶۱	۱/۷۳	۰/۹۳	۱/۸۹	۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۲۶	۲۶/۵	۴/۰	۱/۲۴	۱/۲۴
CHD-۳	$t=۸$	۱۲/۴۴	۱۴/۳۰	۰/۸۷	۱۰/۱۹	۲/۴۸	۰/۶۴	۰/۲۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۶۱/۴	۱۸/۵	۲/۴۵	۲/۴۵
CHD-۴	$d=۲۵$	۲/۶۸	۲/۹۳	۰/۹۱	۲/۴۹	۰/۶۵	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۱۳	۵/۱	۵/۶	۰/۹۲	۰/۹۲
CHD-۵	$d=۱۰۰$	۱۰/۷۰	۱۲/۱۷	۰/۸۸	۱۰/۴۳	۲/۶۳	۱/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۱۲	۲۱/۲	۸۵/۳	۳/۶۷	۳/۶۷
CHD-۶	$b=۲۵$	۱۴/۶۴	۱۸/۷۱	۰/۷۸	۸/۸۹	۱/۵۹	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۲۱/۰	۵۷/۰	۱/۶۰	۱/۶۰
CHD-۷	$b=۱۰۰$	۲/۲۳	۲/۲۸	۰/۹۸	۲/۳۷	۱/۰۵	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۴۴	۴/۷	۳۷/۰	۲/۰۷	۲/۰۷
CHD-۸	$H=۱۵۰$	۱۲/۵۳	۱۳/۰۰	۰/۹۶	۷/۸۶	۲/۲۷	۰/۸۸	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۱۱	۱۶/۱	۵۲/۱	۱/۲۹	۱/۲۹
CHD-۹	$H=۲۰۰$	۷/۶۶	۸/۵۶	۰/۹۰	۵/۱۶	۱/۵۰	۰/۶۳	۰/۲۹	۰/۱۲	۰/۱۲	۱۲/۷	۵۱/۷	۱/۵۷	۱/۵۷
CHD-۱۰	$H=۳۰۰$	۴/۰۵	۴/۵۴	۰/۸۹	۴/۳۵	۱/۲۳	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۳	۸/۸	۳۸/۰	۹/۵	۲/۱۱
CHD-۱۱	$a=۴۵$	۱۲/۵۶	۱۴/۶۴	۰/۸۶	۹/۱۱	۳/۱۹	۱/۲۶	۰/۳۵	۰/۱۴	۰/۱۴	۱۸/۵	۵۹/۶	۱/۸۴	۱/۸۴
CHD-۱۲	$a=۷۵$	۲/۱۳	۲/۳۹	۰/۸۹	۲/۲۵	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۴/۹	۲۷/۸	۶/۹	۱/۸۴
میانگین		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

دلیل خم‌کاری ورق‌های فولادی است، که در تحلیل ماتریسی، خم‌های ذکر شده لحاظ نشده‌اند. مطابق شکل ۱۹، پارامترهای K_1 ، K_2 و K_3 سختی‌های منحنی سه‌خطی و همچنین P_y و P_u به ترتیب نیروی تسلیم و بیشینه‌ی نیروی مقاوم میراگر هستند.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی با عنوان میراگر لانه‌زنبوری موجدار ارائه شده است. میراگر لانه‌زنبوری دارای هزینه ساخت اولیه‌ی کم، ساخت و به کارگیری آسان و نیز قابلیت تعویض ساده پس از تحمل بارگذاری است. در طی پژوهش حاضر، رابطه‌ی سختی اولیه‌ی میراگر بر اساس تحلیل ماتریسی به دست آمده است. طی مطالعات پارامتری بر روی مدل اجزاء محدود، تأثیر هر یک از مشخصه‌های هندسی در رفتار میراگر لانه‌زنبوری موجدار بررسی و بدین ترتیب هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر معرفی شده است. همچنین با استفاده از نمودارهای بارگذاری چرخشی، میرایی معادل، سختی مؤثر و مدل رفتاری سه‌خطی میراگر ارائه شده است. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. طی بارگذاری چرخشی، در نمونه‌هایی که محدودیت نسبت گریز نسبی در آنها برآورده شده بود، رفتاری پایدار، متقارن و بدون اثری از باریک‌شدگی مشاهده شد.
۲. با افزایش ضخامت و عمق یا کاهش عرض، ارتفاع و زاویه می‌توان سختی میراگر لانه‌زنبوری موجدار را افزایش داد و با مقدار مورد نیاز طراحی منطبق ساخت.
۳. با کاهش عرض، پیوسته رفتار میراگر بهبود داشته است، در نتیجه توصیه می‌شود از یک عرض کمینه فقط برای تأمین کمینه‌ی فواصل خم‌کاری و دیگر مسائل اجرایی استفاده شود.
۴. با کاهش زاویه و ارتفاع و یا افزایش ضخامت، عمق و تعداد سلول میراگر در راستای افقی، رفتار چرخشی و انرژی جذب شده‌ی میراگر بهبود یافته است.
۵. کاهش ارتفاع، زاویه و عرض میراگر منجر به کاهش شکل‌پذیری شده است. لذا باید متناسب با میزان گریزنسبی مورد نیاز طرح تنظیم شوند.



شکل ۱۹. نمودار اسکلتون و مدل سه‌خطی نمونه‌ی پایه.

۷. مدل سه‌خطی رفتار میراگر

برای به دست آوردن برخی از پارامترهای پاسخ میراگر، نظیر منحنی سه‌خطی رفتار میراگر، نیرو و جابه‌جایی تسلیم، می‌توان از منحنی اسکلتون^{۲۸} استفاده کرد. در این راستا و بر اساس نمودارهای حاصل از پژوهش حاضر، منحنی اسکلتون بر اساس نمودار چرخشی ترسیم شده است. سپس برای به دست آوردن منحنی سه‌خطی از نمودار اسکلتون، منطبق بر روش پیشنهادی FEMA ۳۵۶^[۲۲] عمل شده است. بدین منظور شیب خطوط باید به نحوی انتخاب شود که مساحت میان نمودار اسکلتون و سه‌خطی در قسمت بالا و پایین آن با هم یکسان باشد. به عنوان مثال، نمودار اسکلتون و منحنی سه‌خطی نمونه‌ی پایه در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. مقادیر عددی پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های مذکور برای تمام نمونه‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است؛ که در آن، $K_{el,t}$ معرف سختی اولیه‌ی میراگر طبق رابطه‌ی ۲ و $K_{el,n}$ سختی اولیه‌ی به دست آمده از تحلیل عددی هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه‌ی تحلیلی ارائه شده، دقت مناسبی داشته است. شایان ذکر است بخشی از خطای موجود در تخمین سختی، به

پانویسها

1. Kelly
2. Bergman
3. Added Damping And Stiffness (ADAS)
4. Tsai
5. Triangular Added Damping And Stiffness (TADAS)
6. Nakashima
7. Low Yield Steel
8. Shear Panel Damper (SPD)
9. Chen
10. Stiffened Shear Panel Damper (SSPD)
11. Pinching
12. Pipe Damper (PD)
13. Dual Pipe Damper (DPD)
14. Pipe In Pipe (PIP)
15. Block Slit Damper (BSD)
16. Shear-Bending Combined (SBC)
17. Shear Panel (SP)
18. Honeycomb Damper (HD)
19. Honeycomb Structural Fuse (HSF)
20. Drift Ratio
21. Hexagonal Honeycomb Steel Damper (HHSD)
22. Corrugated Honeycomb Damper (CHD)
23. Degree of Freedom (DOF)
24. Tie
25. Hard Contact
26. Ductile Damage
27. Stress Triaxiality
28. Skeleton Curve

منابع (References)

1. Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, **5**(3), pp. 63-73 (1972).
2. Bergman, D.M. "Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness", *Rep. No. UMCE87-10. MI, USA Univ. Michigan* (1987).
3. Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and et al. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthq. Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
4. Nakashima, M., Iwai, I., Iwata, M. and et al. "Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **23**(12), pp. 1299-1313 (1994).
5. Chen, Z., Ge, H. and Usami, T. "Hysteretic model of stiffened shear panel dampers", *J. Struct. Eng.*, **132**(3), pp. 478-483 (2006).
6. Maleki, S. and Bagheri, S. "Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study", *J. Constr. Steel Res.*, **66**(8-9), pp. 1088-1095 (2010).
7. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "Dual-pipe damper", *J. Constr. Steel Res.*, **85**, pp. 81-91 (2013).
8. Cheraghi, A. and Zahrai, S.M. "Cyclic testing of multi-level pipe in pipe damper", *J. Earthq. Eng.*, **23**(10), pp. 1695-1718 (2019).
9. Ahmadi Amiri, H., Najafabadi, E.P. and Estekanchi, H.E. "Experimental and analytical study of block slit damper", *J. Constr. Steel Res.*, **141**, pp. 167-178 (2018).
10. Li, Z., Shu, G., and Huang, Z. "Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper", *J. Constr. Steel Res.*, **158**, pp. 28-40 (2019).
11. Lee, M., Lee, J. and Kim, J. "Seismic retrofit of structures using steel honeycomb dampers", *Int. J. Steel Struct.*, **17**, pp. 215-229 (2017).
12. Yang, T.Y., Li, T., Tobber, L. and et al. "Experimental and numerical study of honeycomb structural fuses", *Eng. Struct.*, **204**, p. 109814 (2020).
13. Javanmardi, A., Ghaedi, K., Ibrahim, Z. and et al. "Development of a new hexagonal honeycomb steel damper", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, **20**(63), pp. 1-19 (2020).
14. Dassault Systèmes Simulia, "Abaqus CAE user's Manual", (2017).
15. Yazdi, M. "Design of fillet welds in plastic state", *M.Sc. Thesis*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (In Persian) (1396/2018).
16. Saneei Nia, Z., Ghassemieh, M. and Mazroi, A. "WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading", *J. Constr. Steel Res.*, **88**, pp. 90-108 (2013).
17. Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y.W. and et al. "Calibration and evaluation of seven fracture models", *Int. J. Mech. Sci.*, **47**(4-5), pp. 719-743 (2005).
18. Eshraghi, S. and Carolan, M.E. "Quick calibration of fracture behaviors in TC128 steel for finite element modeling", *Rep. No. DOT/FRA/ORD-20/46*. US Federal Railroad Administration (2020).
19. Yu, H.L. and Jeong, D.Y. "Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched charpy specimens", *Theor. Appl. Fract. Mech.*, **54**(1), pp. 54-62 (2010).
20. FEMA 461, "Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and non-structural components", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC (USA) (2007).
21. Chopra, A. "Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering", *5th ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall* (2020).
22. FEMA 356, "Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC (USA) (2000).

مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمینه و بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی

حمید حسن‌زاده (کارشناس ارشد)

محمدکاظم شربتدار* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۲۷-۱۵، پژوهشی)

خصوصیات الیاف‌ها و میلاگردهای طولی، تأثیر مثبتی در خصوصیات خمشی تیرهای بتن‌آرمه دارند. در نوشتار حاضر، تأثیر دو نسبت متفاوت آرماتور طولی (کمینه و بیشینه) در خواص خمشی و نحوه‌ی گسترش ترک‌های تیرهای الیافی به صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج آنها با تیرهای بتنی معمولی مقایسه شده‌اند. ۸ عدد تیر ساخته شدند، که تیرهای گروه اول، شامل ۲ تیر بتن معمولی مرجع و گروه‌های دوم تا چهارم، هم شامل ۶ تیر بتن الیافی مسلح شده با درصد حجمی الیاف فولادی برابر ۵/۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بار ترک‌خوردگی، مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و جذب انرژی تیرهای بتن الیافی نسبت به تیرهای بتن معمولی مشابه خود بهبود یافته است. بیشترین نسبت شکل‌پذیری در میان نمونه‌های ساخته شده با آرماتور کششی کمینه و ۱٪ الیاف با افزایش ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی مشابه غیرالیافی مشاهده شده است. ضمناً افزودن ۵/۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ درصد الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۱۶، ۲۳ و ۲۹ درصد مقاومت خمشی نسبت به تیرهای بدون الیاف شده است.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی، شکل‌پذیری، مقاومت خمشی، جذب انرژی، کمینه‌ی آرماتور کششی.

hamidhasanzadeh3020@gmail.com
msharbatdar@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

وجود الیاف فولادی در اعضاء بتنی به عنوان بتن الیافی (SFRC)^۱ باعث بهبود مقاومت کششی، شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت برشی و همچنین مقاومت خمشی می‌شود؛ که عملکرد بتن مسلح با الیاف به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف، توزیع و درصد الیاف، خصوصیات پیوند الیاف و بتن بستگی دارد و منجر به کاهش میلاگرد طولی و خاموت می‌شود.^[۵-۱] نسبت ابعادی الیاف در دو مقیاس میکرو و ماکرو در بهبود پیوند بین الیاف و ماتریس و مدهای شکست و خواص مکانیکی مؤثر هستند.^[۶] همچنین الیاف‌ها در دو مقیاس میکرو و ماکرو می‌توانند نقش مکملی برای میلاگرد برای کاربرد در سازه داشته باشند و در مدهای شکست و خواص مکانیکی و مقاومت خمشی بتن تأثیر بگذارند.^[۷] استانداردهای متفاوتی، مانند: RILEM ۱۶۲-TDF و TC و ۲۰۱۰ fib Model Code و ۲۰۰۸ ACI ۵۴۴-۲۰۰۸ درباره‌ی بتن

مسلح الیافی پیشنهاد شده‌اند.^[۸-۱۱] دستورالعمل ACI ۵۴۴ R فرمول‌های متعددی برای محاسبه‌ی ظرفیت خمشی اسمی تیرهای مسلح به میلاگرد و الیاف فولادی ارائه داده است.^[۱] برخی پژوهشگران، رفتار خمشی و شکل‌پذیری تیرهای کامپوزیتی مسلح الیافی با عملکرد بالا (UHPFRC) را به صورت دو سر ساده یا دو دهانه‌ی سراسری یا دو سرگیردار و تغییر در درصد الیاف بررسی کرده‌اند، که نیاز به خاموت‌های کمتر نتیجه گرفته شده است.^[۱۲-۱۶] فیصل محمود^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، عملکرد بازتوزیع خمشی و لنگر ۶ تیر بتن مسلح دو دهانه‌ی سراسری با و بدون الیاف فولاد را بررسی کردند و دریافتند که تیرهای الیافی، شکل‌پذیری خوبی داشته و تقاضای بازتوزیع کامل را نشان داده و ساز و کار مفصل‌ها تشکیل شده‌اند.^[۱۷]

محمود و همکاران (۲۰۱۸)، ۱۴ تیر بتنی را با بتن خودمترکم تحت بار یکنواخت آزمایش کردند.^[۱۸] یو^۳ و همکاران (۲۰۱۷) و نیز کلی و جاداو^۴ (۲۰۱۳)، عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف مرکب را مطالعه کردند و دریافتند که استفاده

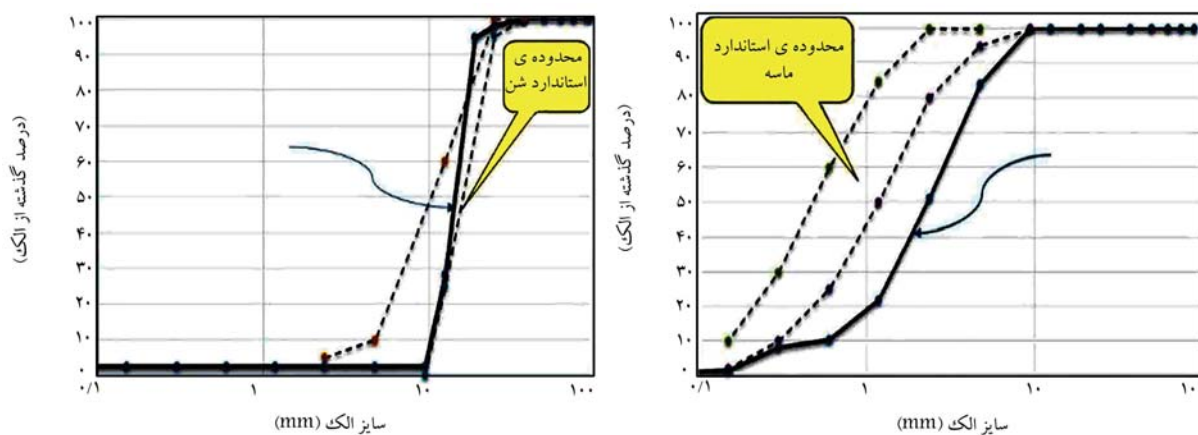
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۱۰، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۲۰

DOI:10.24200/J30.2022.60932.3131

استناد به این مقاله:

حسن‌زاده، حمید و شربتدار، محمدکاظم، ۱۴۰۲. مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمینه و بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۲۷-۱۵.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه.

ماسه با بیشینه اندازه‌ی ۵ میلی‌متر با منحنی دانه‌بندی‌های نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است.

همچنین از سیمان پرتلند تیپ II ساخت کارخانه‌ی سیمان شاهرود مطابق با استاندارد ASTM C۱۵۰ و آب مناسب شرب شهری برای ساخت بتن استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های تیر، از دو نوع میلگرد قطر ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر به عنوان میلگردهای خمشی و قطر ۸ میلی‌متر به عنوان خاموت، تولیدی شرکت فولاد خراسان (نیشابور)، استفاده و مشخصات مقاومت کششی آنها، که با دستگاه کشش یونیورسال اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. از الیاف فولادی مطابق مشخصات استاندارد ASTM A۸۲۰/A۸۲۰M با طول‌های کوتاه و گسسته با نسبت ابعاد (نسبت طول به قطر) از حدود ۲۰ به ۱۰۰، با مقاطع مختلف و معمولاً با درصد حجمی کمتر از ۲٪ در بتن استفاده شده است.

در پژوهش حاضر از الیاف فولادی دو انتها قلاب‌دار با طول ۵۰ و قطر ۸/۰ میلی‌متر و نسبت ظاهری ۶۰، با مقاومت کششی ۵۷۳-۱۱۴۰ مگاپاسکال و از دسته‌ی Crimped-End Wire و نوع I مطابق با استاندارد ASTM A۸۲۰ استفاده شده است.

از روش ACI-۲۱۱ نیز برای طرح اختلاط بتن معمولی و الیافی استفاده شده و تفاوت خاصی بین طرح اختلاط آنها مشاهده نشده است؛ با وجود این، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداسازی یا پدیده‌ی گلوله‌یی شدن و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، متراکم و پرداخت بتن به عمل آید. از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲ در نمونه‌های تیرهای ۴ گروه برای ۱ مترمکعب بتن و نیز از شن و ماسه‌ی خشک در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است.

۲.۲. مبانی طراحی و مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌ی آزمایشگاهی تیرهای با و بدون الیاف فولادی با مقیاس یک دوم مطابق شکل ۲ با عرض b و ارتفاع کل h و ارتفاع مؤثر d برابر ۲۵۰، ۲۵۰ و ۱۹۸ میلی‌متر به طول کل ۲۳۰۰ و طول تکیه‌گاهی ۱۹۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته و ساخته شدند و تحت بارگذاری چهار نقطه‌یی قرار گرفتند و نیروهای متمرکز به فاصله‌ی ۶۶۰ میلی‌متر از یکدیگر و به صورت متقارن اعمال شدند. برای محاسبه‌ی مقادیر کمینه‌ی (p_{min}) و بیشینه‌ی (p_{max}) و سطح کل آرماتورهای طولی لازم برای

از الیاف مرکب، عملکرد خمشی تیر بتن مسلح به الیاف را بهبود می‌بخشد. [۱۹ و ۲۰] پاتیل و سنگل ۵ (۲۰۱۶)، تیرهای تحت هر دو عمل خمش و پیچش را بررسی کردند و دریافتند که الیاف فولادی باعث بهبود هر دو مقاومت شده است. [۲۱] ایوبی و شریتمدار (۲۰۲۰)، هم مقاومت‌سازی تیرهای بتن مسلح آسیب‌دیده را با استفاده از HPFRCC بررسی کردند و دریافتند که نیروی نهایی نمونه‌ها بین ۲۷ تا ۹۵ درصد افزایش یافته است. [۲۲] تقی‌خانی و شریتمدار (۱۳۹۸)، نیز در مطالعه‌ی خود دریافتند که افزودن الیاف‌های HPFRCC به اعضاء خمشی، منجر به کاهش خاموت‌های برشی در مقایسه با تیرهای با بتن معمولی می‌شود. [۲۳] همچنین از الیاف‌های اخیر می‌توان در بتن‌های ویژه مانند بتن کامپوزیتی الیافی توانمند (HPFRCC) در قالب‌های بتنی جدید و نیز در ساخت بتن‌های خاص مانند ECC برای مقاومت‌سازی در حالت‌های مختلف استفاده و اثرپذیری اضافه کردن الیاف‌ها در انواع بتن‌ها را مشاهده کرد. [۲۴ و ۲۵] تأثیر الیاف فولادی در گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح بازمانده دارای وصله‌ی میلگرد نیز نشان داد که افزودن الیاف باعث کاهش ۴۰ درصدی طول وصله می‌شود. [۲۶] همچنین مقایسه‌ی تأثیر استفاده از دو نوع الیاف فولادی و PPS در تیرهای تحت بار چرخه‌یی نشان داد که بتن حاوی الیاف فولادی، مقادیر انرژی تلف شده‌ی تجمعی بیشتر و مقاومت بالاتری را نسبت به مقدار متناظر در بتن حاوی الیاف PPS نتیجه می‌دهد. [۲۷]

مطالعات پیشین نشان دادند که پارامترهای فراوانی در رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه مؤثر هستند، ولی نیاز به مطالعات جدیدی در خصوص بررسی تأثیر هم‌زمان درصد الیاف فولادی و مقادیر متفاوت درصد آرماتور طولی کششی در رفتار خمشی و نحوه‌ی ایجاد ترک‌ها در تیرهای الیافی است، که در نوشتار حاضر به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است.

۲. روش تحقیق آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح و طرح اختلاط

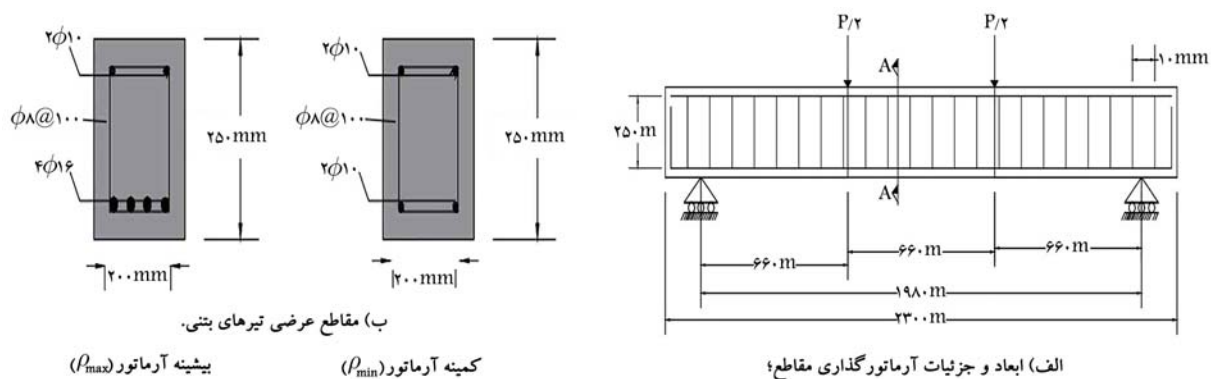
از شن به عنوان درشت‌دانه جهت افزایش مقاومت و از ماسه به عنوان ریزدانه جهت پرکردن فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها در بتن با دانه‌بندی مناسب استفاده می‌شود، تا علاوه بر مقاومت و دوام به همراه کارایی لازم با هزینه‌ی تمام شده‌ی قابل قبول تأمین شود. لذا در پژوهش حاضر، از شن شکسته با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۱۹/۵ و

جدول ۱. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده.

بیشینه‌ی مقاومت	کرنش شکست	مقاومت تسلیم	نمونه	قطر آرماتور
f_u (MPa)	(%)	f_y (MPa)		(mm)
۵۶۶/۷۵	۷۴/۷۰	۴۱۹/۱۹	۱	۸
۵۶۸/۶۹	۳۹/۴۳	۴۰۹/۰۹	۲	
۵۶۷/۷۲	۵۷/۰۶	۴۱۴/۱۴	میانگین	
۶۶۳/۴۹	۵۹/۰۱	۴۲۲/۱۸	۱	۱۰
۶۶۲/۶۱	۶۰/۳۲	۴۲۲/۱۸	۲	
۶۶۳/۰۵	۵۹/۶۶	۴۲۲/۳۶	میانگین	
۶۳۹/۵۴	۳۷/۶۳	۴۹۸/۰۵	۱	۱۶
۶۳۶/۹۱	۳۸/۰۹	۴۹۷/۲۲	۲	
۶۳۸/۲۲	۳۷/۸۶	۴۹۷/۶۳	میانگین	

جدول ۲. طرح اختلاط در پژوهش حاضر.

طرح اختلاط	درصد الیاف	(w/c)	آب (Kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	سنگ دانه (kg/m^3)
	(vf)				شن ماسه
NRC	۰				
SFRC ۰/۵	۰/۵				
SFRC ۱/۰	۱/۰	۰/۵۱	۲۰۳	۳۹۵	۱۱۰۰
SFRC ۱/۵	۱/۵				۶۷۵



شکل ۲. جزئیات تیرهای بتنی آزمایش شده (تمام ابعاد برحسب میلی‌متر).

تیرهای بتنی از آیین‌نامه‌ی ۱۹-۱۳۱۸ ACI^[۲۳] مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است:

محاسبه‌ی کمینه‌ی آرماتورهای طولی (ρ_{min}) :

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} = 0.00331$$

$$A_{s \min} = \rho_{min} b d = 139.02 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

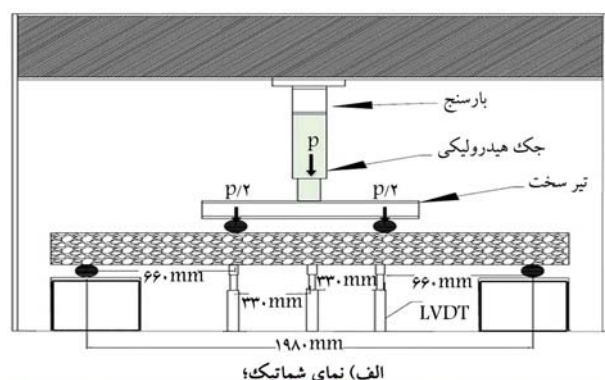
$$A_{s \max} = \frac{0.85 f'_c b \beta_1 d}{f_y} \cdot \frac{0.003}{0.003 + 0.005} = 782.50 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

که در آن، ضریب β_1 مطابق آیین‌نامه و با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال بتن برابر ۰/۸۳۵۷ می‌شود. لذا از ۲ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان کمینه‌ی میلگرد طولی و ۴ میلگرد قطر ۱۶ میلی‌متر به عنوان بیشینه‌ی میلگرد طولی کششی محاسبه

در مورد خاموت‌ها نیز، آرماتورهای کمینه‌ی برشی طبق معادله‌ی ۴ محاسبه می‌شوند، اما مساحت خاموت‌های استفاده شده در این نمونه‌های آزمایشگاهی برابر ۱۵۷/۰۸ میلی‌متر مربع بوده است، که خاموت قطر ۸ میلی‌متر در فاصله‌های ۱۰۰ میلی‌متری

جدول ۳. نامگذاری و مشخصات نمونه‌ها.

شماره	گروه	نام نمونه	شرح نمونه	مشخصات میلگردهای کششی
۱	۱	NRC-MIN	تیر بتن معمولی مسلح شده با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۲	۱	NRC-MAX	تیر بتن معمولی مسلح شده با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۳	۲	SFRC ^۰ /۵-MIN	تیر بتن معمولی مسلح شده با ۰/۵ درصد حجم الیاف فولادی با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۴	۲	SFRC ^۰ /۵-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۰/۵ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۵	۳	SFRC ^۱ /۰-MIN	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۰ درصد حجم با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۶	۳	SFRC ^۱ /۰-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۰ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۷	۴	SFRC ^۱ /۵-MIN	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۵ درصد حجم با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۸	۴	SFRC ^۱ /۵-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۵ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶



ب) نمای واقعی.

شکل ۳. نمای شماتیک و واقعی سیستم آزمایش.

قرار گرفتند، که از آرمان‌تورهای کمیته بیشتر بوده است؛ لذا شکست برشی در این تیرها رخ نخواهد داد و رفتار خمشی حاکم خواهد بود.

$$A_{vmin} = \frac{0.35 b_s}{f_y} = \frac{0.35 \times 200 \times 100}{490} = 14.28 \text{ mm}^2 < A_v = 157.08 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

در نوشتار حاضر، ۸ تیر بتنی در ۴ گروه طراحی و ساخته شدند، که گروه یک به عنوان بتن معمولی مسلح شده (مرجع) و سه گروه دیگر، بتن الیافی فولادی با درصد‌های حجمی ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵٪ در نظر گرفته شدند. هر گروه شامل دو نمونه تیر بتن مسلح شده با کمینه‌ی میلگردهای کششی (۲φ۱۰) و بیشینه‌ی میلگردهای کششی (۴φ۱۶) بودند.

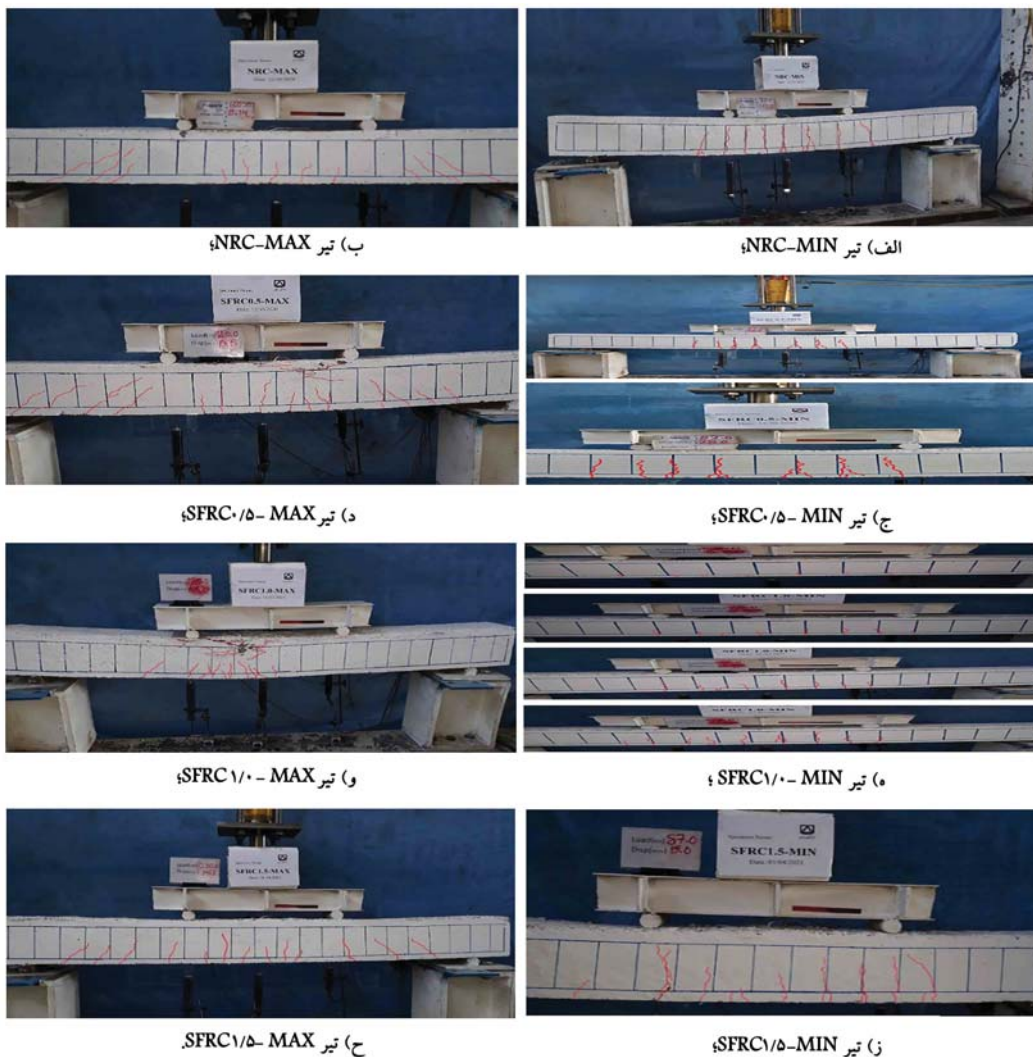
نامگذاری و مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند، که نمونه‌های بتن معمولی به صورت NRC و بتن الیافی فولادی به صورت SFRC با استفاده از علامت‌گذاری NRC-A و SFRCB-A نامگذاری شده‌اند، که «A» معرف کمیته (MIN) و بیشینه‌ی (MAX) مقدار فولاد کششی، «B» مقدار الیاف فولادی (درصد حجم بتن در مترمکعب) است. به عنوان مثال، نمونه‌ی NRC-MIN یک تیر مسلح شده با کمینه‌ی مقدار فولاد کششی (ρ_{min}) از بتن معمولی و SFRC^۱/۰-MAX یک تیر مسلح شده‌ی بتن الیافی با بیشینه‌ی مقدار فولاد کششی (ρ_{max}) از بتن الیافی با حجم ۱/۰٪ در هر مترمکعب است.

در ساخت بتن الیافی، الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه شدند تا از پدیده‌ی گلوله‌یی شدن الیاف جلوگیری شود. ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه، اختلاط ادامه یافته است. در ادامه، سیمان و یک سوم الیاف فولادی به ترکیب اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه ادامه یافته است. در پایان، بقیه‌ی آب و الیاف به ترکیب اضافه و به مدت ۲ دقیقه اختلاط ادامه داده شده است. در حین بتن‌ریزی، به منظور بررسی تأثیر درصد‌های متفاوت الیاف جهت تعیین مقاومت فشاری بتن، چهار نمونه‌ی استوانه‌یی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر از هر طرح اختلاط تهیه شده است، که نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب‌برداری شدند و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری طبق آیین‌نامه‌ی ASTM C۳۳ قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که متوسط مقاومت فشاری استوانه‌یی (f'_c) برای بتن‌های معمولی و بتن‌های الیافی با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف به ترتیب برابر ۲۸/۱۵، ۳۴/۰۵ و ۴۲/۱۲ و ۳۵/۲۸ مگاپاسکال بوده و الیاف فولادی منجر به افزایش ۱۹ تا ۵۰ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد شده‌اند.

۳.۲. تجهیزات آزمایشگاهی و چیدمان آزمایش نمونه‌ها

برای اندازه‌گیری متغیرهای مورد نظر در حین آزمایش، از ابزارها و تجهیزات خاصی، مانند: کرنش‌سنج‌ها، تغییرمکان‌سنج برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها، نیروسنج برای اندازه‌گیری میزان بار، جک و پمپ برای اعمال بار استفاده شده‌اند. از کرنش‌سنج‌های نوع ۱۱-FAL۵ به طول ۵ میلی‌متر ساخت شرکت TML ژاپن برای اندازه‌گیری کرنش طولی بر روی میلگردهای فولادی با دقت لازم و با چسب‌های مخصوص در وسط میلگردهای کششی و فشاری نصب و در برابر رطوبت بتن و ضربه محافظت شدند. سه عدد تغییرمکان‌سنج برای اندازه‌گیری تغییرمکان در وسط دهانه و دو نقطه‌ی دیگر تیرها و نیروسنج نوع ۵۰ کیلونیوتنی هم برای اندازه‌گیری بار قائم وارده قرار گرفتند. اطلاعات لازم در حین آزمایش توسط دستگاه مرتبط ثبت شد. سپس، نمونه‌ها تحت خمش چهار نقطه‌یی استاتیکی مطابق سیستم آزمایشگاهی شکل ۳ آزمایش شدند.



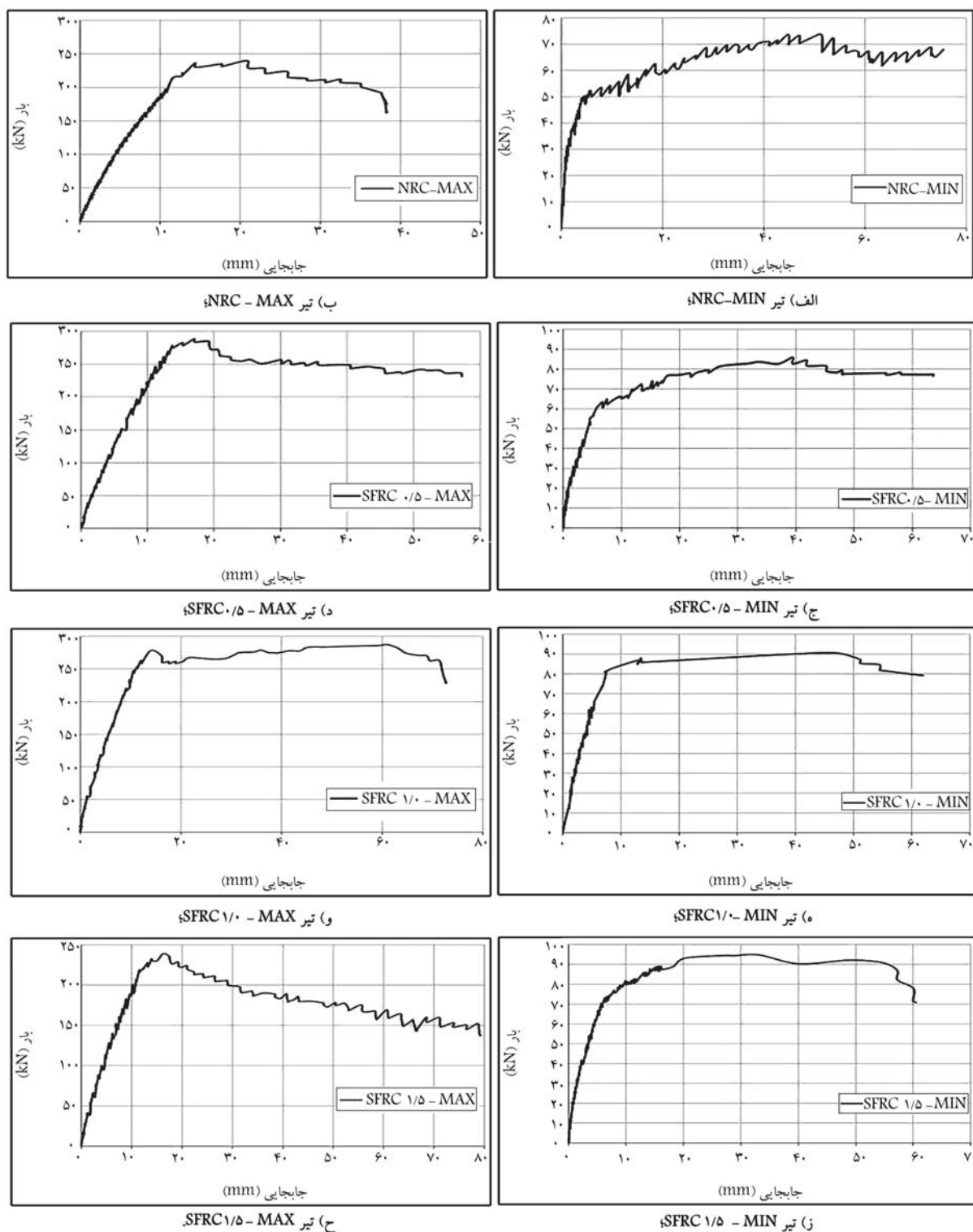
شکل ۴. مراحل بارگذاری و ترک‌خوردگی تیرها تا لحظه‌ی شکست نهایی.

۳. نتایج و مشاهدات اولیه‌ی ترک‌ها

ترک‌های ایجاد شده در ۸ نمونه، متناسب با مقادیر بار وارده در هر مرحله مشاهده و بر روی تیرها با رنگ متفاوت نشان داده شده‌اند. نهایتاً نیز وضعیت تیرهای ترک‌خورده در لحظه‌ی بار نهایی و شکست نهایی در شکل ۴ به تفکیک و منحنی‌های بار- تغییرمکان وسط دهانه‌ی هر یک از تیرها هم در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. اولین ترک در تیر بعد از یک رفتار و شیب اولیه‌ی خطی و متناسب با بار ترک‌خوردگی P_{cr} مشاهده می‌شود و مقدار بار ترک‌خوردگی در لحظه‌ی است که شیب منحنی بار- تغییرمکان در مرحله‌ی اول تغییر می‌کند. بعد از آن، با افزایش تعداد و عرض ترک‌ها، رفتار خمشی تیر به صورت غیرخطی افزایش یافته کمتری در آمده و میزان کرنش کششی در میلگردهای تحتانی تیرها هم افزایش یافته است.

به محض رسیدن کرنش میلگردها به حد تسلیم و جاری شدن متناسب با نیروی جاری شدن P_y و تغییرمکان جاری شدن، شیب منحنی کاهش می‌یابد، ولی هنوز ظرفیت باربری در حال افزایش است؛ تا نهایتاً تیر به ظرفیت بیشینه‌ی خود برابر P_{max} در نقطه‌ی اوج منحنی خواهد رسید، ولی تیرها هنوز قابلیت

تحمل تغییرمکان‌های بیشتری متناسب با میزان آرماتور طولی و درصد الیاف به کار رفته را خواهند داشت و با شیب‌های متفاوت از ملایم تا تند و با باز شدن بیشتر ترک‌ها در ناحیه‌ی تقریباً میانی تیر، به نقطه‌ی شکست نهایی خود در تغییرمکان نهایی خواهند رسید. مقادیر تغییرمکان در لحظه‌ی ترک‌خوردگی Δ_{cr} لحظه‌ی جاری شدن Δ_y و تغییرمکان نهایی لحظه‌ی شکست Δ_u نیز متناسب با همین نقاط به دست می‌آید و از روی منحنی قابل ثبت هستند. چنانچه در مقاطع بتن معمولی، میزان افت بار بیش از ۱۵٪ بار نهایی باشد، مقدار تغییرمکان نهایی Δ_u متناظر با بار نهایی برابر با $0.85P_{max}$ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های مختلف ترک‌خوردگی، جاری شدن، بیشینه و نهایی همه‌ی ۸ تیر به طور جداگانه محاسبه شده‌اند، که در بخش‌های بعدی ارائه و تحلیل شده‌اند. منحنی‌های بار- کرنش بیشینه‌ی کششی میلگردهای هر یک از تیرها در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. با توجه به مقاومت کششی جاری شدن میلگردها، کرنش متناظر حالت جاری شدن برابر ۲۰۰ میکرون است، که بار متناظر آن برابر P_y از منحنی‌های بار- کرنش برای هر تیر به دست می‌آید؛ که برای مثال، بار جاری شدن در تیر مرجع با کمینه‌ی آرماتور طولی برابر ۵۳/۴۹ کیلو نیوتن بوده است.

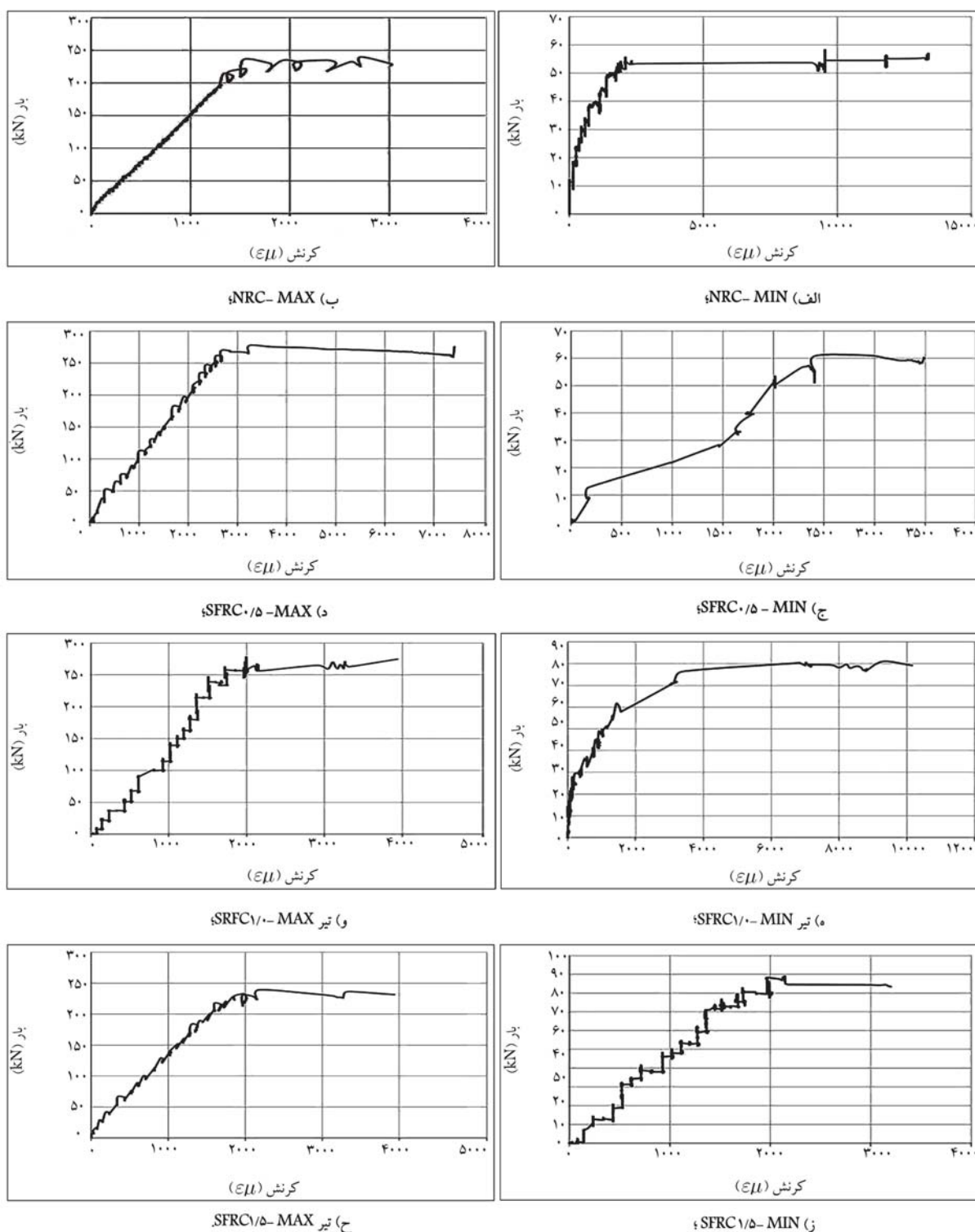


شکل ۵. منحنی نیرو - تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای آزمایش شده.

۴. تحلیل پارامترهای موثر بر رفتار خمشی نمونه‌ها

۴.۱. اثر درصد الیاف در نمونه‌های حاوی کمینه‌ی آرماتور (ρ_{min})
 منحنی‌های بار - تغییرمکان ۴ تیر که دارای کمینه‌ی آرماتور کششی طولی بودند، در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های ترک‌خوردگی،

جاری شدن، بیشینه و نهایی ۴ تیر با کمینه‌ی آرماتور طولی به همراه درصد افزایش هر کدام نسبت به تیر مرجع بدون الیاف فولادی و با کمینه‌ی آرماتور طولی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. مقایسه‌ی بین بارها و تغییرمکان ۴ تیر مذکور با کمینه‌ی آرماتور طولی در شکل ۸ مشاهده می‌شود. بررسی شکل‌های ۷ و ۸ و همچنین مقادیر ارائه شده در جدول ۴، نشان می‌دهد که اولین ترک در تیر مرجع با کمینه‌ی



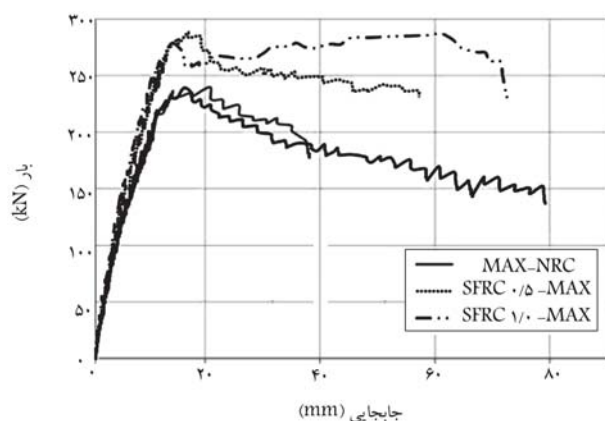
شکل ۶. منحنی نیرو- کرنش پیش‌بینی‌ی کششی میلگردهای تیرهای آزمایش شده.

الیاف داشته است، که اثر افزایشده و مثبت افزودن الیاف فولادی در افزایش میزان باربری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی - SFRC ۱/۵MIN نسبت به سایر نمونه‌ها، تغییر مکان نهایی بیشتری داشته است، که باعث شکست کمتر و دیرتر نمونه شده و دارای شکل‌پذیری بیشتری هم بوده است.

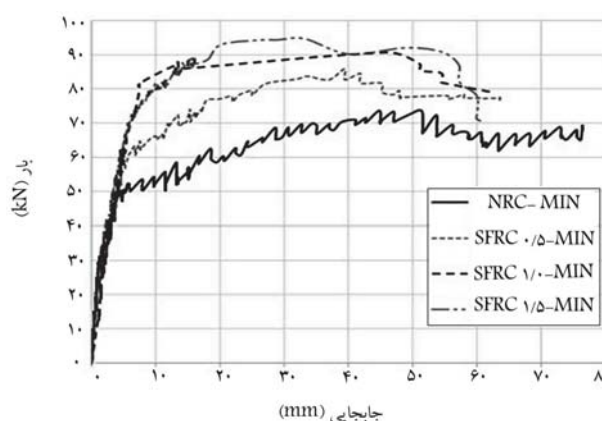
میلگرد طولی، در بار ۱۰ کیلو نیوتن در مرکز تیر مشاهده شده است، ولی با افزایش درصد الیاف، مقدار اخیر تا بار ۲۵ کیلو نیوتن و ۲/۵ برابر افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش در بار جاری شدن هم در تیر با ۱/۵٪ الیاف بوده است، که برابر ۳۸٪ افزایش مشاهده می‌شود. ضمناً تیر با ۱/۵٪ الیاف در مقایسه با دیگر تیرها، بیشترین بار پیشینه تا ۲۹٪ افزایش را نسبت به تیر مرجع بدون

جدول ۴. نتایج بارها و تغییرمکان‌های تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

نام نمونه	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	$\frac{P_y}{P_{y(NRC-MIN)}}$	Δ_y (mm)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{u(NRC-MIN)}}$	Δ_u (mm)
NRC-MIN	۱۰	۰/۰۴	۵۳/۴۹	۱/۰۰	۷/۸۲	۷۳/۶۶	۱/۰۰	۷۵/۴۵
SFRC ۰/۵-MIN	۱۲/۸۳	۰/۶۳	۵۷/۳۳	۱/۰۷	۵/۲۴	۸۵/۸۳	۱/۱۷	۶۳/۶
SFRC ۱/۰-MIN	۱۳/۸۳	۱/۱۳	۶۰/۳۳	۱/۱۳	۴/۹۵	۹۱	۱/۲۴	۶۱/۹۹
SFRC ۱/۵-MIN	۲۵	۱/۰۹	۶۸/۶۶	۱/۲۸	۵/۷۶	۹۵	۱/۲۹	۶۰/۵۱



شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو - تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با بیشینه‌ی آرماتور طولی.



شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو - تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

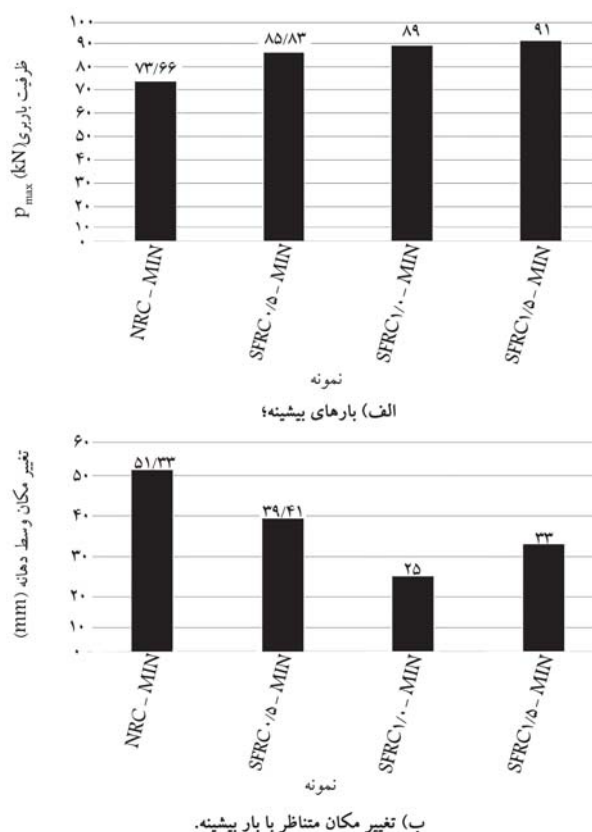
۲.۴. اثر درصد الیاف در نمونه‌های حاوی بیشینه‌ی آرماتور (ρ_{max})

منحنی‌های بار - تغییرمکان ۴ تیر معمولی و الیافی، که دارای بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی بوده‌اند، در شکل ۹ مشاهده می‌شوند. همچنین مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های مختلف تیرهای مذکور هم به همراه درصد افزایش هر کدام نسبت به تیر مرجع بدون الیاف فولادی در جدول ۵ ارائه شده‌اند. ضمناً مقایسه‌ی بین بارها و تغییرمکان ۴ تیر ذکر شده با بیشینه‌ی آرماتور طولی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در تیرهای بتن‌آرمه‌ی ساخته شده با بیشینه‌ی آرماتور کششی، ظرفیت بیشینه‌ی تیرها با افزودن الیاف فولادی تا ۱٪ افزایش یافته است؛ ولی با افزودن الیاف فولادی ۱/۵٪، افزایش محسوسی مشاهده نشده است، که به دلیل تراکم الیاف‌های زیاد است. بیشینه‌ی تغییرمکان وسط دهانه برای نمونه با ۱٪ الیاف برابر ۴۵ میلی‌متر بوده است، که علاوه بر بیشترین ظرفیت با رشد ۱۹٪ نسبت به نمونه‌ی مرجع، دارای بیشترین تغییرمکان با رشد بیش از ۲ برابر نسبت به نمونه‌ی مرجع بوده است.

۳.۴. اثر میزان آرماتور طولی در رفتار خمشی تیرها

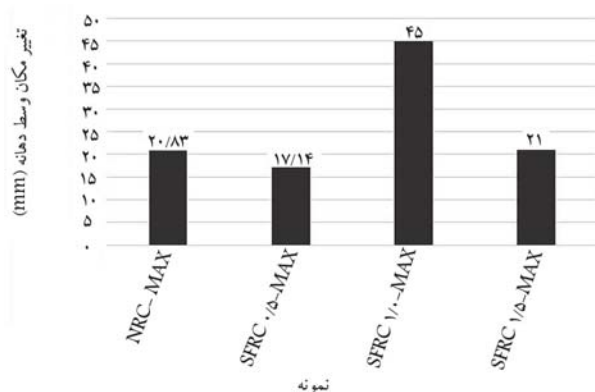
برای بررسی تأثیر درصد آرماتور طولی کمینه و بیشینه در رفتار تیرهای بتن‌آرمه‌ی معمولی، منحنی‌های بار - تغییرمکان ۴ تیر معمولی و الیافی، که دارای بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی بودند، به تفکیک برای ۴ نوع بتن متفاوت (معمولی و بتن‌های الیافی با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف) در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند؛ که مطابق آنها، در تمامی نمودارهای مقایسه‌ی نیرو - تغییرمکان بین جفت نمونه‌های ساخته شده از کمینه و بیشینه‌ی آرماتور کششی، نمونه‌های ساخته شده با ρ_{max} ، ظرفیت



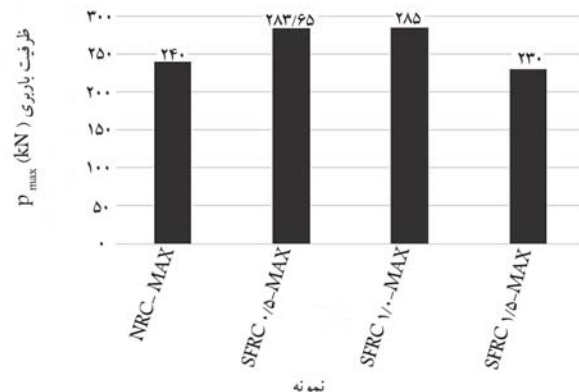
شکل ۸. مقایسه‌ی مقادیر نیرو و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

جدول ۵. نتایج بارها و تغییر مکان های تیرهای با بیشینه آرماتور طولی.

نام نمونه	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	$\frac{P_y}{P_{y(NRC-MAX)}}$	Δ_y (kN)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{max(NRC-MAX)}}$	Δ_u (mm)
NRC-Max	۳۵	۱/۳۰	۱۸۵	۱/۰۰	۱۰/۲۲	۲۴۰	۱/۰۰	۳۵/۰۲
SFRC ۰/۵-Max	۴۰	۱/۵	۲۴۵	۱/۳۳	۱۱/۹۶	۲۸۳/۶۵	۱/۱۸	۴۵/۵۶
SFRC ۱/۰-Max	۵۰	۱/۴۰	۲۵/۹۹	۱/۴۰	۱۲/۱۱	۲۸۵	۱/۱۹	۷۲/۰۸
SFRC ۱/۵-Max	۶۵	۲/۶	۲۱۰	۱/۱۵	۱۱/۵	۲۳۰	۰/۹۶	۳۱/۴۹

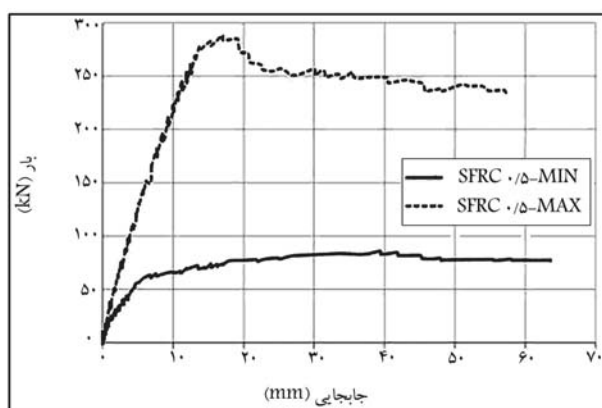


ب) تغییر مکان با بار بیشینه.

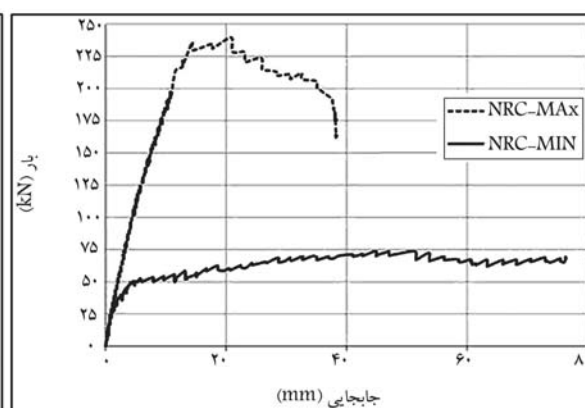


الف) بارهای بیشینه؛

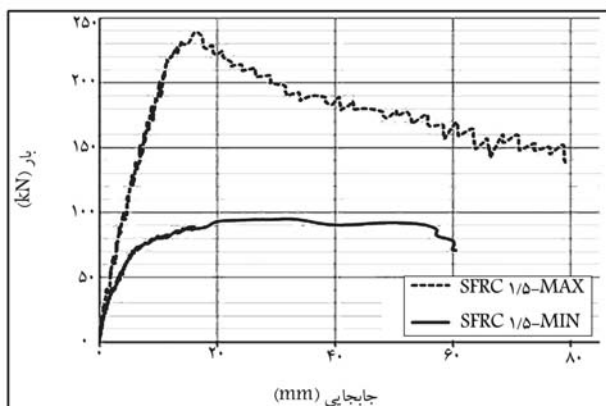
شکل ۱۰. مقایسه‌ی مقادیر نیرو و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیرهای با بیشینه آرماتور طولی.



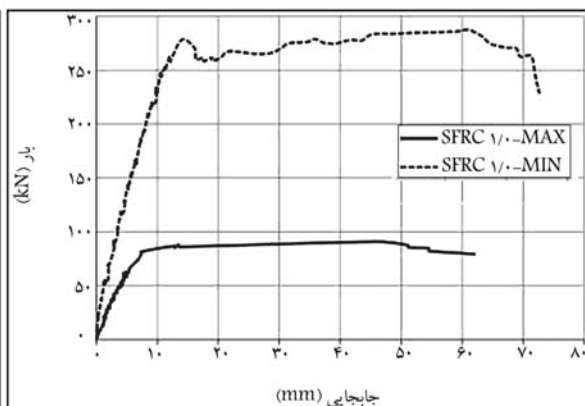
ب) بتن با ۰/۵ درصد الیاف؛



الف) بتن معمولی؛



د) بتن با ۱/۵ درصد الیاف.



ج) بتن با ۱ درصد الیاف؛

شکل ۱۱. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو - تغییر مکان تیرهای با کمینه و بیشینه آرماتور طولی در بتن‌های متفاوت.

جدول ۶. مقادیر شکل پذیری نمونه‌ی تیرهای آزمایش شده در بتن‌های مختلف.

الف) با کمینه‌ی آرما تور طولی				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MIN)}$
NRC-MIN	۷/۸۲	۷۵/۴۵	۹/۶۵	۱/۰۰
SFRC ^۰ /۵-MIN	۵/۲۴	۶۳/۶	۱۲/۱۴	۱/۲۶
SFRC ^{۱/۰} -MIN	۴/۹۵	۶۱/۹۹	۱۲/۵۲	۱/۳۰
SFRC ^{۱/۵} -MIN	۵/۷۶	۶۰/۵۱	۱۰/۵۱	۱/۰۹
ب) با بیشینه‌ی آرما تور طولی.				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MAX)}$
NRC-MAX	۱۰/۲۲	۳۵/۰۲	۳/۴۳	۱/۰۰
SFRC ^۰ /۵-MAX	۱۱/۹۶	۴۵/۵۶	۳/۸۱	۱/۱۲
SFRC ^{۱/۰} -MAX	۱۲/۱۱	۷۲/۰۸	۵/۹۵	۱/۷۴
SFRC ^{۱/۵} -MAX	۱۱/۵	۳۱/۴۹	۲/۷۴	۰/۷۸

جدول ۷. مقایسه‌ی مقادیر شکل پذیری نمونه‌ی تیرهای با کمینه و بیشینه‌ی آرما تور طولی.

الف) بتن معمولی				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MIN)}$
NRC-MIN	۷/۸۲	۷۵/۴۵	۹/۶۵	۱/۰۰
NRC-MAX	۱۰/۲۲	۳۵/۰۲	۳/۴۳	۰/۳۶
ب) بتن با ۵٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^0/5-MIN)}$
SFRC ^۰ /۵-MIN	۵/۲۴	۶۳/۶	۱۲/۱۴	۱/۰۰
SFRC ^۰ /۵-MAX	۱۱/۹۶	۴۵/۵۶	۳/۸۱	۰/۳۲
ج) بتن با ۱٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^{1/0}-MIN)}$
SFRC ^{۱/۰} -MIN	۴/۹۵	۶۱/۹۹	۱۲/۵۲	۱/۰۰
SFRC ^{۱/۰} -MAX	۱۲/۱۱	۷۲/۰۸	۵/۹۵	۰/۴۶
د) بتن با ۱/۵٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^{1/5}-MIN)}$
SFRC ^{۱/۵} -MIN	۵/۷۶	۶۰/۵۱	۱۰/۵۱	۱/۰۰
SFRC ^{۱/۵} -MAX	۱۱/۵	۳۱/۴۹	۲/۷۴	۰/۲۶

باربری بیشتری با سختی بالاتر و عموماً خیز نهایی بیشتری نسبت به نمونه با کمینه‌ی آرما تور طولی داشته‌اند.

الیاف به ترتیب ۳۰ و ۷۴ درصد بیش از نمونه‌های متناظر مرجع خود بوده‌اند. نمونه با کمینه‌ی آرما تور طولی ساخته شده با ۱/۵٪ الیاف هم افزایش حدود ۳۰ درصدی در ظرفیت نهایی و هم حدود ۱۰٪ افزایش در شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ی مرجع خود داشته است؛ ولی نمونه با بیشینه‌ی آرما تور طولی ساخته شده با ۱/۵٪ الیاف هم کاهش ۴ درصدی در ظرفیت و هم کاهش ۲۲ درصدی در شکل‌پذیری داشته است، که نشان می‌دهد حجم زیاد الیاف برای تیرهایی که دارای آرما تور طولی نزدیک به بیشینه هستند، خیلی مفید و مؤثر نیست. مقایسه بین مقادیر شکل‌پذیری نمونه‌های ساخته شده با کمینه و بیشینه‌ی آرما تور کششی در بتن‌های مختلف به تفکیک در جدول ۷ ارائه و نسبت شکل‌پذیری نمونه با بیشینه‌ی نسبت به نمونه با کمینه‌ی آرما تور طولی در هر حالت محاسبه و نشان داده شده است. در همه‌ی موارد با افزایش میزان آرما تور طولی، مقدار شکل‌پذیری به طور قابل توجهی کاهش یافته است، که مقدار آن در بتن‌های معمولی و با الیاف ۵٪ تا حدود ۶۵٪ و در حالت با الیاف ۱/۵٪ تا حدود ۷۴٪ بوده است و کمترین میزان کاهش در

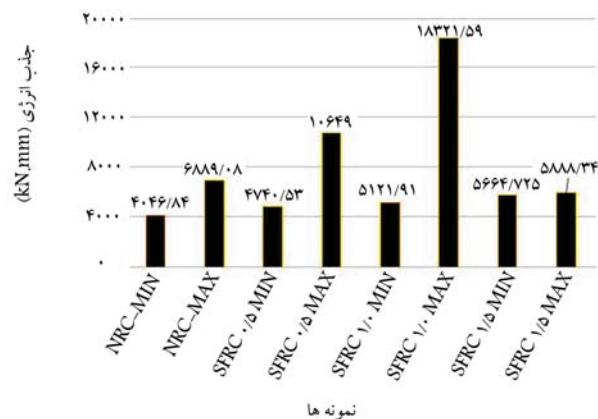
باربری بیشتری با سختی بالاتر و عموماً خیز نهایی بیشتری نسبت به نمونه با کمینه‌ی آرما تور طولی داشته‌اند.

۴.۴. بررسی شکل‌پذیری نمونه‌ها

شکل‌پذیری خمشی به صورت نسبت تغییرمکان نهایی Δ_u به تغییرمکان جاری شدن Δ_y تعریف می‌شود، که هر دو مقدار برای ۸ تیر آزمایش شده در جدول ۶ محاسبه و ارائه شده‌اند. مقادیر شکل‌پذیری نمونه‌های ساخته شده با کمینه و بیشینه‌ی آرما تور کششی با بتن‌های مختلف نیز به تفکیک در جدول ۷ ارائه و نسبت شکل‌پذیری هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مرجع متناظر ساخته شده با بتن معمولی محاسبه و نشان داده شده است. نتایج و مقایسه‌ها در جدول ۶ (الف و ب) نشان می‌دهند که نمونه‌های ساخته شده با ۱٪ الیاف، بیشترین شکل‌پذیری را نسبت به نمونه‌های مرجع خود داشته‌اند؛ به طوری که درصد افزایش در نمونه‌های الیافی ۱٪ با کمینه و بیشینه‌ی

جدول ۸. مقایسه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌های مختلف.

الف) با کمیته‌ی آرماتور کششی		
نام نمونه	میزان انرژی جذب شده $\frac{W}{w(NRC-MIN)}$ W (kN.mm)	
NRC-MIN	۴۰۴۶/۸۴	۱
SFRC ^۰ /۵-MIN	۴۷۴/۵۳	۱/۱۷
SFRC ^۱ /۰-MIN	۵۱۲۱/۹۱	۱/۲۷
SFRC ^۱ /۵-MIN	۵۶۶۴/۷۲۵	۱/۴۰
ب) با بیشینه‌ی آرماتور کششی.		
نام نمونه	میزان انرژی جذب شده $\frac{W}{w(NRC-MAX)}$ W (kN.mm)	
NRC-MAX	۶۸۸۹/۰۸	۱
SFRC ^۰ /۵-MAX	۱۰۶۴۹	۱/۵۵
SFRC ^۱ /۰-MAX	۱۸۳۲۱/۵۹	۲/۶۶
SFRC ^۱ /۵-MAX	۵۸۸۸/۳۴۱	۰/۸۵



شکل ۱۲. مقایسه‌ی جذب انرژی تیرهای آزمایش شده (kN.mm).

تیرها با ۱٪ الیاف بوده است، که تا ۳۴٪ کاهش یافته است، که نشان می‌دهد به کارگیری ۱٪ الیاف، عملکرد بهتری داشته است.

۵.۴. بررسی میزان جذب انرژی نمونه‌ها

میزان جذب انرژی هر نمونه برابر سطح زیر منحنی تا نقطه‌ی شکست در جابه‌جایی نهایی Δ_u نمونه است، که قدرت استهلاک انرژی توسط هر نمونه را نشان می‌دهد. مقادیر جذب انرژی ۸ نمونه از منحنی‌های بار - تغییرمکان هر نمونه محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین نسبت جذب انرژی نمونه‌های با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور طولی به تفکیک نسبت به نمونه‌های مرجع خودشان محاسبه و در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

مقادیر ارائه شده در جدول ۸ نشان می‌دهند که عموماً افزودن الیاف باعث افزایش میزان جذب انرژی تیرها شده و تیر با ۱/۵٪ الیاف، بیشترین مقدار جذب انرژی را در بین تیرهای با کمیته‌ی آرماتور طولی داشته و تا ۴۰٪ افزایش نسبت به تیر مرجع نشان داده است؛ در حالی که در بین تیرها با بیشینه‌ی آرماتور طولی، تیر

با ۱٪ الیاف، بیشترین جذب انرژی را داشته و افزایشی تا ۲/۶۶ برابر نسبت به تیر مرجع متناظر خود نشان داده و افزایش درصد الیاف تا ۱/۵٪، باعث کاهش ۱۵ درصدی جذب انرژی نسبت به تیر مرجع شده است.

۵.۴. مقایسه‌ی ظرفیت خمشی تئوری و آزمایشگاهی نمونه‌ها

با مقایسه‌ی لنگر به دست آمده از آزمایش و لنگر تئوری محاسباتی از آیین‌نامه‌های طراحی، میزان درستی محاسبات و مباحث تئوری در مورد تیرهای بتنی الیافی بررسی شده است. لنگر آزمایشگاهی حاصل ضرب نصف نیروی اعمالی بیشینه در فاصله‌ی نیروی متمرکز تا تکیه‌گاه است.

مقادیر ظرفیت خمشی اسمی تئوری (M_n) تیر بتن معمولی مطابق معادله‌ی ۵ و تیر بتن الیاف فولادی نمونه‌ها مطابق معادلات ۶ الی ۸ محاسبه و در جدول ۹ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند:

$$M_n = A_{st} f_{sy} d \left(1 - \frac{A_{st} f_{sy}}{\gamma_b b d f'_c} \right) \quad (5)$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{\gamma} \right) + 0.5 (h + e - a) b (h - e) \sigma_t \quad (6)$$

$$e = [0.003 + \varepsilon_t (fibers)] \frac{c}{0.003} \quad (7)$$

$$\sigma_t = 0.007773 v_F \left(\frac{l}{d} \right) F_b \quad (8)$$

که در آنها، A_s و f_y به ترتیب سطح و مقاومت جاری شدن میلگرد طولی، f'_c مقاومت فشاری بتن معمولی و σ_t مقاومت کششی بتن الیافی هستند. b و d به ترتیب عرض و ارتفاع مؤثر مقطع، $a = \frac{A_{st} f_{sy}}{0.85 b d f'_c}$ ، c و h هم به ترتیب ارتفاع تار خشی و ارتفاع کل تیر هستند. F_b مشخصات بازده پیوند الیاف است، که از ۱ تا ۱/۲ بسته به الیاف متغیر است. v_F و l/d به ترتیب نسبت حجمی و ابعادی الیاف هستند. با توجه به جدول ۲، مشخصات فنی الیاف فولادی، نسبت ۱/۵ برابر F_b و ۶۰ برابر l/d و مقدار کرنش الیاف $\varepsilon_t (fibers)$ بسیار ناچیز است، که از آن صرف‌نظر شده و v_F به ترتیب ۰/۵، ۱/۵ و ۱ برای بتن الیافی در نظر گرفته شده است. لذا مقدار σ_t برای بتن الیافی ۰/۵، ۱/۵ و ۱ درصد به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۴۷ و ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.

با توجه به نتایج جدول ۹، مقادیر لنگر آزمایشگاهی همه‌ی نمونه‌ها نسبت به مقادیر تئوری بین ۵ تا ۱۲۹ درصد افزایش یافته و کمترین افزایش در تیر با بیشینه‌ی آرماتور طولی و ۱/۵٪ الیاف و بیشترین افزایش در تیر با کمیته‌ی آرماتور طولی و ۱/۵٪ الیاف بوده‌اند. ضمناً میزان افزایش در همه‌ی تیرها با کمیته‌ی آرماتور طولی خیلی بیشتر از همان تیرها با بیشینه‌ی آرماتور طولی بوده و اثرپذیری مناسب افزودن الیاف در تیرها با آرماتور طولی کمتر را نشان داده است.

۵. نتیجه‌گیری

با طراحی و ساخت ۸ نمونه‌ی تیر بتن‌آرمه‌ی معمولی و الیافی در دو حالت با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور طولی و انجام آزمایش‌های مرتبط، این نتایج به دست آمده است:

- چگونگی انهدام نمونه‌های استوانه‌ای بتنی و SFRC نشان می‌دهد که وجود الیاف سبب یک‌پارچگی بیشتر نمونه‌ی SFRC شده و جداکردن بخش‌های تخریب شده‌ی نمونه به سادگی میسر نیست. نمونه‌ی بتنی به صورت دوکی شکل درآمده و کاهش طول آن به‌سادگی دیده نشده است؛ اما نمونه‌ی SFRC متورم شده و کاهش طول آن کاملاً قابل رؤیت بوده است.

جدول ۹. مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت خمشی تئوری و آزمایشگاهی تیرهای بتن آرمه.

ردیف	نام نمونه	$M_{the}(kN.m)$	$M_{exp}(kN.M)$	$\frac{M_{exp}}{M_{the}}$
۱	NRC-MIN	۱۳/۴۶	۲۴/۳۱	۱/۸۱
۲	NRC-MAX	۶۶/۱۰	۷۹/۲	۱/۲۰
۳	SFRC ^۰ /۵-MIN	۱۳/۸۷	۲۸/۳۲	۲/۰۴
۴	SFRC ^۰ /۵-MAX	۶۹/۸۵	۹۳/۶۰	۱/۳۴
۵	SFRC۱/۰-MIN	۱۴/۲۹	۲۹/۹۲	۲/۰۹
۶	SFRC۱/۰-MAX	۷۳/۴۴	۹۳/۵۵	۱/۲۷
۷	SFRC۱/۵-MIN	۱۳/۶۶	۳۱/۲۴	۲/۲۹
۸	SFRC۱/۵-MAX	۷۲/۲۶	۷۵/۹	۱/۰۵

داشته‌اند، ولی تیر با ۱/۵٪ الیاف، کاهش ۴ درصدی نسبت به تیر مشابه بتن معمولی داشته است.

در بین نمونه‌ها با کمینه‌ی آرماتورکشی، نمونه‌ی با ۱٪ الیاف، بیشترین نسبت شکل‌پذیری و افزایشی تا ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف داشته است. شکل‌پذیری نمونه با بیشینه‌ی آرماتورکشی و ۱٪ الیاف نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف دارای رشد تا ۷۴٪ بوده است، ولی کاهش ۲۲ درصدی در نمونه با ۱/۵٪ الیاف مشاهده شده است.

گرچه هم درصد آرماتورکشی و هم درصد الیاف، تأثیر مثبتی در مقدار شکل‌پذیری تیرها داشته‌اند، ولی افزایش درصد آرماتورهای کشی باعث کاهش ضریب شکل‌پذیری شده است؛ به‌طوری که ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ی - SFRC۱/۰ MAX نسبت به نمونه‌ی SFRC۱/۰-MIN به میزان ۴۶٪ کاهش داشته است.

افزودن ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی در تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به ترتیب انرژی مستهلک‌شده را به میزان ۱۷، ۲۷ و ۴۰ درصد افزایش داده است؛ در حالی که افزودن ۵/۰ و ۱/۰ درصد الیاف در تیرهای با بیشینه‌ی آرماتور طولی، افزایش ۵۵ و ۱۶۶ درصد داشته و افزودن ۱/۵٪ الیاف، کاهش ۱۵٪ را نشان داده است.

استفاده از الیاف در درصدهای ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ در پژوهش حاضر به ترتیب مشجر به افزایش ۳۲، ۶۴ و ۳۹ درصد مقاومت فشاری شده است، که افزایش کمتر در درصد بالای الیاف ناشی از تجمع الیاف و تشکیل حفره در بتن الیاف فولادی بوده است.

ترک‌خوردگی تمام نمونه‌های الیافی بیشتر از ترک‌خوردگی نمونه‌ی بدون الیاف متناظر بوده است. همچنین، فاصله‌ی بین ترک‌ها کاهش یافته و تعداد ترک بیش از نمونه‌های بدون الیاف متناظر بوده است.

در تیر بتن مسلح مرجع NRC، جاری شدن فولاد در طول کوتاه‌تر و در تیرهای با SFRC، جاری شدن فولاد در طول و سطح بزرگ‌تری اتفاق افتاده است، لذا از فولاد استفاده مؤثرتری به عمل می‌آید.

نیروی جاری شدن آرماتورهای کشی در تیرهای بتن الیافی با کمینه‌ی آرماتور کشی تا بیشینه‌ی ۲۸٪ افزایش یافته‌اند.

مقاومت خمشی تیرهای با کمینه‌ی آرماتورکشی (ρ_{min}) حاوی ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به تیرهای مشابه بتن معمولی به ترتیب ۱۶، ۲۳ و ۲۹ درصد افزایش داشته‌اند.

مقاومت خمشی تیرهای با بیشینه‌ی آرماتورکشی (ρ_{max}) حاوی ۵/۰ و ۱/۰ درصد الیاف فولادی نسبت به تیرهای مشابه بتن معمولی تا ۱۸٪ افزایش

پانویس‌ها

1. Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)
2. Faisal Mahmood
3. Yoo
4. Koli & Jadhav
5. Patil & Sangle

منابع (References)

1. Winkler, A., Edvardsen, C. and Kasper, T. "Examples of bridge, tunnel lining and foundation design with steel fibre reinforced concrete", *In Proceedings of FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop Fibre Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications* (2014).
2. ACI Committee 544, "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete- ACI 544.1R-96 (reapproved 2002)", *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 6, pp. ACI544.1R-7 - ACI544.1R-23 (2008).
3. Lequesne, R., Setkit, M., Parra-Montesinos, G.J. and et al. "Seismic detailing and behavior of coupling beams with high-performance fibre reinforced concrete", *ACI Special Publication*, **SP-272**, pp. 189-204 (2010).
4. Mahalingam, M., Pulipakka, R., Rao, N. and et al. "Ductility behavior of fibre reinforced concrete beams

- strengthened with externally bonded glass fibre reinforced polymer laminates", *American Journal of Applied Sciences*, **10**(1), pp. 107-111 (2013).
5. Shah, S.P. and Rangan, B.V. "Fiber reinforced concrete properties", *ACI Journal*, **83**(4), pp. 624-628 (1986).
6. Lee, S.C., Cho, J.Y. and Vecchio, F.J. "Simplified diverse embedment model for SFRC element in tension", *ACI Materials Journal*, **110**(4), pp. 403-412 (2013).
7. Fantilli, A.P., Mihashi, H. and Villini, P. "Multiple cracking and strain hardening in fiber-reinforced concrete under uniaxial tension", *Cement and Concrete Research*, **39**(12), pp. 1217-1229 (2009).
8. RILEM TC 162 – TDF 36 (Test and design methods for steel fibre reinforced concrete), pp. 560 – 567 (2003).
9. "Fib Model Code 2010, Fib Model Code for Concrete Structures 2010", *International Federation for Structural Concrete (fib)*, Berlin, Germany (2013). URL: <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
10. "ACI 318-19", Building code requirements for structural concrete and commentary, USA: *American Concrete Institute* (2019).
11. "AS 3600:2018. concrete Structures", *Standards Australia, Sydney, Australia: Australian Standard* (2018).
12. Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. "Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPFRCC layers", *Comput. Concr.*, **16**(4), pp. 545-568 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2015.16.4.000>.
13. Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K. and et al. "Ductile behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames", *Constr. Build. Mater.*, **115**, pp. 681-689 (2016). DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.04.078](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.078).
14. Mousavi Esfahani, S.V. and Sharbatdar, M.K. "Substitution effects of conventional concrete with high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) in beams reinforced with GFRP bars", *Case Stud. Constr. Mater.*, **13**, p. e00440 (2020).
15. Ehsani, R., Sharbatdar, M.K. and Kheyroddin, A. "Ductility and moment redistribution capacity of two-span RC beams", *Magazine of Civil Engineering*, **90**(6), pp. 104-118 (2019).
16. Ghods, A. and Sharbatdar, M.K. "An investigation on the behavior of two fixed end beams cast with HPFRCC composite", *Case Stud. Constr. Mater.*, **13**, p. e00466 (2020).
17. Faisal Mahmood, S.M., Agarwal, A., Foster, S.J. and et al. "Flexural performance of steel fibre reinforced concrete beams designed for moment redistribution", *Engineering Structures*, **177**, pp. 695-706 (2018).
18. Mahir Mahmod, H., Hanoon Ammar, N. and Haitham J. "Flexural behavior of self-compacting concrete beams strengthened with steel fiber reinforcement", *Journal of Building Engineering*, **16**, pp. 228-237 (2018). <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.006>.
19. Yoo, D.Y., Kim, S.W. and Park, J.J. "Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers", *Construction and Building Materials*, **132**, pp. 219-229 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11>.
20. Koli, M.D. and Jadhav, H.S. "Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete beams", *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.*, **2**(3), pp. 210-218 (Aug 2013).
21. Patil, S.P. and Sangle, K.K. "Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion", *Journal of Building Engineering*, **6**, pp. 157-162 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.02.004>.
22. Sharbatdar, M.K. and Ayubi, J. "Flexural retrofitting of the damaged reinforced concrete beams by using HPFRCC", *Scientia Iranica A*, **27**(6), pp. 2680-2689 (2020).
23. Taghikhani, A. and Sharbatdar, M.K. "Flexural behavior investigation of HPFRCC cantilever RC beam with different stirrup configuration", *Ferdousi Civil Eng Journal*, **31**(4), pp. 153-164 (In Persian) (1398/2019).
24. Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. "Using HPFRCC for increasing the capacity of a RC frame", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**(3), pp. 97-106 (In Persian) (1392/2013).
25. Tajari, A.R. and Sharbatdar, M.K. "Engineered cementitious composites effects on seismic strengthening of non-ductile RC frames with masonry infills", *Sharif Civil Engineering Journal*, **37.2**(2), pp. 25-37 (In Persian) (1400/2021).
26. Farrokhpour Tabrizi, M., Ghalehnovi, M. and Karimipour, A. "Ioteosfofextoracbw lsb", *Sharif Civil Engineering Journal*, **36.2**(3.2), pp. 109-123 (In Persian) (1399/2020).
27. Tavakoli, H.R. and Falahatbar, M. "Exeotfboscrofcbucl", *Sharif Civil Engineering Journal*, **31.2**(1.4), pp. 125-133 (In Persian) (1394/2015).

بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن سبک‌دانه‌ی حاوی باگاس و لیکا

علیرضا خالو (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

سیداحمد برسی* (دوبی)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، مرکز علمی کاربردی دزفول

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (دوبی)
دوبی ۳۹، شماره ۲، صص. ۲۹-۳۸، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن حاوی سبک‌دانه‌ی لیکا و الیاف باگاس تحت بارهای فشاری و ضربه‌یی، ابتدا یک طرح اختلاط ثابت در نظر گرفته شده و سپس نمونه‌هایی براساس طرح اختلاط مذکور، بدون افزودن باگاس و لیکا ساخته شده و پس از عمل‌آوری، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌هایی با طرح اختلاط مذکور و با ترکیب باگاس و لیکا به نسبت وزنی ۱ به ۳ و همچنین نمونه‌هایی با استفاده از لیکا (بدون باگاس)، با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین سنگ‌دانه‌ها، ساخته شده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌یی بر روی آنها صورت گرفته و نتایج استخراج شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بتن‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه در رده‌ی بتن سبک جای دارند و بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه، به عنوان بتن سبک سازه‌یی محسوب می‌شود و مقاومت ضربه‌یی بسیار بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد.

واژگان کلیدی: مقاومت ضربه‌یی، مقاومت فشاری، باگاس، لیکا، بتن سبک.

۱. مقدمه

فناوری‌ها و صنایع بزرگ در کنار خدماتی که عرضه می‌کنند، به علت ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی در بلندمدت می‌توانند حیات جامعه‌ی بشری را در معرض خطرهای جبران‌ناپذیری قرار دهند. لذا در توسعه‌ی فناوری‌ها و صنایع باید به توسعه‌ی پایدار توجه شود. به این معنی که در توسعه‌ی فناوری به نحوی رفتار شود که رفع نیازهای زمان حال، خطری برای رفع نیازهای نسل آینده ایجاد نکند.^[۱] با توجه به این‌که بتن یکی از صنایع بزرگ در جهان است و بعد از آب، پرمصرف‌ترین ماده در جهان است و همچنین با توجه به گره خوردن صنعت بتن با زندگی روزمره‌ی مردم، این صنعت می‌تواند نقش مهمی در تحقق توسعه‌ی پایدار ایفا کند.^[۲] در پژوهش حاضر، با به کارگیری مفاهیم توسعه‌ی پایدار، مقاومت ضربه‌یی و همچنین کاهش وزن مخصوص بتن و تولید بتن سبک، سعی شده است که با کاربرد الیاف باگاس، که یکی از ضایعات صنایع نیشکر است و همچنین لیکا به علت وزن کم، عایق بودن در برابر حرارت و صوت و دیگر خصوصیات مطلوب بتن تولید شده با آن،^[۳] در جهت تولید بتن سبک مقاوم در برابر ضربه، گامی در جهت تحقق توسعه‌ی پایدار برداشته شود.^[۴-۱۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۶/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۶/۹/۱۴۰۱، پذیرش ۲۸/۱۰/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61026.3140

استناد به این مقاله:

خالو، علیرضا و برسی، سیداحمد، ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن سبک‌دانه‌ی حاوی باگاس و لیکا. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۲۹-۳۸.

مقاومت ضربه‌یی در فرو کردن شمع‌های بتنی، پی ماشین‌هایی که بارهای ضربه‌یی اعمال می‌کنند، سازه‌های در معرض انفجار، همچنین هنگامی که وقوع ضربه‌های تصادفی ممکن باشد، اهمیت ویژه‌ی دارد. لازم به ذکر است با توجه به این‌که رابطه‌ی واحدی بین مقاومت فشاری و مقاومت ضربه‌یی بتن وجود ندارد، لازم است مقاومت ضربه‌یی مستقیماً مشخص شود.^[۱۲] علاوه بر مقاومت در برابر ضربه، موضوع دیگر ارزیابی شده در پژوهش حاضر، بررسی وزن مخصوص بتن است. پایین بودن نسبت مقاومت به وزن بتن در مقایسه با فولاد، برای ساخت برج‌ها و دیگر سازه‌های بزرگ به عنوان یک مشکل در مسیر توسعه‌ی اقتصادی محسوب می‌شود. به همین دلیل، امروزه سبک‌سازی با حفظ مقاومت، مورد علاقه‌ی دست‌اندرکاران صنعت ساختمان است.^[۴] با این حال، در زمینه‌ی مقاومت ضربه‌یی بتن سبک و الیافی در مقایسه با مقاومت فشاری، پژوهش‌های محدودتری انجام شده است، که در ادامه به معرفی بخشی از آنها پرداخته شده است.

مین^۱ و همکاران (۲۰۲۱)، در مقایسه‌ی مقاومت ضربه‌یی دو مدل بتن، یکی با کامپوزیت‌های سیمانی سخت‌کننده‌ی کرنش و دیگری با آر پی سی دریافتند که استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی سخت‌کننده‌ی کرنش در مقایسه با آر پی سی، در مقاومت در برابر بارهای ضربه‌یی مؤثرتر است.^[۱۳]

رامکومار^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، در ساخت بتن الیافی لایه‌بی دو مرحله‌بی سیمانی کم کربن، با استفاده از الیاف، کلینکر خاکستر بادی، خاک رس کلسینه و فولاد و نیز با استفاده از اشعه‌ی ایکس و تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روشی در بررسی نمونه‌ها دریافتند که نمونه‌ی پیشنهادی لایه‌بی، در مقایسه با مقطع کاملاً تقویت شده با مقادیر معادل فیبر، مقاومت بیشتری در برابر ضربه نشان می‌دهند.^[۱۴]

ژو و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ی تخریب موضعی دال‌های بتنی در اثر برخورد پرتابه‌ی انعطاف‌پذیر، به بررسی تأثیر سرعت پرتابه بر مود خرابی پرداخته‌اند.^[۱۵] بنسیا^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، برای بررسی خواص مختلف بتن الیافی، ۱۵ نمونه‌ی مختلف از انواع بتن الیافی را بررسی کردند و دریافتند که از بین نمونه‌های مورد پژوهش، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بیشترین مقاومت ضربه‌بی را ایجاد کرده‌اند.^[۱۶] در سال‌های اخیر، نیز فعالیت‌هایی در زمینه‌ی مقاومت ضربه‌بی بتن حاوی الیاف فولادی انجام شده است، که نتایج رضایت‌بخشی در بر داشته است.^[۱۷، ۱۸]

عبدالله‌زاده (۱۳۹۰)، نیز در نوشتاری با عنوان «ارزیابی رفتار بتن نیمه‌سبک با لیکا حاوی الیاف فولادی»، خواص مکانیکی بتن‌های نیمه‌سبک ساخته شده از لیکا با ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد جایگزینی با شن، را که با الیاف فولادی صنعتی با درصد‌های ۱/۱، ۱/۵ و ۱/۵ مسلح شده بودند، بررسی و مطالعه کردند و در مجموع ۱۲ ترکیب مختلف بتن را ساخته و دریافت‌اند که الیاف با تشکیل شبکه‌بی مانع از آن می‌شوند که سبک‌دانه از بقیه‌ی مصالح جدا شود و در هنگام شکستن نیز مصالح از هم پاشیده نمی‌شوند. طرح بتن ساخته شده با ۷۵٪ لیکا و ۱/۵٪ الیاف فولادی با وزن مخصوص ۱۹۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۶/۸۸ مگاپاسکال، که در چارچوب بتن سبک سازه‌بی قرار می‌گیرد، به عنوان طرح اختلاط مناسب پیشنهاد شده است.^[۱۹]

همچنین شربتدار و همکاران (۱۳۹۰)، در مطالعه‌ی صفحات بتن‌آرمه‌ی دو لایه تحت بارگذاری ضربه‌بی به بررسی اثر ضخامت دال‌های بتن‌آرمه‌ی دو لایه و همچنین اثر وجود ضربه‌گیر بین دو لایه در برابر بارهای ضربه‌بی پرداختند و دریافتند که دو لایه ساختن و استفاده از ضربه‌گیر ارتجاعی در بین لایه‌ها، تأثیر زیادی در افزایش مقاومت صفحات بتن‌آرمه در برابر ضربه دارد.^[۱۲]

چوسلیپ^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، در یک کار پژوهشی از خاکستر باگاس به عنوان یک ماده‌ی پوزولانی در بتن استفاده کرده‌اند. ایده‌ی پژوهش اخیر آن بوده است که یک ماده‌ی ارزان‌تر جایگزین سیمان شود تا بدون تغییر در کیفیت بتن، قیمت تمام شده‌ی بتن ارزان‌تر تمام شود. لذا با جایگزینی خاکستر باگاس با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان دریافت‌اند که بتن حاوی ۲۰٪ باگاس، مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتری در مقایسه با بتن مینا در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه داشته است. همچنین مقدار بهینه‌ی نسبت خاکستر باگاس به سیمان ۲۰٪ وزنی سیمان بوده است.^[۲۰]

خالو و همکاران (۱۳۹۸)، نیز در مطالعه‌بی به بررسی آزمایشگاهی عملکرد ضربه‌بی دال‌های بتنی مسلح شده به میلگرد GFRP پرداخته و ۷ نمونه‌ی دال بتنی با جزییات و مشخصات مختلف از نظر میزان، چیدمان و نوع آرماتور مسلح‌کننده را آزمایش کرده‌اند. دال‌ها به شکل مربعی با ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر و ضخامت‌های ۵/۷ سانتی‌متر تحت بارگذاری ضربه‌بی ناشی از سقوط وزنه‌ی ۱۰۵ کیلوگرمی قرار گرفته و سپس جابه‌جایی دال‌ها، کرنش آرماتورهای طولی، شتاب ارتعاش قائم دال‌ها، گسترش ترک و عرض ترک و نحوه‌ی شکست نمونه‌ها ارزیابی شده‌اند. نتایج پژوهش اخیر نشان می‌دهد که افزایش میزان آرماتورهای طولی و افزایش ضخامت دال، تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد دینامیکی دال‌ها تحت بار ضربه‌بی دارند. همچنین

استفاده از میلگردهای GFRP گرچه در حالت کلی سبب کاهش ظرفیت دال‌ها در برابر ضربه می‌شود، اما با افزایش حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد میزان میلگرد نسبت به میلگرد فولادی می‌توان به عملکرد مشابه و یا حتی بهتر از دال‌های با میلگرد فولادی در برابر ضربه دست یافت.^[۲۱]

در پژوهش حاضر، تأثیر کاربرد الیاف باگاس و سبک‌دانه‌ی لیکا با درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین سنگ‌دانه‌ها از نظر مقاومت‌های فشاری و ضربه‌بی و وزن مخصوص در بتن بررسی شده است.

۲. روش پژوهش

در پژوهش حاضر، خواص مکانیکی بتن‌های سبک‌ساخته، با ساخت نمونه‌های مکعبی جهت آزمایش مقاومت فشاری و نمونه‌های دیسکی جهت آزمایش ضربه مطالعه شده است. بدین منظور، ابتدا یک طرح اختلاط ثابت براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۲۱۱ در نظر گرفته شده و پیش از ساخت نمونه‌های اصلی، چند نمونه‌ی آزمایشی جهت به دست آوردن میزان بهینه‌ی فوق روان‌کننده و میکروسیلیس ساخته شده است. نمونه‌های بتن معمولی، براساس طرح اختلاط مذکور بدون افزودن باگاس و لیکا ساخته شده و پس از عمل‌آوری تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌هایی با طرح اختلاط اخیر و با ترکیب باگاس و لیکا به نسبت وزنی ۱ به ۳ (۱ واحد باگاس، ۳ واحد لیکا) و همچنین نمونه‌هایی با استفاده از لیکا (بدون باگاس)، با درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین درشت‌دانه‌ها، ساخته شده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌بی (با استفاده از دستورالعمل و دستگاه ساخته شده براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۵۴۴) بر روی آنها صورت گرفته و نتایج استخراج شده است. لازم به ذکر است که عیار سیمان به طور ثابت، ۴۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده و در کلیه‌ی مخلوط‌ها به میزان ۶٪ وزن سیمان، میکروسیلیس و ۱٪ وزن سیمان، فوق روان‌کننده استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت دیسکی به قطر ۱۵۲ میلی‌متر (۶ اینچ) و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) و مکعبی ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متر، در دو سن ۱۴ و ۲۸ روزه و هر کدام ۴ تکرار و در مجموع ۶۴ نمونه‌ی مکعبی و ۶۴ نمونه‌ی دیسکی (۳۲ نمونه‌ی حاوی لیکا و باگاس و ۳۲ نمونه‌ی حاوی فقط لیکا) ساخته شده‌اند.

۳. مصالح استفاده شده

اولین گام به منظور طرح اختلاط دقیق و مناسب بتن، شناخت کامل مصالح اختلاط، شامل: سنگ‌دانه‌ها، سیمان، آب و سایر مواد افزودنی است. لازم به ذکر است که مشخصات مصالح استفاده شده در بتن براساس دستورالعمل‌های ASTM تعیین شده است.^[۲۲]

۱.۳. مصالح سنگی

اسکلت اصلی بتن، سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن هستند. اهمیت استفاده از سنگ‌دانه‌های مناسب و مرغوب در بتن از آن‌جا معلوم می‌شود که سنگ‌دانه‌های ریز و درشت عموماً ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن (۷۰ تا ۸۵ درصد وزن بتن) را اشغال می‌کنند و در خواص بتن تازه و سخت شده و نسبت‌های اختلاط بتن تأثیر بسزایی دارند. لذا سنگ‌دانه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، پس از بررسی معادن مختلف و یافتن مرغوب‌ترین مصالح از لحاظ کیفیت و دانه‌بندی در منطقه انتخاب

جدول ۲. ترکیب شیمیایی باگاس.

هلوسلولز	لیگنین	شکر	خاکستر	رطوبت
۷۱/۶۶	۱۷/۱۴	۰/۲-۲	۲/۷۸	۶/۷

است، لازم است که در انتخاب سیمان، کنترل‌های دقیقی به عمل آید. لذا سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر، سیمان تپ II منطبق بر ضوابط ASTM-C۱۵۰ با چگالی ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و با سطح مخصوص ۳۳۵۰ سانتی‌مترمربع بر گرم انتخاب شده است. [۲۳]

۳.۳. باگاس

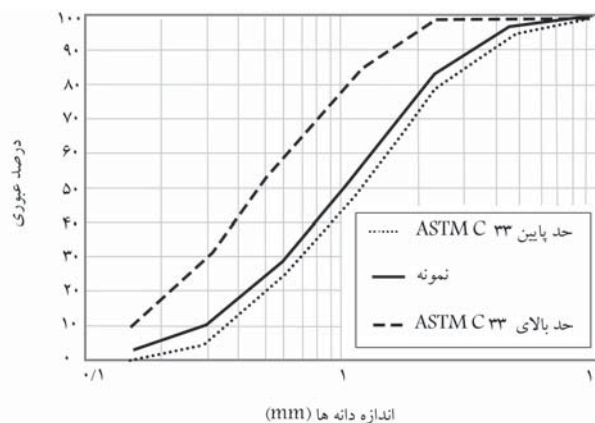
باگاس مصرفی از کارخانه‌ی کشت و صنعت نیشکر هفت تپه‌ی خوزستان تهیه شده است. وزن مخصوص متراکم و غیرمتراکم آن به ترتیب ۱۲۹ و ۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و ترکیب‌های شیمیایی آن مطابق جدول ۲ بوده است. لازم به ذکر است که به دلیل کنترل جذب آب و تأثیر شکر موجود در آن، قبل از اضافه کردن باگاس به مخلوط، با درصدی از سیمان طرح اختلاط مخلوط می‌شود. [۲۴ و ۲۵]

۴.۳. فوق روان‌کننده

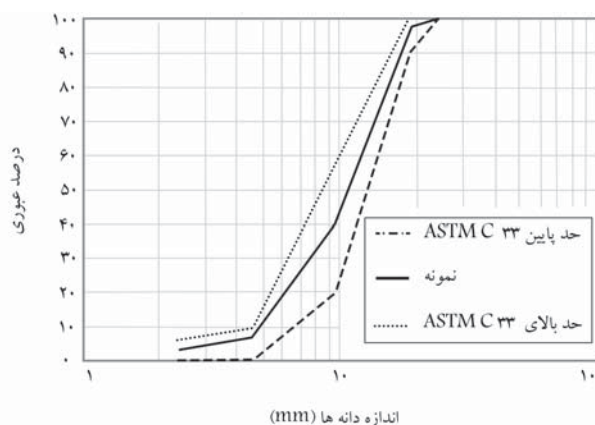
مواد فوق‌روان‌کننده می‌توانند در دو حالت استفاده شوند: در یک حالت، می‌توانند روانی بیشتری را در یک نسبت آب به سیمان ثابت در مقایسه با بتن شاهد ایجاد کنند و در حالت دیگر، باید قادر باشند تا یک روانی ثابت را در مقایسه با یک بتن شاهد با کاهش آب مخلوط فراهم کنند. به علت به دست آمدن خواص بسیار مطلوب در بتن تازه و سخت شده، همچنین با توجه به استفاده از میکروسیلیس جهت کمک به توزیع ذرات میکروسیلیس و ایجاد جریان‌پذیری مناسب در مخلوط بتنی، از فوق روان‌کننده استفاده شده است. فوق‌روان‌کننده‌ی استفاده شده در طرح اختلاط، از نوع power plast-ES با رنگ قهوه‌یی سوخته بوده است.

۵.۳. لیکا

سیک‌دانه‌ی لیکا (دانه‌های رس منبسط شده) در کشورهای اروپایی با عناوینی نظیر: لایتک، لیکا، آگلایت و آراکس نامیده و عموماً در اروپا براساس وزن مخصوص توده‌یی خشک طبقه‌بندی می‌شوند، در حالی که روش طبقه‌بندی سیک‌دانه‌ی لیکا در ایران براساس قطر دانه‌ها صورت می‌گیرد، که به علت مشخص بودن دانه‌بندی، طبقه‌بندی اخیر روش مناسب‌تری جهت استفاده در طرح اختلاط پژوهش حاضر بوده است. برخی از ویژگی‌های لیکا، از جمله: مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن باعث شده است تا در فعالیت‌های عمرانی و صنعتی کاربرد خوبی داشته باشد. از آن‌جا که دانه‌های لیکا در دمای نزدیک به ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تولید می‌شوند، قادرند شوک حرارتی تا ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را بدون اشتغال تحمل کنند. از سوی دیگر، دانه‌های لیکا، قابلیت هدایت حرارتی پائینی دارند، که این موضوع نقش مؤثری در جلوگیری از انتقال آتش دارد. لذا با توجه به موضوع پژوهش حاضر، که احتمال مواجهه با آتش در اثر انفجار نیز برای بتن وجود دارد، استفاده از مصالح ذکر شده جهت کاهش وزن مخصوص بتن جهت تولید بتن سبک مناسب به نظر می‌رسد. [۲۶ و ۲۷] در پژوهش حاضر، برای کاهش وزن مخصوص بتن علاوه بر باگاس، از لیکا با بیشینه‌ی بعد ۱/۲۷ سانتی متر (۵/۰ اینچ) استفاده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه.



شکل ۲. دانه‌بندی شن.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس استفاده شده.

اندازه‌ی ذرات	> 1 میکرون
وزن حجمی متراکم شده	480 تا 720 kg/m^3
وزن مخصوص (Gs)	$2/2$
سطح مخصوص	15000 تا 30000 m^2/kg

شده‌اند. مصالح سنگی شکسته با بیشینه‌ی بعد ۱۹ میلی‌متر از معدن واقع در ۲۰ کیلومتری محور دزفول - شوشتر تهیه شده و براساس دستورالعمل ASTM-C۳۳، آزمایش‌های لازم بر روی آنها صورت گرفته است. در شکل‌های ۱ و ۲، به ترتیب نمودارهای دانه‌بندی ماسه و شن مشاهده می‌شوند. چگالی شن و ماسه به ترتیب ۲/۶۲ و ۲/۶۵ بوده است.

۲.۳. سیمان و میکروسیلیس

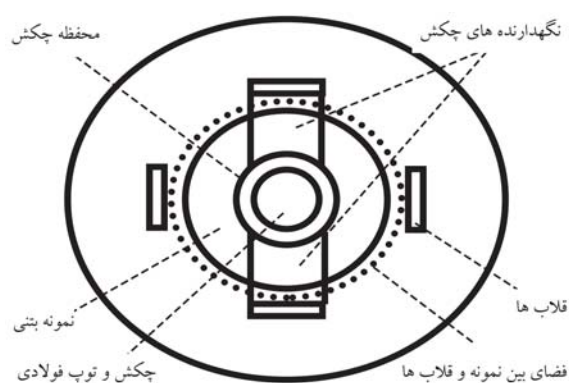
میکروسیلیس یا دوده‌ی سیلیسی، ماده‌یی پودری و خاکستری‌رنگ بوده است، که محصول فرعی کوره‌های قوس الکتریکی در فرایند تولید آلیاژهای فروسیلیس است. با توجه به مزایای کاربرد میکروسیلیس در بتن تازه و سخت شده، از جمله: افزایش چسبندگی، کاهش آب انداختن، افزایش مقاومت فشاری، افزایش دوام و پایداری، افزایش مدول کشسانی و کاهش نفوذپذیری در پژوهش حاضر جهت بهره‌مندی از خواص فوق از پودر میکروسیلیس با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. از سوی دیگر، از آن‌جا که کیفیت سیمان در تولید یک بتن خوب بسیار مؤثر

جدول ۳. طرح اختلاط‌های استفاده شده.

ردیف	سبک‌دانه	فوق روان‌کننده	میکروسیلیس	آب	سیمان	ماسه	شن	درصد سبک‌دانه
	kg/m ^۳	kg/m ^۳	kg/m ^۳	kg/m ^۳	kg/m ^۳	kg/m ^۳	kg/m ^۳	(%)
۱	-	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۹۹۵	۰
۲	۲۱	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۸۰۵/۵	۱۰
۳	۴۲	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۶۱۶	۲۰
۴	۶۳	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۴۲۶/۵	۳۰

جدول ۴. نمونه‌های ساخته شده با سبک‌دانه (لیکا و باگاس).

ردیف	سبک‌دانه (درصد)	نمونه‌ی مکعبی			نمونه‌ی دیسکی		
		کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه	کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۱	۰	B۰	۴	۴	C۰	۴	۴
۲	۱۰	B۱	۴	۴	C۱	۴	۴
۳	۲۰	B۲	۴	۴	C۲	۴	۴
۴	۳۰	B۳	۴	۴	C۳	۴	۴



شکل ۳. شکل شماتیک نمونه‌ی بتنی و وسایل ضربه.

ضربه‌های لازم جهت رسیدن به خرابی نهایی ثبت می‌شود. براساس آیین‌نامه‌ی مذکور خرابی نهایی زمانی رخ می‌دهد که نمونه به ۳ عدد از قلاب‌ها برخورد کرده باشد.^[۲۸]

طرح اختلاط‌های استفاده شده در جدول ۳ و مشخصات و تعداد نمونه‌های دیسکی و مکعبی آزمایش شده در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

۵. نتایج آزمایش‌ها و بحث

در بخش حاضر، نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه، مقاومت فشاری و میزان وزن مخصوص ارائه شده است. لازم به ذکر است که جدول‌های تحلیل آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار متلب^۵ انجام شده است. هر مقاومت فشاری و ضربه‌ی ثبت شده در جدول نتایج، میانگین ۴ نمونه است. مقاومت فشاری نمونه‌ها براساس نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و مقاومت ضربه‌ی براساس نمونه‌ی دیسکی به قطر ۱۵/۲ و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شده است. در پژوهش حاضر، سبک‌دانه به معنی ترکیب یک واحد باگاس و سه واحد لیکا است. در ادامه، در قالب نمودارها و جدول‌ها به تجزیه و تحلیل نتایج

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

بهبود مقاومت در برابر ضربه (جذب انرژی دینامیکی)، یکی از خواص مهم بتن الیافی است؛ که جهت به کارگیری این ویژگی در موقعیت‌هایی که مقاومت در برابر ضربه برای بتن مورد نیاز باشد، لازم است میزان مقاومت در برابر ضربه سنجیده شود. چندین نوع آزمایش برای اندازه‌گیری مقاومت ضربه‌ی بتن الیافی وجود دارد، که این آزمایش‌ها براساس مکانیسم ضربه و پارامتری که در جریان آزمایش ضربه، اندازه‌گیری و بازدید می‌شود، طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های آزمایش ضربه، آزمایش ضربه‌های مکرر به وسیله‌ی سقوط وزنه است، که تعداد ضربه‌های لازم برای رسیدن به یک سطح خرابی از پیش تعیین شده را بر روی نمونه‌ی مورد آزمایش ارائه می‌دهد. تعداد ضربه‌ها به عنوان یک تخمین کیفی جذب انرژی نمونه در سطح خرابی تعریف شده است. آزمایش اخیر می‌تواند برای مقایسه‌ی نسبی قابلیت مخلوط‌های متفاوت بتن الیافی و اثبات بهبود کارایی بتن الیافی نسبت به بتن معمولی استفاده شود. لذا در پژوهش حاضر، با توجه به استفاده از الیاف باگاس در نمونه‌های ساخته شده و همچنین امکان استفاده از روش ذکر شده در شرایط کارگاهی، از شیوه‌ی ضربه‌های مکرر استفاده شده است. در پژوهش حاضر، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با استفاده از جک فشاری و آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی با استفاده از دستگاهی که براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۵۴۴ ساخته، انجام گرفته است. نمونه‌های دیسکی با ضخامت ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) و قطر ۱۵۲ میلی‌متر (۶ اینچ) در قالب قرار می‌گیرند، ولی فقط نمونه در یک لایه ریخته می‌شود. جهت حفظ توزیع یکنواخت الیاف، ویریه‌ی خارجی انجام می‌گیرد. می‌توان قالب را تا ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) پر و سطح آن را صاف کرد، یا یک نمونه‌ی استوانه‌ی کامل ساخت و نمونه‌ی مورد نظر را از آن جدا کرد. نمونه در قسمت پایین با لایه‌ی نازکی از یک ماده‌ی نفتی لیزج یا گریس پوشیده می‌شود و بر روی صفحه پایه بین زبانه‌ها قرار می‌گیرد، به طوری که سطح تمام شده‌ی نمونه رو به بالا باشد. سپس توپ فولادی به قطر ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) بر روی نمونه قرار می‌گیرد (شکل ۳). تعداد ضربه‌های لازم جهت وقوع اولین ترک قابل مشاهده، همچنین

جدول ۵. نمونه‌های ساخته شده با فقط لیکا.

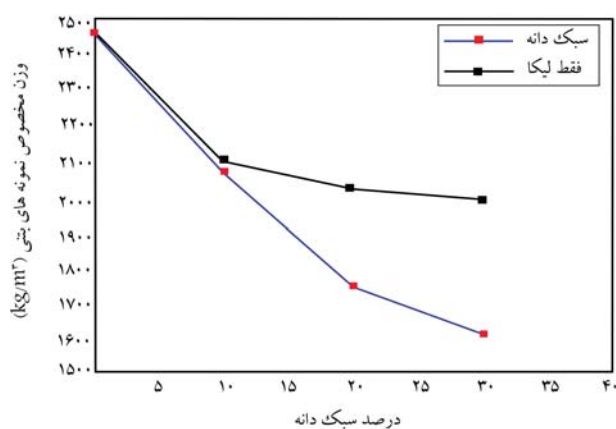
ردیف	سبک‌دانه (درصد)	نمونه مکعبی			نمونه دیسکی		
		کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه	کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۱	۰	L۰	۴	۴	D۰	۴	۴
۲	۱۰	L۱	۴	۴	D۱	۴	۴
۳	۲۰	L۲	۴	۴	D۲	۴	۴
۴	۳۰	L۳	۴	۴	D۳	۴	۴

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس).

وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت ضربه‌یی خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m ²)	سن بتن (Days)	درصد سبک‌دانه (%)
۲۴۵۸	۲۲	۲۹۸	۱۴	۰
	۳۳	۴۰۵	۲۸	
۲۰۶۳	۱۲۹	۱۶۳	۱۴	۱۰
	۱۸۳	۲۲۰	۲۸	
۱۷۳۹	۲۱۳	۱۲۹	۱۴	۲۰
	۳۰۸	۱۷۳	۲۸	
۱۶۰۵	۹۳	۷۸	۱۴	۳۰
	۱۲۳	۱۰۰	۲۸	

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های حاوی فقط لیکا.

وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت ضربه‌یی خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m ²)	سن بتن (Days)	درصد لیکا جایگزین حجمی شن (%)
۲۰۸۰	۲۰	۲۵۸	۱۴	۱۰
	۲۷	۳۷۸	۲۸	
۲۰۳۷	۲۹	۲۳۱	۱۴	۲۰
	۴۳	۳۴۰	۲۸	
۲۰۲۱	۶۸	۲۰۰	۱۴	۳۰
	۱۰۰	۲۸۶	۲۸	



شکل ۴. نمودار رابطه بین وزن مخصوص با درصد سبک‌دانه.

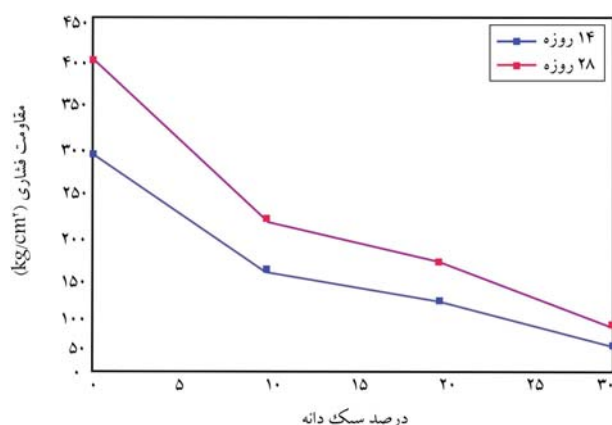
پرداخته شده است. لازم به ذکر است که بتن حاوی ۷۰٪ سبک‌دانه به جای سنگ‌دانه‌ها، قادر به تحمل هیچ نیرویی نیست و پس از قالب‌برداری، بتن فرو می‌ریزد.

۱.۵. بررسی وزن مخصوص نمونه‌ها

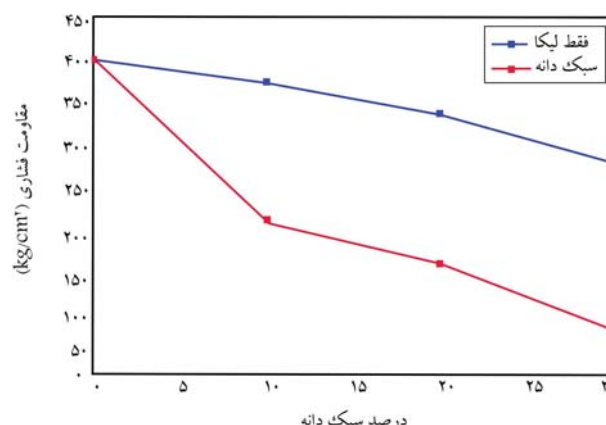
همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، کلیه بتن‌های حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه و بیشتر را می‌توان به عنوان بتن سبک در نظر گرفت. همچنین براساس تعریف بتن سبک سازه‌یی، بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک سازه‌یی به شمار آورد. با دقت در جدول‌های ۶ و ۷ و شکل ۴ نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش درصد سبک‌دانه، وزن مخصوص کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شیب نمودار کاهش وزن، با افزایش درصد سبک‌دانه کمتر شده

جدول ۸. میزان تغییرات مقاومت فشاری، ضربه‌یی و وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به بتن معمولی.

وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت ضربه‌یی (تعداد ضربات) خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m ²)	سن بتن (Days)	درصد سبک‌دانه (%)
-۱۶٪	+۴۸۶٪	-۴۵٪	۱۴	۱۰
	+۴۵۴٪	-۴۵٪	۲۸	
-۲۹٪	+۸۶۸٪	-۵۶٪	۱۴	۲۰
	+۸۳۳٪	-۵۷٪	۲۸	
-۳۴٪	+۳۲۲٪	-۷۳٪	۱۴	۳۰
	+۲۷۲٪	-۷۵٪	۲۸	



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به درصد سبک‌دانه.



شکل ۵. نمودار رابطه بین مقاومت فشاری با درصد سبک‌دانه.

است، که این کاهش شیب با ایجاد شکستگی‌هایی در نمودار مشاهده می‌شود. میزان شکستگی نمودار در نقطه‌ی مربوط به ۲۰٪ سبک‌دانه به طور مشخصی نسبت به شکستگی مربوط به نقطه‌ی ۱۰٪ سبک‌دانه، شدیدتر شده است. بنابراین به ازاء درصد سبک‌دانه‌ی بالاتر از ۲۰٪، شدت کاهش وزن مخصوص به طور محسوسی کمتر شده است. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی میزان کاهش وزن نمونه‌ی حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) با نمونه‌ی حاوی فقط لیکا مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با ۱۰٪ سبک‌دانه و کمتر، میزان کاهش وزن در هر دو سری نمونه‌ها نزدیک به هم بوده و پس از آن شدت کاهش وزن نمونه‌های حاوی باگاس بسیار بیشتر شده است، به طوری که کاهش وزن نمونه‌های با ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ برابر میزان کاهش وزن در نمونه‌های با فقط لیکا بوده است.

۲.۵. مقاومت فشاری

در جدول ۶، میزان مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی و وزن مخصوص نمونه‌های سبک‌دانه و در جدول ۸، میزان تغییرات مقادیر اخیر نسبت به بتن معمولی (بدون سبک‌دانه) ارائه شده است.

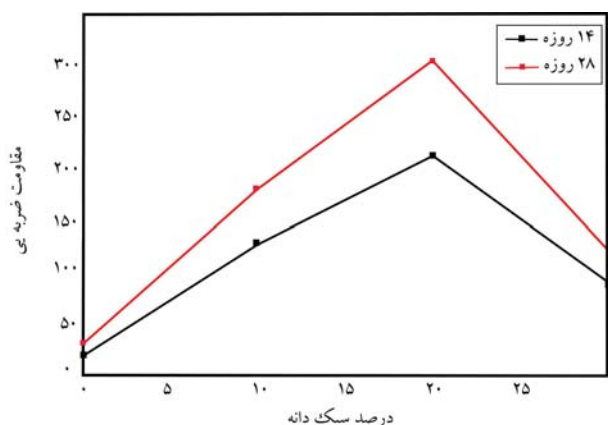
همچنین در شکل ۵، نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) و در کنار آن نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های با فقط لیکا جهت مقایسه ترسیم شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی حاوی ترکیب باگاس و لیکا در کلیه‌ی دوره‌های عمل‌آوری، کاهش قابل‌ملاحظه‌یی نسبت به نمونه‌ی بتن معمولی و همچنین نسبت به نمونه‌های حاوی فقط لیکا از خود نشان داده‌اند. در مقابل، مقاومت ضربه‌یی و میزان جذب



شکل ۸. شکست قطری نمونه‌ی بتن معمولی و شکست قطاعی نمونه با سبک‌دانه.



شکل ۹. آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی.



شکل ۱۰. نمودار رابطه‌ی مقاومت ضربه‌یی با درصد سبک‌دانه.

و جذب انرژی با افزایش میزان سبک‌دانه از صفر تا ۱۰ درصد با شیب بیشتری رشد کرده و در نقطه‌ی با درصد سبک‌دانه‌ی ۱۰، مقاومت ضربه‌یی جهت نمونه‌ی ۲۸ روزه به ۱۸۰ رسیده است؛ در حالی که پس از عبور میزان سبک‌دانه از ۱۰٪، شیب نمودار یا به عبارتی شدت افزایش مقاومت ضربه‌یی کمتر شده است. با عبور میزان سبک‌دانه از مرز ۳۰٪، نمودار نزولی شده و میزان مقاومت ضربه‌یی شروع به کاهش کرده است؛ به طوری که در انتهای نمودار برای بتن ۲۸ روزه حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه، عدد ضربه ۱۲۱ است. در شکل ۱۱، نمودارهای مقاومت ضربه‌یی نمونه‌های حاوی سبک‌دانه (لیکا و باگاس) و نمونه‌های حاوی فقط لیکا مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها و همچنین مشاهده‌ی جدول ۹ ملاحظه می‌شود که مقاومت ضربه‌یی نمودارهای حاوی سبک‌دانه‌ی مخلوط با نرخ بسیار سریع‌تری افزایش یافته است، به طوری که در ۲۰٪، بیشینه‌ی اختلاف را با نمونه‌ی حاوی لیکا داشته است، که میزان آن در حدود ۷ برابر نمونه‌ی حاوی فقط لیکا بوده است. در شکل ۱۲، رابطه‌ی بین تغییرات مقاومت ضربه‌یی در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه بتن، نسبت به مقاومت فشاری در همین سنین مشاهده می‌شود. هر یک از نقاط مشخص شده در نمودارها مربوط به یک طرح اختلاط با درصد سبک‌دانه‌ی ثابت است. در ضلع افقی نمودار، تغییرات مقاومت فشاری در بازه‌ی زمانی ۱۴ تا ۲۸ روزه و در محور



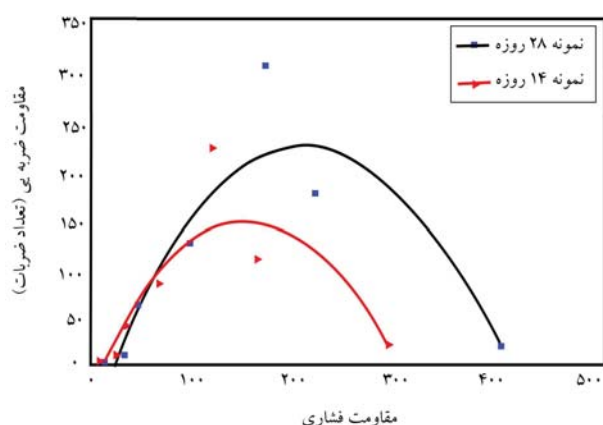
شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی.

۶۰٪ سبک‌دانه، به علت افت ۹۰ درصدی مقاومت فشاری، کاربرد محدودی دارند و بتن‌های حاوی ۷۰٪ سبک‌دانه قادر به تحمل هیچ نیرویی نیستند. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری با درصد سبک‌دانه، در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. همان طور که در جدول ۶ نیز مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ی ۲۸ روزه بدون سبک‌دانه، ۴۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است، که با افزایش درصد سبک‌دانه و الیاف باگاس، مقاومت فشاری کاهش شدیدی داشته و در نمونه با ۱۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری کاهش یافته و به ۲۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است؛ ولی پس از آن، با رسیدن میزان درصد سبک‌دانه به ۲۰٪، همان‌طور که از شکستگی و کاهش شیب نمودار نیز مشخص است، با افزایش مقدار سبک‌دانه، کاهش مقاومت شدت کمتری از خود نشان داده است، که این موضوع می‌تواند به علت جای‌گیری سبک‌دانه‌ها در فضاهای خالی ایجاد شده در مصالح و همچنین در اثر اشغال فضای کمتر به علت فشردگی الیاف باگاس باشد. و در نهایت در نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری به مقدار ۱۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است. پس از آن، تا انتهای نمودار مجدداً شیب افزایش یافته و نرخ کاهش مقاومت بیشتر شده است، تا نهایتاً در بتن با ۳۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است. روند کلی نمودار در نمونه‌های با سن ۱۴ روزه نیز تا حدود زیادی مشابه نمونه‌های ۲۸ روزه است. در شکل ۷، تصویر نمونه‌های مکعبی و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها مشاهده می‌شود.

۳.۵. مقاومت ضربه‌یی

همان طور که در تصویر سمت راست شکل ۸ مشاهده می‌شود، شکست نمونه‌های دیسکی فاقد سبک‌دانه تحت آزمایش ضربه به صورت قطری است، در حالی که با توجه به تصویر سمت چپ در همان شکل، در نمونه‌های دیسکی حاوی سبک‌دانه، به علت وجود الیاف باگاس تحت آزمایش ضربه، شکست نمونه‌های مذکور به صورت قطاعی رخ داده است. در شکل ۹، تصویر نمونه‌های دیسکی و آزمایش مقاومت ضربه‌یی بر روی آنها مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۰، میزان مقاومت ضربه‌یی (تعداد ضربه‌های وارده از سوی چکش مخصوص تا رسیدن به اولین ترک قابل مشاهده) نسبت به درصد سبک‌دانه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن و همچنین با دقت در جدول ۶ می‌توان دریافت که بیشینه‌ی مقاومت ضربه‌یی، مربوط به بتن ۲۸ روزه، با ۲۰٪ سبک‌دانه و به میزان ۳۰۵ است. این در حالی است که این رقم در بتن با سن ۲۸ روز و بدون سبک‌دانه، ۳۱ بوده است، که از این‌جا می‌توان به تأثیر چشمگیر سبک‌دانه و الیاف به کار رفته در مخلوط، در قابلیت جذب انرژی و مقاومت بتن در برابر ضربه پی برد. همچنین با دقت در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که میزان افزایش مقاومت ضربه‌یی



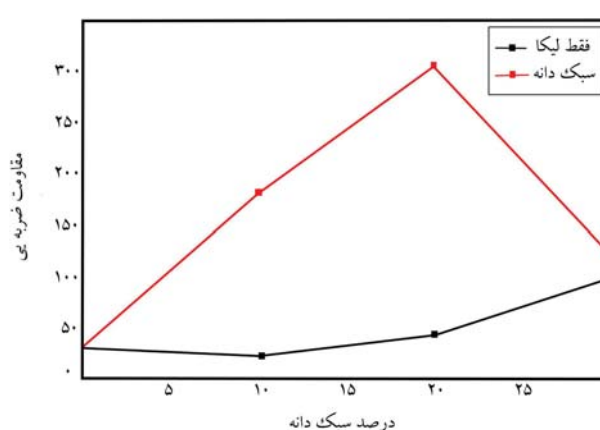
شکل ۱۲. رابطه‌ی بین مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی.

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی سبک‌دانه (لیکا و باگاس) با نمونه‌ی حاوی فقط لیکا.

درصد سبک‌دانه (%)	مقاومت فشاری لیکا	مقاومت فشاری سبک‌دانه	مقاومت ضربه‌یی لیکا	مقاومت ضربه‌یی سبک‌دانه
۱۰	۳۷۸	۲۲۰	۲۷	۱۸۰
۲۰	۳۴۰	۱۷۳	۴۳	۳۰۵
۳۰	۲۸۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۱

اعداد مذکور، ملاحظه می‌شود با وجود این‌که نمودار رابطه‌ی مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی، دید خوبی از روند ارتباط بین دو مقاومت مذکور و نقاط بیشینه و کمینه‌ی نمودارها و شیب‌ها ارائه می‌دهد، ولی از بررسی نمودارها، نمی‌توان یک رابطه‌ی مشخص و دقیق جهت محاسبه‌ی مقادیر مقاومت ضربه‌یی با استفاده از مقاومت فشاری به دست آورد و مقاومت ضربه‌یی باید جداگانه محاسبه شود. با بررسی نسبت مقاومت ضربه‌یی ۱۴ به ۲۸ روزه، که این نسبت تأثیر زمان (سن بتن) در روند افزایش هر مقاومت را مشخص می‌کند، نتیجه گرفته می‌شود که این نسبت در اغلب موارد عددی نزدیک به ۷۵/۰ است. با بررسی این نسبت در نقاط ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه ملاحظه می‌شود که با توجه به کوچک‌تر بودن نسبت مقاومت ضربه‌یی ۱۴ به ۲۸ روزه، در مقایسه با مقاومت فشاری ۱۴ به ۲۸ روزه، زمان تأثیر بیشتری در روند کسب مقاومت فشاری به نسبت مقاومت ضربه‌یی دارد، که این موضوع می‌تواند به تأثیر مقدار شکر باقی‌مانده در باگاس در تأخیر درگیرش بتن مرتبط باشد. با توجه به ساخت نمونه‌هایی با فقط لیکا، جهت مقایسه با نتایج نمونه‌های حاوی ترکیب لیکا و باگاس، علاوه بر ترسیم نمودارهای مقایسه‌یی نتایج وزن مخصوص، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت فشاری و نمایش نتایج در جدول‌های ۶ و ۷، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌یی هر دو سری نمونه‌ها جهت مقایسه، به صورت عددی در جدول ۹ نیز ارائه شده است.

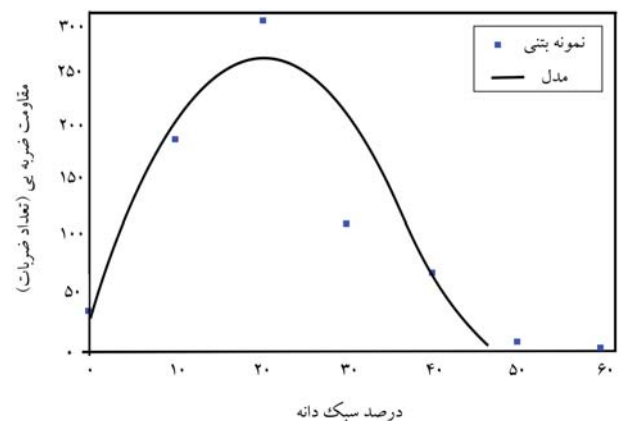
در شکل ۱۳، رابطه‌ی ریاضی بین درصد سبک‌دانه و مقاومت ضربه‌یی با یک منحنی درجه‌ی ۳ تقریب زده شده است، که در آن متغیر i مقاومت ضربه‌یی و یا به عبارتی، تعداد ضربه‌ها جهت ایجاد اولین ترک قابل مشاهده و V درصد سبک‌دانه‌ی جایگزین شده به جای سنگ‌دانه‌ها هستند. همچنین در جدول ۱۰، به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی ۲۸ روزه و نتایج حاصل از مدل ریاضی پیشنهادی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که جهت دقت بیشتر مدل ریاضی، نمونه‌های با درصد سبک‌دانه‌های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ نیز ساخته شده و در سن ۲۸ روزه بر روی آنها آزمایش ضربه انجام شده است. جهت ایجاد



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ی رابطه‌ی مقاومت ضربه‌یی با درصد سبک‌دانه و درصد لیکا.

عمودی میزان مقاومت ضربه‌یی متناظر با هر مقاومت فشاری نمایش داده شده است. خطوط منحنی و نقاط قرمز رنگ مربوط به بتن با سن ۱۴ روز و خطوط منحنی و نقاط مشکی رنگ مربوط به بتن با سن ۲۸ روز است. نمودارهای ترسیم شده، براساس نقاط به دست آمده از آزمایش‌ها و پوش دادن منحنی درجه‌ی ۲ با استفاده از نرم‌افزار اکسل به دست آمده است. جهت مقایسه‌ی هر چه بهتر، منحنی‌های ۱۴ و ۲۸ روزه در قالب یک نمودار ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، شکل کلی نمودار ۱۴ روزه مشابه نمودار ۲۸ روزه است؛ با این تفاوت که نمودار ۱۴ روزه به سمت چپ حرکت کرده و مقادیر بیشینه‌ی آن کاهش یافته‌اند. با مشاهده‌ی نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری از صفر تا ۲۰ درصد، هم در نمونه‌ی ۱۴ روزه و هم ۲۸ روزه، شیب نمودارها کاهش یافته است. در نقاط اولیه‌ی نمودار با مقاومت‌های فشاری کم، شیب نمودار ۱۴ روزه کمتر از ۲۸ روزه بوده است، که این موضوع با مشاهده‌ی تلاقی نمودارها در محل مقاومت فشاری (78 kg/cm^2) و شروع نمودار ۱۴ روزه از مقادیر مقاومت فشاری پایین‌تر مشخص است. در بررسی دقیق‌تر نمودارها می‌توان با محاسبه‌ی نسبت مقاومت ضربه‌یی به مقاومت فشاری آنها، به میزان تأثیر تغییرات مقاومت فشاری در مقاومت ضربه‌یی دست یافت. بیشترین نسبت به دست آمده مربوط به نقطه با مقاومت فشاری (173 kg/m^2) (نمونه با ۲۰٪ سبک‌دانه) و کمترین نسبت به دست آمده مربوط به نقطه با مقاومت فشاری (15 kg/m^2) (نمونه با ۶۰٪ سبک‌دانه) است. این موضوع نشان می‌دهد که در نمونه با ۲۰٪ سبک‌دانه به ازاء هر واحد افزایش در مقاومت فشاری، مقاومت ضربه‌یی به نسبت دیگر نمونه‌ها، بیشترین مقدار افزایش را داشته است. همچنین، با بررسی نمودارهای موجود در شکل ۱۲ می‌توان دریافت که نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه با افزایش درصد سبک‌دانه تا ۲۰٪، افزایش یافته و برای بتن با ۳۰٪ سبک‌دانه، نسبت اخیر در مقایسه با بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) کاهش یافته است. در نتیجه، بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه، با داشتن وزن مخصوص و مقاومت فشاری مناسب و بالاترین مقاومت ضربه‌یی، نمونه‌ی بهینه است.

نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری در بتن با ۲۰٪ سبک‌دانه برابر با $1/76$ بوده است، که بیشترین نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری است. این نسبت در بتن با صفر درصد سبک‌دانه، برابر $0/76$ ، در بتن با ۱۰٪ سبک‌دانه برابر $0/82$ و در بتن با ۳۰٪ سبک‌دانه، برابر $1/21$ بوده است. با دقت در نمودار و محاسبه‌ی



شکل ۱۳. رابطه‌ی بین مقاومت ضربه‌ی و درصد سبک‌دانه.

جدول ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های نمونه‌های ۲۸ روزه با نتایج حاصل از مدل.

درصد سبک‌دانه (%)	مقاومت فشاری مدل نتایج واقعی	مقاومت فشاری مدل نتایج واقعی	مقاومت ضربه‌ی واقعی
۰	۲۱/۳	۴۰/۵	۲۴/۹
۱۰	۲۳/۴	۲۲۰	۲۱۲
۲۰	۲۲۱/۸	۱۷۳	۲۳۴
۳۰	۱۴۹	۱۰۰	۱۴۹

معادله، ابتدا اعداد حاصل از آزمایش‌ها بر روی نمودار مشخص و سپس با استفاده نرم‌افزار اکسل و پوش دادن چندین نمودار و سعی و خطا، نزدیک‌ترین معادله به ارقام واقعی انتخاب شده است. همان‌طور که در جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود در اغلب موارد نتایج حاصل از معادله، اختلاف اندکی با نتایج واقعی دارند. بنابراین، جهت محاسبه‌ی مقادیر مقاومت ضربه‌ی نسبت به درصد سبک‌دانه در محدوده‌ی نشان داده شده و با شرایط مشابه آزمایش‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر، می‌توان با دقت خوبی از معادله استفاده کرد. با توجه به شکل ۱۳ و تحلیل آماری داده‌ها، رابطه‌ی بین مقاومت ضربه‌ی (i) و درصد سبک‌دانه (V) در نمونه‌های ۲۸ روزه به صورت رابطه‌ی ۱ تقریب زده می‌شود:

$$i = 0.01v^2 - 1.13v + 29.05v + 24.88$$

$$R^2 = 0.89$$

(۱)

۶. نتیجه‌گیری

۱- بتن حاوی لیکا و باگاس، مقاومت ضربه‌ی و میزان جذب انرژی بسیار بالاتری

نسبت به بتن معمولی دارد. تحت بارگذاری ضربه‌ی، اغلب بتن‌های معمولی به صورت قطری ترک می‌خورند و گسیخته می‌شوند، ولی بتن‌های حاوی لیکا و باگاس به صورت جدا شدن قطاعی از دیسک، گسیخته می‌شوند (شکل ۸).

۲- بتن‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک در نظر گرفت. همچنین براساس تعریف بتن سبک سازه‌ی، بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک سازه‌ی به شمار آورد، که مزیت دیگر آن نسبت به بتن معمولی، مقاومت ضربه‌ی و میزان جذب انرژی بالای آن است.

۳- نسبت مقاومت ضربه‌ی به مقاومت فشاری با افزایش درصد سبک‌دانه تا ۲۰٪، افزایش یافته و برای بتن ۳۰٪ سبک‌دانه، نسبت اخیر شروع به کاهش کرده است. بیشترین نسبت مقاومت ضربه‌ی به فشاری مربوط به بتن حاوی ۲۰٪ باگاس بوده است، که ۱/۷۶ است.

۴- در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد مخلوط باگاس و لیکا، میزان افزایش مقاومت ضربه‌ی در حدود ۷ برابر نمونه‌های حاوی فقط لیکا و در نمونه‌های ۳۰٪، مقاومت ضربه‌ی آنها نزدیک به هم بوده است. همچنین، میزان کاهش وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد مخلوط باگاس و لیکا، به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ برابر میزان کاهش وزن در نمونه‌های با فقط لیکاست.

۵- مقاومت فشاری بتن با جایگزینی سبک‌دانه به جای سنگ‌دانه‌ها کاهش می‌یابد، که این امر را می‌توان به ضعیف شدن و حذف اسکلت اصلی بتن یعنی سنگ‌دانه‌ها نسبت داد.

۶- مقاومت ضربه‌ی و میزان جذب انرژی بتن با ۲۰٪ سبک‌دانه در کلیه‌ی سنین از بتن معمولی، بسیار بیشتر است، که این امر با داشتن مقاومت فشاری قابل قبول ۲۸ روزه‌ی آن یک مزیت محسوب می‌شود.

۷- بتن‌های الیافی عمدتاً مقاومت ضربه‌ی و توانایی جذب انرژی بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند، که این موضوع را می‌توان به قابلیت جذب انرژی الیاف موجود در بتن الیافی نسبت داد. هر چه این قابلیت الیاف بیشتر باشد، بتن حاصل، مقاومت ضربه‌ی بالاتری از خود نشان می‌دهد. با بررسی مطالعات پیشین بر روی مقاومت ضربه‌ی بتن حاوی الیاف فولادی و مقایسه‌ی نتایج آن با بتن حاوی الیاف باگاس ملاحظه می‌شود که بتن حاوی الیاف باگاس، مقاومت ضربه‌ی بسیار بالاتر و البته مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد. در شرایطی که امکان وقوع ضربه‌ها بر بتن وجود دارد (با توجه به این که محاسبه از طریق فرمول با استفاده از مقاومت فشاری بتن ممکن است، دقت لازم را نداشته باشد)، لازم است مقاومت ضربه‌ی مستقیماً از طریق آزمایش ضربه به دست آورده شود، که به نظر می‌رسد روش ضربه‌های مکرر در دسترس‌ترین و کم‌خطرترین روش در مقایسه با دیگر روش‌هاست و در کارگاه نیز به راحتی انجام می‌شود.

پانویس‌ها

1. Min

2. Ramkumar
3. Banthia
4. Chusilp
5. MATLAB

منابع (References)

1. WCED, "Our common future", *London Oxford University Press* (1987).
2. Linnerud, K. "Closing the sustainable development gap a global study of goal interactions", *Wiley Online*, **29**(1), p. 238281/F60 (2021).
3. Meyer, C. "The greening of the concrete industry", *Cement & Concrete Composites*, **31**, pp. 601-605 (2009).
4. Borsi, S.A. "Investigation of mechanical properties of concrete containing leca grain and bagasse mortar under compressive and impact loads", *M.Sc. thesis, Azad University of Dezful*, pp. 1-50 (In Persian) (1390/2012).
5. Gagg, C.R. "Cement and concrete as an engineering material an historic appraisal and case study analysis", *Engineering Failure Analysis*, **40**, pp. 114-40 (2014).
6. Budafpour, S. "Study of strength behavior of lightweight concrete types and their application in structural reinforcement", *First National Conference on Infrastructure Engineering and Management*, University of Tehran (In Persian) (1387/2009).
7. José, A. and Bogas, J. "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete", *Figueiredo, J. of Cleaner Production*, Elsevier, **89**, pp 187-195 (2015).
8. Osama, Y., Reza, H., Julie, E. and et al. "An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete", *Construction and Building Materials*, **175**, pp. 239-253 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.18>.
9. Jovana, J. "Analytical prescription models of lightweight concrete mixtures with (leca) expanded clay aggregate", *Journal of SSRG*, **7**(4), pp. 22-27 (2020).
10. Kuutti, J. "Modelling of projectile penetration into lightweight expanded clay aggregate", *J. of Dynamic Behavior Material Springer*, **2**, pp. 425-437 (2016).
11. Modi, F., Medrasi, Sh. and Dashti, P. "Evaluation of properties of lightweight structural concrete containing slag and the effect of concrete pumping on the properties of the optimal mix design", *12th National Concrete Conference*, Tehran (In Persian) (1398/2020).
12. Sharbatdar, M.K., Ghasemi Naghibdehi, M.V. and Dehghan, M. "Investigation of the behavior of two-layer reinforced concrete slabs under impact loading", *6th National Congress of Civil Engineering*, Semnan University (2011) (In Persian) (1389/2011).
13. Min, K., Hong, C. and Wonsik, S. "Development of impact resistant high-strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC) superior to reactive powder concrete (RPC) under flexure", *Journal of Building Engineering Elsevier* (2021).
14. Ramkumar, G., Murali, B., Neha, P. and et al. "Development of a novel low carbon cementitious two stage layered fibrous concrete with superior impact strength", *Journal of Building Engineering*, **25**, 100841 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100841>.
15. Xu, L.Y., Cai, F. and XueYing, Y. "Numerical analyses of local damage of concrete slabs by normal impact of deformable solid projectiles", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**(1), pp. 5121-5132 (2019).
16. Bantia, N., Bindiganavile, V. and Jones, J. "Fiber reinforced concrete in precast", *PCI Journal*, **57**(3), pp. 33-46 (2012).
17. Ameri, F. and Jorge, D. "Steel fibre-reinforced high-strength concrete incorporating copper slag mechanical, gamma-ray shielding, impact resistance, and microstructural characteristics", *J. of Building Engineering, Elsevier*, **29**, p. 101118 (2020).
18. Saif, K. and Mezzal, Z. "Effect of discarded steel fibers on impact resistance, flexural toughness and fracture energy of high strength self compacting concrete exposed to elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, **121**, p. 103271 (2021).
19. Abdollahzadeh, R. and Ranjbar, M. "Evaluation of the behavior of semi-lightweight concrete with steel fiber lycopen", *6th National Congress of Civil Engineering*, University of Semnan (In Persian) (1389/2011).
20. Chusilp, N., Jaturapitakhul, C. and Kaittikomol, K. "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials Journal*, Elsevier, **23**(11), pp. 3352-3358 (2009).
21. Sadraei, H., Khaloo, A., Abdous, H. and Taherkhani, A. "Laboratory study of impact performance of concrete slabs reinforced with GFRP rebar", *3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management*, Tehran (In Persian) (1397/2019).
22. Steven, K. and William P. *Design and Control of Concrete Mixes*, Tehran, Sharif University of Technology, Translated by Alireza khaloo, Mahmoud Irajian, Scientific Publishing Institute, pp. 70-110 (2009).
23. ASTM C150. "Standard specification for portland cement", *American Standards for Testing and Materials* (2004).
24. Golbabaie, F. "The use of bagasse in the construction of reinforced wood-fiber cement composite", *4th Technology Development Conference and International Conference on New Findings of Iranian Architecture and Construction Industry* (In Persian) (1398/2020).
25. Rezende, C.A., de Lima, M.A. and Maziero, P. "Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility", *Biotechnol Biofuels*, **4**, p. 54 (2011).
26. Priyanka, M., Karthikeyan, M. and Sri Rama, M. "Development of mix proportions of geopolymer lightweight aggregate concrete with LECA", *Materials Today*, **27**(2), pp.958-962 (2020). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.271>.
27. Ardakani, A. and Yazdani, M. "Comparison of the characteristics of expanded clay grains with specific gravity and different diameters", *The 1st National Conference on Lightweight Concrete* University of Tehran (In Persian) (1389/2011).
28. ACI committee, "State of the art report on fiber reinforced concrete", *ACI Structural Journal* (2021).

شناسایی آسیب سازه‌های فولادی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود و برپایه‌ی داده‌های کرنش

نرگس فلاح (دانشجوی دکتری)

سید روح‌الله حسینی واعظ* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه قم

اکبر اسفندیاری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (پژوهشی)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۳۹-۴۹، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، یک روش جدید برای شناسایی آسیب سازه‌ها ارائه شده است، که بر پایه‌ی تحلیل مؤلفه‌های اصلی و داده‌های چگالی طیفی توان کرنش - محور فرمول‌بندی شده است. عیب‌یابی، شامل یافتن مکان و مقدار آسیب است، که توسط یک معادله‌ی حساسیت ابداعی و با استفاده از داده‌های کرنش و بهینه‌سازی کمینه‌ی مربعات حل شده است. داده‌های مذکور از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی غیرکامل سازه گرفته شده‌اند. روش ارائه شده مبتنی بر استفاده از داده‌های حوزه‌ی بسامد بوده و از تغییرات به وجود آمده در سختی المان‌ها به این منظور استفاده شده است. به منظور اثبات توانایی روش اخیر، دو سازه‌ی فلزی، شامل یک خرپای دوبعدی و یک قاب دوبعدی دو طبقه‌ی دو دهانه انتخاب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که حتی با وجود خطای اندازه‌گیری، عملکرد روش ارائه شده خوب بوده است. همچنین، مقایسه‌ی روش ارائه شده با روش‌های دیگر نشان می‌دهد که نتایج معادله‌ی اشاره شده، حساسیت مناسب‌تری نسبت به دیگر روش‌های کرنش - محور دارد.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، به‌روزرسانی مدل، داده‌ی کرنش، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تجزیه‌ی مقادیر تکین، چگالی طیفی توان.

۱. مقدمه

بلایای طبیعی و ناخوشایند همچون زلزله، سیل و طوفان ممکن است در سازه‌های مهم مهندسی منجر به آسیب‌های ناگهانی فاجعه‌بار شود و با ایجاد خسارت‌های اقتصادی، تهدیدهای جانی برای انسان‌ها نیز به بار آورند. بنابراین سازه‌های مهم، با توجه به میزان اهمیت‌شان نیاز به تجهیز با حسگرهای مناسب جهت پایش و بازرسی سلامت دارند. به همین جهت، تلاش‌های بسیاری برای مکان و مقدار یابی خرابی سازه‌ها شده و پژوهشگران بسیاری از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود استفاده کرده‌اند. پژوهشگران بسیاری به منظور شناسایی آسیب سازه‌ها از روش‌های شناسایی آسیب کلی^۱ و تغییرات در پاسخ‌های سازه‌ی منتج شده از خرابی استفاده کرده‌اند. روش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۵، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61055.3144

استناد به این مقاله:

فلاح، نرگس، حسینی واعظ، سید روح‌الله و اسفندیاری، اکبر، ۱۴۰۲. شناسایی آسیب سازه‌های فولادی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود و برپایه‌ی داده‌های کرنش. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۳۹-۴۹.

nfallah@stu.qom.ac.ir
hoseinivaez@qom.ac.ir
a_esfandiari@aut.ac.ir

ارائه شده در پژوهش حاضر، مبتنی بر استفاده از داده‌های حوزه‌ی بسامد است، که عملاً شفافیت بیشتری نسبت به داده‌های حاصل از روش‌های حوزه‌ی زمان دارد. همچنین در پژوهش حاضر، فقط از تغییرات به وجود آمده در سختی المان‌ها جهت عیب‌یابی استفاده شده است. تغییرات مذکور شامل تغییرات در مدول کشسانی المان‌ها و یا سطح مقطع‌شان بوده و نسبت به روش‌های دیگر که علاوه بر سختی، از تغییرات ماتریس‌های میرایی و جرم هم برای شناسایی آسیب بهره می‌گیرند، از پیچیدگی‌های غیرضروری خودداری می‌کند و در نتیجه، کارایی بیشتری در عیب‌یابی بسیاری از سازه‌های بزرگ و با جرم بالا دارد.

ویژگی‌هایی همچون مؤلفه‌های اصلی (PCs) داده‌های دینامیکی سازه به منظور عیب‌یابی، حساسیت بیشتری دارند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی معمولاً به دو شیوه استفاده می‌شود: در روش اول، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نقش اصلی را در فرایند

شناسایی و مکان‌یابی خرابی ایفا می‌کند. در حالی که در روش دوم، به عنوان مرحله اولیه برای دیگر الگوریتم‌های شناسایی آسیب استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر نیز حیطه‌ی کار معطوف به روش اول بوده است.

به منظور عیب‌یابی، ماتریس حساسیت مربوط به تغییرات ماتریس سختی با تغییرات به وجود آمده در تابع PSD و مقادیر اصلی حاصل از تجزیه‌ی مقادیر تکین آن تشکیل می‌شود. سپس با مقایسه بین مقادیر به دست آمده از حل معادله‌ی حساسیت و مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی اندازه‌گیری، مدل عددی اولیه جهت نزدیک شدن به مدل عددی تغییر یافته به علت خرابی به روزرسانی می‌شود. معادلات حساسیت با روش کمینه‌ی مربعات و با اعمال وزن‌دهی مناسب حل می‌شوند. فرضیات مهم لحاظ شده در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- تحریک سازه توسط نیرویی نظیر چکش مودال انجام و از آثار ارتعاش‌های محیطی صرف‌نظر می‌شود.
- رفتار سازه تحت بارهای وارده در دامنه‌ی ارتعاشی مورد مطالعه، خطی فرض شده است.
- در پژوهش حاضر، از آثار شرایط محیطی مثل دما و رطوبت در پاسخ سازه صرف‌نظر شده است.
- خرابی تحت بارگذاری استاتیکی ایجاد شده و به عواملی چون خوردگی فولاد و خزش پرداخته نشده است.

۱.۱. مروری بر ادبیات فنی

روش‌های عیب‌یابی کلی با بهره‌گیری از تغییرات پارامترهای سازه‌یی و توسط پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی آن، که عبارت‌اند از: تغییر شکل‌ها، کرنش‌های استاتیکی و شکل‌های مودی، [۲، ۱] پاسخ‌های بسامدی، [۳، ۴] توابع پاسخ بسامدی (FRF) [۵، ۶]، نرمی مودال، [۷] انحنای شکل مودال، [۸ و ۹] انرژی کرنشی مودال و کرنش‌های مودال، [۱۰ و ۱۱] دیگر پاسخ‌های دینامیکی [۱۲] و دیگر پاسخ‌های استاتیکی، [۱۳] کار می‌کنند.

برتری‌های به کارگیری داده‌های کرنش مودال اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج نسبت به شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده با شتاب‌سنج توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. [۱۴] یاو و همکاران (۱۹۹۲)، نشان دادند که کرنش‌های مودال برای مکان‌یابی آسیب به مراتب بهتر از داده‌های تغییر شکل عمل می‌کنند. [۱۵] کرنش‌سنج‌ها در مقایسه با شتاب‌سنج، اولویت‌هایی همچون جمع و جور بودن، وزن سبک، دوام و استحکام بیشتر، نصب آسان و کم هزینه‌تر و مقاومت بیشتر در برابر دما دارند. بیهقی و اسفندیاری (۲۰۱۸)، با استفاده از داده‌های کرنش غیرکامل به عیب‌یابی پرداخته و روشی بر پایه‌ی به روزرسانی مدل سازه ارائه داده‌اند. [۱۶]

داده‌ی PSD، یکی از حساس‌ترین پارامترهای سازه‌یی به شمار می‌رود و از آنجایی که به دلیل تابع انتقال درجه‌ی دوم بودن، یک تابع غیرخطی نیز محسوب می‌شود، مزایای مطمئنی در به کارگیری در شناسایی آسیب دارد. [۱۷]

بنابراین PSD در مقایسه با FRF، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پارامترهای سازه‌یی دارد. [۱۸] همچنین ماتریس PSD به علت وجود پارامترهای طیف چگالی مستقیم^۴ و طیف چگالی متقاطع^۵، داده‌های بیشتری دارد. ژنگ و همکاران (۲۰۱۵)، یک روش عیب‌یابی بر پایه‌ی تحلیل حساسیت داده‌ی PSD ارائه دادند. [۱۸] ایشان راستی‌آزمایی روش خود را با مدل کردن عددی یک سازه‌ی بلند برشی و یک سازه‌ی قاب دوبعدی بررسی کرده‌اند. پدram و همکاران (۲۰۱۷)،

نیز یک روش شناسایی خرابی حساسیت‌محور با استفاده از داده‌ی PSD ارائه داده‌اند. [۱۹]

ها و گالینوال^۶ (۲۰۱۰)، در بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی خرابی در سازه‌های خطی شکل مثل مدل تیر، روش شناسایی مکان خرابی‌خود را براساس حساسیت‌های مؤلفه‌های اصلی مربوط به داده‌های FRF ارائه داده‌اند. [۲۰] همچنین اسفندیاری و همکاران (۲۰۲۰)، معادله‌ی حساسیتی بر پایه‌ی تغییرات PCs متناظر با داده‌های FRF جهت شناسایی خرابی ارائه کرده‌اند. [۵] ایشان از تجزیه‌ی مقادیر تکین سمت چپ^۷ مربوط به داده‌های FRF برای عیب‌یابی تعدادی از سازه‌های دوبعدی بهره جستند. بولورانی و همکاران (۲۰۲۱)، از روش‌های PCA و ماشین بردار پشتیبان^۸ جهت توسعه‌ی یک سیستم پایش سلامت سازه‌یی برای شناسایی مؤثر در واکنش‌های بندر استفاده کرده‌اند. [۲۱]

یکی از کلیدی‌ترین مسائل مهم برای یک به روزرسانی مدل موفق، داشتن یک رابطه‌ی حساسیت صحیح و مناسب است. برای برخی از ویژگی‌های سازه‌یی همچون PSD، که با توجه به آنچه که ذکر شده است، حساسیت بالایی دارد، کارا بودن معادله‌ی حساسیت نیز ضریب اهمیت بیشتری دارد. در پژوهش حاضر، یک معادله‌ی حساسیت بر پایه‌ی مؤلفه‌های اصلی متناظر با داده‌های غیرکامل پاسخ PSD کرنش - محور جهت عیب‌یابی ارائه شده است. جهت اثبات کارایی و صحت روش ارائه شده، دو مدل عددی دوبعدی شامل یک خرپا و یک قاب فولادی که دارای وزن زیرسازه روی اعضاء افقی‌شان هستند، بررسی شده‌اند. همچنین روش ارائه شده با دیگر روش‌ها مقایسه و نتایج ارائه شده‌اند.

۲. پیاده‌سازی معادله‌ی حساسیت

۲.۱. فرمول‌بندی

برای فرمول‌بندی یک معادله‌ی حساسیت براساس داده‌ی کرنش، ابتدا باید کرنش دینامیکی را محاسبه کرد و سپس تابع پاسخ بسامدی و تابع چگالی توان طیف کرنش - محور را به دست آورد. سپس برای فرمول‌بندی معادله‌ی حساسیت براساس تجزیه‌ی مقادیر تکین باید به سراغ پیاده کردن روش مذکور روی PSD رفت و معلومات و مجهولات معادله را به منظور پیاده‌سازی معادله‌ی باقی‌مانده دسته‌بندی کرد. برای این منظور، شکل ۱ ارائه شده است. همچنین قابل ذکر است که رابطه‌های ج ۱ تا ج ۱۳ که در شکل ۱ استفاده شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی المان‌های تیر و خرپا است.

سمت راست روابط ج ۱۳ و ج ۱۴ تابعی از تغییرات PSD یعنی δS_e^l است، که به عبارتی تابعی از تغییرات مؤلفه‌های سازه‌یی هستند. همچنین، سمت چپ آنها مقادیر معلومی هستند که می‌توان آنها را محاسبه کرد. بنابراین سمت چپ روابط اخیر را می‌توان به صورت δr_j^v از آمین باقی‌مانده (δr_j^v) بازنویسی کرد (روابط ۱ و ۲):

$$\delta r_j^v = \delta \mathbf{V}_j - (\mathbf{S}_e^l)^T \mathbf{U}_j \sum_{jd}^{-1} - (\mathbf{S}_e^l)^T \delta \mathbf{U}_j \sum_{jd}^{-1} \quad (۱)$$

$$\delta r_j^{\Sigma} = \delta \sum_j - \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \delta \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \delta \mathbf{V}_j \quad (۲)$$

با توجه به آنچه گفته شد، معادله‌ی حساسیت به شکل روابط ۳ و ۴ خواهد بود:

$$\delta r_j^v = \mathbf{SE}_j^v \delta \mathbf{P} \quad (۳)$$

$$\delta r_j^{\Sigma} = \mathbf{SE}_j^{\Sigma} \delta \mathbf{P} \quad (۴)$$

۱- محاسبه ماتریس انتقال کرنش-تغییر مکان (B_n) برای المان‌های خرپا و قاب با استفاده از روابط (ج ۱) و (ج ۲) و با توجه به روابط تعیین کرنش المان‌ها (ج ۳) و (ج ۴) و شکل (۲) [۲۲]

۲- محاسبه ماتریس انتقال کرنش-تغییر مکان (B) کل سازه با سوار نمودن ماتریس هر المان در ماتریس جابه‌جایی کرنش کل سازه [۲۲]

۳- محاسبه ماتریس‌های انتقال یا FRF ($H(\omega)$) و چگالی طیف توان، ($S_{xx}(\omega)$) با استفاده از روابط (ج ۵) و (ج ۶)

۴- محاسبه ماتریس‌های FRF و سپس چگالی طیف توان کرنش-محور با استفاده از روابط (ج ۷) و (ج ۸)

۵- محاسبه ماتریس چگالی توان طیفی کرنش-محور، ($S_{\epsilon}^l(\omega_i, \xi)$)، با استفاده از m المان اندازه‌گیری شده برای فرکانس نام در مکان تحریک λ ام با رابطه (ج ۹)

۶- ساخت ماتریس S_{ϵ}^l با قرار دادن درایه‌های غیرتکراری ($S_{\epsilon}^l(\omega_i, \xi)$) به ازای هر فرکانس i در یک ستون از ماتریس (ج ۱۰)؛ آرایه (k, r) از ماتریس S_{ϵ}^l متناظر است با آرایه ردیف p ام و ستون q ام از ماتریس ($S_{\epsilon}^l(\omega_p, \xi)$) که به ترتیب $1:m$ و $p:m$ هستند.

۷- تجزیه ماتریس S_{ϵ}^l با استفاده از تکنیک SVD مطابق رابطه (ج ۱۱) و محاسبه سه ماتریس U ، V و Σ

۸- جداسازی معلومات و مجهولات مساله در دو سمت با فرمول‌بندی V و Σ بر اساس ماتریس S_{ϵ}^l با توجه به (ج ۱۲) و رسیدن به روابط (ج ۱۳) و (ج ۱۴).

شکل ۱. مراحل پیاده‌سازی اولیه‌ی معادلات و جداسازی معلومات و مجهولات مسئله.

جدول ۱. روابط مربوط به شکل ۱.

رابطه	برچسب رابطه
$B_n = \frac{1}{L_n} [-1 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$	(ج ۱)
$\xi = \left(\frac{2\bar{x}}{L_n} \right) - 1$ که $B_n(\xi) = \frac{1}{L_n} [-1 \quad -6\bar{y}\xi/L_n \quad -\bar{y}(6\xi-2)/2 \quad 1 \quad -6\bar{y}\xi/L_n \quad -\bar{y}(6\xi+2)/2]$	(ج ۲)
$\epsilon_n = \frac{1}{L_n} (\bar{u}_j - \bar{u}_i)$	(ج ۳)
$\epsilon_n = -\bar{y} (d^2 \bar{v} / d^2 \bar{v}^2)$	(ج ۴)
$H(\omega) = (K - \omega^2 M + i \omega C)^{-1}$	(ج ۵)
$S_{xx}(\omega) = H^*(\omega) S_{FF} H^T(\omega)$	(ج ۶)
$H_{\epsilon}(\omega, \xi) = B(\xi) H(\omega)$	(ج ۷)
$S_{\epsilon\epsilon}(\omega, \xi) = H_{\epsilon}^*(\omega, \xi) S_{FF} H_{\epsilon}^T(\omega, \xi)$	(ج ۸)
$S_{\epsilon}^l(\omega_i, \xi) = [s_{p,q}] \in i^{m \times m}$	(ج ۹)
$n_{data} = m \times (m+1) / 2$ که $S_{\epsilon}^l = [s_{k,r}] \in i^{n_{data} \times n}$	(ج ۱۰)
$S_{\epsilon}^l = U \Sigma V^T$	(ج ۱۱)
$\Sigma_d = \Sigma + \delta \Sigma$ و $U_d = U + \delta U$ ، $V_d = V + \delta V$	(ج ۱۲)
$\delta V_j - (S_{\epsilon}^l)^T U_j (\Sigma_{jd})^{-1} - (S_{\epsilon}^l)^T \delta U_j \Sigma_{jd}^{-1} = (\delta S_{\epsilon}^l)^T U_j^d \Sigma_{jd}^{-1}$	(ج ۱۳)
$\delta \Sigma_j - U_j^T S_{\epsilon}^l \delta V_j - \delta U_j^T S_{\epsilon}^l V_j - \delta U_j^T S_{\epsilon}^l \delta V_j = (U_j^d)^T \delta S_{\epsilon}^l V_j^d$	(ج ۱۴)

که در آنها، SE_j^v و SE_j^{Σ} ماتریس‌های حساسیت به ازاء زامین مؤلفه‌ی اصلی و بر پایه‌ی ماتریس‌های V و Σ هستند.

(۶) $\delta Z(\omega) = \delta K - \omega^T \delta M + i \omega \delta C$
با در نظر گرفتن این‌که خرابی فقط باعث تغییر در سختی سازه می‌شود، خواهیم داشت: $\delta Z(\omega) = \delta K$ از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

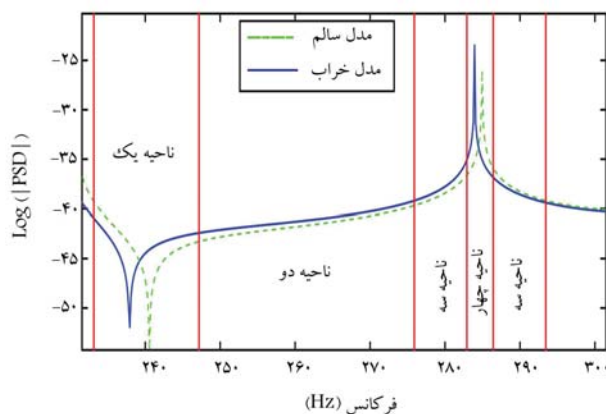
تغییرات پارامترهای سختی، جرم و میرایی به تغییرات زامین مقدار تکین وابسته است δP تغییرات بردار P با ابعاد $(1 \times ne)$ است، که شامل مقادیر خرابی در همه‌ی المان‌های سازه‌ی است.

تغییرات چگالی طیفی پاسخ سازه از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید: [۱۹]

$$\delta S_{\epsilon\epsilon}(\omega) = -H_{\epsilon}^*(\omega) S_{FF}^l H(\omega) \delta K(\omega) H_{\epsilon d}^T(\omega) - H_{\epsilon d}^*(\omega) \delta K(\omega) H^*(\omega) S_{FF}^l H_{\epsilon d}^T(\omega) \quad (۷) \quad \delta S_{\epsilon\epsilon}(\omega) = -H_{\epsilon}^*(\omega) S_{FF} H(\omega) \delta Z(\omega) H_{\epsilon d}^T(\omega)$$

$$- H_{\epsilon d}^*(\omega) \delta Z^*(\omega) H^*(\omega) S_{FF} H_{\epsilon d}^T(\omega) \quad (۵)$$

تغییرات ماتریس سختی را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۸ بسط داد: [۲۲]



شکل ۳. شاخص‌گذاری نواحی مختلف نمودار طیف چگالی طیفی جهت انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب. [۲۴]

می‌شود. بنابراین به روشی برای اندازه‌گیری غیرکامل تابع پاسخ بسامدی کرنش - محور نیاز است. در پژوهش حاضر، از معادله‌ی ۱۳ جهت محاسبه‌ی FRF تقریبی کرنش - محور استفاده شده است. [۲۴]

$$\mathbf{H}_{ed}^{approx}(\omega) = \mathbf{B} \left\{ \sum_{j=1}^m \frac{\phi_{jh} \phi_{jh}^T}{\Omega_{jd}^2 - \omega^2 + 2i\xi_{jd}\Omega_{jd}\omega} + \sum_{j=m+1}^{nd} \frac{\phi_{jh} \phi_{jh}^T}{\Omega_{jh}^2 - \omega^2 + 2i\xi_{jh}\Omega_{jh}\omega} \right\} \quad (13)$$

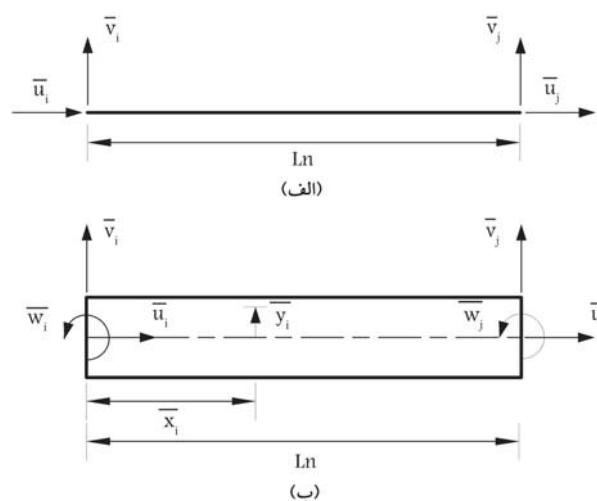
که در آن، ϕ_{jh} از آمین شکل مود سازه‌ی سالم و Ω_{jd} ، آمین بسامد طبیعی سازه‌ی آسیب‌دیده، ω بسامد تحریک، ξ_{jd} ضریب میرایی آمین مود و nd تعداد پاسخ‌های موجود هستند. اندازه‌گیری کامل شکل مودها در صورت کسر امکان‌پذیر نیست، بنابراین از روش تابع پاسخ بسامدی تقریبی استفاده می‌شود. عبارت دوم در معادله‌ی مذکور، برای کاهش اثر عدم اندازه‌گیری کامل در بسامدهای بالاتر اضافه شده است؛ که در حین فرایند بهنگام‌سازی ضمن تصحیح شکل مودهای بالاتر منجر به بهبود هم‌گرایی و بهنگام‌سازی می‌شود.

۳.۲. انتخاب محدوده‌ی بسامدی

انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب موجب می‌شود که تأثیر خطای ناشی از اندازه‌گیری و مشکلات در مدل‌سازی میرایی در فرایند شناسایی خرابی کمتر شود و فرایند بهنگام‌سازی آهنگ هم‌گرایی بهتری را داشته باشد. همچنین انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب در کارکرد رابطه‌ی تقریبی نیز مهم است. برای روشن‌سازی این نکته، یک نمونه از نمودار چگالی طیفی $S_{xx}(\omega)$ در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که به چهار ناحیه‌ی A، B، C و D تقسیم‌بندی شده است. خواص و ویژگی‌های نواحی اخیر در ادامه ارائه شده است. [۲۴]

• **ناحیه‌ی A:** در ناحیه‌ی A، دامنه‌ی طیف چگالی کم و تحت تأثیر خطای اندازه‌گیری زیاد است، بنابراین از نقاط بسامدی مذکور صرف‌نظر می‌شود.

• **ناحیه‌ی B:** در این ناحیه، مقدار PSD دو حالت آسیب‌دیده و سالم تحت تأثیر خطای اندازه‌گیری بوده و معادله‌ی حساسیت استخراج شده، دقت کمی داشته است. به بیان بهتر، از آنجا که تابع پاسخ بسامدی تقریبی توسط مخرج کنترل می‌شود، دقت بالایی در نزدیکی بسامدهای طبیعی دارد.



شکل ۲. الف) المان خراب، ب) المان قاب.

$$\delta \mathbf{K} = \mathbf{A}_s \delta \mathbf{P}_s \mathbf{A}_s^T \quad (8)$$

که در آن، \mathbf{A}_s و \mathbf{P}_s به ترتیب شامل مقادیر ویژه و غیرصفر ماتریس سختی و بردارهای متناظر با مقادیر ویژه و غیرصفر ماتریس مذکور هستند و تغییرات متناظر با پارامترهای سختی المان‌ها در اثر خرابی است. با جایگذاری رابطه‌ی ۸ در رابطه‌ی ۷، برای آرایه‌ی \mathbf{K}_e از $\delta \mathbf{S}_e^l$ ، رابطه‌ی ۹ را خواهیم داشت:

$$\delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} = -\mathbf{H}_{P,:}^{e,*}(\omega_r) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}(\omega_r) \mathbf{A}_s \text{diag}(\mathbf{A}_s^T \mathbf{H}_{:,q}^{T,\varepsilon d}(\omega_r)) \delta \mathbf{P} - \mathbf{H}_{q,:}^{e,*}(\omega_r) \mathbf{A}_s \text{diag}(\mathbf{A}_s^T \mathbf{H}^*(\omega_r) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}_{:,q}^{T,\varepsilon d}(\omega_r)) \delta \mathbf{P} \quad (9)$$

با جایگذاری رابطه‌ی اخیر در سمت راست روابط ج ۱۳ و ج ۱۴، ماتریس حساسیت برای آمین مؤلفه‌ی اصلی مطابق رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{SE}(r, :)^V_j = \sum_{k=1}^{n_{data}} \delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} \mathbf{U}_{pj}^d \sum_{j=d}^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{SE}_j^\Sigma = \sum_{k=1}^{n_{data}} \sum_{r=1}^n \mathbf{U}_{kj}^d \delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} \mathbf{V}_{kj}^d \quad (11)$$

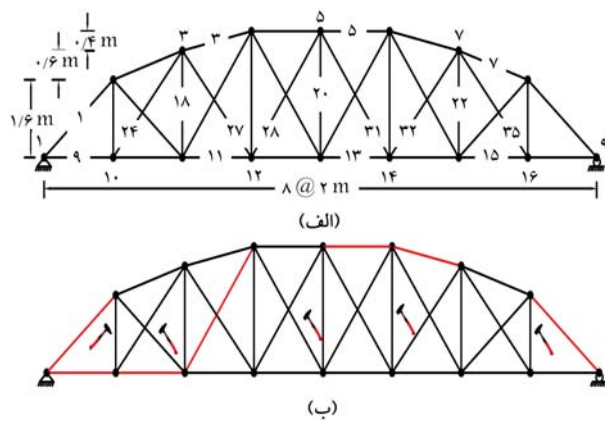
و برای تمامی مؤلفه‌های اصلی به طور خلاصه، معادله‌ی حساسیت به شکل رابطه‌ی ۱۲ است:

$$\begin{pmatrix} \delta r^V \\ \delta r^\Sigma \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{SE}^V \\ \mathbf{SE}^\Sigma \end{bmatrix} \delta \mathbf{P} \quad (12)$$

که رابطه‌ی اخیر می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی کمینه‌ی مربعات مقید خطی توسط تابع «lsqlin» نرم‌افزار متلب (نسخه‌ی ۲۰۱۴، [۲۴]) به منظور محاسبه‌ی $\delta \mathbf{P}$ حل شود.

۲.۲. اندازه‌گیری ناکامل

روش ارائه شده برای بهنگام‌سازی مدل اجزاء محدود، نیازمند به اندازه‌گیری تابع پاسخ بسامدی دقیق سازه‌ی آسیب‌دیده است. این در حالی است که در شرایط عملیاتی به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی تهیه و نصب حسگر، اندازه‌گیری پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده در تمام اعضاء سازه از جمله در المان‌های سازه‌ی قاب غیرممکن



شکل ۵. الف) هندسه‌ی سازی خراب؛ ب) المان‌های اندازه‌گیری و تحریک.

جدول ۲. ویژگی المان‌های خراب.

المان‌ها	سطح مقطع (mm^2)
۱-۸	۱۸۰۰
۹-۱۶	۱۵۰۰
۱۷-۲۳	۱۰۰۰
۲۴-۳۵	۱۲۰۰
مدول کشسانی (MPa)	
۱-۳۵	2×10^5
چگالی جرمی (kg/m^3)	
۱-۳۵	۷۳۰۰

جدول ۳. سناریوهای خرابی سازی خراب.

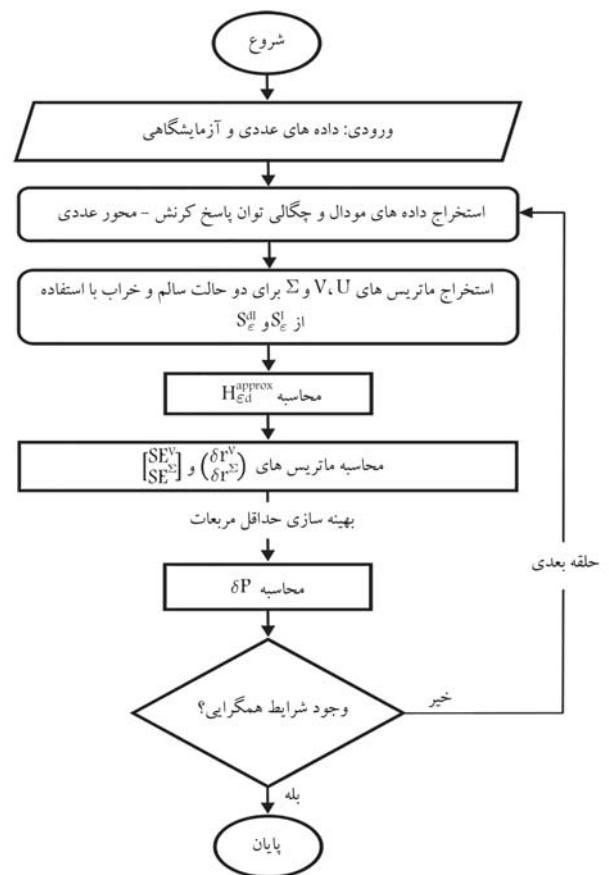
سناریو	شماره‌ی المان	مقدار خرابی
۱	۱۶، ۷	$0/30^\circ$ و $0/40^\circ$
۲	۲۴ و ۱۸، ۵	$0/30^\circ$ ، $0/35^\circ$ و $0/35^\circ$
۳	۳۴ و ۲۸، ۱۵، ۹	$0/30^\circ$ ، $0/40^\circ$ و $0/30^\circ$
۴	۳۳ و ۲۷، ۱۰، ۸، ۵	$0/20^\circ$ ، $0/30^\circ$ ، $0/30^\circ$ و $0/25^\circ$

می‌شود. در پژوهش حاضر، ۱۵ و $0/5^\circ$ درصد خطای اندازه‌گیری به ترتیب برای چگالی طیفی پاسخ و بسامدهای طبیعی در نظر گرفته شده و به صورت تصادفی به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود اضافه شده است.

۱.۳. خرابای ۳۵ عضوی

اولین سازی بررسی شده، یک خرابای فلزی معیار^۹ دوبعدی بوده است، که مشخصات هندسی و المان‌های اندازه‌گیری و تحریک آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مدل خرابا دارای ۳۵ عضو میله‌ای و ۲۹ درجه‌ی آزادی کلی بوده است، که ویژگی المان‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای بررسی کارکرد و توانایی روش ارائه شده، ۴ سناریوی خرابی فرض شده و جزئیات مقادیر و المان‌های خراب در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی وزن روسازه، مقدار 1000 کیلوگرم جرم متمرکز بر روی درجه‌های آزادی المان‌های پایینی سازه اعمال شده است.^[۲۷]

به منظور به‌روزرسانی خرابای ۳۵ عضوی، محدوده‌های بسامدی در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۴). برای شبیه‌سازی داده‌های مودال مدل آسیب‌دیده، المان‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰ و ۲۶ اندازه‌گیری شده و به عبارت دیگر تعداد حسگرها، ۷ عدد



شکل ۴. الگوریتم روش ارائه شده.

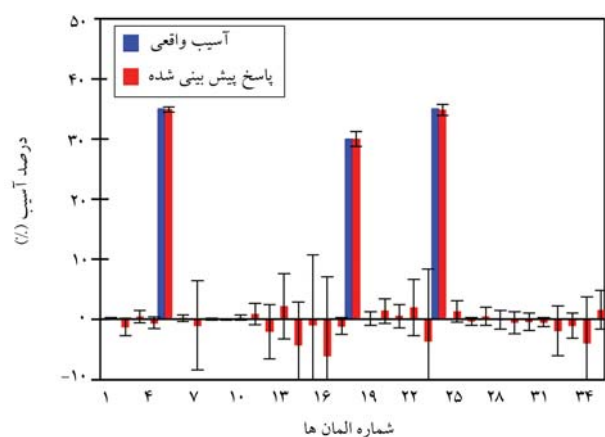
- ناحیه‌ی C: در بازه‌ی C بسامدی، اثر میرایی قابل صرف‌نظر و همچنین اختلاف دامنه‌ی پاسخ دو سازه، میزان چشمگیری دارد.
- ناحیه‌ی D: در این ناحیه، چگالی طیفی پاسخ هر دو مدل تحلیلی و آسیب‌دیده تحت تأثیر خواص میرایی است، بنابراین در غیاب یک مدل مناسب برای میرایی سازه‌ی، بهنگام‌سازی مدل موفق نخواهد بود.

با توجه به نکات ذکر شده، ناحیه‌ی A، بازه‌ی بسامدی مناسب برای بهنگام‌سازی خواهد بود.

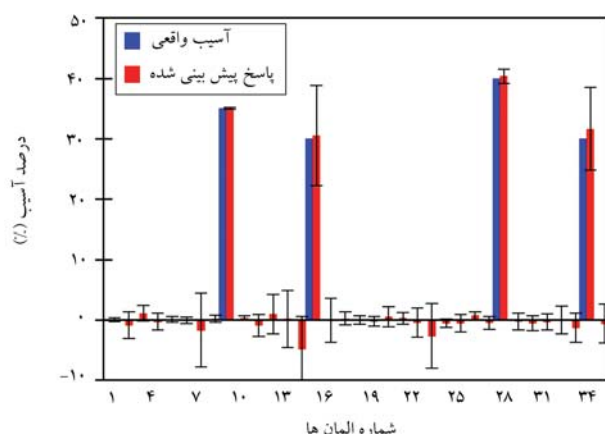
آثار میرایی باعث کنترل دامنه‌ی PSD می‌شود، لذا در بسامدهای نزدیک ناحیه‌ی تشدید بیشتر نمایان می‌شود. با دور شدن نقاط بسامدی از ناحیه‌ی تشدید، آثار میرایی به شدت کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر، به منظور عدم در نظرگیری میرایی برای به‌روزرسانی مدل، نواحی بسامدی به اندازه‌ی کافی از مناطق تشدید دور در نظر گرفته شده‌اند.^[۲۵، ۲۶] به طور کلی روش ارائه شده در قالب یک فلوچارت در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳. مثال‌های عددی

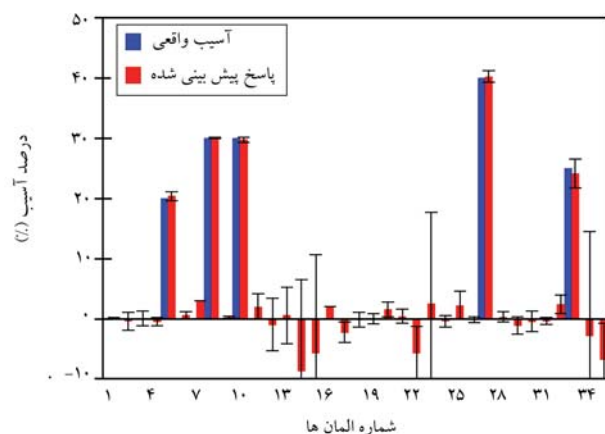
به منظور بررسی توانایی و دقت معادله‌ی حساسیت ارائه شده در شناسایی خرابی، روش پیشنهادی روی دو سازی فلزی خراب و قاب دوبعدی اعمال و نتایج بررسی شده است. جهت بررسی عددی پایداری روش‌های بهنگام‌سازی در مقابل خطای اندازه‌گیری، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و انجام ۵۰ اجرای مستقل توسط برنامه استفاده



شکل ۷. پاسخ سناریوی دوم خرپای ۳۵ عضوی.



شکل ۸. پاسخ سناریوی سوم خرپای ۳۵ عضوی.



شکل ۹. پاسخ سناریوی چهارم خرپای ۳۵ عضوی.

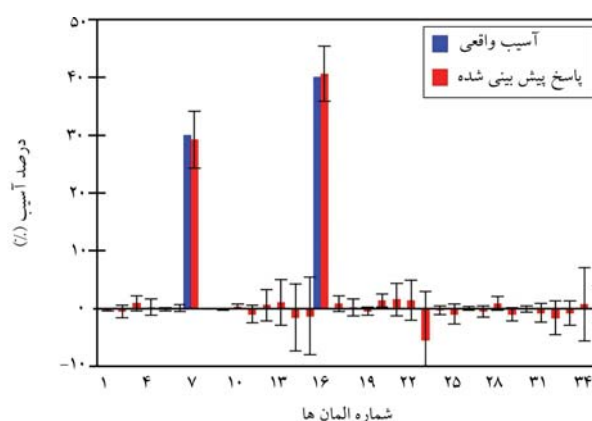
به دست آمده در اطراف میانگین پراکنده شده باشند، این موضوع را با ارزیابی مقادیر انحراف معیار پارامترها در اجراهای انجام شده، می‌توان بررسی کرد. به همین علت انحراف معیار مقادیر خرابی المان‌ها در طی اجراهای انجام شده در هر سناریو بر روی نمودار میانگین در شکل‌های ۶ الی ۹ رسم شده است. همچنین نسبت انحراف معیار به مقادیر میانگین خرابی، که یک شاخص به نام ضریب تغییرات (COV) 1° است،^[۲۶] در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. بنابراین هر چقدر مقدار COV المان‌ها کمتر باشد، توان روش بالاتر است. مطابق

جدول ۴. بسامدهای تحریک در سناریوهای سازه‌ی خرپای ۳۵ عضوی (Hz).

سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۱۹/۳-۲۵	۱۴-۱۸/۷	۱۳-۱۸	۱۳-۱۷/۹
۲۸-۳۲/۵	۲۶-۳۲/۴	۳۰-۳۲/۶	۱۹/۲-۲۳
۳۳/۸-۳۶/۸	۳۳/۶-۳۵/۲	۳۳/۶-۳۴/۶	۲۹-۳۱/۶
۴۲-۴۶/۵	۴۱-۴۵/۸	۴۰-۴۴/۸	۳۳/۶-۳۵/۸
۴۷/۳-۵۰	۴۷-۴۹	۴۷/۳-۴۹/۵	۴۱-۴۶/۱
۵۰-۵۲	۴۹-۵۱/۲	۴۹/۵-۵۰/۱	۴۹/۱-۵۰/۷
۵۳/۳-۵۶/۳	۵۲/۶-۵۵	۵۲/۵-۵۵	۵۲/۵-۵۴/۶
۵۷-۵۹	۵۷-۵۸	۵۷-۵۸	۵۷-۵۸/۵

جدول ۵. بسامدهای طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده‌ی خرپای ۳۵ عضوی (Hz).

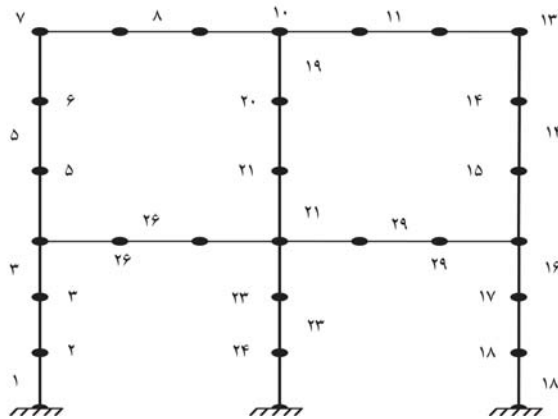
سازه‌ی سالم	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۶/۸۲	۶/۸۲	۶/۸۳	۶/۸۱	۶/۹۶
۱۸/۲	۱۸/۲	۱۸/۹	۱۸/۳	۱۹
۳۲/۸	۳۲/۸	۳۲/۶	۳۲/۹	۳۳/۴
۴۵/۱	۴۵/۱	۴۵/۹	۴۶/۸	۴۷/۱
۵۰/۳	۵۰/۳	۵۱/۴	۵۲/۲	۵۲/۲
۵۵/۴	۵۵/۴	۵۵/۶	۵۶/۶	۵۶/۸



شکل ۶. پاسخ سناریوی اول خرپای ۳۵ عضوی.

بوده است. همچنین المان‌های ۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۵ و ۲۹ به عنوان مکان‌های تحریک انتخاب شده‌اند. ۶ بسامد طبیعی اول سازه‌ی آسیب‌دیده به عنوان داده‌ی مودال اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین، ۶ بسامد طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده و محدوده‌های بسامدی انتخابی در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که ۶ مؤلفه‌ی اصلی از ماتریس‌های V و \sum استفاده شده است و نتایج در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل‌های ۶ الی ۹، مکان و مقدار خرابی المان‌های آسیب‌دیده تقریباً به درستی ارزیابی شده‌اند. همچنین تعداد المان‌های سالم کمی با مقدار آسیب قابل صرف‌نظر (مقدار خرابی بین -9% تا $+2\%$) یافت شده‌اند، که وجود آنها نیز به دلیل اندازه‌گیری ناکامل داده‌ی PSD و وجود خطاهای اندازه‌گیری بوده است. می‌توان به این نتیجه رسید که میانگین نتایج نمی‌توانند به تنهایی معیار قابل قبولی برای محک کارایی روش ارائه شده باشند. بنابراین، در صورتی که مقادیر پارامترهای



شکل ۱۱. مشخصات هندسی قاب ۳۰ عضوی.

جدول ۷. ویژگی المان‌های قاب.

المان‌ها	طول (m)
۱-۳، ۱۸-۱۶ و ۲۴-۲۲	۱
۴-۶، ۱۵-۱۳ و ۲۱-۱۹	۱/۲۵
۷-۱۲ و ۳۰-۲۵	۰/۷۵
سطح مقطع (mm ^۲)	
۱-۳۰	۳۱۲۰۰
مدول کشسانی (MPa)	
۱-۳۰	۲ × ۱۰ ^۵
چگالی جرمی (kg/m ^۳)	
۱-۳۰	۷۲۰۰
ممان اینرسی (mm ^۴)	
۱-۳۰	۶۷۸ × ۱۰ ^۵

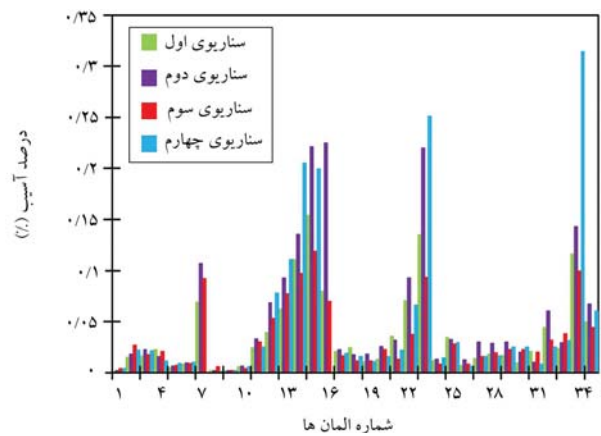
جدول ۸. سناریوهای خرابی سازه‌ی قاب.

سناریو	شماره‌ی المان	مقدار خرابی
۱	۳ و ۱۰	۰/۳۵ و ۰/۳۰
۲	۱۱ و ۸، ۴	۰/۳۵ و ۰/۳۰، ۰/۳۰ و ۰/۳۵
۳	۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۷	۰/۳۵ و ۰/۳۰، ۰/۳۵ و ۰/۳۰
۴	۶، ۱۱، ۱۴، ۱۹ و ۲۸	۰/۳۵ و ۰/۳۰، ۰/۴۰ و ۰/۳۰، ۰/۳۵ و ۰/۳۵

المان‌های افقی سازه اعمال شده است. لازم به ذکر است که به جهت تحلیل مدل اجزاء محدود المان‌های قاب از روش دوگره‌یی استفاده شده است.

به منظور به‌روزرسانی مدل سازه‌ی ذکر شده، لیست محدوده‌های بسامدی در جدول ۹ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی داده‌های مودال مدل آسیب‌دیده، المان‌های ۱، ۳، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۹، ۲۲، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ اندازه‌گیری شده و به عبارت دیگر، تعداد حسگرها ۱۰ عدد بوده است. همچنین المان‌های ۱، ۸، ۱۰، ۲۰، ۲۳، ۲۶ و ۳۰ به عنوان مکان‌های تحریک انتخاب شده‌اند. المان‌های اندازه‌گیری و تحریک در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند. ۱۰ بسامد طبیعی اول سازه‌ی آسیب‌دیده به عنوان داده‌ی مودال اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ۱۰ بسامد طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده و محدوده‌های بسامدی انتخابی در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که ۸ مؤلفه‌ی اصلی از ماتریس‌های V و Σ استفاده کرده و نتایج در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ ارائه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، مکان و مقدار خرابی المان‌های آسیب‌دیده



شکل ۱۰. نمودار ضریب تغییرات سناریوهای خرابی ۳۵ عضوی.

جدول ۶. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای سازه‌ی خرابی ۳۵ عضوی.

شماره‌ی سناریو	مقدار CI
۱	۰/۸۲
۲	۰/۸۹
۳	۰/۹۴
۴	۰/۸۵

شکل ۱۰، بیشینه‌ی مقدار COV متعلق به المان‌های ۲۳ و ۳۴ به ترتیب با مقداری حدود ۰/۲۵ و ۰/۳۲ در سناریوی چهارم است. بقیه‌ی مقادیر در همه‌ی المان‌ها و سناریوها کمتر از ۰/۲۳ بوده است، که کارایی روش را در برابر خطاهای موجود نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که مقادیر انحراف معیارهای روی نمودارهای نتیجه و همچنین مقدار COV المان‌ها توانایی روش در برابر نویز و اندازه‌گیری ناکامل را به طور واضح، خوب گزارش می‌دهند.

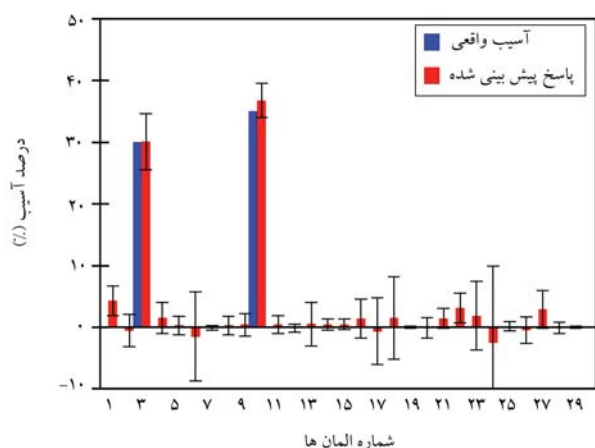
برای بررسی و مقایسه‌ی کمی دقیق‌ی از پاسخ‌ها، شاخص‌های زیادی تاکنون ارائه شده‌اند، که یکی از آنها شاخص CI^{۱۱} است، که با استفاده از بردار پاسخ‌های خرابی به دست آمده و خرابی‌های واقعی به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود: [۲۸]

$$CI = 1 - \frac{\|\delta P^p - \delta P^a\|}{\|\delta P^a\|} \quad (14)$$

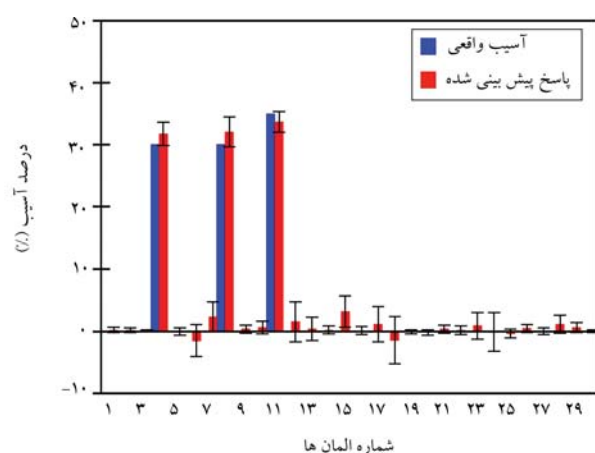
که در آن، δP^p و δP^a به ترتیب بردارهای خرابی‌های واقعی و ارزیابی شده هستند. همچنین $\|\cdot\|$ نشان از نرم بردار دارد. بنابراین هر چقدر مقادیر CI به ۱ نزدیک‌تر باشند، بدین معناست که پاسخ ارزیابی شده به مقدار دقیق نزدیک‌تر بوده است. مقادیر شاخص CI، متناظر با ۴ سناریوی بررسی شده در جدول ۶ ارائه شده‌اند. می‌توان با توجه به اعداد جدول به مناسب بودن پاسخ ۴ سناریوی مربوط به سازه‌ی خرابی ۳۵ عضوی پی برد.

۲.۳. قاب ۳۰ عضوی

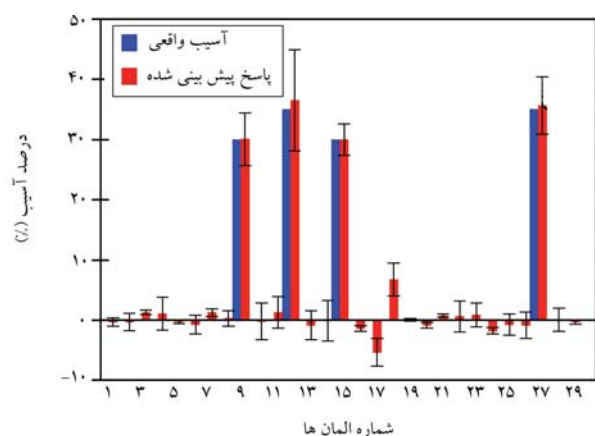
دومین سازه‌ی بررسی شده، یک قاب فلزی دو دهانه‌ی دو طبقه‌ی دو بوعدی است، که مشخصات هندسی آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مدل قاب، دارای ۳۰ عضو میله‌یی و ۲۹ درجه‌ی آزادی کلی بوده است، که ویژگی المان‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. برای بررسی کارکرد و توانایی روش ارائه شده، ۴ سناریوی خرابی فرض شده است، که جزئیات مقادیر و المان‌های خراب در جدول ۸ ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی وزن روسازه، مقدار ۶۰۰ (kg/m) بار یکنواخت بر روی تمامی



شکل ۱۳. پاسخ سناریوی اول قاب ۳۰ عضوی.



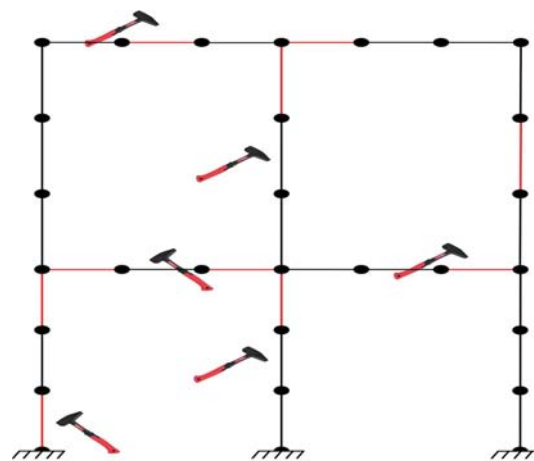
شکل ۱۴. پاسخ سناریوی دوم قاب ۳۰ عضوی.



شکل ۱۵. پاسخ سناریوی سوم قاب ۳۰ عضوی.

جدول ۱۱. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای سازه‌ی قاب ۳۰ عضوی.

مقدار CI	شاخص سناریو
۰/۸۳	۱
۰/۸۹	۲
۰/۸۶	۳
۰/۸۰	۴



شکل ۱۲. المان‌های اندازه‌گیری و تحریک قاب ۳۰ عضوی.

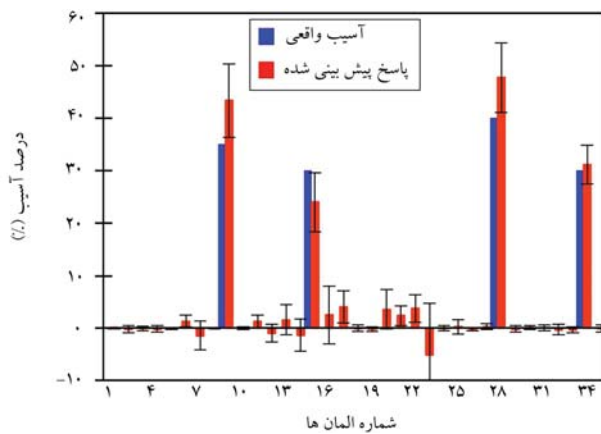
جدول ۹. بسامدهای تحریک در سناریوهای سازه‌ی قاب ۳۰ عضوی (Hz).

سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۵۸-۶۰/۴	۵۷-۶۰/۵	۵۶-۵۹/۳	۵۶-۵۸/۳
۶۱/۶۲-۴	۶۱/۶۲-۴	۶۱/۶۱-۴/۸	۶۱/۶۱-۴/۶
۶۴/۶۹-۵	۶۴/۶۸-۵	۶۴/۶۸-۵	۶۴/۶۸-۵
۶۹-۷۳/۴	۶۸-۶۹/۸	۶۸-۷۱/۸	۶۸-۶۹/۸
۷۴/۷۶-۲	۷۴/۷۵-۲	۷۴/۷۵-۲/۲	۷۴/۷۵-۲
۷۶-۷۸/۵	۷۵-۷۷/۳	۷۵/۷۶-۲/۲	۷۵/۷۶-۲/۴
۸۵-۸۰	۸۵-۸۰	۸۵-۸۰	۸۵-۸۰
۸۵-۹۰/۸	۸۵-۹۲/۷	۸۵-۹۱	۸۵-۹۱/۷
۹۳/۹۵-۴	۹۳/۹۵-۴	۹۳/۹۵-۳/۳	۹۳/۹۵-۳/۴

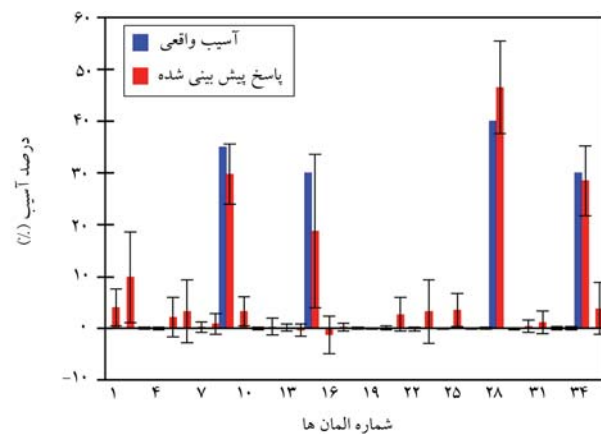
جدول ۱۰. بسامدهای طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده‌ی قاب ۳۰ عضوی

سازه‌ی سالم	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۶/۰۱	۵/۹۸	۵/۹۸	۵/۹۰	۵/۸۱
۱۷/۶	۱۷/۴	۱۷/۳	۱۷/۲	۱۷/۱
۳۷/۷	۳۷/۲	۳۶/۰	۳۶/۸	۳۵/۴
۴۳/۶	۴۳/۱	۴۲/۵	۴۲/۲	۴۱/۶
۵۵/۴	۵۴/۹	۵۳/۵	۵۴/۳	۵۲/۲
۶۱/۲	۶۰/۶	۶۰/۸	۵۹/۷	۵۸/۵
۶۴/۳	۶۳/۳	۶۲/۲	۶۲/۳	۶۱/۸
۷۴/۰	۷۳/۶	۷۲/۰	۷۲/۲	۷۰/۰
۷۹/۷	۷۸/۷	۷۷/۵	۷۶/۷	۷۶/۶
۹۳/۲	۹۱/۱	۹۲/۹	۹۱/۹	۹۲/۰

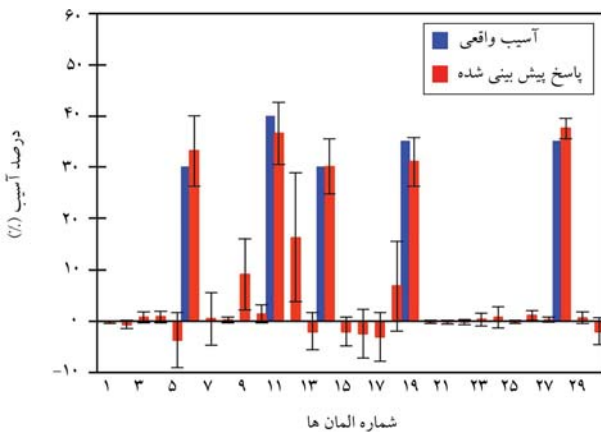
تقریباً به درستی ارزیابی شده‌اند. همچنین تعداد المان‌های سالم کمی با مقدار آسیب قابل صرف‌نظر (مقدار خرابی بین ۸- تا ۵+٪) یافت شده‌اند، که وجود آنها نیز به دلیل اندازه‌گیری ناکامل داده‌ی PSD و وجود خطاهای اندازه‌گیری بوده است. مقادیر COV همه‌ی المان‌ها و CI در همگی سناریوها در شکل ۱۷ و جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. مطابق شکل ۱۷، بیشینه‌ی مقدار COV متعلق به المان‌های ۱۲ و ۲۴ به ترتیب با مقداری حدود ۱۳/۰ و ۱۲/۰ در سناریوهای سوم و اول است. بقیه‌ی مقادیر در همه‌ی المان‌ها و سناریوها کمتر از حدود ۸/۰ بوده است، که کارایی روش را در



شکل ۱۸. پاسخ سناریوی سوم خریا با روش PCA-FRF.

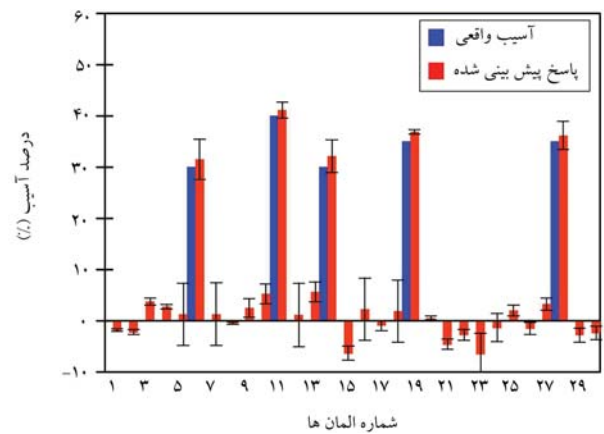


شکل ۱۹. پاسخ سناریوی سوم خریا با روش PSD.

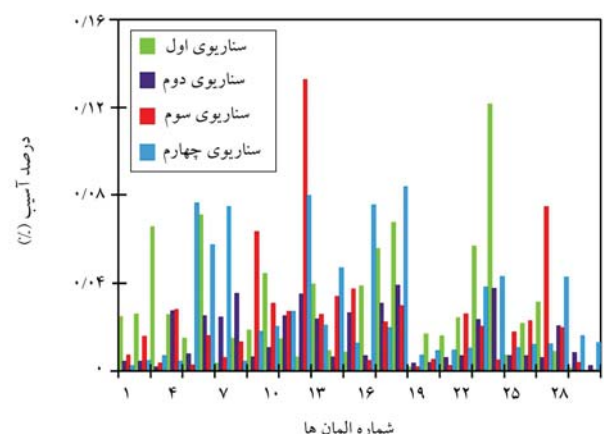


شکل ۲۰. پاسخ سناریوی چهارم قاب با روش PCA-FRF.

FRF، همان‌طور که گفته شد، اسفندیاری و همکاران با استفاده از ترکیب داده‌های FRF و روش SVD به ارائه‌ی روش خود پرداخته‌اند. همچنین در روش ملقب به PSD، پدرام و همکاران با استفاده از معادله‌ی حساسیت خطی و با استفاده از داده‌های چگالی طیفی کرنش - محور مستقیماً به ارائه‌ی روش خود پرداخته‌اند. قابل ذکر است که روش FRF به صورت کرنش - محور برای مقایسه در پژوهش حاضر پیاده‌سازی شده است. دو سناریوی مذکور با توجه به تمام ویژگی‌های ذکر شده‌ی اخیر توسط سه الگوریتم اشاره شده، پیاده‌سازی شده‌اند و نتایج در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۶. پاسخ سناریوی چهارم قاب ۳۰ عضوی.



شکل ۱۷. نمودار ضریب تغییرات سناریوهای قاب ۳۰ عضوی.

برابر خطاهای موجود نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر انحراف معیارهای روی نمودارهای نتیجه و همچنین مقدار COV المان‌ها، توانایی روش در برابر نویز و اندازه‌گیری ناکامل را به طور واضح خوب گزارش می‌دهند. می‌توان با توجه به اعداد جدول ۱۱ به مناسب بودن پاسخ ۴ سناریوی مربوط به سازه‌ی قاب ۳۰ عضوی پی برد.

۴. مقایسه‌ی روش ارائه شده با دیگر روش‌ها

در انتها، برای ارزیابی کامل و بهتر روش ارائه شده، بهتر است آن را با دیگر روش‌های بررسی شده در گذشته مقایسه کرد. به همین منظور روش ارائه شده با دو روش دیگر مقایسه شده است. مقایسه‌ی اول با روشی است که نقطه‌ی اشتراک بیشتری با روش معرفی شده در مطالعه‌ی حاضر دارد، اما با داده‌های پاسخ بسامدی FRF انجام شده است. به این ترتیب برتری داده‌های PSD بر FRF مشخص می‌شود. در وهله‌ی بعدی، فرایند مقایسه توسط روشی ساده و بدون استفاده از SVD، فقط با استفاده از داده‌های PSD و معادله‌ی حساسیت مستقیم انجام شده است. به این ترتیب برتری استفاده از ترکیب روش SVD و داده‌های PSD نیز مشخص شده است. برای این هدف، سناریوی ۳ از سازه‌ی خریا و سناریوی ۴ از سازه‌ی قاب انتخاب شده‌اند. در نتیجه، الگوریتم‌هایی که مقایسه شده‌اند، شامل روش ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر (PCA-PSD)، روش ارائه شده توسط اسفندیاری و همکاران (FRF)^[۵] و روش ارائه شده توسط پدرام و همکاران (PSD)^[۲۴] است. در روش ملقب به

شده از روش ارائه شده در پژوهش حاضر بهتر نبوده‌اند. برای بررسی بیشتر پاسخ‌های ذکر شده، جدول ۱۲، که شامل مقادیر CI است، ارائه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۱۲، به طور میانگین روش PCA-FRF دارای مقدار CI بیشتری نسبت به روش PSD بوده است. در نتیجه هر کدام از روش‌های PCA-FRF با PSD می‌توانند از جهاتی بر دیگری برتری داشته باشند، اما به طور کلی چه از لحاظ مقادیر اندیس CI و یا چه از نظر کیفیت خرابی در المان‌های آسیب‌دیده یا سالم، هیچ‌یک بر روش ارائه شده در پژوهش حاضر برتری نداشته‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

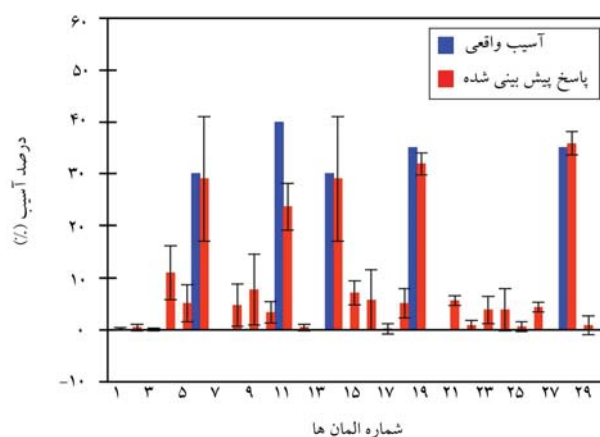
در پژوهش حاضر، یک روش جدید برای بررسی مسئله‌ی شناسایی آسیب سازه‌ی با بهره‌گیری از PCA داده‌ی PSD ارائه شده است. این روش که در محدوده‌ی بسامدی و کرنش - محور است، به شکلی پیاده‌سازی شده است که برای به نتیجه رسیدن فقط به بسامدهای طبیعی سازه‌ی خراب و اجزاء اصلی PSD اندازه‌گیری شده نیازمند است. بنابراین، روش مذکور نسبت به روش‌هایی که نیازمند مشتق مرتبه‌ی اول بوده و احتمالاً به همین سبب خطاهایی داشته‌اند، برتری دارد. به سبب بررسی کارایی و راستی‌آزمایی روش ارائه شده از تعدادی مثال شامل شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه شده بر روی سازه‌های فلزی خراب و قاب با وجود خطاهای اندازه‌گیری مؤثر است. همچنین روش ارائه شده با دو روش دیگر مقایسه شده و با توجه به بالا بودن شاخص CI در پاسخ‌های روش ارائه شده، دقیق‌تر بودن مقادیر درصد آسیب در المان‌های خراب و کمتر بودن مقادیر عددی پیدا شده در المان‌های سالم می‌توان به این نتیجه رسید که پاسخ‌های روش ارائه شده مناسب‌تر هستند. بنابراین، نتایج در ابعاد مختلف بر مؤثرتر و کاراتر بودن روش ارائه شده در پژوهش حاضر تأکید می‌کنند.

پانویس‌ها

1. Global Damage Detection
2. Frequency Response Functions (FRF)
3. Yao
4. Auto Spectral Density
5. Cross Spectral Density
6. Ha & Golinval
7. Left Singular Values
8. Support Vector Machine
9. Benchmark
10. Coefficient of Variation (COV)
11. Closeness Index

منابع (References)

1. Fallah, N., Hoseini Vaez, S.R. and Mohammadzadeh, A. "Multi-damage identification of large-scale truss structures using a two-step approach", *Journal of Building Engineering*, **19**, pp. 494-505 (2018).



شکل ۲۱. پاسخ سناریوی چهارم قاب با روش PSD.

جدول ۱۲. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای مقایسه‌ی.

روش	سازه	مقدار CI
PCA-FRF	خراب	۰/۷۶
	قاب	۰/۷۱
PSD	خراب	۰/۷۱
	قاب	۰/۶۵

مطابق شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، بیشینه‌ی مقدار خرابی در المان‌های سالم حدود ۱۶ و ۱۰ درصد به ترتیب با روش‌های PCA-FRF و PSD بوده است، که از این نظر برتری استفاده از داده‌های PSD در برابر FRF را اثبات می‌کند. همچنین بیشینه‌ی اختلاف خرابی در المان‌های آسیب‌دیده در هر دو روش حدود ۱۰٪ بوده است. همان‌طور که مشخص است، پاسخ هیچ‌کدام از روش‌ها از پاسخ‌های منتج

2. Hou, R., Xia, Y. and Zhou, X. "Structural damage detection based on l1 regularization using natural frequencies and mode shapes", *Structural Control and Health Monitoring*, **25**(3), p. e2107 (2018).
3. Jiang, Y., Xiang, J.W., Li, B. and et al. "A hybrid multiple damages detection method for plate structures", *Science China Technological Sciences*, **60**(5), pp. 726-736 (2017).
4. Xiang, J. and Liang, M. "Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **27**(6), pp. 439-454 (2012).
5. Esfandiari, A., Nabiyan, M.S. and Rofooei, F.R. "Structural damage detection using principal component analysis of frequency response function data", *Structural Control and Health Monitoring*, **27**(7), p. e2550 (2020).
6. Niu, Z. "Frequency response-based structural damage detection using Gibbs sampler", *Journal of Sound and Vibration*, **470**, p. 115160 (2020).
7. Bernagozzi, G., Ventura, C.E., Allahdadian, S. and et al. "Output-only damage diagnosis for plan-

- symmetric buildings with asymmetric damage using modal flexibility-based deflections", *Engineering Structures*, **207**, pp. 110-115 (2020).
8. Janeliukstis, R., Ručevskis, S. and Kaewunruen, S. "Mode shape curvature squares method for crack detection in railway prestressed concrete sleepers", *Engineering Failure Analysis*, **105**, pp. 386-401 (2019).
9. Wang, Y., Liang, M. and Xiang, J. "Damage detection method for wind turbine blades based on dynamics analysis and mode shape difference curvature information", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **48**(1), pp. 351-367 (2014).
10. Jayasundara, N., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T. and et al. "Damage detection and quantification in deck type arch bridges using vibration based methods and artificial neural networks", *Engineering Failure Analysis*, **109**, p. 104265 (2020).
11. Huang, M., Li, X., Lei, Y. and et al. "Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced moth-flame optimization", *Structures*, **28**, pp. 1119-1136 (2020).
12. Fallah, N., Vaez, S.R.H. and Fasihi, H. "Damage identification in laminated composite plates using a new multi-step approach", *Steel and Composite Structures*, **29**(1), pp. 139-149 (2018).
13. Abdel-Basset, M. "Parametric study of using only static response in structural damage detection", *Engineering Structures*, **34**, pp. 124-131 (2012).
14. Adewuyi, A. and Wu, Z. "Modal macro-strain flexibility methods for damage localization in flexural structures using long-gage FBG sensors", *Structural Control and Health Monitoring*, **18**(3), pp. 341-360 (2011).
15. Yao, G.C., Chang, K.-C. and Lee, G. "Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, **118**(9), pp. 1949-1961 (1992).
16. Beyhaqi, A. and Esfandiari, A. "FRF-based structural parameters estimation using strain data: Sensitivity equation, measurement and excitation selection", *Inverse Problems in Science and Engineering*, **26**(7), pp. 942-965 (2018).
17. Kammer, D.C. and Nimityongskul, S. "Frequency band averaging of spectral densities for updating finite element models", *Journal of Vibration and Acoustics*, August, **131**(4), pp.041007-1 (2009). <https://doi.org/10.1115/1.3085885>.
18. Zheng, Z., Lu, Z.R., Chen, W.H. and et al. "Structural damage identification based on power spectral density sensitivity analysis of dynamic responses", *Computers & Structures*, **146**, pp. 176-184 (2019).
19. Pedram, M., Esfandiari, A. and Khedmati, M.R. "Damage detection by a FE model updating method using power spectral density: Numerical and experimental investigation", *Journal of Sound and Vibration*, **397**, pp. 51-76 (2017).
20. Ha, N.V. and Golinval, J.-C. "Damage localization in linear-form structures based on sensitivity investigation for principal component analysis", *Journal of Sound and Vibration*, **329**(21), pp. 4550-4566 (2010).
21. Bolourani, A., Bitaraf, M. and Tak, A.N. "Structural health monitoring of harbor caissons using support vector machine and principal component analysis", *Structures, Elsevier*, **33**, pp. 4501-4513 (2021).
22. Doebling, S.W., Peterson, L.D. and Alvin, K.F. "Experimental determination of local structural stiffness by disassembly of measured flexibility matrices", *Journal of Vibration and Acoustics*, **120**(4), pp. 949-957 (1998).
23. MATLAB, V., (R2014a), Natick, MA: The MathWorks Inc. (2014).
24. Pedram, M., Esfandiari, A. and Khedmati, M.R. "Finite element model updating using strain-based power spectral density for damage detection", *Structural Control and Health Monitoring*, **23**(11), pp. 1314-1333 (2016).
25. Esfandiari, A., et al., "Finite element model updating using frequency response function of incomplete strain data", *AIAA Journal*, **48**(7), pp. 1420-1433 (2010).
26. Fallah, N., Hoseini Vaez, S.R. and Esfandiari, A. "Damage identification of structures based on sensitivity equations using PCA and PSD data", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **237**(11), pp. 2606-2620 (2022).
27. Esfandiari, A. "Structural model updating using incomplete transfer function of strain data", *Journal of Sound and Vibration*, **333**(16), pp. 3657-3670 (2014).
28. Esfandiari, A., et al., "Structural model updating using frequency response function and quasi-linear sensitivity equation", *Journal of Sound and Vibration*, **326**(3-5), pp. 557-573 (2009).

بررسی اثر المان‌های موجود در پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر

آنوسا وثیق (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانیال معظمی* (استادیار)

گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

شهرام پوراکیبر (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، مؤسسه آموزشی عالی بینالود

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۵۱-۵۷)، پژوهشی
دوری ۳۹، شماره ۲، صص.

در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوپلیمر با مواد پسماند پوست تخم‌مرغ برای تثبیت خاک رس استفاده شده است. در این راستا، از ترکیب سدیم‌هیدروکسید و چسب سیلیکات به عنوان فعال‌کننده‌ی بازی استفاده شده است. جهت بررسی نمونه‌های خاکی تثبیت شده به روش ژئوپلیمر، از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. تحلیل شیمیایی واکنش‌ها از طریق بررسی عکس‌برداری الکترونی (SEM) روی نمونه‌های ژئوپلیمری انجام شده است. براساس نتایج پژوهش حاضر، استفاده از پسماندها با داشتن المان‌های آلومینا (Al_2O_3) و سیلیکا (SiO_2) بالا می‌تواند سبب افزایش در مقاومت خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر شود. استفاده از پودر پوست تخم‌مرغ با درصد‌های ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روزه به ترتیب باعث مقاومت فشاری تک‌محوری به میزان $1/24$ MPa، $1/21$ MPa، $1/18$ MPa و 849 kPa شده است.

واژگان کلیدی: خاک رس، تثبیت خاک، ژئوپلیمر.

ati.vgh@gmail.com
d_moazami@mshdiau.ac.ir
pourakbar@binaloud.ac.ir

۱. مقدمه

از آن‌جا که در بیشتر پروژه‌های عمرانی، خاک جزء جدایی‌ناپذیر است، لذا تأمین مقاومت آن، اهمیت خاصی دارد. از جمله مشکلات موجود در خاک، بحث نشست و تورم است، که وجود آنها با جنس و بافت خاک ارتباط مستقیم دارد. یکی از خاک‌های چالش برانگیز در علم ژئوتکنیک، خاک‌های رسی هستند؛ زیرا که این خاک‌ها مقاومت فشاری و ظرفیت باربری کم و یا تورم زیاد دارند. تثبیت خاک، یکی از راه‌های مقابله با مشکلات اخیر است.^[۳-۱]

در علم مهندسی ژئوتکنیک، تغییر در خصوصیات خاک، شامل: مقاومت، سختی، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، پتانسیل تورم و همچنین افزایش ظرفیت باربری آن را تثبیت خاک می‌نامند.^[۴-۶] تثبیت و یا بهسازی خاک یک اصطلاح کلی است که برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا ترکیبی از آنها که برای بهبود خواص خاک به کار می‌رود، اطلاق می‌شود.^[۷ و ۸]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۵، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2023.59981.3092

استاد به این مقاله:

وثیق، آنوسا، معظمی، دانیال و پوراکیبر، شهرام، ۱۴۰۲. بررسی اثر المان‌های موجود در پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۵۷-۵۱.

از جمله مباحث مهم در مکانیک خاک، بحث مقاومت برشی است. پارامترهای مهم و مؤثر در مقاومت برشی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک هستند. برای جلوگیری از بروز مشکلات مقاومتی در خاک می‌توان از روش اصلاح و تثبیت با مواد افزودنی استفاده کرد. انتخاب مواد افزودنی جهت تثبیت خاک بستگی به نوع و جنس خاک و همچنین هدف از تثبیت خاک دارد.^[۹-۱]

کمبود منابع طبیعی و افزایش هزینه‌ی زمین منجر به شناسایی روش‌های استفاده‌ی مجدد از زباله‌های صنعتی می‌شود. پروژه‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده‌ی موفقیت‌آمیز از پسماندهای صنعتی در روش ژئوپلیمر برای تثبیت خاک می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت و ساز شود. همچنین استفاده از مواد ضایعاتی در مصالح ساخت، ایده‌ی مطلوب بشمار می‌رود. استفاده از مواد ضایعاتی، از طرفی موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی و از طرف دیگر، موجب کاهش هزینه‌های دفع پسماند می‌شود.

بونداری^۱ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۹] به بررسی شیمیایی و فیزیکی پنج نوع پوزولان طبیعی ایران پرداخته‌اند. با توجه به نتایج و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری و حلالیت

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک.

پارامتر	استاندارد	مقدار
نام خاک در سیستم طبقه بندی متحد	ASTM D۲۴۸۷	CL
بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک ($\gamma_{d \max}$)	ASTM D۶۹۸	$1/95(\text{gr/cm}^3)$
چگالی دانه های خشک (Gs)	ASTM D۸۵۴	۲/۶۵
نشانه خمیری (PI)	ASTM D۴۳۱۸-۱۰	۸
حد خمیری (PL)	ASTM D۴۳۱۸-۱۰	۲۱
حد روانی (LL)	TM D AS۴۳۱۸-۱۰	۲۹
درصد رطوبت بهینه (w_{opt})	ASTM D۶۹۸	$12/5(\%)$
مقاومت فشاری تک محوری (UCS)	ASTM D۲۱۶۶/D۲۱۶۶M	$247(KPa)$
چسبندگی (C)	ASTM D۳۰۸۰	$0/33(\text{kg/cm}^2)$
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	ASTM D۳۰۸۰	18°

قلیایی به عنوان میزان فعالیت پوزولانی ماده، از میان پوزولان‌های تفتان، رفسنجان، سیرجان، سهند و شاهین دژ، پوزولان تفتان به علت داشتن LOI (افت حرارتی) کم و مقدار کلسیم قابل حل زیاد، بیشترین واکنش‌پذیری و بهترین رفتار را نشان داده است.

یکی دیگر از پوزولان‌های قابل استفاده در خاک، پست تخم مرغ در ترکیب با آهک را می‌توان برای تثبیت خاک رس استفاده و اثر آن را در ویژگی‌های خاک بررسی کرد و ترکیبی بهینه از پودر پسته‌ی تخم مرغ و آهک را به دست آورد.^[۱۰] دمیرل^۲ (۲۰۱۰)،^[۱۱] آثار استفاده از ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر را به عنوان ماسه‌ی ریزدانه در خواص مکانیکی بتن مطالعه کرده و دریافته است که افزودن ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه، اثر بسزایی در مقاومت فشاری آنها دارد. گرد و غبار سنگ مرمر از تولید سنگ مرمر حاصل می‌شود و در مقیاس بزرگ، ایجاد آلودگی زیست محیطی می‌کند.

ضایعات شیشه به دلیل شباهت ترکیب‌هایش به ماسه، مورد مطالعه‌ی پژوهشگران صنعت ساخت قرار گرفته است. استفاده از ضایعات شیشه در صنایع و مصالح ساخت، علاوه بر این که به پایداری محیط زیست کمک می‌کند، از هزینه‌های اشغال زمین، حمل و نقل، دفع و نگهداری آنها می‌کاهد. در این راستا، استفاده از ضایعات شیشه به عنوان مصالح دانه‌پی و یا مکمل سیمان در ساخت بتن بررسی شده است، که نتایج مطلوبی داشته است.^[۱۲]

ویجاپاکومار^۳ و همکاران (۲۰۱۳)، نیز به این نتیجه رسیدند که پودر شیشه می‌تواند به عنوان مواد جایگزین سیمان تا حد اندازه‌ی ذرات کمتر از ۷۵ میکرومتر استفاده شود، تا از واکنش‌های قلیایی - سیلیسی جلوگیری کند.^[۱۳] همچنین شخاوات و آگاروال^۴ (۲۰۱۴)،^[۱۴] نشان دادند که ضایعات شیشه می‌تواند به طور مؤثر در بتن به عنوان یک پوزولان شیشه‌یی استفاده شود. ضایعات شیشه در قالب پودر ریز، به دلیل محتوای سیلیسی برخی از خواص پوزولانی را دارد. بنابراین پودر شیشه تا حدی می‌تواند جایگزین سیمان شود و باعث بهبود مقاومت و دوام بتن شود.

مرور تاریخچه‌ی مطالعات و پژوهش‌های انجام یافته نشان می‌دهد که استفاده از پسماند ژئوپلیمرها به عنوان سیستم‌های جدید و پاک برای تثبیت خاک رس می‌تواند استفاده شود. در این راستا، در پژوهش حاضر، به بررسی نقش المان‌های مختلف موجود در پودر سنگ، پودر شیشه و پودر پست تخم مرغ در تثبیت خاک رس پرداخته شده است.

بدین منظور از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری جهت ارزیابی نمونه‌های

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد

برای انجام پژوهش حاضر از خاک رس، پست تخم مرغ، چسب سیلیکات و سود سوزآور استفاده شده است. آنالیز XRF طیف‌سنجی پرتو ایکس، یکی از روش‌های آنالیز عنصری است که از آن به طور وسیعی در صنعت و مراکز پژوهشی استفاده می‌شود. از روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس برای شناسایی عنصرهای شیمیایی نمونه‌های مختلف استفاده می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های شناسایی خاک مطابق استاندارد ASTM، مشخصات کامل نمونه‌ی خاک و پست تخم مرغ مورد آنالیز XRF قرار گرفته است. خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، براساس طبقه‌بندی یونیفاید، خاک رس با حالت خمیری پایین (CL) است. حد روانی و حد خمیری نیز با توجه به استاندارد ASTM D۴۳۱۸،^[۱۵] تعیین شده است. در جدول ۱، نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مطالعه شده ارائه شده است.

پست تخم مرغ تهیه شده از کارگاه‌های شیرینی‌پزی، پس از خشک شدن در هوای آزاد توسط آسیاب پودر شده و در آزمایشگاه از الک ۲۰۰ عبور کرده است. آهک در پژوهش حاضر فقط جهت ساخت نمونه‌ی شاهد استفاده شده و در ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری آهک استفاده نشده است. در جدول ۲، نتایج آنالیز

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF برای شناسایی ترکیب‌های مصرفی.

ساختار شیمیایی	پوست تخم مرغ (%)	سیمان II (%)	آهک (%)
SiO ₂	-	۲۱/۱۱	۲/۲۳
Al ₂ O ₃	-	۴/۴۲	۰/۷۱
Fe ₂ O ₃	-	۳/۹۶	۰/۲۶
CaO	۹۹/۸۳	۶۳/۳۶	۷۹/۸
MgO	-	۱/۵۱	۰/۶۶
Na ₂ O	-	۰/۳۸	۰/۰۸
K ₂ O	-	۰/۵۱	۰/۰۸
LOI			
SO ₂	-	۲/۶۱	-
CaCO ₃	۹۷-۹۸	-	-
Ca	۴۰	-	-
P	۰/۱	-	-
F	۰/۴۰	-	-

XRF مواد مصرفی در پژوهش حاضر، شامل پوست تخم مرغ، سیمان و آهک ارائه شده است.

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH، همواره به عنوان یک ماده‌ی پرمصرف در صنایع استفاده شده است. سدیم هیدروکسید را می‌توان به صورت پودر یا پولک‌های جامد سفیدرنگ تهیه کرد. شکل پولکی آن کاربرد بسزایی در صنعت دارد و استفاده از آن در تحقیقات مهندسی، از جمله ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری، رایج است.

ساخت محلول قلیایی شامل سدیم هیدروکسید بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا آب و محلول سدیم هیدروکسید با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد. سپس وزن مشخصی از تکه‌های سدیم هیدروکسید ۳/۵ مولار به وزن ۷۰ گرم با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب داخل یک ظرف شیشه‌یی به آرامی حل شد تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواختی حاصل شود و برای این‌که محلول مذکور به دمای محیط برسد و یکنواخت‌تر شود، پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده شده است.

به منظور استفاده از مقدار بهینه‌ی مواد فعال‌ساز قلیایی، نسبت چسب سیلیکات به سود استفاده شده در روش ژئوپلیمر توسط پژوهشگران به عنوان نسبت بهینه‌ی محلول فعال‌ساز قلیایی معرفی شده است.^[۲۲،۲۳] لذا در پژوهش حاضر، نیز نسبت ۲ واحد چسب سیلیکات و ۱ واحد سود استفاده شده است.

در جدول ۳، مشخصات دوره‌های عمل‌آوری، درصد رطوبت بهینه (ω_{opt})، چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{d max}$)، نسبت چسب به سود، درصد چسب و سود، مولاریته‌ی سود در گروه‌های شاهد، که شامل ۵ گروه نمونه‌ی شاهد شامل: خاک طبیعی (S)، خاک تثبیت شده با چسب و سود (SG)، خاک تثبیت شده با سیمان ۶٪ (SC_۶)، خاک تثبیت شده با سیمان ۱۰٪ (SC_{۱۰}) و خاک تثبیت شده با آهک ۱۰٪ (SL_{۱۰}) و همچنین یک گروه نمونه‌ی اصلی، شامل خاک تثبیت شده با خاک تثبیت شده با پوست تخم مرغ به روش ژئوپلیمر (SGE) هستند، ارائه شده است.

۲.۲.۲. ارائه و تحلیل نتایج

۱.۲.۲. نحوه‌ی انجام مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده طبق استاندارد D ۲۱۶۶

ASTM با توجه به ابعاد قالب نمونه‌ی تک‌محوری (قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر)، مقدار مشخصی خاک خشک با درصدهای مختلف افزودنی به طور همگن مخلوط شده است. پس از تهیه‌ی مواد اولیه و قبل از شروع به نمونه‌سازی باید ۲۴ ساعت قبل محلول قلیایی سدیم هیدروکسید تهیه شود. خاک و پودر پوست تخم مرغ (محلول سدیم هیدروکسید و چسب سیلیکات با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شدند، سپس به صورت خشک با دست مخلوط شدند تا یکنواخت شوند.

جهت تعیین میزان آب برای هر مخلوط، مقدار آب موجود در محلول سدیم هیدروکسید تعیین شده است. روش ساخت محلول قلیایی شامل سدیم هیدروکسید بدین صورت بوده است که آب و محلول سدیم هیدروکسید با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شدند، سپس وزن مشخصی از تکه‌های سدیم هیدروکسید ۳/۵ مولار به وزن ۷۰ گرم با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب داخل یک ظرف شیشه‌یی به آرامی حل شد تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواختی حاصل شود. همچنین برای این‌که محلول مذکور به دمای محیط برسد و یکنواخت‌تر شود، پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده شده است.

سپس مقدار آب لازم جهت رسیدن خاک به رطوبت بهینه، به عنوان آب اضافی تعیین و به ترکیب همگن خاک و پسماندهای صنعتی افزوده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل یکسان بودن نرخ جذب آب دانه‌های خاکی و مواد پسماند با خاک، همه‌ی نمونه‌ها با انرژی تراکم یکسان و رطوبت بهینه‌ی به دست آمده از آزمایش تراکم ساخته شدند. در ابتدا، آب اضافی، محلول سدیم هیدروکسید و چسب سیلیکات درون لیوان همزن ریخته و مخلوط مذکور به مدت ۲ دقیقه با دور کند و ۶ دقیقه ترکیب شدند تا محلول همگنی به دست آید.

سپس چسب و سود به مقدار رطوبت بهینه‌ی به دست آمده از آزمایش تراکم به ترکیب اضافه شد و در هنگام اختلاط مصالح دقت شد تا توده‌یی در خاک ایجاد نشود و مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. مخلوط حاصل در قالب استوانه‌یی (قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) در سه لایه ریخته و هر لایه در زیر جک UCS با فشار ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متراکم شده و ۳۰ ثانیه صبر کرده و لایه‌ی بعد پس از شیار زدن با تیغ درون قالب ریخته شده است. سپس با استفاده از جک، نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند و به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری، ابتدا هر نمونه درون سلفون کاملاً محصور و سپس با فویل آلومینیومی پوشانده شده است.

۲.۲.۲. نتایج آزمایش تک‌محوری

- تأثیر استفاده از پودر پوست تخم مرغ در روش ژئوپلیمر در مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس

در شکل ۱ (الف الی د)، خاک‌های تثبیت شده در روش ژئوپلیمر با پودر پوست تخم مرغ (نمونه‌ی SGE) در درصدهای: ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ و دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه مشاهده می‌شوند. علاوه بر آن، در شکل ۲، خاک طبیعی (گروه شاهد S)، خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بدون افزودنی (گروه شاهد GS) و خاک تثبیت شده با آهک (گروه شاهد SL_{۱۰}) جهت مقایسه با نمونه‌های ژئوپلیمری نشان داده شده‌اند.

استفاده از پودر پوست تخم مرغ (نمونه‌ی شاهد SGE) با درصدهای ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روزه به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری: ۱/۲۴ MPa، ۱/۲۱ MPa، ۱/۱۸ MPa و ۸۴۹ kPa را باعث شده است. دلیل افزایش مقاومت در گروه (SGE) در مقایسه با گروه شاهد (SC) وجود المان‌های موجود در پودر پوست تخم مرغ به ویژه کلسیم اکساید (CaO)

جدول ۳. مشخصات ترکیب‌های استفاده شده در آزمایش‌ها.

گروه شاهد	نوع مواد افزودنی	نام اختصاری	نسبت چسب به سود	مولاریته سود (M)	درصد چسب و سود	ω_{opt} (%)	$\gamma_d \max$ (gr/cm ³)	دوره‌ی عمل‌آوری (روز)
S	خاک طبیعی	S	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SG	خاک + چسب + سود	SG	۱-۲	۵/۳	۱۶	۱۶	۱/۹۷	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SGE	خاک + چسب + سود + پست تخم مرغ ۲/۵٪	SGE _{۲/۵}	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پست تخم مرغ ۵٪	SGE _۵	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پست تخم مرغ ۷/۵٪	SGE _{۷/۵}	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پست تخم مرغ ۱۰٪	SGE _{۱۰}	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + سیان ۶٪	SC _۶	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SC	خاک + سیان ۱۰٪	SC _{۱۰}	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SL	خاک + آهک ۱۰٪	SL _{۱۰}	-	-	-	۱۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷

۳.۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش برش مستقیم

نحوه‌ی ساختن نمونه در آزمایش برش مستقیم، همانند آزمایش تک‌محوری است. نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار خاک و نگهداری نمونه‌ها نیز مشابه بوده است. در آزمایش برش مستقیم، مکعب به طول و عرض و ارتفاع ۶ سانتی‌متر بوده و برای به دست آوردن حجم، ضخامت صفحات متخلخل از ارتفاع کم شده است. برای انجام آزمایش کنونی، ابتدا خاک مورد نظر از الک نمره ۴ عبور داده شد و وزن خشک خاک مورد نیاز براساس حجم جعبه‌ی برش و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک تعیین شده است.

پس از افزودن محلول قلیایی و چسب سیلیکات، که براساس درصد رطوبت بهینه محاسبه شده است، نمونه در سه لایه با ضخامت یکسان داخل جعبه‌ی برش تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر متراکم و در دستگاه برش گذاشته شده‌اند. برای نمونه‌های عمل‌آوری شده قبل از ساخت نمونه‌ها در قالب سطح داخلی قالب روغن‌کاری شده است. نمونه‌های ساخته شده از درون قالب خارج و درون سلفون و فویل قرار داده شدند تا مدت ۷ روز عمل‌آوری شوند. لازم به ذکر است که عمل‌آوری نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش مستقیم طبق شرایطی که برای نمونه‌های تک‌محوری توضیح داده شده است، عمل‌آوری شده است.

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری درون جعبه‌ی برش قرار گرفتند و روی دستگاه برش

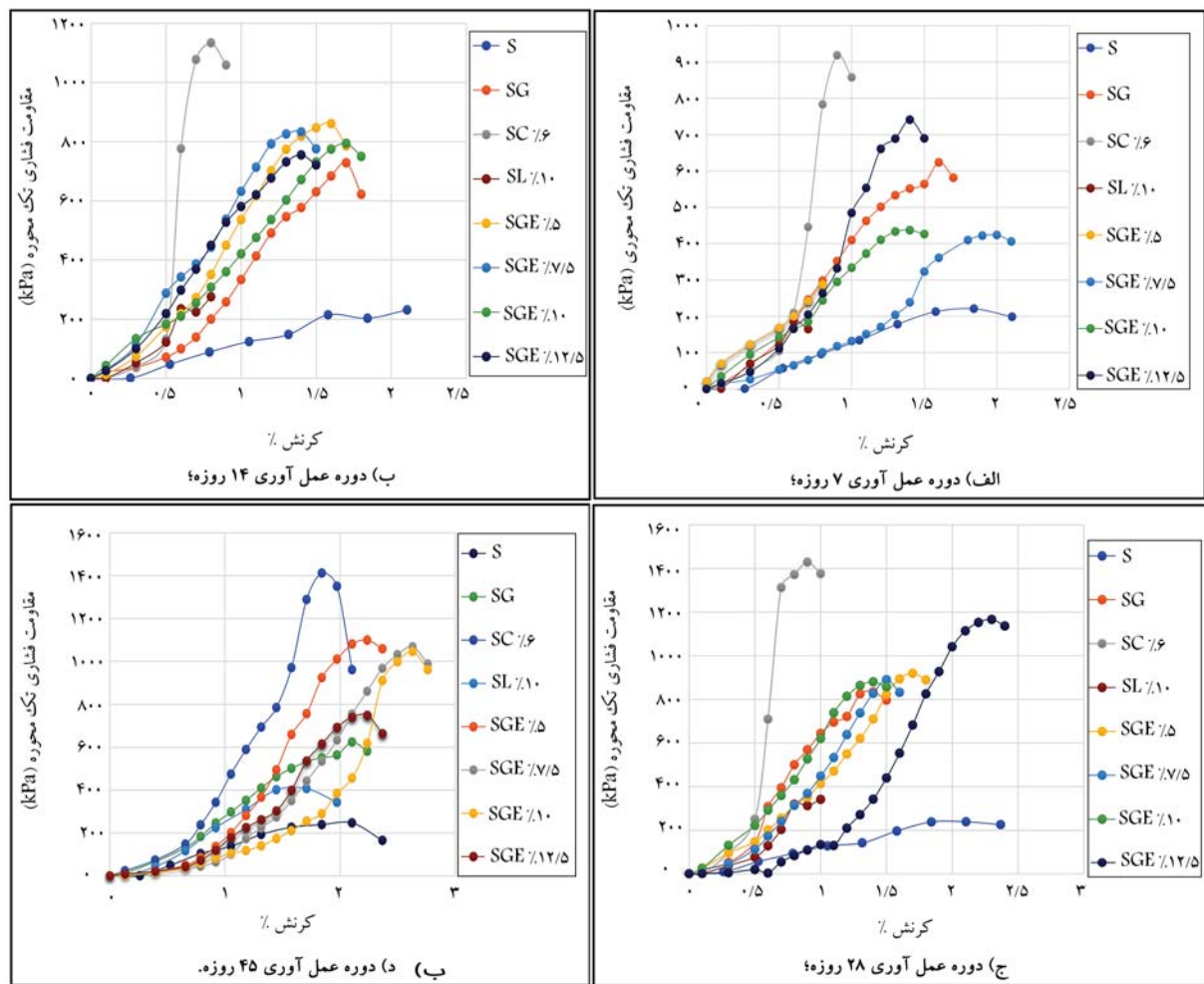
است. نتایج اخیر نشان می‌دهد که استفاده از پودر پست تخم مرغ با میزان Cao بالا در روش ژئوپلیمر می‌تواند کارایی بالا در افزایش مقاومت نمونه‌های خاکی تثبیت شده به روش ژئوپلیمر داشته باشند.

• بررسی زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده

در شکل ۲، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر به وسیله‌ی پودر پست تخم مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف مشاهده می‌شود.

به منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری در بیشینه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده، نمودارهای بیشینه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب زمان عمل‌آوری ترسیم شده است. در تمامی نمودارهای اخیر ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰٪ آهک (SL_{10}) حتی پس از گذشت ۴۵ روز عمل‌آوری، با مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت نشده تفاوت چندانی ندارد. همچنین افزودن ۶ و ۱۰ درصد سیان به خاک طبیعی (SC_{10} و SC_6)، موجب مقاومت فشاری بیشینه‌ی تک‌محوری در بین نمونه‌های شاهد شده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ی ۵٪ پست تخم مرغ (SGE_5) نسبت به وزن خشک خاک به میزان مقاومت فشاری ۲/۱۱۶ Mpa در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روز است.



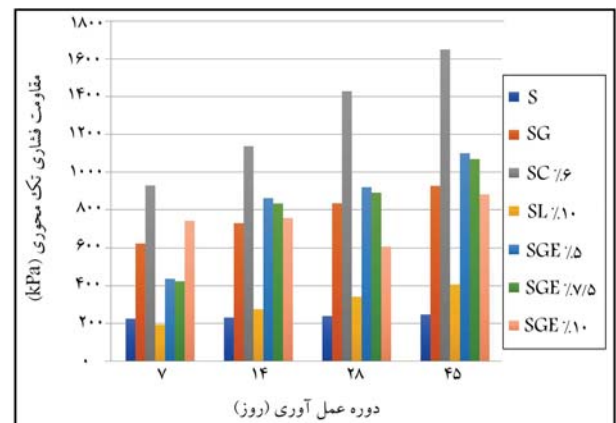
شکل ۱. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر با استفاده از پوست تخم‌مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف.

و پس از اعمال سربار، اقدام به اعمال نیرو و قرائت نیروسنج و کرنش‌سنج شده است. مشخصات مصالح استفاده شده جهت ساخت نمونه‌ها برای انجام آزمایش برش مستقیم در جدول ۴ ارائه شده است، که مطابق آن، دوره‌های عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده با پسماند پوست تخم‌مرغ (SGE) به روش ژئوپلیمر ۱ و ۷ روز بوده است. لازم به ذکر است که تعداد کم قالب‌ها و ترکیب‌های مختلف مصالح مستلزم زمان زیادی برای ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش برش مستقیم بوده است. لذا نمونه‌های ساخته شده در دوره‌های عمل‌آوری ذکر شده، آماده شده‌اند.

• نتایج آزمایش برش مستقیم

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) خاک طبیعی استفاده شده در پژوهش حاضر به ترتیب ۳۳ kPa و ۱۸° بوده است. استفاده از چسب و سود به عنوان فعال‌ساز قلیایی در تثبیت خاک (نمونه‌ی شاهد SG)، سبب افزایش C و ϕ خاک به ترتیب به میزان ۳۵ kPa و ۱۹° شده است.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که استفاده از پسماند پوست تخم‌مرغ ۷/۵٪ ($SGE_{7/5}$) در روش ژئوپلیمر در خاک تثبیت شده سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی شده است. لازم به ذکر است که از درصد‌های بهینه‌ی هر یک



شکل ۲. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با پوست تخم‌مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف.

مستقیم گذاشته شدند. قرائت‌ها تا جایی که مقدار بار برشی به بیشینه‌ی مقدار خودش برسد، ادامه یافته است.

پس از ساخت نمونه‌های آزمایش برش مستقیم و سپری شدن مدت زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها درون قالب برش قرار گرفتند و سپس درون دستگاه گذاشته شدند

جدول ۴. مشخصات مصالح برای انجام آزمایش برش مستقیم.

نام نمونه	نام اختصار	ω_{opt} (%)	$\gamma_d \max$ (gr/cm ^۳)	دوره‌ی عمل‌آوری (روز)
خاک طبیعی	S	۱۶	۱/۹۱	۱-۷
خاک + چسب + سود	SG	۱۶	۱/۹۷	۱-۷
خاک + چسب + سود + پوست تخم مرغ ۵٪	SGE _۵	۱۸	۱/۹۸	۱-۷

جدول ۵. میزان پارامترهای آزمایش برش مستقیم.

نام نمونه	نام اختصار	دوره‌ی عمل‌آوری (۱ روز)		دوره‌ی عمل‌آوری (۷ روز)	
		(C)	(φ)	(C)	(φ)
		(kg/cm ^۲)	(°)	(kg/cm ^۲)	(°)
خاک طبیعی	S	۰/۳۳	۱۸	۰/۳۳	۱۸
خاک + چسب + سود	SG	۰/۳۵	۱۹	۰/۳۵	۳۰
خاک + چسب + سود + پوست تخم مرغ ۵٪	SGE _۵	۰/۶	۳۸	۰/۶۳	۳۳

از مواد پسماند به عنوان ماده‌ی اولیه در روش ژئوپلیمر سبب افزایش یکپارچگی و کاهش حفره‌ها در نمونه‌های تثبیت شده، شده است. همچنین استفاده از ماده‌ی پسماند (پودر پوست تخم مرغ) در تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر سبب تشکیل باندهای مستحکم در بین ذرات خاک و افزایش مقاومت در توده‌های خاک در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز شده است.

در این راستا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از مواد پسماند با داشتن المان‌های متفاوت در ساختار خود می‌تواند سبب یکپارچگی خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر شوند. لذا طیف وسیعی از این مواد پسماند می‌توانند جهت تثبیت خاک بستر به روش ژئوپلیمر شوند.

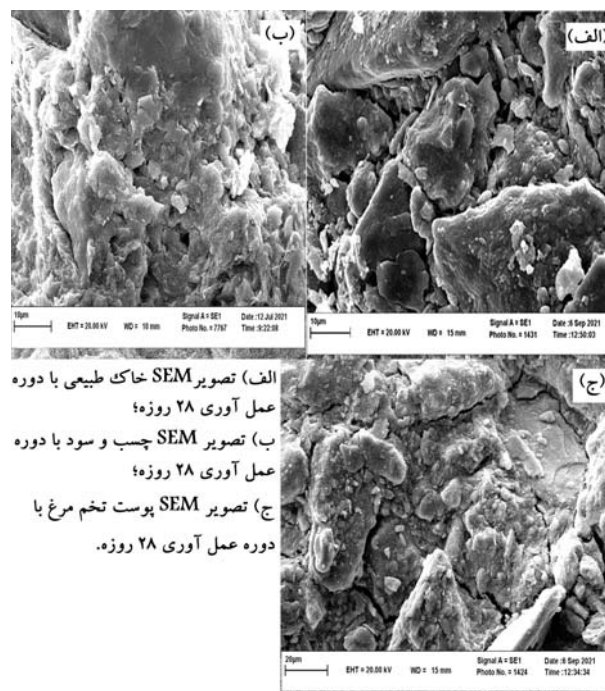
۳. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده به این شرح هستند:

در پژوهش حاضر، تمامی آزمایش‌های صورت گرفته و نتایج بررسی اثر ژئوپلیمر در خاک رس ارائه شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در ۷ حالت مختلف تثبیت ذکر شده و در ۴ دوره‌ی عمل‌آوری: ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه با ۳ تکرار در هر حالت، برای افزایش دقت نتایج انجام شده است.

- براساس نتایج به دست آمده، استفاده از ماده‌ی پسماند سبب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، شامل زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی در دوره‌های عمل‌آوری مختلف شده است.

- بررسی نتایج شیمیایی نشان می‌دهد که استفاده از پسماند در روش ژئوپلیمر در خاک تثبیت شده سبب افزایش یکپارچگی شده است. براساس نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، استفاده از ماده‌ی پسماند با داشتن المان‌های مختلف در ساختار خود می‌تواند در حجم وسیع به عنوان مواد اولیه در روش ژئوپلیمر به منظور تثبیت خاک بستر استفاده شود.



شکل ۳. بررسی میکروساختاری آنالیز SEM.

از مواد به دست آمده از آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه‌های ژئوپلیمری جهت ساخت و انجام آزمایش برش مستقیم استفاده شده است.

۴.۲.۲. تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی‌های میکروساختاری آنالیز SEM نیز انجام شده است. در شکل ۳ (الف) الی ج، نمونه‌های انتخاب شده برای آنالیز نمونه‌های تثبیت شده با پوست تخم مرغ SGE_۵ با دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، استفاده

1. Bondar
2. Demirel
3. Vijayakumar
4. Shekhawat & Aggarwal

منابع (References)

1. Petry, T.M. and Little, D.N. "Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14**(6), pp. 447-460 (2002).
2. Ebnjalal, R. and Bajestan, S.B. "Theoretical and practical principles of soil mechanics", *Shahid Chamran University Press*, 4th Ed., Ahvaz, p. 816 (In Persian) (1382/2004).
3. Petry, T.M. and Armstrong, J.C. "Stabilization of expansive clay soils", *Transportation Research Record*, **1219**, pp. 103-111 (1989).
4. Farzaneh O. and Mosaddegh A. "Experimental analysis to evaluate the effectiveness of lime and three new developed materials on subgrade soil stabilization of Kerman-Zangiabad road", *MS thesis*, University of Tehran, **1**(45), pp. 23-33 (In Persian) (1389/2011).
5. Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. "Soil stabilization principles and practice", *Butterworth and Company Publishers Limited*, p. 374 (1972).
6. Eades, J.L. and Grim, R.E "Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization", *Highway Research Board Bulletin*, **262** (1960).
7. Moon, D.H., Grubb, D.G. and Reilly, T.L. "Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust", *Journal of Hazardous Materials*, **168**(2-3), pp. 944-951 (2009).
8. Edil, T.B., Benson, C.,H. and Senol, A. "Field evaluation of construction alternatives for roadways over soft subgrade", *Transportation Research Record*, **1786**(1), pp. 36-48 (2002).
9. Bondar, D., Lynsdale, C.J. and Milestone, N.B. "Alkali-activated natural pozzolan concrete as new construction material", *ACI Materials Journal*, **110**(3), pp. 331-337 (2013).
10. Amu, O., Fajobi, A. and Oke, B. "Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil", *Research journal of Agriculture and Biological Sciences*, **1**(1), pp. 80-84 (2005).
11. Demirel, B. "The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete", *International Journal of Physical Sciences*, **5**(9), pp. 1372-1380 (2010).
12. Schmitz, A., Kamiński, J., Scalet, B.M. and et al. "Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry", *Energy Policy*, **39**(1), pp. 142-155 (2011).
13. Vijayakumar, G., Vishaliny, H. and Govindarajulu, D. "Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **3**(2), pp. 153-157 (2013).
14. Shekhawat, B.S. and Aggarwal, D.V. "Utilisation of waste glass powder in concrete—A literature review", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **3**(7), pp. 14822-14826 (2014).
15. ASTM, D. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", D4318-10 (2010).
16. Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A. "Deep soft soil improvement by alkaline activation", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **164**(2), pp. 73-82 (2011).
17. Pourakbar, S., Asadi, F. and Huat, B.B. "Soil stabilization with alkali-activated agro-waste", *Environmental Geotechnics*, **2**(6), pp. 359-370 (2015).

تصفیه‌ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد

مسعود خجسته (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد دلنواز* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

حسن مهدیان (استاد)

مؤسسه‌ی تحقیقاتی پلاسما، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۶۸-۵۹)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۶۸-۵۹ (پژوهشی)

هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارزیابی درصد حذف رنگ تارترازین از محلول آبی با استفاده از فناوری پلاسمای سرد است. بدین منظور، پارامترهای اصلی فرایند حذف رنگ با استفاده از پلاسمای سرد شامل غلظت رنگ (۲۰-۴ میلی‌گرم در لیتر)، pH محلول (۹/۴ - ۲/۲)، ولتاژ منبع تغذیه (۷۰-۱۱۰ ولت)، زمان تصفیه (۳۰-۱۰ دقیقه) و فاصله‌ی الکترود تا سطح محلول رنگی به طور ثابت ۸ میلی‌متر بررسی شده‌اند. آزمایش‌ها در حجم ۱۵ میلی‌لیتر با استفاده از منبع تغذیه‌ی الکتریکی جریان متناوب (AC) برای تولید پلاسمای سرد انجام شده است. بررسی حذف رنگ نشان داد که حالت بهینه‌ی آزمایش‌ها در غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، ولتاژ ۸۶ ولت، $pH = 4/1$ و زمان تابش پلاسما در ۱۸/۷ دقیقه با درصد حذف رنگ ۹۹/۷۸٪ رخ داده است که در این حالت بازده انرژی ۱۰۸/۳ میلی‌گرم در کیلووات ساعت بوده است. نتایج مستخرج شده از مدل‌سازی حاکی از تأثیر مستقیم زمان ماند و ولتاژ اولیه و تأثیر معکوس pH و غلظت اولیه‌ی رنگ صنعتی در راندمان حذف بوده است.

واژگان کلیدی: پلاسمای سرد، بهینه‌سازی، تارترازین، درصد حذف رنگ، بازدهی انرژی.

masoudkhojaste1374@gmail.com
delnavaz@khu.ac.ir
mahdian@khu.ac.ir

۱. مقدمه

آلودگی آب، مهم‌ترین مسئله‌ی زیست‌محیطی پیش روی جوامع انسانی در سطح جهان است که ناشی از توسعه‌ی سریع فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت است.^[۱] فاضلاب حاوی رنگ‌ها از آلوده‌کننده‌های مهم محیط‌زیست هستند که در سلامت انسان نیز تأثیر می‌گذارد، زیرا صنایع نساجی مقادیر زیادی فاضلاب رنگی حاوی طیف متنوعی از آلاینده‌های پایدار تولید می‌کنند.^[۲] یکی از شناخته‌شده‌ترین، پرمصرف‌ترین و متداول‌ترین ترکیب‌های رنگی در صنایع غذایی، دارویی و نساجی از زیرمجموعه‌ی آزو^۱، رنگ تارترازین است. همچنین از مضرترین موادی که می‌تواند خطر سُمی بودن در صنایع مذکور را به همراه داشته باشد، همین رنگ تارترازین است.^[۳] به همین دلیل سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA)^۲ و سازمان ایمنی غذای اروپا (EFSA)^۳، مجوزهای استفاده از ترکیب‌های مذکور را برای ارائه‌ی محصولات غذایی ایمن برای مصرف‌کنندگان و جلوگیری از آثار نامطلوب کوتاه‌مدت و بلندمدت تنظیم کردند.^[۴] رنگ‌های آزو ترکیب‌های معطر پیچیده‌ی هستند که با یک یا چند گروه $(R1 - N = N - R2)$ مشخص می‌شوند. بسیاری از رنگ‌های آزو به سبب پیچیدگی ساختار، زیست‌تجزیه‌پذیری نسبتاً کمی دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که فاضلاب‌های رنگی علاوه بر داشتن آثار سُمی، احتمال بروز آلرژی، عفونت‌های چشمی و پوستی، درمانیت و سرطان را افزایش می‌دهند.^[۱] ضمناً می‌توانند آثار منفی و مخربی مانند تشکیل تری‌هالومتان‌ها، تداخل در جذب و انعکاس تابش نور خورشید از طریق کاهش شفافیت آب و ایجاد مشکل در حیات آبریان و فتوسنتز گیاهان داشته باشند.^[۴] روش‌های اصلی مورد استفاده برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی رنگی، شامل: تصفیه‌ی بیولوژیکی^[۵]، فیلتراسیون^[۶]، اولترافیلتراسیون^[۷]، جداسازی غشایی^[۸]، جذب سطحی^[۹]، شناورسازی^[۱۰]، انعقاد^[۱۱]، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^[۱۲] و الکترولیز^[۱۳] هستند. به سبب پایداری بالای مولکول‌های آلاینده‌های رنگی، فرایندهای فیزیکوشیمیایی کارایی نسبتاً پایینی دارند.^[۱۵] فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)^۴ به عنوان جایگزینی مناسب برای فرایندهای متداول حذف مواد رنگی پیشنهاد می‌شوند. اساس فرایند AOP بر پایه‌ی اکسیداسیون مواد آلی توسط

آلودگی آب، مهم‌ترین مسئله‌ی زیست‌محیطی پیش روی جوامع انسانی در سطح جهان است که ناشی از توسعه‌ی سریع فعالیت‌های صنعتی و افزایش جمعیت است.^[۱] فاضلاب حاوی رنگ‌ها از آلوده‌کننده‌های مهم محیط‌زیست هستند که در سلامت انسان نیز تأثیر می‌گذارد، زیرا صنایع نساجی مقادیر زیادی فاضلاب رنگی حاوی طیف متنوعی از آلاینده‌های پایدار تولید می‌کنند.^[۲] یکی از شناخته‌شده‌ترین، پرمصرف‌ترین و متداول‌ترین ترکیب‌های رنگی در صنایع غذایی، دارویی و نساجی از زیرمجموعه‌ی آزو^۱، رنگ تارترازین است. همچنین از مضرترین موادی که می‌تواند خطر سُمی بودن در صنایع مذکور را به همراه داشته باشد، همین رنگ تارترازین است.^[۳] به همین دلیل سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA)^۲ و سازمان ایمنی غذای اروپا (EFSA)^۳، مجوزهای استفاده از ترکیب‌های مذکور را برای ارائه‌ی محصولات غذایی ایمن برای مصرف‌کنندگان و جلوگیری از آثار نامطلوب کوتاه‌مدت و بلندمدت تنظیم کردند.^[۴] رنگ‌های آزو ترکیب‌های معطر پیچیده‌ی هستند که با یک یا چند گروه $(R1 - N = N - R2)$ مشخص می‌شوند. بسیاری از رنگ‌های آزو به سبب پیچیدگی ساختار، زیست‌تجزیه‌پذیری نسبتاً کمی دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که فاضلاب‌های رنگی علاوه بر داشتن آثار سُمی، احتمال بروز آلرژی، عفونت‌های چشمی و پوستی، درمانیت و سرطان را افزایش می‌دهند.^[۱] ضمناً می‌توانند آثار منفی و مخربی مانند تشکیل تری‌هالومتان‌ها، تداخل در جذب و انعکاس تابش نور خورشید از طریق کاهش شفافیت آب و ایجاد مشکل در حیات آبریان و فتوسنتز گیاهان داشته باشند.^[۴] روش‌های اصلی مورد استفاده برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی رنگی، شامل: تصفیه‌ی بیولوژیکی^[۵]، فیلتراسیون^[۶]، اولترافیلتراسیون^[۷]، جداسازی غشایی^[۸]، جذب سطحی^[۹]، شناورسازی^[۱۰]، انعقاد^[۱۱]، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^[۱۲] و الکترولیز^[۱۳] هستند. به سبب پایداری بالای مولکول‌های آلاینده‌های رنگی، فرایندهای فیزیکوشیمیایی کارایی نسبتاً پایینی دارند.^[۱۵] فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)^۴ به عنوان جایگزینی مناسب برای فرایندهای متداول حذف مواد رنگی پیشنهاد می‌شوند. اساس فرایند AOP بر پایه‌ی اکسیداسیون مواد آلی توسط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۲۷.

DOI:10.24200/J30.2022.61048.3141

استناد به این مقاله:

خجسته، مسعود، دلنواز، محمد و مهدیان، حسن، ۱۴۰۲. تصفیه‌ی فاضلاب رنگی حاوی تارترازین با استفاده از فناوری پلاسمای سرد. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۶۸-۵۹.

تولید طیف گسترده‌ای از انواع رادیکال‌های آزاد مانند هیدروکسیل است که باعث تخریب آلایندگی اولیه به ترکیب‌هایی کوچک‌تر و در نهایت، تبدیل آن به آب و دی‌اکسیدکربن می‌شود و ممکن است منجر به معدنی‌سازی کامل شوند.^[۱۵]

طیف وسیعی از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه شده است. به عنوان مثال، سیستم لامپ UV و پراکسید هیدروژن برای حذف ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر محلول رنگی ری‌اکتیو آبی توسط آیتی و همکاران (۲۰۱۳)، استفاده شده و نتایج آن‌ها حاکی از حذف کامل آلایندگی در مدت زمان ۲۵ دقیقه و در pH قلیایی بوده است.^[۱۶] یکی از انواع فرایندهای AOP که در سال‌های اخیر به طور مناسبی برای تصفیه فاضلاب‌های خطرناک استفاده شده است، فرایند پلاسماي اتمسفر سرد (CAP)^۵ است که از دو طریق می‌تواند رادیکال‌های مؤثر در فرایند تخریب ماده‌ی آلی را تولید کند.^[۱۴] به دلیل تولید انرژی بالا، پلاسما به خودی خود قادر به تولید انواع رادیکال است. علاوه بر این، در سطح تماس پلاسما با آب، یون‌های فعال و رادیکال‌هایی از جمله OH، الکترون‌های پر انرژی و فوتون‌های فرابنفش تولید می‌شوند که همگی می‌توانند به تخریب و اکسیداسیون مولکول‌های آلی و مواد خطرناک موجود در آب کمک کنند. همچنین روش اخیر (CAP)، به عنوان یک روش اصلاحی مطلوب به دلیل نیاز به انرژی کم یک فرایند سازگار با محیط‌زیست است.^[۱۵،۱۳]

گارسیا^۶ و همکاران (۲۰۱۷)، برای حذف رنگ متیلن بلو در محلول آبی با استفاده از جت پلاسماي سرد در فشار اتمسفر مطالعه‌ی انجام داده‌اند که منجر به حذف رنگ متیلن آبی شده است. ایشان از گاز آرگون به عنوان گاز مصرفی استفاده کردند و دریافتند که با افزایش سرعت جریان ورودی گاز آرگون، سرعت تخریب رنگ افزایش می‌یابد.^[۱۷] عبدالفتاح^۷ (۲۰۱۹)، جت پلاسما در فشار اتمسفر با ورودی گاز هلیوم را برای تخریب رنگ متیلن بلو ارزیابی کرده و دریافتند که با افزایش نرخ جریان گاز هلیوم از ۲/۵ به ۱۰ لیتر در دقیقه، سرعت حذف رنگ با شدت بیشتری انجام می‌شود، به طوری که پس از ۴۰ دقیقه تصفیه با جت پلاسما، محلول آبی کاملاً رنگ‌زدایی می‌شود. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که رابطه‌ی مستقیم بین درصد حذف رنگ و طول پلاسماي تشکیل شده وجود دارد (منظور از طول پلاسما در پژوهش مذکور، فاصله‌ی بین غلاف کوآرتز تا سطح محلول رنگی است).^[۱۸] رحیم‌پور و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش راکتور پلاسماي تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک (DBD)^۸ با گاز مصرفی O_۲ اقدام به حذف رنگ کریستال بنفش با مشخصات غلظت اولیه ۱۰ μM و pH = ۵/۵ کردند. در توان ثابت با افزایش دبی گاز O_۲، میزان درصد حذف رنگ افزایش یافت، به طوری که افزایش دبی گاز از ۵۰۰ به ۷۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه منجر به حذف رنگ از ۹۸/۲ به ۱۰۰ درصد شد، در حالی که با افزایش نرخ جریان گاز از ۹۰ به ۳۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه، درصد حذف رنگ از ۴۰/۱ به ۹۱/۴ ارتقاء پیدا کرد.^[۱۹]

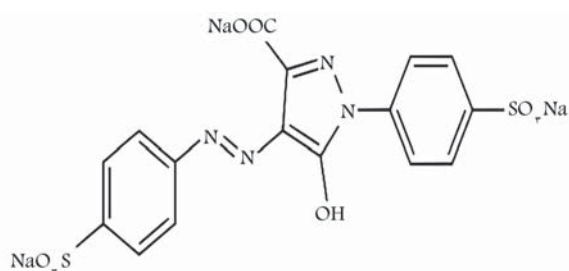
مجید^۹ و همکاران (۲۰۲۲)، فرایند تخریب رنگ آبی با مشخصات جذب در ۶۲۴ نانومتر، غلظت ۶/۳ میلی‌گرم و pH = ۷/۳ را با تخلیه‌ی پلاسما و در حضور فتوکاتالیست پلی‌وینیلیدین فلوراید/MWCNs/TiO_۲ بررسی کردند و دریافتند که حذف رنگ آبی با تابش فقط پلاسما در زمان تصفیه‌ی ۲۰ و ۶۰ دقیقه به مقدار ۴۲ و ۹۴ درصد بوده است. در حالی که راندمان درصد حذف رنگ در همان جذب ۶۲۴ نانومتر، برای نمونه‌های تصفیه شده با پلاسما در شرایط مشابه و در حضور پلی‌وینیلیدین فلوراید/MWCNs/TiO_۲ پس از ۲۰ و ۶۰ دقیقه تصفیه، ۸۹ و ۹۰ درصد بوده است.^[۱۳] واسی‌کاران^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲)، عملکرد راکتور پلاسماي سرد به کمک هوای اتمسفر برای تجزیه‌ی اکسیداتیو رنگ‌های نساجی آزو (اورنژ

G و کنگو قرمز) و غیرآزو (کریستال بنفش و کوماسی آبی روشن) را بررسی کردند و در غلظت ۵ ppm و زمان تصفیه‌ی ۳۰ دقیقه به راندمان حذف ۹۹ درصدی برای تمامی رنگ‌ها دست یافتند. راندمان درصد حذف رنگ با ولتاژ اعمال شده، رابطه‌ی مستقیم و با غلظت اولیه‌ی رنگ، رابطه‌ی معکوس داشت و در pHهای خنثی، راندمان حذف بیشتری نسبت به محدوده‌ی اسیدی و بازی از خود نشان داد. در مطالعه‌ی مذکور، با افزایش زمان تابش، غلظت گونه‌های OH، H_۲O_۲ و O_۲ به طور خطی افزایش یافته است.^[۲۰]

به منظور یافتن محدوده‌ی پارامترهای مؤثر اقداماتی از قبیل مطالعه‌ی نوشتارهای مشابه و انجام پیش‌آزمایش‌ها صورت گرفت تا به درستی در نرم‌افزار RSM وارد شوند. همچنین به علت عدم استفاده از گازهای مختلف، مانند: آرگون، نیتروژن و اکسیژن، فاصله‌ی الکترودها برای ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی بسیار اهمیت داشت؛ به همین دلیل، برای جلوگیری از ایجاد خطا، فاصله‌ی الکترودها در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی استفاده از پلاسماي سرد برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های رنگی و صنعتی بسیار محدود بوده است و با توجه به عدم استفاده از ماده‌ی فتوکاتالیست، استفاده از فناوری ذکر شده می‌تواند زمینه‌ی مهمی برای صنعتی‌سازی آن باشد. از این رو با توجه به اهمیت و گسترش کاربرد پلاسماي سرد در فرایندهای تصفیه‌ی فاضلاب صنعتی، امکان‌سنجی استفاده از فرایند مذکور در حذف آلایندگی رنگی تارترازین از محیط آبی و به دست آوردن شرایط بهینه جهت حصول بیشینه‌ی راندمان حذف در پژوهش حاضر بررسی شده است. از نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از پلاسماي سرد و بررسی اندرکنش اجزاء مختلف واکنش با استفاده از مدل RSM در حذف آلایندگی رنگی اشاره کرد.

۲. مواد و روش‌ها

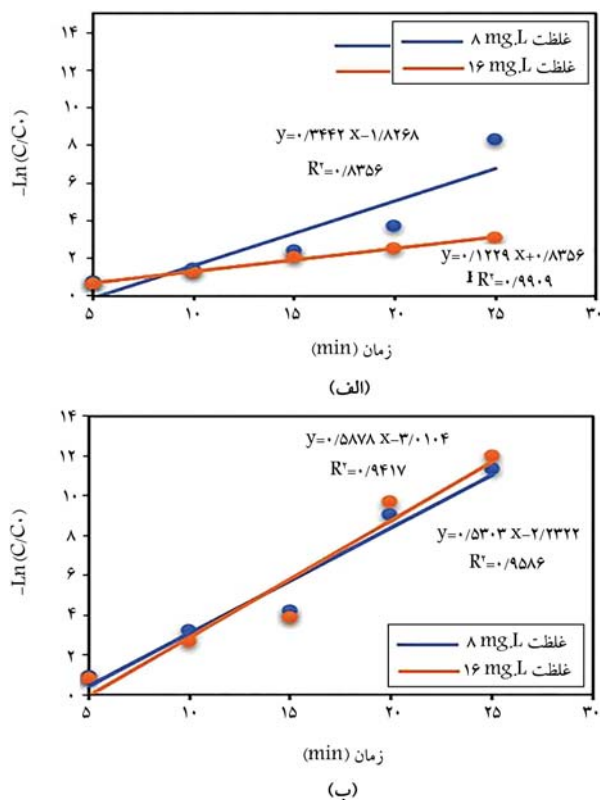
در پژوهش حاضر، از رنگ تارترازین با ساختار شیمیایی مطابق شکل ۱ و خصوصیات شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده شده است. به منظور تولید پلاسما، دو الکترود به منبع تغذیه‌ی جریان متناوب (AC) متصل شد. یک سیم مفتولی با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۲۵۰ میلی‌متر به عنوان الکترود اول (الکترود ولتاژ بالا) در داخل غلاف عایقی از جنس کوآرتز با طول ۲۳۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۴/۲ میلی‌متر



شکل ۱. ساختار شیمیایی رنگ تارترازین.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی رنگ تارترازین.

Tartrazine, FD&C yellow	نام تجاری
C _{1۶} H _۹ N _۴ Na _۳ O _۹ S _۲	فرمول شیمیایی
۵۳۴/۴ gr/mol	وزن مولکولی
۴۲۵ nm	طول موج بیشینه



شکل ۳. الف) تعیین بیشینه‌ی طول موج جذب، ب) منحنی کالیبراسیون.

تابش پلاسما مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. همچنین براساس معادله‌ی ۴، به محاسبه‌ی نیمه‌ی عمر واکنش پرداخته شده است.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (3)$$

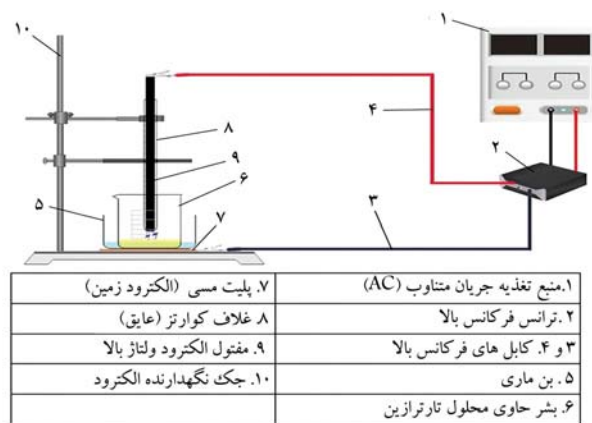
$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{t}{\log_{\frac{1}{2}} \left(\frac{C_t}{C_0} \right)} \rightarrow t_{\frac{1}{2}} = -\frac{\ln \left(\frac{1}{2} \right)}{K} \quad (4)$$

که در آن، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ، C_t غلظت رنگ پس از گذشت زمان t ، k سرعت ثابت واکنش ($1/\text{min}$) و $t_{\frac{1}{2}}$ مدت زمانی است که طول می‌کشد تا غلظت آلاینده (رنگ تارترازین) به نصف غلظت اولیه‌ی خود برسد (نیمه‌ی عمر). [۲۲، ۲۱] برای تجزیه و تحلیل داده‌های آماری از نرم افزار Design Expert (نسخه‌ی ۱۳) و روش سطح پاسخ (RSM) [۱۱] که روشی کارآمد برای بهینه‌سازی متغیرهای مستقل و پاسخ‌های آن‌ها به طور تجمعی است و در فرایندهای مختلف برای دست‌یابی به بالاترین راندمان بکار برده، استفاده شده است. RSM تعداد آزمایش‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و توانایی مطالعه‌ی تعداد زیادی از پارامترها و همچنین تعامل بین آن‌ها را دارد. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) نتایج آماری و آزمون بررسی تشخیصی را ارائه می‌دهد که پژوهشگران از آن برای ارزیابی کفایت مدل‌ها استفاده می‌کنند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی تأثیر متغیرهای فرایند در راندمان حذف

مطابق با جدول ۲، براساس انجام پیش‌آزمایش‌ها و تعریف محدوده برای هر متغیر،



شکل ۲. راکتور و تجهیزات استفاده شده.

و قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر قرار گرفت و صفحه‌ی تخت مسی با ابعاد 15×15 سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به عنوان الکتروود دوم (الکتروود اتصال به زمین) انتخاب شده است. حجم محلول در هر آزمایش ۱۵ میلی‌لیتر بوده است. الکتروود اول از طریق پایه‌ی نگهدارنده در مرکز محلول و در فاصله‌ی ۸ میلی‌متری از محلول، در حالی که ظرف محلول بر روی الکتروود دوم متصل بود، تنظیم و ثابت شده است. در طول آزمایش به دلیل افزایش دمای محلول و به منظور جلوگیری از تبخیر، از دستگاه بن ماری جهت تنظیم دمای محلول استفاده شده است (شکل ۲). قبل از انجام هر آزمایش، برای تعیین و تنظیم pH محلول از دستگاه pH متر دیجیتالی مدل HQ4۰d (HACH) استفاده شده است.

برای تعیین غلظت نهایی محلول رنگی، ابتدا طول موج بیشینه تعیین شده است. بدین منظور، غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر محلول رنگ تارترازین تهیه و طیف جذب آن در محدوده‌ی ۳۴۰ تا ۷۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR۳۹۰۰ ساخت شرکت HACH رسم شده است. با توجه به طیف به دست آمده در شکل ۳ الف، طول موج بیشینه‌ی جذب محلول رنگ ۴۲۵ نانومتر تعیین شده است. سپس به منظور رسم منحنی کالیبراسیون مطابق شکل ۳ ب، غلظت‌های مختلف محلول رنگی به میزان ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه و میزان جذب نور در طول موج بیشینه‌ی ۴۲۵ نانومتر اندازه‌گیری شده است.

منحنی کالیبراسیون براساس قانون بیرلامبرت و رابطه‌ی خطی جذب و غلظت رسم شده است. در طی مراحل پژوهش برای تعیین درصد حذف رنگ از رابطه‌ی ۱ استفاده شده است:

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ (mg/L) و C_t غلظت رنگ در فاضلاب تصفیه شده در زمان t (mg/L) هستند. در فرایند پلاسما به دلیل حضور منبع تغذیه، میزان انرژی مصرفی اهمیت خاصی دارد. میزان انرژی مصرفی مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود: [۱۹]

$$EE = \frac{C_0 \times V \times \frac{1}{V_0} \times R}{P \times t} \quad (2)$$

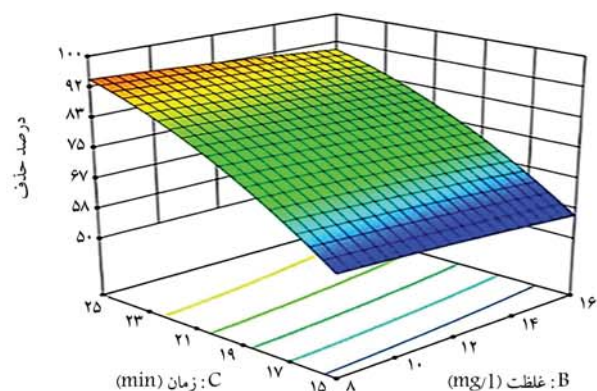
که در آن، EE بازده انرژی بر حسب گرم در کیلووات ساعت، C_0 غلظت اولیه‌ی رنگ بر حسب گرم در لیتر، V حجم محلول بر حسب لیتر، R حذف رنگ بر حسب درصد، P توان بر حسب کیلووات و t زمان تصفیه بر حسب ساعت هستند. براساس مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول، تحلیل سینتیک برای تخریب رنگ تارترازین با

جدول ۲. آزمایش‌های طرح شده و راندمان حذف آلاینده در شرایط مختلف.

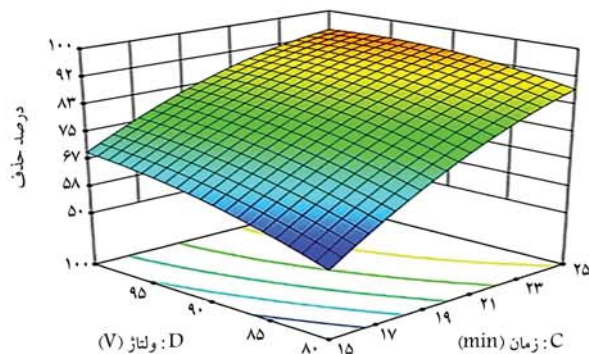
شماره	pH	غلظت رنگ	زمان ماند	ولتاژ	کارایی %
۱	۴	۸	۱۵	۸۰	۹۱/۲
۲	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۹/۴
۳	۷/۶	۸	۲۵	۸۰	۹۱/۵
۴	۷/۶	۱۶	۲۵	۱۰۰	۹۰
۵	۵/۸	۱۲	۱۰	۹۰	۶۴/۶
۶	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۷/۹
۷	۴	۱۶	۲۵	۸۰	۹۵/۵
۸	۷/۶	۸	۲۵	۱۰۰	۹۹/۴
۹	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۶
۱۰	۷/۶	۸	۱۵	۸۰	۵۶/۵
۱۱	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۹
۱۲	۲/۲	۱۲	۲۰	۹۰	۱۰۰
۱۳	۵/۸	۱۲	۲۰	۱۱۰	۹۹/۵
۱۴	۷/۶	۸	۱۵	۱۰۰	۷۳/۳
۱۵	۴	۱۶	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۶	۵/۸	۲۰	۲۰	۹۰	۹۳/۶
۱۷	۴	۱۶	۱۵	۸۰	۸۷/۷
۱۸	۵/۸	۴	۲۰	۹۰	۱۰۰
۱۹	۴	۸	۱۵	۱۰۰	۹۸/۵
۲۰	۵/۸	۱۲	۲۰	۷۰	۷۶/۶
۲۱	۴	۱۶	۱۵	۱۰۰	۹۸
۲۲	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۷/۸
۲۳	۹/۴	۱۲	۲۰	۹۰	۶۲/۲
۲۴	۴	۸	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۵/۸	۱۲	۳۰	۹۰	۱۰۰
۲۶	۷/۶	۱۶	۲۵	۸۰	۹۱
۲۷	۴	۸	۲۵	۸۰	۱۰۰
۲۸	۵/۸	۱۲	۲۰	۹۰	۹۸/۶

تعداد ۲۸ آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Design Expert و روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) تعیین و درصد حذف رنگ مشخص شده است. تأثیر هر متغیر به تنهایی و تأثیر همزمان دو متغیر در میزان حذف ماده‌ی آلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، غلظت اولیه‌ی رنگ در محدوده‌ی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت اولیه از ۴ به ۲۰، میزان حذف از ۱۰۰ به ۹۳/۶ کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان در افزایش نسبت رادیکال‌های OH به غلظت رنگ دانست. در مطالعه‌ی که لیو^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰)، برای تخریب رنگ اسید اورنژ ۷ توسط پلاسما‌ی غیرحرارتی انجام دادند، به این نکته پی بردند که بیشترین درصد حذف در کمترین غلظت، برابر با ۵ میلی‌گرم در لیتر (۹۷/۵٪) و کمترین درصد حذف در بیشترین غلظت، برابر با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر (۷۰/۸٪) رخ داده است.^[۲۳]

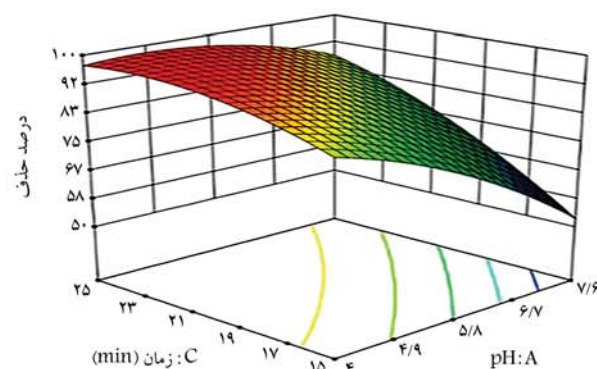
همچنین در حین انجام آزمایش‌ها به این نکته پی برده شد که با افزایش pH، میزان حذف تارتازین کاهش یافته است؛ که نشان می‌دهد محیط بازی اثر منفی در حذف تارتازین داشته است، در حالی که محیط اسیدی باعث افزایش حذف تارتازین می‌شود. نتایج نشان داد که در شرایط مشابه درصد حذف رنگ



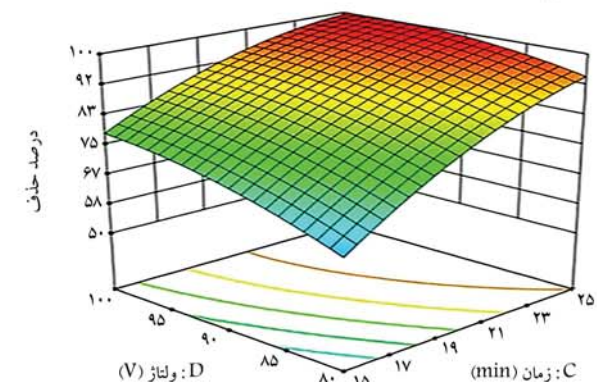
الف) تأثیر pH=۹/۴ و ولتاژ ۷۰ V در غلظت و زمان‌های مختلف؛



ب) تأثیر pH=۹/۴ و غلظت ۲۰ mg/l در ولتاژ و زمان‌های مختلف؛



ج) تأثیر غلظت ۲۰ mg/l و ولتاژ ۷۰ V در pH و زمان‌های مختلف؛



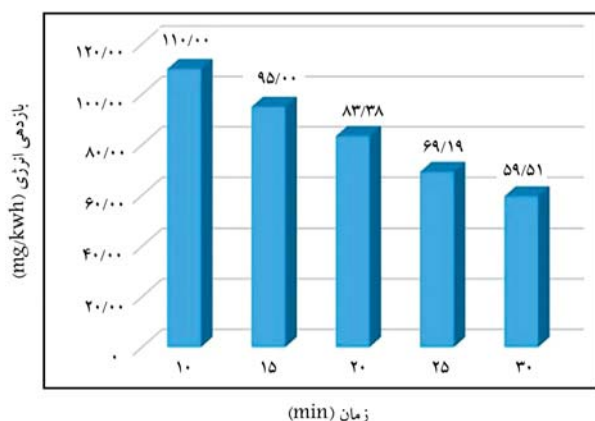
د) تأثیر غلظت ۲۰ mg/l و pH=۴/۶ در ولتاژ و زمان‌های مختلف.

شکل ۴. تأثیر تغییرات همزمان دو متغیر در رنگ‌زدایی فرایند.

سطح محلول رنگی است، و فاصله‌ی مذکور، یک مقدار بهینه دارد. بدین معنی که با افزایش یا کاهش بیش از حد فاصله‌ی الکترود، راندمان حذف رنگ کاهش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان در تغییر شدت میدان الکتریکی دانست. در پژوهش حاضر، فاصله‌ی الکترود ولتاژ بالا تا سطح محلول ۸ میلی‌متر و ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است جنس و ضخامت عایق استفاده شده (که در پژوهش حاضر، کوارتز با ضخامت ۱ میلی‌متر بوده است) در یافتن فاصله‌ی بهینه از عوامل مؤثر هستند. ذقیود^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۰) از مطالعه‌ی خود نتیجه گرفتند که فاصله‌ی بین الکترودها، یعنی شکاف تخلیه، نقش اساسی در راندمان تخریب ترکیب‌های مضر دارد، زیرا تغییر فاصله‌ی الکترود منجر به تغییر در شدت میدان الکتریکی می‌شود و همان‌طور که ایشان گزارش کرده‌اند، افزایش فاصله‌ی الکترودها، زمان لازم برای دست‌یابی به راندمان حذف معین آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد.^[۳۰] از سوی دیگر، سانو^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ی خود که در مورد تجزیه‌ی ترکیب‌های آلی در آب بوده است، گزارش کرده‌اند که شکاف کاتد - آنود، یک مقدار بهینه در یک ورودی ولتاژ معین برای دستیابی به بیشینه‌ی راندمان تخریب رنگ رودامین B دارد.^[۳۱] ژیانگ^{۲۲} و همکاران (۲۰۱۴)، از پژوهش خود نتیجه گرفتند که ولتاژ شروع تخلیه را می‌توان با کاهش فاصله‌ی الکترود برای دستیابی به همان میزان راندمان کاهش داد و اگر فاصله‌ی بین دو الکترود، بیش از حد زیاد شود، حجم ناحیه‌ی تولید پلاسما کاهش و در نتیجه راندمان کاهش می‌یابد. بنابراین طراحی فاصله بین دو الکترود باید به گونه‌ی باشد که توزیع یکنواخت پلاسما، یک منطقه‌ی الکتریکی بزرگ و مطابق با راکتور ایجاد کند.^[۳۲] بررسی اثر بازده انرژی در حذف رنگ مطابق رابطه‌ی ۲ و در حالت بهینه (غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، توان ۶/۲۸ وات، و $pH=4/1$) مطابق شکل ۵ انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ولتاژ تخلیه، راندمان حذف رنگ به تدریج افزایش و بازده انرژی کاهش، و با افزایش زمان تصفیه، بازدهی انرژی کاهش یافته است.

۲.۳. راستی‌آزمایی مدل و توصیف فرایند

راهبرد آزمایشی طراحی RSM با روش CCD برای بهینه‌سازی و ساخت مدل‌های مؤثر برای فرایند در متغیرهای وابسته، از نظر تأثیر آن‌ها در متغیرهای وابسته استفاده می‌شود.^[۳۳] همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، از میان مدل‌های Linear، Quadratic، Cubic، و Quadratic، مدل مطلوب‌ترین مدل برای توصیف حذف ماده‌ی رنگ صنعتی تارترازین با فرایند پلاسما تعیین شده



شکل ۵. اثر بازده انرژی در حذف رنگ در حالت بهینه (در غلظت اولیه‌ی ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، توان ۶/۲۸ وات و $pH=4/1$).

در $pH=2/2$ برابر 100% ، ولی در $pH=9/4$ برابر $62/2$ بوده است که تقریباً کاهش ۳۸ درصدی راندمان را نشان می‌دهد (شکل ۴ ب). تارکوا^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)، با فرایند پلاسما سرد نشان دادند با کاهش pH ، درصد حذف رنگ اورانژ G افزایش یافته است، به‌طوری که در $pH=10$ ، درصد حذف رنگ 71% و در $pH=3$ ، درصد حذف رنگ تقریباً 100% بوده است که pH بهینه، برابر ۳ تعیین شد.^[۲۴] ایکسین^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۰)، نیز دریافتند که کاهش pH باعث افزایش راندمان حذف رنگ اسید بروم آمین می‌شود، به‌طوری که در مدت ۱۵ دقیقه تصفیه با پلاسما در $pH=10$ ، راندمان حذف $77/7\%$ به دست آمده است که این مقدار برای $pH=6/7$ و $pH=4$ به ترتیب برابر $98/7$ و $99/5$ درصد بوده است. تمامی نتایج ذکر شده، تأییدکننده‌ی این موضوع است که حذف رنگ در محیط اسیدی، راندمان بالایی دارد که دلیل آن را می‌توان در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و ازن (O_3) دانست، چرا که حضور رادیکال‌های مذکور برای حذف رنگ ضروری است. در شرایط اسیدی، درصد H بیشتری تولید می‌شود که منجر به تولید OH می‌شود. همچنین ازن در محلول اسیدی بسیار پایدارتر از محلول قلیایی است؛ به همین دلیل غلظت ازن در pH پایین‌تر، افزایش می‌یابد.^[۲۵]

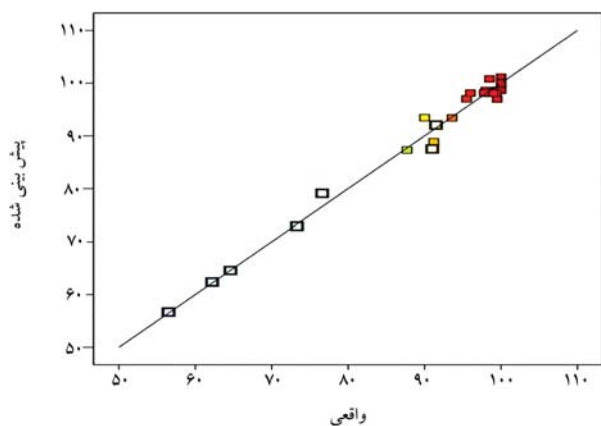
با افزایش زمان تصفیه، میزان حذف رنگ نیز افزایش یافته است. نتایج به دست آمده نشان داد که در شرایط یکسان در مدت زمان تصفیه‌ی ۳۰ و ۱۰ دقیقه به ترتیب درصد حذف رنگ، ۱۰۰ و $64/6\%$ درصد بوده است. همچنین نتایج فرایند پلاسما در مطالعه‌ی مروپولیس^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۱)، کارایی $39/8$ و $81/2$ درصدی در حذف رنگ از محلول آبی پس از ۲ و ۸ دقیقه را نشان داده است. کارایی فرایند پس از ۲۰ دقیقه منجر به تخریب کامل رنگ شده است.^[۲۶] تغییرات ولتاژ در درصد حذف رنگ فرایند به عنوان متغیر دیگری ارزیابی شده است. بدین منظور تغییرات ولتاژ در دامنه‌ی ۷۰-۱۱۰ ولت اعمال و نتایج آزمایش‌ها، اثر مستقیم ولتاژ در کارایی فرایند را ثابت کرده است. بنابراین، میزان حذف تارترازین با افزایش ولتاژ، افزایش یافته است. البته این یافته زمانی اعتبار بیشتری دارد که بتوان دمای محلول را ثابت نگه داشت؛ در غیر این صورت، با افزایش توان اعمالی از ۷۰ به ۱۱۰ ولت، بخشی از انرژی راکتور به گرما تبدیل و باعث تبخیر محلول در فرایند حذف رنگ می‌شود که در مطالعه‌ی حاضر، برای کنترل و ثابت کردن دما از دستگاه بن‌ماری استفاده شده است. با افزایش ولتاژ، الکترون‌های پرانرژی بیشتری تولید می‌شوند که منجر به تشکیل سریع گونه‌های فعال، مانند ازن و افزایش شدت تابش فرابنفش می‌شود، که هر دو عامل برای حذف رنگ مفید هستند.^[۲۷] طبق آزمایش‌های انجام شده در شرایط مشابه مشخص شد که در ولتاژهای ۷۰ و ۱۱۰ ولت، حذف رنگ به ترتیب برابر $99/5$ و $76/6\%$ درصد بوده است (شکل ۵ د). سانگ^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۱)، نیز اثر تخریبی پلاسما DBD در حذف رنگ صنعتی اورانژ G در محیط آبی را بررسی کردند و دریافتند که با اعمال ولتاژهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ ولت (معادل ۳/۵ و ۴ کیلوولت) طی ۱۰ دقیقه، راندمان تخریبی $39/9$ ، $64/7$ و $76/2$ درصد بوده است.^[۲۸] همچنین حافظ^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۱)، حذف رنگ آزو RB-۵^{۱۹} را با راکتور پلاسما غیرحرارتی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش ولتاژ، حذف رنگ خود (۴۴٪) رسیده است؛ این در حالی بود که در ولتاژ $6/2$ کیلوولت با غلظت ازن $48ppm$ به $32/8\%$ کاهش یافته است که این کاهش را ناشی از کاهش غلظت ازن در آن نقطه دانستند. با افزایش ولتاژ از $3/8$ به ۵ کیلوولت، تشکیل ازن از ۴۱ به ۶۳ (ppm) افزایش یافته است. به بیانی دیگر، بیشینه‌ی حذف رنگ در ولتاژی اتفاق افتاده است که غلظت ازن در آن ولتاژ، بیشترین مقدار خود را داشته است.^[۲۹] یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در بازدهی، فاصله‌ی الکترود ولتاژ بالا تا

جدول ۳. نتایج رستنی آزمای مدل انتخاب شده توسط نرم افزار.

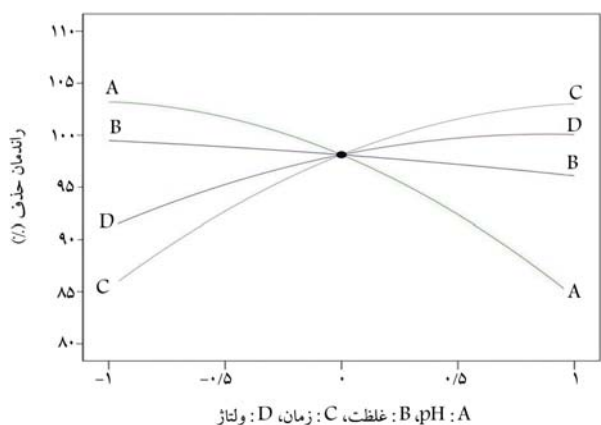
منبع	p-value		R^2	
	متوالی	کمبود تناسب	تنظیم شده	پیش بینی شده
خطی	$< 0/0001$	$0/0002$	$0/6053$	$0/4969$
۲FI	$0/2052$	$0/0002$	$0/6594$	$0/5201$
مربعی	$< 0/0001$	$0/0505$	$0/9696$	$0/9030$
مکعبی	$0/0505$		$0/9909$	

جدول ۴. نتایج مربوط به مدل مربعی.

انحراف معیار	$2/20$	R^2	$0/9854$
میان	$91/35$	R^2 تنظیم شده	$0/9696$
ضریب تغییرات (%)	$2/41$	R^2 پیش بینی	$0/9030$
PRESS	$418/97$	دقت کافی	$27/5501$



شکل ۶. مقایسه‌ی داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی برای درصد رنگ زدایی.



شکل ۷. تأثیر هر یک از پارامترها در درصد رنگ زدایی.

۳.۳. بهینه‌سازی فرایند

تعداد آزمایش‌ها برای حذف رنگ با توجه به شرایط و محدوده‌های ارائه شده در روش RSM تعیین و به عنوان خروجی دریافت شده است. سپس با اعمال محدودیت‌ها بر روی متغیرهای مستقل (غلظت، زمان و ...) و متغیر پاسخ (درصد حذف رنگ)، مطابق جدول ۶، متغیرهای بهینه از نرم‌افزار دریافت و به عنوان آزمایش‌های بهینه در نظر گرفته شده‌اند. حال برای اعتبارسنجی شرایط بهینه‌ی به‌دست آمده از ANOVA، آزمایش‌ها باید در همان شرایط بهینه انجام می‌شدند و از این میان، آزمایشی به عنوان بهینه‌ترین حالت پذیرفته می‌شد که راندمان آن کمترین اختلاف و درصد خطا را با راندمان آزمایش ارائه شده توسط ANOVA داشته باشد (شکل ۸). با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که درصد خطای تمامی آزمایش‌ها کمتر از ۶٪ بوده و از میان آن‌ها، آزمایش با داده‌های (غلظت اولیه‌ی رنگ ۱۴ میلی‌گرم در لیتر، $pH=4/1$ ، ولتاژ اولیه‌ی ۸۶ ولت، زمان تصفیه‌ی ۱۸/۷ دقیقه و راندمان حذف ۹۹/۷۸٪)، کمترین درصد خطا (۲٪) را به خود اختصاص داده و به عنوان بهینه‌ترین آزمایش پذیرفته شده است. در نهایت، از مقدار خطاهای به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که مدل ایجاد شده برای تابش پلاسما با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته است.

۴.۳. تعیین سینتیک و نیمه‌ی عمر فرایند

طبق رابطه‌ی ۳ ارائه شده برای سینتیک و رابطه‌ی ۴ برای نیمه‌ی عمر در قسمت مواد و روش‌ها، به تحلیل هر یک از آن‌ها پرداخته شده است. همان‌طور که در جدول ۷

است که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. R^2 بالای ۹۸٪، به همراه نزدیکی مقادیر برای R^2 و تنظیم R_{adj}^2 (اختلاف کمتر از ۲٪) و معنادار نبودن LOF همگی دلالت بر این دارند که مدل Quadratic برازش خوبی داشته است. [۳۴] علاوه بر این، مطابق شکل ۶، از نزدیکی مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با مقادیر آزمایشگاهی برای درصد حذف رنگ، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار قادر است کارایی فرایند را تا حد بسیار بالایی به‌درستی پیش‌بینی کند که بیانگر خطای جزئی آزمایشگاهی است. [۳۵] معنی‌دار بودن مقادیر P برای مدل و پارامترهای دیگر در جدول ANOVA نیز تأیید بیشتر مدل برای فرایند پلاسماست. همچنین مقادیر P کمتر از $0/0001$ برای متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که تأثیر متغیرهای مذکور در آزمایش بسیار مهم و با اهمیت بالاست. حال اگر مقادیر P کمتر از $0/05$ باشد، بیانگر آثار قابل توجه ولی با اهمیت کمتر از حالت اول برای متغیرهای ذکر شده است، که در هر دو صورت شرایط آماری معنی‌داری را برای مدل نشان می‌دهد. با بالا بودن مقادیر P از $0/05$ برای متغیرهای مستقل، عدم تأثیر آن‌ها را می‌توان فهمید و لذا می‌توان آن‌ها را از معادله‌ی ۵ حذف کرد. [۳۵] در نهایت، مقدار P برای شاخص عدم تناسب باید بیشتر از $0/05$ باشد تا مناسب بودن مدل تأیید شود که این شرط نیز با اختلاف کمی برآورده شده است ($0/05 > 0/0505$). [۳۵]

طبق مقادیر F در جدول ۵ و معادله‌ی فرایند ذکر شده می‌توان استنباط کرد که pH اصلی‌ترین و مؤثرترین متغیر محسوب می‌شود؛ در حالی که غلظت رنگ، کمترین تأثیر را در حذف رنگ فرایند داشته است که این امر را می‌توان در شکل ۷ نیز مشاهده کرد، به طوری که شیب خط هر یک از پارامترها، رابطه‌ی مستقیم با درصد حذف رنگ دارد. در ضمن، علامت مثبت برای متغیرهای زمان و ولتاژ در معادله‌ی ۵، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت متغیر در فرایند است، در حالی که علامت منفی دو متغیر pH و غلظت، نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی متغیر است. این بدان معناست که با افزایش زمان ماند و ولتاژ، درصد حذف رنگ افزایش و با افزایش pH و غلظت رنگ، درصد حذف رنگ کاهش می‌یابد.

$$Y_{dye} = 98/12 - 9/35A - 1/69B + 8/86C + 4/47D$$

$$+ 6/35AC - 2/41CD - 4/25A^2 - 0/395C^2 - 2/52D^2$$

(۵)

جدول ۷. معادله‌ی واکنش و R^2 فرایند: الف) در ولتاژ ۸۰، ب) در ولتاژ ۱۰۰ ولت.

ثابت سرعت واکنش $K_t (min^{-1})$	نیمه‌ی عمر $t_{\frac{1}{2}} (min)$	R^2	
$K_{10} = 0.16203$	$t_{\frac{1}{2}}(10) = 4.28$		غلظت ۸
$K_{20} = 0.18444$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 3.76$	۰/۸۳۵۶	میلی گرم
$K_{25} = 0.33176$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 2.09$		در لیتر
$K_{10} = 0.13964$	$t_{\frac{1}{2}}(10) = 4.96$		غلظت ۱۶
$K_{20} = 0.12629$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 5.49$	۰/۹۹۰۹	میلی گرم
$K_{25} = 0.12404$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 5.59$		در لیتر
$K_{10} = 0.27998$	$t_{\frac{1}{2}}(10) = 2.48$		غلظت ۸
$K_{20} = 0.44936$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 1.54$	۰/۹۵۸۶	میلی گرم
$K_{25} = 0.45159$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 1.53$		در لیتر
$K_{10} = 0.26080$	$t_{\frac{1}{2}}(10) = 2.67$		غلظت ۱۶
$K_{20} = 0.48402$	$t_{\frac{1}{2}}(20) = 1.43$	۰/۹۴۱۷	میلی گرم
$K_{25} = 0.47932$	$t_{\frac{1}{2}}(25) = 1.45$		در لیتر

مشاهده می‌شود، سینتیک و نیمه‌ی عمر واکنش در سه زمان ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه، غلظت ۸ و ۱۶ میلی گرم در لیتر و برای ولتاژهای ۸۰ و ۱۰۰ ولت به دست آمده‌اند. نتایج نشان داد که نمودار $\ln(C/C_0)$ در برابر مقیاس زمانی در کل محدوده‌ی غلظت و زمان مورد بررسی، خطی است. از ضریب همبستگی‌های R^2 که بیشتر از ۰/۹ به دست آمده‌اند، می‌توان دریافت که واکنش‌های تخریب پلاسمایی با مدل سینتیکی مرتبه‌ی اول، مطابقت بیشتری دارند که به وضوح در شکل ۹ مشاهده می‌شود. ضمناً، سرعت واکنش با اسیدی‌تر شدن محیط آبی از ۸/۵ به ۴ بیشتر شده است؛ در نتیجه، قدرت اکسیداسیون پلاسما بیشتر و کارایی فرایند بیشتر شده است که با یافته‌های آزمایشگاهی به دست آمده مطابقت دارد. از محاسبه‌ی نیمه‌ی عمر برای تمامی آزمایش‌ها مشخص شد که آزمایش ۲۳م، با پارامترهای: غلظت اولیه‌ی ۱۲ میلی گرم در لیتر، $pH = 9/4$ ، ولتاژ اولیه‌ی ۹۰ ولت، زمان تصفیه‌ی ۲۰ دقیقه و راندان حذف ۶۲/۲٪، بیشترین نیمه‌ی عمر (۱۴/۲۵ دقیقه) را داشته است. همچنین، آزمایش ۱۲م، با پارامترهای: غلظت اولیه‌ی ۱۲ میلی گرم در لیتر، $pH = 2/2$ ، ولتاژ اولیه‌ی ۹۰ ولت، زمان تصفیه‌ی ۲۰ دقیقه و راندان حذف ۱۰۰٪، کمترین نیمه‌ی عمر (۱/۱۹ دقیقه) را داشته است. از داده‌های اخیر به این نکته‌ی مهم پی برده می‌شود که با ثابت بودن تمامی پارامترها به جز pH ، بیشترین نیمه‌ی عمر در بیشترین pH و کمترین نیمه‌ی عمر در کمترین pH اتفاق افتاده است که درستی نتیجه‌ی ANOVA مبنی بر بیشترین اثربخشی pH نسبت به پارامترهای دیگر در حذف رنگ تارترازین را تأیید می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

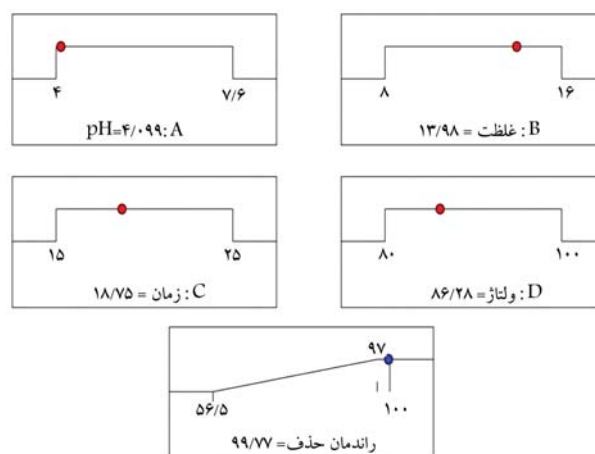
در پژوهش حاضر سعی شده است تا از قابلیت اکسیداسیون پلاسما در حذف رنگ

جدول ۵. آنالیز واریانس برای مدل پیشنهادی.

منبع	جمع مربعات	DF	میان مربعات	مقدار - F	مقدار p
مدل	۴۲۵/۱۲	۱۴	۳۰۳/۹۴	۶۲/۵۵	< ۰/۰۰۰۱
A: pH	۱۶۳/۸۹	۱	۱۶۳/۸۹	۳۳۵/۸۲	< ۰/۰۰۰۱
غلظت رنگ: B	۵۳/۴۲	۱	۵۳/۴۲	۱۰/۹۹	۰/۰۰۵۶
زمان: C	۱۴۶/۷۷	۱	۱۴۶/۷۷	۳۰۱/۴۳	۰/۰۰۰۱
ولتاژ: D	۴۱۴/۷۴	۱	۴۱۴/۷۴	۸۵/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
AB	۵/۱۰	۱	۵/۱۰	۱/۰۵	۰/۳۲۴۲
AC	۴۵۱/۶۱	۱	۴۵۱/۶۱	۹۲/۹۳	< ۰/۰۰۰۱
AD	۱۴/۹۷	۱	۱۴/۹۷	۳/۰۸	۰/۱۰۲۸
BC	۰/۴۳۷	۱	۰/۴۳۷	۰/۰۰۹۰	۰/۹۲۵۹
BD	۰/۳۵۱۵	۱	۰/۳۵۱۵	۰/۰۷۲۳	۰/۷۹۲۲
CD	۷۵/۵۴	۱	۷۵/۵۴	۱۵/۵۵	۰/۰۰۱۷
A ²	۴۸۶/۴۷	۱	۴۸۶/۴۷	۱۰۰/۱۱	< ۰/۰۰۰۱
B ²	۲/۹۱	۱	۲/۹۱	۰/۵۹۹۳	۰/۴۵۲۷
C ²	۴۲۰/۲۸	۱	۴۲۰/۲۸	۸۶/۴۹	< ۰/۰۰۰۱
D ²	۱۷۰/۲۵	۱	۱۷۰/۲۵	۳۵/۰۳	< ۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۶۳/۱۷	۱۳	۸۶/۴		
کمبود تناسب	۵۵/۸۸	۸	۶/۹۹	۴/۷۹	۰/۰۵۰۵

جدول ۶. محدودیت‌های انتخاب شده برای بهینه‌سازی پارامترها توسط ANOVA.

متغیرها	معیارهای انتخاب متغیرها
pH	در محدوده
غلظت	در محدوده
زمان	در محدوده
ولتاژ	در محدوده
درصد حذف (رنگ‌زدایی)	بیشینه



شکل ۸. نقاط بهینه‌ی فرایند پلاسما در حذف رنگ تارترازین.

فرایند مطلوب است. براساس مقادیر به دست آمده F ، مهم ترین و مؤثرترین متغیر بهره برداری در فرایند، pH بوده است که با افزایش آن در محیط آبی، کارایی فرایند در حذف ماده رنگی کمتر می شود. این امر در نیمه عمر واکنش نیز مشاهده شده است؛ به طوری که در بیشترین pH، بیشترین نیمه عمر و در کمترین pH، کمترین نیمه عمر به دست آمده است. شرایط بهینه بهره برداری از رنگ زدایی با کمک فرایند پلاسما در غلظت رنگ ۱۴ میلی گرم در لیتر، pH= ۴/۱، ولتاژ ۸۶ ولت و زمان تصفیه ۱۸/۷ دقیقه تعیین شده است که منجر به حذف ۹۹/۷۸ درصدی رنگ شده است. همچنین، بازده انرژی حذف رنگ در ولتاژهای مختلف اندازه گیری شده و بیشترین بازده انرژی با ۱۵۰/۳ میلی گرم در کیلووات ساعت در آزمایش ۱۷ اتفاق افتاده است؛ در حالی که این مقدار برای کمترین (بهترین) نیمه عمر که در آزمایش ۱۲ ام رخ داده است، ۸۲/۲ میلی گرم در کیلووات ساعت بوده است. همچنین با انجام آزمایش ها مشخص شد که افزایش یا کاهش بیش از حد فاصله الکترود منجر به کاهش راندمان حذف رنگ می شود که فاصله بهینه الکترود ولتاژ بالا تا سطح محلول ۸ میلی متر به دست آمده است. نتایج اخیر نشان می دهند که پلاسما قدرت اکسیداسیون بالایی در حذف مواد آلی با قابلیت تجزیه پذیری کم بیولوژیکی در مدت زمان بسیار کمتر نسبت به دیگر روش های متداول اکسیداسیون پیشرفته دارد. لذا، روش پلاسما به طور بالقوه می تواند به سبب راهبری نسبتاً آسان و قدرت بالای اکسیداسیون مواد آلی، گزینه یی جایگزین برای روش های متداول تصفیه در نظر گرفته شود و کارایی و قدرت تجزیه کنندگی آن در مقیاس های نیمه صنعتی و برای آلاینده هایی با پایداری زیاد و مقاوم در برابر روش های مرسوم تصفیه ارزیابی شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی جهت حمایت مالی در انجام پروژه قدردانی می شود.

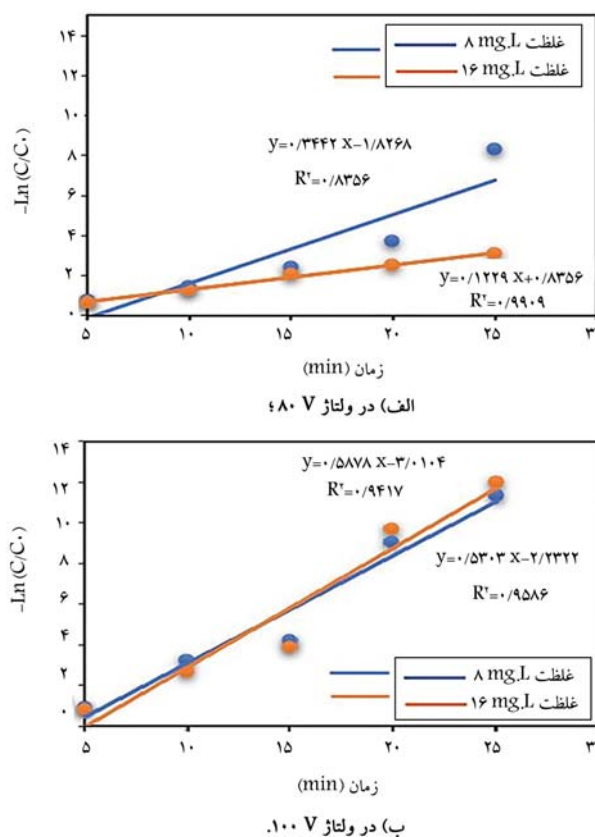
پانویس ها

1. Azo
2. Food and Drug Administration (FDA)
3. European Food Safety Authority (EFSA)
4. Advanced Oxidation Processes
5. Cold Atmospheric Plasma
6. Garcia
7. Abdel-Fattah
8. Dielectric Barrier Discharge (DBD)
9. Mohamed
10. Vasikaran
11. Response Surface Methodology (RSM)
12. Central Composite Design (CCD)
13. Liu
14. Tarkwa
15. Xin
16. Meropoulis
17. Sang

18. Hafeez
19. Reactive black-5
20. Zeghioud
21. Sano
22. Jiang

منابع (References)

1. Russo, A., Merlo, B. and Jacobo, S. "Adsorption and catalytic degradation of tartrazine in aqueous medium by a fe-modified zeolite", *Cleaner Engineering and Technology*, 4, p. 100211 (2021).
2. Al-Tohamy, R., Ali, S., Li, F. and et al. "A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety",



شکل ۹. نمودار شبه مرتبه اول برای تارترازین.

صنعتی تارترازین استفاده شود. بدین منظور، کارایی متغیرهای فرایند پلاسما روی میزان حذف با کمک مدل RSM بررسی شده است. خروجی مدل نشان می دهد مدل Quadratic به دلیل R^2 بالا (> 0.95) و نزدیکی R^2 و تنظیم R^2 برای توصیف

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, **231**, p. 113160 (2022).
3. Kaya, S.I., Cetinkaya, A. and Ozkan, S.A. "Latest advances on the nanomaterials-based electrochemical analysis of azo toxic dyes sunset yellow and tartrazine in food samples", *Food and Chemical Toxicology*, **156**, p. 112524 (2021).
4. Rahmati, R., Nayebi, B. and Ayati, B. "Investigating the effect of hydrogen peroxide as an electron acceptor in increasing the capability of slurry photocatalytic process in dye removal", *Water Science and Technology*, **83**(10), pp. 2414-2423 (2021).
5. Paz, A. and et al "Biological treatment of model dyes and textile wastewaters", *Chemosphere*, **181**, pp. 168-177 (2017).
6. Rodenburg, L.A., Hermanson, M.R. and Sumner, A.L. "Effect of membrane filtration on the fate of polychlorinated biphenyls in wastewater treatment", *Chemosphere*, **287**, p. 132335 (2022).
7. Kim, S. and Park, C. "Potential of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of anionic surfactants in laundry wastewater for greywater reuse", *Journal of Water Process Engineering*, **44**, p. 102373 (2021).
8. Zhang, X. "Selective separation membranes for fractionating organics and salts for industrial wastewater treatment: Design strategies and process assessment", *Journal of Membrane Science*, **643**, p. 120052 (2022).
9. Munonde, T.S., September's, N.P., Mpupa, A. and et al. "Two agitation routes for the adsorption of reactive red 120 dye on NiFe LDH/AC nanosheets from wastewater and river water", *Applied Clay Science*, **219**, p. 106438 (2022).
10. Samal, K. and Trivedi, S. "A statistical and kinetic approach to develop a floating bed for the treatment of wastewater", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**(5), p. 104102 (2020).
11. Delnavaz, M. and Bahrami, D. "Application of electrochemical coagulation process with iron and aluminum modified by zinc oxide nanoparticles by cyclic voltammetry in removal of reactive blue 19 dye", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37**(1.2), pp. 87-94 (2021).
12. Tian, K., Hu, L., Li, L. and et al. "Recent advances in persulfate-based advanced oxidation processes for organic wastewater treatment", *Chinese Chemical Letters* (2021).
13. Mohamed, W.A., Fahmy, A., Helal, A. and et al. "Degradation of local brilliant blue R dye in presence of polyvinylidene fluoride/MWCNTs/TiO₂ as photocatalysts and plasma discharge", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**(1), p. 106854 (2022).
14. Feng, L., Liu, J., Guo, Zh. and et al. "Reactive black 5 dyeing wastewater treatment by electrolysis-Ce (IV) electrochemical oxidation technology: Influencing factors, synergy and enhancement mechanisms", *Separation and Purification Technology*, **285**, p. 120314 (2022).
15. Petrovic, M., Rancev, S., Velinov, N. and et al. "Triclinic ZnMoO₄ catalyst for atmospheric pressure non-thermal pulsating corona plasma degradation of reactive dye; role of the catalyst in plasma degradation process", *Separation and Purification Technology*, **269**, p. 118748 (2021).
16. Ayati, B. "Study of reactive blue 171 dye degradation in hybrid system of UV/H₂O₂ & SBAR", *Iranian Journal of Health and Environment*, **6**(3), pp. 393-406 (2013).
17. Garcia, M.C., Mora, M., Esquivel, D. and et al. "Microwave atmospheric pressure plasma jets for wastewater treatment: Degradation of methylene blue as model dye", *Chemosphere*, **180**, pp. 239-246 (2017).
18. Abdel-Fattah, E. "Atmospheric pressure helium plasma jet and its applications to methylene blue degradation", *Journal of Electrostatics*, **101**, p. 103360 (2019).
19. Rahimpour, M., Taghvaei, H., Zafarnak, S. and et al. "Post-discharge DBD plasma treatment for degradation of organic dye in water: A comparison with different plasma operation methods", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7**(4), p. 103220 (2019).
20. Vasikaran, E.M., Murugesan, P., Moses, J.A. and et al. "Performance of non-thermal plasma reactor for removal of organic and inorganic chemical residues in aqueous media", *Journal of Electrostatics*, **115**, p. 103671 (2022).
21. Tran, M.L., Fu, Ch.-Ch., Wei, T.-H. and et al. "Surface coating of titania and graphene oxide onto plasma-activated polymer membranes as efficient photocatalysts for organics removal from water", *Journal of Water Process Engineering*, **37**, p. 101488 (2020).
22. Iervolino, G., Vaiano, V. and Palma, V. "Enhanced azo dye removal in aqueous solution by H₂O₂ assisted non-thermal plasma technology", *Environmental Technology & Innovation*, **19**, p. 100969 (2020).
23. Liu, X., Li, W., Hu, R. and et al. "Synergistic degradation of acid orange 7 dye by using non-thermal plasma and g-C₃N₄/TiO₂: Performance, degradation pathways and catalytic mechanism", *Chemosphere*, **249**, p. 126093 (2020).
24. Tarkwa, J.-B., Acayanka, E., Jiang, B. and et al. "Highly efficient degradation of azo dye Orange G using laterite soil as catalyst under irradiation of non-thermal plasma", *Applied Catalysis B: Environmental*, **246**, pp. 211-220 (2019).
25. Xin, Y.-Y., Zhou, L., Ma, K.-K. and et al. "Removal of bromoamine acid in dye wastewater by gas-liquid plasma: The role of ozone and hydroxyl radical", *Journal of Water Process Engineering*, **37**, p. 101457 (2020).
26. Meropoulis, S., Rassias, G., Bekiari, V. and et al. "Structure-degradation efficiency studies in the remediation of aqueous solutions of dyes using nanosecond-pulsed DBD plasma", *Separation and Purification Technology*, **274**, p. 119031 (2021).
27. Wang, T., Qu, G., Ren, J. and et al. "Organic acids enhanced decoloration of azo dye in gas phase surface discharge plasma system", *Journal of Hazardous Materials*, **302**, pp. 65-71 (2016).
28. Sang, W., Lu, W., Mei, L. and et al. "Research on different oxidants synergy with dielectric barrier discharge plasma in degradation of orange G: Efficiency and mechanism", *Separation and Purification Technology*, **277**, p. 119473 (2021).
29. Hafeez, A., Javed, F., Fazal, T. and et al. "Intensification of ozone generation and degradation of azo dye in non-thermal hybrid corona-DBD plasma micro-reactor",

- Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **159**, p. 108205 (2021).
30. Zeghioud, H., Nguyen-Tri, P., Khezami, L. and et al. "Review on discharge plasma for water treatment: Mechanism, reactor geometries, active species and combined processes", *Journal of Water Process Engineering*, **38**, p. 101664 (2020).
 31. Sano, N., Kawashima, T., Fujikawa, J. and et al. "Decomposition of organic compounds in water by direct contact of gas corona discharge: Influence of discharge conditions", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **41**(24), pp. 5906-5911 (2002).
 32. Jiang, B., Zheng, J., Qiu, Sh. and et al. "Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation", *Chemical Engineering Journal*, **236**, pp. 348-368 (2014).
 33. Singh, B. and Kumar, P. "Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM)", *Journal of Water Process Engineering*, **36**, p. 101317 (2020).
 34. Ahmadi, E., Shokri, B., Mesdaghinia, A. and et al. "Synergistic effects of $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ on the performance of a non-thermal plasma reactor as a novel catalytic oxidation process for dimethyl phthalate degradation", *Separation and Purification Technology*, **250**, p. 117185 (2020).
 35. Guo, H., Jiang, N., Wang, H. and et al. "Degradation of flumequine in water by pulsed discharge plasma coupled with reduced graphene oxide/ TiO_2 nanocomposites", *Separation and Purification Technology*, **218**, pp. 206-216 (2019).

تحلیل موانع پیاده سازی مدل سازی اطلاعات ساخت در پروژه های خصوصی صنعت ساخت ایران

حمیدرضا اطهاری نیکوروان* (دانشجوی دکتری)

محمود گلابچی (استاد)

دانشکده ی معماری، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۶۹-۸۰، صص. ۲، شمار ۳۹، دوری ۳۹)
(پژوهشی)

مدل سازی اطلاعات ساخت (BIM)، ابزاری کلیدی برای مدیران است. جدید بودن BIM در ایران و جهان باعث شده است که موانعی در به کارگیری آن وجود داشته باشد. هدف پژوهش حاضر، بررسی موانع مذکور در ایران است. در ابتدا با استفاده از مرور ادبیات، ۲۷ مانع در سطح بین المللی شناسایی و در ۴ گروه سازمانی - فرهنگی، قراردادی، قانونی و فنی دسته بندی شده اند. سپس با مطالعه ی موردی ۲۸ شرکت کارفرمایی، مشاوره و پیمانکاری، ۱۷ مانع به کارگیری BIM در ایران تحلیل و شناسایی شده اند. برای گردآوری داده ها، از بررسی اسناد، شرکت در جلسات، مصاحبه ی نیمه ساختاریافته و مشاهده ی مستقیم استفاده شده است. پس از کدگذاری داده ها در نرم افزار N-Vivo، یافته ها با نظر خبرگان گروه بندی شده اند. ۱۰ مورد از موانع بازار ایران با ادبیات مشابهت داشت. در مقابل، ۷ مانع جدید نیز شناسایی شد: عدم انجام وظایف توسط سایرین، انتظار دستمزد بالای متخصصان BIM، عدم انطباق با BEPI، ارزش کم مشوق ها/جرام، دشواری سنجش پیشرفت خدمات BIM، نبود محیط اشتراک داده ی کارآمد و مشکلات پهنای باند. انتظار می رود شناسایی موانع ذکر شده، سبب بهبود استقرار BIM در پروژه ها شود.

واژگان کلیدی: مدل سازی اطلاعات ساخت، موانع، مطالعه ی موردی.

hamidathari@ut.ac.ir
golabchi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

صنایع پایین تر است^[۹،۸] و از چندپارچگی^۱ و دوباره کاری های فراوان رنج می برد.^[۱۰]

رویکردها، سیستم ها و ابزارهای متعددی برای بهبود بازدهی صنعت ساخت به خدمت گرفته شده است، که از مهم ترین آنها می توان به فناوری اطلاعات اشاره کرد.^[۱۰] هر چند صنعت ساختمان به عنوان یکی از کم بهره ترین بخش های اقتصادی از بُعد بهره گیری از فناوری اطلاعات شناخته شده است؛^[۱۱] در ۱/۵ دهه ی گذشته، یکی از مؤثرترین مظاهر فناوری اطلاعات در صنعت ساختمان، مدل سازی اطلاعات ساخت (BIM)^۲ است، که انتظار می رود بهره وری صنعت ساخت را به میزان قابل توجهی افزایش و هزینه های آن را کاهش دهد.^[۱۲] مدل سازی اطلاعات ساخت (BIM) را انقلاب جدید صنعت ساختمان می نامند^[۶] و نقش محوری در یک پارچگی صنعت ساخت - که از چندپارچگی رنج می برد - دارد.^[۱۳] نگرش ها به BIM طیف گسترده یی دارد: از نگرش های فقط تکنولوژیک تا نگرش های اجتماعی - فنی^۳، که آن را یک سیستم اطلاعاتی تعریف می کند که «افراد و اطلاعات را و می دارد با یکدیگر به طرز اثربخش و کارا از طریق فناوری و فرایندهای تعریف شده همکاری کنند».^[۱۴] در یک بیان جامع می توان گفت مدل سازی اطلاعات ساخت،

صنعت ساختمان، سهم مهمی در سرمایه گذاری و تولید ناخالص داخلی کشورها دارد. و همچنین سهم بزرگی از مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه ای دارد.^[۱] این صنعت در اروپا معمولاً ۱۰٪ تولید ناخالص داخلی را تشکیل می دهد و ۲۰ میلیون شاغل دارد.^[۲] در کل جهان، صنعت ساختمان ۶٪ تولید ناخالص داخلی را شامل می شود.^[۳] در ایران، معمولاً حدود ۲۰٪ شاغلان در صنعت ساختمان فعالیت دارند^[۴] و این صنعت همواره از مهمترین حوزه های سرمایه گذاری در چند دهه ی گذشته بوده است.^[۵] با این حال، صنعت ساختمان از بازدهی بسیار پایین رنج می برد و حجم بالایی از تولید دی اکسید کربن، اتلاف منابع و آلودگی محیط زیست توسط صنعت ساختمان انجام می شود.^[۶] لذا هرگونه افزایش بهره وری در صنعت ساخت، اثر قابل ملاحظه یی در اقتصاد کلان کشورها، رفع فقر و همچنین بهبود وضع محیط زیست دارد.^[۷] با وجود این، اغلب مراجع معتبر مهندسی ساختمان اتفاق نظر دارند که بازدهی صنعت ساخت از سایر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۱، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۲۲

DOI:10.24200/J30.2022.61059.3146

استناد به این مقاله:

اطهاری نیکوروان، حمیدرضا و گلابچی، محمود، ۱۴۰۲. تحلیل موانع پیاده سازی مدل سازی اطلاعات ساخت در پروژه های خصوصی صنعت ساخت ایران. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۶۹-۸۰.

«یک بازنمایی دیجیتال از خصوصیات فیزیکی و عملکردی یک ساختمان است. یک مدل اطلاعات ساختمان، یک منبع دانشی مشترک حاوی اطلاعات درباره‌ی یک ساختمان است که پایگاه قابل اعتمادی را برای تصمیم‌سازی در طول دوره‌ی حیات آن ساختمان فراهم می‌کند».^[۱۵] انتظار می‌رود با استقرار مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌های صنعت ساختمان، بهبود قابل توجهی در عملکرد مدیران پروژه و راندمان نیروی کار، مصالح و انرژی ایجاد شود.^[۱۶ و ۱۷] اما عملاً موانعی بر سر راه استقرار این سیستم و ابزار وجود دارد که مانع از تحقق مزایای فوق‌الذکر می‌شود. لذا ضروری است که در مورد موانع مذکور، پژوهش صورت گیرد و مرتفع شود. در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی جهت استقرار و بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌های ایران صورت گرفته است؛ اما به نظر می‌رسد موانعی در این راستا وجود دارد. هدف پژوهش حاضر، شناخت موانع موجود در جهت بهره‌مندی از مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌های صنعت ساخت ایران است. با بررسی پیشینه‌ی پژوهش مشخص شد چنین پژوهشی در نقاط متعدد جهان انجام شده است.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

مزایا و منافع و کاربردهای متعددی برای مدل‌سازی اطلاعات ساخت در طول کمتر از دو دهه‌ی گذشته که این ابزار به خدمت گرفته شده است، شناسایی شده است.^[۱۸] و در سال‌های اخیر، استفاده از آن در پروژه‌های عمومی و خصوصی در بسیاری کشورها الزامی بوده است.^[۱۹] با وجود منافع متعدد، در عین حال به کارگیری سیستم BIM، عاری از موانع و مشکلات نبوده است.^[۲۰ و ۲۱] پژوهش‌های متأخری سعی در شناخت موانع مذکور انجام شده است؛ ولی با این حال، تلاش‌های قابل قبولی برای شناخت موانع پیاده‌سازی BIM در کشورهای در حال توسعه انجام نشده است.^[۲۲] گزارش‌هایی وجود دارد که برخی پیمانکاران عمومی (GC) ۴، با هدف غلبه بر موانع اشاره شده، خدمات مدل‌سازی اطلاعات ساخت را بر برون‌سپاری می‌کنند. از نگاه ایشان، هزینه‌ی استخدام یا آموزش پرسنل ماهر و زمانی که صرف توسعه‌ی مدل می‌شود، از موانع به کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساخت است.^[۲۳] نهاد‌های مرجع در حوزه‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساخت نیز در گزارش‌های سالانه‌ی خود موانع به کارگیری آن را بر شمرده‌اند.^[۲۵] برخی از مطالعات انجام شده در جهت شناخت موانع به بازه‌ی خاصی از چرخه‌ی حیات ساختمان - مثلاً دوران بهره‌برداری - پرداخته‌اند. دوردیف^۵ و همکارانش (۲۰۲۲)،^[۲۶] به موانعی همچون: نامناسب بودن قراردادهای موجود برای استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت، عدم حمایت مدیریت ارشد، هزینه‌ی بالای آموزش و مشکلات کیفیت اطلاعات به عنوان موانع استفاده از BIM در فاز بهره‌برداری اشاره کرده‌اند. برخی دیگر فقط از منظر خاصی - به طور مثال فقط از منظر پیمانکاران - به مسئله نگاه کرده‌اند. تن تن^۶ و همکارانش (۲۰۱۹)،^[۲۷] موانع موجود بر سر راه پیاده‌سازی BIM در صنعت ساخت کشور چین را در ۵ دسته‌ی اصلی: فنی، مدیریتی، محیطی، مالی و قانونی دسته‌بندی کرده‌اند. ایشان با به کارگیری مرور ادبیات نظام‌مند^۷، جمعاً ۳۰ مانع بر سر راه پیاده‌سازی BIM در پروژه‌های کشور چین را در ادبیات پیشین شناسایی کرده‌اند. در مطالعه‌ی دیگری در کشور چین، ما^۸ و همکارانش (۲۰۲۰)،^[۲۷] موانع شناسایی شده، مانند: عدم قابلیت همکاری نرم‌افزارها، نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی در BIM، کمبود پرسنل فنی، کمبود دانش و تجربه‌ی پیاده‌سازی BIM و نبود قوانین و مقررات مرتبط را رتبه‌بندی کرده‌اند. بناوی (۲۰۱۵)،^[۲۷] نیز ۱۰ مورد از موانع به کارگیری BIM در صنعت ساخت در عربستان سعودی را جمع‌بندی کرده است، که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

آماده نبودن بازار، هزینه‌ی بالای آموزش و موانع قانونی متعدد. در پژوهشی دیگر، موانع پیاده‌سازی BIM را از بعد سازمانی و از منظر بلوغ BIM سنجیده و موانع را در سطوح راهبردی و مدیریت ارشد، دپارتمان فناوری اطلاعات، مدیران پروژه و مدیران میانی و تیم پروژه سطح‌بندی کرده‌اند.^[۱۲] در سطح مدیریت ارشد، مهم‌ترین کاستی که موجب عدم حمایت مدیریت ارشد از به کارگیری BIM می‌شود، نبود شواهد کافی از مزایا و منافع BIM است. از دید ایشان، با توجه به این‌که مدیران به دنبال مشروعیت بخشیدن به تخصیص منابع خود برای اجرای BIM هستند، فقدان شواهد در مورد مزایای BIM، تمایل مدیریت را برای تخصیص منابع به منظور به کارگیری BIM محدود می‌کند. همچنین از نقطه‌نظر آنها، که از جنبه‌ی سازمانی به موضوع پرداخته‌اند، عامل بازدارنده‌ی مهم دیگر را می‌توان به عنوان تأثیر انگیزه، دانش و مهارت افراد و فرهنگ سازمانی بر پیاده‌سازی و استفاده از BIM خلاصه کرد. به بیان دیگر، صنعت ساخت دارای فرهنگ سازمانی غیرحیاتی است که مانع اجرای BIM در آن می‌شود. چنین فرهنگ سازمانی، اغلب با فقدان هدف‌گذاری و جهت‌گیری تیمی شناخته می‌شود. اولانرجو^۹ و همکارانش (۲۰۲۰)،^[۳] موانع استقرار BIM در نیجریه را بررسی و رتبه‌بندی کرده و دریافته‌اند که: دانش کم در مورد BIM، نبود سیاست‌های حاکمیتی و هزینه‌ی بالای به کارگیری آن، مهم‌ترین موانع در برابر استفاده از BIM است. معرفت و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۸] موانع به کارگیری BIM در زمینه‌ی ایمنی ساخت‌وساز را در نبود پرسنل تعلیم‌یافته، ناکافی بودن زیرساخت‌های اجتماعی و نبود راهنما و حمایت دولتی جمع‌بندی کرده‌اند. ممون^{۱۰} و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۲۴] موانع موجود در جهت به کارگیری BIM را در پروژه‌های مالزی بررسی کرده و سه عامل کمبود پرسنل ماهر، عدم آگاهی از فناوری و نبود کتابخانه‌ی از اشیاء مورد استفاده در BIM را مهم‌ترین عوامل دانسته‌اند. چان^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۹] نیز در بررسی موانع موجود در بازار صنعت ساخت هنگ کنگ، ۱۲ عامل بازدارنده را شناسایی کرده‌اند، که در رأس آنها، موانع فرهنگی - به ویژه مقاومت در برابر تغییر - ساختار سازمانی که جایگاهی برای BIM ندارد و عدم کفایت همکاری درونی^{۱۲} نرم‌افزارهای رایانه‌ی قرار دارند. به مشکل همکاری درونی نرم‌افزارها مکرراً در گزارش‌ها و مطالعات مختلف اشاره شده است،^[۳۰ و ۳۱] تا حدی که بسیاری معتقدند مشکل اخیر، مهم‌ترین مانع استفاده‌ی گسترده از BIM در صنعت ساخت است.^[۱۴] در مطالعه‌ی دیگری در هنگ کنگ که فقط از منظر طراحان به موانع پرداخته است، کمبود پرسنل ماهر، دانش و استانداردها، مهم‌ترین موانع شناخته شده‌اند.^[۳۱] چان (۲۰۱۴)،^[۳۱] نیز موانع موجود در پیاده‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساخت در مصر را ۸ مورد شناسایی کرده است، که به ترتیب موارد: کمبود آگاهی و دانش، مقاومت در برابر تغییر، عدم نیاز از سوی کارفرما و کمبود قوانین مرتبط، مهم‌ترین عوامل بوده‌اند.^[۳۲] همچنین در کشور برزیل، به مشکلاتی مانند: درک نادرست از مفهوم BIM، کمبود پرسنل ماهر و مقاومت در برابر به‌روزرسانی فرایندهای کاری انطباق با BIM اشاره شده است.^[۳۲]

در مجموع، همچنان که نگرش‌ها به BIM از دیدگاه‌های فقط فنی تا دیدگاه‌های مدیریتی و سازمانی را در بر می‌گیرد، موانعی نیز که در ادبیات ذکر شده‌اند، از موانع صرفاً فنی تا موانع سازمانی - فرهنگی را شامل می‌شوند. در پژوهش حاضر، پس از بررسی ۱۵۳ مانع ذکر شده در ادبیات و حذف موارد مشابه، در نهایت ۲۷ مانع یکتا در ۴ دسته‌ی سازمانی - فرهنگی، قراردادی، فنی و قانونی دسته‌بندی شده‌اند. موانع سازمانی - فرهنگی بیشترین فراوانی را در ادبیات داشته‌اند و جمعاً ۱۲ مانع در حوزه‌ی ادبیات شناسایی شده است. پرتکرارترین مانع در ادبیات - یعنی درک نادرست/ناآگاهی یا ابهام در منافع BIM - نیز در دسته‌ی ادبیات قرار داشته است. در دسته‌ی موانع فنی، در دسترس نبودن/گران بودن فناوری مرتبط چه نرم‌افزار و

جدول ۱. موانع مدل سازی اطلاعات ساخت شناسایی شده در ادبیات پژوهش.

کد	دسته بندی	موانع	مرجع
م.ا.سا.۱	سازمانی - فرهنگی	عدم حمایت مدیریت ارشد	[۲۷، ۲۶، ۱۹]
م.ا.سا.۲		عدم حمایت ذی نفعان کلیدی	[۳]
م.ا.سا.۳		نبود آموزش یا هزینه و زمان بالای آموزش	[۳۲، ۳۱، ۲۸-۲۶، ۲۲، ۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.سا.۴		هزینه بالای پیاده سازی در سازمان	[۲۹، ۲۷، ۲۶، ۲۳، ۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.سا.۵		کمبود پرسنل ماهر یا با تجربه	[۳۲، ۳۱، ۲۹-۲۶، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۱۹]
م.ا.سا.۶		مقاومت در برابر تغییر	[۳۲، ۲۸، ۲۶، ۲۳، ۲۱، ۱۹]
م.ا.سا.۷		مشکلات فرایندی و جایگاه سازمانی	[۳۱، ۲۷، ۲۶، ۲۲، ۲۱، ۱۹]
م.ا.سا.۸		عدم تمایل به اشتراک داده ها	[۲۱ و ۳]
م.ا.سا.۹		عدم تمایل به کار گروهی	[۳۱ و ۲۱، ۳]
م.ا.سا.۱۰		درک نادرست/ناآگاهی یا ابهام در منافع BIM	[۳۲، ۳۱، ۲۸-۲۶، ۲۳-۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.سا.۱۱		نبود پیمانکاران جزء آشنا با BIM	[۳۲ و ۳۱، ۲۹]
م.ا.سا.۱۲		نبود انگیزه	[۲۷ و ۲۳]
م.ا.قر.۱۳	قراردادی	نبود درخواست، الزام یا مشوق از سوی کارفرما	[۳۲، ۲۹-۲۷، ۲۳، ۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.قر.۱۴		نبود فرمت قراردادی استاندارد	[۲۹ و ۲۷، ۲۶، ۲۱، ۱۹، ۱۳]
م.ا.قر.۱۵		نبود مکانیزم حل اختلاف	[۲۱ و ۱۹]
م.ا.قا.۱۶	قانونی	عدم وجود استانداردهای BIM	[۳۲، ۳۱، ۲۹، ۲۸، ۲۳، ۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.قا.۱۷		نبود الزام قانونی در بهره گیری از BIM	[۲۷ و ۲۶، ۲۳، ۱۹]
م.ا.قا.۱۸		مشکلات مالکیت معنوی	[۳۲، ۲۹، ۲۱، ۱۹، ۱۳]
م.ا.قا.۱۹		عدم حمایت دولت و سیاست گذاران	[۲۹ و ۲۸، ۲۶، ۱۹، ۱۳]
م.ا.قا.۲۰		عدم وجود بیمه پوشش دهنده به کارگیری BIM	[۲۹ و ۲۱، ۱۹]
م.ا.فن.۲۱	فنی	در دسترس نبودن/گران بودن فناوری مربوطه (نرم افزار و سخت افزار)	[۳۲، ۲۹، ۲۷، ۲۶، ۲۲، ۲۱، ۱۹، ۳]
م.ا.فن.۲۲		عدم قابلیت همکاری درونی نرم افزارها	[۳۱ و ۲۹-۲۶، ۱۹، ۳]
م.ا.فن.۲۳		نبود کتابخانه اشیاء پارامتریک	[۲۲ و ۲۱]
م.ا.فن.۲۴		زمان بر و هزینه بر بودن توسعه مدل	[۳۲ و ۲۷، ۲۳، ۲۱، ۱۹]
م.ا.فن.۲۵		تحقیق و توسعه ناکافی	[۲۶ و ۲۱]
م.ا.فن.۲۶		مشکلات کیفیت اطلاعات/خطاها و ضعف های نرم افزارهای BIM	[۲۷ و ۲۶، ۱۹]
م.ا.فن.۲۷		ریسک و به ویژه ریسک امنیت اطلاعات	[۳۱ و ۲۷-۱۹]

فراوانی موانع شناسایی شده در هر دسته در ادبیات

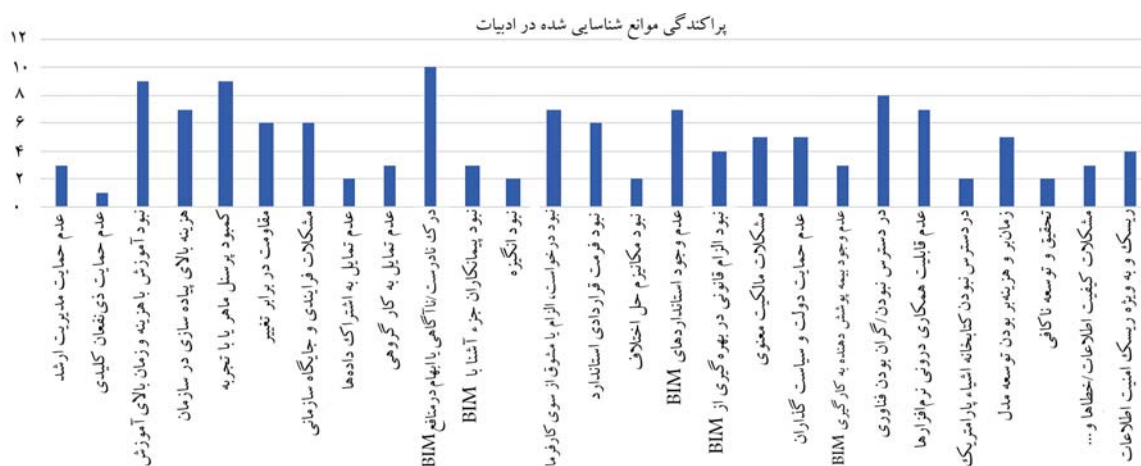


شکل ۱. نمودار فراوانی موانع شناسایی شده در هر یک از دسته های سازمانی - فرهنگی، قراردادی، قانونی - حاکمیتی و فنی.

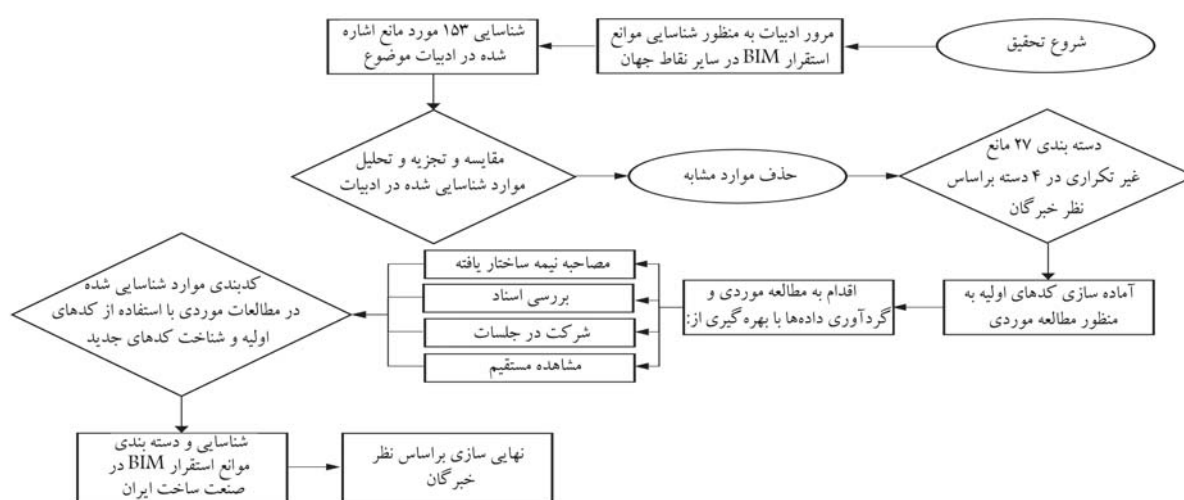
چه سخت افزار، بیشترین تکرار را در ادبیات داشته اند.

در جدول ۱، جمع بندی موانع شناسایی شده در ادبیات موضوع ارائه شده است. آنچه که در جدول ۱ به آن اشاره شده است، به عنوان کدهای اولیه ی پژوهش شناخته شده اند. همچنین کدهای دارای هم پوشانی ذیل یک کد واحد گردآوری شده اند. موانع ادبیات نیز به اختصار کد م.ا. نام گرفته اند.

فراوانی موانع شناسایی شده در ادبیات موضوع در دسته بندی چهارگانه در شکل ۱ و همچنین نمودار پراکنندگی تکرار موانع در ادبیات موضوع در شکل ۲ مشاهده می شوند. سؤال پژوهش حاضر، عبارت از «شناخت موانع پیاده سازی مدل سازی اطلاعات ساخت (BIM) به طور ویژه در پروژه های خصوصی صنعت ساختمان ایران» است. پیش از انجام پژوهش انتظار می رفت برخی از موانعی که در پژوهش حاضر شناسایی شده اند، با برخی موارد از جدول ۱ مشابهت داشته باشند. در عین حال خارج از انتظار نبود که برخی موانع متفاوت نیز شناسایی شوند.



شکل ۲. پراکندگی موانع شناسایی شده در ادبیات موضوع. بیشترین تکرار در ادبیات «درک نادرست/ناآگاهی یا ابهام در منافع BIM» و کمترین تکرار «عدم حمایت ذی‌نفعان کلیدی» بوده است.



شکل ۳. ساختار کلی پژوهش.

۳. روش شناسی پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، ابتدا به مرور ادبیات و شناخت موانع یاد شده در ادبیات در سایر نقاط جهان پرداخته شده است، که جمع‌بندی آن در جدول ۱ ارائه شده است. سپس پژوهشگران برای شناخت موانع مذکور در بستر پروژه‌های ساخت و ساز ایران، دست به مطالعات موردی زده‌اند. مطالعه‌ی موردی از بنیادی‌ترین روش‌های پژوهش کیفی است، که موضوع مورد بررسی را در بستر خود ارزیابی می‌کند و ابزار مناسبی برای کشف مسئله و نظریه‌پردازی است. بین ۱۳ (۱۹۸۱)، [۲۳] مطالعه‌ی موردی را «یک تحقیق عملی که یک پدیده‌ی معاصر را در زمینه‌ی زندگی واقعی آن بررسی می‌کند و به موقعیتی می‌پردازد که در آن مرزهای بین پدیده و زمینه به وضوح مشهود نیست» می‌داند. این راهبرد پژوهشی «شامل نوعی بررسی تفصیلی (همراه با داده‌های اطلاعاتی در یک دوره‌ی زمانی) از یک یا چند سازمان یا از گروه‌های درون‌سازمانی که با هدف ارائه‌ی تحلیلی از زمینه و فرایندهای دخیل در پدیده‌ی مورد بررسی انجام می‌شود» است. [۲۴] چنین روش پژوهشی، ایده‌آل موضوع پژوهش حاضر است. مراحل یک مطالعه‌ی موردی به این شرح است: [۲۵]

۱. بیان مسئله و انتخاب مورد؛
۲. بررسی پیشینه‌ی پژوهش و برنامه‌ریزی برای انجام عملیات میدانی؛
۳. گردآوری داده‌ها و سازمان‌دهی آنها؛
۴. تدوین گزارش پژوهش.

در شکل ۳، ساختار کلی پژوهش مشاهده می‌شود:

۱.۳. مورد مطالعه

در مطالعه‌ی موردی باید شرایط و ویژگی‌های مورد تحت مطالعه تبیین شود. [۲۵] پیچیدگی انجام پژوهش حاضر با توجه به جدید بودن حوزه‌ی BIM، محدود بودن پروژه‌ها و سازمان‌هایی بود که بتوان بر آنها تمرکز کرد و مطالعه‌ی موردی انجام داد. نمونه‌هایی که برای پژوهش حاضر مطالعه شده‌اند، مجموعه‌ی از سازمان‌های درگیر - اعم از کارفرما، مشاوره و پیمانکار - بوده‌اند، که در طراحی، تدارکات و ساخت پروژه‌هایشان از خدمات مدل‌سازی اطلاعات ساخت استفاده کرده‌اند. همچنین موارد مطالعه به میزان کافی گسترده و پیچیده بوده است؛ لذا، کارکرد

جدول ۲. تنوع و تعداد اسناد مورد بررسی در مطالعات موردی.

ردیف	نوع سند	تعداد
۱	قرارداد	۱۲ سند
۲	گزارش‌های هفتگی و ماهانه	۲۰۰۰ سند
۳	نامه‌ها و اعلامیه‌های فنی	۱۰۰۰ سند
۴	شرکت در جلسات	۱۰۰۰ ساعت
۵	سایر اسناد	۴۰۰ سند

۲.۳. گردآوری داده‌ها

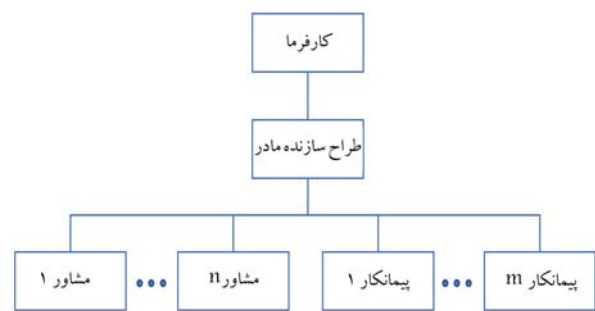
مطالعه‌ی موردی یک راهبرد پژوهشی است که در آن از روش‌های متعددی برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، برای گردآوری داده‌ها از بررسی اسناد، شرکت در جلسات، مصاحبه‌ی نیمه ساختاریافته و مشاهده‌ی مستقیم استفاده شده است. روش نمونه‌گیری برای انجام مصاحبه‌ها، نمونه‌گیری کیفی یا هدفمند بوده است، که در آن می‌توان از افراد، رویدادها و موقعیت‌ها نمونه‌برداری کرد و پژوهشگر با افراد دارای اطلاعات و آگاهی کافی و مناسب در مورد موضوع مورد بررسی یا برخی از ابعاد آن، ارتباط برقرار می‌کند تا اطلاعات مورد نیاز را جمع‌آوری کند و مصاحبه را تا زمانی ادامه می‌دهد که داده‌ها به اشباع برسند. در مجموع، در پژوهش حاضر ۱۴ مصاحبه انجام شده است. علاوه بر مصاحبه، مستندهای پروژه، شامل: گزارش‌های هفتگی، ماهانه و موردی، برخی قراردادهای و صورت جلسات مرتبط نیز بررسی و مطالعه شده‌اند. در جدول ۲، تنوع اسناد مورد بررسی در مطالعات موردی و در جدول ۳، سابقه‌ی کار و جایگاه سازمانی مصاحبه‌شوندگان ارائه شده‌اند.

۳.۳. تحلیل داده‌ها

برای کدگذاری یافته‌ها، رویکرد قیاسی اتخاذ شده است، که در آن با تمرکز بر روی موضوعاتی که در ادبیات موجود مهم شناخته شده‌اند، یک چارچوب از پیش تعریف شده از کدها قبل از شروع کدگذاری داده‌ها ایجاد می‌شود. این رویکرد به ویژه اگر هدف مطالعه، تعمیم تحلیلی برخی مطالعات موردی باشد، یک رویکرد مفید است.^[۳۶] بر این اساس، آنچه در ادبیات جمع‌بندی شده بود و در جدول ۱ به آنها اشاره شده است، به عنوان کدهای اولیه شناخته شده‌اند. جدول ۱، در حکم چارچوب کدگذاری اولیه به پژوهشگران و مصاحبه‌شوندگان برای پیشبرد پژوهش کمک می‌کند.^[۳۷] در گام بعد و پس از انجام مصاحبه‌ها و بررسی اسناد مرتبط با موضوع پژوهش، با رویکرد تحلیل توصیفی^{۲۰} اقدام به کدگذاری داده‌ها در نرم‌افزار ان‌ویو^{۲۱} شده است. سپس کدهای به دست آمده از مطالعه‌ی موردی با کدهای ارائه شده در ادبیات پژوهش مقایسه و با رویکرد کدگذاری الگو^{۲۲} دسته‌بندی شده‌اند.

۴.۳. اعتبارسنجی داده‌ها

گام نخست در اطمینان از اعتبار یافته‌های پژوهش‌های موردی، مربوط به فاز جمع‌آوری داده است. بهره‌گیری از نقاط داده‌ی متعدد^{۲۳} منجر به یافته‌هایی می‌شود که قابل آزمایش و دقیق هستند.^[۳۸، ۳۹] ابزار دیگر مثلث‌بندی^{۲۴} در فاز جمع‌آوری داده‌ها، استفاده از روش‌های مختلف گردآوری داده است.^[۴۰] در پژوهش حاضر، از هر دو روش ذکر شده - یعنی بهره‌گیری از نقاط داده‌ی متعدد و گردآوری داده‌ها از روش‌های مختلف - برای مثلث‌بندی در فاز جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. از بعد اعتبار بیرونی مطالعات موردی، پژوهشگران معتقدند باید از منطق تکرار



شکل ۴. نمودار ساختار سازمانی عوامل پروژه.



شکل ۵. تصاویری از مگاپروژه‌ی مورد مطالعه.

BIM در همه‌ی زمینه‌های تخصصی آن قابل بررسی است. بر این اساس، سازمان‌ها و شرکت‌های فعال در ایران پروژه‌ی^{۱۴} توسعه‌ی غربی ایران‌مال (IMWE)^{۱۵} مطالعه شده است، که مختصری از مشخصات آن در ادامه ذکر شده است. ضروری است مطالعه‌ی موردی به میزان کافی بزرگ باشد، تا بتوان به مقابله‌ی داده‌ها و مقایسه‌ی یافته‌ها پرداخت.^[۳۴] موارد تحت مطالعه‌ی پژوهش حاضر، حائز چنین ویژگی بوده و طی یک قرارداد طرح و ساخت به یک شرکت طراح سازنده‌ی^{۱۶} مادر واگذار شده است. با توجه به اسناد، مگاپروژه‌ی مذکور به ۳ زیرپروژه^{۱۷} تقسیم شده و ساختار سازمانی عوامل پروژه مطابق شکل ۴ بوده است.

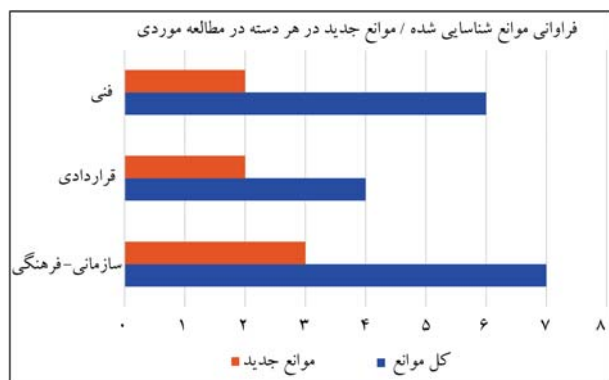
در زیرمجموعه‌ی شرکت طراح سازنده‌ی مادر، ۸۶ مشاور و پیمانکار محلی و بین‌المللی مشغول به فعالیت و تمرکز پژوهش بر سازمان‌ها بوده است. اجرا به صورت طرح و ساخت هم‌زمان^{۱۸} از سال ۱۳۹۵ آغاز شده و زیربنای اولیه‌ی پروژه بالغ بر ۸۰۰/۰۰۰ مترمربع در زمینی به مساحت ۴ هکتار بوده است. مطالعه‌ی حاضر بر پروژه‌ی مذکور از تاریخ شروع آن آغاز شده و شامل بررسی کارکرد مدل‌سازی اطلاعات ساخت در فازهای طراحی، تدارکات و اجرا بوده است. مطابق گزارش‌های کنترل پروژه در اوج کاری پروژه، اجرا در سه شیفت انجام می‌شد و در شیفت‌های روزانه تا ۱۰۰۰ نفر در هر شیفت مشغول بوده‌اند. شرکت طراح - سازنده‌ی مادر طبق قرارداد با کارفرما مکلف بود از مدل‌سازی اطلاعات ساخت استفاده کند. سرعت بالای اجرای پروژه و هم‌زمانی طراحی با اجرای آن، چالشی از منظر مدل‌سازی اطلاعات ساخت بوده است؛ زیرا از طرفی، نیاز به ابزار BIM را بیشتر می‌کرده و از طرفی، فرصت کافی برای ارائه‌ی خروجی‌ها را نمی‌داده است. نقشه‌ی راه پیاده‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BEP)^{۱۹} توسط طراح سازنده‌ی مادر تهیه شده بود. اغلب عوامل مؤلف بودند برای انجام امور محوله، از نقشه‌ی راه تدوین شده (BEP) استفاده کنند. در موارد تحت مطالعه، الزام به استفاده از BIM وجود داشته و به عبارتی مانع «م.ا.ق.ر. ۱۳». نبود درخواست، الزام یا مشوق از سوی کارفرما» مطرح نبوده است. تصاویری از پروژه در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. جایگاه سازمانی و سابقه‌ی کار مصاحبه‌شوندگان.

مصاحبه‌شونده	جایگاه سازمانی (نوع سازمان)	سابقه‌ی کار
م ع ۱	مدیر عامل (پیمانکار)	۱۸ سال
م ع ۲	مدیر عامل (مشاور)	۱۵ سال
م پ ۱	مدیر پروژه (پیمانکار)	۱۷ سال
م پ ۲	مدیر پروژه (مشاور)	۱۶ سال
م م ۱	مدیر مدل‌سازی اطلاعات ساخت ^۱ (طراح سازنده‌ی مادر)	۱۴ سال
م م ۲	مدیر مدل‌سازی اطلاعات ساخت (مشاور)	۷ سال
م ف ۱	مدیر فنی (پیمانکار)	۱۸ سال
م ف ۲	مدیر فنی (پیمانکار)	۱۲ سال
م ا ۱	مدیر اجرایی (طراح سازنده‌ی مادر)	۳۶ سال
م د ۱	مدیر دفتر مدیریت پروژه ^۲ (طراح سازنده‌ی مادر)	۷ سال
م ه ۱	هماهنگ‌کننده‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساخت (پیمانکار)	۵ سال
س م ۱	سرپرست مدل‌سازی (مشاور)	۱۲ سال
س م ۲	سرپرست مدل‌سازی (پیمانکار)	۶ سال
ک م ۱	کارشناس مدل‌سازی اطلاعات ساخت (مشاور)	۴ سال

۱. BIM Manager

۲. PMO



شکل ۶. تعداد موانع شناسایی شده و تعداد موانع جدید در هر دسته در مطالعه‌ی موردی.

اطلاعات، انتظار دستمزد بالای متخصصان BIM و عدم انطباق با نقشه‌ی راه مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BEP) همان‌طور که موانع سازمانی در ادبیات با ۱۲ مورد بیش از سایر دسته‌ها بوده است، در مطالعه‌ی موردی نیز موانع این دسته با ۷ مورد بیش از سایر دسته‌ها بوده است.

- عدم حمایت مدیریت ارشد: این مانع به خصوص در شرکت‌های کوچک (همچون برخی شرکت‌های با پایه‌های ۴ و ۵) مشهود بوده است. بعضاً مشاهده شده است که مدیران ارشد سازمان‌های بزرگ، از استقرار این ابزار مدرن حمایت می‌کردند. به نظر می‌رسد عدم حمایت مدیران ارشد سازمان‌های کوچک از BIM، به تبعاتی بر می‌گردد که استقرار این سیستم بر فرایندهای کاری و پرسنل موجود ایشان داشت. به عبارت دیگر، با توجه به کوچکی سازمان، امکان نهادینه کردن این سیستم جدید را درون سازمان نداشتند. این مانع بیشتر در ادبیات اشاره شده بود (م.ا.سا. ۱۰). عدم حمایت مدیریت ارشد.

- مقاومت در برابر تغییر: به ویژه از آن منظر جالب توجه بود که برخی افراد کلیدی که با تجربه‌ی بالا نیز محسوب می‌شدند؛ از طرفی، سابقه‌ی طولانی در

در نوشتار بین ۲۵ (۲۰۰۹)^[۳۰] و تأیید همکاران پژوهشی^{۲۶}،^[۳۴] بهره برد. در پژوهش حاضر، داده‌های ورودی و یافته‌ها، مکرراً توسط پژوهشگران و شرکت‌کنندگان ارزیابی شدند و به جهت کسب تأیید همکاران پژوهشی، یافته‌ها به خبرگان و برخی افرادی که پیشتر در مصاحبه‌ها شرکت کرده بودند، عرضه شد تا بررسی و تأیید شوند.

۴. یافته‌های پژوهش

موانع شناسایی شده در پژوهش موردی، یافته‌های نهایی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهند. موانع مذکور با کمک خبرگان در همان دسته‌بندی به دست آمده از ادبیات قرار گرفته‌اند. در مجموع، ۱۷ مانع در راستای بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساخت شناسایی شده است. در جدول ۴، موانع شناسایی شده در پژوهش حاضر و دسته‌بندی آنها ارائه شده است. برخی از موانع شناسایی شده در پژوهش حاضر با آنچه پیشتر در مرور ادبیات جمع‌بندی شده بود، دارای شباهت‌هایی بوده و البته، تفاوت‌هایی نیز وجود داشته است که در ادامه، به تفصیل بیان شده‌اند. موانع یافت شده در مطالعه‌ی موردی به صورت م.م. کدگذاری شده‌اند.

موانعی که در مطالعه‌ی حاضر به دست آمده‌اند، بعضاً شباهت‌ها و تفاوت‌هایی با آنچه در ادبیات ذکر شده بود، داشته‌اند. یک تمایز بنیادین این است که دسته‌ی موانع قانونی در مطالعات موردی ما وجود نداشته است، زیرا پروژه‌ها و سازمان‌های مورد مطالعه خصوصی بوده و الزام کارفرما به استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت وجود داشته است.

فراوانی موانع شناسایی شده در مطالعات موردی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۱.۴. موانع سازمانی - فرهنگی

در حوزه‌ی موانع سازمانی - فرهنگی، ۷ مانع شناسایی شده است: عدم حمایت مدیریت ارشد، مقاومت در برابر تغییر، عدم تمایل به اشتراک داده‌ها، عدم استفاده‌ی برخی پیمانکاران جزء از BIM، نبود فرایندهای کاری کارآمد در باره‌ی تولید و گردش

جدول ۴. موانع شناسایی شده در برابر استقرار مدل سازی اطلاعات ساخت در بخش خصوصی صنعت ساخت ایران.

کد	دسته بندی	موانع	شرح	موانع مشابه در ادبیات
م.م.سا.۱		عدم حمایت مدیریت ارشد	عدم حمایت مدیریت ارشد در سازمان ها و شرکت های کوچک مشاهده می شود به نوعی با تبعاتی که استقرار BIM در آن سازمان یا شرکت ایجاد می نمود مرتبط بود.	م.ا.سا.۱. عدم حمایت مدیریت ارشد
م.م.سا.۲		مقاومت در برابر تغییر	با وجود امکان و الزام استفاده از BIM، مقاومت در برابر آن مشهود بود؛ به ویژه از جانب افرادی که در گذشته تجربه طولانی در انجام پروژه ها بدون بهره گیری از BIM داشتند.	م.ا.سا.۶. مقاومت در برابر تغییر
م.م.سا.۳	سازمانی - فرهنگی	عدم تمایل به اشتراک داده ها	عدم تمایل به اشتراک داده ها به جهت ارزش رقابتی آن یا آثار منفی بی که بر منافع فرد/گروه/شرکت منتشر کننده داشته است. تلقی دانش فنی اختصاصی از اطلاعات و نگرانی از آشکار شدن عیوب کار از دلایل عدم تمایل به اشتراک داده ها بوده است.	م.ا.سا.۸. عدم تمایل به اشتراک داده ها
م.م.سا.۴		عدم انجام وظایف تعیین شده در حوزه ی BIM توسط سایرین	عدم انجام وظایف توسط برخی عوامل به ویژه پیمانکاران جزء، بخشی از استقرار BIM در پروژه را تحت الشعاع قرار می داد و مهم این که سایرین را نیز از عمل به وظایف خویش باز می داشت. به ویژه از آن جهت که ضروری بود بخشی از مدل پروژه توسط ایشان تولید شود و خروجی اطلاعاتی ایشان ورودی سایرین بود.	-
م.م.سا.۵		نبود فرایندهای کاری ^۱ کارآمد تولید و گردش اطلاعات	علاوه بر جایگاه سازمانی، فرایندهای کاری نیز برای بهره گیری از BIM ضروریست. فرایندهای تعریف شده BIM در سازمان ها بعضاً پاسخگو نبود، یا دائماً در حال تغییر بود، یا با سایر فرایندهای تشبیه شده سازمان تداخل داشته است.	م.ا.سا.۷. مشکلات فرایندی و جایگاه سازمانی
م.م.سا.۶		انتظار دستمزد بالای متخصصان BIM	با توجه به جدید بودن مفاهیم مدل سازی اطلاعات ساخت، پرسنل ماهر در این حوزه مطالبه دستمزد بیشتری در مقایسه با سایر پرسنل و اشل دستمزدی شرکت داشتند. این موضوع پیامدهای منفی بر روی سایر شئون کاری شرکت ها داشته است.	-
م.م.سا.۷		عدم انطباق با نقشه ی راه مدل سازی اطلاعات ساخت BEF ^۲	برخی عوامل پروژه بدون توجه به نقشه راه و الزامات مدل سازی اقدام به تهیه مدل و انجام وظایف محوله می نمودند که سبب می شد مدل آماده شده کارکرد لازم را نداشته باشد.	-
م.م.قر.۸		نبود چارچوب استاندارد قراردادی برای خدمات BIM	نبود چنین چارچوبی کار تدوین قراردادهای مبتنی بر BIM را طولانی و پیچیده می کرد. در مواردی نبود چنین چارچوبی عملاً منجر به حذف BIM از قراردادها می شد.	م.ا.قر.۱۴. نبود فرمت قراردادی استاندارد
م.م.قر.۹	قراردادی	ارزش کم مشوق ها/جرائم درازای انجام دادن/ندادن وظایف حوزه ی BIM	در مواردی هزینه به خدمت گرفتن BIM توسط عامل بیشتر از جرائم قراردادی بود و از آن صرف نظر می شد.	-
م.م.قر.۱۰		دشواری سنجش پیشرفت کار در شرح خدمات BIM	سنجش پیشرفت خدمات حوزه BIM به ویژه به جهت کیفی بودن، دشوار و زمان بر بود.	-
م.م.قر.۱۱		فقدان مرجع بازرسی و داوری پیرامون دعاوی حوزه ی BIM	بعضاً برداشت های متفاوتی از تکالیف قراردادی حوزه BIM بین عوامل وجود داشت و مرجعی برای رسیدگی به اختلاف ها وجود نداشت	م.ا.قر.۱۵. نبود مکانیزم حل اختلاف

ادامه‌ی جدول ۴.

۱۲.م.م.فن	نبود محیط اشتراک داده کارآمد (CDE) ^۲	نبود چنین زیرساختی، عملاً تبادل اطلاعات بر پایه یک مدل و یک مرکز اطلاعاتی مشترک را به چالش می‌کشد.	-
۱۳.م.م.فن	عدم قابلیت همکاری درونی نرم‌افزارها	با توجه به رواج نرم‌افزارهای تجاری متعدد در حوزه BIM، تبادل اطلاعات آنها ضروری است. با این حال، تبادل اطلاعات بعضاً منجر به فروکاستن برخی داده‌ها می‌شود.	م.ا.فن.۲۳. عدم قابلیت همکاری درونی نرم‌افزارها
۱۴.م.م.فن	نبود کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک فنی	چنین گنجینه‌یی از المان‌های آماده برای سرعت بیشتر و هزینه‌ی کمتر مدل‌سازی ضروری است. نبود آن و در نتیجه صرف زمان و هزینه بیشتر، بعضاً کارآمدی BIM را کاهش می‌داد.	م.ا.فن.۲۳. نبود کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک
۱۵.م.م.فن	محدودیت‌های فنی در نرم‌افزارهای BIM	نرم‌افزارهای BIM هنوز فاصله زیادی تا کارکرد مطلوب دارند. کاربران حرفه‌یی، با بهره‌گیری از کدنویسی‌های اختصاصی، افزونه‌ها و رابط برنامه‌نویسی کاربردی سعی می‌کردند بر محدودیت‌های نرم‌افزارها غلبه کنند. گرچه همواره صرفه ندارد.	م.ا.فن.۲۶. مشکلات کیفیت اطلاعات/خطاها و ضعف‌های نرم‌افزارهای BIM
۱۶.م.م.فن	صرف زمان بیشتر برای توسعه‌ی مدل در مقایسه با روش‌های سنتی	در مواقعی نیاز اطلاعاتی مدیران برای تصمیم‌سازی، از غیر طریق مدل‌سازی اطلاعات ساخت سریع تر به دست می‌آمد. به ویژه اگر مدل‌سازی صرفاً یک هدف (مثلاً فقط متره یا فقط تجمیع نقشه‌ها) بود.	م.ا.فن.۲۴. زمان‌بر و هزینه‌بر بودن توسعه‌ی مدل
۱۷.م.م.فن	مشکلات پهنای باند	با توجه به محدودیت اتصال اینترنتی، دسترسی به مرکز اطلاعات پروژه از سایر محل‌های جغرافیایی - به ویژه برای شرکت‌های خارجی - بر بستر اینترنت دشوار بود.	-

۱. Workflow

۲. Common Data Environment

یک پارچگی اقدام می‌کنند، نیز نمی‌توانند از مدل‌سازی اطلاعات ساخت بهره‌ی لازم را ببرند. با وجود پذیرش عمومی منافع BIM بین عوامل پروژه، با توجه به گستردگی عوامل و افراد درگیر در پروژه که بیشتر آمار آن ذکر شده است، برخی از عوامل و به ویژه پیمانکاران جزء، وظایف خود را در این حوزه انجام نمی‌دادند. این مانع از این جهت جالب توجه است که عدم انجام وظایف توسط ایشان، سایرین را نیز هم در انجام وظایف و هم در بهره‌گیری از منافع BIM دچار اختلال می‌کرد. چه این‌که پیمانکاران مذکور بعضاً وظایف مهمی در تولید اطلاعات مورد استفاده توسط سایرین داشتند و خروجی وظایف ایشان در حوزه‌ی BIM، ورودی دیگران بود. این موضوع نشان داد آگاهی و انجام وظایف حوزه‌ی BIM توسط مدیران سازمان‌های بالادستی برای استقرار جامع آن در پروژه کفایت نمی‌کند. بلکه باید همه‌ی عوامل مطابق با نقشه‌ی راه تدوین شده، وظایف خود را به درستی انجام دهند. این مانع شبیه «م.ا.سا.۱۱. نبود پیمانکاران جزء آشنا با BIM» است. با این تفاوت مهم که صرف‌نظر از آشنایی یا عدم آشنایی پیمانکاران جزء نسبت به مدل‌سازی اطلاعات ساخت، عدم انجام وظایف توسط برخی، در عملکرد سایرین نیز اثر می‌گذاشت. لذا این مانع در ادبیات قبلاً به این شکل اشاره نشده است.

- نبود فرایندهای کاری کارآمد در باره‌ی تولید و گردش اطلاعات: هر چند در نمونه‌های مورد مطالعه، مطابق نقشه‌ی راه BIM، فرایندهای کاری به طور مکتوب تعریف و ابلاغ شده بود، این فرایندها کاملاً جواب‌گوی همه‌ی رخدادهای پروژه

اجرای پروژه‌ها بدون بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساخت را داشتند و از طرف دیگر، با توجه به عدم تسلط بر BIM، در برابر پیاده‌سازی ابزاری که بر آن تسلط نداشتند و تغییر روش‌های اجرای پروژه، مقاومت می‌کردند. این مانع پیشتر نیز در ادبیات مفصلاً اشاره شده است (م.ا.سا.۶. مقاومت در برابر تغییر).

- عدم تمایل به اشتراک داده‌ها: در برخی شرکت‌ها با وجود فراهم بودن زیرساخت‌های تبادل اطلاعات و با وجود پرسنل ماهر در زمینه‌ی تبادل اطلاعات، یکی از موانع مهم در برابر گردش اطلاعات بین عوامل پروژه، ارزش رقابتی اطلاعات است. در مواقعی مشاهده شده است که برخی افراد/گروه‌ها/شرکت‌ها، به جهت برخی منافع یا بهره‌گیری‌های آتی، مانع ارائه‌ی اطلاعات حوزه‌ی تحت امر خود در بستر مدل‌سازی اطلاعات ساخت می‌شدند. در یک مورد، شرکتی معتقد بود اطلاعات محصولاتی، دانش فنی اختصاصی خودش است و نباید آن را با سایرین به اشتراک گذارد و از ارائه‌ی آن بر بستر BIM امتناع می‌کرد. در مورد دیگری، به جهت خطاهای اجرایی، پیمانکار از ارائه‌ی مدل مانند ساخت، سر باز می‌زد. این مانع پیشتر در ادبیات نیز اشاره شده است (م.ا.سا.۸. عدم تمایل به اشتراک داده‌ها).
- عدم انجام وظایف تعیین شده در حوزه‌ی BIM توسط سایرین: کارکرد مهم BIM، تأمین بستر یک‌پارچگی پروژه است. بنابراین، در صورتی که برخی عوامل پروژه از ارائه‌ی اطلاعات و ادای سهم خود در تأمین یک‌پارچگی خودداری کنند، سایر عواملی که در چارچوب وظایف خود در ارائه‌ی اطلاعات و تأمین

۲.۴. موانع قراردادی

در بخش حاضر، نیز ۴ مانع شناسایی شده است. نکته‌ی مهم در حوزه‌ی موانع قراردادی، این است که در بسیاری از قراردادهای مورد مطالعه، پیوست شرح خدمات BIM وجود داشته است. با این حال، نبود چارچوب استاندارد قراردادی برای خدمات مدل‌سازی اطلاعات ساخت، ارزش کم مشوق‌ها/جرائم در اداء انجام دادن/ندادن وظایف حوزه‌ی BIM، دشواری سنجش پیشرفت کار در شرح خدمات BIM و فقدان مرجع رسیدگی و داوری پیرامون دعاوی احتمالی حوزه‌ی BIM، موانع شناسایی شده در حوزه‌ی موانع قراردادی بوده‌اند. بیشتر در ادبیات موضوع، سه مانع قراردادی شناسایی شده‌اند که در این بین «م.ا.قر.۱۳» نبود درخواست، الزام یا مشوق از سوی کارفرما» با توجه به این‌که در پژوهش حاضر، پروژه‌های خصوصی مورد مطالعه بوده‌اند، وجود نداشته است. بلکه چنین درخواستی، الزام و مشوق‌هایی از جانب کارفرما تعریف شده بود. دو مانع دیگر اشاره شده در ادبیات به همراه دو مانع جدید در مطالعات موردی مشاهده شده است، که در ادامه تشریح شده‌اند:

- نبود چارچوب استاندارد قراردادی برای خدمات BIM: نبود چارچوب ذکر شده، تدوین پیوست شرح خدمات BIM قراردادهای را دشوار و شخصی^{۲۷} می‌ساخت و چالش‌هایی را بر سر راه پذیرش پیوست‌های BIM ایجاد می‌کرد. مشاهده شد در مواردی از پیوست‌های پیشنهاد شده توسط مؤسسه‌ی معماران آمریکایی (AIA) ۲۸ همچون AIA E ۲۰۳-۲۰۱۳ و AIA G ۲۰۲-۲۰۱۳ در قراردادهای مشاوران خارجی - استفاده می‌شود. با این حال، به ویژه مدیران بخش قراردادی شرکت‌ها، نبود چنین پیوستی در سیستم قراردادهای کشور را از موانع استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌ها می‌دانستند. مانع ذکر شده در ادبیات نیز شناسایی شده است (م.ا.قر.۱۴). نبود فرمت قراردادی استاندارد).

- ارزش کم مشوق‌ها/جرائم در اداء انجام دادن/ندادن وظایف حوزه‌ی BIM: این مانع سبب می‌شد که در بعضی موارد، عوامل پروژه از منافع قراردادی و ریالی‌شان به اداء اجرای BIM بگذرند و وظایف محوله را انجام ندهند. مشاهده شد برخی از عوامل با وجود تکالیف قراردادی و امکان عمل به تعهدات مرتبط، چنین رویکردی را در پیش می‌گرفتند. مانع ذکر شده، بیشتر در ادبیات مشاهده نشده بود.

- دشواری سنجش پیشرفت کار در شرح خدمات BIM: چنین مشکلی باعث بروز اختلاف در سنجش کارهای انجام شده و کارهای باقی‌مانده می‌شود. خروجی‌های قراردادی مدل‌سازی اطلاعات ساخت، هم کُشی و هم کیفی هستند و این موضوع دشواری سنجش را بیشتر می‌کند. این مانع بیشتر در ادبیات مشاهده نشده بود.

- فقدان مرجع رسیدگی و داوری پیرامون دعاوی حوزه‌ی BIM: هر چند مفهوم سطح توسعه (LOD) ۲۹ کمک می‌کند برنامه‌ی تفصیلی برای تولید و گردش اطلاعات در پروژه تدوین شود و پس از آن نیز مبنای سنجش پیشرفت مدل‌ها باشد.^{۲۱ و ۲۲} در عمل تعاریف ارائه شده برای هر سطح از جزئیات امکان تفسیر دارد و مشاهده شد بعضاً طرفین قرارداد در تعبیر و تفسیر آن، درک متفاوتی دارند. در مواردی که طرفین دچار ادعا و اختلاف در وظایف قراردادی می‌شوند، مرجعی برای رسیدگی به این دعاوی وجود ندارد و بعضاً وظایف حوزه‌ی BIM پس از رسیدن به اختلاف دیگر ادامه نمی‌یابد. این مانع در ادبیات نیز شناسایی شده بود (م.ا.قر.۱۵). نبود مکانیزم حل اختلاف).

- به ویژه در رخدادهای غیرمعمول و نادر - نبودند و مشاهده شد افراد مسئول در حوزه‌ی اطلاعات و مدل‌سازی اطلاعات ساخت، در برخی مواقع نسبت به چگونگی روال‌های کاری و گردش اطلاعات دچار ابهام می‌شدند. این موضوع از این نظر که تجربه‌ی کافی از پروژه‌هایی که مدل‌سازی اطلاعات ساخت را به خدمت گرفته‌اند وجود ندارد، قابل درک بود. فرایندهای تعریف شده‌ی BIM در سازمان‌ها، بعضاً پاسخگو نبود، یا بیش از حد در حال تغییر بود، یا با سایر فرایندهای تثبیت شده‌ی سازمان تداخل داشت. این مانع بیشتر در ادبیات نیز اشاره شده بود (م.ا.سا.۷). مشکلات فرایندی و جایگاه سازمانی).

- انتظار دستمزد بالای متخصصان BIM: هیچ‌کدام از افراد مورد مصاحبه و یا اسناد مورد بررسی، اشاره‌ی به «م.ا.۵.۱. کمبود پرسنل ماهر در حوزه‌ی BIM» نداشته‌اند. در عوض، برخی مدیران از این گلایه‌مند بودند که دستمزد پرسنل BIM بالاتر از سایر پرسنل هم‌ترازشان از نظر تحصیلات و سابقه بوده و نظام دستمزدی شرکت‌ها را به چالش کشیده است. مسئله‌ی حاضر با توجه به جدید بودن تخصص BIM قابل درک است. هر چند موانع هزینه‌ی در ادبیات وجود داشته است (م.ا.سا.۴). هزینه‌ی بالای پیاده‌سازی در سازمان و م.ا.فن.۲۴. زمان‌بر و هزینه‌بر بودن توسعه‌ی مدل، اما مانع اشاره شده بیشتر در ادبیات بدین شکل اشاره نشده بود.

- عدم انطباق با نقشه‌ی راه مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BEP): برخی عوامل پروژه بدون توجه به نقشه‌ی راه و الزامات مدل‌سازی اقدام به تهیه‌ی مدل و انجام وظایف شان می‌کردند، که سبب می‌شد مدل آماده شده کارکرد لازم را نداشته باشد. بعضاً ایشان درک کمیته‌ی از BIM - در حد سه‌بعدی‌سازی - داشتند و عدم تبعیت از BEP پروژه مانع از تحقق برخی کارکردهای BIM می‌شد. هر چند این مانع شبیه (م.ا.سا.۱۰). درک نادرست/ناآگاهی یا ابهام در منافع BIM بود، اما تفاوت مهمی داشت. این‌جا موضوع ابهام در کلیات یا کارآمدی مدل‌سازی اطلاعات ساخت نیست، بلکه عدم انطباق با الزامات مدل‌سازی است. همچنین گرچه مانع اشاره شده سبب ناکارآمدی مدل و عدم امکان استخراج اطلاعات لازم از آن می‌شد، اما نباید آن را با «م.ا.فن.۲۶. مشکلات کیفیت اطلاعات/خطاها و ضعف‌های نرم‌افزارهای BIM» برابر دانست. در م.ا.فن.۲۶، نرم‌افزار مورد استفاده به جهت کاستی‌های ذاتی خود مانع بهره‌گیری درست از BIM می‌شود، اما در مانع مذکور مشکل از نرم‌افزار نیست، بلکه موضوع عدم رعایت الزامات در حین مدل‌سازی است. مانع کنونی، بیشتر در ادبیات اشاره نشده بود.

برخی موانع شناسایی شده در ادبیات در دسته‌ی موانع سازمانی در مطالعه‌های موردی مشاهده نشده است. به طور مثال، «م.ا.سا.۳. نبود آموزش یا هزینه و زمان بالای آموزش» در موارد مطالعه گزارش نشده است. زیرا سازمان‌های مورد مطالعه بیشتر به دنبال جذب نیروهای جدید آشنا به مباحث BIM بوده و کمتر آموزش این مباحث به نیروهای فعلی خود را دنبال کرده‌اند. در مواردی هم که موضوع آموزش سازمانی دانش BIM مطرح بود، شکایتی از گرانی این خدمت گزارش نشده است؛ یا در موضوع آگهی‌های جذب پرسنل ماهر در BIM، مدیران از تعداد داوطلبان راضی بودند و کمبودی از پرسنل ماهر (م.ا.سا.۵.۱). احساس نمی‌شد. در مجموع، هم از ادبیات موضوع و هم از مطالعات موردی چنین بر می‌آید که دسته‌ی موانع سازمانی - فرهنگی، گسترده‌ترین موانع بر سر راه استقرار مدل‌سازی اطلاعات ساخت در صنعت ساختمان است.

۳.۴. موانع فنی

با توجه به استقرار گسترده‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساخت در بین عوامل پروژه، مشکلات فنی ملاحظه شده در بخش حاضر، حالت پیشرفته داشته است. در دسته‌ی موانع فنی، ۶ مانع، شامل: نبود محیط اشتراک داده‌ی کارآمد، عدم قابلیت همکاری درونی نرم‌افزارها، نبود کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک، محدودیت‌های فنی در نرم‌افزارهای BIM، صرف زمان بیشتر برای توسعه‌ی مدل در مقایسه با روش‌های سنتی و مشکلات پهنای باند شناسایی شده است. از بین موانع فنی تبیین شده در ادبیات «م.ا.ف.ن. ۲۶» در دسترس نبودن/گران بودن فناوری مرتبط (نرم‌افزار و سخت‌افزار) در مطالعات موردی وجود نداشته است، که با توجه به تفاوت قیمت نرم‌افزارها در ایران با سایر کشورها قابل درک است. همچنین «م.ا.ف.ن. ۲۵» پژوهش و توسعه‌ی ناکافی» و «م.ا.ف.ن. ۲۷» ریسک و به ویژه ریسک امنیت اطلاعات»، در مطالعات موردی گزارش نشده است.

• **نبود محیط اشتراک داده‌ی کارآمد:** محیط اشتراک داده، «یک مرجع توافق شده برای جمع‌آوری، مدیریت و انتشار اطلاعات از طریق فرایندهای مدیریت شده» است.^[۴۳] محیط اشتراک داده باید شامل قابلیت مدیریت پایگاه داده^{۳۰} برای مدیریت فایل‌ها و فراداده‌ها^{۳۱} و قابلیت صدور اعلامیه‌ی فنی^{۳۲} به‌روزرسانی برای اعضای تیم و حفظ ویرایش‌ها و نسخه‌های قبلی فایل‌ها باشد.^[۱۵] نمونه‌هایی از محیط‌های اشتراک داده توسط شرکت‌های مختلف عرضه شده است. اما مشاهده شد این نمونه‌ها اشکالاتی دارند و هنوز با کارکرد مطلوب فاصله دارند. با بررسی تجارب سایر کشورها مشاهده شد مشکلاتی در استفاده از محیط اشتراک داده در سایر کشورها و پروژه‌ها نیز گزارش شده است.^[۲۵]

• **عدم قابلیت همکاری درونی نرم‌افزارها:** هر چند مبتنی بر نقشه‌ی راه به کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه، نرم‌افزارهای تجاری مورد استفاده از پیش تعیین شده بود و در نتیجه در بین نرم‌افزارهای استفاده شده، یک‌دستی وجود داشت تا از تأثیر این مانع بکاهد، با این حال نمونه‌های متعددی از ضعف تبادل اطلاعات میان نرم‌افزارها کماکان قابل مشاهده بود که سبب تأخیر در زمان مدل‌سازی و بهره‌گیری از منافع آن می‌گشت. مکرراً گزارش می‌شد در تبادل مدل و داده‌ها بین نرم‌افزارهای تجاری برخی اطلاعات فروکاسته می‌شد. این مشکل در نسخه‌های بالاتر نرم‌افزارها کمتر گزارش شده است. این مانع در ادبیات نیز اشاره شده بود (م.ا.ف.ن. ۲۳). عدم قابلیت همکاری درونی نرم‌افزارها.

• **نبود کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک:** کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک که باید شامل اشیاء استفاده شده در پروژه باشد، در کاهش زمان و هزینه‌ی بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساخت بسیار مؤثر است. با توجه به جدید بودن BIM در سراسر دنیا، چنین گنجینه‌ی از آلمان‌های استفاده شده هنوز به میزان لازم توسعه نیافته است. هر چند گزارش‌هایی از این کار در ایران و جهان وجود دارد. این مانع در ادبیات اشاره شده بود (م.ا.ف.ن. ۲۳). نبود کتابخانه‌ی اشیاء پارامتریک).

• **محدودیت‌های فنی در نرم‌افزارهای BIM:** نرم‌افزارهای BIM، هنوز فاصله‌ی زیادی تا کارکرد مطلوب دارند و کاربران با محدودیت‌هایی برای خواسته‌های خود مواجه‌اند. مهم‌ترین پیامد محدودیت‌های مذکور، افزایش زمان پاسخ به نیازهای اطلاعاتی پروژه است. در طول مدت مطالعات پژوهش حاضر مشاهده شد که نسخه‌های جدیدتر نرم‌افزارها شامل به‌روزرسانی و ارتقاء بوده‌اند، تا ضعف‌های مذکور مرتفع شود. در مطالعات موردی مشاهده شد کاربران حرفه‌یی، با بهره‌گیری از کدنویسی‌های اختصاصی، افزونه‌ها^{۳۳} و رابط برنامه‌نویسی کاربردی (API)^{۳۴}

سعی می‌کردند بر محدودیت‌های نرم‌افزارها غلبه کنند. امکان استفاده از افزونه و API برآمده از این قابلیت بنیادین است که نرم‌افزارهای BIM، به جای ذخیره‌ی اطلاعات در قالب خطوط و ترسیم، اطلاعات را در قالب پایگاه داده ذخیره می‌کنند و اجازه می‌دهند کاربران با کدنویسی، داده‌های ذخیره شده را به دلخواه مدیریت کنند. قابلیت ذکر شده از اثر محدودیت‌های نرم‌افزارها می‌کاهد. این مانع در ادبیات نیز اشاره شده بود (م.ا.ف.ن. ۲۶). مشکلات کیفیت اطلاعات/خطاها و ضعف‌های نرم‌افزارهای BIM).

• **صرف زمان بیشتر برای توسعه‌ی مدل در مقایسه با روش‌های سنتی:** این مانع مربوط به مواقعی بود که توسعه‌ی مدل برای پاسخ به برخی نیازهای اطلاعاتی مستلزم صرف زمان و هزینه‌ی بیشتری در مقایسه با روش‌های سنتی بود. در چنین مواقعی مشاهده شد به وضوح افراد با کنار گذاشتن BIM، از روش‌های سنتی برای پاسخ به درخواست‌های اطلاعاتی پروژه استفاده می‌کردند. مانع حاضر به نوعی ضعف نرم‌افزارهای مبتنی بر BIM در ارائه‌ی سریع خدمات اطلاعاتی مورد نیاز پروژه‌ها نیز است. نکته‌ی مهم در این باره، این است که مانع ذکر شده به ویژه زمانی خود را نشان می‌داد که مدل‌سازی فقط برای یک منظور خاص (مثلاً متره کردن به تنهایی، یا فقط کنترل برخورد) انجام می‌شد. به عبارت دیگر، از آن‌جا که مدل‌سازی مستلزم صرف زمان و هزینه است، هنگامی فایده‌مند است که هم‌زمان چند کاربرد مختلف BIM هدف‌گذاری شود. این مانع به نحوی در ادبیات پیشین به آن اشاره شده بود (م.ا.ف.ن. ۲۴). زمان‌بر و هزینه‌بر بودن توسعه‌ی مدل).

• **مشکلات پهنای باند:** با توجه به ضرورت نگهداری اطلاعات در یک CDE متمرکز و حجم بالای فایل‌های متداول، دسترسی به آن خارج از محل پروژه نیاز به پهنای باند بالا دارد. برخی شرکت‌های بین‌المللی ارائه‌دهنده‌ی نرم‌افزارهای مهندسی ساختمان، فضای ابری CDE نیز ارائه می‌کنند، اما نگرانی از قطع دسترسی‌های احتمالی و همچنین مشکلات پهنای باند، شرکت‌ها را متمایل به استفاده از سرورهای داخلی می‌سازد. در مواردی مشکلات پهنای باند بهره‌گیری از اطلاعات مشترک و مدل را دچار وقفه می‌کرد. این مشکل به ویژه در تعامل با مشاورین خارجی بیشتر بوده است. به این مانع در ادبیات اشاره نشده بود.

۵. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی اطلاعات ساخت به عنوان یک سیستم اطلاعاتی در صنعت ساختمان، که وضعیت موجود و ایده‌آل پروژه را تبیین می‌کند، ابزار مهمی برای تصمیم‌سازی مدیران صنعت ساخت است. با توجه به جدید بودن سیستم مذکور در اجرای پروژه‌ها و کندی حوزه‌ی مهندسی ساختمان در پذیرش ابزارهای جدید، موانعی در پیاده‌سازی آن در پروژه‌ها وجود دارد. با مطالعه‌ی ادبیات و با عنایت به جدول ۱ مشخص شد که موانع اخیر در جوامع مختلف یکسان نیستند. لذا برای شناخت موانع در جامعه‌ی ایران، به یک پژوهش کیفی نیاز بود. پژوهش حاضر، به مثابه‌ی یک پژوهش کیفی دست اول، موانع استقرار مدل‌سازی اطلاعات ساخت را به متخصصان حوزه‌ی مدیریت پروژه‌های ساختمانی کشور ایران معرفی می‌کند. نکته‌ی مهم این است که پژوهشگران در پژوهش حاضر به دنبال یافتن موانع جدید و خاص در بخش خصوصی صنعت ساخت ایران بودند و به همین منظور دست به یک پژوهش کیفی زدند. لذا، نبود آن دسته از موانع که در ادبیات مورد اشاره قرار داشته‌اند، اما در مطالعات موردی وجود

حاضر می‌توان پژوهش‌های کمی دیگری را ترتیب داد تا گستره‌ی اثر هر یک از موانع ذکر شده را در پروژه‌های صنعت ساخت کشور سنجید. در مواردی که مشابهت‌هایی بین موانع شناسایی شده در ایران با سایر کشورها وجود دارد، می‌توان انتظار داشت راهکارهای مشابهی برای غلبه بر موانع با آنچه در سایر نقاط جهان پیشنهاد شده است، به کار آید. در هر حال، راه‌حل‌های غلبه بر موانع اشاره شده، خود می‌تواند موضوع پژوهش مستقلی باشد.

نداشته‌اند، به این معنا نیست که آن دسته از موانع لزوماً در صنعت ساخت ایران هیچ جایگاهی ندارند. در نتیجه، در پژوهش حاضر، ۱۷ مانع در برابر استقرار BIM در بخش خصوصی صنعت ساخت ایران شناسایی شده است، که ۷ مورد از آن پیشتر در ادبیات ذکر نشده بود. در بُعد صنعت، شناسایی موانع، گام بنیادین برای رفع آن و پیشینه‌سازی منافع مدل‌سازی اطلاعات ساخت در پروژه‌هاست. در بُعد آکادمیک، بر پایه‌ی پژوهش

پانوشته‌ها

1. Fragmentation
2. Building Information Modelling
3. Socio-Technical
4. General Contractor
5. Durdjev
6. Tan Tan
7. Systematic Literature Review
8. Ma
9. Olanrewaju
10. Memon
11. Chan
12. Insufficient Interoperability
13. Yin
14. Mega-Project
15. Iran Mall West Expansion (IMWE)
16. Designe-BUILDER
17. Sub-Project
18. Fast Trac
19. BIM Execution Plan (BEP)
20. Descriptive Analysis
21. NVivo
22. Pattern Coding
23. Multiple Date-Point
24. Triangulation
25. Yin
26. Peer Debriefing
27. Subjective
28. American Institute of Architects (AIA)
29. Level of Development (LOD)
30. Database
31. Meta-Data
32. Transmittal
33. Plug-In
34. Application Programming Interface

منابع (References)

1. Santos, R., Costa, A.A. and Grilo, A. "Bibliometric analysis and review of building information modelling literature published between 2005 and 2015", *Autom. Constr.*, **80**, pp. 118-136 (2017).
2. "Strategy for the sustainable competitiveness of the construction sector and its enterprises", *European Commission*, Brussel (2012).
3. Olanrewaju, O.I., Chileshe, N., Babarinde, S.A. and et al. "Investigating the barriers to building information modeling (BIM) implementation within the Nigerian construction industry", *Eng. Constr. Archit. Manag.*, **27**(10), pp. 2931-2958 (2020).
4. <https://www.irna.ir/news/82701496> (Jun 2022).
5. Shahabadi, A. and Ganji, M. "Analysis of factors affecting investment in housing and construction in Iran", *Development Economics and Planning*, **3**(1), pp. 1-21 (2014).
6. Lee, A., Betts, M., Aouad, Gh. and et al. "Developing a vision for an nD modelling tool", *Autom. Constr.*, **20**(2), p. 1051 (Dec 2017).
7. Banawi, A. "Barriers to implement building information modeling (BIM) in public projects in Saudi Arabia", *Adv. Intell. Syst. Comput.*, **600**, pp. 119-125 (2018).
8. Knotten, V., Svaestuen, F., Hansen, G.K. and et al. "Design management in the building process - A review of current literature", *Procedia Econ. Financ.*, **21**, pp. 120-127 (Jan 2015).
9. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and et al. "BIM Handbook", 2nd ed. Hoboken, New Jersey, *John Wiley & Sons Inc.* (2011).
10. Lee, S.K. and Yu, J.H. "Success model of project management information system in construction", *Autom. Constr.*, **25**, pp. 82-93 (2012).
11. Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J. and et al. "Reinventing construction: A route to higher productivity", *McKinsey Global Institute* (2017).
12. Siebelink, S., Voordijk, H., Endedijk, M. and et al. "Understanding barriers to BIM implementation: Their impact across organizational levels in relation to BIM maturity", *Front. Eng. Manag.*, **8**(2), pp. 236-257 (2021).
13. Chen, K., Lu, W., Peng, Y. and et al. "Bridging BIM and building: From a literature review to an integrated conceptual framework", *Int. J. Proj. Manag.*, **33**(6), pp. 1405-1416 (2015).
14. Oesterreich, T.D. and Teuteberg, F. "Behind the scenes: understanding the socio-technical barriers to BIM adoption through the theoretical lens of information systems research", *Technol. Forecast. Soc. Change*, **146**, pp. 413-431 (Jan 2019).

15. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G. and et al. "BIM handbook A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers", *Wiley Publ* (2018).
16. Barlish, K. and Sullivan, K. "How to measure the benefits of BIM - A case study approach", *Autom. Constr.*, **24**, pp. 149-159 (2012).
17. Succar, B. "Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders", *Autom. Constr.*, **18**(3), pp. 357-375 (2009).
18. Issa, R.R.A. and Olbina, S. "Building information modeling applications and practices", *American Society of Civil Engineers* (2015).
19. Zhou, Y., Yang, Y. and Bin Yang, J. "Barriers to BIM implementation strategies in China", *Eng. Constr. Archit. Manag.*, **26**(3), pp. 554-574 (2019).
20. Olanrewaju, O.I., Kineber, A.F., Chileshe, N. and et al. "Modelling the relationship between building information modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle", *Build. Environ.*, **207**(PB), p. 108556 (2022).
21. Tan, T., Chen, K., Xue, F. and et al. "Barriers to building information modeling (BIM) implementation in China's prefabricated construction: An interpretive structural modeling (ISM) approach", *J. Clean. Prod.*, **219**, pp. 949-959 (2019).
22. Memon, A.H., Rahman, I.A., Memon, I. and et al. "BIM in malaysian construction industry: status, advantages, barriers and strategies to enhance the implementation level", *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, **8**(5), pp. 606-614 (2014).
23. Marzouk, M., Elsaay, H. and Othman, A.A.E. "Analysing BIM implementation in the Egyptian construction industry", *Eng. Constr. Archit. Manag* (2021).
24. Fountain, J. and Langar, S. "Building information modeling (BIM) outsourcing among general contractors", *Autom. Constr.*, **95**, pp. 107-117 (2018).
25. NBS, "National BIM report 2019", *Natl. BIM Rep. 2019 Defin. Ind. Updat.*, pp. 1-28 (2019).
26. Durdjev, S., Ashour, M., Connelly, S. and et al. "Barriers to the implementation of building information modelling (BIM) for facility management", *J. Build. Eng.*, **46**, p. 103736, (Nov 2022).
27. Ma, X.D., Darko, A., Chan, A.P.C. and et al. "An empirical analysis of barriers to building information modelling (BIM) implementation in construction projects: evidence from the Chinese context", *Int. J. Constr. Manag.*, **22**(1), pp. 1-9 (2020).
28. Marefat, A., Toosi, H. and Mahmoudi Hasankhanlo, R. "A BIM approach for construction safety: Applications, barriers and solutions", *Eng. Constr. Archit. Manag.*, **26**(9), pp. 1855-1877 (2019).
29. Chan, D.W.M., Olawumi, T.O. and Ho, A.M.L. "Perceived benefits of and barriers to building information modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong", *J. Build. Eng.*, **25**, p. 100764 (2019).
30. Ku, K. and Taiebat, M. "BIM experiences and expectations: The constructors' perspective", *Int. J. Constr. Educ. Res.*, **7**(3), pp. 175-197 (2011).
31. Chan, C.T.W. "Barriers of implementing BIM in construction industry from the designers' perspective: A Hong Kong experience", *ISSN J. Syst. Manag. Sci. J. Syst. Manag. Sci.*, **4**(2), pp. 1816-6075 (2014).
32. Arrotéia, A.V., Freitas, R.C. and Melhado, S.B. "Barriers to BIM adoption in Brazil", *Front. Built Environ.*, **7**, pp. 1-12, (March 2021).
33. Yin, R.K. "The case study crisis: Some answers", *J. Mark. Res.*, **26**(1), pp. 199-208 (1981).
34. Danaee Fard, H., Alvani, S.M. and Azar, A. "Qualitative research methodology in management, domrehensive Approach", *Saffar Press*, **276** Tehran, Iran (In Persian) (1391/2013).
35. Bazargan, A. "An introduction to qualitative and mixed methods", *Didar Press*, pp. 75-76, Tehran, Iran (In Persian) (1392/2014).
36. Hashimov, E. "Qualitative data analysis: A methods sourcebook and the coding manual for qualitative researchers", *Tech. Commun. Q.*, **24**(1), pp. 109-112 (Jan 2015).
37. Skjott Linneberg, M. and Korsgaard, S. "Coding qualitative data: A synthesis guiding the novice", *Qual. Res. J.*, **19**(3), pp. 259-270 (2019).
38. Eisenhardt, K.M. and Graebner, M.E. "Theory building from cases: opportunities and challenges", *Acad. Manag. J.*, **50**(1), pp. 25-32 (2007).
39. Bazely, P. "Qualitative data analysis with NVivo", London: *Sage Publication Inc.* (2007).
40. Yin, R.K. "Case study research: design and methods", *4th ed. Thousand Oaks, CA, US: Sage Publication Inc.* (2009).
41. Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B. and et al. "Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models", *Autom. Constr.*, **20**(5), pp. 601-609 (Aug 2011).
42. Biljecki, F., Ledoux, H. and Stoter, J. "An improved LOD specification for 3D building models", *Comput. Environ. Urban Syst.*, **59**, pp. 25-37 (2016).
43. "ISO - ISO/DIS 19650-3 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — part 3: operational phase of a", [Online] Available: <https://www.iso.org/standard/75109.html>. (Nov 2019).

کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از ژئولیت

علی صرافعی (کارشناس ارشد)

امیرمحمد رمضانپور (دانشیار)

سید مهدی زهرائی* (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۳۹، ۸۱-۹۱، صص. ۲، شمار ۲، ۹۱-۸۱، پژوهشی)

بتن غلتکی در سازه‌های حجیم کاربرد دارد، که به علت حجم زیاد، بتن‌ریزی در چند مرحله و با ایجاد وقفه‌ی زمانی انجام می‌شود. این موضوع باعث بروز درز می‌شود، که کاهش مقاومت فشاری و افزایش نفوذپذیری را به دنبال دارد. اهداف پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با ژئولیت در کاهش آثار مخرب تشکیل درز است. بنابراین ژئولیت با درصد‌های مختلف جایگزین سیمان شد و در هر درصد نیز، نمونه‌ها با انواع درز ساخته شدند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ سریع یون کلراید (RCPT)، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج بیان‌گر نقش بسزای ژئولیت در کاهش آثار مخرب درزهای گرم و سرد در خصوصیات دوامی و همچنین بهبود اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری بوده است.

واژگان کلیدی: ژئولیت، بتن غلتکی، درزهای ساخت (سرد و گرم)، خصوصیات دوامی، خصوصیات مکانیکی.

ali.sarafi@ut.ac.ir
ramezaniyan@ut.ac.ir
mzahrai@ut.ac.ir

۱. مقدمه

بتن غلتکی کم‌سیمان، بتنی با اسلامپ صفر است، که بیشتر حجم آن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند. در مخلوط‌های بتن غلتکی کم‌سیمان، حجم خمیر سیمان جهت کاهش حرارت ناشی از هیدراتاسیون و کاهش ترک‌خوردگی کم است؛ به همین علت، خمیر سیمان قادر به پر کردن همه‌ی فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها نخواهد بود و در نتیجه نفوذپذیری آن زیاد است. همچنین بتن غلتکی عمدتاً در سازه‌های حجیم استفاده می‌شود و در آنها به علت حجم زیاد بتن مصرفی، بتن‌ریزی در چند نوبت زمانی و با ایجاد وقفه صورت می‌گیرد. افزایش زمان وقفه در بتن‌ریزی باعث ایجاد درز در بدنه‌ی سازه‌ها می‌شود، که افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد.^[۱] باید توجه داشت که به دلیل نفوذپذیری بیشتر خمیر سیمان در بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی، آثار منفی درزها نیز در بتن غلتکی بیشتر خواهد بود. این موضوع از نظر ورود یون‌های مخرب به بدنه‌ی بتنی سازه‌ها نامطلوب است، زیرا نفوذ عوامل خرابی از میان نواحی متخلخل موجود در بین درزها به مرور زمان موجب خرابی و کاهش عمر

بتن غلتکی کم‌سیمان، بتنی با اسلامپ صفر است، که بیشتر حجم آن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند. در مخلوط‌های بتن غلتکی کم‌سیمان، حجم خمیر سیمان جهت کاهش حرارت ناشی از هیدراتاسیون و کاهش ترک‌خوردگی کم است؛ به همین علت، خمیر سیمان قادر به پر کردن همه‌ی فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها نخواهد بود و در نتیجه نفوذپذیری آن زیاد است. همچنین بتن غلتکی عمدتاً در سازه‌های حجیم استفاده می‌شود و در آنها به علت حجم زیاد بتن مصرفی، بتن‌ریزی در چند نوبت زمانی و با ایجاد وقفه صورت می‌گیرد. افزایش زمان وقفه در بتن‌ریزی باعث ایجاد درز در بدنه‌ی سازه‌ها می‌شود، که افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد.^[۱] باید توجه داشت که به دلیل نفوذپذیری بیشتر خمیر سیمان در بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی، آثار منفی درزها نیز در بتن غلتکی بیشتر خواهد بود. این موضوع از نظر ورود یون‌های مخرب به بدنه‌ی بتنی سازه‌ها نامطلوب است، زیرا نفوذ عوامل خرابی از میان نواحی متخلخل موجود در بین درزها به مرور زمان موجب خرابی و کاهش عمر

لیو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲] با تهیه‌ی عکس‌های الکترونی از نمونه‌های بتن غلتکی دریافتند که با افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه، در محل درز، حفره‌ها و ترک‌ها بزرگ‌تر می‌شوند، به طوری که در زمان وقفه‌ی ۴۸ ساعته، ترک‌ها به طور واضح قابل مشاهده بودند. کیان و خو^۲ (۲۰۱۸)،^[۳] نیز با اعمال زمان‌های وقفه‌ی صفر ساعت (بدون درز)، ۳ ساعت (درز داغ)، ۶ و ۹ ساعت (درز گرم)، ۱۲ و ۱۵ ساعت (درز سرد) بین اجرای لایه‌های اول و دوم در نمونه‌های بتن غلتکی به این نتیجه رسیدند که افزایش زمان وقفه و تشکیل درز باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود؛ همچنین افزایش زمان وقفه، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. آشکار^۳ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۴] به منظور ایجاد انواع درز در نمونه‌ها، زمان‌های وقفه‌ی ۲، ۱۲ و ۴۸ ساعت را بین اجرای لایه‌های اول و دوم نمونه‌های بتن غلتکی اعمال کردند و دریافتند که وجود درز در کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر بسزایی دارد. از این رو پژوهشگران در خصوص استفاده از مواد مکمل سیمانی به منظور بهبود درزها و کاهش اثر مخرب آنها تحقیقاتی انجام

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61237.3157

استاد به این مقاله:

صرافعی، علی، رمضانپور، امیرمحمد و زهرائی، سید مهدی، ۱۴۰۲. کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از ژئولیت. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۸۱-۹۱.

منفی درزهای به وجود آمده در سازه‌های موجود در پروژه‌های عمرانی استفاده شود.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

۱.۱.۲. سنگدانه

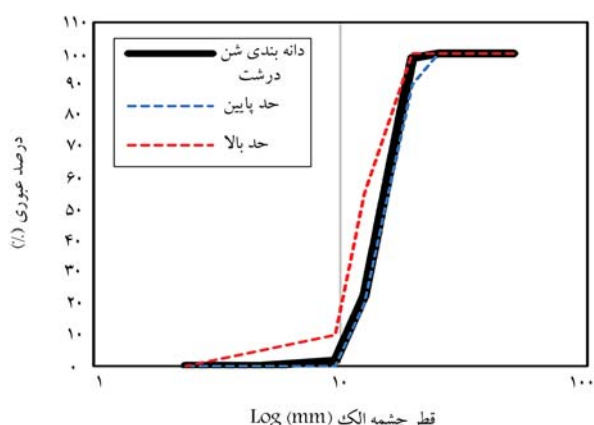
سنگدانه‌های مصرفی شامل شن (درشت و ریز) و ماسه‌ی شسته بودند. در شکل‌های ۱ الی ۳، منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. در جدول ۱، نیز مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی ارائه شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C ۱۳۶^[۱۳] و تعیین درصد جذب آب درشت دانه و ریزدانه نیز به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C ۱۲۷^[۱۴] و ASTM C ۱۲۸^[۱۵] انجام شده است.

۲.۱.۲. سیمان و پوزولان

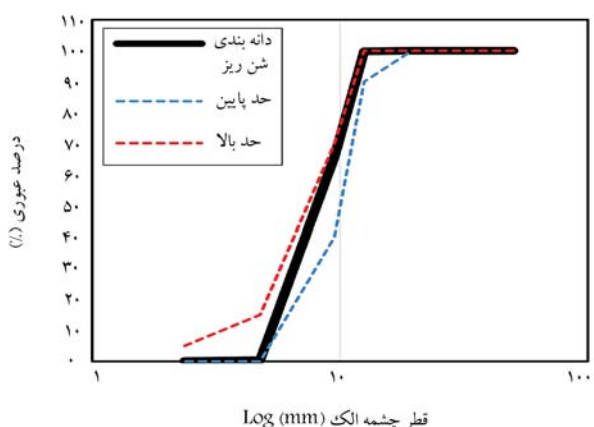
سیمان مصرفی، سیمان تیپ II و پوزولان استفاده شده در پژوهش حاضر، زئولیت طبیعی بوده است. نتایج آنالیز شیمیایی (XRF) سیمان و زئولیت در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۱.۲. آب و افزودنی‌های شیمیایی

در طرح اختلاط بتن‌ها از آب آشامیدنی شهر تهران استفاده شده است. همچنین فوق روان‌کننده به کار برده شده با پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اثر بوده است.



شکل ۱. دانه‌بندی شن درشت.



شکل ۲. دانه‌بندی شن ریز.

داده‌اند، لیو و همکاران (۲۰۱۸)^[۲] دریافتند که اجرای یک لایه‌ی ملات سیمانی حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس در محل یک درز ۴۸ ساعته باعث افزایش مقاومت برشی و بهبود ریزساختار بتن غلتکی در محل درز می‌شود و اثر منفی درز در خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. ژو^۹ و همکاران (۲۰۲۰)^[۵] در پژوهش خود ابتدا به منظور ایجاد درز در نمونه‌های بتن غلتکی، بین اجرای لایه‌های اول و دوم نمونه‌ها، ۴۸ ساعت وقفه‌ی زمانی اعمال کردند. سپس با اجرای یک لایه‌ی ملات سیمانی به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر حاوی پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستر بادی در محل درزهای بتن غلتکی توانستند مقاومت برشی در محل درزهای به وجود آمده را افزایش دهند، همچنین آنها مشاهده کردند که اجرای لایه‌ی ملات سیمانی اخیر باعث کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی دارای درز می‌شود. بایگرا^۵ و همکاران (۲۰۲۲)^[۶] نیز دریافتند که اجرای یک لایه ملات در محل درز سرد و همچنین جایگزین کردن بخشی از سنگدانه‌ها با خاکستر بادی در طرح اختلاط بتن غلتکی، یک راهکار مناسب برای غلبه بر آثار مخرب درز سرد است و باعث بهبود قابل توجه خصوصیات دوامی بتن غلتکی دارای درز می‌شود. همچنین لو^۶ و همکاران (۲۰۲۲)^[۷] در پژوهش خود با اجرای ملات سیمانی و همچنین اجرای یک نوع از مواد چسبنده در محل درزهای بتن غلتکی توانستند خواص بتن غلتکی در محل درزهای به وجود آمده را بهبود ببخشند، سختی شکست در محل درزها نیز افزایش یافت. در پژوهش کریم‌پور^۷ (۲۰۱۰)^[۸] با جایگزین کردن بخشی از سیمان با سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی در مخلوط بتن غلتکی، نه تنها آثار منفی افزایش زمان وقفه بین فرایند اختلاط و تراکم بتن کاهش یافته است، بلکه در مقاومت فشاری و نفوذپذیری نیز بهبود چشمگیری مشاهده شده است.

در پژوهش‌های پیشین، در خصوص نقش زئولیت در کاهش آثار مخرب درزهای بتن غلتکی کار نشده است، از این رو در پژوهش حاضر، تأثیر آن بررسی شده است. زئولیت یک آلومینوسیلیکات^۸ هیدراته از کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی است، که به دلیل وجود مقادیر زیادی آلومینیوم اکسید و سیلیس فعال در ترکیب آن، به خوبی می‌تواند با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراتاسیون واکنش دهد و ریزساختار بتن را بهبود ببخشد.^[۹] نتایج مطالعات اخیر حاکی از سازگاری بیشتر این ماده‌ی مکمل سیمانی با محیط زیست نسبت به سایر پوزولان‌هاست.^[۱۰] پژوهشگران در سال‌های اخیر در رابطه با تأثیر زئولیت در بهبود خصوصیات دوامی و مکانیکی بتن معمولی به نتایج مطلوبی دست یافته‌اند، ولی‌پور^۹ و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۱] با جایگزین کردن سیمان با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت دریافتند که سطوح جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد، نفوذ یون کلراید را به شدت کاهش می‌دهد. احمدی و شکرچی‌زاده^{۱۰} (۲۰۱۰)^[۹] نیز با جایگزینی سیمان با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد زئولیت به این نتیجه رسیدند که در سطوح جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد سیمان با زئولیت، نفوذ یون کلراید کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد سیمان با زئولیت علاوه بر کاهش نفوذ یون کلر در کاهش عمق نفوذ آب در نمونه‌ها نیز مؤثر است.^[۱۱] در پژوهش‌های دیگر در سال ۲۰۱۵ نیز نتایج مشابه در خصوص سطح جایگزینی ۱۵٪ برای زئولیت به دست آمده است.^[۱۲] بنابراین انتظار می‌رود زئولیت در خواص بتن غلتکی بهبود ایجاد کند و باعث کاهش اثر مخرب درزها شود. از این رو در پژوهش حاضر، نمونه‌های بتن غلتکی با جایگزینی ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد زئولیت ساخته و در هر درصد جایگزینی نیز در نمونه‌ها درزهای داغ، گرم و سرد اعمال شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی قرار گرفتند. امید است از نتایج پژوهش حاضر در کاهش آثار

دو لایه به میرانی باشد که نفوذ سنگدانه از لایه‌ی بالایی به درون لایه‌ی زیرین وجود نداشته و لایه‌ی زیرین هنوز به گیرش نهایی نرسیده باشد. درز سرد، که یک درز ضعیف اجرایی است و هنگامی پدید می‌آید که فاصله‌ی زمانی بین اجرای لایه‌ها آنقدر زیاد شود که بتن گیرش خود را آغاز کند، در نتیجه پیوستگی دو لایه‌ی آن کم خواهد بود. در پژوهش حاضر، نمونه‌های هر طرح در دو لایه‌ی ۷/۵ سانتی‌متری اجرا شدند و به منظور ایجاد درزهای داغ، گرم و سرد بین اجرای لایه‌های اول و دوم به ترتیب زمان‌های وقفه‌ی ۳۰ دقیقه، ۲ ساعت و ۲۴ ساعت اعمال شد و هر لایه تحت وزنه‌ی همراه با لرزش میز لرزه تراکم یافت. نمونه‌های ساخته شده تا رسیدن سن مورد نظر آزمایش در حوضچه‌ی آب آهک اشباع تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. نمونه‌های هر یک از ۴ طرح مخلوط با سه نوع درز ساخته شدند، که عنوان هر یک از ۱۲ طرح در جدول ۴ ارائه شده است.

۴.۲. روش آزمایش‌ها

۴.۲.۱. آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C۳۱۱ [۱۶] و به منظور تعیین واکنش پذیری ژئولیت انجام شده است.

۴.۲.۲. آزمایش زمان وی بی

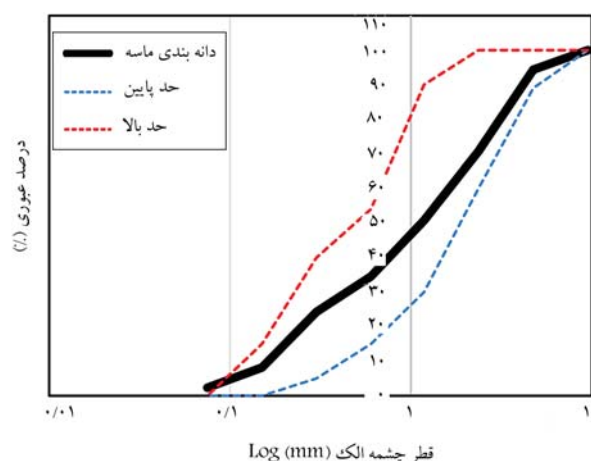
به منظور ارزیابی کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی، آزمایش زمان وی بی مطابق با استاندارد ASTM C۱۱۷۰ [۱۷] انجام شده است. بتن تازه در داخل ظرف استوانه‌یی به وسیله‌ی وزنه و لرزش میز شروع به متراکم شدن کرد. لرزش میز به صورت ارتعاش سینوسی با بسامد ۶۰ هرتز و با دامنه‌ی ۸/۰ ± ۴۳/۰ میلی‌متر بوده است. از زمان روشن شدن میز لرزه تا زمانی که بتن در دور تا دور فضای حلقوی بین ظرف و وزنه شروع به بالا آمدن کند، به وسیله‌ی زمان‌سنج ثبت شده است، که به عنوان زمان وی بی در نظر گرفته می‌شود، که معیاری برای سنجش کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی است.

۴.۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C۳۹ [۱۸] انجام شده است، که در آن نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز آزمایش شدند. در آزمایش کنونی، ۲۴ نمونه برای هر سن ساخته شد، که شامل ۴ درصد مختلف ژئولیت و انواع درز بودند.

۴.۲.۴. آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید (RCPT)

آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۰۲ [۱۹] انجام شده است. به منظور انجام آزمایش حاضر، ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته شد، که شامل ۶ نمونه طرح ۰٪ ژئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ ژئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد بودند. ابتدا از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری که به سن ۲۸ روز رسیده بودند، مغزه‌هایی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر گرفته شد. به طوری که درزهای داغ، گرم و سرد، که در داخل نمونه‌ها اعمال شده بودند، عمود بر سطح مقطع دایره‌یی مغزه‌ها قرار داشتند. در مرحله‌ی بعد، مغزه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط خلأ قرار گرفتند، سپس هر کدام از دو انتهای مغزه‌ها در تماس با یک محفظه قرار داده شدند، که در یکی از محفظه‌ها محلول ۳٪ کلراید سدیم (NaCl) ریخته و به قطب منفی وصل شد و در محفظه‌ی دیگر نیز محلول ۳/۰ (NaOH) ریخته و به قطب مثبت وصل شد. پس از آن مطابق شکل ۴، دو سر مغزه‌ها به مدت ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت قرار گرفتند، تا جریان الکتریکی بین دو سر مغزه‌ها در اثر این اختلاف پتانسیل برقرار



شکل ۳. دانه بندی ماسه.

جدول ۱. مشخصات فنی سنگدانه‌های مصرفی.

سنگدانه	درصد جذب آب	وزن مخصوص (چگالی نسبی)
شن درشت	۱/۷۸	۲/۵۷
شن ریز	۱/۹۹	۲/۵۹
ماسه	۲/۲۹	۲/۵۴

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان و ژئولیت.

ترکیب شیمیایی	سیمان (%)	ژئولیت (%)
SiO ₂	۲۰/۱۸	۶۴/۹
Al ₂ O ₃	۳/۷۸	۱۲/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۷۹	۰/۴
CaO	۶۴/۰۷	۲/۱
MgO	۱/۲۳	۰/۹
SO ₃	۳/۶	۰/۲
Na ₂ O	۱/۳۶	۲/۲
K ₂ O	۰/۹۶	۲/۸

۲.۲. طرح اختلاط

در پژوهش حاضر، ۴ طرح مخلوط بتن غلتکی در نظر گرفته شده است. به این صورت که ژئولیت با ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین وزن سیمان شد (در جدول ۳ طرح مخلوط ارائه شده است). به منظور ساخت طرح‌های بتنی، ابتدا شن، ماسه، سیمان و ژئولیت در داخل مخزن مخلوط کن مخلوط شدند، سپس آب و فوق روان‌کننده به مخلوط بتنی اضافه شد. از زمان اضافه کردن آب به مخلوط، مصالح به مدت ۴ دقیقه توسط مخلوط کن مخلوط شدند. همچنین در هر طرح مخلوط، ۱۰۰ گرم فوق روان‌کننده با پایه‌ی پلی کربوکسیلات اتر استفاده شده است.

۳.۲. ساخت نمونه‌های بتنی

در پژوهش حاضر، از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری استفاده شده است. درز داغ هنگامی پدید می‌آید که لایه‌ی بالایی پیش از گیرش لایه‌ی پایینی اجرا شود، در این صورت سنگدانه‌های لایه‌ی بالایی در لایه‌ی زیرین نفوذ می‌کند و دو لایه به یکدیگر پیوسته می‌شوند. درز گرم هنگامی پدید می‌آید که فاصله‌ی زمانی بین اجرای

جدول ۳. طرح‌های مخلوط بتن غلتکی.

عنوان طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg/m ^۳)	زئولیت (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	شن درشت (kg/m ^۳)	شن ریز (kg/m ^۳)	ماسه (kg/m ^۳)	فوق روان‌کننده (%)
Z ^۰	۰/۷۲	۲۰۸	۰	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۱۵}	۰/۷۲	۱۷۶/۸	۳۱/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۳۰}	۰/۷۲	۱۴۵/۶	۶۲/۴	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶
Z ^{۴۰}	۰/۷۲	۱۲۴/۸	۸۳/۲	۱۵۱	۵۱۳/۷۵	۵۱۳/۷۵	۱۰۲۷/۵	۰/۶



شکل ۵. قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش عمق نفوذ آب.

کاملاً خشک شوند. سپس وزن آنها به عنوان وزن خشک نمونه‌ها ثبت شد (m_0). در مرحله‌ی بعد، نمونه‌ها داخل آب قرار گرفتند و وزن آنها پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان قرارگیری در آب ثبت شد (m). در نهایت، درصد جذب آب بتن مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$\text{درصد جذب آب بتن} = \left(\frac{m - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

۷.۴.۲. آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (چگالی بتن)

آزمایش وزن مخصوص بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C1۳۸^[۲۲] انجام شد. سپس به وسیله‌ی حجم ظرف استوانه‌یی، وزن مخصوص بتن تازه مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه شد:

$$\text{وزن ظرف خالی} - \text{وزن ظرف حاوی بتن} = \text{وزن مخصوص بتن تازه} \times \text{حجم ظرف استوانه‌یی} \quad (2)$$

۸.۴.۲. آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

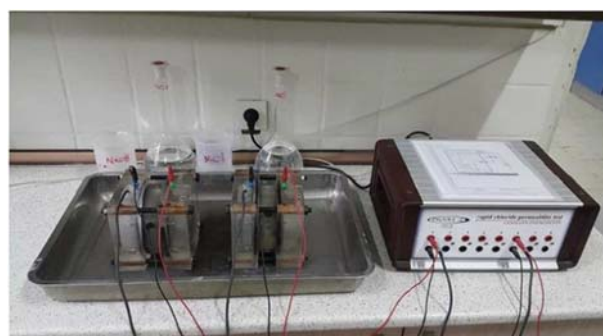
آزمایش حاضر مطابق با استاندارد ASTM C5۹۷^[۲۳] بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) در سن ۲۸ روز انجام شده است. مطابق شکل ۶، مبدل‌های دستگاه اولتراسونیک بر روی دو وجه روبه‌رویی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (به دو صورت موازی و عمود بر صفحه‌ی درزها) قرار داده شدند. سرعت عبور موج از داخل نمونه‌ها بر حسب واحد m/s ثبت شده است.

۹.۴.۲. آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) انجام شده است. مطابق شکل ۷، مقاومت الکتریکی بتن توسط دستگاه بر حسب واحد $k\Omega \cdot cm$ ثبت شده است.

جدول ۴. عنوان طرح‌های مخلوط بتن غلتکی.

Z ^{۴۰}	Z ^{۳۰}	Z ^{۱۵}	Z ^۰	
Z ^{۴۰} -۰/۵h	Z ^{۳۰} -۰/۵h	Z ^{۱۵} -۰/۵h	Z ^۰ -۰/۵h	H
Z ^{۴۰} -۲h	Z ^{۳۰} -۲h	Z ^{۱۵} -۲h	Z ^۰ -۲h	W
Z ^{۴۰} -۲۴h	Z ^{۳۰} -۲۴h	Z ^{۱۵} -۲۴h	Z ^۰ -۲۴h	C



شکل ۴. دستگاه آزمایش RCPT.

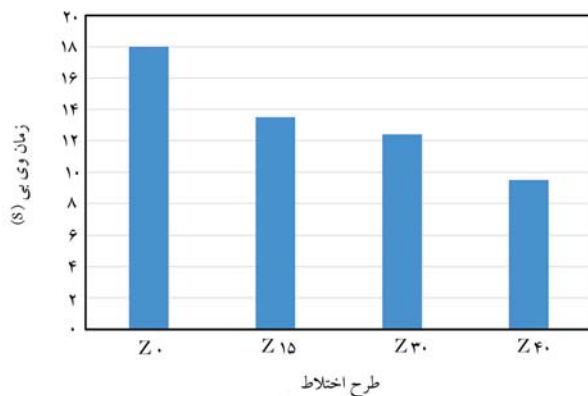
شود. شار عبوری بین دو سر مغزه‌ها پس از ۶ ساعت بر حسب واحد کولن^{۱۲} توسط نرم‌افزار Rapid Chloride Permeability Test اندازه‌گیری شده است.

۵.۴.۲. آزمایش عمق نفوذ آب در بتن

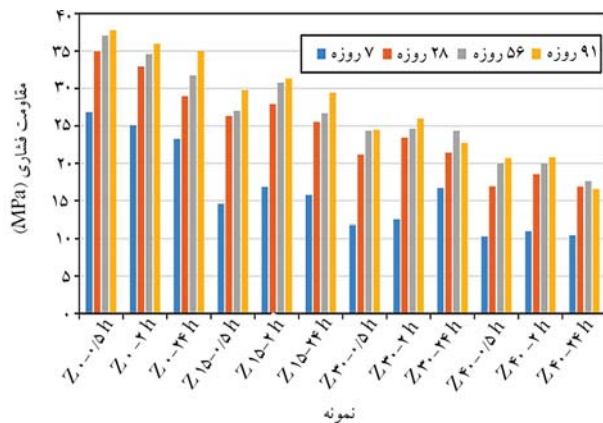
آزمایش عمق نفوذ آب مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۸^[۲۰] بر روی ۱۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) در سن ۲۸ روز انجام گرفت. ابتدا نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. سپس مطابق شکل ۵، نمونه‌ها به گونه‌یی در دستگاه قرار گرفتند که درز موجود در نمونه‌ها در راستای جهت نفوذ آب در نمونه قرار داشت. فشار وارد بر نمونه‌ها نیز به مقدار ۵۰ کیلوپاسکال تنظیم شد. پس از ۷۲ ساعت نمونه‌ها از دستگاه خارج و توسط جک مقاومت فشاری بر روی قطرشان به دو نیم تقسیم شدند و عمق پیشروی آب در داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۶.۴.۲. آزمایش جذب آب بتن

آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C۶۴۲^[۲۱] در سن ۲۸ روز انجام شد. در آزمایش مذکور، ۱۲ نمونه (۶ نمونه طرح ۰٪ زئولیت و ۶ نمونه طرح ۱۵٪ زئولیت هر کدام دارای ۳ نوع درز داغ، گرم و سرد) ساخته شدند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در داخل گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند تا



شکل ۹. زمان وی بی طرح‌های بتن غلتکی.



شکل ۱۰. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف.

۲.۳. آزمایش زمان وی بی

در شکل ۹، نتایج زمان وی بی مخلوط‌های بتن غلتکی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزودن درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت طبیعی، زمان وی بی کاهش یافته است، به طوری که با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با ژئولیت در مخلوط‌های بتن غلتکی، زمان وی بی به ترتیب ۲۵، ۳۱ و ۴۷ درصد نسبت به مخلوط شاهد کاهش یافته است. که دلیل آن، ریزتر بودن ذرات ژئولیت نسبت به ذرات سیمان است، از این رو با افزایش درصد ژئولیت، فیلر بیشتری به مخلوط اضافه شده است. بنابراین، با وجود این که جذب آب ژئولیت بیشتر از سیمان است، اما توزیع دانه‌بندی ژئولیت و سنگدانه‌ها به گونه‌ای بوده است که packing density دانه‌های خشک بیشتر بوده و این موضوع باعث کاهش جذب آب توسط دانه‌های جامد در مخلوط بتن شده است. لذا با افزایش درصد ژئولیت، آبی که منجر به افزایش روانی مخلوط می‌شود، بیشتر شده و در نتیجه زمان وی بی کاهش یافته است. به بیان دیگر، اثر فیلری ژئولیت در افزایش کارایی بیشتر از اثر جذب آب آن در کاهش کارایی بوده است.

۳.۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

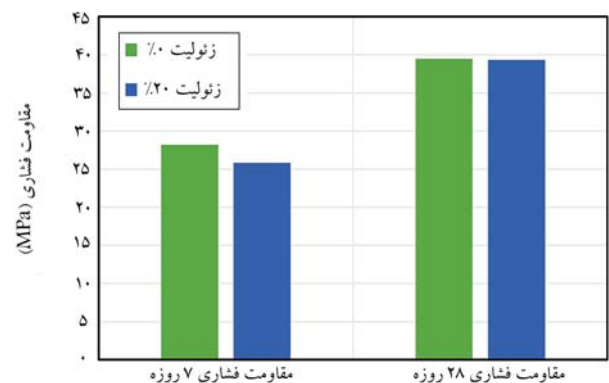
نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده‌اند. براساس نتایج اشاره شده، در تمام سنن در بین نمونه‌های دارای درز یکسان با افزایش درصد ژئولیت، عمده‌اً مقاومت فشاری کاهش یافته است. روند اخیر فقط بین مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌های Z15 و Z30 درز سرد برقرار نبوده است، که در آن Z30



شکل ۶. دستگاه سرعت پالس اولتراسونیک.



شکل ۷. تعیین مقاومت الکتریکی بتن.



شکل ۸. نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی.

۳. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر

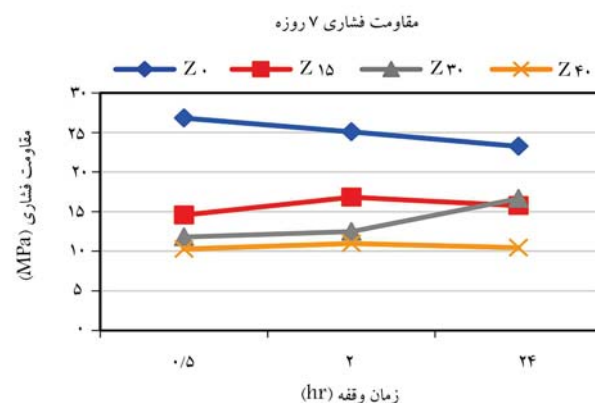
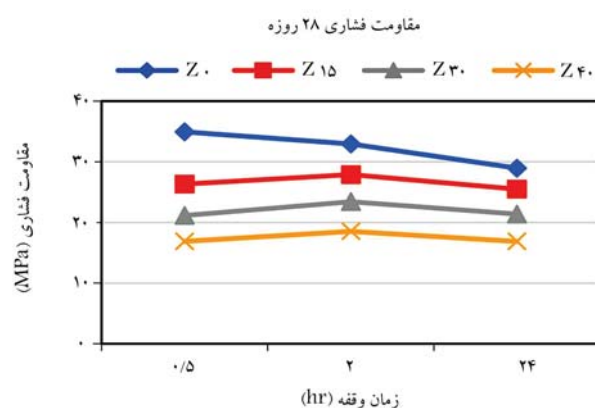
۱.۳. نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی

نتایج آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آنها، با جایگزین کردن ۲۰٪ وزن سیمان با ژئولیت، مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۸/۵ و ۴/۰ درصد کاهش یافته است. مطابق مقادیر به دست آمده از آزمایش کنونی، شاخص فعالیت پوزولانی ژئولیت ۹۶/۲٪ بوده است. نتایج اخیر نشان می‌دهند که فعالیت پوزولانی ژئولیت در سنن اولیه (۷ روز) کمتر از واکنش هیدراتاسیون سیمان و در سن ۲۸ روز تقریباً با آن برابر است. پژوهش رضانیانپور و همکاران (۲۰۱۵، [۱۲]) نتیجه‌ی حاصل از پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

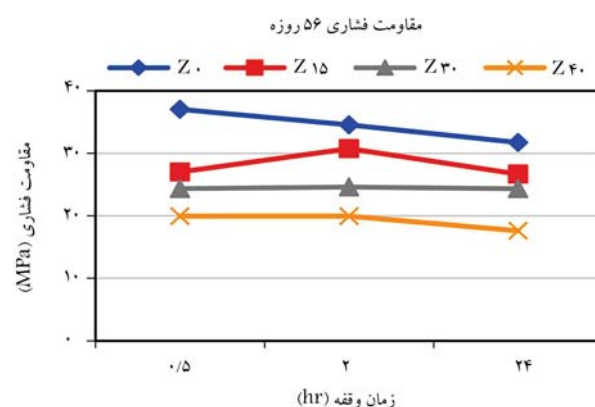
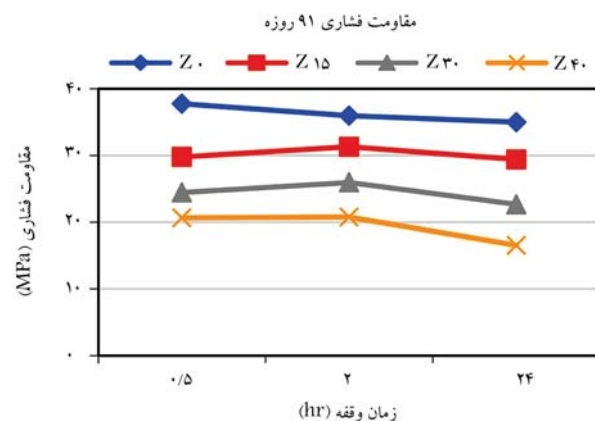
مقاومت بیشتری داشته است. به‌طور کلی، دلیل کاهش مقاومت با افزایش درصد زئولیت، کاهش سیمان در نسبت مخلوط در اثر جایگزینی بخشی از آن با زئولیت بوده است، که کاهش سیمان نیز از مقاومت کاسته است، زیرا سیمان خود عامل مهمی برای افزایش و کسب مقاومت از طریق واکنش هیدراتاسیون است. نتیجه‌ی اخیر، یافته‌های پژوهش نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۱] در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت را تأیید می‌کند، به طوری که در پژوهش ایشان نیز نمونه‌های دارای ۱۵ و ۳۰ درصد زئولیت جایگزین سیمان، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته و افزایش درصد زئولیت منجر به کاهش مقاومت فشاری در همه‌ی سنن شده است. در مطالعه‌ی ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳)،^[۱۰] نیز در نمونه‌های دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد زئولیت (جایگزین سیمان)، با افزایش درصد زئولیت تا ۲۰٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش سن در تمام نمونه‌ها (به غیر از ۲۴h-۳۰ و ۲۴h-۴۰) مقاومت فشاری افزایش یافته است. دلیل آن تداوم واکنش هیدراتاسیون بوده است، که باعث کاهش ریزترک‌های ناحیه‌ی انتقال (ITZ) و بهبود آن شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، براساس نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، وجود درزهای گرم و سرد در نمونه‌های طرح شاهد به ترتیب باعث کاهش ۶/۵ و ۱۳/۴ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز (درز داغ) شده است. در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۵/۵ و ۸/۱ درصد مقاومت را نسبت به نمونه‌ی بدون درز افزایش داده‌اند. در نمونه‌های دارای ۳۰٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۵/۹ و ۴۱/۱ درصد و در نمونه‌های دارای ۴۰٪ زئولیت نیز به ترتیب باعث افزایش ۶/۸ و ۱/۶ درصد مقاومت نمونه‌ها شده‌اند. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می‌دهند که در نمونه‌های طرح شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۵/۷ و ۱۷/۱ درصد مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده‌اند. همچنین وجود درز گرم در نمونه‌های ۱۵ و ۴۰ Z به ترتیب باعث افزایش ۶ و ۹/۷ درصد مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز در همان طرح شده است. وجود درز سرد در نمونه‌های ۱۵ و ۴۰ Z نیز باعث کاهش ۳/۱ و ۰/۲ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. در خصوص نمونه‌های دارای ۳۰٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۰/۷ و ۱/۲ درصد مقاومت نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌ی بدون درز افزایش داده‌اند. مطابق نتایج مقاومت فشاری ۵۶ روزه، در نمونه‌های شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب ۶/۶ و ۱۴/۳ درصد مقاومت نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌ی بدون درز کاهش داده‌اند. همچنین وجود درز گرم به ترتیب باعث افزایش ۱۳/۹، ۱ و ۰/۱ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۰ Z نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. درز سرد نیز به ترتیب باعث کاهش ۱/۲، ۰/۱ و ۱۱/۸ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۰ Z نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. در خصوص نتایج مقاومت فشاری ۹۱ روزه در نمونه‌های طرح شاهد، درزهای گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۴/۸ و ۷/۳ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای درز داغ شده‌اند. در رابطه با طرح اختلاط‌های دارای زئولیت نیز، درز گرم به ترتیب باعث افزایش ۵/۲، ۶/۲ و ۰/۶ درصدی مقاومت نمونه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۰ Z نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. درز سرد نیز به ترتیب ۱/۲، ۷/۲ و ۲۰ درصد مقاومت نمونه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۰ Z نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. را نسبت به نمونه‌های درز داغ (بدون درز) کاهش داده است.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، در هر ۳ طرح ۱۵، ۳۰ و ۴۰ Z (به غیر از طرح ۳۰ Z ۲۸ روزه)، وجود درزهای گرم و سرد در نمونه‌های



شکل ۱۱. نتایج مقاومت فشاری در سنن ۷ و ۲۸ روز.



شکل ۱۲. نتایج مقاومت فشاری در سنن ۵۶ و ۹۱ روز.

درزهای مختلف تقریباً نفوذ یون کلراید یکسانی داشته‌اند، که دلیل آن کاهش اثر منفی درزها و تعدیل نقش مخرب آنها در اثر اضافه کردن پوزولان زئولیت است. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های شاهد که زئولیت حضور نداشته است، درزهای گرم و سرد اثر منفی خود را نشان داده و باعث افزایش قابل توجه نفوذ یون کلراید در نمونه‌ها شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در کاهش اثر منفی درزهای گرم و سرد در خصوصیات دوامی مؤثر بوده است؛ به این دلیل که در اثر تداوم واکنش پوزولانی زئولیت، بلورهای هیدروکسید کلسیم (CH)^{۱۴}، که عامل افزایش نفوذپذیری هستند، مصرف و ژل متراکم C-S-H تولید می‌شود، که نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند. از دلایل دیگر، خاصیت پُرکنندگی زئولیت به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان است، که با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، پیوستگی و یکنواختی خمیر بتن بیشتر می‌شود و ذرات ریز زئولیت در فضاهای مویینه و حفره‌های ریز بتن قرار می‌گیرند. این عوامل در مجموع خواص بتن غلتکی را بهبود می‌بخشند.

۵.۳. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در شکل ۱۴ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ و سرد به ترتیب باعث کاهش ۱۳ و ۲۳/۵ درصد عمق نفوذ آب در نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. در نمونه‌های دارای درز گرم نیز، عمق نفوذ آب در نمونه‌ی دارای زئولیت، ۱۸۷/۵٪ از عمق نفوذ نمونه‌ی شاهد بیشتر بوده است. دلیل این موضوع می‌تواند خطای دستگاه آزمایش عمق نفوذ در اعمال دقیق فشار آب (۵۰ کیلوپاسکال) به نمونه باشد. نتیجه‌ی به دست آمده در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن زئولیت در کاهش عمق نفوذ آب، تأییدکننده‌ی نتایج به دست آمده از پژوهش‌های رمضانیاپور و همکاران (۲۰۱۵)^{۱۱} و نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)^{۱۱} است، که در آنها نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف زئولیت، عمق نفوذ آب کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند.

همچنین مطابق نمودار ۱۴ مشاهده می‌شود که در بین نمونه‌های شاهد، عمق نفوذ آب در نمونه‌ی دارای درز گرم، ۵۲/۴٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و عمق نفوذ نمونه‌ی دارای درز سرد، ۷۹/۵٪ بیشتر از نمونه‌ی بدون درز بوده است. در میان نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز مقدار عمق نفوذ آب در نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۵۷/۱ و ۵۷/۸ درصد بیشتر از عمق نفوذ در نمونه‌ی بدون درز است. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه و تشکیل درز سرد، نفوذپذیری افزایش یافته است. دلیل آن نیز وقفه‌ی ۲۴ ساعته

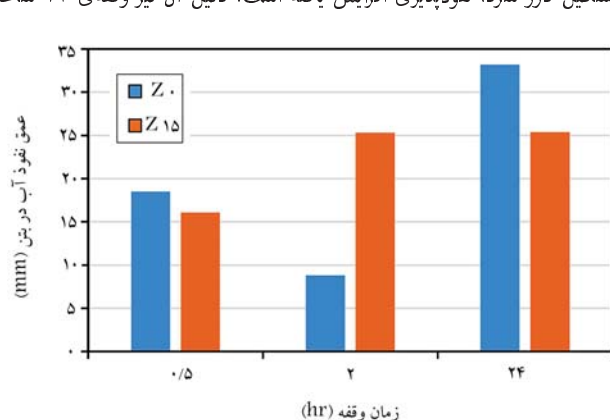
بتن غلتکی به ترتیب موجب افزایش و کاهش مقاومت فشاری نسبت به درز داغ شده است. دلیل بیشتر بودن مقاومت نمونه‌های دارای درز گرم نسبت به درز داغ در نمونه‌های دارای درصد زئولیت مشابه، کم شدن اثر منفی درز گرم در اثر افزودن پوزولان زئولیت و بهبود خواص خمیر بتن است. دلیل کاهش مقاومت در نمونه‌های دارای درز سرد نیز آن است که فاصله‌ی زمانی زیاد (۲۴ ساعت) بین اجرای لایه‌های اول و دوم آن باعث شده است که پوزولان زئولیت نتواند آن را بهبود ببخشد.

۴.۳. نتایج آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید

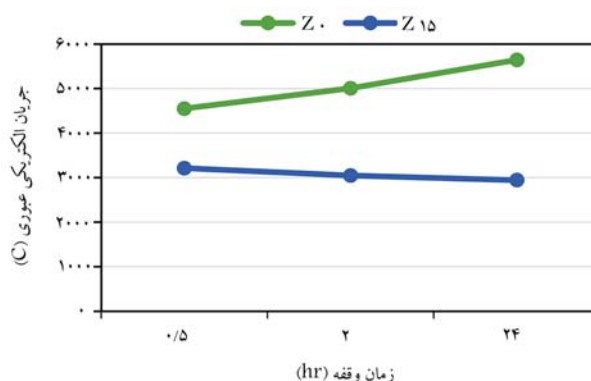
در شکل ۱۳، نتایج آزمایش RCPT بر روی نمونه‌ها مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، در نمونه‌های دارای درزهای داغ (بدون درز)، گرم و سرد جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌ی دارای ۱۵٪ زئولیت به ترتیب ۲۹/۴، ۳۹/۲ و ۴۷/۹ درصد کمتر از نمونه‌ی شاهد بوده است. این نتایج بیان‌گر آن است که نفوذپذیری نمونه‌های دارای زئولیت نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت کمتر بوده است. بنابراین پوزولان زئولیت در کاهش نفوذ یون کلراید در بتن غلتکی تأثیر بسزایی دارد. نتیجه‌ی به دست آمده در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن زئولیت در کاهش نفوذ یون کلراید، تأییدکننده‌ی نتایج تحقیقات رمضانیاپور و همکاران (۲۰۱۵)^{۱۱} و نجیمی و همکاران (۲۰۱۲)^{۱۱} است، که در آنها نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف زئولیت، نفوذ یون کلراید کمتری را نسبت به طرح شاهد داشته‌اند.

در خصوص تأثیر نوع درز در نفوذ یون کلراید، مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در بین نمونه‌های شاهد، جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱۰ و ۲۴ درصد بیشتر از نمونه‌ی بدون درز است. بنابراین در نمونه‌های شاهد، تأثیر درز سرد در افزایش نفوذپذیری بیشتر از درز گرم است. در میان نمونه‌های دارای زئولیت، نیز جریان الکتریکی عبوری از نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۵/۲ و ۸/۴ درصد کمتر از جریان عبوری از نمونه‌ی بدون درز بوده است. بنابراین در رابطه با تأثیر نوع درز در آزمایش RCPT می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی، درز سرد بیشترین تأثیر را در افزایش نفوذپذیری و نمونه‌های درز داغ نیز کمترین نفوذپذیری را در بین انواع درز داشته‌اند. این نتیجه، نتایج آزمایش RCPT در پژوهش کیان و خو (۲۰۱۸)^{۱۳} را تأیید می‌کند، که در آن نیز در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی، که بدون پوزولان بودند، افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه (ایجاد درز در وسط نمونه‌ها)، باعث افزایش نفوذ یون کلراید و افزایش نفوذپذیری نمونه‌ها در آزمایش RCPT شده است.

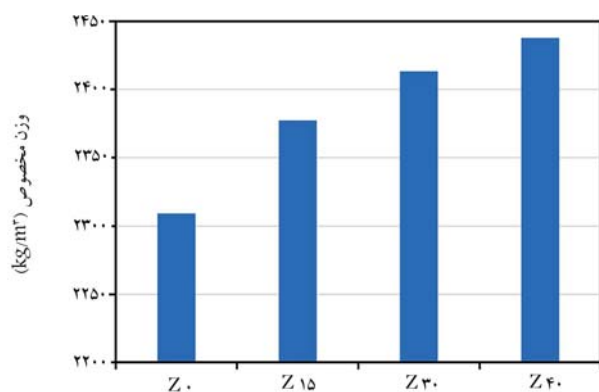
براساس شکل ۱۳، در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، تمامی نمونه‌های دارای



شکل ۱۴. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب.



شکل ۱۳. نمودار شار عبوری جریان از داخل نمونه‌ها در آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید.



شکل ۱۶. نتایج وزن مخصوص بتن تازه.

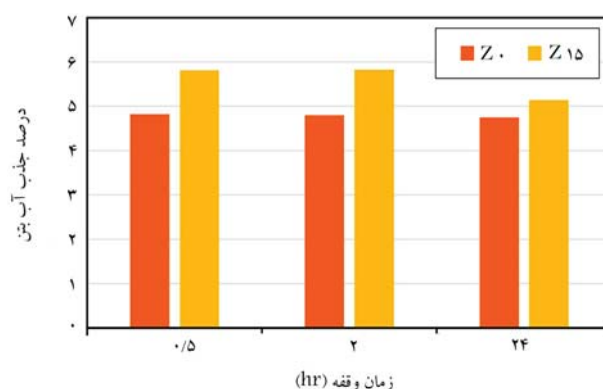
جای می‌گیرند، بنابراین جذب آب نیز بیشتر می‌شود. اما در نمونه‌های دارای درز سرد، که در داخل آنها فضای خالی بیشتری به واسطه‌ی شکاف درز سرد وجود دارد، دانه‌های کمتری جای می‌گیرد، زیرا بخشی از حجم و فضای نمونه را هوا و فضای خالی بین دو لایه اشغال کرده است. از این رو، درصد جذب آب نمونه‌های درز سرد با اختلاف زیادی کمتر از دو نوع دیگر درز است.

۷.۳. نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (جگالی بتن)

نتایج وزن مخصوص بتن تازه در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی افزایش یافته است، به طوری که با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با زئولیت، وزن مخصوص بتن غلظتی به ترتیب ۲/۹، ۴/۵ و ۵/۵ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. زیرا هنگامی که دانه‌های ریز زئولیت در فضای خالی بین درشت دانه‌های مخلوط بتن قرار گرفته‌اند، به مانند روان‌کننده عمل کرده و باعث شده‌اند که دانه‌های درشت، راحت‌تر بر روی هم حرکت کنند و در جای مناسب و فضای خالی قرار بگیرند. از این رو در حجم ثابت ظرف آزمایش، مصالح بیشتری قرار گرفته است، که باعث افزایش وزن مخصوص مخلوط‌های دارای زئولیت نسبت به طرح شاهد شده است. همچنین شکل دانه‌بندی زئولیت به گونه‌ی بوده است که با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، packing density دانه‌های خشک افزایش یافته است. از این رو با افزایش درصد جایگزینی سیمان با زئولیت، وزن مخصوص مخلوط‌ها بیشتر شده است. در پژوهش ناگروکین و گیرسکاس (۲۰۱۶)^[۲۴] نیز نتیجه‌ی مشابه در این خصوص کسب شده است.

۸.۳. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک

نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شوند؛ که بر اساس شکل ۱۷، در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، به ترتیب باعث کاهش ۳/۰، ۱/۳ و ۱ درصد سرعت پالس اولتراسونیک نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. مطابق شکل ۱۸ نیز در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت به ترتیب ۱، ۲/۵ و ۱/۲ درصد سرعت پالس نمونه‌ها را نسبت به طرح شاهد کاهش داده است. بنابراین در هر دو حالت قرارگیری مبدل‌ها نسبت به موقعیت درزها، در بین نمونه‌های دارای درز یکسان، نمونه‌ی دارای زئولیت، سرعت پالس اولتراسونیک کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. با توجه به این‌که سرعت



شکل ۱۵. نتایج جذب آب بتن.

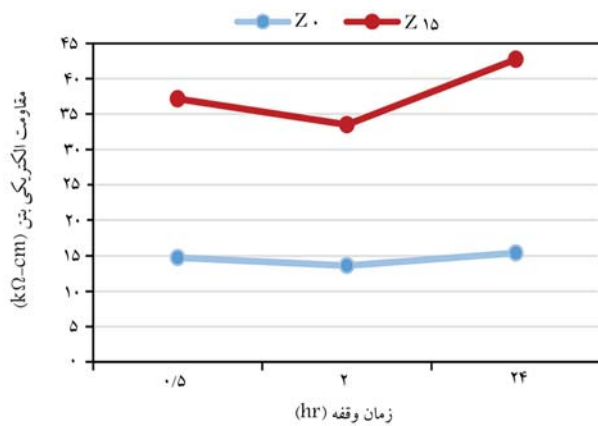
بین اجرای دو لایه در درز سرد و پیوستگی کم لایه‌های آن است. در پژوهش کیان و خو (۲۰۱۸)^[۳] نیز افزایش زمان وقفه بین اجرای دو لایه در نمونه‌های بتن غلظتی و ایجاد درز در آنها باعث افزایش عمق نفوذ آب و افزایش نفوذپذیری شده است. مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، درزهای گرم و سرد، عمق نفوذ آب یکسانی دارند؛ اما در طرح شاهد، درز سرد باعث حدود ۴ برابر شدن عمق نفوذ آب نسبت به درز گرم شده است، که نشان می‌دهد جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، منجر به کاهش اثر منفی درز سرد (با زمان وقفه‌ی ۲۴ ساعت) شده و اثر مخرب آن بر دوام را در حد یک درز با زمان وقفه‌ی ۲ ساعته تعدیل کرده است. با وجود این، همچنان نمونه‌های درز سرد و گرم، عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون درز دارند.

۶.۳. نتایج آزمایش جذب آب بتن

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود؛ که براساس آن، جایگزین کردن ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش درصد جذب آب به میزان ۲۰/۵، ۲۱/۵ و ۸/۲ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است؛ که نتیجه‌ی به دست آمده مشابه یافته‌های پژوهش‌های پیشین بوده است.^[۱۰ و ۱۱]

مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که در طرح شاهد، درصد جذب آب نمونه‌های دارای درزهای گرم و سرد به ترتیب ۴/۰ و ۱/۵ درصد کمتر از جذب آب نمونه‌ی بدون درز است. باید در نظر داشت که اختلاف درصد جذب آب نمونه‌های درز گرم و سرد در طرح شاهد بسیار ناچیز است (در حدود ۱/۳٪) از این رو می‌توان گفت در طرح شاهد، هر سه نوع درز تقریباً درصد‌های جذب آب یکسانی دارند. در رابطه با تأثیر درز در نمونه‌های ۱۵٪ زئولیت نتایج نشان می‌دهند که جذب آب نمونه‌ی درز گرم ۳/۰٪ بیشتر از نمونه‌ی بدون درز و جذب آب نمونه‌ی درز سرد ۱۱/۵٪ کمتر از جذب آب نمونه بدون درز بوده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های دارای زئولیت، اختلاف بین درصد جذب آب نمونه‌های درز داغ و گرم بسیار کم است (۳/۰٪)، در حالی که درز سرد با اختلاف بیشتری نسبت به دو درز داغ و گرم، جذب آب نمونه‌ها را کاهش داده است، که به دلیل جذب آب بتن تحت تأثیر جذب آب مصالح مصرفی در آن است. بنابراین، هر چه دانه‌های ریز بتن بیشتر باشد، جذب آب آن نیز بیشتر است (به دلیل بیشتر بودن سطح مخصوص ریزدانه‌ها). از این رو در نمونه‌های درز داغ، که به دلیل بهتر بودن پیوستگی میان دو لایه، فضای خالی بین دو لایه کمتر است؛ در نتیجه مجموعه‌ی بتن یکنواخت‌تر عمل می‌کند و دانه‌های بیشتری در حجم مشخص نمونه



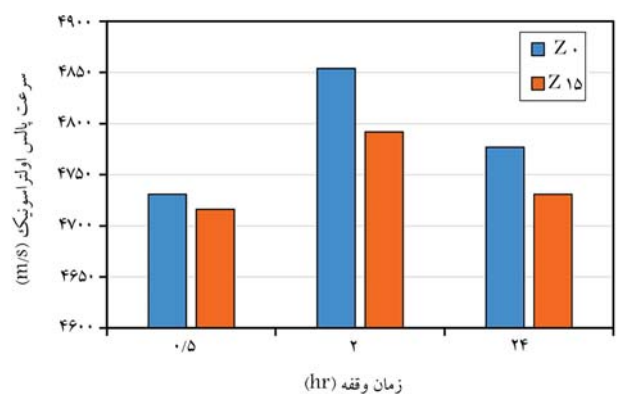
شکل ۱۹. نتایج مقاومت الکتریکی.

می‌کند. در خصوص درز سرد نیز در حالت موازی، درز سرد در حضور ژئولیت منجر به افزایش سرعت پالس شده است، از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اثر منفی درز سرد در مقاومت نیز توسط ژئولیت بهبود یافته است.

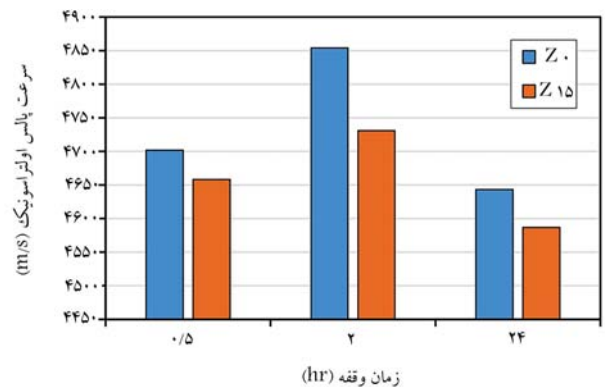
۹.۳. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با ژئولیت در بین نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۱۵۱/۵، ۱۴۵/۸ و ۱۷۷ درصدی مقاومت الکتریکی بتن نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. به منظور نتیجه‌گیری در خصوص داده‌های آزمایش مقاومت الکتریکی بتن و مشخص شدن ارتباط آنها با نفوذپذیری نمونه‌ها باید در نظر داشت که هر چه مقاومت الکتریکی نمونه‌ی بیشتر باشد، نفوذپذیری آن کمتر است و بالعکس. بنابراین در بین نمونه‌های دارای درز یکسان، نمونه‌های دارای ژئولیت، نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پوزولان ژئولیت در کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی مؤثر است. چرا که ژئولیت به واسطه‌ی خواص فیزیکی و شیمیایی خود، ریزساختار بتن غلتکی را بهبود داده و باعث کاهش نفوذپذیری شده است، خاصیت فیزیکی همان خاصیت پرکنندگی ژئولیت به واسطه‌ی ریزتر بودن ذرات آن نسبت به ذرات سیمان است، و خاصیت شیمیایی نیز منجر به مصرف کلسیم هیدروکسید و تولید ژل C-S-H متراکم از طریق واکنش پوزولانی ژئولیت می‌شود، که در نهایت کاهش نفوذپذیری را به دنبال دارد. نتیجه‌ی حاضر مشابه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عمق نفوذ آب و RCPT در پژوهش حاضر در خصوص مؤثر بودن ژئولیت در کاهش نفوذپذیری است. در پژوهش‌های رمضانیاپور و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۲]، احمدی و شکرچی‌زاده (۲۰۱۰)^[۹] و ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۰] نیز نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف ژئولیت جایگزین سیمان، مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته‌اند و از این نظر، نتایج آن تأییدکننده‌ی نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در پژوهش حاضر است.

مطابق شکل ۱۹، در طرح شاهد، مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز گرم ۷/۷٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز سرد، ۴/۵٪ بیشتر از حالت بدون درز است. در خصوص طرح ۱۵٪ ژئولیت، مقاومت الکتریکی نمونه‌ی دارای درز گرم، ۹/۸٪ کمتر از نمونه‌ی بدون درز و مقاومت الکتریکی نمونه‌ی درز سرد، ۱۵/۱٪ بیشتر از حالت بدون درز بوده است.



شکل ۱۷. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک برای حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت موازی با درزها.



شکل ۱۸. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک برای حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت عمود بر درزها.

پالس اولتراسونیک متناسب با مقاومت فشاری است، در آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز نتایج مشابه با آزمایش سرعت پالس مشاهده شده است. مطابق شکل ۱۷، درزهای گرم و سرد در نمونه‌های طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش ۲/۶ و ۱ درصدی سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده‌اند. در نمونه‌های دارای ۱۵٪ ژئولیت نیز درزهای گرم و سرد به ترتیب ۱/۶ و ۳/۰ درصد سرعت پالس را نسبت به نمونه‌های بدون درز افزایش داده‌اند. بنابراین در طرح‌های Z0 و Z15، نمونه‌ی دارای درز گرم بیشترین سرعت پالس اولتراسونیک و نمونه‌ی دارای درز داغ کمترین سرعت پالس اولتراسونیک را داشته‌اند. مطابق شکل ۱۸، نیز درز گرم در نمونه‌های Z0 و Z15 به ترتیب باعث افزایش ۳/۲ و ۱/۶ درصدی سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز و وجود درز سرد در نمونه‌های Z0 و Z15 به ترتیب باعث کاهش ۱/۳ و ۱/۵ درصد سرعت پالس نسبت به نمونه‌ی بدون درز شده است. بنابراین، در بین نمونه‌های شاهد و نمونه‌های دارای ژئولیت، نمونه‌ی دارای درز گرم بیشترین سرعت پالس و نمونه‌ی دارای درز سرد، کمترین سرعت پالس اولتراسونیک را داشته است.

نتایج این آزمایش به‌طور کلی نشان می‌دهد که در هر دو حالت قرارگیری مبدل‌ها، درز گرم سرعت پالس را افزایش داده است. این مطلب در نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز مشاهده شده و در آن، نمونه‌های درز گرم مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون درز داشته‌اند. بنابراین نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک نیز نقش مؤثر پوزولان ژئولیت در بهبود اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری را تأیید

۱۰.۳. مقایسه‌ی کلی آثار درصدهای مختلف زئولیت

در خصوص آزمایش مقاومت فشاری، با افزایش درصد زئولیت مقاومت کاهش یافته است. همچنین مطابق نتایج آزمایش کنونی در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان با زئولیت باعث کاهش اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۶، ۱۰ و ۴ درصد شده است؛ که مطابق آن، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، بیشترین تأثیر را در کاهش اثر منفی درز گرم در مقاومت داشته است. همچنین هیچ‌یک از درصدهای مختلف زئولیت، تأثیر چندانی در کاهش آثار منفی درز سرد در مقاومت فشاری نداشته‌اند. مقایسه‌ی آثار درصدهای مختلف زئولیت در آزمایش‌های دوام نشان می‌دهد که در RCPT، عمق نفوذ آب و مقاومت الکتریکی، ۱۵٪ زئولیت تأثیر بسزایی در کاهش اثر منفی درزهای گرم و سرد بر خصوصیات دوام داشته و موجب کاهش نفوذپذیری بتن نیز شده است. بنابراین، بر اساس نتایج پژوهش حاضر، استفاده از ۱۵٪ زئولیت در پروژه‌های عمرانی به منظور بهبود آثار منفی درزها توصیه می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری، نفوذ تسریع‌شده‌ی یون کلراید، عمق نفوذ آب، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن غلتکی حاوی زئولیت، که دارای انواع درزهای ساخت با زمان‌های وقفه‌ی ۵، ۲۰ و ۲۴ ساعت بودند، تعیین و با نتایج نمونه‌های بدون زئولیت مقایسه شده است. سپس تأثیر زئولیت در کاهش آثار مخرب درزها و همچنین کاهش نفوذ یون کلراید و بهبود خصوصیات دوامی بتن غلتکی ارزیابی شده است. در ادامه، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های پژوهش حاضر ارائه شده است:

- در تمام سنین با افزایش درصد زئولیت، مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین مطابق انتظار درزهای ساخت (سرد و گرم) در نمونه‌های شاهد بتن غلتکی (در غیاب زئولیت)، مقاومت فشاری را در تمام سنین نسبت به حالت بدون درز کاهش داده است. با وجود این، براساس نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت راهکار مؤثری برای بهبود اثر منفی درز گرم در مقاومت فشاری است. در خصوص درز سرد نیز که دارای زمان وقفه‌ی زیادی (۲۴ ساعت) بین اجرای دو لایه‌ی آن است، حتی در حضور درصدهای مختلف زئولیت، همچنان مقاومت‌های کمتری نسبت به نمونه‌ی بدون درز داشته است.

- مطابق نتایج آزمایش RCPT، با جایگزینی ۱۵٪ زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد نفوذ یون کلراید به ترتیب ۲۹/۴، ۳۹/۲ و ۴۷/۹ درصد کاهش یافته است. درزهای گرم و سرد در طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۱۰ و ۲۴ درصد شده‌اند. درزهای گرم و سرد در طرح دارای زئولیت نیز نفوذپذیری را به ترتیب ۵/۲ و ۸/۴ درصد کاهش داده است. برخلاف نمونه‌های شاهد، تمامی نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت، تقریباً جریان عبوری یکسانی دارند و به عبارت دیگر، درزهای گرم و سرد، تأثیری در افزایش نفوذپذیری این نمونه‌ها نداشته‌اند، بنابراین زئولیت توانسته است آثار منفی درزهای گرم و سرد در خصوصیات دوامی بتن غلتکی (به ویژه نفوذ یون کلراید) را کاهش دهد.

- جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ و سرد به ترتیب باعث کاهش ۱۳ و ۲۳/۵ درصد عمق نفوذ آب در نمونه‌ها و در نمونه‌های دارای درز گرم، باعث افزایش ۱۸۷/۵٪ عمق نفوذ آب شده است. در طرح شاهد، درز سرد باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۷۹/۵٪ و درز گرم باعث کاهش نفوذپذیری به میزان ۵۲/۴٪ شده است. در طرح دارای زئولیت نیز، درزهای گرم و سرد به ترتیب موجب افزایش نفوذپذیری به میزان ۵۷/۱ و ۵۷/۸ درصد شده‌اند. مطابق نتایج حاصل از عمق نفوذ آب، زئولیت تأثیر بسزایی در بهبود اثر منفی درز سرد دارد و می‌تواند آثار مخرب درز سرد در دوام را تا حد یک درز با زمان وقفه‌ی ۲ ساعته کاهش دهد.

- جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های بتن غلتکی دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش درصد جذب آب به میزان ۲۰/۵، ۲۱/۵ و ۸/۲ درصد شده است. در طرح شاهد، درزهای گرم و سرد در نمونه‌ها به ترتیب باعث کاهش ۴/۰ و ۱/۵ درصد جذب آب شده است. در طرح دارای ۱۵٪ زئولیت نیز، درز گرم در نمونه‌ها موجب افزایش ۳/۰٪ جذب آب و درز سرد باعث کاهش ۱۱/۵٪ جذب آب شده است.

- براساس نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک در حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت موازی با درزها، جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث کاهش ۳/۰، ۱/۳ و ۱ درصد سرعت پالس اولتراسونیک شده است. در حالت قرارگیری مبدل‌ها به صورت عمود بر درزها نیز جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب منجر به کاهش ۱، ۲/۵ و ۱/۲ درصد سرعت پالس نمونه‌ها شده است. در خصوص تأثیر درزها در حالت موازی با درزها، درزهای گرم و سرد در طرح شاهد به ترتیب باعث افزایش ۲/۶ و ۱ درصد سرعت پالس و در نمونه‌های دارای ۱۵٪ زئولیت نیز به ترتیب باعث افزایش ۶/۱ و ۳/۰ درصدی سرعت پالس شده‌اند. در حالت عمود بر درزها نیز درز گرم در طرح‌های شاهد و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب باعث افزایش ۳/۲ و ۱/۶ درصدی سرعت پالس و درز سرد نیز در طرح‌های شاهد و ۱۵٪ زئولیت به ترتیب باعث کاهش ۳/۱ و ۱/۵ درصدی سرعت پالس شده است.

- مطابق نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی، با جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت، نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی دارای انواع درز کاهش یافته است، به طوری که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌های دارای درزهای داغ، گرم و سرد به ترتیب باعث افزایش ۱۵۱/۵، ۱۴۵/۸ و ۱۷۷ درصدی مقاومت الکتریکی شده است. همچنین وجود درز گرم در نمونه‌های ۱۵ و Z^۰ به ترتیب باعث افزایش نفوذپذیری به میزان ۷/۷ و ۹/۸٪ درصد شده است. درز سرد نیز در نمونه‌های ۱۵ و Z^۰ به ترتیب باعث کاهش نفوذپذیری به میزان ۴/۵ و ۱۵/۱ درصد شده است.

- نتایج آزمایش‌های RCPT، عمق نفوذ آب، و سرعت پالس اولتراسونیک نشان می‌دهند که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با زئولیت تأثیر بسزایی در خشی‌سازی و تعدیل کردن اثر منفی درزهای سرد و گرم در خصوصیات دوامی دارد، همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهند که زئولیت توانسته است اثر منفی درز گرم بر مقاومت فشاری را کاهش دهد و لذا استفاده از آن توصیه می‌شود.

1. Liu
2. Qian & Xu
3. Ashkar
4. Zhu
5. Bayqra
6. Luo
7. Karimpour
8. Aluminosilicate
9. Valipour
10. Ahmadi & Shekarchi Zadeh
11. Rapid Chloride Permeability Test
12. Coulomb
13. Interfacial Transition Zone (ITZ)
14. Calcium Hydroxide (CH)
15. Nagrockiene & Girska

منابع (References)

1. Azizmohammadi, M., Toufigh, V. and Ghaemian, M. "Experimental and analytical investigation on the interlayer of roller compacted concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **33**(5), p. 04021090 (2021).
2. Liu, G., Lu, W., Lou, Y. and et al. "Interlayer shear strength of roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments", *Construction and Building Materials*, **166**, pp. 647-656 (2018).
3. Qian, P. and Xu, Q. "Experimental investigation on properties of interface between concrete layers", *Construction and Building Materials*, **174**, pp. 120-129 (2018).
4. Ashkar, M., Toufigh, V., Ghaemian, M. and et al. "Application of ultrasonic models for investigating the properties of the interface between roller compacted concrete (RCC) layers", *NDT & E International*, **124**, p. 102516 (2021).
5. Zhu, X., Guo, Z., Yang, W. and et al. "Effects of double expansion agents on the properties of interlayer in roller-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, **262**, p. 120909 (2020).
6. Bayqra, S.H., Mardani, A., Özen, S. and et al. "Effect of delayed placement of layers on permeability and durability of roller-compacted concrete containing fly ash", *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-16 (2022). DOI.org/10.1080/10298436.2022.2075552.
7. Luo, D., Lu, S., Hu, C. and et al. "Experimental and numerical investigation on interlayer fracture process of roller compacted concrete", *Construction and Building Materials*, **342**, p. 127998 (2022).
8. Karimpour, A. "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2079-2083 (2010).
9. Ahmadi, B. and Shekarchi Zadeh, M. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites*, **32**(2), pp. 134-141 (2010).
10. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi Zadeh, M. and et al. "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", *Construction and Building Materials*, **41**, pp. 879-888 (2013).
11. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and et al. "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 1023-1033 (2012).
12. Ramezani-pour, A.A., Mousavi, R., Kalhori, M. and et al. "Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes", *Construction and Building Materials*, **101**, pp. 347-358 (2015).
13. ASTM International, "ASTM C136-01: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2001).
14. "ASTM, C127-01, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate", *ASTM International* (2001).
15. "ASTM C128-01: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate", *ASTM International* (2001).
16. ASTM International, "ASTM C311: Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete", (2013).
17. "ASTM C1170/ C1170M-14e1: Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2014).
18. "ASTM C39/C39M-14: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA. ASTM, AI (2014).
19. "ASTM C1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", *ASTM International* (2012).
20. The European Committee for Standardization, "Testing hardened concrete. depth of penetration of water under pressure", EN 12390-8 (2009).
21. "ASTM, C642-13: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2013).
22. American Society for Testing and Materials, "Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete (ASTM C 138)", Philadelphia, PA: ASTM (2009).
23. "ASTM C597-02: Standard test method for pulse velocity through concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, **4**(02) (2002).
24. Nagrockiene, D. and Girska, G. "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition", *Construction and Building Materials*, **113**, pp. 964-969 (2016).

ارزیابی ریزساختاری تأثیر نحوه عمل آوری در فرایند تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی در بنتونیت آلوده به یون سرب

وحیدرضا اوحدی* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

بهنام یوسفی (دانشجوی دکتری)

ریحانه صفادوست (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۰-۹۳، (پژوهشی)

تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی از روش‌های جلوگیری از انتقال آلودگی در خاک است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ریزساختاری مکانیزم‌های کنترل‌کننده در تثبیت/جامدسازی بنتونیت آلوده در شرایط عمل آوری سیستم باز (قرارگیری در معرض رطوبت) و شرایط عمل آوری سیستم بسته (عدم قرارگیری در معرض رطوبت) بوده است. به این منظور، یک مجموعه آزمایش pH، آب شویی آلودگی (TCLP) و اشعه‌ی ایکس انجام شد. براساس نتایج به دست آمده، در حضور ۱۵٪ سیمان، pH محیط در ناحیه‌ی ایمن قرار گرفته و نوع عمل آوری، تأثیری در بازده تثبیت نداشته است. در دو سیستم عمل آوری سیستم‌های باز و بسته، مکانیزم رسوب آلانینده، عملکرد نسبتاً یکسانی داشته است. نتایج آزمایش‌های اشعه‌ی ایکس، پیشرفت محدود واکنش‌های پوزولانی را به دلیل حضور فاز سنگین نشان داده است. با وجود این، براساس نتایج آزمایش‌های ریزساختاری اشعه‌ی ایکس، احراز محدودیت‌های استاندارد EPA در نمونه‌های عمل آوری شده در سیستم بسته را می‌توان به پیشرفت بهتر واکنش‌های پوزولانی و جامدسازی آلانینده با تشکیل C-A-S-H و C-S-H برای نمونه‌های عمل آوری شده در سیستم بسته نسبت داد.

واژگان کلیدی: تثبیت/جامدسازی، TCLP، پراش پرتوایکس، بنتونیت آلوده، سیمان.

۱. مقدمه

امروزه با رشد تکنولوژی و به علت سرعت توسعه‌ی شهری و صنعتی شدن و استفاده‌ی بیشتر از مواد شیمیایی و پسماندهای تولید شده، حضور آلاینده‌های فلز سنگین در خاک‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و تبدیل به یکی از مشکلات متداول ژئوتکنیک زیست محیطی در سراسر جهان شده است.^[۱] فلزات سنگین به علت سمی بودن، دوام، تجمع و حضور در پسماندها، یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست محیطی هستند.^[۲] در میان فلزات سنگین، یون سرب (Pb) به صورت ویژه‌ی

مورد توجه بوده و این به دلیل سمیت و افزایش استفاده‌ی گسترده از آن در صنایع مختلف است.^[۳] تکنولوژی‌های اصلاح‌کننده‌ی خاک‌های آلوده به فلز سنگین، اصولاً شامل: شستشوی شیمیایی، تثبیت و جامدسازی، پوشش خاک آلوده، سیستم زهکشی و رقیق‌سازی است.^[۴]

تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی، یک روش رایج و مؤثر به دلیل هزینه‌ی نسبتاً کم، بهبود مشخصات فیزیکی و عملکرد مناسب از منظر زیست محیطی بوده و به طور قابل توجهی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلز سنگین استفاده شده است.^[۵]

تثبیت و جامدسازی هر کدام از آن‌ها، آثار متفاوتی در پسماند دارند. جامدسازی سبب ایجاد تغییراتی در خواص فیزیکی پسماند می‌شود، که شامل: افزایش مقاومت،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61334.3163

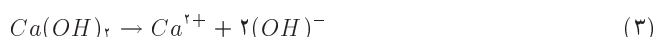
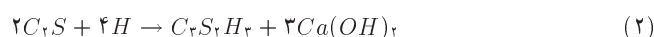
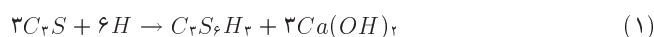
استناد به این مقاله:

اوحدی، وحیدرضا، یوسفی، بهنام و صفادوست، ریحانه، ۱۴۰۲. ارزیابی ریزساختاری تأثیر نحوه عمل آوری در فرایند تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی در بنتونیت آلوده به یون سرب. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۰-۹۳.

کاهش نفوذپذیری و کیسوله شدن اجزاء خطرناک است. همچنین، تثبیت سبب ایجاد تغییرات شیمیایی در مواد پسماند و جلوگیری از انتقال آن می‌شود.^[۹]

سیمان پرتلند معمولی به علت اختلاط ساده، در دسترس بودن، قیمت مناسب و سازگاری با بسیاری از آلاینده‌ها، پرمصرف‌ترین و رایج‌ترین چسباننده‌ی استفاده شده در فرایند تثبیت و جامدسازی است.^[۱۰] به دلیل pH قلیایی سیمان، فلزات به صورت رسوب هیدروکسیدی یا نمک‌های کربناتی، به ساختارهایی با استحکام بیشتر تبدیل می‌شوند. فرایند شیمیایی تشکیل ژل C-S-H در: تثبیت، کیسوله کردن آلاینده‌ها، بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی ملات‌های سخت شده، نقش اساسی در فرایند تثبیت و جامدسازی پایه‌ی سیمانی ایفا می‌کند.^[۱۱] استفاده از ترکیب‌هایی، همچون نانوسیلیس در حضور سیمان پرتلند سبب افزایش میزان شکل‌گیری ژل C-S-H^۱ می‌شود که سبب غالب شدن مکانیزم جامدسازی بر مکانیزم تثبیت می‌شود.^[۱۲] استفاده از ترکیب سیمان - خاکستر بادی به‌عنوان چسباننده، ضمن کاهش pH و تنظیم آن در ناحیه‌ی ایمن (ناحیه‌ی رسوب آلاینده)، مقدار سرب تراوش شده از نمونه‌ها طی آزمایش TCLP^۲ را به مقدار قابل توجهی کاهش و در محدوده‌ی قابل قبول (کوچک‌تر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر) قرار داده است.^[۱۳]

سیلیکات‌های کلسیم (C_۲S و C_۳S) دو بخش چسباننده‌ی اصلی در سیمان هستند. هیدرات C_۳S_۲H_۲ و مقدار آهک جدا شده به صورت Ca(OH)_۲، محصول هیدراسیون C_۳S هستند. هیدراته شدن C_۲S نیز ترکیب مشابه تولید می‌کند، با این تفاوت که مقدار آهک آن کمتر است. تشکیل Ca(OH)_۲ در طی فرایند هیدراسیون، سیمان اصلی‌ترین عامل افزایش pH در محیط است (معادله‌های ۱ الی ۳).^[۱۵]



هیدراسیون سیمان فرایند بسیار مهمی است و حضور فلزات سنگین در شکل‌گیری آن اختلال ایجاد می‌کند. مطالعات نشان داده است که دی‌آمونیم فسفات باعث اسیدی شدن محیط خاک و افزایش انحلال‌پذیری سرب و فسفر در خاک و نیز سبب تشکیل کانی پایرومورفایت و تثبیت در جای سرب در خاک می‌شود.^[۱۶] در حالت اخیر انتظار می‌رود از تأثیر منفی یون سرب در کاهش تشکیل واکنش‌های پوزولانی سیمان کاسته شود. در مجموع، هدف از عمل‌آوری در دمای عادی، حفظ محیط سیمانی در حالت مرطوب است، تا زمانی که فضاها پر از آب موجود در خمیر سیمان تازه، به میزان مطلوب با فرآورده‌های هیدراسیون سیمان اشغال شوند. لزوم عمل‌آوری، برخاسته از این حقیقت است که هیدراسیون سیمان فقط در منافذ مویینه‌ی پُر از آب اتفاق می‌افتد و به این دلیل باید از افت آب در منافذ مویینه جلوگیری کرد.^[۱۷]

پژوهشگران مختلف برای تثبیت و جامدسازی پایه‌ی سیمانی از دو روش عمل‌آوری در شرایط محیط مرطوب (سیستم باز) و عمل‌آوری در حالت آب‌بندی شده (سیستم بسته) بهره گرفته‌اند.^[۱۸، ۱۹] یکی از محدودیت‌های مطالعات پیشین، تأکید و تمرکز بر مطالعه‌ی رفتار خاک‌های جامدسازی شده‌ی پایه‌ی سیمانی با آماده‌سازی نمونه در شرایط مرطوب بهینه بوده است.^[۱۸] تهیه‌ی نمونه‌های تثبیت و جامدسازی براساس درصد مرطوب بهینه‌ی ترکیب خاک و سیمان بدون در نظر گرفتن آلودگی و اندازه‌گیری مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به عنوان معیاری برای پیشرفت هیدراسیون سیمان در نظر گرفته شده است. در این راستا، معیار استفاده از ۱/۲ برابر درصد مرطوب بهینه (OWC)^۳ برای حصول بیشینه‌ی مقاومت تک‌محوری خاک‌های تثبیت شده‌ی سیمانی پیشنهاد شده است.^[۱۸، ۱۹] بررسی نتایج سایر پژوهشگران نشان داده است

که در بیشتر مطالعات تثبیت و جامدسازی پایه‌ی سیمانی خاک‌های آلوده، حضور ۱۰ تا ۲۰ درصدی سیمان پرتلند به عنوان چسباننده، موجب کاهش استخراج فلز سنگین سرب می‌شود.^[۱۸، ۱۹]

با توجه به آنکه در مطالعات پیشین، به موضوع تأثیر همزمان pH محلول سیال حفره‌ی در تشکیل فازهای رسوب و نحوه‌ی عمل‌آوری توجه کمتری صورت گرفته است، هدف نوشتار حاضر، به تعیین تأثیر درصد مرطوب، pH محلول سیال حفره‌ی و نحوه‌ی عمل‌آوری در نگهداشت فلز سنگین سرب تحت فرایند تثبیت و جامدسازی پایه‌ی سیمانی معطوف شده است. در پژوهش حاضر، نمونه‌های بتونیت حاوی سرب در درصد‌های مرطوب بهینه‌ی مختلف و با نحوه‌ی عمل‌آوری سیستم‌های باز و بسته در حضور سیمان پرتلند تثبیت و جامدسازی شده‌اند. سپس با ارزیابی تغییرات pH در طی زمان و استخراج آلاینده‌ی قابل دسترس توسط آزمایش آبتویی آلودگی (TCLP) به همراه آنالیز اشعه‌ی ایکس (XRD)، کارایی سیستم تثبیت و جامدسازی، بحث و بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد استفاده شده

ظرفیت نگهداشت آلاینده‌ی فلز سنگین در بتونیت به دلیل مساحت ویژه‌ی بزرگ و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.^[۲۰] خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، بتونیت تجاری با نام «بتونیت فلات ایران» تهیه شده از شرکت «ایران باریت» است. در جدول ۱، مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک بتونیتی استفاده شده در پژوهش حاضر درج شده است. به علت آنکه در نوشتارهای علمی معتبر، روش اندازه‌گیری pH و درصد کربنات براساس استاندارد BS توصیه شده است، در پژوهش حاضر نیز این مقادیر براساس استاندارد فوق اندازه‌گیری شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک بتونیت می‌توان به مساحت ویژه (۴۱۸ m^۲/g) و ظرفیت تبدیلی کاتیونی (soil - ۶۲/۲ cmol/kg) اشاره کرد. برای آلوده کردن خاک در آزمایشگاه از نیترات سرب با فرمول شیمیایی Pb(NO_۳)_۲ استفاده شده است. این آلاینده‌ی فلز سنگین از شرکت مرک (Merck) خریداری شده است. در پژوهش حاضر، جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بتونیت استفاده شده.

مشخصات فیزیکی بتونیت	مقدار	روش اندازه‌گیری
pH	۹/۸	BS EN ۱۲۴۵۷ - ۲
درصد کربنات	۱۰	BS ۱۳۷۷ - ۳
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)*	۶۲/۲	[۲۱]
(cmol/kg - soil)		
سطح مخصوص (SSA)** (m ^۲ /g)	۴۱۸	[۲۲]
توده‌ی ویژه (G _s)	۲/۷۹	ASTM C ۱۸۸
حد روانی (LL)*** (%)	۳۱۹	ASTM D ۴۳۱۸
دامنه خمیری (PI)**** (%)	۲۷۵	ASTM D ۴۳۱۹
ذرات هم اندازه رس (%)	۷۲	ASTM D ۷۹۲۸

* Cation Exchange Capacity (CEC)

** Specific Surface Area (SSA)

*** Liquid Limit (LL)

**** Plasticity Index (PI)

جدول ۲. مقادیر اکسیدهای اصلی معادل اجزاء تشکیل دهنده‌ی مصالح.

عناصر تشکیل دهنده	مقدار %	
	بتونیت	سیمان
SiO _۲	۵۷/۳	۲۱/۵
Al _۲ O _۳	۱۴	۴/۹
Fe _۲ O _۳	۳/۲	۳/۸
CaO	۳/۸	۶۳/۳
MgO	۲/۹	۱/۶
SO _۲	۰/۴	۲/۴
Na _۲ O	۲/۳	۰/۵
K _۲ O	۰/۷	۰/۸
L.O.I	۱۴/۷	۱/۲

از سیمان پرتلند تیپ II، محصول شرکت سیمان هگمتان ایران استفاده شده است. مقادیر اکسیدهای اصلی معادل اجزاء تشکیل دهنده‌ی بتونیت و سیمان مصرفی توسط آنالیز XRF بررسی و در جدول ۲ ارائه شده است.

۲.۲. تهیه‌ی نمونه

براساس مطالعات صورت گرفته بر روی بتونیت با مشخصات جدول ۱، بیشینه‌ی ظرفیت جذب آلودگی سرب توسط بتونیت، معادل $cmol/kg - soil$ ۹۰ است.^[۱۴] بنابراین به منظور بررسی تأثیر سیمان و تغییرات pH ناشی از آن در فرایند تثبیت و جامدسازی، خاک موردنظر با غلظت آلودگی معادل $cmol/kg - soil$ ۱۰۰ به صورت مصنوعی آلوده شده است. برای تهیه‌ی خاک آلوده در آزمایشگاه، ابتدا نمک نترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) به صورت سوسپانسیون و با نسبت S:W (آب): مواد جامد) برابر با ۱۰ : ۱ به خاک اضافه شده است. سوسپانسیون به مدت ۹۶ ساعت، هر روز به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده‌ی^۴ مکانیکی برای انجام تبادل کاتیونی کاملاً مخلوط و پس از آن در گرمخانه با دمای $60^\circ C$ خشک شده است. خاک مذکور به عنوان خاک آلوده در فرایند تثبیت و جامدسازی استفاده شده است. سیمان پرتلند معمولی به میزان ۱۵٪ وزنی خاک خشک آلوده به نمونه‌ها اضافه شده است. با توجه به اینکه تأثیر تغییرات درصد رطوبت اولیه در راندمان جامدسازی پایه‌ی سیمانی خاک‌های آلوده در مطالعات پیشین کمتر بررسی شده است، در پژوهش حاضر، معیار رطوبت ساخت نمونه‌ها در ضرایب مختلف درصد رطوبت بهینه (OWC) بوده است. بر این اساس، نمونه‌ها در چهار درصد رطوبت متفاوت آزمایش و هر یک در دو سیستم متفاوت بازو بسته عمل‌آوری شده‌اند. در سیستم عمل‌آوری باز، نمونه‌ها در اتاقک مرطوب با درصد رطوبت ثابت ۹۵٪ و دمای $25^\circ C$ نگهداری شده‌اند. در سیستم عمل‌آوری بسته نیز نمونه‌ها به منظور حفظ درصد رطوبت اولیه، سلفون پیچ شده و پس از قرارگیری در پلاستیک زیپ‌دار در اتاقک مرطوب قرار گرفته‌اند.

۳.۲. شیوه انجام آزمایش‌ها

به منظور بررسی اندرکنش آلاینده‌های فلز سنگین سرب با بتونیت و سایر ترکیب‌های بتونیت و تصمیم‌گیری درباره‌ی میزان غلظت آلودگی اعمالی به خاک، آزمایش نگهداشت فلز سنگین به روش تعادل سوسپانسیون خاک، ارائه شده در استاندارد

EPA، به این شرح انجام شده است: محلول‌های حاوی غلظت‌های متفاوت از فلز سنگین تهیه و ۲۰ میلی‌لیتر از آن‌ها به عنوان آلاینده‌ی مرجع برای استفاده در آزمایش‌ها انتخاب شده است. سوسپانسیون نمونه‌ها با نسبت S:W (محلول آلاینده: مواد جامد) برابر با ۱۰:۲۰ تهیه شده است. پس از قرارگیری بر روی لرزاننده‌ی مکانیکی به مدت ۹۶ ساعت و هر روز به مدت ۲ ساعت همزده شده است تا سیستم کاملاً همگن شود و تبادل کاتیونی صورت گیرد. سپس توسط دستگاه سانتریفیوژ، فاز مایع از جامد جدا، مقدار pH اندازه‌گیری و بخشی از فاز مایع توسط دستگاه جذب اتمی (AAS) مدل GBC۹۳۲ AB Plus موجود در آزمایشگاه پژوهشی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا آنالیز شده است. رسوب ترکیب‌های حاوی فلز سنگین سرب در مقادیر pH مختلف، یکی از مکانیزم‌های تثبیت آلودگی در خاک است، که در روند هیدراسیون سیمان پرتلند نیز تأثیر می‌گذارد.^[۱۹] بر این اساس، یک مجموعه‌ی آزمایش، به منظور بررسی چگونگی تشکیل رسوب آلاینده‌ی Pb با تغییر pH صورت گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک لیتر محلول استاندارد Pb با غلظت (ppm) ۱۰۰ آماده شده است. در ادامه، ۲۰ ml از محلول استاندارد، همراه با اسید هیدروکلریک یک مولار (۱M) و یا محلول سدیم هیدروکسید یک مولار (۱M) در محدوده‌ی pH ۲ تا ۱۲ تنظیم شده‌است. پس از تنظیم pH، به منظور ایجاد شرایط تعادل، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده‌ی مکانیکی تکان داده شده و به مدت ۲۴ ساعت به‌طور ثابت نگهداری شده‌اند. در ادامه، pH نهایی محلول اندازه‌گیری و پس از سانتریفیوژ، فاز مایع نمونه از کاغذ صافی با استفاده از دستگاه مکش EPEC عبور داده شده و در لوله‌ی آزمایش ریخته شده است. در انتها، غلظت کاتیون‌های Pb در محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شده است.

براساس روش‌های متداول، میزان درجه‌ی عدم تحرک فلزات سنگین بعد از انجام فرایند تثبیت و جامدسازی با استفاده از آزمایش آب‌شویی آلودگی (TCLP) ارزیابی شده است.^[۲۰،۲۱] آزمایش TCLP براساس روش EPA-۱۳۱۱ انجام شده است، تا میزان غلظت فلز سنگین استخراج شده از خاک آلوده‌ی تثبیت/جامدسازی شده تعیین شود.^[۲۲] برای این منظور، نمونه‌های تثبیت و جامدسازی، پس از طی دوره‌ی عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز در دو سیستم باز و بسته خرد و در گرمخانه با دمای $60^\circ C$ خشک شده است. اندازه‌ی ذرات قبل از شروع آزمایش باید کمتر از $9/5 mm$ باشد. براساس استاندارد مذکور، محلول استخراج استفاده شده، استیک اسید ۰/۱ مولار است که پس از تهیه، در pH برابر با $2/88 \pm 0/05$ به تعادل رسیده است. سوسپانسیون نمونه‌ها با نسبت S:W (محلول استخراج: مواد جامد) برابر با ۱۰:۲۰ تهیه شده است. تمامی سوسپانسیون‌ها به مدت 18 ± 2 ساعت به طور مداوم توسط دستگاه لرزاننده‌ی مکانیکی تکان داده شده‌اند. با اندازه‌گیری pH نمونه‌ها و سانتریفیوژ کردن آن‌ها، فاز مایع جدا و مقدار Pb^{+2} توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شده است. براساس معیار سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا برای پذیرش مقدار آلودگی رها شده از نمونه بعد از انجام آزمایش TCLP، بیشینه‌ی غلظت مجاز آلاینده ۵ (ppm) تعیین شده است.^[۲۳] به منظور تحلیل و بررسی پیشرفت واکنش‌ها و عناصری که در طی فرایند هیدراسیون و اندرکنش میان خاک آلوده و سیمان رخ داده است، از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شده است. با توجه به حضور مواد چسباننده و تأثیر رطوبت در مقدار پیشرفت هیدراسیون از روش نمونه‌سازی پودری و دستگاه Siemens – Diffractometer DA Advance واقع در دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا استفاده شده است.

۳. بحث و بررسی

۳.۱. رسوب فلز سنگین سرب تحت pH های مختلف

اصولاً حضور فلزات سنگین در خاک سبب اسیدی شدن محیط خاک می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده است، استفاده از سیمان در فرایند تثبیت و جامدسازی سبب افزایش pH نمونه می‌شود. اولین گام در فرایند تثبیت و جامدسازی فلزات سنگین، تغییر pH در محیط معادل با کمترین مقدار انحلال‌پذیری آلاینده است. [۲۴] فلز سنگین سرب، رفتار آمفوتریک دارد؛ بدین معنی که با تغییر pH محلول حفره‌بی در محدوده‌ی اسیدی و بازی شدید، غلظت سرب محلول افزایش می‌یابد. [۱۴] به‌منظور امکان ارزیابی رفتار سرب با تغییرات pH، یک مجموعه آزمایش رسوب انجام شده است. مطابق شکل ۱، رفتار فلز سنگین سرب در چهار ناحیه‌ی ۱، ۲، ۳ و ۴ قابل تفکیک است. رسوب تدریجی سرب در ناحیه‌ی ۲ با $pH = 4$ شروع شده و تا $pH = 9$ ادامه یافته است. کمترین مقدار انحلال‌پذیری سرب در $pH = 9$ تا $pH = 12$ رخ داده است. در نتیجه، براساس الگوی رسوب سرب در مقادیر pH مختلف، می‌توان درخصوص درصد سیمان مصرفی مناسب برای استفاده از مکانیزم رسوب و افزایش قابلیت نگهداری آلاینده در فرایند تثبیت و جامدسازی استفاده کرد.

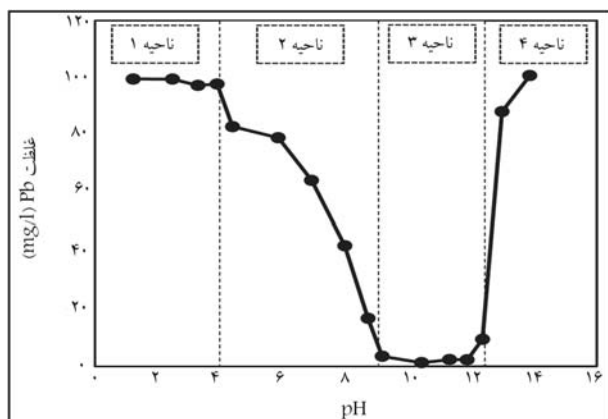
۳.۲. جذب و نگهداری آلاینده‌ی سرب توسط خاک بنتونیت

ارزیابی مطالعات و آزمایش‌های انجام شده توسط پژوهشگران نشان می‌دهد که فلزات سنگین در خاک‌های رسی توسط مکانیسم‌های تبادل کاتیونی، کربنات، هیدروکسید (عامل pH)، سطح مخصوص و فاز آلی نگهداری می‌شوند. [۲۵] به‌منظور مطالعه‌ی رفتار ژئوتکنیک زیست‌محیطی بنتونیت در میزان جذب و نگهداری فلز سنگین، در پژوهش حاضر یک‌سری آزمایش جذب صورت گرفته است که نتایج آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در حضور آلاینده، pH محیط خاک شروع به کاهش کرده و از $pH = 9/8$ در شرایط عدم حضور آلودگی تا $pH = 5$ در غلظت‌های زیاد آلودگی کاهش یافته است. این امر به دلیل حل‌شدگی فلز سنگین در آب و آزادسازی یون H^+ رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی میزان جذب و نگهداری آلاینده‌ی فلز سنگین سرب توسط بنتونیت در حدود $(93 \text{ cmol/kg} - \text{soil})$ است.

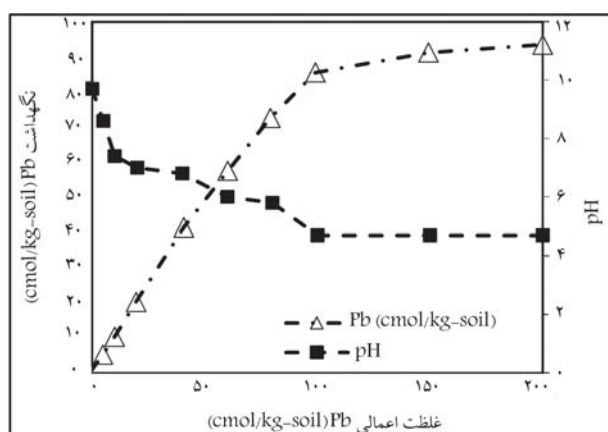
با توجه به نتایج جدول ۱ و آنالیز پراش پرتو ایکس خاک بنتونیت در شکل ۳، اصلی‌ترین عوامل جذب زیاد سرب در خاک بنتونیت، شامل: ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، سطح مخصوص بزرگ و حضور کربنات و کانی مونت‌موریلونیت است. سهم قابل توجه کانی مونت‌موریلونیت و همچنین حضور کربنات با توجه به نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس خاک بنتونیت در شکل ۳ مشاهده می‌شود. براساس نتایج شکل ۲ و بیشینه‌ی قابلیت نگهداری آلاینده‌ی سرب توسط بنتونیت، در پژوهش حاضر برای بررسی مستقیم تأثیر سیمان و نحوه‌ی عمل‌آوری در فرایند تثبیت/جامدسازی، نمونه‌ی خاک با $(100 \text{ cmol/kg} - \text{soil})$ سرب به صورت مصنوعی آلوده شده است.

۳.۳. پایش تغییرات pH نمونه‌های تثبیت/جامدسازی شده

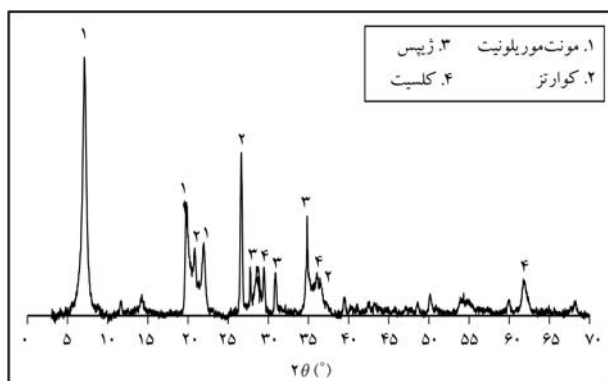
حضور سیمان در تثبیت و جامدسازی، با توجه به فرایند هیدراسیون سیمان و تشکیل پرتلندیت (CH) و به تبع آن آزاد شدن ترکیب‌های یون OH^- و آهک، موجب افزایش pH محیط می‌شود. براساس نتایج شکل ۱، تغییرات pH در فرایند حلالیت یون سرب، تأثیر مستقیم و قابل توجهی دارد. بنابراین لازم است تا پایش تغییرات pH



شکل ۱. تغییرات تشکیل و رسوب هیدروکسید سرب با تغییرات pH محلول.



شکل ۲. قابلیت نگهداری فلز سنگین سرب توسط بنتونیت و تغییرات pH آن.



شکل ۳. منحنی‌های پراش پرتو ایکس بنتونیت.

در طی زمان انجام شود. مقدار سیمان مصرفی در نوشتار حاضر، براساس قرارگیری pH در محدوده‌ی بیشینه‌ی رسوب آلاینده بوده و نمونه‌ها در چهار درصد رطوبت متفاوت ($0/8$ ، $1/2$ و $1/4$ رطوبت بهینه) و در دو سیستم عمل‌آوری باز و بسته آماده شده‌اند.

در شکل ۴، روند تغییرات pH نمونه‌ها در زمان‌های متفاوت به تفکیک سیستم‌های باز و بسته مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش زمان نگهداری، pH کلیه‌ی نمونه‌ها در بازه‌ی حدود $10/5$ تا $11/5$ به‌صورت افزایشی تغییر کرده است. در واقع، پیشرفت هیدراسیون سیمان در زمان و تولید پرتلندیت (CH)، عامل اصلی افزایش pH بوده است.

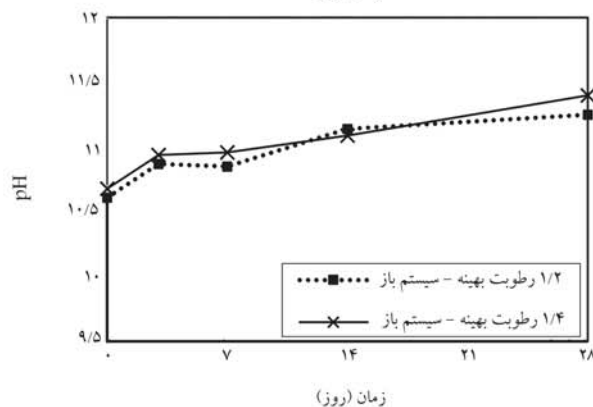
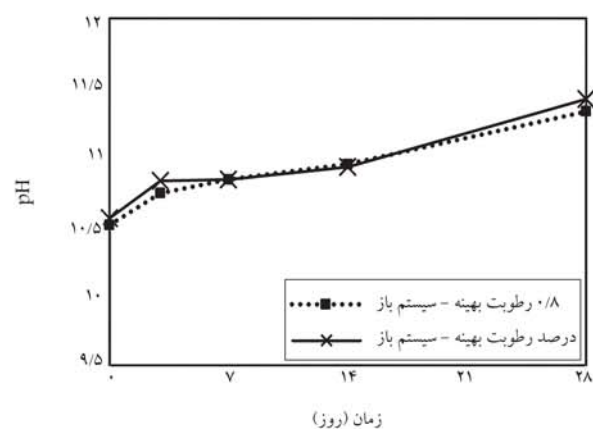
از سوی دیگر، نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط با رطوبت بیشتر، عموماً به مقدار جزئی دارای مقادیر pH نسبتاً بزرگ‌تری در مقایسه با نمونه‌های دارای درصد رطوبت کمتر بوده‌اند. از آنجا که خطای اندازه‌گیری با pH متر برابر ۰/۱° بوده، مقدار تفاوت مشاهده شده معنی‌دار بوده است. در هر سیستم عمل‌آوری، این تغییرات در نمونه‌های دارای درصد رطوبت بیشتر در مقایسه با نمونه‌های دارای درصد رطوبت کمتر، قابل مشاهده است. همچنین در درصد رطوبت اولیه یکسان، pH نمونه‌های نگهداری شده در سیستم باز به مقدار جزئی از مقادیر pH نمونه‌های نگهداری شده در سیستم بسته بیشتر بوده است. این افزایش جزئی در pH نمونه‌ها را می‌توان به حضور بهتر آب در نمونه‌های سیستم باز و تسریع در واکنش‌های هیدراسیون سیمان نسبت داد. در نتایج سایر پژوهشگران، تغییرات pH از ابتدا تا انتهای زمان عمل‌آوری بررسی نشده است؛ با این حال نتایج pH در انتهای زمان عمل‌آوری سایر پژوهشگران با نتایج ارائه شده در نوشتار حاضر مطابقت دارد. [۱۸، ۱۴]

در مجموع، در هر دو نحوه عمل‌آوری در طی زمان، pH نمونه‌ها در بازه‌ی حدود ۱۰/۵ تا ۱۱/۵ بوده است. براساس شکل ۱، در بازه‌ی اخیر تغییرات pH، رفتار یون سرب در ناحیه‌ی ۱ در شکل ۱ قرار گرفته است که بیانگر محدوده‌ی نظیر رسوب بیشینه‌ی آلایندگی سرب است. همین موضوع سبب می‌شود که در نمونه‌های مورد مطالعه در فرایند تثبیت/جامدسازی، مکانیزم نگهداری آلایندگی از طریق تثبیت (رسوب آلایندگی) نقش نسبتاً یکسانی داشته باشد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نوع سیستم عمل‌آوری و حدود درصد رطوبت نمونه‌ها (در دامنه‌ی حدود درصد رطوبت بهینه) نقش قابل‌توجهی بر تثبیت آلایندگی در فرایند فوق نداشته است. از سوی دیگر، تأثیر ۱۵٪ سیمان در نگهداری pH نمونه‌ها در بازه‌ی نظیر ناحیه‌ی ۳ از شکل ۱، بیانگر مناسب بودن حدود درصد سیمان انتخابی در پژوهش حاضر است.

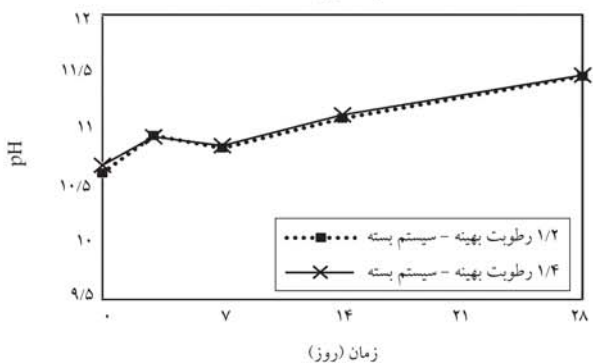
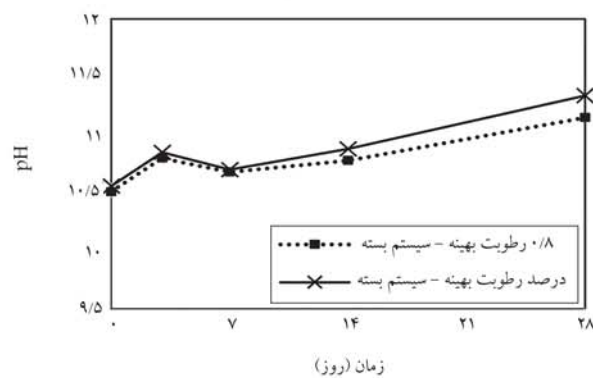
۴.۳. آزمایش آب‌شویی آلودگی (TCLP)

نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده توسط سیمان، ممکن است در طی زمان تحت عوامل جوی و محیطی مختلف، از جمله‌ی باران‌های اسیدی، حمله‌ی سولفات‌ها و یا شرباهای صنعتی رهاسازی شده در طبیعت در محیط با pH اسیدی قرار گیرند. به همین منظور سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، آزمایش آب‌شویی آلودگی (TCLP) را معیار مناسبی برای ارزیابی کارآمدی نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده در طی زمان بیان کرده است. بر این اساس، خاک تثبیت و جامدسازی شده، پس از عمل‌آوری همراه با سیمان با محلول استیک اسید ۰/۱ مولار که در pH ۵/۰ ± ۲/۸۸ به تعادل رسیده است، با نسبت S:W (محلول استخراج: مواد جامد) برابر با ۲۰ : ۱ تهیه شده و تمامی سوسپانسیون‌ها به مدت ۱۸ ± ۲ ساعت به‌طور مداوم توسط دستگاه لرزاننده‌ی مکانیکی تکان داده شده است. سپس بعد از احراز دیگر شرایط آزمایش، غلظت یون سرب در محلول اندازه‌گیری شده است. با وجود ظرفیت بافرینگ قابل توجه نمونه‌های جامدسازی شده‌ی پایه سیمانی، [۱۴] در صورتی که این نمونه‌ها در معرض شرایط محیط اسیدی قرار گیرند، می‌توان انتظار کاهش pH نمونه‌ها را داشت.

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱، در چنین شرایطی مسیر کاهش pH به سمت دامنه‌ی بی از pH است که ضمن حفظ شرایط قلیایی، حلالیت یون سرب و رهاسازی آن با شیب کمتری نسبت به محدوده به شدت قلیایی صورت گرفته است. نتایج آزمایش آب‌شویی آلودگی (TCLP) در شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب برای سیستم‌های باز و بسته تحت شرایط عمل‌آوری مختلف و درصد رطوبت ساخت متفاوت ارائه شده است. مطابق شکل ۵، هیچ‌کدام از نمونه‌های مطالعه شده در حالت



الف) عمل‌آوری سیستم باز؛



ب) عمل‌آوری سیستم بسته.

شکل ۴. تغییرات pH نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده‌ی بنتونیت آلوده به ۱۰۰ (cmol/kg - soil) فلز سنگین سرب همراه با ۱۵٪ سیمان در درصدهای مختلف رطوبت.

سیستم باز در ۷ روز عمل‌آوری، محدودیت استاندارد EPA در آزمایش را احراز نکرده‌اند. برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز نیز فقط نمونه با ۱/۴ رطوبت بهینه، محدودیت استاندارد EPA در آزمایش TCLP را احراز کرده است.

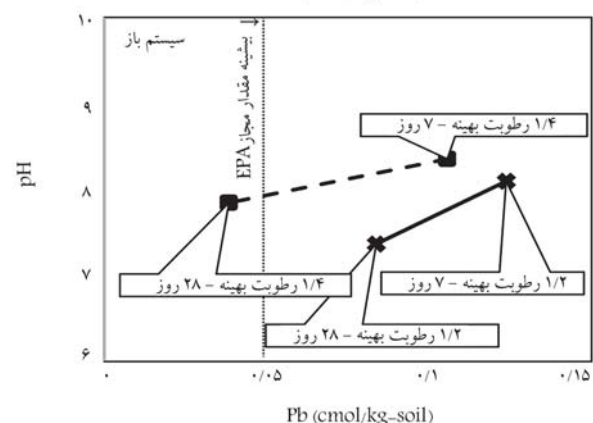
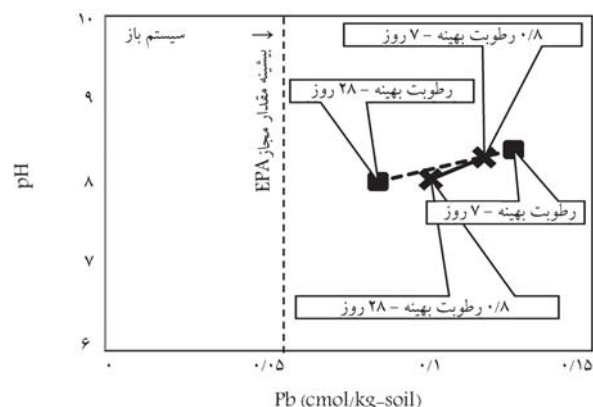
از سوی دیگر، براساس نتایج شکل ۶، با وجود آنکه تقریباً همه‌ی نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۷ روز نیز محدودیت‌های استاندارد را احراز نکرده‌اند، ولی مقادیر یون سرب واجبی در آزمایش TCLP برای نمونه‌های مذکور به مقدار مجاز ۵ppm بسیار نزدیک است. ضمن آنکه برای کلیه‌ی نمونه‌های اخیر، بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، محدودیت مجاز استاندارد احراز شده و غلظت یون سرب واجبی در آزمایش TCLP، کمتر از مقدار مجاز ۵ppm بوده است. قرارگیری pH نمونه‌ها در بازه‌ی مناسب برای رسوب آلایند در دوره‌ی عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز نشان می‌دهد که کاهش واجبی نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، احتمالاً به علت پیشرفت واکنش‌های پوزولانی در درازمدت (۲۸ روز) بوده است. برای تفسیر رفتار اخیر، یادآوری این نکته ضروری است که براساس نتایج ارائه شده در نمودارهای شکل ۴، دامنه‌ی تغییرات pH برای کلیه‌ی نمونه‌های سیستم‌های باز و بسته در مقادیر مشابه زمان عمل‌آوری، نسبتاً مشابه بوده است. ضمن آنکه در دامنه‌ی اخیر از تغییرات pH براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱، آلایندگی فلز سنگین سرب از منظر تثبیت (رسوب) در ناحیه‌ی ایمن قرار گرفته است. از سوی دیگر، براساس نمودارهای شکل ۶، برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم بسته، تغییرات غلظت یون سرب واجبی شده تقریباً مستقل از تغییرات درصد رطوبت حین ساخت نمونه‌ها بوده است.

با بررسی توأم نمودارها در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که مقدار pH نمونه‌ها پس از آزمایش TCLP، در طی زمان ۷ تا ۲۸ روز کاهش یافته است. این کاهش مقدار pH بیانگر کاهش ظرفیت بافرینگ سیستم در طی زمان است. با وجود کاهش ظرفیت بافرینگ در تمامی حالت‌ها، مقدار یون سرب واجبی کاهش یافته است. در نتیجه، غلظت بسیار کم یون سرب در نمونه‌های ۲۸ روزه، عمل‌آوری برای سیستم بسته (شکل ۶)، تأییدکننده‌ی این موضوع است که احتمالاً پیشرفت بهتر واکنش‌های پوزولانی در سیستم بسته، سبب واجبی کمتر یون سرب در آزمایش TCLP شده است.

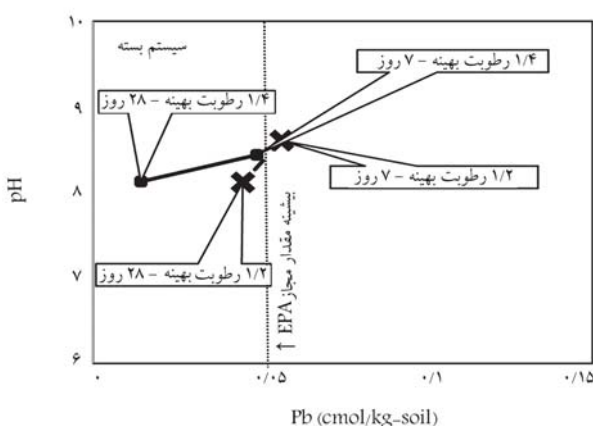
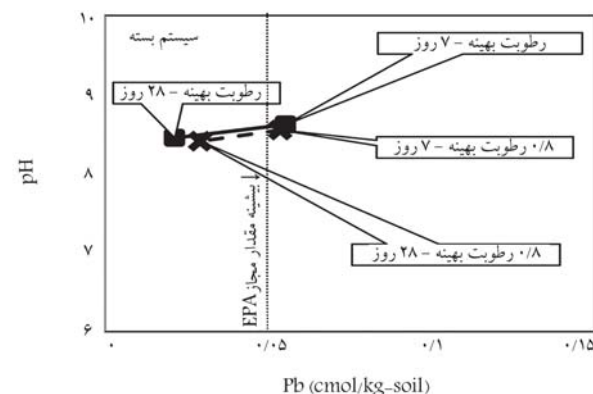
در نتیجه با عنایت به نمودارهای شکل ۴ و مشابه بودن شرایط لازم برای شکل‌گیری و پیشرفت مکانیزم تثبیت در هر دو سری نمونه‌ی عمل‌آوری شده، دلایل احراز محدودیت‌های استاندارد EPA در نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم بسته را می‌توان به پیشرفت بهتر فرایند جامدسازی در نمونه‌های اخیر نسبت داد. از آنجا که در مطالعات پیشین فقط بر تراکم بهتر نمونه‌های جامدسازی شده در شرایط رطوبت بهینه تمرکز شده و در عموم آن‌ها، به تأثیر تغییرات درصد رطوبت اولیه در نتایج آزمایش‌های TCLP توجهی نشده است،^[۱۸] لذا در مطالعات پیشین فقط اینگونه نتیجه‌گیری شده است که در محدوده‌ی درصد رطوبت مناسب برای کارایی مخلوط سیمان - خاک، تأثیر قابل توجهی در تراوش آلایند در نمونه‌های جامدسازی شده مشاهده نشده است. محدودیت اصلی مطالعات مذکور، مطالعه‌ی رفتار نمونه‌های جامدسازی شده در یک دامنه‌ی محدود از تغییرات درصد رطوبت بوده است.^[۱۸، ۱۴] با توجه به تأثیر قابل توجه درصد رطوبت در نتایج مشاهده شده در آزمایش‌های TCLP که در نمودارهای اخیر ارائه شده است، برای مطالعه‌ی ریزساختاری این موضوع از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شده است.

۵.۳. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

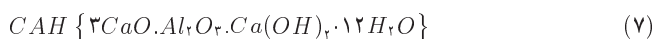
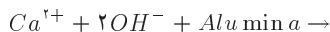
از آنالیز (XRD) به منظور بررسی ریزساختاری تشکیل کانی‌های مختلف و یافتن



شکل ۵. نتایج آزمایش TCLP در حالت سیستم باز.



شکل ۶. نتایج آزمایش TCLP در حالت سیستم بسته.



تجزیه و تحلیل قله‌های موجود در نمودارهای شکل ۷، امکان تفکیک مکانیزم‌های تثبیت و جامدسازی و مقایسه‌ی آن‌ها را در دو سیستم عمل‌آوری باز و بسته فراهم می‌کند. در شکل ۷، موقعیت و شدت قله‌های نظیر ترکیب‌های کریستال‌های سرب شامل:

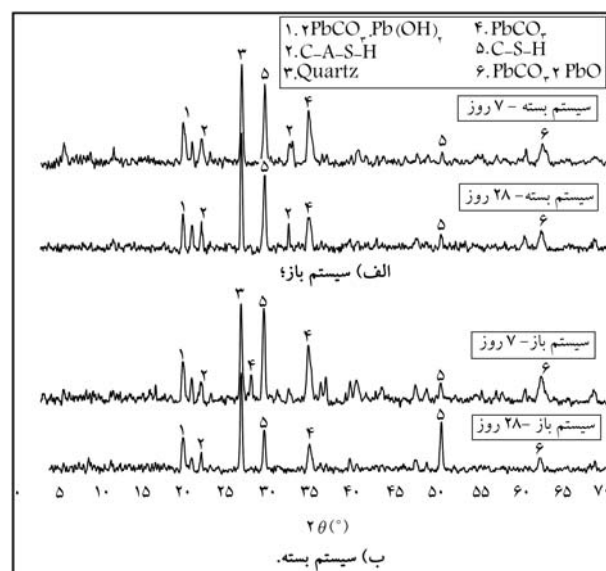
- کربنات سرب ($PbCO_3$, ICDD ۰۱۷ – ۰۷۳۲)،
 - کربنات اکسیدسرب ($PbCO_3/PbO$, ICDD ۰۱۹ – ۰۶۸۱)،
 - کربنات هیدروکسیدسرب ($2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$, ICDD ۰۱۹ – ۰۶۸۰)
- نشان داده شده است.

شدت قله‌ی نظیر این کریستال‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین ترکیب‌های شکل رسوبی ترکیب‌های سرب بیانگر پیشرفت مکانیزم تثبیت در فرایند تثبیت/جامدسازی پایه‌ی سیمانی است. براساس شکل ۷، سه ترکیب رسوبی سرب در هر دو سیستم عمل‌آوری باز و بسته تشکیل شده است. در نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ نیز نشان داده شد که تغییرات pH نمونه‌ها مستقل از شرایط عمل‌آوری بوده و در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه با تغییر جزئی در بازه‌ی حدود ۱۰/۵ تا ۱۱/۵ قرار گرفته است. همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، بازه‌ی تغییرات pH براساس نتایج شکل ۱ منطبق بر تشکیل رسوب‌های پایدار ترکیب‌های سرب است. بنابراین، انطباق شدت و موقعیت قله‌های نظیر ترکیب‌های سرب برای دو سیستم عمل‌آوری در شکل ۷، ضمن تأیید نتایج قبلی، بیان‌کننده‌ی این نکته‌ی اساسی است که فرایند تثبیت در هر دو نحوه‌ی عمل‌آوری تقریباً یکسان و مستقل از مکانیزم و نوع عمل‌آوری بوده است.

از سوی دیگر انتظار می‌رود در مکانیزم جامدسازی، بخشی از رسوب فلز سنگین سرب، هنگام تشکیل هیدراسیون سیمان از طریق جذب شدن بر سطح محصولاتی از جمله نانوساختار ($C-S-H$, ICDD ۰۴۲ – ۰۵۳۸)، ($C-A-S-H$, ICDD ۰۲۲ – ۰۵۱۸۱) و یا کپسوله شدن توسط محصولات هیدراسیون سیمان ثابت و پایدار شوند. سایر پژوهشگران نیز رسوبات هیدروکسی و کربناتی حاوی فلز سنگین سرب را در آنالیز XRD مشاهده کرده‌اند. [۲۹، ۲۸]

برای تمایز بهتر مکانیزم‌های تثبیت و جامدسازی و تحلیل کامل‌تر نتایج، از نمودار میله‌ای تجمعی شدت قله‌ها در شکل ۸ استفاده شده است. همان‌طور که در نتایج شکل ۸ و در مدت عمل‌آوری ۷ روز برای سیستم باز و بسته مشاهده می‌شود، مقدار تجمعی رسوبات کربناتی تشکیل شده در سیستم عمل‌آوری باز نسبت به سیستم بسته اندکی بیشتر بوده است. با توجه به میزان خطای موجود در قله‌ی تعیین شده در آزمایش‌های اشعه‌ی ایکس، این اختلاف معنی‌دار بوده است. [۲۷]

با وجود این، مقایسه‌ی نمودارهای میله‌ای در شکل ۸، حاکی از آن است که شدت تجمعی نظیر رسوب‌های سرب در ۲۸ روز کمتر از ۷ روز بوده و در مقابل در هر دو سیستم باز و بسته، شدت قله‌ی نظیر ترکیب‌های پوزولانی (جامدسازی‌کننده) در ۲۸ روز بیشتر از مقادیر نظیر در ۷ روز بوده است. این الگوی تغییرات را می‌توان به رشد واکنش‌های پوزولانی در زمان و جذب و کپسوله کردن بخشی از ترکیب‌های سرب در ترکیب‌های پوزولانی (کاهش شدت قله‌ی نظیر ترکیب‌های سرب در ۲۸ روز) نسبت داد. همچنین، با مقایسه‌ی محصولات جامدسازی شده در هر دو سیستم

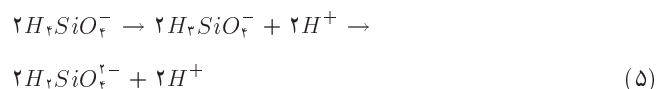
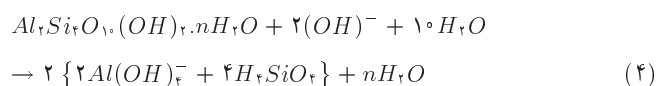


شکل ۷. منحنی‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های با درصد رطوبت بهینه‌ی عمل‌آوری شده در مدت ۷ و ۲۸ روز.

علت تغییرات در نتایج نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم‌های باز و بسته استفاده شده است. بر این اساس، نمونه‌های با درصد رطوبت بهینه و مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز، در سیستم‌های عمل‌آوری باز و بسته بررسی شده‌اند. نتایج شکل ۷، با استفاده از پرتو $Cu-K\alpha$ در محدوده‌ی ۲θ، ۴ تا ۷۰ درجه تهیه شده است. برای تشخیص فازهای کریستالی در نتایج پراش پرتو ایکس از نرم‌افزار X-Pert High Score Plus بر مبنای پایگاه داده‌ها نسخه‌ی (۲۰۱۷ release) PDF – ۲/ICDD استفاده شده است.

پراش پرتو ایکس یکی از روش‌هایی است که به شکل گسترده در شناسایی ریزساختاری کانی‌های رسی و مطالعه‌ی تغییر ساختار آن‌ها استفاده می‌شود. [۲۶]

اصلی‌ترین کانی رسی خاک بنتونیت استفاده شده، کانی مونت‌موریلونیت است، که براساس (Montmorillonite, ICDD ۹۶-۹۰۱-۰۹۵۸)، فاصله‌ی پایه $12/17 \text{ \AA}$ و زاویه‌ی 2θ برابر با $7/26$ دارد که در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس معادله‌ی ۲، افزایش pH محیط به مقدار بیش از $10/5$ موجب انحلال کانی‌های رس می‌شود: [۲۷، ۱۴]



با توجه به معادله‌های ۴ و ۵ و تغییرات pH محیط در طی عمل‌آوری که در شکل ۴ نشان داده شده است؛ تمامی نمونه‌ها طی عمل‌آوری، pH بیش از $10/5$ را تجربه کرده‌اند. با مقایسه‌ی طیف‌های اشعه‌ی ایکس ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۷، حذف قله‌ی اصلی نظیر کانی مونت‌موریلونیت در نتایج شکل ۷، تأییدکننده‌ی این مطلب است که کانی رسی مونت‌موریلونیت انحلال یافته است. براساس معادله‌های ۶ الی ۸، حضور یون‌های آلومینا و سیلیکات ناشی از انحلال کانی رسی مونت‌موریلونیت در محیط و همچنین حضور یون کلسیم، احتمال تشکیل این محصولات وجود دارد: [۲۴]



۴. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به این شرح خلاصه کرد:

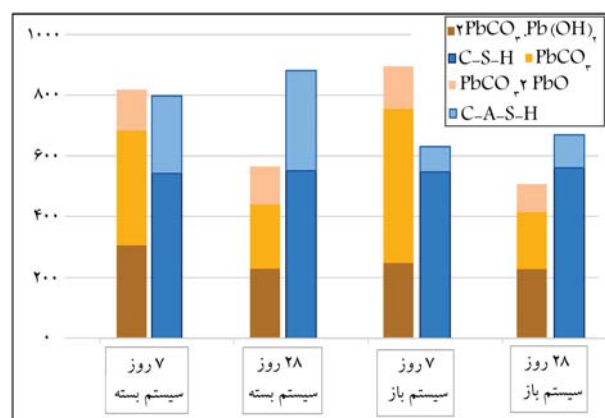
۱. با توجه به اهمیت pH در رسوب آلودگی، مقدار اولیه pH هنگام اختلاط سیمان با خاک آلوده، بسیار حائز اهمیت است. لازم است با توجه به غلظت آلاینده‌ی فلز سنگین، کمینه‌ی درصد سیمان برای جامدسازی به میرانی انتخاب شود که pH نمونه‌ی تثبیت/جامدسازی شده در محدوده‌ی ایمن رسوب آلاینده قرار گیرد.

۲. الگوی تغییرات pH در نمونه‌های نظیر در دو سیستم باز و بسته در زمان‌های عمل‌آوری یکسان، تقریباً مشابه و در محدوده‌ی رسوب یون سرب بوده است. در نمونه‌های مطالعه شده در فرایند تثبیت/جامدسازی، مکانیزم نگهداری آلاینده از طریق تثبیت (رسوب آلاینده) نقش نسبتاً یکسانی داشته است. بر این اساس، نوع سیستم عمل‌آوری و حدود درصد رطوبت نمونه‌ها (در حدود رطوبت بهینه) نقش قابل‌توجهی در مکانیزم تثبیت آلاینده نداشته است.

۳. با عنایت به مشابه بودن شرایط لازم برای شکل‌گیری و پیشرفت مکانیزم تثبیت در هر دو سری نمونه‌ی عمل‌آوری شده، احراز محدودیت‌های استاندارد EPA در نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم بسته را می‌توان به پیشرفت بهتر واکنش‌های پوزولانی و تشکیل کریستال‌های C-A-S-H و محبوس شدن آلاینده‌ی فلز سنگین برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم بسته نسبت داد.

۴. در روش عمل‌آوری در سیستم بسته، محدودیت استاندارد EPA مستقل از مقدار درصد رطوبت اولیه حین ساخت نمونه احراز شده است و تمامی نمونه‌های مذکور صرف‌نظر از درصد رطوبت اولیه، در آزمایش آب‌شویی آلودگی، مقدار واجدبی کمتر از حد مجاز استاندارد را کسب کرده‌اند.

۵. براساس نتایج پژوهش حاضر از منظر اجرایی استفاده از تثبیت پایه‌ی سیمانی در سایت‌هایی که خاک آلوده در ترازهای بالاتر از سفره‌ی آب زیرزمینی واقع است، راندمان و عملکرد بهتری داشته است و انتظار می‌رود در این موارد، واجدبی آلاینده از مصالح جامدسازی شده به میزان کمتری صورت گیرد.



شکل ۸. نمودار میله‌ای مقدار تجمع شدت قله‌های تثبیت و جامدسازی.

عمل‌آوری در مدت زمان ۷ و ۲۸ روز، افزایش محصولات سیمانی مشاهده می‌شود. شدت بیشتر قله نظیر ترکیب‌های پوزولانی در سیستم بسته در مقایسه با سیستم باز، حاکی از آن است که مکانیزم جامدسازی در سیستم بسته، پیشرفت بهتری داشته است.

از آنجا که شدت نظیر قله‌ی C-S-H در دو سری نمونه‌های سیستم‌های باز و بسته در زمان‌های ۷ و ۲۸ روز تقریباً یکسان بوده است، می‌توان افزایش مجموع شدت قله‌های نظیر واکنش‌های پوزولانی در ۲۸ روز برای نمونه‌های سیستم بسته را به تشکیل و رشد کریستال‌های پوزولانی و جامدسازی‌کننده‌ی C-A-S-H نسبت داد. همین موضوع سبب شده است تا نمونه‌های سیستم بسته براساس نتایج شکل ۶ و به علت پیشرفت بهتر فرایند جامدسازی در سیستم بسته، واجدبی کمتری در آزمایش TCLP نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در سیستم باز نشان دهند. همچنین نتایج ارائه شده در شکل ۸ حاکی از آن است که با پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خصوصاً در سیستم بسته، بخشی از آلاینده‌های فلزی سنگین رسوب کرده و برای نگهداری به قالب فرایند جامدسازی منتقل شده‌اند. این نتیجه‌گیری با نتایج آزمایش‌های TCLP نیز انطباق مناسبی دارد.

پانویس‌ها

1. Calcium Silica Hydrate
2. Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
3. Optimum Water Content (OWC)
4. Shaker
5. Basal Spacing

منابع (References)

1. Xia, W.Y., Feng, Y.S., Du, Y.J. and et al. "Solidification and stabilization of heavy metal-contaminated industrial site soil using KMP binder", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**(6), p. 04018080 (2018).

2. Glatstein, D.A. and Francisca, F.M. "Influence of pH and ionic strength on Cd, Cu and Pb removal from water by adsorption in Na-bentonite", *Applied Clay Science*, **118**, pp. 61-67 (2015).
3. Muthu, M., Santhanam, M. and Kumar, M. "Pb removal in pervious concrete filter: Effects of accelerated carbonation and hydraulic retention time", *Construction and Building Materials*, **174**, pp. 224-232 (2018).
4. Ouhadi, V.R., Amiri, M. and Goodarzi, A.R. "The Special potential of nano-clays for heavy metal contaminant retention in geo-environmental projects", *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**(6), pp. 631-642 (2012).
5. Wang, X.L., Wang, M.H., Xiang Quan, Sh. and et al. "Influence of thermal treatment on fixation rate and

- leaching behavior of heavy metals in soils from a typical e-waste processing site", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **4**(1), pp. 82-88 (2016).
6. Rajendran, S., Priya, T.A.K., Khoo, K.S. and et al. "A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils", *Chemosphere*, **287**(4), (Article 132369) (2022).
7. Wang, H., Ju, C., Zhou, M. and et al. "Sustainable and efficient stabilization/solidification of Pb, Cr, and Cd in lead-zinc tailings by using highly reactive pozzolanic solid waste", *Journal of Environmental Management*, **306**, p. 114473 (2022).
8. Su, Y., Yang, J., Liu, D. and et al. "Effects of municipal solid waste incineration fly ash on solidification/ stabilization of Cd and Pb by magnesium potassium phosphate cement", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **4**(1), pp. 259-265 (2016).
9. Wang, L., Tsang, D.C. and Poon, C.S. "Green remediation and recycling of contaminated sediment by waste-incorporated stabilization/solidification", *Chemosphere*, **122**, pp. 257-264 (2015).
10. Akkarapongtrakul, A., Julphunthong, P. and Nochaiya, T. "Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes", *Monatsh Chem*, **148**, pp. 1355-1362 (2017).
11. Malviya, R. and Chaudhary, R. "Study of treatment effectiveness of solidification/stabilization process for waste bearing heavy metals", *J. Hazard. Mater*, **6**, pp. 147-153 (2004).
12. Ouhadi, V.R. and Sahraie, N. "Solidification/stabilization of cadmium contaminated bentonite by the use of cement, impact of nano-silica upon this process", *Modares Civil Engineering Journal*, **22**(3), pp. 133-146 (2022).
13. Ouhadi, V.R. and Deiranlou, M. "Impact of fly ash on the process of cement based solidification of heavy metal contaminated bentonite", *Journal of Civil Engineering of Sharif University*, **37.2**(1.1), pp. 85-94 (2021).
14. Ouhadi, V.R., Yong, R.N. and Deiranlou, M. "Enhancement of cement-based solidification/stabilization cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay", *Journal of Hazardous Materials*, **403**, p. 123969 (2021).
15. Lu, L., Xiang, C., He, Y. and et al. "Early hydration of C3S in the presence of Cd²⁺, Pb²⁺ and Cr³⁺ and the immobilization of heavy metals in pastes", *Construction and Building Materials*, **152**, pp. 923-932 (2017).
16. Barani motlagh, M., Emani, T., Bostani, A. and et al. "In situ chemical stabilization of lead using phosphate compounds in a calcareous contaminated soil", *Water and Soil Science*, **25**(3), pp. 91-103 (2015).
17. Aitcin, P.C. and Neville, A.M. "How the water/cement ratio affects concrete strength", *Concrete International*, **25**(8), pp. 51-58 (2003).
18. Kogbara, R.B., Al-Tabbaa, A., Yi, Y. and et al. "Cement-fly ash stabilisation/solidification of contaminated soil: Performance properties and initiation of operating envelopes", *Applied Geochemistry*, **33**, pp. 64-75 (2013).
19. Behnood, A. "Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges", *Approaches and Techniques. Transp. Geotech*, **17**, pp. 14-32 (2018).
20. Ouhadi, V.R., Yong, R.N. and Sedighi, M. "Desorption response and degradation of buffering capability of bentonite, subjected to heavy metal contaminants", *Engineering Geology*, **85**(1.2), pp. 102-110 (2006).
21. Ouhadi, V.R., and Deiranlou, M. "Development and validation of the modified barium chloride method for CEC measurement and determination of accurate exchangeable calcium cation concentration in carbonated clayey soils", *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(3), pp. 21-34 (In Persian) (2017).
22. Eltantawy, I.N. and Arnold, P.W. "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether, (EGME) method for surface area estimation of clays", *Soil Science*, **24**(2), pp. 232-238 (1973).
23. Dermatas, D. and Meng, X. "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils", *Engineering Geology*, **70**(3.4), pp. 377-394 (2003).
24. U.S. Environmental Protection Agency, "Technology performance review: Selecting and using solidification/stabilization treatment for site remediation", EPA/600/R-09/148 November, Cincinnati (2009).
25. Yong, R.N. and Phadungchewit, Y. "pH influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **30**(5), pp. 821-833 (1993).
26. Mitchell, J.K. "Fundamentals of soil behavior", *2nd Edn.*, John Wiley & Sons. Inc, New York, pp. 420-450 (2005).
27. Ouhadi, V.R. and Yong, R.N. "Impact of clay microstructure and mass absorption coefficient on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis", *Applied Clay Science*, **23**, pp. 141-148 (2003).
28. Chiu, A.C.F., Akseseh, R., Moumouni, I.M. et al. "Laboratory assessment of rice husk ash (RHA) in the solidification/stabilization of heavy metal contaminated slurry", *Journal of Hazardous Materials*, **371**, pp. 62-71 (2019).
29. Wang, F., Shen, Z., Liu, R. and et al. "GMCs stabilized/solidified Pb/Zn contaminated soil under different curing temperature: Physical and microstructural properties", *Chemosphere*, **239**, p. 124738 (2020).

تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه «پاندولی تکی» با پلان نامنظم

مهدی امری (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

عبدالرضا سروقد مقدم* (دانشیار)

بزره‌شگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

آرمین عظیمی‌نژاد (استادیار)

محمدرضا منصوری (استادیار)

گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (دوره ۳، شماره ۲، صص. ۱۱۴-۱۰۳) (پژوهشی)

کارایی یک ساختمان با سیستم جداسازی پایه، از مودهای بالاتر تأثیر می‌پذیرد. با توجه به نبود مطالعات برای بسیاری از انواع پلان‌های نامنظم در ساختمان‌های دارای جداساز پایه پاندولی، در مطالعه‌ی حاضر به پوشش طیف وسیعی از میزان نامنظمی چیدمان‌های مختلف جداگرها پرداخته شده است. به منظور بررسی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه پاندولی، یک مطالعه‌ی پارامتریکی روی مدل‌های ساختمانی با پلان‌های مختلف در ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه با پلان L شکل، همچنین از ۴ ساختمان یک طبقه با خروج از مرکزیت‌های متفاوت مرکز جرم و سختی و ساختمان‌های U و S شکل در مطالعه‌ی حاضر انجام شده است. در هر کدام از ساختمان‌ها از ۸ چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی استفاده شده است. زمان تناوب مودهای مختلف ارتعاشی، درصد مشارکت جرمی مودها و تغییرات متوسط بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز پایه تحت ۱۲ شتاب‌نگاشت مقایسه شده است. نتایج کلی تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در صورت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی در تراز پایه از درصد مشارکت جرمی مود اول کاسته و در عوض، به درصد مشارکت جرمی مودهای دوم یا سوم و بالاتر اضافه می‌شود. لذا، مود دوم و یا بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سازه می‌شود و تغییرمکان تراز پایه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مودهای بالاتر ارتعاشی، درصد مشارکت جرمی، سیستم جداگر پایه پاندولی تکی، مرکز سختی و مرکز جرم تجمعی در تراز پایه، مرکز سختی و مرکز شعاع انحناء جداگر پایه پاندولی.

mehdi_amri@yahoo.com
moghadam@iies.ac.ir
arminaziminejad@srbiau.ac.ir
mman@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

مشاهده کرد، که در آنها زمان تناوب مود اول در ناحیه‌ی حساس به سرعت یا جابه‌جایی طیف و زمان تناوب مود دوم در ناحیه‌ی حساس به شتاب قرار می‌گیرد که در برش تأثیرگذار است. همچنین جرم مؤثر مودی در مود دوم بزرگ‌تر از مود اول است. لذا مود دوم، تعیین‌کننده‌ی مقدار برش پایه است.^[۱، ۲] پدیده‌ی دوم، افزایش شتاب‌های غیرمنتظره‌ی کف طبقات به مقدار بیش از مقادیر ارزیابی شده توسط مدل‌های تحلیلی است. برای مثال، در طول زمین‌لرزه‌ی نورتریج، بیشینه‌ی شتاب طبقات بیش از ۴ برابر بیشینه‌ی شتاب زمین اندازه‌گیری شده است. نیروهای

مطالعات محدودی در سیستم‌های سازه‌یی با قاب‌های سازه‌یی وجود دارند که امکان تأثیرگذاری حالت غیرخطی ناشی از آسیب ساختمان در مودهای بالا را نشان می‌دهند و تاکنون دو پدیده از این لحاظ ارزیابی شده است.^[۱، ۲] اولین پدیده را می‌توان در افزایش مقدار برش پایه در سازه‌های دارای دیوار بتنی لاغر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۱۳، پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2023.61073.3147

استاد به این مقاله:

امری، مهدی، سروقد مقدم، عبدالرضا، عظیمی‌نژاد، آرمین و منصوری، محمدرضا، ۱۴۰۲. تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه «پاندولی تکی» با پلان نامنظم. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۱۴-۱۰۳.

اینرسی وارد بر کف به شتاب کف مرتبط است، لذا ارزیابی نادرست از شتاب طبقه، تخمین نادقیقی از نیروهای اینرسی طبقه را نشان خواهد داد که در طراحی اجزاء سازه‌یی و غیرسازه‌یی متعدد تأثیرگذار خواهد بود.^[۱۵] از سوی دیگر، حتی با توجه به استفاده‌ی آیین‌نامه‌های مدرن کنونی از تحلیل‌های چند مودی دوکاستی هنوز باقیمانده است. یکی آنکه، از ضریب رفتار واحدی برای تمامی موردهای مؤثر ارتعاشی استفاده می‌شود و دیگر آنکه، مقادیر طیف طراحی با استفاده از زمان تناوب کشسان، بدون در نظر گرفتن تغییر سختی در محدوده‌ی غیرخطی محاسبه می‌شود.^[۱۲]

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ی چندانی بر روی تأثیر موردهای مختلف ارتعاشی در سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی انجام نشده است. از طرف دیگر، عملکرد سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی براساس افزایش زمان تناوب صورت می‌پذیرد و تأثیر موردهای بالاتر ارتعاشی در سازه‌هایی با زمان تناوب بالا بیشتر مشهود هست. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است اثر موردهای بالاتر در ساختمان‌های نامنظم در پلان با چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی تکی بررسی شود. از سوی دیگر، دو شاخص مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه پاندولی و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی تعریف و مطالعه‌ی بر روی تأثیر نقاط مذکور در پاسخ سازه‌ها انجام شده است. همچنین بررسی مبنی بر بهینه‌سازی نحوه‌ی چیدمان‌های مختلف جداگرهای پایه پاندولی صورت گرفته است.

۲. مروری بر چند نمونه از مطالعات پیشین

مطالعه‌ی عددی بر روی تأثیر موردهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های برشی، که در آنها میراگر ویسکوکشسان به صورت غیریکنواخت توزیع شده بود، توسط تسای و چانگ^[۲۰۲] بررسی شده و نشان داده است که اثر موردهای بالاتر در ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوکشسان با زمان تناوب طولانی قابل توجه است. همچنین، تأثیر آن در مقدار برش پایه، کمتر از شتاب طبقات بوده و در طبقات بالا این تفاوت بیشتر مشاهده شده است.^[۷]

دانشجو و گرامی^[۲۰۳]، براساس تحلیل طیفی و تحلیل دینامیکی تاریخیچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی به بررسی آثار موردهای بالاتر در پاسخ لرزه‌یی قاب‌های خمشی فولادی چنددرجه آزادی با تعداد طبقات ۴، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ طبقه، تحت زمین‌لرزه‌های: السنترو، طیس، ناغان و منجیل پرداخته و برای اعمال تأثیر موردهای بالاتر در تبدیل سازه‌ی یک درجه آزادی به چند درجه آزادی، ضرایب اصلاحی برای پاسخ‌های دررفت، جابه‌جایی، برش و شکل‌پذیری ارائه داده‌اند.^[۸] تسای و همکاران^[۲۰۴]، در رابطه با توزیع نیروی جانبی در ارتفاع سازه‌ی بالای جداگر پایه پرداخته و دریافته‌اند که رابطه‌ی مربوط به آیین‌نامه‌ی UBC-۹۷ بسیار محافظه‌کارانه است و رابطه‌ی برای آن ارائه داده‌اند.^[۹] نقش تحلیل‌های پوش‌آور با موردهای بالاتر در تحلیل لرزه‌یی ساختمان‌ها توسط راکش کی گوئل و همکاران^[۲۰۵]، بررسی شده است.

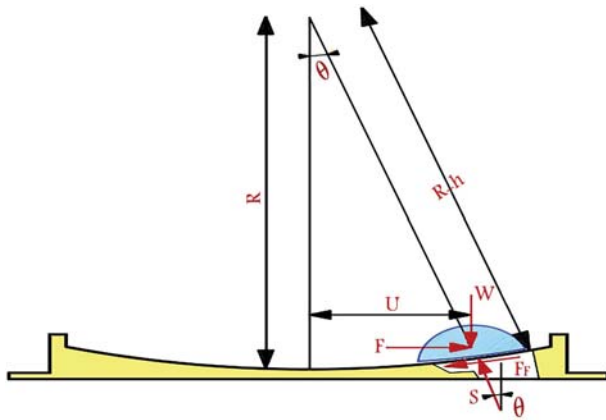
مانیاتاکیس^۲ و همکاران^[۲۰۱۳]، نتایج حاصل از پاسخ‌های تحلیل طیفی مودال با تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی را در ساختمان ۹ طبقه‌ی بتنی که انتظار می‌رفت مود اول بر آن غالب باشد، مقایسه کرده و نتیجه گرفته‌اند که نیروهای اینرسی طبقه و شتاب همه‌ی طبقات و نیروهای برشی در طبقات بالاتر با روش‌هایی که موردهای بالاتر را نادیده می‌گیرند، به درستی محاسبه نمی‌شوند، حتی برای سازه‌هایی که مود اول بر آنها حاکم است، به طور قابل توجهی دست‌کم گرفته می‌شوند و سهم

موردهای بالاتر به ویژگی‌های حرکت زمین، مقاومت مازاد هر مود و کمیت پاسخ مورد بررسی بستگی دارد.^[۱۰] خوشنودیان و نوزادی^[۲۰۱۳]، توزیع عمودی نیروی برش پایه در ارتفاع سازه‌های دارای جداگر پایه‌ی الاستومتری را با در نظر گرفتن آثار مد بالاتر تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بررسی کردند و دریافته‌اند که رفتار غیرخطی سیستم‌های دارای جداگر پایه باعث تغییر بسامدهای ارسالی به سازه‌ی فوقانی می‌شود و آثار موردهای بالاتر را باید در نظر گرفت و رابطه‌ی برای توزیع برش پایه در ارتفاع سازه‌های دارای جداگر پایه، که شامل ویژگی‌های سیستم جداگر پایه‌ی الاستومتری تحت زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک بود، را ارائه کردند.^[۱۱] سیاپلو و همکاران^[۲۰۱۷]، پی بردند که تأثیر موردهای بالاتر تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در راستای موازی با گسل بیشتر از زلزله‌های عمود بر راستای گسل است و طبقات فوقانی سازه‌ها بیشتر تحت تأثیر موردهای بالاتر قرار می‌گیرند، به طوری که تقریباً اثر موردهای بالاتر در ۲۰ الی ۴۰ درصد ارتفاع طبقات فوقانی حاکم است و طبقات میانی و تحتانی سازه‌ها بیشتر تحت تأثیر مود اول هستند. همچنین نتایج نشان داده است که آثار موردهای بالاتر با افزایش زمان تناوب سازه‌ها افزایش یافته است.^[۱۲]

بهنودگنجوی و همکاران^[۲۰۱۶]، نشان دادند که در موارد کشسان و غیرکشسان، آثار موردهای بالاتر برای سیستم‌های خاک - سازه در مقایسه با ساختمان‌هایی بر پایه‌ی تکیه‌گاه ثابت بیشتر مشاهده می‌شود.^[۱۳]

قلهکی و سلیم بهرامی^[۲۰۱۹]، به بررسی نسبت انرژی چرخه‌یی به کل انرژی تلف شده در سازه‌های قاب خمشی بتنی به همراه دیوار برشی فولادی پرداختند و نشان دادند در سیستم‌های چنددرجه آزادی، تغییرات نسبت انرژی چرخه‌یی به کل انرژی تلف شده مستقل از زمان تناوب است؛ به طوری که اثر موردهای بالاتر چندان در آن قابل توجه نیست. همچنین برای سیستم چنددرجه آزادی با افزایش ضریب شکل‌پذیری، این نسبت به نتایج سیستم یک درجه آزادی نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که افزایش ضریب شکل‌پذیری منجر به کاهش آثار موردهای بالاتر می‌شود.^[۲] فاطمی^۳ و همکاران^[۲۰۲۰]، در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی سازه‌ی دارای دیوار برشی نشان دادند که ضریب تقویت برشی ناشی از آثار موردهای بالاتر غیرخطی می‌تواند بیشتر از ۱/۵ برابر باشد. طبق نتایج آزمایشگاهی به نظر می‌رسد در محاسبه‌ی مقاومت نیروی برشی وارد بر دیوارهای بتنی سازه‌یی، آیین‌نامه‌های مدرن سازه‌یی به صورت محافظه‌کارانه عمل می‌کنند.^[۱۴] رفیعی و همکاران^[۲۰۱۹]، در بررسی تأثیر موردهای بالاتر در ضریب کاهش مقاومت سازه‌های قاب خمشی به همراه دیوار برشی بتنی دریافته‌اند که مقدار ضریب رفتار توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها، برای ساختمان‌های بلند ناسازگار است و باید برای آنها اصلاح شود.^[۱۵]

سلیم بهرامی و قلهکی^[۲۰۲۱]، نیز با مطالعه بر روی سازه‌های بتنی به همراه دیوار برشی فولادی پی بردند که در سیستم‌های چنددرجه آزادی، مستقل از زمان تناوب، اثر موردهای بالاتر چندان قابل توجه نیست.^[۱] ژیاوی و کی^۴ [۲۰۲۲]، به ارائه‌ی روش جدیدی برای محاسبه‌ی طیف میانگین پرداخته‌اند، به طوری که از ضرایب وزنی نسبت‌های مشارکت جرمی هر مود استفاده کرده و اثر موردهای بالاتر را در نظر گرفته‌اند.^[۱۶] بررسی تعامل بین موردهای بالاتر سازه دارای سقف‌های مشبک با سازه‌ی تحتانی توسط نایر^۵ و همکاران^[۲۰۲۱] انجام پذیرفته و نسبت جدیدی از سهم هر مود سازه‌ی تحتانی از پاسخ کلی سازه ارائه شده است.^[۱۷] وانگ^۶ و همکاران^[۲۰۲۱]، با مطالعه بر روی قاب‌های فولادی مهاربندی شده پی بردند در طراحی قاب‌های مهاربندی شده هم‌محور، تأثیر موردهای بالاتر را نباید نادیده گرفت. نتایج عددی نشان داده‌اند که موردهای بالاتر به مقدار برش پایه نسبت به جابه‌جایی بیشتر مؤثرتر هستند.^[۱۸]



شکل ۱. تصویر تغییر شکل یافته‌ی جداگر پاندولی.

همچنین، θ زاویه‌ی تغییر شکل جداگر از حالت اولیه و S نیروی عکس العمل سطحی است که به دلیل وجود لنگر در محل اثر نیرو و خروج از مرکزیت θ ایجاد می‌شود (رابطه‌ی ۶).

$$S = \frac{W}{\cos \theta} \cong W \quad (6)$$

که با قرار دادن مقدار اخیر (S) در رابطه‌ی ۵، مقدار F_f مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$F_f = \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (7)$$

که در آن، $\operatorname{sgn}(\dot{u})$ تابع علامت است و u مقدار جابه‌جایی افقی محل اثر نیرو است که از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید: [۱۹]

$$u = (R - h) \sin \theta = R_{eff} \sin \theta \quad (8)$$

که در آن، R شعاع انحنا جداگر، h مقدار ارتفاعی است که لغزنده بالا آمده و جابه‌جایی قائم لغزنده از حالت اولیه بوده است، و R_{eff} شعاع انحنا مؤثر جداگر است.

با استفاده از رابطه‌های ۴ تا ۸، رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی جداگر پاندولی تکی از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$F = \frac{W}{R_{eff} \cos \theta} u + \frac{F_f}{\cos \theta} \quad (9)$$

با توجه به زیاد بودن شعاع انحنا و به تبع آن کوچک بودن زاویه، می‌توان مقدار زاویه‌ی جابه‌جایی را صفر فرض کرد. برای مقادیر $u < \frac{1}{2} R$ ، مقدار θ عدد کوچکی است و خطای ۲٪ در مقدار جابه‌جایی دارد. [۲۰] و در صورتی که جابه‌جایی جداگر کمتر از $\frac{1}{3}$ شعاع انحنا جداگر باشد، خطایی در حدود ۵٪ خواهد داشت. [۲۰] لذا رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی مطابق رابطه‌ی ۱۰ خواهد بود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$F = \frac{W}{R_{eff}} u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) = F_r + F_f = \text{restoring} + \text{friction} \quad (10)$$

باربری برای F_r و R ‌های بزرگ انجام می‌شود. یعنی در صورتی که $(u < \mu R)$ یا $F_r < F_f$ باشد، انتقال باری انجام نخواهد پذیرفت. سختی مؤثر جداگر پاندولی

۳. مفهوم مودهای بالاتر

معادله‌ی حرکت حاکم بر سازه‌های n درجه آزادی در صورت رفتار غیرخطی مطابق معادله‌ی ۱ است: [۱۰]

$$[m]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{f_s\}(\{u\}, \operatorname{sign}\{\dot{u}\}) = -[m]\{i\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که در آن، $[m]$ ، $[C]$ ، $\{f_s\}$: ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی؛ $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ ، $\{\ddot{u}\}$: بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب؛ $\{i\}$: بردار واحد و \ddot{u}_g : شتاب زمین هستند که در تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی استاندارد (NLRHA) به صورت عددی حل می‌شود.

آنالیز تاریخی زمانی مودال غیرهمبسته (UMRHA)، روشی با ارزش برای محاسبه‌ی آثار مودهای بالاتر است، زیرا امکان بررسی پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخی زمانی را بدون در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای هر مود به صورت جداگانه فراهم می‌کند و معادله‌ی حرکت آن بر مود n م مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\ddot{D}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{D}_n(t) + \frac{F_{sn}}{L_n} D_n(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که در آن، $D_n(t)$ مقدار تغییر مکان در هر لحظه‌ی زمانی، ξ_n و ω_n درصد میرایی و بسامد طبیعی در مود n م، L_n ضریب مشارکت مود n م و Γ_n از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آیند:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad L_n = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{jn} \quad M_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2 \quad (3)$$

در روش‌های تحلیل مودال مرسوم، معمولاً فقط چند مود غالب برای توصیف رفتار دینامیکی ساختمان‌های چنددرجه آزادی مورد نیاز است. تعداد مودهای مورد نیاز در تحلیل دینامیکی به سهم مودهای بالاتر در پاسخ سازه بستگی دارد که به آن اثر مودهای بالاتر گفته می‌شود.

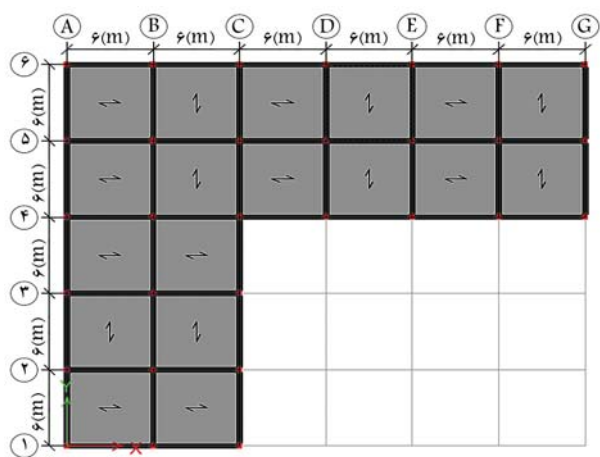
۴. سختی و سختی مؤثر جداگر پاندولی تکی

از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که برای مدل کردن جداگرهای پایه پاندولی وجود دارد، عبارت از: سختی مؤثر، سختی سکانت و شعاع انحنا جداگر پایه پاندولی هستند. لذا گذرا به نحوه‌ی محاسبه‌ی آنها پرداخته شده است. در شکل ۱، جداگر پاندولی تکی تغییر شکل یافته مشاهده می‌شود که روابط تعادل نیرویی در آن مطابق رابطه‌ی ۴ هستند: [۱۹]

$$\begin{aligned} F - S \sin \theta - F_f \cos \theta &= 0 \\ W - S \cos \theta + F \sin \theta &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، F نیروی جانبی زلزله است که توسط لغزنده به جداگر وارد می‌شود و W بار قائم (بارهای ثقلی) و F_f نیروی اصطکاک در سطح تماس است که از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$F_f = \mu S \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (5)$$



شکل ۴. پلان سازه‌ی بررسی شده در مدل اول.

مرده‌ی پشت‌بام ۵۶°، بار زنده‌ی طبقات ۲۰۰ و بار زنده‌ی پشت‌بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و ابعاد تیرها ۴۵cm × ۳۵cm و ستون‌ها ۴۵cm × ۴۵cm در نظر گرفته شده‌اند.

برای هر کدام از ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه‌ی مذکور، علاوه بر مرکز جرم تجمعی پایه و مرکز سختی و مرکز هندسی پلان طبقه‌ی اول، مرکز شعاع انحناء و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه تعریف شده‌اند. سپس از ۸ چیدمان متفاوت جداگر پایه پاندولی مطابق شرایط زیر استفاده شده است:

چیدمان اول: حالت مرسوم است که در آن شعاع انحناء تک‌تک جداگرهای پاندولی با هم برابر و سختی آنها براساس تیپ‌بندی ستون‌ها (براساس مقدار بار ثقلی وارده) تغییر می‌یابد.

چیدمان دوم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که محل «مرکز شعاع انحناء» تمامی آنها بر مرکز هندسی سقف اول منطبق شود. بدیهی است که مطابق رابطه‌ی ۱۲، زمانی که شعاع انحناء جداگری تغییر می‌یابد، سختی آن جداگر نیز تغییر می‌کند.

چیدمان سوم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز شعاع انحناء تمامی آنها بر مرکز جرم تجمعی پایه منطبق شود.

چیدمان چهارم: شعاع انحناء یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز شعاع انحناء تمامی آنها بر مرکز سختی طبقه‌ی اول منطبق شود.

چیدمان پنجم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز هندسی سقف اول منطبق شود.

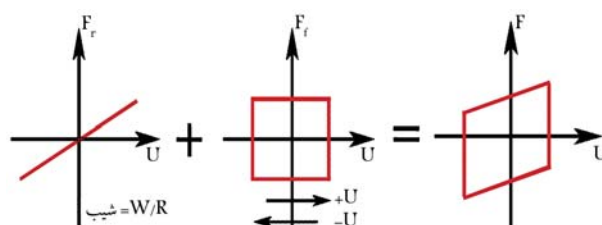
چیدمان ششم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز جرم تجمعی پایه منطبق شود.

چیدمان هفتم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که منطبق شدن مرکز سختی تمامی آنها بر مرکز سختی طبقه‌ی اول منطبق شود.

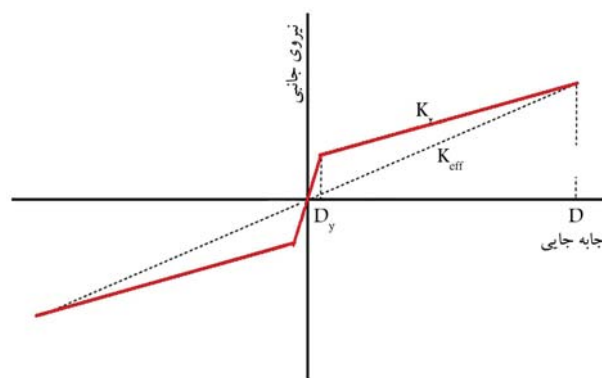
چیدمان هشتم: سختی یک یا چند جداگر پایه پاندولی تغییر می‌کند، به طوری که مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی بر مرکز شعاع انحناء تمامی آنها منطبق شود.

در چیدمان‌های اول تا هشتم، مرکز شعاع انحناء و مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی از روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند:

$$X_{RPI} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{pi} \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n R_{pi}}, \quad Y_{RPI} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{pi} \bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n R_{pi}} \quad (14)$$



شکل ۲. نمودار نیرو- جابه‌جایی جداگر پاندولی تکی.



شکل ۳. سختی مؤثر و سختی سکانت جداگر پاندولی تکی.

تکی مطابق رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ خواهد بود: [۸۶]

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{eff}} + \frac{F_f}{u} \quad (11)$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{eff}} + \frac{\mu W}{u} = W \left(\frac{1}{R_{eff}} + \frac{\mu}{u} \right) \quad (12)$$

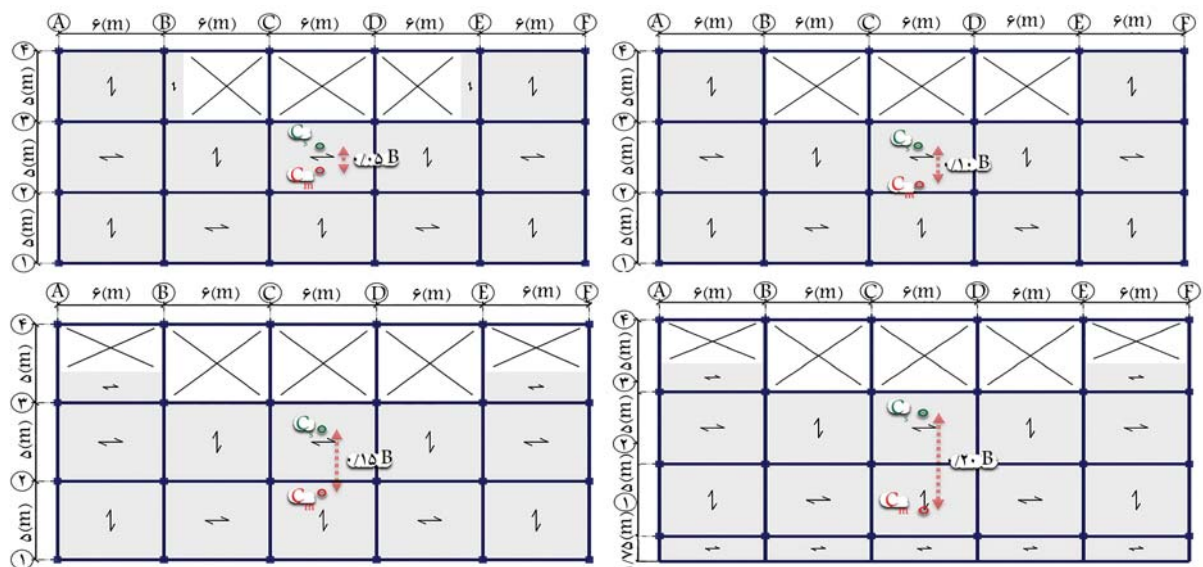
سختی ثانویه و زمان تناوب جداگر مطابق رابطه‌ی ۱۳ خواهد بود: [۱۴]

$$K_2 = \frac{W}{R_{eff}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (13)$$

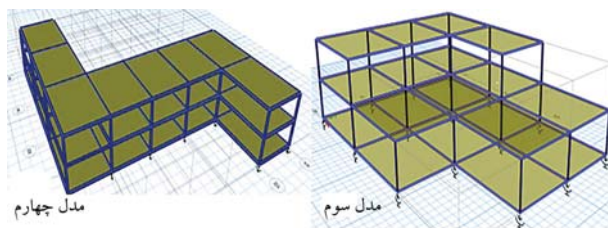
در شکل ۳، نمودار تغییرات سختی مؤثر و سختی ثانویه مشاهده می‌شود، که مدلی برای بیان رفتار غیرخطی (دو خطی) کشسان - خمیری با زوال سختی سیستم‌های جداسازی شده از پایه است.

۵. مدل‌های بررسی شده

مدل‌های بررسی شده به نحوی انتخاب شده‌اند که فرم‌های هندسی و نامنظمی‌ها، محدوده‌ی وسیعی از ساختمان‌های متداول را پوشش دهند. به عنوان مدل‌های پایه از ۴ مدل ساختمانی با پلان‌هایی به شکل‌های L در دو حالت U و S استفاده شده است. ابتدا مطابق شکل ۴، از ساختمانی با پلان L شکل، با تعداد طبقات ۲، ۴ و ۶ طبقه استفاده شده است که فاصله‌ی دهانه‌ها در دو جهت به طور یکسان، ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مقطع تیرها و ستون‌ها براساس طراحی سازه مطابق آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸ ACI به دست آمده و رفتار جداگرها به صورت غیرخطی مدل شده است. همچنین مقاومت بتن 210 Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ی قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط بوده است که در یک محل با پارامترهای لرزه‌ی $S_s = 1/25g$ و $S_1 = 0.4g$ و در سایت کلاس C مطابق آیین‌نامه‌ی ۱۶-ASCE قرار گرفته و میرایی آن ۵٪ بوده است. در تمامی مدل‌ها، بار مرده‌ی طبقات ۵۱°، بار تیغه‌بندی ۱۰۰°، بار



شکل ۵. پلان سازی بررسی شده در مدل دوم.



شکل ۶. پلان سازی بررسی شده در مدل‌های سوم و چهارم.

بار و سازه مثل مدل‌های قبلی بوده است (شکل ۶). تحلیل خطی، شبیه مدل اول در هر کدام از سازه‌ها، با ۸ چیدمان مختلف جداگر پایه پاندولی، انجام شده است، زمان تناوب مودهای اول و دوم و درصد مشارکت جرمی مودهای اول و دوم و بقیه‌ی مودهای ارتعاشی، محاسبه و با روش مرسوم (چیدمان اول) مقایسه شده‌اند.

بدون تغییر در مقدار بارها و مشخصات سازه‌ی، هر یک از سازه‌های مذکور تحت ۱۲ شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌ی دو مؤلفه‌ی حوزه‌ی دور قرار گرفته است (جدول ۱). PGA استفاده شده در شتاب‌نگاشت‌های مذکور بین $0.25g$ و $0.64g$ و نسبت PGA/PGV آنها بین $0.36-0.47$ و با بزرگای گشتاوری بیش از $6/5$ بوده‌اند. در هر کدام از سازه‌ها، تحلیل تاریخی‌چرخه‌ی زمانی خطی انجام شده است. سپس مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان تراز پایه تحت هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها به دست آمده و متوسط بیشینه‌ی تغییرمکان‌ها برای مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه و در نهایت، نحوه‌ی آرایش چیدمان دوم تا هشتم جداگر پایه با چیدمان اول مقایسه شده است.

۶. بررسی پاسخ‌ها

۶.۱. بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی سازه

زمان تناوب سازه‌ها، یکی از خصوصیات مهم دینامیکی سازه‌ها محسوب می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، تغییرات زمان تناوب مود اول محاسباتی در مدل‌های مختلف ساختمانی نشان داده شده‌اند. در مدل اول ساختمانی با تعداد طبقات مختلف

$$X_{KPi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi} \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi}}, \quad Y_{KPi} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi} \bar{Y}_i}{\sum_{i=1}^n K_{eff,pi}} \quad (15)$$

که در آنها، R_{pi} شعاع انحناء جداگر پاندولی پایه‌ی i ام؛ $K_{eff,pi}$ سختی مؤثر جداگر پاندولی پایه‌ی i ام؛ \bar{X}_i, \bar{Y}_i فاصله‌ی هر جداگر از محورهای مختصات؛ X_{Rpi}, Y_{Rpi} مختصات مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه پاندولی و X_{KPi}, Y_{KPi} مختصات مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه پاندولی هستند.

مدل دوم از ۴ مدل ساختمانی استفاده شده در پژوهش حاضر، خود در ۴ حالت در نظر گرفته شده است (شکل ۵). فاصله‌ی دهانه‌ها به طور یکسان در جهت طولی ۶ متر، جهت عرضی ۵ متر و ارتفاع طبقه، ۳/۵ متر بوده است. مدل‌ها طوری انتخاب شده‌اند که خروج از مرکزیت‌ها برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بُعد عرضی سازه در نظر گرفته شوند. ولی ابعاد و مشخصات سازه در تمامی مدل‌ها با یک خروج از مرکزیت یکسان هستند. برای اعمال خروج از مرکزیت بین مرکز جرم و سختی در سقف طبقه، بازو ایجاد شده و توزیع جرم تغییر کرده است. به عبارت دیگر، در هر کدام از مدل‌ها، ممان اینرسی جرمی با تغییر خروج از مرکزیت عوض شده است.

همانند مدل قبلی، ابعاد مقطع تیرها $40cm \times 40cm$ و ستون‌ها $45cm \times 45cm$ براساس طراحی سازه مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 به دست آمده و جداگرها با رفتار غیرخطی مدل شده و مقاومت بتن $210kg/cm^2$ در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ی قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط بوده است که در یک محل فرضی با پارامترهای لرزه‌ی $S_s = 1/25g$ و $S_1 = 0.4g$ در سایت کلاس C مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE 7-16 قرار داشته و با میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است. در مدل‌های سوم و چهارم ساختمانی، طول دهانه‌ها به طور یکسان در جهت طولی $10/67$ متر، در جهت عرضی $7/62$ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر، ابعاد تیرها و ستون‌ها به ترتیب برابر با $90cm \times 60cm$ و $60cm \times 60cm$ و بقیه‌ی مشخصات شبیه دو مدل قبلی بوده است. در مدل سوم، پلان سازی L شکل در ۲ طبقه و جرم طبقه‌ی دوم حدوداً ۵٪ جرم طبقه‌ی اول بوده و در مدل چهارم، از ساختمان دو طبقه با پلان S شکل استفاده شده است که مشخصات

جدول ۱. شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده.

رتبه	رکورد زلزله	سال	مرکز زلزله	شدت گشتاوری	عمق (کیلومتر)	کمینه فرکانس (هرتز)	ضریب تصحیح	شتاب (g) بیشینه دامنه	بیشینه دامنه سرعت (m/s)	نسبت بیشینه دامنه سرعت به بیشینه دامنه شتاب
۱	Northridge California, USA	۱۹۹۴	Beerly Hills	۶/۷	۱۷/۵	۰/۲۵	۰/۱۶۵۱	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۸۲۹
۲	Hector Mine California, USA	۱۹۹۹	Hector	۷/۱	۲۰	۰/۰۴	۱/۰۹۲	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۸۰۴
۳	Im perial Valley California, USA	۱۹۷۹	Delta	۶/۵	۱۱/۶	۰/۰۶	۱/۳۱۱	۰/۳۴۸	۰/۳۳۴	۱/۰۴۲
۴	Kobe Japon	۱۹۹۵	Nishi	۶/۹	۱۷/۶	۰/۱۳	۱/۰۳	۰/۵۳	۰/۳۹	۱/۳۵۹
۵	Kocaeli Izmit, Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۷/۶	۱۵/۰	۰/۲۴	۰/۱۶۹	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۶۱۰
۶	Landers California, USA	۱۹۹۲	Yerme	۷/۳	۱/۰۹	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۲۴	۰/۵۱	۰/۴۷۱
۷	Elcentro, USA	۱۹۴۰	California	۷/۱	۱۶	۰/۲۵	۱/۰۹	۰/۱۶۴	۰/۵۰	۱/۲۸
۸	Cape Mexico California, USA	۱۹۹۲	Rio.Dell	۷/۲	۱۰/۵	۰/۰۷	۰/۸۲	۰/۴۵	۰/۳۶	۱/۲۵
۹	Supersition Hills	۱۹۸۷	El.Centr	۶/۶	۱۰/۹	۰/۱۳	۰/۱۸۷	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۷۷۵
۱۰	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	Bolu	۷/۲	۱۳/۷	۰/۰۶	۰/۶۲۹	۰/۵۲	۰/۳۹	۱/۳۳۳
۱۱	Manjil, IRAN	۱۹۹۰	Abhar	۷/۴	۱۵/۰	۰/۱۳	۰/۷۹	۰/۴	۰/۴۳	۰/۹۳
۱۲	SanFernado California, USA	۱۹۷۰	La.Haliwood	۶/۶	۸/۴	۰/۲۵	۲/۱	۰/۴۹	۰/۴۸۷	۱/۰۰۷

مودهای ارتعاشی تغییر یافته و کم و زیاد شده است. در تمامی ۴ مدل ساختمانی در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگر پایه با مرکز جرم تجمعی سازه، زمان تناوب اصلی سازه و زمان تناوب مود دوم محاسباتی، روند کاهش داشته است.

بیشترین کاهش تغییراتی در چیدمان ششم جداگر پایه، یعنی انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه با مرکز جرم تجمعی پایه رخ داده است. مقدار کاهش زمان تناوب مود اول ارتعاشی در مدل ساختمانی اول در صورت افزایش طبقات از ۲ تا ۶ طبقه به ترتیب ۱۲ تا ۱۹ درصد بوده و در مدل ساختمانی دوم با افزایش خروج از مرکزیت بین مرکز جرم و سختی سازه از ۵ تا ۲۰ درصد بعد عرضی، از ۱ تا ۵ درصد کاهش مشاهده می‌شود. برای مدل‌های ساختمانی سوم و چهارم، به ترتیب کاهش حدود ۱۰ و ۷ درصد به دست آمده است.

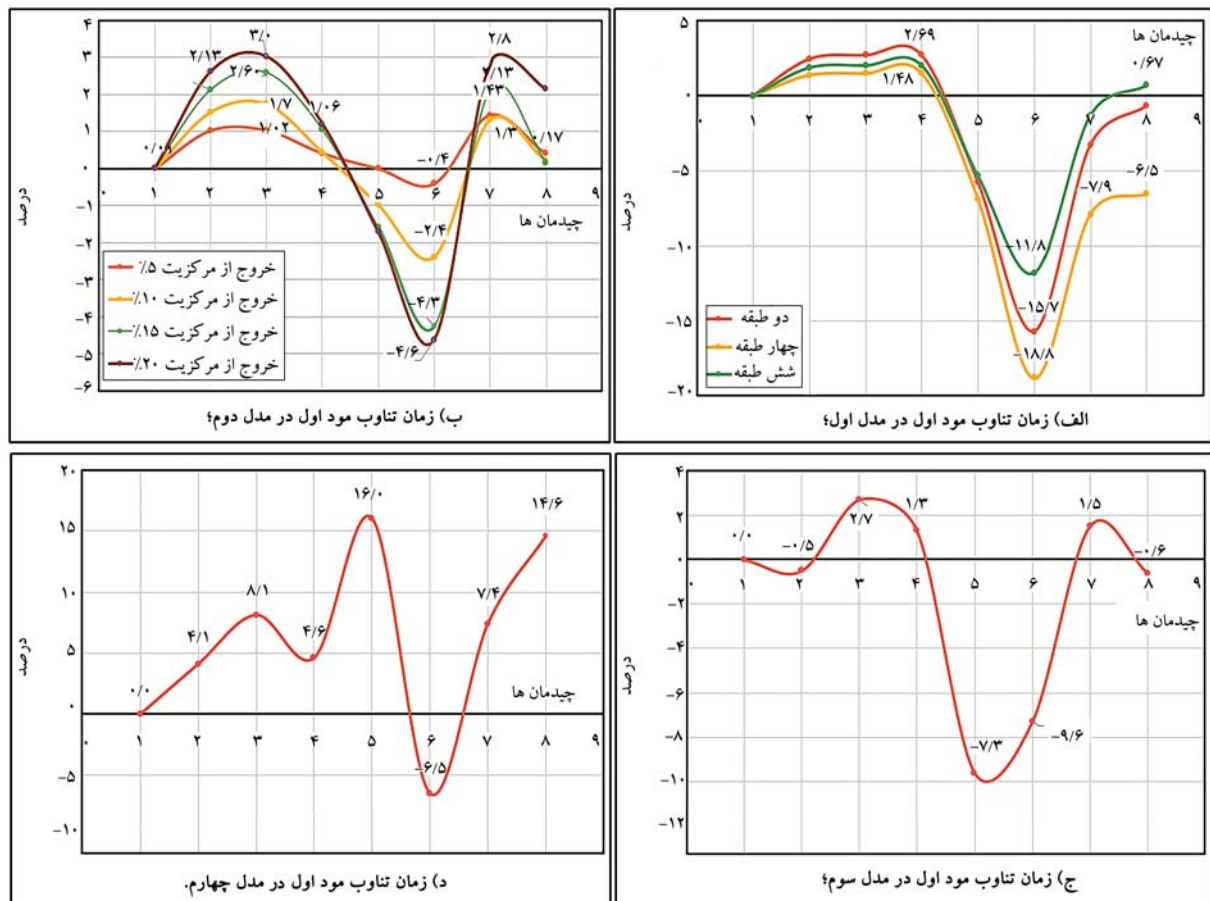
همچنین در مدل ساختمانی اول با افزایش تعداد طبقات، زمان تناوب مود دوم محاسباتی، کاهش در حدود ۱ تا ۵ درصد را نشان می‌دهد و در مدل دوم با افزایش خروج از مرکزیت، کاهش در حدود ۲ تا ۸۵ درصد مشاهده می‌شود. برای خروج از مرکزیت ۵٪، تغییرات زمان تناوب مودهای اول و دوم ناچیز به نظر می‌رسد.

درصد تغییرات زمان تناوب سازه‌ها در چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی نسبت به چیدمان اول (حالت مرسوم)، در مدل دوم در ۴ ساختمان با خروج از مرکزیت ۵ تا ۲۰ درصد مرکز جرم و سختی، در مدل سوم در ساختمانی با نامنظمی جرمی و در مدل ساختمانی چهارم در ساختمانی با نامنظمی هندسی مقایسه شده‌اند.

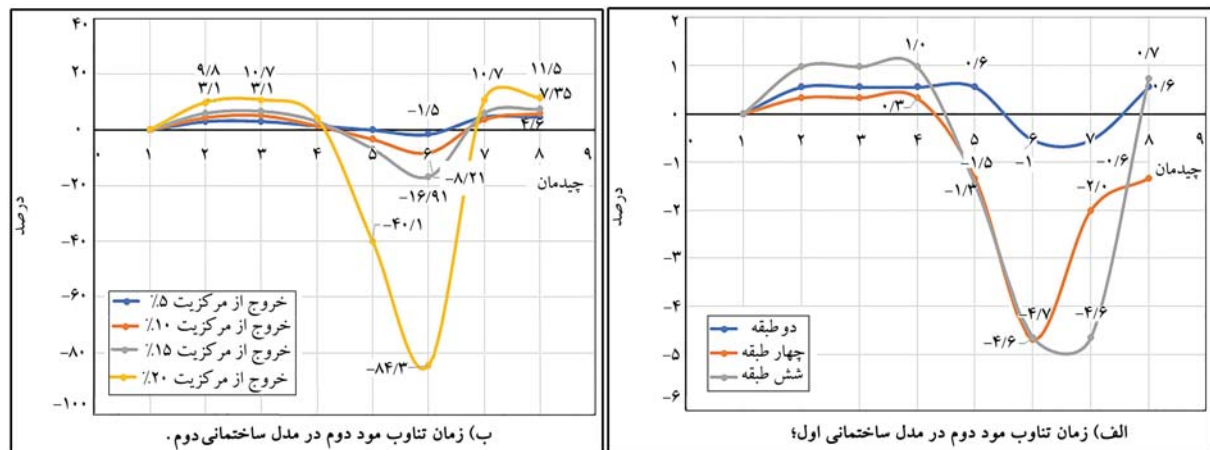
با توجه به این‌که با تغییر شعاع انحنا، سختی جداگر پایه پاندولی نیز تغییر می‌کند، لذا تغییرات اخیر می‌تواند در ماتریس سختی سازه اثر کند و به تبع آن زمان تناوب سازه تغییر خواهد کرد.

تغییرات زمان تناوب مود اول ارتعاشی در کلیه مدل‌های ساختمانی در چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی نسبت به چیدمان اول جداگر پایه در شکل ۷ و تغییرات زمان تناوب مود دوم ارتعاشی در ساختمان‌های اول و دوم در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که در سازه‌های دارای جداگر پایه پاندولی تکی در چیدمان‌های در نظر گرفته شده، شامل انطباق مرکز سختی طبقه اول یا مرکز جرم تجمعی پایه یا مرکز هندسی (در سازه‌ی فوقانی) با مرکز شعاع انحنا تمامی جداگرهای پایه یا مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه، مقادیر زمان تناوب



شکل ۷. تغییرات زمان تناوب اصلی مدل‌های مختلف سازه‌یی با آرایش‌های مختلف جداگرهای پایه پاندولی.



شکل ۸. تغییرات زمان تناوب مود دوم در مدل‌های اول و دوم.

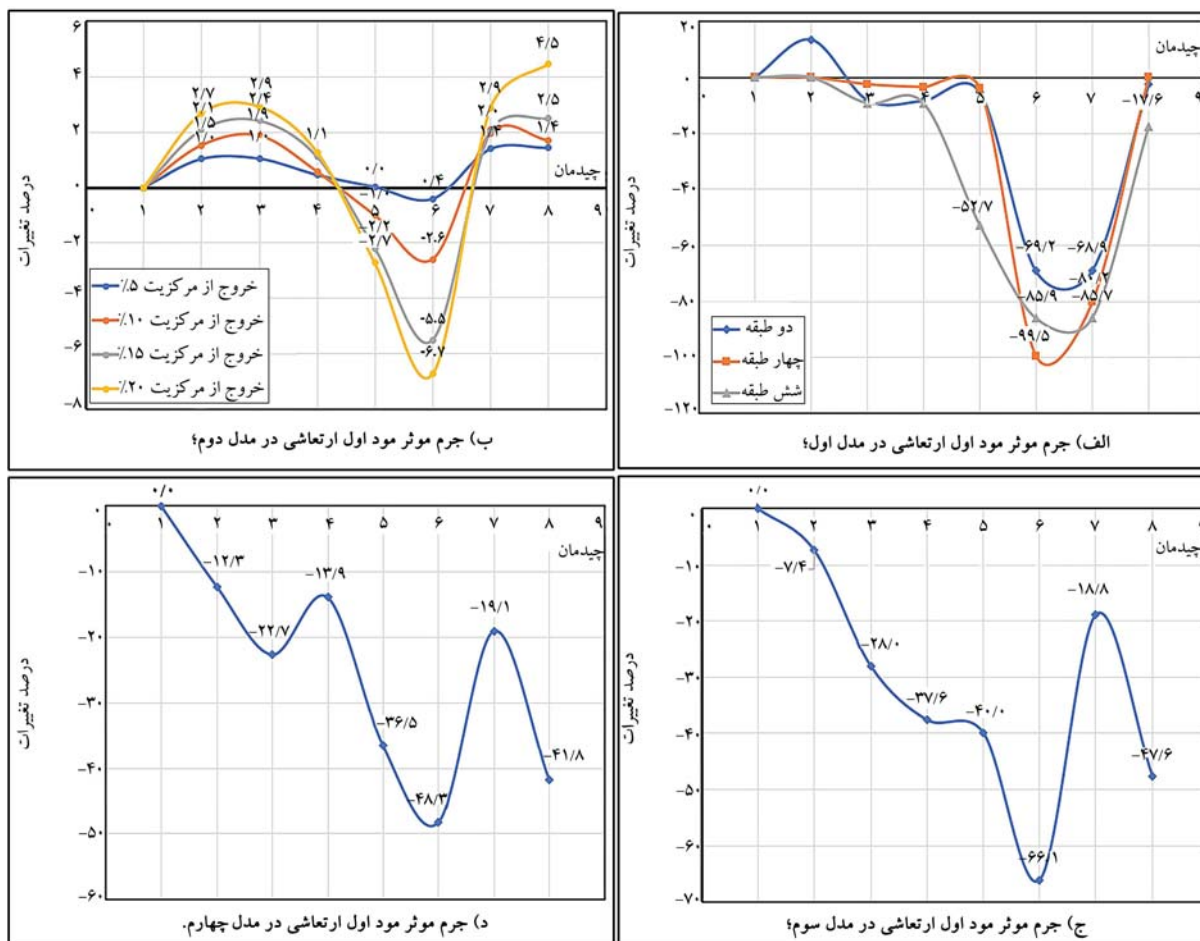
ساختمانی در چیدمان‌های دوم تا هشتم، جداگر پایه پاندولی با چیدمان اول در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

همچنان که مشاهده می‌شود، مقدار مشارکت جرم مؤثر مود اول در چیدمان ششم جداگر پایه در ساختمان‌های ۲، ۴ و ۶ طبقه (مدل ساختمانی اول) نسبت به چیدمان اول جداگرهای پایه، ۶۹، ۸۶ و ۹۹ درصد کاهش داشته است. در مدل ساختمانی دوم، برای خروج از مرکزیت ۵٪، کاهش مشارکت جرمی مود اول ناچیز بوده و برای خروج از مرکزیت‌های بیشتر از ۵٪، ۳ تا ۷ درصد کاهش مشاهده

۲.۶. مقایسه‌ی درصد مشارکت جرمی مودها

درصد مشارکت جرمی مودها به تعبیری اندازه‌یی از انرژی موجود در هر حالت تشدید را ارائه می‌دهد، زیرا نشان‌دهنده‌ی مقدار جرم سیستم شرکت‌کننده در یک مود خاص است. مودهایی که جرم مؤثر زیادتری دارند، معمولاً نقش مهم‌تری در پاسخ سیستم دارند.

مقایسه‌ی تغییرات درصد مشارکت جرمی مود اول ارتعاشی در مدل‌های مختلف



شکل ۹. تغییرات جرم مؤثر مود اول با آرایش مختلف جداگرها در تمامی مدل‌های ساختمانی.

درصد، جرم مؤثر مود سوم ارتعاشی افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار درصد افزایش مشارکت مود سوم تقریباً نزدیک به مود دوم است. در مدل ساختمانی دوم، تغییرات درصد مشارکت جرمی در مود سوم برای خروج از مرکزیت‌های ۱۵، ۱۰ و ۲۰ درصد فقط در چیدمان ششم جداگرهای پایه، زمانی که مرکز سختی کل جداگر پایه منطبق بر مرکز جرم تجمعی می‌شود، از ۱۱ تا ۳۱ درصد افزایش می‌یابد و برای خروج از مرکزیت ۵٪، این تغییرات ناچیز است. مود سوم ارتعاشی در مدل سوم ساختمانی نیز در چیدمان‌های دوم و ششم، روند افزایشی داشته است که بیشترین درصد افزایش در چیدمان ششم برابر با ۴۰٪ بوده است.

در مدل چهارم ساختمانی، مود سوم ارتعاشی در تمامی چیدمان‌ها نسبت به چیدمان اول جداگر پایه پاندولی، روند افزایشی داشته است؛ که بیشترین آن در چیدمان ششم برابر با ۳۷٪ افزایش بوده است.

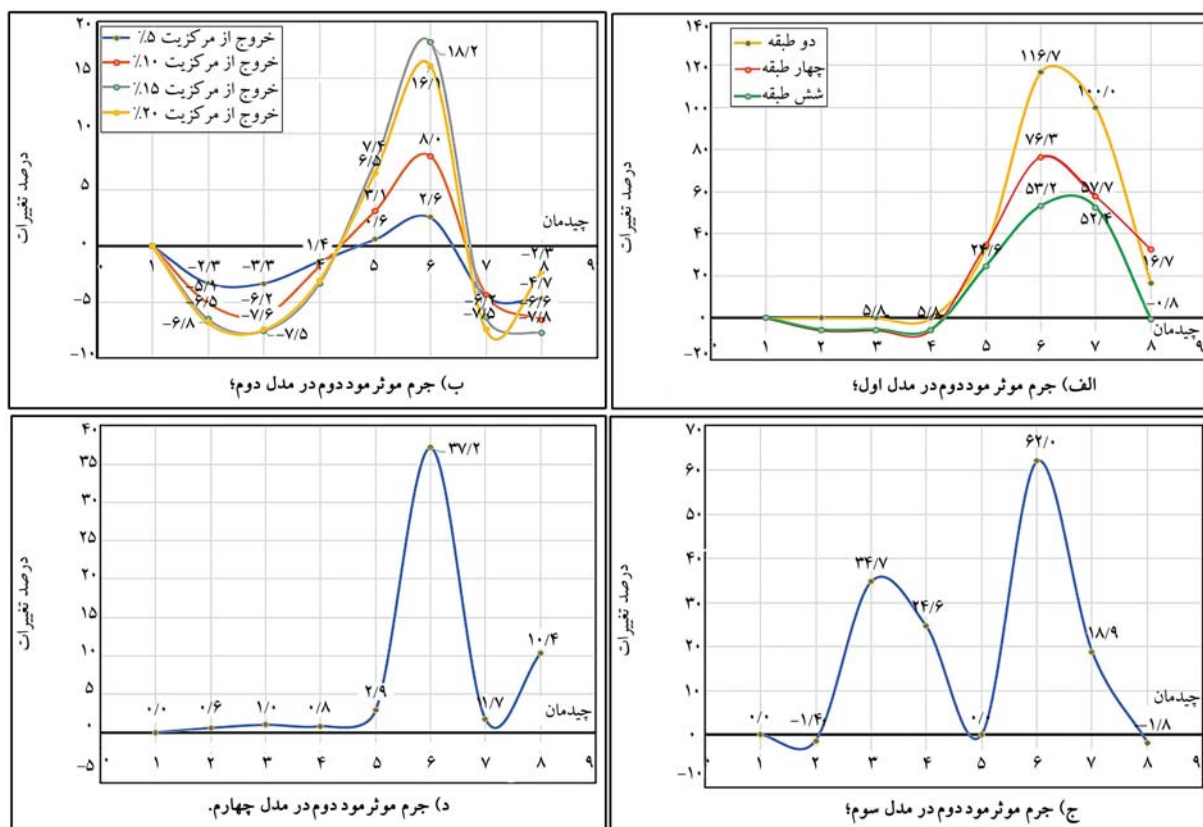
۳.۶. مقایسه‌ی تغییرات درصد مشارکت مود اول و تغییرمکان تراز پایه

یکی از مهم‌ترین عیوب جداگرهای پایه، تغییرمکان زیاد آنها در تراز پایه است؛ لذا استفاده از راهکاری که بتواند مقدار تغییرمکان تراز پایه را کاهش دهد، می‌تواند فوق‌العاده مفید واقع شود.

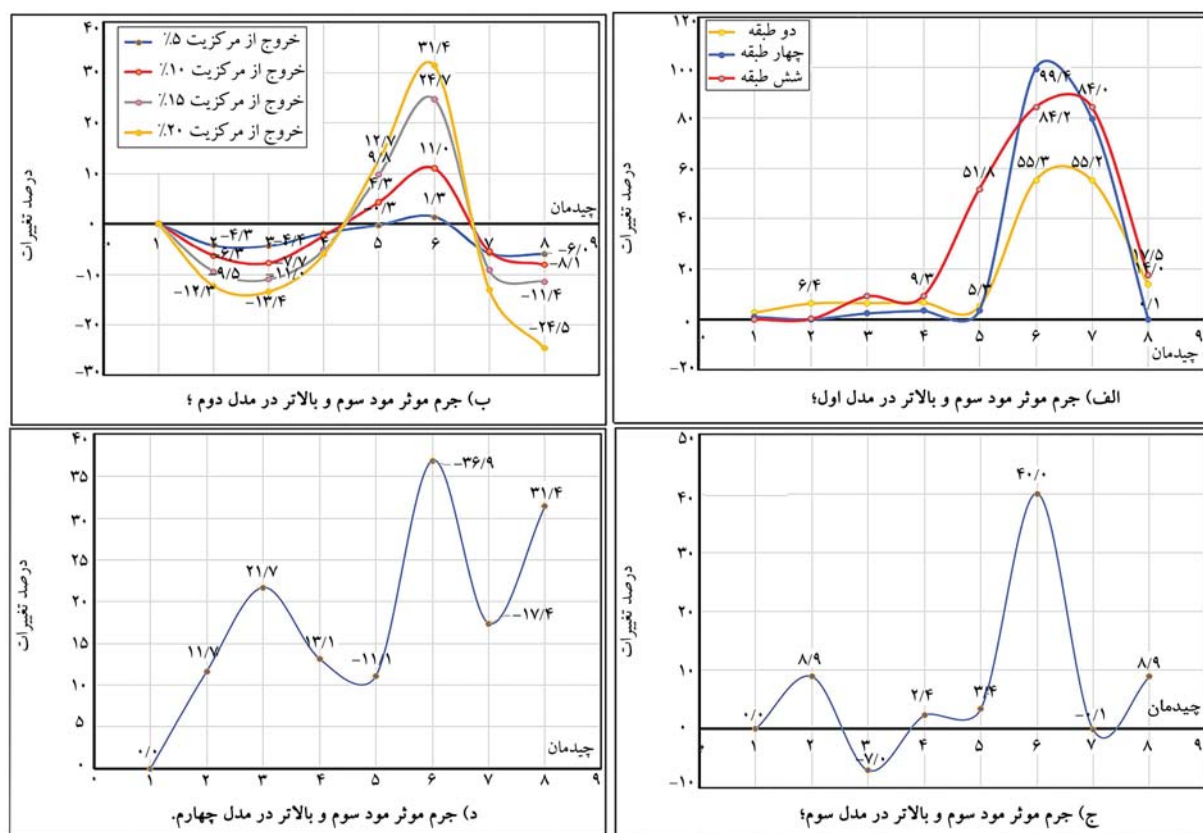
می‌شود. مطابق مدل اول ساختمانی، کاهش درصد مشارکت جرمی مود اول در صورت انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی پایه و یا انطباق مرکز سختی کل جداگرهای پایه با مرکز سختی طبقه‌ی اول سازه حدوداً یکسان است. در مدل‌های ساختمانی سوم و چهارم، در تمامی چیدمان‌ها، کاهش مشارکت جرمی مود اول مشاهده می‌شود، که بیشترین کاهش در چیدمان ششم رخ داده است که برای مدل ساختمانی سوم، ۶۶٪ و در مدل ساختمانی چهارم، ۴۸٪ کاهش به دست آمده است.

تغییرات جرم مؤثر مود دوم ارتعاشی با آرایش مختلف جداگرهای پایه پاندولی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در حالی که بیشترین کاهش درصد مشارکت جرمی در مود اول ارتعاشی، که در چیدمان ششم جداگر پایه پاندولی رخ داده بود، بیشترین مقدار درصد افزایش جرم مشارکت مود دوم ارتعاشی نیز در همان چیدمان دیده می‌شود؛ که این مقدار برای مدل ساختمانی اول از ۵۳ تا ۱۱۶ درصد، برای مدل دوم ساختمانی از ۳ تا ۱۸ درصد، و برای مدل‌های سوم و چهارم ساختمانی، به ترتیب ۶۲ و ۳۷ درصد افزایش مشاهده می‌شود.

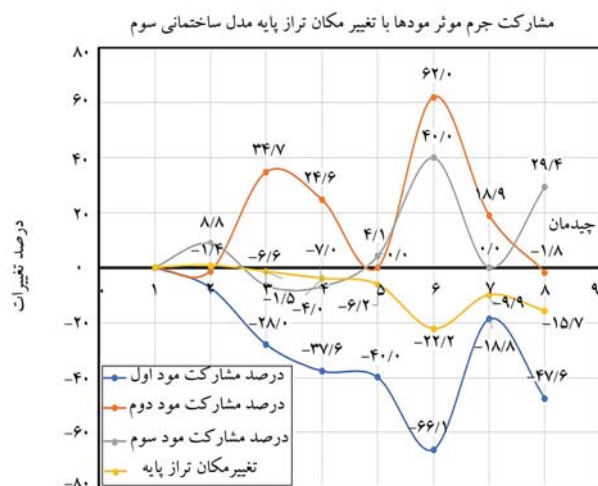
همچنین در شکل ۱۱، تغییرات جرم مؤثر مود سوم و بالاتر با آرایش مختلف جداگرهای پایه نشان داده شده است. درصد مشارکت جرمی مود ارتعاشی سوم و بالاتر در مدل ساختمانی اول، در چیدمان‌های ششم و هفتم برخلاف مود اول (و مانند مود دوم ارتعاشی)، روند افزایشی داشته است که این روند در چیدمان ششم بیشتر از چیدمان هفتم دیده می‌شود. در ساختمان‌های ۲ تا ۶ طبقه از ۵۵ تا ۹۹



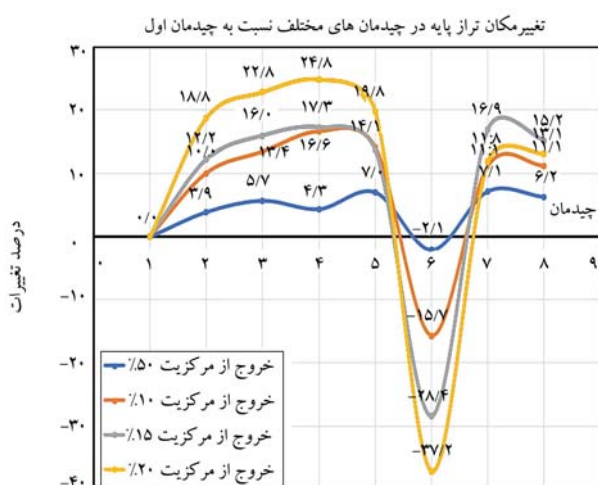
شکل ۱۰. تغییرات جرم مؤثر مود دوم با آرایش مختلف جداگرها در مدل‌ها.



شکل ۱۱. تغییرات جرم مؤثر مود سوم و بالاتر با آرایش مختلف جداگرها در مدل دوم.



شکل ۱۳. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش مختلف جداگرها در مدل ساختمانی سوم.



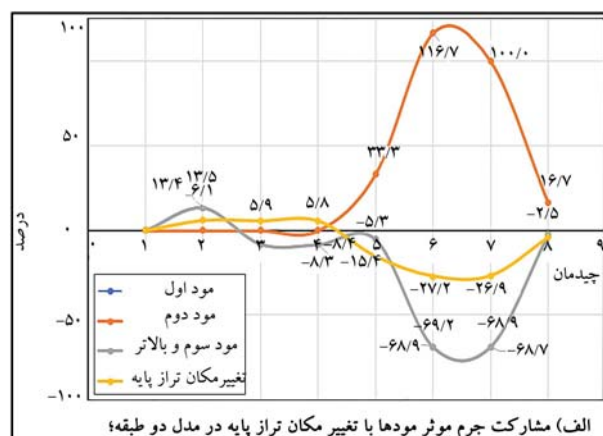
شکل ۱۴. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش‌های مختلف جداگرها در مدل ساختمانی دوم.

مودها، فقط در چیدمان ششم جداگرهای پایه پاندولی، مقدار تغییر مکان تراز پایه حدود ۲۳٪ کاهش یافته است. در مدل اخیر با کاهش جرم مود اول، مود دوم و بالاتر روند افزایشی داشته‌اند.

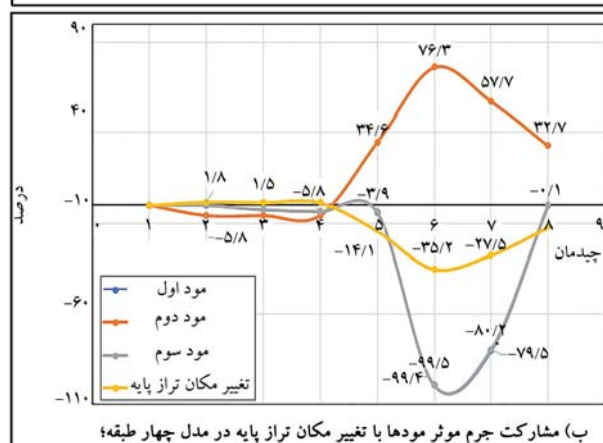
تغییرات تغییر مکان تراز پایه در مدل ساختمانی دوم برای خروج از مرکزیت ۵٪ به مقدار ناچیز (۲٪) کاهش یافته است و در خروج از مرکزیت‌های بالاتر، از ۱۶ تا ۳۷ درصد کاهش مشاهده می‌شود (شکل ۱۴).

۷. نتیجه‌گیری

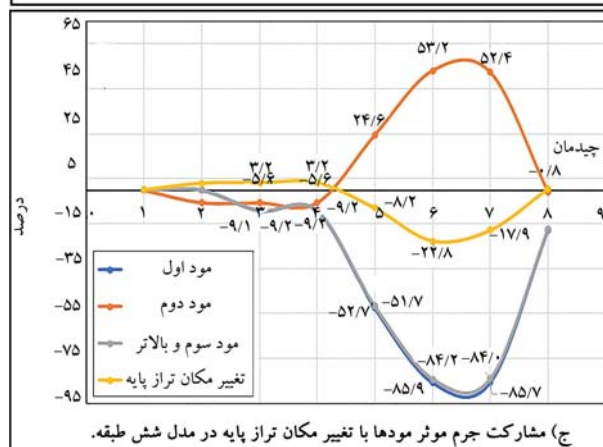
به منظور بررسی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی در ساختمان‌های دارای جداگر پایه پاندولی با پلان نامنظم، یک مطالعه‌ی پارامتریک روی طیف وسیعی از عوامل نامنظمی در ساختمان‌های متداول انجام شده است؛ که در این رابطه ۴ تیپ پلان مختلف، که مجموعاً ۹ سازه را شکل داده‌اند، تحت ۱۲ زمین‌لرزه‌ی دو مؤلفه‌ی در حوزه‌ی دور انجام پذیرفته است. علاوه بر این، در مورد هر کدام از ۹ سازه، ۸ چیدمان



الف) مشارکت جرم موثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل دو طبقه؛



ب) مشارکت جرم موثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل چهار طبقه؛



ج) مشارکت جرم موثر مودها با تغییر مکان تراز پایه در مدل شش طبقه.

شکل ۱۵. تغییرات درصد مشارکت جرمی مودها و تغییر مکان تراز پایه با آرایش‌های مختلف جداگرها در مدل ساختمانی اول.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات هم‌زمان درصد مشارکت مودها و تغییر مکان تراز پایه در مدل‌های ساختمانی اول و سوم مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها، در مدل ساختمانی اول در چیدمان ششم و هفتم جداگر پایه، هم‌زمان با کاهش درصد مشارکت جرمی مودهای اول و سوم، درصد مشارکت جرمی مود دوم افزایش قابل ملاحظه‌ی داشته است که باعث کاهش تغییر مکان تراز پایه در چیدمان‌های اخیر جداگر پایه شده و مقدار آن در چیدمان ششم بیش از چیدمان هفتم بوده است و کاهش بین ۲۳ تا ۳۵ درصد در تغییر مکان تراز پایه مشاهده می‌شود. در مدل ساختمانی سوم، همانند مدل ساختمانی اول با تغییرات درصد مشارکت

- در مدل دوم ساختمانی با کاهش ۲ تا ۷ درصدی مشارکت مود اول ارتعاشی، به میزان ۸ تا ۱۱ درصد به مشارکت مود دوم ارتعاشی و ۱۱ تا ۳۱ درصد به مشارکت مود سوم ارتعاشی و بالاتر اضافه شده است. در مدل‌های سوم و چهارم از مشارکت مود اول به میزان ۶۶ و ۴۸ درصد کاسته شده است، در عوض ۶۲ و ۳۷ درصد به مشارکت مود دوم، ۴۰ و ۳۷ درصد به مشارکت مود سوم اضافه شده است. لذا مود دوم و بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سیستم سازه‌یی در چیدمان ششم بوده‌اند.
- برای خروج از مرکزیت ۵٪، تغییرات ذکرشده ناچیز بوده است.
- در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه بر مرکز جرم تجمعی (چیدمان ششم)، تغییرمکان تراز پایه، کمترین مقدار خود را داشته است. در مدل اول سازه‌یی، ۲۳ تا ۳۵ درصد، در مدل دوم ۱۶ تا ۳۷ درصد و در مدل سوم، ۲۲٪ نسبت به چیدمان متعارف جداگر پایه پاندولی، کاهش مشاهده شده است.
- در نهایت، به عنوان جمع‌بندی کلی در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پاندولی پایه با مرکز جرم تجمعی پایه (چیدمان ۶)، مود دوم و بالاتر، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های ساختمان‌های با پلان نامتقارن بوده و سازه بهینه شده است.

- جداگر پایه پاندولی استفاده شده است. با انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پایه یا مرکز شعاع انحناء تمامی جداگرهای پایه با مرکز هندسی سقف اول یا مرکز جرم تجمعی در تراز پایه یا سختی طبقه‌ی اول و مقایسه‌ی پاسخ‌ها با حالت متعارف چیدمان جداگر پایه، این نتایج به دست آمده است:
- برای چیدمان‌های مختلف جداگر پایه پاندولی با تغییر زمان تناوب مودها، مقدار درصد مشارکت جرمی مودها و تغییرمکان تراز پایه نیز تغییر کرده است.
- در حالت انطباق مرکز سختی تمامی جداگرهای پاندولی پایه با مرکز جرم تجمعی پایه (چیدمان ۶) از زمان تناوب مود اول ارتعاشی کاسته شده است. این مقدار در مدل ساختمانی اول با افزایش تعداد طبقات، ۱۲ تا ۱۹ درصد، در مدل ساختمانی دوم با افزایش خروج از مرکزیت ۱ تا ۵ درصد، در مدل سوم ۱۰٪ و در مدل چهارم ۷٪ مشاهده شده است.
- در مدل اول ساختمانی، با افزایش تعداد طبقات از ۲ تا ۶ طبقه در چیدمان ششم جداگر پایه پاندولی، از مشارکت جرم مود اول ۶۹ تا ۹۹ درصد، همچنین از مشارکت مود سوم به میزان ۵۵ تا ۹۹ درصد کاسته شده است، در عوض به مشارکت مود دوم به مقدار ۵۳ تا ۱۱۷ درصد اضافه شده است. لذا در مدل حاضر، مود دوم ارتعاشی، تعیین‌کننده‌ی پاسخ‌های سیستم سازه‌یی بوده است.

پانویس‌ها

1. Tsai & Chang
2. Maniatakis
3. Fatemi
4. Jia-wei & Ke
5. Nair
6. Wang

منابع (References)

1. Salimbahrami, S.R. and Gholhaki, M. "Effects of higher modes and degrees of freedom on energy requirement in reinforced concrete structures with steel shear wall", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **53**(10), pp. 4143-4160 (2021).
2. Salimbahrami, S.R. and Gholhaki, M. "Analytical study to evaluate the effect of higher modes of reinforced concrete moment-resisting frames with thin steel shear wall under simple pulse", *Advances in Structural Engineering*, **21**(15), pp. 2311-2325 (2018).
3. Housner, G.W. "Limit design of structures to resist earthquakes", *In Proc. of 1st WCEE* (1956).
4. Uang, C.-M. and Bertero, V.V. "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design", *88, Earthquake Engineering Research Center*, University of California Berkeley (1988).
5. Ghodrati, A.G., Abdollahzade, D.G. and Khan, Z.M. "Earthquake duration and damping effects on input energy", *Interbational Journal of Civil Engineering*, **5**(1), pp. 14-29 (2007).
6. Standard, B., "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance", Part 1, pp. 1998-2001 (2005).
7. Tsai, M.-H. and Chang, K.-C. "Higher-mode effect on the seismic responses of buildings with viscoelastic dampers", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1**(1), pp. 119-129 (2002).
8. Daneshjoo, F. and Gerami, M. "Higher mode effects on seismic behavior of MDOF steel moment resisting frames", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 41-54 (2003).
9. Tsai, C., Chen, B.-J., Chiang, T.-Ch. and et al. "Higher mode effect on lateral force distributions for base-isolated structures", *In 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada (2004).
10. Maniatakis, C.A., Psycharis, I.N. and Spyarakos, C.C. "Effect of higher modes on the seismic response and design of moment-resisting RC frame structures", *Engineering Structures*, **56**, pp. 417-430 (2013).
11. Khoshnoudian, F. and Nozadi, O. "Effects of higher modes on vertical distribution of isolated structures under near field earthquakes", *International Journal of Civil Engineering*, **11**(2), pp. 115-124 (2013).
12. Gerami, M., Siahpolo, N. and Vahdani, R. "Effects of higher modes and MDOF on strength reduction factor of elastoplastic structures under far and near-fault ground motions", *Ain Shams Engineering Journal*, **8**(2), pp. 127-143 (2017).

13. Ganjavi, B., Hao, H. and Hajirasouliha, I. "Influence of higher modes on strength and ductility demands of soil-structure systems", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **10**(4), pp.1793-4311, 1650006.ISSN (2016). <https://doi.org/10.1142/S1793431116500068>.
14. Fatemi, H., Paultre, P. and Lamarche, C.-P. "Experimental evaluation of inelastic higher-mode effects on the seismic behavior of RC structural walls", *Journal of Structural Engineering*, **146**(4), p. 04020016 (2020).
15. Rafiei, E., Danesh, F.A., Matou, F. and et al. "The effects of higher modes on the response modification factor of tall RC buildings", *International Journal of Engineering and Technology*, **11**(1), p. 45 (2019).
16. Jia-wei, G. and Ke, D. "A model conditional mean target spectrum method to consider higher mode effect", **39**(3), pp. 23-32 (2022). DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0029.
17. Nair, D. and et al., "Higher mode effects of multistorey substructures on the seismic response of double-layered steel gridshell domes", *Engineering Structures*, **243**, 112677 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112677>.
18. Wang, Y., Zhou, Zh., Zhang, L. and and et al. "Quantification of higher mode effects of steel frame and control method using dual self-centering variable friction damper brace", *Engineering Structures*, **240**, p. 112368 (2021).
19. Jangid, R. and Datta, T. "Nonlinear response of torsionally coupled base isolated structure", *Journal of Structural Engineering*. **120**(1), pp. 1-22 (1994).
20. Adibrameza, M., Moghadam, A. and Ziyaeifar, M. "Assessment of a technique for the torsional response reduction of seismic isolated asymmetric structures", *Journal of Applied Sciences*, **9**(15), pp. 2653-2670 (2009).

بررسی اثر چرخه‌ی خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار

نگین قبادپور (کارشناس ارشد)

محمود حسنلوراد* (دانشیار)

فواد کیلانه‌ای (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (دوره‌ی ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۱۵-۱۲۴)، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، تغییرات ایجاد شده در نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ی رس‌دار با احتمال واقع شدن آن‌ها برای مدت‌طولانی در معرض خشکسالی بررسی شده است. خاک استفاده شده برای مطالعه‌ی حاضر، ترکیب ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کائولن با ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه بوده است. آزمایش‌های نفوذپذیری در دو مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی با دستگاه سه‌محوری بر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که خشک‌شدگی و ترشدگی در نفوذپذیری نمونه‌ها در ابتدای عبور آب، به دلیل ایجاد ترک‌های ناشی از خشک شدن تأثیر قابل توجهی دارد و با گذشت زمان و جذب مجدد رطوبت توسط خاک، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و به عدد ثابتی میل می‌کند. همچنین نمونه‌هایی که در مسیر خشک و تر شدن واقع شده بودند، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه به دلیل ایجاد درز و ترک، نفوذپذیری بیشتری نشان داده‌اند. برای مثال، در ابتدای ورود آب به نمونه‌ی کاملاً خشک، ضریب نفوذپذیری آن نسبت به نمونه با رطوبت بهینه برابر ۱/۸ و ۲/۵ به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس بوده است. از طرفی آزمایش‌ها نشان دادند که لزوماً نمونه‌ی کاملاً خشک، بیشترین نفوذپذیری را ندارد.

واژگان کلیدی: ضریب نفوذپذیری، خاک ماسه‌ی رس‌دار، خشک‌شدگی، ترشدگی.

neginghr@gmail.com
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir
kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

ایران از نظر اقلیمی در ناحیه‌های خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، لذا در زمان خشکسالی حفاظت و مدیریت مخازن ذخیره‌ی آب، اهمیت بالایی دارد. در نواحی خشک ممکن است سد بعد از ساخته شدن، مدت زمان طولانی آبگیری نشود و بدنه‌ی سد خشک شود و حتی در دوره‌های بعد این اتفاق تکرار شود. همچنین ممکن است به یکباره بارندگی‌های شدید رخ دهد و سد پُر شود. در بسیاری از مناطق جنوبی و مرکزی ایران، این موضوع محتمل است. این مدت زمان طولانی خشک شدن و یا خیس شدن مجدد منجر به تغییر ساختار خاک می‌شود و ترک‌هایی را در آن ایجاد خواهد کرد. برای نمونه، پور حسینی و همکاران (۱۳۹۶) ملاحظه کردند که با افزایش دما، درصد رطوبت مربوط به شروع اولین ترک ناشی از خشک‌شدگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه حرارت، تعداد نهایی ترک‌های انقباضی در سطح خاک کاهش می‌یابد و این موضوع را به کاهش کشش سطحی آب و

تمرکزگرایی حفره‌های خاک ارتباط می‌دهند.^[۱]

ضریب نفوذپذیری^۱، یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی شده در احداث سدهای خاکی است که برای بررسی مقدار دبی عبوری از سد و حتی پایداری شیب‌های خاکی سدها، یک پارامتر تعیین‌کننده است. عوامل مختلفی در پارامتر ضریب نفوذپذیری، تأثیرگذار هستند، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به: درجه‌ی حرارت محیط، خشک شدن و یا خیس شدن مجدد، درز و ترک‌های ایجاد شده، جنس خاک استفاده شده و غیره اشاره کرد. لذا خشک و خیس شدن خاک‌ها باعث به وجود آمدن تغییراتی در مشخصه‌های فیزیکی خاک از جمله نفوذپذیری آن می‌شود که لازم است در کنترل رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی و میزان آبگذری و حتی در پایداری آن در نظر گرفته شود.

ضریب نفوذپذیری خاک، در واقع مقاومت خاک در برابر عبور آب است.^[۲] در خاک‌های اشباع، نفوذپذیری خاک تابعی از فضاها یا منافذ است. به هر حال در خاک‌های غیراشباع، هر دو فاز آب و هوا، جریان آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و ضریب نفوذپذیری خاک به مقدار درصد آب و فضاها یا منفذی مربوط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۲۸، پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61377.3167

استناد به این مقاله:

قبادپور، نگین، حسنلوراد، محمود و کیلانه‌ای، فواد، ۱۴۰۲. بررسی اثر چرخه‌ی خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۱۵-۱۲۴.

است.^[۴] مطالعات نشان داده است که آب فقط از میان منافذ عبور می‌کند که به‌طور پیوسته با آب پر شده است، بنابراین نفوذپذیری خاک غیراشباع به دو متغیر تنش قائم خالص^۲ و مکش بافتی^۳ وابسته است که مقدار آب را در خاک غیراشباع کنترل می‌کنند.^[۴] در مکانیک خاک، تنش خالص به‌صورت تفاوت تنش کل و فشار هوای حفره‌یی ($\sigma - u_a$) تعریف می‌شود و مکش بافتی به صورت تفاوت فشار هوای حفره‌یی و فشار آب حفره‌یی بیان می‌شود (یعنی $u_a - u_w$).

مکش بافتی، تأثیر قابل توجهی در درصد رطوبت خاک دارد. کاهش درصد رطوبت به دلیل افزایش مکش بافتی باعث کاهش قابل توجه نفوذپذیری خاک غیراشباع می‌شود. ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع بیش از ۱۰ برابر تغییرات مکش بافتی تغییر می‌کند. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که نفوذپذیری خاک غیراشباع، رابطه‌ی نزدیکی با منحنی مشخصه‌ی آب و خاک (SWCC) در فرایندهای خشک‌شدگی و ترشدگی دارد.^[۶،۵] به عبارت دیگر، نفوذپذیری خاک غیراشباع، رفتار هیسترسیس دارد و منحنی مشخصه‌ی آب و خاک که در آن ساختار مجدد خاک برگشت پذیر باشد، باعث کاهش رفتار هیسترسیس می‌شود.^[۷،۳]

معمولاً برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب در خاک از روش مستقیم پایدار استفاده می‌شود. در این حالت، مقادیر هد جریان و مکش بافتی ثابت‌اند و حالت پایدار با نزدیک شدن جریان ورودی به نمونه با جریان خروجی از آن برقرار می‌شود. با افزایش درجه اشباع خاک، ضریب نفوذپذیری خاک در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی متناوباً افزایش می‌یابد، ولی با افزایش مکش بافتی، ضریب نفوذپذیری خاک در هر دو فرایند ترشدگی و خشک‌شدگی کاهش می‌یابد.^[۹] اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود. این امر به دلیل افزایش حجم خلل و فرج در نمونه‌های تحت اثر تر و خشک شدن متوالی است.^[۱۰] همچنین ترک‌خوردگی با تعداد چرخه‌های خشک و خیس شدن افزایش می‌یابد.^[۱۱] هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه‌ی آب و خاک به یکدیگر مرتبط هستند. پژوهشگران نشان داده‌اند که هدایت هیدرولیکی در شاخه‌ی خشک، نسبت به شاخه‌ی تر، مقدار بیشتری دارد. در هنگام خشک شدن در دو خاک مشابه، در خاکی که چگالی خشک بیشتری دارد، نمونه‌ها با سرعت کمتری نسبت به نمونه‌ها با چگالی کم اشباع می‌شوند. همچنین در هنگام تر شدن، خاک با چگالی خشک بیشتر، رفتار هیسترسیس کمتری از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این امر ناشی از کاهش کلی اندازه‌ی منافذ به دلیل چگالی اولیه‌ی بالاتر باشد، که به دلیل تخلخل کمتر اتفاق می‌افتد.^[۱۲]

فردلوند^۴ و همکاران (۱۹۹۴)،^[۵] بیان کرده‌اند که نفوذپذیری خاک غیراشباع در ابتدا تابع توزیع اندازه‌ی منافذ خاک است و به‌طور غیرمستقیم ضریب نفوذپذیری تابع منحنی مشخصه‌ی آب و خاک است. با این ویژگی‌ها، ارزیابی درصد رطوبت باقیمانده جهت تعیین نفوذپذیری خاک غیراشباع ضروری نیست. طالب‌العلم^۵ (۲۰۱۹) در پژوهشی اثر خیس و خشک شدن متوالی هسته‌ی رسی سد دوستی را بررسی کرده و دریافته است که پس از ۶ چرخه‌ی خیس و خشک شدن، در کنار کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها، میزان نفوذپذیری هسته‌ی سد حدود ۱/۹ برابر افزایش یافته است.^[۱۳] گالاتگ^۶ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۸] یک پارامتر جدید برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع با استفاده از روش جریان پایدار و اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی معرفی کرده‌اند. ایشان برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، از دو نوع ماسه در فرایند خشک‌شدگی و خیس‌شدگی استفاده کرده‌اند که رفتار هیسترسیس قابل توجهی در برابر مکش بافتی نشان داده‌اند. اما رفتار هیسترسیس برای ضریب هدایت هیدرولیکی در برابر درصد رطوبت مشاهده نشده است. در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)،^[۷] یک دستگاه سه‌محوری اصلاح شده برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری و

مقاومت برشی سه نوع خاک غیراشباع در چرخه‌های خشک‌شدگی و خیس‌شدگی استفاده شده است،^[۱۴] که در نتایج به‌دست آمده، سازگاری خوبی با داده‌های گزارش شده در ادبیات مشاهده شده است. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که در کنار بررسی نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع، تعدادی از پژوهشگران، اثر رطوبت را در مقاومت برشی خاک‌ها بررسی کرده‌اند. برای نمونه می‌توان به مطالعات الشایه^۷ (۲۰۰۱) و دونگ^۸ و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که به جهت اختصار از ذکر جزئیات آن‌ها صرف‌نظر شده است.^[۱۴،۱۵]

کای^۹ و همکاران (۲۰۱۴)، یک روش جدید برای تخمین آثار چگالی در ضریب نفوذپذیری یک خاک غیراشباع و عوامل نفوذپذیری وابسته به چگالی را معرفی کرده‌اند.^[۱۶] همچنین گوه^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵)، دستگاه سه‌محوری معمولی را برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع اصلاح کرده‌اند که همزمان با اندازه‌گیری مقاومت برشی، ضریب نفوذپذیری را نیز اندازه‌گیری می‌کرده است.^[۱۷] ژنگ و فردلوند^{۱۱} (۲۰۱۵)، نیز توابع مختلف را که توسط سایر پژوهشگران برای تخمین ضریب نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع بیان شده بود، ارزیابی کرده‌اند.^[۱۸] همچنین نظری و همکاران (۲۰۱۸)، توابع اخیر را جهت تخمین ضریب نفوذپذیری خاک‌های با ترکیب ماسه و سیلت با انجام آزمایش ارزیابی کرده و نتیجه گرفته‌اند که ضریب نفوذپذیری خاک مخلوط ماسه و سیلت، تابعی از کشش بافتی، اندازه‌ی منافذ، و درصد ریزدانه (سیلت) است. همچنین ایشان دریافته‌اند که افزایش ریزدانه، مخصوصاً در مقادیر مکش بالاتر می‌تواند باعث کاهش نفوذپذیری شود.^[۱۹] در سال ۲۰۲۱، ون^{۱۲} و همکاران، نیز یک تابع نفوذپذیری برای تخمین ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع براساس معادله‌ی تعادل فاز آب پیشنهاد دادند که نیاز به یک پارامتر داشت که به راحتی با استفاده از آزمایش نفوذپذیری خاک غیراشباع با مقادیر مختلف تخلخل به دست می‌آمد.^[۲۰]

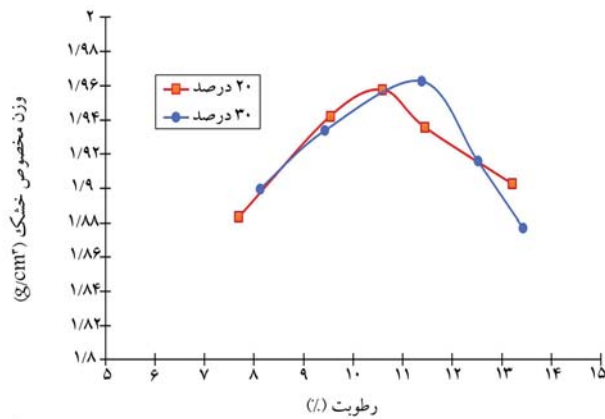
همچنین انگون^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۲)، یک روش ساده‌ی انتقالی برای تخمین ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع بیان کردند. در واقع آن‌ها جهت غلبه بر مشکلات روش پروفیل آنی (IP)، یک روش ساده و جدید پیشنهاد دادند. ایشان تغییرات مقدار رطوبت حجمی و فشار آب منفذی نظیر آن را برای روش پیشنهادی خود استفاده کردند و دریافته‌اند که روش پیشنهادی‌شان بدون در نظر گرفتن نوع خاک نسبت به روش IP کاربردی‌تر است.^[۲۱] بیشتر مطالعات مذکور، اثر یک چرخه‌ی کامل خشک‌شدگی و ترشدگی را در نفوذپذیری در شرایط پایدار و شکل‌گیری مجدد کامل جریان بررسی کرده و کمتر کسی تغییرات نفوذپذیری را در حین و طول مدت آبیگری از حالت کاملاً خشک تا برقراری شرایط پایدار بررسی کرده است. لذا در پژوهش حاضر، ضریب نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار با دو درصد متفاوت ۲۰ و ۳۰ در مسیر خشک و تر شدن با انجام تعدادی آزمایش نفوذپذیری بررسی شده است، تا به نوعی رفتار آب‌گذری یک سازه‌ی خاکی با رطوبت‌های اولیه‌ی مختلف ارزیابی شود.

۲. مصالح مصرفی و روش انجام آزمایش‌ها

در بخش حاضر، ابتدا مواد و مصالح مصرفی و سپس روش انجام آزمایش‌ها تشریح شده است:

۱.۲. مصالح مصرفی و مشخصات آن‌ها

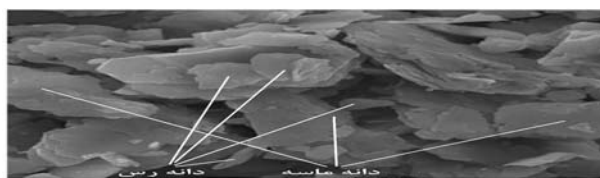
خاک مصرفی در پژوهش حاضر، شامل ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کائولن و ترکیب خاک استفاده شده شامل ۲۰ و ۳۰ درصد رس و مابقی آن ماسه بوده است که به صورت درصد وزنی خشک با یکدیگر ترکیب شده‌اند. به عبارتی،



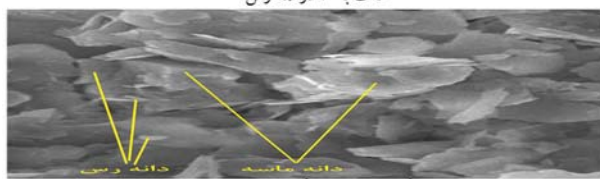
شکل ۱. منحنی تراکم دو ترکیب خاک.

جدول ۴. مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص پیشینه برای ترکیب خاک.

درصد رس	%۲۰	%۳۰
وزن مخصوص خشک پیشینه (KN/m^3)	۱۹/۵۸	۱۹/۶۳
رطوبت بهینه (%)	۱۰/۶	۱۱/۴



خاک با ۲۰ درصد رس



خاک با ۳۰ درصد رس

شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دو نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ (با حفره‌های بیشتر) و ۳۰٪ (با حفره‌های کمتر) رس.

رس، ساختار بازتر و منافذ بیشتری دارد. هر چند در شکل‌های مذکور، دانه‌های ماسه با ذرات رس پوشیده شده‌اند، ولی تا حدودی دانه‌های ماسه و رس مشخص هستند.

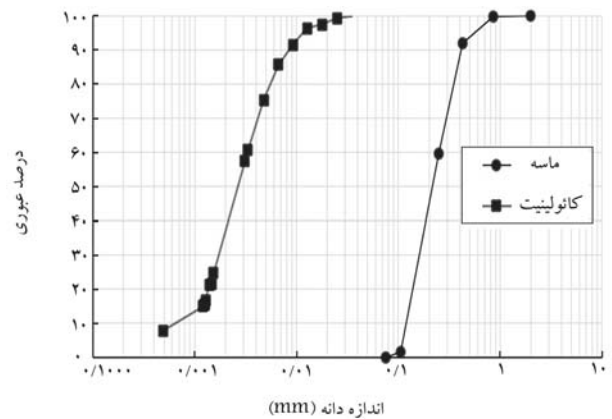
۲.۲. روند انجام آزمایش‌ها

وزن مخصوص خشک پیشینه و مقدار رطوبت بهینه به کمک آزمایش تراکم استاندارد تعیین شده‌اند. ترکیب خاک (ماسه و رس) به صورت درصد وزنی در حالت کاملاً خشک با یکدیگر ترکیب و سپس آب، به اندازه‌ی درصد رطوبت بهینه به خاک اضافه و مخلوط شده است. در نهایت، مخلوط به دست آمده به جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد. برای ساخت نمونه‌ها از قالب دوتکه‌یی به قطر ۳/۸ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده و نمونه‌سازی با تراکم ۱۰۰٪ در داخل قالب انجام شده است.

نکته‌ی اصلی، میزان از دست دادن رطوبت نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه در فرایند خشک و خیس شدن و به دست آوردن مجدد رطوبت آن‌هاست. لذا

جدول ۱. آزمایش‌های شناسایی مصالح.

آزمایش	استاندارد
دانه بندی	ASTM D ۴۲۲
هیدرومتری	ASTM D ۴۲۲
تعیین چگالی ویژه	ASTM D ۸۵۴
تراکم استاندارد	ASTM D ۶۹۸
حدود اتربرگ	ASTM D ۴۳۱۸



شکل ۴. منحنی دانه بندی ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کائولین.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

۲/۶۷	G_s	توده‌ی ویژه
۱/۹	c_u	ضریب یکنواختی
۰/۸	c_c	ضریب انحنای
۰/۲	D_{50}	اندازه‌ی متوسط دانه‌ها
SP	USCS	طبقه‌بندی متحده

جدول ۳. مشخصات خاک رس کائولین.

USCS	PI (%)	PL (%)	LL (%)	G_s
CL	۱۷/۳	۳۱/۵	۴۸/۸	۲/۶۳

منظور از ۲۰٪ رس، یک قسمت رس و ۴ قسمت ماسه است. در ابتدا، به کمک آزمایش‌های استاندارد طبق جدول ۱، خصوصیات فیزیکی خاک‌های استفاده شده مانند: دانه‌بندی، چگالی جامد دانه‌ها، وزن مخصوص خشک پیشینه، رطوبت بهینه، حد روانی و حد خمیری خاک تعیین شده است. [۲۲-۲۵]

مطابق شکل ۱، منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به صورت یکنواخت و بد دانه‌بندی است. همچنین مشخصات فیزیکی آن، شامل توده‌ی ویژه و رده‌ی آن طبق روش متحده در جدول ۲ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولین استفاده شده و مشخصات آن، شامل توده‌ی ویژه، حدود اتربرگ و رده‌ی آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۳ ارائه شده است.

در شکل ۲، منحنی تراکم ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ با دو درصد مختلف کائولین (۲۰ و ۳۰ درصد) مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک پیشینه‌ی دو ترکیب اخیر خاک در جدول ۴ ارائه شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌ها نیز با مقیاس برابر در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس نسبت به نمونه با ۳۰٪

۳.۲. انجام آزمایش نفوذپذیری با دستگاه سه‌محوری

آزمایش‌هایی مانند هد ثابت و یا افتان برای شرایط جریان پایدار هستند و به دلیل اینکه در پژوهش حاضر هدف بررسی تغییرات نفوذپذیری از ابتدای ورود آب به نمونه تا شکل‌گیری جریان پایدار بوده است، از دستگاه سه‌محوری استفاده شده است. با استفاده از دستگاه سه‌محوری، نفوذپذیری نمونه‌ی استوانه‌یی خاک در سلول سه‌محوری براساس استاندارد ASTM D۲۸۵۰ تحت تنش مؤثر و پس‌فشار معینی به‌دست می‌آید.^[۲۵] در واقع، حجم سیال عبوری از خاک در زمانی مشخص، تحت گرادین هیدرولیکی ثابت اندازه‌گیری می‌شود. بدین صورت که دبی خروجی و ورودی به نمونه در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. طبق استاندارد، آزمایش با قطر نمونه‌های ۳/۸ و ۱۰ سانتی‌متر انجام‌پذیر بوده و دربارۀ ارتفاع نمونه، محدودیتی داده نشده است، لذا به دلیل بسیار زمان‌بر بودن آزمایش، از نمونه‌ها با ارتفاع کمتری استفاده شده است. ارتفاع نمونه از ۱ تا ۳ سانتی‌متر توصیه شده است. به دلیل تراکم بالای نمونه‌ها، فرایند نمونه‌سازی خارج از دستگاه و به کمک قالب‌های فلزی دوتکه انجام شده است. در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری حجم آب ورودی به نمونه و حجم آب خروجی از نمونه حائز اهمیت است. به همین منظور، در مسیر آب ورودی، قبل از شیر آب ورودی به نمونه، یک عدد حجم‌سنج قرار داده شده است، تا بتوان حجم آب ورودی را اندازه‌گیری کرد. همچنین برای اندازه‌گیری آب خروجی از نمونه، از یک ترازوی دیجیتال استفاده و پس از خروج آب و ریختن آن در ظرفی که بر روی ترازو قرار دارد، وزن آب خروجی به‌صورت تجمعی تعیین شده است.

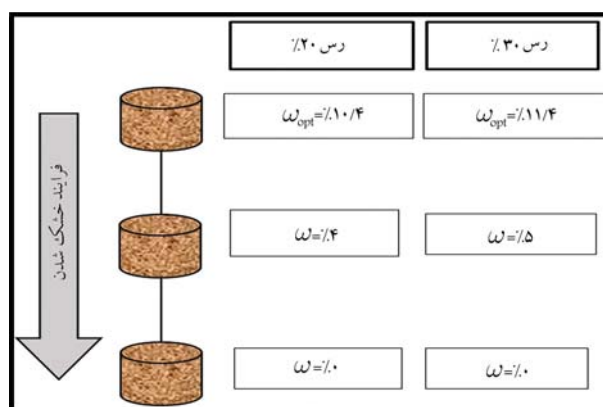
پیش از انجام آزمایش، باید از نبود هرگونه انسدادی در تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها اطمینان حاصل می‌شود. همچنین شلنگ‌های ورودی و خروجی، سنگ متخلخل و کاغذ صافی جاگذاری شده قبل از آزمایش اشباع می‌شوند. در دستگاه سه‌محوری، تنش همه‌جانبه توسط کمپرسور باد به سلول‌های تحت فشار منتقل می‌شود، سپس سلول‌های مذکور فشار را به آبی که در اطراف نمونه حضور دارد اعمال می‌کنند و بدین شکل تنش به نمونه وارد می‌شود. این فشار توسط رگلاتور به صورت دستی قابل تنظیم است و با بازکردن شیر مرتبط به نمونه منتقل می‌شود. در پژوهش حاضر، میزان فشار همه‌جانبه برابر ۵۰ کیلو پاسکال و پس‌فشار ۳۰ کیلو پاسکال انتخاب شده است. بدین صورت که آب با فشار ۳۰ کیلو پاسکال از حجم‌سنج عبور کرده و سپس وارد نمونه شده است. آزمایش تا مقدار آب عبوری از هر نمونه به اندازه‌ی ۶ برابر حجم نمونه ادامه یافته و پس از آن، آزمایش متوقف شده است. لذا زمان آب عبوری از نمونه وابسته به میزان درصد رس، رطوبت نمونه، قرار گرفتن در شاخه‌ی ترشدگی و یا خشک‌شدگی و میزان ترک‌های ایجاد شده در هر نمونه متفاوت است و تغییر هر یک از پارامترهای اخیر در زمان کلی آزمایش، اختلاف زمان آب ورودی و خروجی از نمونه، و عدد نفوذپذیری تأثیرگذار است؛ ولی در حالت کلی نمونه‌ها با درصد رس بالاتر، زمان بیشتری را برای آزمایش نیاز دارند. همان‌طور که بیان شد، اختلاف فشار همه‌جانبه و پس‌فشار اعمال شده بر نمونه‌ها برابر ۲۰ کیلو پاسکال بوده و در همه‌ی آزمایش‌ها این مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. این مقدار تنش مؤثر جهت اطمینان از این است که آب از مسیر ترجیحی مابین غشاء و خاک عبور نکند. نتایج به‌دست آمده برای هر دو درصد رس (۲۰ و ۳۰)، هر کدام به صورت جداگانه در دو نمودار به‌صورت دو روند خشک‌شدگی و ترشدگی ارائه شده است، که هر دو روند اخیر با نمونه‌ی اولیه (با رطوبت بهینه) مقایسه شده‌اند. آزمایش نفوذپذیری برای هر رطوبت، با ۳ بار تکرار انجام شده است. در شکل ۶، تصویری از انجام آزمایش نفوذپذیری به کمک دستگاه سه‌محوری موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی مشاهده می‌شود.

رطوبت نمونه قبل از آزمایش در نتایج و نفوذپذیری بسیار اثرگذار است. ادامه‌ی روند انجام آزمایش به این شرح است:

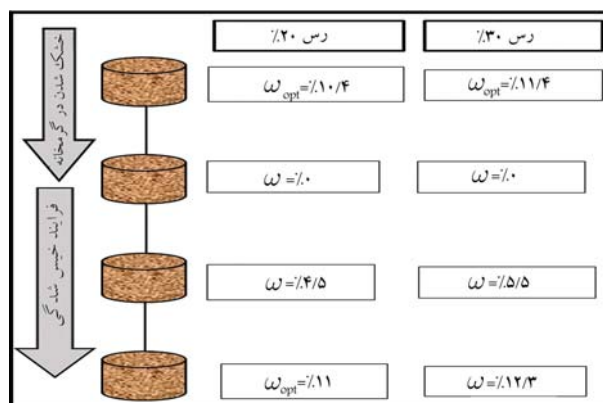
— **روند خشک‌شدگی:** در روش حاضر، نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته می‌شوند و به منظور کاهش رطوبت، در گرمخانه قرار می‌گیرند، تا به رطوبت موردنظر برسند. بدین منظور ساعت‌های قرارگیری نمونه‌ها در گرمخانه متفاوت است. دمای قرارگیری نمونه‌ها در گرمخانه، ۴۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد (جهت شبیه‌سازی دمای هوای گرم). برای مشخص شدن میزان رطوبت موردنظر در پایان هر مرحله، نمونه‌ها از گرمخانه خارج و وزن شدند.

— **روند ترشدگی:** در بخش کنونی، ابتدا نمونه‌ها طبق روند خشک‌شدگی ساخته شدند و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفتند، تا وزن آن‌ها ثابت شود. برای رطوبت‌دهی به نمونه‌های خشک شده، از محفظه با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد با رطوبت ۹۵٪ استفاده شده است. نمونه‌های خشک شده در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفتند و تا رسیدن به رطوبت موردنظر در آن باقی ماندند. در هر مرحله، برای اطمینان از رطوبت نمونه‌ی خاک، در پایان هر مرحله نمونه‌ها وزن شده‌اند.

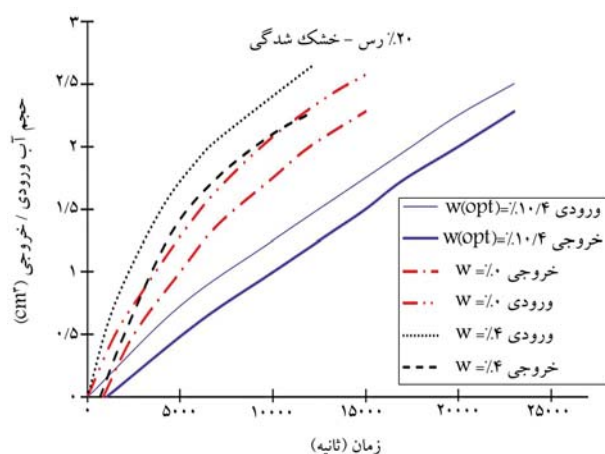
روند انجام آزمایش و رطوبت‌های موردنظر آزمایش‌های انجام‌شده برای هر دو مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.



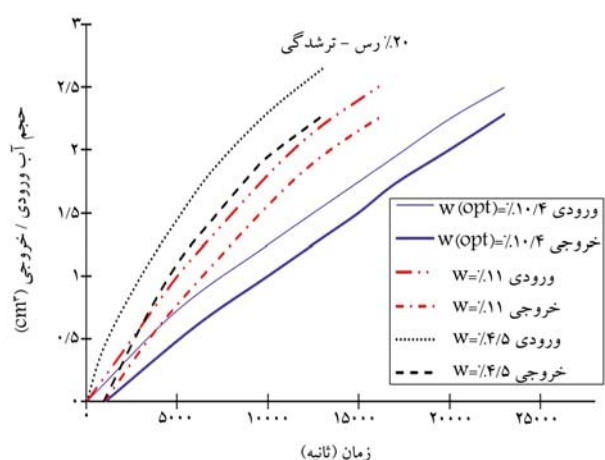
شکل ۴. روند خشک‌شدگی نمونه‌های خاک با ۲۰ و ۳۰ درصد رس و آزمایش‌های انجام شده.



شکل ۵. روند ترشدگی نمونه‌های خاک با ۲۰ و ۳۰ درصد رس و آزمایش‌های انجام شده.



شکل ۶. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر خشک شدگی برای خاک با ۲۰ درصد رس.



شکل ۷. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر ترشدگی برای خاک با ۲۰ درصد رس.

برابر ۲/۲۸ سانتی متر مکعب بر ثانیه را داشته و میزان دبی ورودی در نمونه‌ها وابسته به فضای خالی داخل نمونه بوده است و اختلاف این دو منحنی در هر لحظه، مقدار آب جمع شده در منافذ و یا جذب شده توسط ذرات خاک را نشان می‌دهد.

در شکل ۸، نمودار دبی تجمعی ورودی و خروجی در نمونه با ۲۰٪ رس در مسیر تر شدن مشاهده می‌شود؛ به صورتی که نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته شده، سپس در گرم‌خانه کاملاً خشک شده و به رطوبت صفر رسیده، و بعد از آن با قرار دادن نمونه‌ها در محفظه به رطوبت ۴/۵ و ۱۱ درصد رسیده‌اند. همچنین در شکل مذکور، مقایسه‌ی جریان ورودی و خروجی به دست آمده از نمونه‌ها با نمونه‌ی اولیه (ساخته شده با رطوبت بهینه) صورت گرفته است. ۳۰° در هر دو شکل خشک شدگی و ترشدگی، نمونه‌ی آزمایش شده با رطوبت بهینه، بیشترین زمان آزمایش را داشته و نمونه‌هایی که در مسیر خشک و تر شدن قرار گرفته‌اند، جریان ورودی و خروجی در زمان کمتری از نمونه عبور کرده است (حتی برای نمونه‌ی که در فرایند مجدد ترشدگی به رطوبتی بیش از رطوبت بهینه رسیده است). برای نمونه‌های ذکر شده (تحت خشک و تر شدن) هر چه زمان جریان عبوری کمتر باشد، اختلاف دبی ورودی و خروجی از یکدیگر بیشتر شده و اختلاف نمودار جریان



شکل ۸. تصویری از انجام آزمایش نفوذپذیری به کمک دستگاه سه محوری در آزمایشگاه.

۳. نتایج آزمایش

در ادامه، نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه و تشریح شده است:

۱.۳. بررسی روند خشک و تر شدن بر جریان

در بخش کنونی، به تأثیر خشک و تر شدن در جریان آب ورودی و خروجی پرداخته شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، در مسیر شلنگ آب ورودی به نمونه و قبل از شیر متصل به سلول، حسگر اندازه‌گیری تغییر حجم قرار داده شده است که به کمک آن، حجم آب ورودی به نمونه توسط دیتالاگر متصل به رایانه اندازه‌گیری شده است. همچنین با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۲ گرم که در زیر شیر خروجی سلول قرار گرفته است، وزن آب خروجی در لحظات موردنظر قرائت شده است. در بخش حاضر، نمودارهای دبی تجمعی ورودی و خروجی به ترتیب برای ترکیب خاک‌های موردنظر با دو مقدار رس ۲۰ و ۳۰ درصد ارائه شده است.

۱.۳.۱. نمودار جریان بر حسب زمان برای خاک با ۲۰٪ رس

در شکل ۹، دبی تجمعی آب ورودی و خروجی به نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس در مسیر خشک شدن مشاهده می‌شود. در مسیر خشک شدن، دو نمونه با رطوبت صفر و ۴ درصد آزمایش شده‌اند، بدین صورت که نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه در گرم‌خانه به رطوبت ۴٪ رسیده و نمونه‌ی دیگر کاملاً خشک شده و نتایج با نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه مقایسه شده است. بدیهی است که در هر نمونه، دبی جریان ورودی از زمان صفر شروع و آب ورودی پس از پُر کردن خلل و فرج نمونه و عبور از آن، پس از مدتی از شروع آزمایش از نمونه خارج می‌شود، لذا اندازه‌گیری دبی جریان خروجی نسبت به دبی جریان ورودی با اختلاف زمان همراه است و به این دلیل در هر نمونه، دبی جریان خروجی در موقعیتی پایین‌تر از دبی جریان ورودی قرار گرفته است. نکته‌ی دیگر در مورد شکل ۹ این است که نرخ افزایش دبی در نمونه با رطوبت بهینه به علت تقریباً پُر و مسدود بودن منافذ با آب، کمتر از نمونه‌های خشک و تر است. از طرفی، نرخ افزایش دبی تجمعی در نمونه‌ی حاوی ۴٪ رطوبت اولیه بیشتر از نمونه‌ی کاملاً خشک است؛ لذا به نظر می‌رسد فقط کمتر بودن رطوبت اولیه، تنها عامل در ورود و جریان آب نیست و در کنار آن، مکش بافتی و توان خروج هوا از نمونه و جایگزینی آن با آب نیز در این مورد دخیل هستند و باعث پیچیده شدن جریان آب می‌شوند. حجم آب خروجی از نمونه‌ها در لحظه‌ی آخر یکسان و مقداری

خشک‌شدگی، نمونه‌ی خاک با صفر و ۵ درصد رطوبت و برای مسیر ترشدگی نمونه‌ی خاک با رطوبت‌های ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد، با نمونه‌ی خاک ساخته شده با رطوبت بهینه مقایسه شده‌اند.

مطابق شکل‌های ۷ الی ۱۰، برای نمونه با رطوبت بهینه، زمان آب عبوری در خاک با ۳۰٪ رس از نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس بیشتر بوده است. این زمان برای خاک با ۳۰٪ رس حدود ۳/۵ برابر خاک با ۲۰٪ رس بوده است. مسلماً بیشتر بودن زمان آب عبوری در خاک ۳۰٪ رس به دلیل وجود رس بیشتر بوده و با افزایش مقدار رس در ترکیب خاک، مسیر حرکت ذره‌ی آب و قدرت جذب آب بیشتر شده است. همچنین در ترکیب خاک با ۳۰٪ رس، ذرات رس کاملاً دور دانه‌های ماسه را فرا گرفته و بافت خاک بیشتر به سمت خاک رسی متمایل شده است.

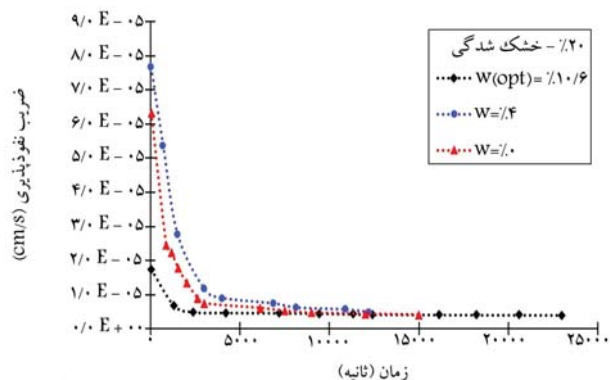
فاصله‌ی دو نمودار جریان ورودی و خروجی در خاک با ۳۰٪ رس در رطوبت بهینه، از فاصله‌ی نمودار جریان ورودی و خروجی با ۲۰٪ رس بیشتر است. این فاصله‌ی بیشتر نیز به دلیل وجود رس بیشتر است که افزایش آن باعث جذب آب بیشتری در نمونه‌ی خاک شده است. همچنین زمان آزمایش برای نمونه با ۳۰٪ رس تحت روند خشک و تر شدن نسبت به نمونه با رطوبت بهینه کمتر بوده است که نشانگر زیاد بودن دبی جریان خروجی و ورودی در نمونه‌های مذکور به دلیل ترک‌های ایجاد شده و افزایش فضای خالی در آن‌هاست. این روند در نمونه با ۳۰٪ رس همانند ترکیب با ۲۰٪ رس بوده است.

۲.۳. بررسی روند خشک و تر شدن در نفوذپذیری

مقادیر نفوذپذیری در بخش حاضر، با استفاده از نمودارهای دبی جریان در لحظه به دست آمده‌اند. این توضیح لازم است که ضریب نفوذپذیری براساس رابطه‌ی دارسی ($V = k_i$) محاسبه شده است که مقادیر V و i به صورت $i = \Delta h / L$ و $V = q / A$ و $\Delta h = \Delta p / \gamma_w$ است. در روابط اخیر، i گرادیان هیدرولیکی و Δh اختلاف هد ورودی و خروجی نمونه، A سطح مقطع نمونه و Δp اختلاف فشار ورودی و خروجی نمونه، q دبی ورودی به نمونه و V سرعت تراوش هستند.

۱.۲.۳. نمودارهای نفوذپذیری برحسب زمان برای خاک با ۲۰٪ رس

در شکل ۱۱، نمودار ضریب نفوذپذیری برای روند خشک شدن مشاهده می‌شود. در روند خشک‌شدگی، نمونه‌های خاک در حالت کاملاً خشک و ۴٪ رطوبت آزمایش شده‌اند. در دو نمونه‌ی اخیر و نمونه با رطوبت بهینه، نفوذپذیری در لحظات اولیه بیشتر بوده و سپس با گذشت زمان، نفوذپذیری کاهش یافته و پس از مدتی به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. کمترین نفوذپذیری در لحظه‌ی ابتدایی مربوط به نمونه با رطوبت بهینه بوده و این مقدار برای نمونه‌هایی که در مسیر خشک

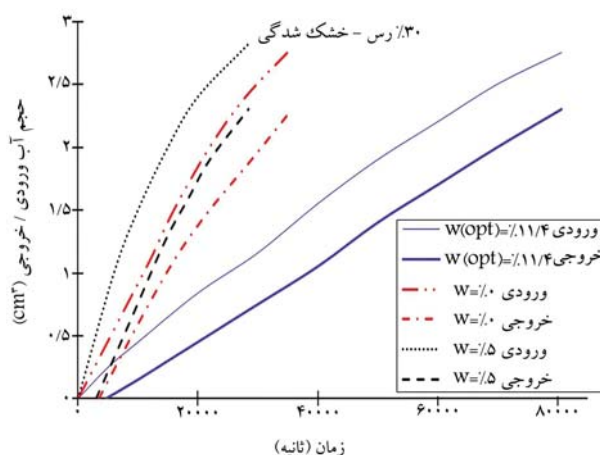


شکل ۱۱. نفوذپذیری در روند خشک‌شدگی برای خاک با ۲۰٪ رس.

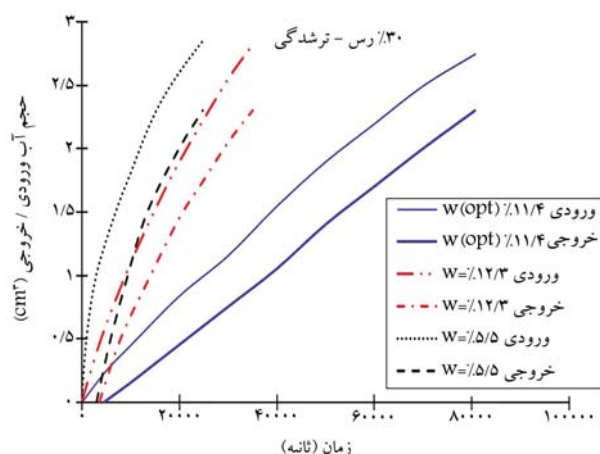
ورودی و خروجی برای نمونه با رطوبت بهینه، از دو نمونه‌ی دیگر تحت روند تر شدن و خشک شدن کمتر بوده است. در نمونه با رطوبت بهینه به دلیل آنکه ذرات خاک با انرژی تراکم مناسب در کنار هم قرار گرفته‌اند، ساختار همگن‌تری با کمترین فضای خالی را داشته است؛ لذا نیاز به زمان بیشتری برای عبور آب از بین دانه‌های خاک دارد. برای نمونه‌های تحت روند خشک‌شدگی و ترشدگی، نمونه‌ها یک بار در گرمخانه قرار گرفتند؛ لذا این موضوع باعث تبخیر شدن آب داخل خاک و منقبض شدن آن و ایجاد ترک در خاک شده است. برای نمونه‌های تحت روند تر شدن علاوه بر گرمخانه، نمونه‌ها در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفته و دچار انبساط نیز شده‌اند. این انقباض و انبساط مجددی که در خاک رخ داده است، بر دبی جریان ورودی و خروجی و زمان عبور آب و در نتیجه نرخ تغییرات دبی بر حسب زمان تأثیر گذاشته و احتمالاً نمونه‌ی که به رطوبتی (۱۱٪) بیش از رطوبت بهینه (۴٪/۱۰٪) رسیده است، همچنان ساختار ترک‌خورده‌ی آن کاملاً ترمیم نشده و ساختار ترک‌ها احتمالاً حفظ شده است.

۲.۱.۳. نمودار جریان بر حسب زمان برای خاک با ۳۰٪ رس

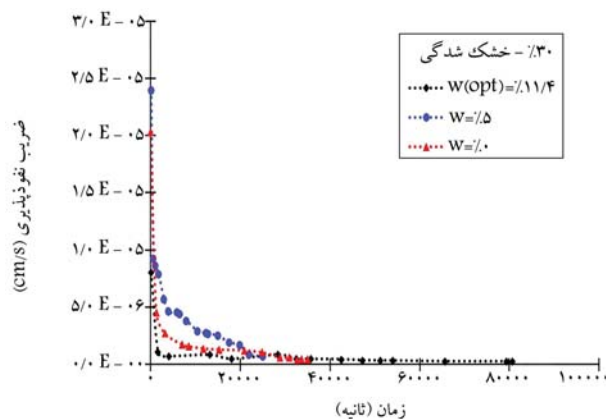
در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودار دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی به ترتیب برای روند خشک و تر شدن برای خاک با ۳۰٪ رس مشاهده می‌شود. برای مسیر



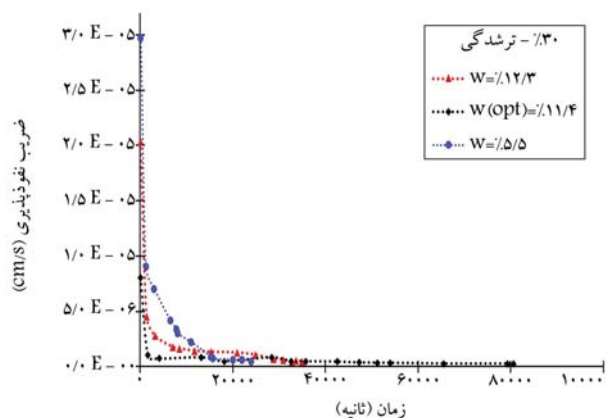
شکل ۹. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر خشک‌شدگی برای خاک با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۰. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر تر شدن برای خاک با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۳. نفوذپذیری در روند خشک شدن خاک با ۳۰ درصد رس.



شکل ۱۴. نفوذپذیری در روند تر شدن خاک با ۳۰ درصد رس.

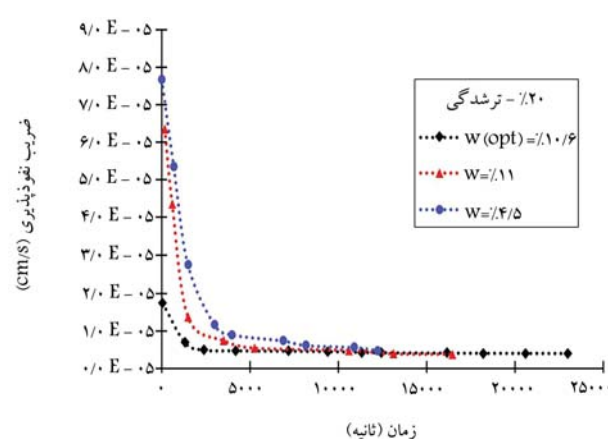
و نمونه‌های خشک و تر شده با ۳۰٪ رس نسبت به نمونه با ۲۰٪ رس بیشتر بوده است. هر چه میزان رس در نمونه‌ها بیشتر باشد، میزان رطوبت برای ساخت نمونه بیشتر می‌شود، لذا در هنگام خشک شدن نمونه، میزان رطوبتی که نمونه‌ی خاک از دست می‌دهد، بیشتر می‌شود که همین موضوع باعث ترک‌خوردگی بیشتر در نمونه نیز می‌شود. نفوذپذیری نهایی برای خاک با ۳۰٪ رس، برابر $4/8 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ است. به دست آمده است که این مقدار به دلیل وجود رس بیشتر نسبت به نمونه با ۲۰٪ رس بوده است.

۳.۳. بررسی روند خشک و تر شدن بر درجه اشباع

در ادامه، تغییرات درصد رطوبت و درجه اشباع در حین عبور آب برای نمونه‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است تغییرات درصد رطوبت و درجه اشباع طبق روابط وزنی حجمی محاسبه شده‌اند.

۱.۳.۳. تغییرات درجه اشباع برای خاک با ۲۰٪ رس

در شکل ۱۵، تغییرات درجه اشباع برای خاک با ۲۰٪ رس در روند خشک‌شدگی مشاهده می‌شود که مطابق آن ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های با رطوبت‌ها و درجه‌های اشباع‌شدگی اولیه‌ی مختلف طی زمان و عبور آب و با جذب آب، درجه اشباع با نرخ‌های متفاوت با جذب آب افزایش یافته و به مقدار ثابتی میل کرده است. نتایج آزمایش نشان داد که نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه، در ابتدا رطوبتی برابر $10/6$ ٪ و اشباع‌شدگی برابر 65 ٪ داشته و برای نمونه‌ی کاملاً خشک و نمونه با رطوبت اولیه‌ی 4 ٪، درجه اشباع در ابتدا به ترتیب صفر و 26 ٪ بوده است که



شکل ۱۵. نفوذپذیری در روند تر شدن خاک با ۲۰ درصد رس.

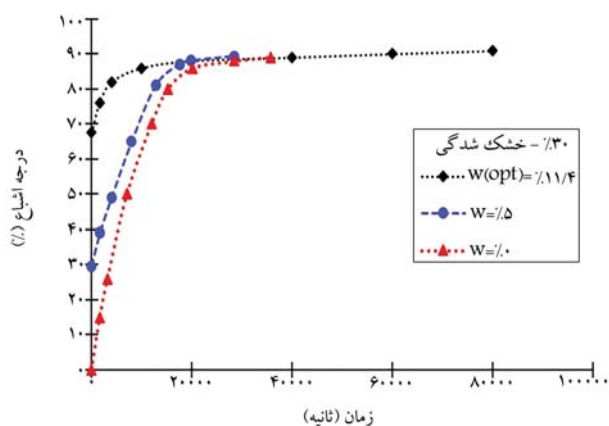
شدن قرار گرفته‌اند، بیشتر بوده است؛ که به دلیل وارد شدن آب بیشتر به نمونه‌های تحت فرایند خشک‌شدگی به علت وجود فضاهای خالی ناشی از خشک شدن بوده است. اما رفته‌رفته با قرارگیری آب در بین فضاهای خالی ذکر شده و جذب آن توسط ذرات خاک، ترک‌ها بسته و فضاهای خالی پر و آب با سرعت کمتری قادر به عبور از نمونه‌ی خاک شده است؛ لذا پیوسته نفوذپذیری خاک کم شده و نرخ تغییرات نفوذپذیری نسبت به زمان اولیه کاهش یافته و با گذشت زمان، نفوذپذیری به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. طبق نمودار، ضریب نفوذپذیری اولیه برای نمونه با ۴٪ رطوبت نسبت به نمونه‌ی کاملاً خشک بیشتر بوده است. در نمونه با رطوبت بهینه، فضای خالی بین دانه‌های خاک کم بوده و انسجام نمونه نسبت به حالت خشک شده بیشتر شده و نمونه دستخوش تغییرات زیاد نشده است.

در شکل ۱۶، تغییرات ضریب نفوذپذیری در روند ترشدگی برای خاک با ۲۰٪

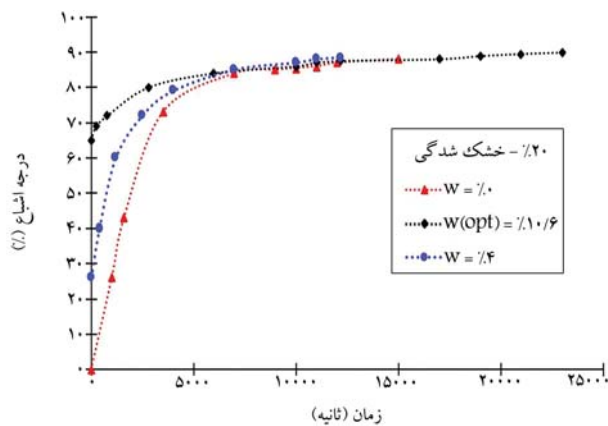
رس مشاهده می‌شود. نمونه‌های تحت فرایند ترشدگی، رطوبتی برابر $4/5$ و 11 درصد دارند. در مسیر ترشدگی نیز نمونه با رطوبت بهینه، کمترین نفوذپذیری را نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است. در نمونه‌های ترشده، ابتدا نمونه‌ها کاملاً خشک و دچار ترک شده و سپس در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفته‌اند. این مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی باعث می‌شود که خاک منقبض و منبسط شود و نیز ساختار و خلل و فرج نمونه با حالت اولیه (رطوبت بهینه) متفاوت باشد و ترک‌های به وجود آمده در خاک ترمیم نشوند؛ لذا نفوذپذیری در لحظات اولیه در نمونه‌های تر شده نسبت به نمونه‌ی سالم افزایش یافته و پس از گذشت زمان، نفوذپذیری در تمامی نمونه‌ها تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. طبق آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ساخته شده، ضریب نفوذپذیری برای خاک ماسه‌یی رس‌دار با ۲۰٪ رس، به میزان $3/98 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ به دست آمده است.

۲.۲.۳. نمودارهای نفوذپذیری برحسب زمان برای خاک با ۳۰ درصد رس

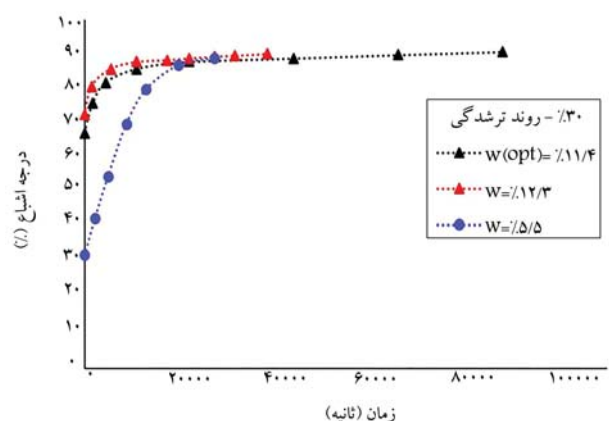
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب نفوذپذیری در مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی برای خاک با ۳۰٪ رس مشاهده می‌شود. آزمایش‌ها در مسیر خشک‌شدگی برای نمونه‌ی کاملاً خشک با رطوبت صفر و نمونه با 5 ٪ رطوبت و در مسیر ترشدگی برای نمونه با $5/5$ و $12/3$ درصد رطوبت انجام و با نمونه با رطوبت بهینه مقایسه شده‌اند. نمونه با ۳۰٪ رس با رطوبت بهینه، کمترین نفوذپذیری را در زمان‌های اولیه‌ی آزمایش نسبت به نمونه‌های خشک شده و تر شده داشته است که این موضوع همانند خاک با ۲۰٪ رس بوده است. تغییرات نفوذپذیری در لحظات اولیه برای نمونه با رطوبت بهینه



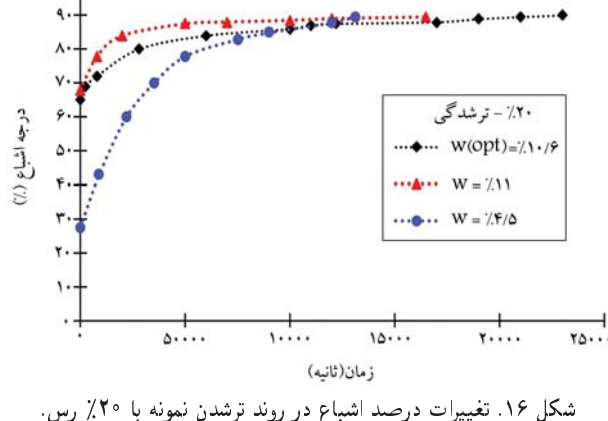
شکل ۱۷. تغییرات درصد اشباع‌شدگی در مسیر خشک شدن برای نمونه با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۵. تغییرات درجه اشباع در روند خشک‌شدگی برای نمونه با ۲۰٪ رس.



شکل ۱۸. تغییرات درجه‌ی اشباع در مسیر ترشدگی برای نمونه با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۶. تغییرات درصد اشباع در روند ترشدن نمونه با ۲۰٪ رس.

در شکل ۱۸، هم تغییرات درجه اشباع خاک با ۳۰٪ رس در مسیر تر شدن مشاهده می‌شود. در روند ترشدگی، تغییرات درجه اشباع نمونه‌ها با رطوبت‌های ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد با نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه، که در مسیر ترشدگی قرار نگرفته است، مقایسه شده است. درجه اشباع برای نمونه‌های با رطوبت‌های اولیه‌ی ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد در ابتدای آزمایش به ترتیب ۳۲/۶ و ۷۲/۸ درصد بوده است که در انتهای آزمایش، حدوداً به ۹۱٪ رسیده است.

با توجه و مقایسه‌ی شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ و نیز ۱۵ الی ۱۸ نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش درجه اشباع و کاهش قدرت عبور و جذب آب، نفوذپذیری نمونه‌ها نیز کاهش یافته است. خاک خشک نسبت به نمونه‌ی مرطوب، خلل و فرج و ترک بیشتری دارد؛ چرا که در اثر جذب رطوبت توسط ذرات رس، مولکول‌های آب، جذب سطحی ذرات رس می‌شوند و لذا منافذ کوچک‌تر و ترک‌ها بسته می‌شوند و در جریان از دست دادن رطوبت، عکس این موضوع رخ می‌دهد. همچنین نمونه‌ی خشک میل به جذب بیشتر آب دارد، بنابراین در ابتدای ورود آب، آب با نرخ بیشتری وارد نمونه می‌شود و لذا نفوذپذیری آن بیشتر و با گذشت زمان، نفوذپذیری خاک کمتر شده است. از طرفی، بنا به وجود حد انقباض، می‌توان گفت با کاهش رطوبت، نقطه‌ی وجود دارد که با کاهش بیشتر رطوبت، کاهش حجم بیشتری رخ نمی‌دهد. بنابراین شاید این موضوع دلیلی باشد بر اینکه چرا در ابتدای ورود آب به نمونه، نفوذپذیری خاک کاملاً خشک از نمونه‌ی حاوی اندکی رطوبت بیشتر نشده است.

رطوبت بیشینه‌ی نهایی آن‌ها به ۱۴/۵٪ (بیش از بهینه) رسیده است. همچنین بیشینه‌ی درجه اشباع در انتهای آزمایش برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی بهینه بوده است که به حدود ۸۹/۹٪ رسیده است. لذا ملاحظه می‌شود که حصول درجه اشباع کامل در اثر عبور آب تقریباً غیرممکن بوده است.

در شکل ۱۶، نیز تغییرات درجه اشباع برای نمونه با ۲۰٪ رس در مسیر ترشدگی مشاهده می‌شود که مطابق آن، برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۴/۵٪، درجه‌ی اشباع در ابتدای آزمایش برابر ۲۷/۵٪ و برای نمونه با ۱۱٪ رطوبت اولیه برابر ۶۸٪ بوده است. برای نمونه‌های اخیر، بیشینه‌ی درصد رطوبت در انتهای آزمایش مربوط به نمونه با رطوبت بهینه بوده است، که به مقداری برابر ۱۴/۵٪ رسیده است. همچنین درجه اشباع نمونه‌ها نیز به حدود ۹۰٪ رسیده است.

۲.۳.۳. تغییرات درجه‌ی اشباع برای خاک با ۳۰٪ رس

در شکل ۱۷، تغییرات درجه اشباع خاک با ۳۰٪ رس در مسیر خشک شدن مشاهده می‌شود که مطابق آن، برای نمونه خاک با ۳۰٪ رس، رطوبت بهینه‌ی نمونه برابر ۱۱/۴٪ بوده است. همان‌طور که گفته شد، در مسیر خشک‌شدگی دو نمونه با رطوبت اولیه‌ی صفر و ۵ درصد آزمایش شده‌اند. درجه اشباع در ابتدای آزمایش برای نمونه با رطوبت بهینه برابر ۶۷/۵٪ و برای نمونه‌های با رطوبت صفر و ۵ درصد، به ترتیب برابر صفر و ۲۹/۶ درصد به دست آمده و بیشترین درجه اشباع در انتهای آزمایش برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۱۱/۴٪ بهینه بوده است که حدوداً به ۹۰/۹٪ رسیده است.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، اثر فرایند خشک‌شدگی و ترشدگی مجدد خاک ماسه حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس در روند تغییرات ضریب نفوذپذیری آن به کمک دستگاه سه‌محوری بررسی شده است، اهم نتایج به‌دست آمده به این شرح بوده است:

- در هر نمونه‌ی حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس (هم در مسیر خشک‌شدگی و هم در مسیر ترشدگی)، دبی خروجی با اختلاف زمانی از دبی ورودی شروع می‌شود؛ به این دلیل که ابتدا آب خلل و فرج داخل نمونه را پر می‌کند و سپس از نمونه خارج می‌شود؛ لذا زمان شروع دبی جریان خروجی نسبت به زمان دبی جریان ورودی، دیرتر اتفاق می‌افتد.
- اختلاف دبی جریان ورودی و خروجی در نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه نسبت به نمونه‌های تحت روند خشک‌شدگی و ترشدگی کمتر است، که دلیل آن تقریباً پر بودن فضای خالی نمونه با رطوبت بهینه و ایجاد ترک و خلل و فرج در اثر فرایند خشک‌شدگی و ترشدگی است.

- در ابتدای ورود آب به نمونه، نفوذپذیری نمونه‌ی اولیه با رطوبت بهینه، کمتر از نمونه با رطوبت‌های دیگر (چه در فرایند خشک‌شدگی و چه در فرایند ترشدگی) بوده است که به دلیل خلل و فرج و حفره‌های ایجاد شده در خاک در اثر ترک‌خوردگی نمونه‌های خشک شده است. هر چند نمونه‌ی کاملاً خشک، کمترین نفوذپذیری را نشان نداده است. لذا به نظر می‌رسد بیشترین نفوذپذیری اولیه در یک درصد رطوبت بین رطوبت بهینه و نمونه‌ی کاملاً خشک ایجاد شود.
- در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان، نفوذپذیری ابتدا با نرخ بیشتر و سپس با نرخ کمتر کاهش یافته است، و سپس در همه‌ی آن‌ها، به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. چراکه ظاهراً با جذب بیشتر آب، ساختار تغییر یافته‌ی خاک در اثر خشک شدن، بازسازی و تا حدودی یکسان می‌شود.
- با گذشت زمان و عبور آب از نمونه، آب بیشتری جذب خاک می‌شود و درجه اشباع و درصد رطوبت نمونه، افزایش می‌یابد. هر چقدر رطوبت اولیه‌ی نمونه، کمتر و نمونه خشک‌تر باشد، نرخ جذب آب و افزایش درصد رطوبت و نیز درجه اشباع بیشتر است.

پانویس‌ها

1. Permeability Coefficient
2. Net Normal Stress
3. Matric Suction
4. Fredlund
5. Talebolelm
6. Gallage
7. Al-Shayea
8. Dong
9. Cai
10. Goh
11. Zahng & Fredlund
12. Wen
13. Nguyen

منابع (References)

1. Pourhosseini, R., Mossavi, M. and Nassiri, N. "Influence of temperature on desiccation cracking of clay soil", *Amirkabir J. Civil Eng*, **49**(3), pp. 161-164 (2017).
2. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. "An introduction to geotechnical engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA (1981).
3. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. "Soil mechanics for unsaturated soils", *John Wiley & Sons*, New York, NY, USA (1993).
4. Mirzaei, A. and Yasrobi, S.S. "Effect of net stress on hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Transport in Porous Media*, **95**(3), pp. 497-505 (2012).
5. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(4), pp. 533-546 (1994).
6. Mirzaei, A., Yasrobi, S.S. and Khalili, N. "Experimental investigation of hydraulic conductivity in unsaturated compressible soils", in *Proceedings of the 2nd European Conference on Unsaturated Soils*, pp. 205-212, Napoli, Italy (June, 2012).
7. Fredlund, D.G. "Unsaturated soil mechanics in engineering practise", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(3), pp. 286-321 (2006).
8. Gallage, C., Kodikara, J. and Uchimura, T. "Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes", *Soils and Foundations*, **53**(3), pp. 417-430 (2013).
9. Adelian Bahanmiri, G., Yasrobi, S. and Mirzaei, A. "Evaluation of the effects of hydraulic and mechanical parameters on the water coefficient permeability of clayey sand with a novel permeameter for unsaturated soils", *Sharif Civil Engineering Journal*, **2-28**(4), pp. 15-24 (In Persian) (1391/2013).
10. Lu, H., Li, J., Wang, W. and et al. "Cracking and water seepage of Xiashu loess used as landfill cover under wetting-drying cycles", *Environmental Earth Sciences*, **74**(11), pp. 7441-7450 (2015).
11. Bakti, L.A.A., Kirchhof, G. and Som H.B. "Effect of wetting and drying on structural regeneration of puddled soil", *Soil Solutions for a Changing World, Proc. 19th World Congr, Soil Science* (2010).
12. Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**(2), p. 06013001 (2014).

13. Talebolelm, A. "Investigation of mechanical characteristics on core dam materials in reservoir fluctuations and frequently changes in core degree of saturation (case study: Doosty Dam)", Ph.D Thesis, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian) (1397/2019) (2019).
14. Al-Shayea, N.A. "The combined effect of clay and moisture content on the remolded unsaturated soils", *Engineering Geology*, **62**(4), pp. 319-342 (2001).
15. Dong, Y., Wu, Y., Yin, J. and et al. "Investigation of soil shear-strength parameters and prediction of the collapse of gully walls in the black soil region of northeastern China", *Physical Geography*, **32**(2), pp. 161-178 (2011).
16. Cai, G., Zhou, A. and Sheng, D. "Permeability function for unsaturated soils with different initial densities", *Canadian Geotechnical Journal*, **51**(12), pp. 1456-1467 (2014).
17. Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils", *Soils and Foundations*, **55**(1), pp. 63-73 (2015).
18. Zahng, F. and Fredlund, D.C. "Examination of the estimation of relative permeability for unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(12), pp. 2077-2087 (2015).
19. Nazari, S., Hassanlourad, M., Chavoshi, E. and et al. "Experimental investigation of unsaturated silt-sand soil permeability", *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-12 (2018).
20. Wen, T., Shao, L. and Guo, X. "Permeability function for unsaturated soil", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **25**(1), pp. 1-13 (2021).
21. Nguyen, B.T., Ishikawa, T., Zhu, Y. and et al. "New simplified transient method for determining the coefficient of permeability of unsaturated soil", *Engineering Geology*, **300**, p. 106564 (2022).
22. ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soils", West Conshohocken (1998).
23. ASTM D698-12, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", West Conshohocken (2012).
24. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", West Conshohocken (2005).
25. ASTM D854, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", West Conshohocken (2000).
26. ASTM D2850-03, "Standard test method for unconsolidated - undrained triaxial compression test on cohesive soils" (2017).

بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا با ساده‌سازی مدل سازه به همراه مطالعه‌ی موردی: پل لالی

میثم رون (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرضا قیامی آزاد* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۱۲۵-۱۳۲، یادداشت فنی)
دروی ۳۹، شماره ۲، صص.

پل‌های کابلی ایستا به پل‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها، عرشه مستقیماً توسط کابل‌های مورب به برج‌ها وصل شده است. پل‌های کابلی ایستا، جزء سازه‌های بزرگ و با نامعینی زیاد محسوب می‌شوند، بنابراین بهینه‌سازی آن‌ها، همواره یک چالش بزرگ و پرهزینه بوده است. از طرفی تغییرشکل عرشه و برج‌ها وابسته به مقدار نیروی پیش‌کشش وارد شده به کابل‌هاست که به کمک فرایند بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. پژوهش حاضر قصد دارد با افزایش سرعت تحلیل، زمان فرایند بهینه‌سازی را کاهش دهد. لذا به جای تحلیل مدل سه‌بعدی و کامل سازه، از تحلیل جداگانه‌ی مدل‌های دو‌بعدی عرشه و برج بدون درنظر گرفتن کابل استفاده شده و پل کابلی لالی در خوزستان به عنوان نمونه به کار رفته است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که خطای محاسبه‌ی نیروی بهینه در روش ذکر شده نسبت به فرایند بهینه‌سازی مدل کامل ناچیز بوده و زمان محاسبه‌ی آن کمتر شده است.

واژگان کلیدی: پل کابلی ایستا، بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پل لالی، نیروی کابل.

meysamravan@ut.ac.ir
rghiami@ut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه با توجه به مسائل زیست‌محیطی و هزینه‌ی بالای ساخت و اجرای سازه‌های بزرگ، بهینه‌سازی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در پل‌های کابلی ایستا، به منظور کنترل تغییرشکل و توزیع لنگر خمشی در عرشه و برج، کابل‌ها کشیده می‌شوند که این امر موجب کاهش سختی خمشی مورد نیاز المان‌های عرشه و برج و نیز بهبود عملکرد و سبک‌سازی سازه می‌شود.

طبق مرور ادبیاتی که مارتینز^[۱] و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱] در زمینه‌ی بهینه‌سازی پل‌های کابلی ایستا انجام داده‌اند، تا سال ۲۰۲۰ حدود ۴۲/۲٪ از نوشتارهای مربوط به بهینه‌سازی پل‌های کابلی ایستا به بحث محاسبه‌ی نیروی کابل‌ها پرداخته‌اند. چهار راه‌حل کلی در نوشتارهای مختلف برای محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به‌منظور کمینه‌سازی تغییرمکان عرشه و برج مشاهده می‌شود که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2022.60867.3128

۱.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش

تغییرمکان صفر

وانگ^۲ و همکاران (۱۹۹۳)،^[۳] روش تغییرمکان صفر را پیشنهاد کرده‌اند که در آن، نیروی کابل‌ها به گونه‌ی محاسبه می‌شوند که تغییرمکان عرشه، در نقاط اتصال کابل‌ها به عرشه تحت بار مرده صفر شوند. برای این کار، ابتدا پل با فرض صفر بودن نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها تحلیل می‌شود. سپس نیروی لازم برای صفر شدن تغییرمکان عرشه در نقاط اتصال کابل‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه، با نیروهای محاسبه شده تحلیل و مشاهده می‌شود که هنوز تغییرمکان عرشه به صفر نرسیده است؛ پس دوباره نیروی لازم برای صفر شدن تغییرمکان مذکور محاسبه می‌شود و فرایند تکراری اخیر تا همگرا شدن پاسخ‌ها ادامه می‌یابد. این عملیات سبب بهینه‌سازی پل می‌شود، اما لزوماً منجر به صفر شدن تغییرمکان عرشه نمی‌شود و همواره خطا دارد. همچنین فرایند همگرایی، بسیار کند است.^[۴] وانگ و او^۳ (۲۰۱۴)،^[۵] با درنظر گرفتن مشکلاتی، نظیر فشردگی محاسبات و عدم همگرایی پاسخ بهینه در روش تغییرمکان صفر به بهبود آن پرداخته‌اند. روش بهبودیافته به این صورت است که در هر مرحله از

استناد به این مقاله:

رون، میثم و قیامی آزاد، امیررضا، ۱۴۰۲. بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا با ساده‌سازی مدل سازه به همراه مطالعه‌ی موردی: پل لالی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۲۵-۱۳۲.

جست‌وجوی جواب بهینه، یک درون‌یابی انجام می‌شود و فرایند طراحی را یک‌نواخت می‌کند.

۲.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش تعادل نیرو

چن^۴ و همکاران (۲۰۰۰)^[۶] از تعادل نیرو، برای محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی کابل‌ها استفاده کرده‌اند. در روش تعادل نیرو، نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به گونه‌ی محاسبه می‌شود که توزیع لنگر خمشی روی عرشه و برج بهینه شود. ابتدا، پل با فرض صفر بودن نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها تحلیل و لنگر خمشی آن محاسبه می‌شود. سپس ماتریس تأثیر کابل‌ها محاسبه می‌شود. برای این کار لازم است که سازه به تعداد کابل‌های موجود در پل تحلیل و در هر مرحله از تحلیل، نیروی پیش‌کشیدگی یکی از کابل‌ها، واحد فرض شود. در نهایت، با حل معادله‌ی ۱، نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها محاسبه می‌شود:

$$D^T.X = \Delta t \quad (۱)$$

که در آن، D ماتریس تأثیر، X بردار نیروهای مجهول پیش‌کشیدگی کابل‌ها و Δt بردار اختلاف بین نیروی پیش‌کشیدگی کابل در حالت ابتدایی و حالت بهینه هستند. نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در حالت بهینه، براساس توزیع لنگر خمشی یک‌نواخت روی عرشه محاسبه می‌شود. فابرسیانو^۵ و همکاران (۲۰۱۷)^[۷]، برای محاسبه‌ی توزیع لنگر خمشی یک‌نواخت روی عرشه، عرشه را یک تیر سراسری در نظر گرفته و هر کابل را یک تکیه‌گاه فرض کرده‌اند. سپس آن را تحلیل و توزیع لنگر خمشی عرشه را محاسبه کرده‌اند. ویژگی کارآمد روش تعادل نیرو، بی‌نیازی به محاسبات عددی در حل است.

۳.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش نیروی واحد

جانجیک^۶ و همکاران (۲۰۰۳)^[۸] روش نیروی واحد را پیشنهاد داده‌اند. ایشان از توزیع لنگر خمشی بهینه‌ی روی عرشه، برای محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها استفاده کرده‌اند. در روش نیروی واحد، ابتدا یک توزیع مناسب برای لنگر خمشی روی عرشه، در محل اتصال عرشه و کابل‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس با اعمال نیروی واحد به هر یک از کابل‌ها، لنگر خمشی زیر هر کابل محاسبه و در نهایت، با استفاده از رابطه‌ی ۲، نیروی پیش‌کشیدگی هر یک از کابل‌ها محاسبه می‌شود:

$$M^K = M_P^K + \sum_{m=1}^n M_{T_m}^K.X_m \quad (۲)$$

که در آن، $M_{T_m}^K$ مقدار لنگر خمشی عرشه در زیر کابل K است که از طریق اعمال بار واحد بر کابل T_m محاسبه شده است، M_P^K لنگر ناشی از بار مرده در زیر کابل K ، M_K لنگر خمشی مطلوب در زیر کابل K و X_m نیروی پیش‌کشیدگی مجهول در کابل‌ها هستند. در بهینه‌سازی به روش نیروی واحد ممکن است پاسخ بهینه‌سازی به اکسترمم‌های موضعی همگرا شود؛ از این رو لی^۷ و همکاران (۲۰۰۸)^[۹] یک روش دو مرحله‌ی براساس روش بار واحد ارائه کرده‌اند. در روش نیروی واحد، پیشینه و کمینه‌ی نیروی کششی کابل‌ها در مرحله‌ی دوم معرفی می‌شوند و سپس از این طریق، پاسخ بهینه‌ی مطلق به دست می‌آید. البته روش نیروی واحد فقط برای سازه‌هایی با رفتار خطی مناسب است و برای پل‌هایی که دهانه‌های بزرگی دارند، روش مناسبی نیست.

۴.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با بهینه‌سازی

از طریق تشکیل تابع هدف و محاسبه‌ی اکسترمم آن

در روش تشکیل تابع هدف، به منظور دستیابی به اهداف مختلف (نظیر کمینه‌سازی تغییرمکان و انرژی خمشی در سازه) یک تابع هدف تعریف می‌شود. سپس با تغییر دادن پارامترهای طراحی سعی می‌شود که تابع هدف اکسترمم شود. در روش مذکور، امکان همگرا شدن پاسخ‌های بهینه‌سازی به سمت اکسترمم‌های موضعی وجود دارد. از این رو استفاده از الگوریتم‌های متنوع حائز اهمیت است. همان‌گونه که در روش چهارم بیان شد، یکی از روش‌های محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. در سال‌های اخیر، برای جلوگیری از همگرا شدن پاسخ بهینه‌سازی به پاسخ‌های موضعی و همچنین کاهش هزینه بهینه‌سازی، از الگوریتم‌های متنوع و با اهداف گوناگون استفاده شده است. در ادامه، به مرور تاریخچه‌ی نوشتارهای موجود در این زمینه پرداخته شده است. در مطالعات انجام شده توسط نگو^۸ و همکاران (۱۹۹۷)^[۱۰] و سیمونس^۹ و همکاران^[۱۱] (۲۰۰۰)، ابتدا بردار نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به صورت رابطه‌ی ۳ به عنوان متغیر طراحی تعریف می‌شود:

$$x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}^T \quad (۳)$$

سپس محدودیت‌های مسئله به کمک توابع g تعریف می‌شود. شماری از محدودیت‌های مسئله به صورت روابط ۴ و ۵ است:

$$g_1(x) = \frac{|\delta|}{\delta_{Max}} - 1 \leq 0 \quad (۴)$$

$$g_2(x) = \frac{|\sigma|}{\sigma_{Max}} - 1 \leq 0 \quad (۵)$$

که در آن‌ها، δ و σ به ترتیب تغییرمکان و تنش در سازه هستند. در نهایت، با استفاده از تحلیل‌های متوالی به ازاء x ‌های مختلف و کمینه‌سازی یک تابع اسکالر محدب، نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها محاسبه می‌شود. در ریاضیات، تابعی اسکالر محدب^{۱۰} نامیده می‌شود که مشتق دوم آن در کل دامنه، منفی باشد. تابع مذکور، در مسئله‌ی حاضر به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$F(x) = \frac{1}{\rho} \ln \sum_{i=1}^M e^{\rho \times g_i(x)} \quad (۶)$$

که در آن، M تعداد محدودیت‌ها و ρ وزنی است که به نسبت اهمیت هر محدودیت به آن داده می‌شود. این روش براساس یک رویکرد مبتنی بر آنتروپی^{۱۱} است. آنتروپی، معیاری برای گسسته‌سازی محدودیت‌هایی نظیر تغییرشکل و تنش مجاز در سازه است. در روش اخیر به دلیل مشکلات عددی و هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالا، امکان لحاظ کردن اثر جابه‌جایی‌های بزرگ و تأثیر لنگر ثانویه^{۱۲} در تحلیل سازه وجود ندارد. مارتینز^{۱۳} و همکاران^[۱۲-۱۴] در ادامه‌ی مطالعات ذکر شده، سعی کردند که نیروهای وارد بر سازه در هنگام اجرای پل به روش طره‌ی متعادل^{۱۴} و تأثیر عوامل وابسته به زمان را در تحلیل خود لحاظ کنند.

حسن^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳)^[۱۴، ۱۵] روش جدیدی برای محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی بهینه در کابل‌ها تحت بار دائمی پل ارائه کرده‌اند که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک^{۱۶} و منحنی‌های B-Spline بوده است. در روش مذکور، ابتدا نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با منحنی B-Spline جایگزین و در نهایت نقاط کنترل منحنی B-Spline با استفاده از الگوریتم ژنتیک و فرایند تحلیل متوالی محاسبه

تعادل را به عنوان متغیر طراحی و انرژی خمشی سازه را به عنوان تابع هدف تعریف کردند. وانگ^{۲۴} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۱] نیز برای بهینه سازی پل های کابلی ایستای نامتقارن از وزنه ی تعادل و همچنین از یک تابع دو هدفه به منظور کمینه سازی انرژی خمشی عرشه و وزن وزنه های تعادل استفاده کرده اند.

فرایند بهینه سازی نیاز به تحلیل های متوالی و با تعداد زیاد دارد و از طرفی تحلیل پل های کابلی ایستا با توجه به بزرگی آن ها، پرهزینه و زمان بر است. به همین علت در نوشتار حاضر، روش جدیدی برای محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها ارائه شده است، که زمان فرایند بهینه سازی در آن را کاهش می دهد.

در روش هایی که از الگوریتم های بهینه سازی برای محاسبه ی نیرو با سطح مقطع کابل ها استفاده می شود، نیاز به به روز رسانی ماتریس سختی و وارون کردن آن پس از هر بار تحلیل وجود دارد که این امر خود موجب زمان بردن تحلیل می شود. از طرفی پل های کابلی ایستا، معمولاً دهانه های بزرگی دارند و زمان تحلیل در آن ها زیاد است. در پژوهش حاضر، مدلی ارائه شده است که مدل اصلی را ساده تر می کند و همچنین نیاز به به روز رسانی و وارون کردن ماتریس سختی در هر تحلیل وجود ندارد.

۲. روش مدل سازی توسعه یافته

بیشتر پل های کابلی ایستا به صورت متقارن ساخته می شوند، پس می توان به جای تحلیل کل سازه نصف آن را مدل کرد و در وسط آن از تکیه گاه غلطکی گیردار استفاده کرد. از طرفی با توجه به مفصلی بودن اتصال کابل ها به عرشه و برج، نیرویی که هر کابل به عرشه و برج وارد می کند، مطابق رابطه ی ۹ برابر با مجموع نیروی پیش کشیدگی و نیروی حاصل از کرنش آن کابل است:

$$F_C = E_{Eq} \varepsilon_C A_C + F_{PT} \quad (9)$$

که در آن، F_{PT} و F_C نیروی پیش کشیدگی و نیروی کابل مورد نظر هستند و همچنین پارامترهای E_{Eq} ، A_C و ε_C به ترتیب: مدول کشسانی معادل غیرخطی، سطح مقطع و کرنش هر یک از کابل ها هستند. پل های کابلی ایستا نیز به گونه یی طراحی می شوند که پل تحت بار مرده ی خود به صورت ثابت و بدون تغییر شکل زیاد باقی بماند، یعنی بار مرده و نیروهای پیش کشیدگی کابل ها هم دیگر را ارضا می کنند. در واقع، نیروی پیش کشیدگی کابل ها با هدف کمینه ساختن تغییر شکل سازه تحت بار مرده و به کمک فرایند بهینه سازی محاسبه می شود. در نتیجه می توان گفت که در هنگام محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها، می توان نیروی کابل را برابر با نیروی پیش کشیدگی آن کابل در نظر گرفت؛ زیرا کرنش کابل ها در این حالت ناچیز است و به سمت صفر میل می کند.

در پژوهش حاضر، کابل ها مدل نشده و به جای آن ها نیروی پیش کشیدگی کابل ها به عرشه و برج وارد شده است. همچنین برای ساده سازی مدل، عرشه و برج نیز به صورت جداگانه مدل سازی می شوند؛ در نتیجه، با ثابت بودن تمام مدل در فرایند بهینه سازی ماتریس سختی سازه برخلاف مدل سازی کل سازه نیاز به به روز رسانی ندارد. در ضمن با توجه به مفصلی بودن اتصال عرشه به برج و بالا بودن سختی محوری برج در زیر عرشه می توان عرشه و برج را به صورت جداگانه در نظر گرفت و محل اتصال را با یک تکیه گاه مفصلی جایگزین کرد. در شکل ۱، نحوه ی این تبدیل مشاهده می شود.

در نهایت با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی و به منظور کمینه ساختن مجذور مجموع مربعات کرنش کابل ها، نیروی پیش کشیدگی آن ها محاسبه می شود. در ادامه،

می شود. ایشان در روش اخیر، به کمینه سازی تغییر شکل قائم عرشه و تغییر مکان افقی سر برج ها پرداخته اند. روش جدید برای پل های کابلی ایستا با دهانه ی بزرگ که در آن ها متغیرهای طراحی زیاد هستند، بسیار کارآمد است؛ زیرا در روش ارائه شده از مختصات x و y نقاط کنترل منحنی های B-Spline به جای نیروی پیش کشیدگی کابل ها به عنوان متغیر طراحی استفاده می شود. استفاده از نقاط کنترل منحنی های B-Spline به جای نیروی پیش کشیدگی کابل ها سبب کمتر شدن متغیرهای طراحی و در نتیجه کاهش زمان محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها می شود. در روش مذکور، تابع هدف مجذور مجموع مربعات تغییر مکان ها در عرشه و برج است.

گوا^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۷] روشی برای بهینه سازی نیروی پیش کشیدگی کابل ها در پل های کابلی ایستای قوسی شکل تعریف کرده اند. ایشان نیروی پیش کشیدگی کابل ها را با منحنی B-Spline جایگزین و برای بهینه سازی از الگوریتم شبیه سازی تبرید یا SA^{۱۸} و نیز از مختصات نقاط کنترل منحنی B-Spline به جای مقدار نیروی پیش کشیدگی هر کابل استفاده کرده اند. از این رو تعداد متغیرهای طراحی بسیار کمتر شده و سرعت عملیات بهینه سازی افزایش یافته است. تابع هدف پژوهش حاضر مطابق معادله ی ۷ است:

$$F_{obj} = \sqrt{(d_1^{(r)} + d_2^{(r)} + \dots) + (p_1^{(r)} + p_2^{(r)} + \dots)} \quad (7)$$

که در آن، d و p به ترتیب تغییر مکان های قائم و افقی المان های عرشه و برج هستند. سان^{۱۹} و همکاران (۲۰۰۹)،^[۱۹] با کمینه سازی انرژی حاصل از لنگر خمشی در المان های سازه به محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها پرداختند و پیش کشیدگی کابل ها را به عنوان متغیر طراحی و تابع ۸ را به عنوان تابع هدف تعریف کردند:

$$\min(f(T)) = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{2 E_i I_i} M_i^2 \quad (8)$$

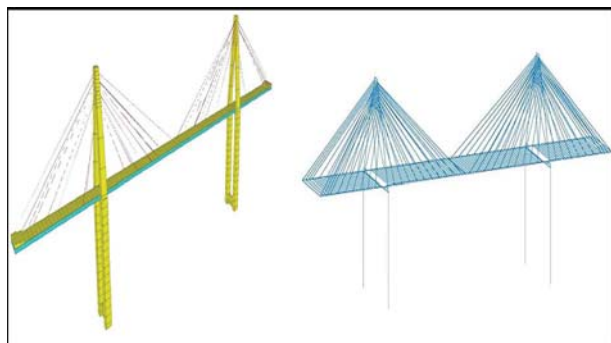
که در آن، m تعداد المان ها و پارامترهای l ، E ، I و M به ترتیب: طول، مدول کشسانی، ممان اینرسی و لنگر هر یک از المان ها هستند. در نهایت، تابع هدف به کمک (الگوریتم بهینه سازی ناحیه ی اعتماد^{۲۰}) کمینه می شود. در پژوهش حاضر، این فرضیات مطرح شده است:

۱. نیروی کششی کابل ها باید به گونه یی باشد که تنش ایجاد شده در کابل ها تحت بار مرده از ۴۰٪ تنش مجاز کابل ها بیشتر نشود.
۲. توزیع کشش بین کابل ها باید یکنواخت و معقول باشد، به صورتی که نیروی پیش کشیدگی دو کابل کنار هم زیاد با هم اختلاف نداشته باشند.
۳. نیروی پیش کشیدگی کابل ها با طول آن رابطه ی مستقیم دارد، در نتیجه مقدار نیروی کششی کابل ها از دو انتها به وسط نزولی است. فنگ^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱۹] تعداد رشته های هر یک از کابل ها در پل کابلی ایستا را به عنوان متغیر طراحی و انرژی خمشی عرشه را به عنوان تابع هدف تعریف کرده اند. ایشان برای محاسبه ی انرژی خمشی، ابتدا ماتریس تأثیر کابل های پل را محاسبه کردند. ماتریس تأثیر با اختصاص دادن نیروی واحد به هر یک از کابل ها و محاسبه ی نیروهای دیگر کابل ها محاسبه می شود. آن ها در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سطح مقطع و نیروی کابل ها را محاسبه کرده اند.

سونگ^{۲۲} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۰] یک روش بهینه سازی برای پل های کابلی ایستای نامتقارن ارائه کرده اند. ایشان برای متعادل کردن لنگر خمشی در برج، نصب وزنه ی تعادل^{۲۳} در زیر عرشه را پیشنهاد و اهمیت آن برای بهینه سازی پل را اثبات کردند. آن ها در روش مذکور، نیروی کششی کابل ها، وزن وزنه ی تعادل و طول وزنه ی

جدول ۱. تغییرشکل مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزارهای متلب و SAP۲۰۰۰ بدون پیش‌کشیدگی کابل‌ها به متر.

تغییرشکل		
افقی سر برج	قائم وسط عرشه	
۰/۲۴۱۳m	-۱/۰۹۴۳m	SAP۲۰۰۰
۰/۲۳۹۷m	-۱/۱۰۴۸m	MATLAB
درصد خطا	۰/۹۶ درصد	-۰/۶۶ درصد



شکل ۳. سمت راست مدل سه‌بعدی پل لالی در نرم‌افزار متلب و سمت چپ مدل راستی آزمایی پل لالی در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰.

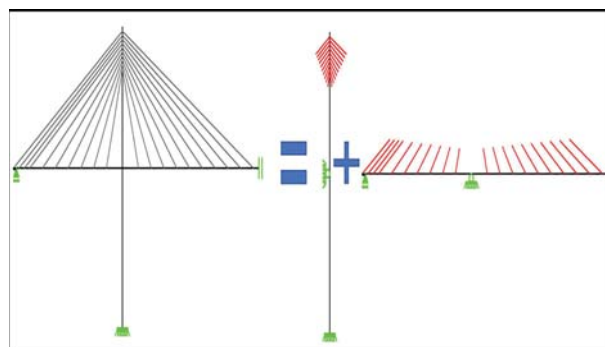
دال بتنی، پیاده‌روها، نرده‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات می‌شود، بوده است. فولاد مصرفی پروژه حاضر از جنس ST۵۲-۳، مقاومت بتن مصرفی ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، مقاومت تسلیم کابل‌ها ۱۶۷۴ مگاپاسکال، و مدول کشسانی کابل‌ها ۱۹۵ گیگاپاسکال بوده است.

۱.۳. مدل اول

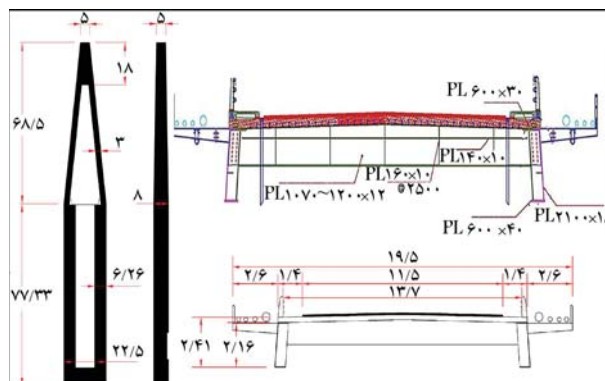
در مدل اول، کل سازه به صورت کامل و به صورت اجزاء محدود در نرم‌افزار متلب^{۲۵} مدل‌سازی شده و همچنین راستی‌آزمایی آن در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ صورت گرفته است. سه عامل مؤثر در رفتار غیرخطی پل‌های کابلی ایستا، عبارت‌اند از: اثر لانگر ثانویه^{۲۶}، تغییرشکل‌های بزرگ در سازه و افتادگی کابل‌ها در اثر وزن‌شان.^[۲۲] اثر افتادگی کابل‌ها را می‌توان با رابطه‌ی سختی معادل مطابق رابطه‌ی ۱۰ لحاظ کرد:^[۲۳]

$$E_{Eq} = \frac{E}{1 + \frac{(\gamma \cdot L \cdot \cos(\alpha))^2 E}{12 \sigma^3}} \quad (10)$$

که در آن، γ چگالی کابل، E مدول کشسانی کابل، α زاویه‌ی بین کابل و عرشه و σ تنش کابل هستند. دو اثر دیگر را نیز می‌توان با استفاده از تحلیل مرتبه‌ی دوم لحاظ کرد. مارتینز^{۲۷} و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۲] اثبات کردند که اثر افتادگی کابل‌ها در غیرخطی شدن رفتار سازه بیش‌تر از دو عامل دیگر است و می‌توان از دو عامل دیگر در مقابل آن چشم‌پوشی کرد. لذا برای اعمال آثار غیرخطی در مدل ساخته شده با متلب، فقط اثر افتادگی کابل‌ها و با کمک مدول کشسانی معادل لحاظ شده است. برای راستی‌آزمایی مدل ساخته شده، تغییرشکل افقی سر برج‌ها و تغییرشکل قائم میانه‌ی عرشه در حالتی که هیچ‌گونه نیروی پیش‌کشیدگی به کابل‌ها وارد نمی‌شود و پل فقط تحت اثر بارهای مرده قرار دارد، در دو مدل ساخته شده در نرم‌افزارهای SAP۲۰۰۰ و متلب در کنار هم مقایسه شده‌اند. نتایج راستی‌آزمایی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۳، شماتیک مدل‌سازی در دو نرم‌افزار مذکور مشاهده می‌شود.



شکل ۱. تبدیل نصف پل کابلی به دو سازه‌ی مجزا (مدل دوم پل کابلی ایستای لالی).



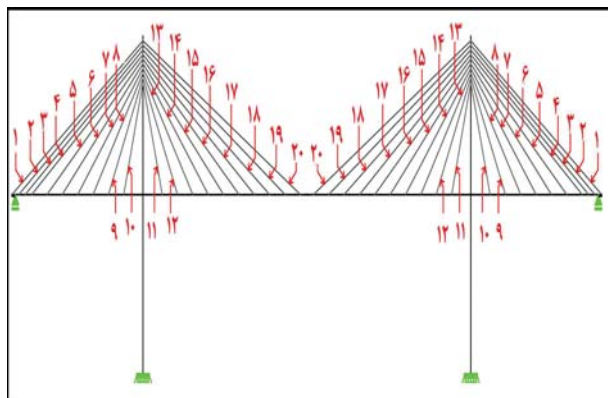
شکل ۲. جزئیات عرشه و برج پل لالی.

برای بررسی کارایی عملکرد این نوع مدل‌سازی، پل کابلی ایستای لالی به دو صورت کامل و به روش توسعه‌یافته، مدل‌سازی و تحلیل شده است.

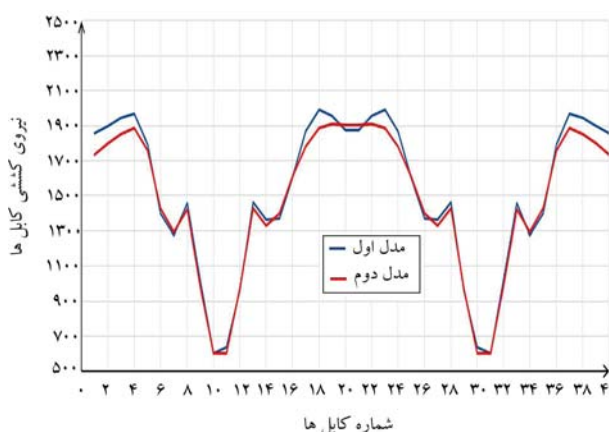
۳. پل کابلی ایستای لالی

پل کابلی لالی، راه ارتباطی بین شهرستان مسجد سلیمان و شهرستان لالی است که خطوط انتقالی نفت، آب و گاز منطقه نیز روی آن است. پل لالی در ۱۵ کیلومتری بالادست محور سد گتوند و در حدود ۳ کیلومتری بالادست پل قدیم لالی - مسجد سلیمان قرار دارد. فاصله‌ی بین کوله‌های دو طرف پل ۴۵۵/۲۵ متر است که از دو دهانه‌ی ۹۹/۶۲۵ متری و یک دهانه‌ی ۲۵۶ متری میانی تشکیل شده است. پل لالی در مجموع ۴۶۰/۵ متر طول دارد و عرض آن ۱۹/۵ متر است که ۱۱/۵ متر آن، محل عبور خودرو و مابقی آن مختص عبور پیاده‌رو و خطوط انتقالی است. آرایش کابل‌ها به صورت پنجه‌یی بوده و در هر طرف عرشه از ۴۰ کابل به فاصله‌ی ۱۲ متر استفاده شده است. عرشه‌ی پل به صورت کامپوزیت و ترکیبی از دو شاه‌تیر فولادی (U) شکل به ارتفاع ۲/۱۷ متر و یک دال بتنی ۲۵ سانتی‌متری روی آن است. همچنین تیرورق‌های عرضی (I) شکل در هر ۴ متر از طول عرشه کشیده شده‌اند. همچنین پل لالی از دو برج به ارتفاع ۱۴۴/۶ متر تشکیل شده است که ۷۷/۳۳ متر آن پایین‌تر از تراز عرشه قرار دارد. برج‌ها، بتنی و با مقطع باکس به ضخامت ۶۰ سانتی‌متر هستند که به صورت منشوری ساخته شده‌اند. در شکل ۲، جزئیات عرشه و برج‌ها مشاهده می‌شود.

بارهای وارد بر سازه براساس آیین‌نامه‌های ایران فرض شده‌اند. بار مرده‌ی عرشه، شامل: تیرهای اصلی، تیرهای فرعی، طره‌ها و ۱۴۰ کیلو نیوتن دیگر (که شامل:



شکل ۴. شماره گذاری کابل ها.



شکل ۵. نیروی کششی محاسبه شده پس از پایان فرایند بهینه سازی از دو مدل ساخته شده.

عنوان متغیر طراحی استفاده شده است. متغیرهای طراحی به شرح روابط ۱۴ و ۱۵ هستند.

$$\text{Variables} : \{PT_1, PT_2, PT_3, \dots, PT_{10}\} \quad (14)$$

$$\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{10}\} = \frac{\{PT_1, PT_2, PT_3, \dots, PT_{10}\}}{0.4 \times \sigma_a} \quad (15)$$

که در آن ها، PT نیروی پیش کشیدگی، A سطح مقطع و σ_a تنش مجاز کابل ها هستند و ترتیب شماره ی کابل ها نیز در شکل ۴ مشاهده می شود.

۶. بررسی نتایج

نیروی پیش کشیدگی کابل ها در هر دو مدل ساخته شده از پل کابلی ایستای لالی، بهینه سازی و محاسبه شده اند. پس از بهینه سازی، مقدار تابع هدف (مجذور مجموع مربعات کرنش کابل ها) در مدل اول به مقدار 0.17% و در مدل دوم به 0.0004% رسیده است که هر دو ناچیز هستند. این موضوع نشان می دهد که در حالت بهینه، کرنش کابل ها به سمت صفر میل می کند و فرض برابر بودن نیروی موجود در کابل با نیروی پیش کشیدگی آن کابل درست است.

نتایج بهینه سازی در شکل ۵ مشاهده می شود؛ که مطابق آن، نیروی پیش کشیدگی محاسبه شده از بهینه سازی دو مدل تا حد قابل قبولی منطبق بر یکدیگر هستند. نیروهای محاسبه شده از بهینه سازی مدل دوم به صورت میانگین، 2% و نهایتاً 6%

۴. مدل دوم

در مدل دوم، مطابق توضیحات ارائه شده در بخش سوم، فقط یک برج و نصف عرشه به صورت جداگانه و دوبعدی مدل سازی شده اند. محل اتصال عرشه و برج از تکیه گاه مفصلی و در انتهای نصف شده ی عرشه از تکیه گاه غلطکی گیردار استفاده و به جای کابل ها، نیروی آن ها به عرشه و برج وارد شده است. همچنین با توجه به کم بودن تغییر شکل ها در حالت بهینه و ناچیز شدن کرنش کابل ها می توان از آثار غیرخطی سازه صرف نظر کرد.

۵. بهینه سازی

۱.۵. الگوریتم بهینه سازی

برای بهینه سازی مسئله ی کنونی و محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^{۲۸} استفاده شده است. الگوریتم بهینه سازی، یک الگوریتم فرا ابتکاری است که از حرکت پرندگان الگو گرفته است.^[۲۴] در الگوریتم مذکور، ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می شود، سپس طبق معادلات ۱۱ و ۱۲، هر یک از ذرات جابه جا می شوند:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(x_{ib}^k - x_i^k) + c_2r_2(x_{gb}^k - x_i^k) \quad (11)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (12)$$

که در آن ها، c ضریبی ثابت، x_{ib}^k بهترین تجربه ی ذره ی i ام، x_{gb}^k بهترین تجربه ی کل جمعیت، x_i^k و v_i^k مکان و سرعت ذره ی i ام در تکرار k ام، r مقدار تصادفی بین ۰ تا ۱ و w ضریب اینرسی هستند. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در طی سالی های متوالی بهبود یافته است. به عنوان مثال، باررا^{۲۹} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲۵] راجع به محدود کردن سرعت ذرات بحث کردند و نشان دادند که محدود کردن سرعت باعث بهبود عملکرد الگوریتم بهینه سازی می شود. برای بهینه سازی مسئله ی ذکر شده از 200 ذره و 200 تکرار استفاده شده است، که در مجموع به 40000 بار تحلیل برای بهینه سازی هر مدل نیاز بوده است.

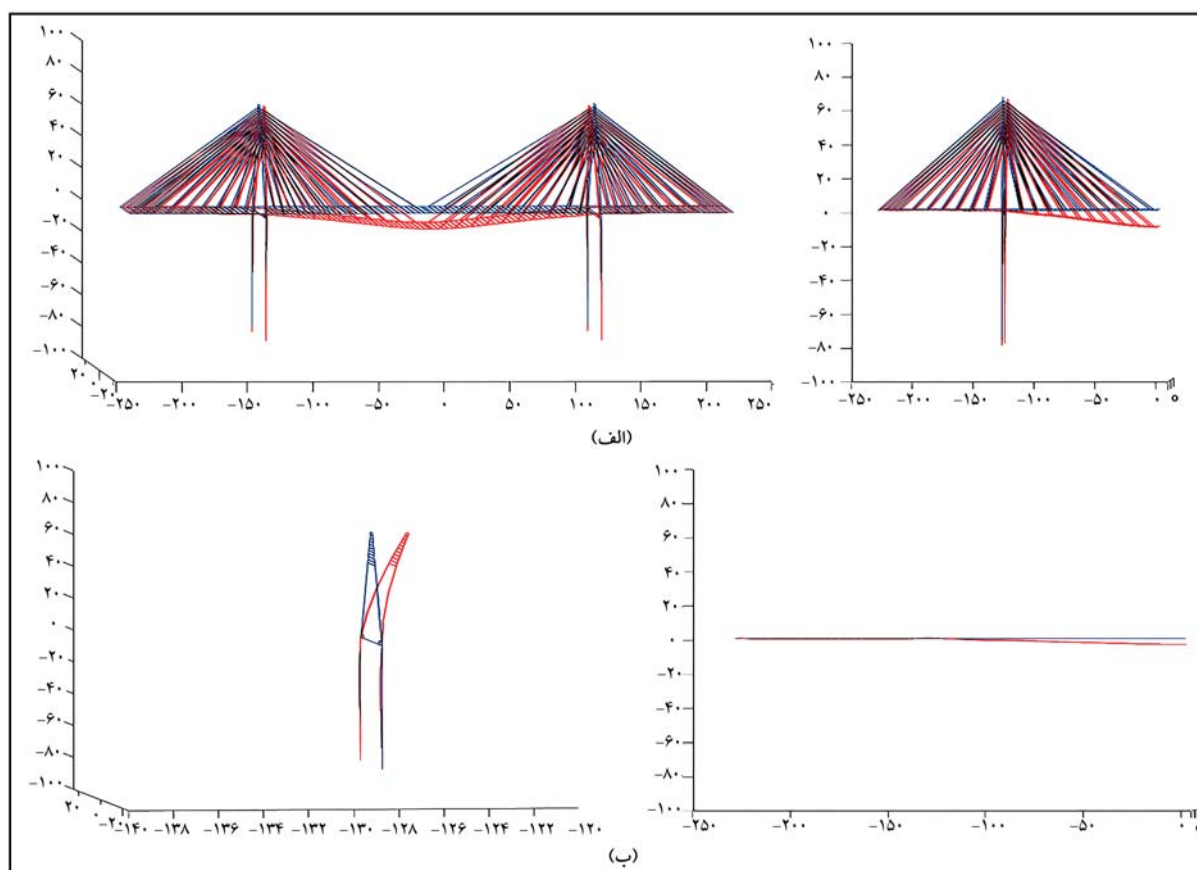
۲.۵. تابع هدف

هدف کمینه سازی تغییر شکل عرشه و برج است که می توان آن را به صورت مجذور مجموع مربعات کرنش کابل ها مطابق رابطه ی ۱۳ نوشت، تا فرض مدل دوم نیز به واقعیت نزدیک تر باشد. برای محاسبه ی کرنش هر یک از کابل های فرضی، از نسبت تغییر فاصله ی دو گره متناظر هر یک از کابل های فرضی پس از تغییر شکل سازه به طول اولیه ی آن کابل استفاده می شود.

$$ObjFunc = \sqrt{\varepsilon_{C1}^2 + \varepsilon_{C2}^2 + \varepsilon_{C3}^2 + \dots + \varepsilon_{C70}^2} \quad (13)$$

۳.۵. متغیرهای طراحی

با توجه به فرضیات سان^{۳۰} و همکاران (۲۰۰۹)،^[۱۸] مقدار نیروهای پیش تنیدگی کمتر و یا در حدود 4% تنش مجاز کابل هاست. با توجه به رابطه ی تقریبی ذکر شده، فقط نیروهای پیش تنیدگی یا فقط سطح مقطع کابل ها به عنوان متغیرهای طراحی در مسائل تعریف می شوند. در پژوهش حاضر نیز از نیروی پیش کشیدگی کابل ها به



شکل ۶. الف) تغییر شکل کل و نصف سازه در مدل اول، ب) تغییر شکل سازه‌های دوبعدی ساخته شده برای مدل دوم.

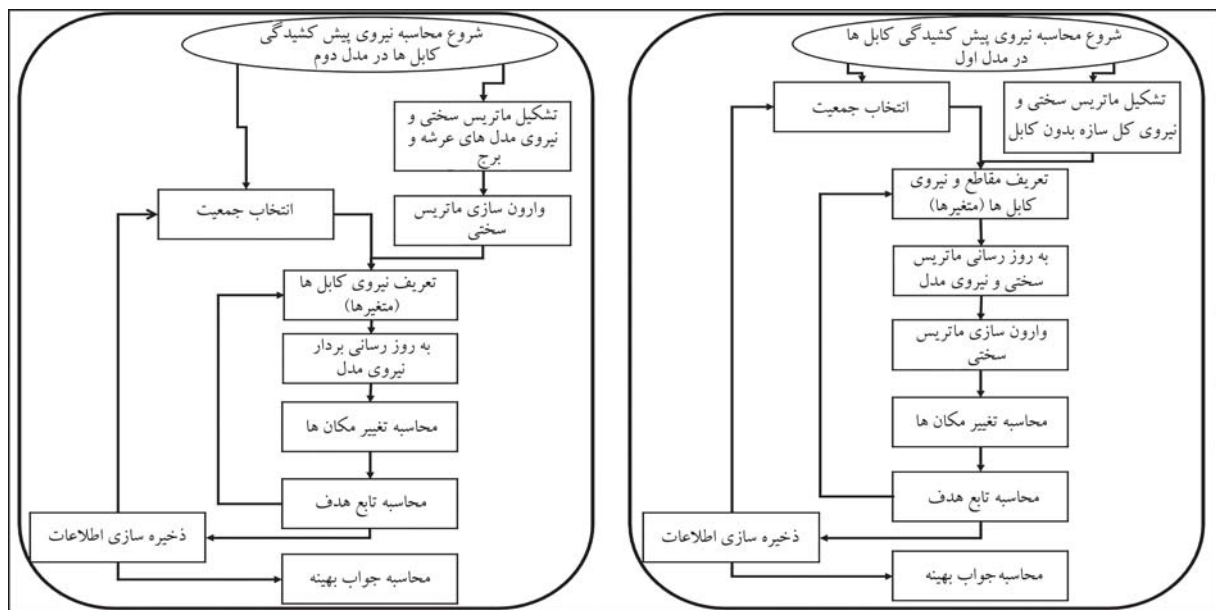
جدول ۲. جزئیات زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در دو مدل.

مدل دوم		مدل اول		زمان عملیات (ثانیه)	عملیات
زمان کل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان کل (ثانیه)	تعداد تکرار		
۰/۰۶۴۲	۱	۲۵۶۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۶۴۲	تشکیل ماتریس سختی
۰/۰۶۲۱	۱	۲۴۸۴	۴۰۰۰۰	۰/۰۶۲۱	وارون کردن ماتریس سختی
۸	۴۰۰۰۰	۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	تشکیل بردار نیرو
۸	۴۰۰۰۰	۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	محاسبه‌ی تغییر شکل سازه
۲۳۷۶	۴۰۰۰۰	۲۳۷۶	۴۰۰۰۰	۰/۰۵۹۴	محاسبه‌ی تابع هدف
۱۷۲۸/۲۶	۲۰۰	۱۷۲۸/۲۶	۲۰۰	۸/۶۴۱۳	اجرای الگوریتم بهینه‌سازی
۴۱۲۰/۳۹		۹۱۷۲/۲۶			مجموع زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی (ثانیه)

۷. نتیجه‌گیری

پل‌های کابلی ایستا، جزء بزرگ‌ترین سازه‌های ساخته شده توسط بشر هستند و تحلیل و طراحی آن‌ها پیچیده، زمان‌بر و هزینه‌بر است. از طرفی همان‌گونه که گفته شد، روش مرسوم برای طراحی سطح مقطع کابل‌ها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است و در فرایند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیاز است که سازه به صورت متوالی و به تعداد دفعات زیاد مدل‌سازی و تحلیل شود. در پژوهش حاضر، با تغییر نحوه‌ی

خطا دارد که برای مسئله‌ی کنونی قابل قبول است. زمان فرایند بهینه‌سازی در مدل اول، حدود ۹۱۷۲ ثانیه و در مدل دوم حدود ۴۱۲۰ ثانیه بوده است که حدود ۵۵٪ کاهش زمان بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. جزئیات زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی در دو مدل مذکور، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۶، در قسمت (الف)، تغییر شکل مدل اول و نصف آن پس از بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها و در قسمت (ب)، تغییر شکل مدل‌های دوبعدی عرشه و برج در مدل دوم مشاهده می‌شوند.



شکل ۷. روند نمای فرایند بهینه سازی در دو مدل اول و دوم.

اما در مدل دوم، ماتریس سختی سازه فقط یکبار ساخته و معکوس آن محاسبه شده است. مدل اول، کامل بوده و سه بعدی سازی پیچیده با درجات آزادی بالایی داشته است؛ اما مدل دوم، برخلاف مدل اول که یک مدل سه بعدی بوده است، به صورت دو بعدی مدل شده است. در نتیجه، بنا به دلایل ذکر شده انتظار می رود که فرایند بهینه سازی در مدل دوم نسبت به مدل اول کاهش چشمگیری داشته باشد. روند نمای فرایند بهینه سازی دو مدل ساخته شده در شکل ۷ مشاهده می شود. مقایسه ی نیروهای پیش کشیدگی محاسبه شده از دو مدل ساخته شده برای پل کابلی ایستای لالی نشان می دهد که در مجموع روش مذکور، خطای نسبتاً پایینی داشته و سرعت فرایند بهینه سازی در آن، حدود ۵۵٪ کمتر شده است. این موضوع در مدل های با تعداد المان بیشتر و یا مش بندی های ریزتر بسیار با ارزش بوده است.

مدل سازی، سازه نیاز به مدل سازی مجدد در هر تکرار را ندارد. همچنین مدل جدید ارائه شده نسبت به مدل اصلی سازه ساده تر است، زیرا به صورت دو بعدی بوده و با مدل نشدن کابل ها در آن، تعداد المان ها نیز کاهش یافته است.

عدم نیاز به مدل سازی در هر تکرار فرایند بهینه سازی و ساده تر شدن مدل سبب می شود که زمان فرایند بهینه سازی و هزینه ی طراحی آن کاهش یابد. به عنوان نمونه در پژوهش حاضر، دو مدل از پل کابلی ایستای لالی ساخته شد، که مدل اول آن یک مدل کامل و سه بعدی از پل و مدل دوم آن ترکیبی از دو مدل دو بعدی از عرشه و برج بوده است که کابلی در آن وجود نداشت. برای بهینه سازی سازه ی مذکور و محاسبه ی نیروی پیش کشیدگی کابل ها، هر یک از مدل ها ۴۰۰۰۰ بار تحلیل شدند. در مدل اول، برای هر تحلیل، ماتریس سختی ایجاد و وارون آن محاسبه شده است؛

پانویس ها

1. Martins
2. Wang
3. Zhang & Au
4. Chen
5. Fabbrocino
6. Janjic
7. Lee
8. Negrao
9. Simoes
10. Convex Scalar Function
11. Entropy-based
12. $P - \Delta$
13. Martins
14. Cantilever Balanced

15. Hassan
16. Genetic Algorithm
17. Guo
18. Simulated Annealing
19. Sun
20. Trust Region Algorithm
21. Feng
22. Song
23. Counterweight
24. Wang
25. MATLAB
26. Martins
27. PSO
28. Barrera
29. H. Sun

منابع (References)

1. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negrao, J.H.J.O. "Optimization of cable-stayed bridges: A literature survey", *Adv. Eng. Softw.*, **149**, p. 102829 (Nov. 2020). DOI:10.1016/J.advensoft.2020.102829.
2. Hassan, M.M. "Optimum design of cable-stayed bridges", Ph.D. Thesis, Western Ontario University (2010).
3. Wang, P.H., Tseng, T.C. and Yang, C.G. "Initial shape of cable-stayed bridges", *Comput. Struct.*, **47**(1), pp. 111-123 (Apr. 1993).
4. Kim, K.-S. and Lee, H.-S. "Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridge", *Comput. Struct.*, **79**(29-30), pp. 2681-2692 (Nov. 2001).
5. Zhang, J. and Au, F.T.K. "Calibration of initial cable forces in cable-stayed bridge based on kriging approach", *Finite Elem. Anal. Des.*, **92**, pp. 80-92 (Dec. 2014).
6. Chen, D.W., Au, F.T.K., Tham, L.G. and et al. "Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method", *Comput. Struct.*, **74**(1), pp. 1-9 (Jan. 2000).
7. Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I. and et al. "Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges", *Compos. Struct.*, **169**, pp. 167-172 (Jun. 2017).
8. Janjic, D., Pircher, M. and Pircher, H. "Optimization of cable tensioning in cable-stayed bridges", *J. Bridg. Eng.*, **8**(3), pp. 131-137 (May 2003).
9. Lee, T.Y., Kim, Y.H. and Kang, S.W. "Optimization of tensioning strategy for asymmetric cable-stayed bridge and its effect on construction process", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **35**(6), pp. 623-629 (2008).
10. Negrao, J.H.O. and Simoes, L.M.C. "Optimization of cable-stayed bridges with three-dimensional modelling", *Comput. Struct.*, **64**(1.4), pp. 741-758 (Jul. 1997).
11. Simoes, L.M.C. and Negrao, J.H.J.O. "Optimization of cable-stayed bridges with box-girder decks", *Adv. Eng. Softw.*, **31**(6), pp. 417-423 (Jun. 2000).
12. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negrao, J.H.J.O. "Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **51**(3), pp. 757-772 (Mar. 2015).
13. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negrao, J.H.J.O. "Optimum design of concrete cable-stayed bridges", *Eng. Optim.*, **48**(5), pp. 772-791 (May 2016).
14. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negrao, J.H.J.O. "Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities", *Comput. Struct.*, **155**, pp. 18-27 (Jul. 2015).
15. Hassan, M.M., Nassef, A.O. and El Damatty, A.A. "Determination of optimum post-tensioning cable forces of cable-stayed bridges", *Eng. Struct.*, **44**, pp. 248-259 (Nov. 2012).
16. Hassan, M.M. "Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique", *Eng. Struct.*, **49**, pp. 643-654 (Apr. 2013).
17. Guo, J., Yuan, W., Dang, X. and et al. "Cable force optimization of a curved cable-stayed bridge with combined simulated annealing method and cubic B-Spline interpolation curves", *Eng. Struct.*, **201**, p. 109813 (Dec. 2019).
18. Sun, H., Dou, Y.-Z. and Qian, Y.-J. "Optimal cable tension design for cable-stayed bridges on trust region algorithm", *International Conference on Transportation Engineering*, pp. 1826-1831 (2009).
19. Feng, Y., Lan, C., Briseghella, B. and et al. "Cable optimization of a cable-stayed bridge based on genetic algorithms and the influence matrix method", *Eng. Optim.*, **54**(1), pp. 20-39 (Jan. 2022).
20. Song, C., Xiao, R. and Sun, B. "Optimization of cable pre-tension forces in long-span cable-stayed bridges considering the counterweight", *Eng. Struct.*, **172**, pp. 919-928 (Oct. 2018).
21. Wang, Z., Zhang, N., Du, X. and et al. "Multiobjective optimization of cable forces and counterweights for universal cable-stayed bridges", *J. Adv. Transp.*, **2021**, pp. 1-13 (Jan. 2021).
22. Ju Y.-Zh., Liu, W.-Ch., Bai, J.-F. and et al. "Nonlinear static analysis of cable-stayed bridge", *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, pp. 2883-2886 (2010).
23. Xia, G.Y. and Cai, C.S. "Equivalent stiffness method for nonlinear analysis of stay cables", *Struct. Eng. Mech.*, **39**(5), pp. 661-667 (Sep. 2011).
24. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimization", *Studies in Computational Intelligence*, IEEE (1995).
25. Barrera, J., Alvarez Bajo, O., Flores, J.J. and et al. "Limiting the velocity in the particle swarm optimization Algorithm", *Comput. y Sist.*, **20**(4), pp. 635-645 (Dec. 2016).

* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش های اصلی و زیربخش ها، نتیجه گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه -- با احتساب شکل و نمودار -- باشد.

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

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون های ۸/۵ سانتی متری آراسته می شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی متر با ضخامت کادر Apx و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا پسوند JPG یا Tif امکان پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه های لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با فرمت جنرال (عدد معمولی) ارائه شود (طبق شکل های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه منابع مورد استفاده، شماره بندی (از شماره یک و به طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه ای (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

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

Journals:

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

Books:

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

Proceedings and reports:

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

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

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

راهنمای نگارش مقالات

مجله علمی

شریف

مجله علمی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه پژوهش های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه مجموعه ای مفید است. چاپ مقالات در مجله شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه های علمی و فنی بوده و در مجله دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می رسند.

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

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه ای دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته علمی و فنی باشند.

MODEL WITH A CASE STUDY OF LALI BRIDGE

M. Ravan

meysamravan@ut.ac.ir

A.R. Ghiami Azad(corresponding author)

rghiami@ut.ac.ir

School of Civil Engineering

University of Tehran

DOI:10.24200/J30.2022.60867.3128

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 125-132, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 15 August 2022; received in revised form 3 December 2022; accepted 10 December 2022.

Abstract

Cable-stayed bridges are bridges in which the deck is connected directly to the towers by diagonal cables. These bridges are mainly known by the length of the middle span, which often falls between the span lengths of suspension bridges and bridges without cables. They are also known for their light weight, beauty, and elegance. Cable-stayed bridges are highly indeterminate and are considered significant structures, which makes their optimization a major and costly challenge for de-

signers. The deflection and distribution of the bending moment on the deck and towers depend on the pre-tensioning force applied to the cables, making the calculation of tensile force in cables one of the most critical optimization parameters. Typically, cable pre-tensioning force is calculated through an optimization process that requires extensive analysis, which in turn requires a significant amount of time and computational power. This research aims to reduce the optimization process time by improving the analysis speed. Instead of analyzing a complete three-dimensional model of the structure, this research uses a separate two-dimensional model of the deck and tower without considering the cables. The Lali cable-stayed bridge located in Khuzestan, Iran, serves as the case study for this research. Results show that calculating tensile forces using this method induces an insignificant error compared to optimization using a complete model. The proposed model eliminates the repetitive process of updating the stiffness matrix, significantly reducing the time required to calculate cable pre-tensioning forces during the optimization process. Additionally, the proposed model produces negligible errors both in the optimization process and in the calculation of tensile forces in the cables compared to results obtained through three-dimensional modeling.

Key Words: Cable stayed bridge, optimization, particle swarm optimization algorithm, lali bridge, cable force.

Abstract

When a structure's fundamental period lengthens, often shear and floor acceleration increases. The contribution of higher modes in the dynamic response of structural systems with multiple degrees of freedom is significant in both the design of new structures and the evaluation of existing structures. Few research have looked at the impact of higher modes on base isolation systems in structures. To investigate the effects of higher modes on a building with a friction pendulum base isolation, a study was conducted on four different types of buildings: one with an L-shaped plan with two, four, and six floors; another eccentricities of buildings 5%, 10%, 15%, and 20%; and two others with a building with an L-shaped plan, where the second floor is half the mass of the first floor and next S shape plan. Eight layouts of the pendulum base isolation are considered for each building and their first mode, the second mode, and the mass participation rate of the first mode, the second mode, and higher modes are derived. Finally, in a linear time history analysis, the change in the maximum displacement of the base level is compared to the percentage of mass participation on the modes. The findings show that in four models, the percentage of first mode mass participation is decreased if the center of stiffness of the base isolation is aligned to the center of cumulative mass of the building, and the percentage of mass participation is increased in the second or third modes. The responses of the structure are thus determined by the second mode or higher modes. In general, the stiffness center of the base isolation must line up with the center of the base cumulative mass to produce the optimal design. And this pendulum base isolation layout's displacement of the base level is also reduced.

Key Words: High modes, mass participation ratio, center of stiffness of pendulum, center of the curvature radius of pendulum.

STUDY OF WETTING AND DRYING CYCLE EFFECT ON THE CLAYEY SANDY SOIL PERMEABILITY

N. Ghobadpour

neginghr@gmail.com

M. Hassanlourad (corresponding author)

hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

F. Kilanehei

kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Imam Khomeini International University

DOI:10.24200/J30.2023.61377.3167

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 115-124, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 14 November 2022; received in revised form 19 December 2022; accepted 1 January 2023.

Abstract

Drought and moisture reduction can weaken and crack soil structure, altering its shear strength and permeability. This paper investigates changes in permeability of clayey sandy soil undergoing drying and wetting cycles, which are often overlooked during the design and construction of earth structures such as embankments and dams. To conduct the investigation, a sandy soil called Firoozkooh sand No. 161 and a kaolinite clay soil were selected and mixed in varying ratios to produce soil samples. Two mixtures of sand and clay were prepared with 20% and 30% clay and 80% and 70% sand by weight, respectively. The sand used was poorly graded and the clay was low plastic. Test samples were created using the maximum dry unit weight and optimum moisture content obtained from standard compaction tests. Permeability tests were then conducted on the prepared samples in both drying and wetting directions using a common triaxial apparatus. In addition, some Scanning Electron Microscope (SEM) images were taken of the soil combinations. Results from the permeability tests revealed that the drying and wetting process initially has a significant effect on the water entrance to the sample due to soil cracking, and the soil permeability reduces over time as water passes through the soil and is absorbed by clay minerals, closing voids and cracks. Eventually, the permeability of all samples, including those that underwent drying and wetting, reached a relatively constant value, and seepage became stable. Moreover, the samples that underwent the drying and wetting processes showed higher permeability than the initial samples prepared with optimum moisture content. The test results also indicated that completely dried samples do not necessarily have the highest permeability. Furthermore, SEM images revealed that samples with 20% clay content had more voids compared to those with 30% clay.

Key Words: Soil permeability, clayey sand. drying, wetting.

OPTIMIZATION OF CABLE PRE-TENSIONING FORCE IN CABLE-STAYED BRIDGES BY SIMPLIFYING THE STRUCTURAL

results of water penetration depth, RCPT, and electrical resistivity tests, but increases water absorption and decreases UPV.

Key Words: Zeolite, roller-compacted concrete (RCC), construction joints (cold and warm joints), durability properties, mechanical properties.

MICRO-STRUCTURAL EVALUATION OF THE IMPACT OF CURING METHOD ON THE PROCESS OF CEMENT BASED STABILIZATION/SOLIDIFICATION OF PB ION-CONTAMINATED BENTONITE

V.R. Ouhadi(corresponding author)

vahidouhadi@yahoo.ca

Dept. of Civil Engineering
Bu-Ali Sina University
School of Civil Engineering
University of Tehran

B. Yousefi

behioyousefi@yahoo.com

R. Safadoust

reyhanehsafadoust@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering
Bu-Ali Sina University

DOI:10.24200/J30.2023.61334.3163

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 93-101, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 1 November 2022; received in revised form 21 December 2022; accepted 1 January 2023.

Abstract

Cement-based stabilization/solidification is a commonly used method to prevent the transportation of heavy metal ions in soils. The main objective of this paper is to investigate the controlling mechanisms in cement-based stabilization/solidification of Pb ion-contaminated bentonite under two different curing conditions: closed and open systems. In an open system, the stabilized/solidified sample continues to have access to free water, while in a closed system, the stabilized/solidified sample is prevented from accessing any external water after initial mixing. To achieve this objective, a series of geo-environmental experiments, including pH, solubility measurements, TCLP, and XRD, were performed. In the first step, the bentonite sample was contaminated with

100 cmol/kg-soil of lead nitrate. After achieving equilibrium, the contaminated sample was stabilized/solidified with 15% cement. The results indicate that when 15% cement is applied to the contaminated bentonite, the pH ranges from 10.5 to 11.5, which is a safe domain for lead precipitation. In other words, the minimum required percentage of cement for stabilization/solidification is the quantity in which the pH of the system is in the necessary range for heavy metal precipitation. This quantity is generally a function of the type and concentration of the heavy metal contaminant. According to the experimental results of this research, the method of curing does not have a noticeable impact on the stabilization process of stabilized/solidified contaminated bentonite. However, the XRD results show that more pozzolanic components have formed in the closed system. Therefore, the achievement of EPA criteria for TCLP experiments in cured samples in the closed system is attributed to the more significant progress in pozzolanic interaction and more formation of C-S-H and C-A-S-H components at 28 days for cured samples under closed conditions.

Key Words: Stabilization/Solidification, TCLP, XRD analysis, contaminated bentonite, cement.

HIGHER MODE EFFECTS ON FRICTION PENDULUM BASE ISOLATED ASYMMETRIC BUILDINGS

M. Amri

mehdi.amri@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering
Science and Research Branch
Islamic Azad University

A. S. Moghadam(corresponding author)

moghadam@iiees.ac.ir

International Institute of Earthquake
Engineering and Seismology

A. Aziminejad

arminaziminejad@srbiau.ac.ir

M.R. Mansoori

mman@srbiau.ac.ir

Dept. of Civil Engineering
Science and Research Branch
Islamic Azad University

DOI:10.24200/J30.2023.61073.3147

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 115-124, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 November 2022; received in revised form 4 March 2023; accepted 14 March 2023.

ANALYSIS OF BARRIERS TO IMPLEMENTING BIM IN AEC PRIVATE PROJECTS: AN IRANIAN APPROACH

H.R. Athari Nikooravan(corresponding author)

hamidathari@ut.ac.ir

M. Golabchi

golabchi@ut.ac.ir

Faculty of Architecture

University of Tehran

DOI:10.24200/J30.2022.61059.3146

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 69-80, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 October 2022; received in revised form 22 November 2022; accepted 13 December 2022.

Abstract

Building Information Modeling (BIM) plays a crucial role in managers' decision-making processes, as it has been proven to increase productivity, reduce costs, and improve the quality of construction projects. However, BIM implementation faces barriers in Iran and other parts of the world due to its novelty. This paper aims to analyze and identify these barriers in the Iranian AEC industry. A literature review identified 27 international barriers, which were categorized into four categories: Organizational/Cultural, Contractual, Legal, and Technical. Case studies of 28 private companies, including owners, consultants, and contractors, were conducted to identify 17 barriers to BIM implementation in Iran. Data was collected through document reviews, participation in meetings, semi-structured interviews, and direct observation, and then analyzed using N-Vivo. The barriers identified in the Iranian market had similarities and differences from those summarized in the literature review. Similar barriers included a lack of top management support, resistance to change, unwillingness to share data, lack of efficient workflows, lack of standard contractual frameworks, lack of interoperability of software, technical limitations in BIM software, lack of parametric objects library, and time and expenditure of model development. Seven new barriers were identified, including failure to complete tasks by other professional task groups, high salary expectations of BIM professionals, non-compliance with BIM Execution Plans (BEP), low value of incentives/penalties, difficulty in measuring work progress in BIM services, lack of efficient Common Data Environments (CDE), and internet connectivity issues. The identification and categorization of barriers is an essential step toward removing them and improving the implementation of BIM in projects.

Key Words: Building information modelling, barriers, case study.

REDUCING THE NEGATIVE EFFECTS OF CONSTRUCTION JOINTS IN ROLLER COMPACTED MASS CONCRETE STRUCTURES USING ZEOLITE

A. Sarafi

ali.sarafi@ut.ac.ir

A.M. Ramezaniapour

ramezaniapour@ut.ac.ir

S.M. Zahrai(corresponding author)

mzahrai@ut.ac.ir

School of Civil Engineering

University of Tehran

DOI:10.24200/J30.2023.61237.3157

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 81-91, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 12 October 2022; received in revised form 16 January 2023; accepted 21 January 2023.

Abstract

Roller compacted concrete is a dry, hard concrete with zero slump, typically used in mass concrete structures where casting is done in stages with time intervals between each stage. However, the formation of joints in these concretes increases the penetration of destructive ions, leading to eventual failure and instability of mass concrete structures. This study aims to evaluate the impact of replacing part of cement with zeolite in reducing the destructive effects of joint formation in roller compacted concrete structural members.

Samples were made with hot, warm, and cold joints, with zeolite replacing cement at percentages of 0, 15%, 30%, and 40%. Results showed that at 15% replacement percentage, samples had the highest compressive strength, so roller compacted concrete samples were made with 15% zeolite to test for Rapid Chloride Permeability Test (RCPT), water penetration depth, water absorption, ultrasonic pulse velocity (UPV), and electrical resistivity. The tests showed that replacing 15% of the cement weight with zeolite improves compressive strength in warm joint areas and reduces destructive effects of warm and cold joints on durability properties. The electrical resistivity test revealed that replacing 15% of cement with zeolite significantly reduces the permeability of specimens. Zeolite also reduces the permeability of roller compacted concrete specimens based on the

to enact laws restricting carbon dioxide emissions. Traditionally, the use of Portland cement is a typical approach to increasing the bearing capacity, minimizing settlement, and improving seismic behavior of problematic soils. However, the cement industry's high energy consumption, uncontrollable emission of greenhouse gases, large carbon footprint, further depletion of natural resources, and high cost have become enormous challenges for all countries. Therefore, researchers continually seek new materials to replace ordinary Portland cement, contributing towards sustainable development. In this regard, the use of environmentally friendly, cheap, and readily available additives in modern soil methods of the construction cycle, particularly soil stabilization, is crucial. Geopolymer materials have recently emerged as serious alternatives to cement. This study aims to investigate the innovative reuse of eggshells through the geopolymerization process for engineering improvement of clayey soil. Alkali-activated binders are inorganic polymers that form repeated polymeric chains by polymerizing alumina and silica, sharing all oxygen atoms and using the alkaline cation. The combination of sodium hydroxide and sodium silicate was used as an alkaline activator in this study. The unconfined compressive strength (UCS) was the primary criterion for assessing the quality and effectiveness of the proposed solutions. This test was performed on selected combinations to assess the strength of the stabilized clay with different binder dosages and after different curing times. Moreover, the direct shear test was used to study the Mohr-Coulomb criteria parameters of the stabilized soil, namely the cohesion and angle of internal friction. Scanning Electron Microscope (SEM) microstructure observations of the natural and treated soil were conducted to investigate the strength development. The results showed that using 5, 7.5, 10, and 12.5% eggshell by dry weight activated by sodium hydroxide increases the UCS to 1.24 MPa, 1.21 MPa, 1.18 MPa, and 849 kPa, respectively, after 45 days of curing. The microstructural analysis results highlighted the reaction between the eggshell and the alkaline activator, resulting in the formation of an aluminosilicate gel.

Key Words: Clay, soil stabilization, geopolymer.

TREATMENT OF TARTERAZINE DYE WASTEWATER BY A COLD ATMOSPHERIC PLASMA PROCESS

M. Khojasteh

masoudkhojaste1374@gmail.com

M. Delnavaz (corresponding author)

delnavaz@khu.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Engineering Faculty

Kharazmi University

H. Mehdian

mahdian@khu.ac.ir

Dept. of Physics and Institute for Plasma

Research, Physics Faculty

Kharazmi University

DOI:10.24200/J30.2022.61048.3141

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 59-68, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 September 2022; received in revised form 12 December 2022; accepted 18 December 2022.

Abstract

Plasma is a subgroup of advanced oxidation technology (AOP) that has received considerable attention. It is currently being used to degrade persistent pollutants and inactivate organisms in environmental bodies. The objective of the present study is to decolorize tartrazine aqueous dye solution using cold atmospheric plasma technology. The main parameters selected for the study were initial dye concentration (4-20 mg/L), pH of the solution (2.2-9), input AC voltage (70-110), treatment time (10-30 minutes), and the electrode distance, which was kept at 8 mm throughout the experiment. The primary parameters investigated through the optimization tool of response surface methodology (RSM) software were color concentration, solution pH (2.2-9.4), power supply voltage (70-110 V), and detention time (10-30 minutes). The experimental reactor had a capacity of 15 ml. The color removal study of the plasma process showed that the optimal condition occurred at an initial concentration of 14 mg/L, voltage of 86 V, pH = 4.1, and plasma irradiation time of 18.7 minutes, resulting in a color removal percentage of 99.78%. According to half-life and efficiency yield calculations, the process was suitable for application in water pollution decontamination, with the lowest half-life achieved at the optimum condition (1.18) and the highest efficiency yield (108.3 mg/Kwh). The results extracted from the quadratic model illustrate the direct effect of retention time and initial voltage and the inverse effect of pH and initial concentration of industrial dye on the removal efficiency. The contact time had the major influence on efficiency via its coefficient in the model equation, while among interactive parameters, pH and contact time had the most interactive influence on the process. The reaction rate could also be described by the first-order kinetic model with an R² value of over 95%.

Key Words: Cold plasma, optimization, tartrazine, dye removal percentage, yield energy.

and impact loads. Initially, a target mix scheme is determined, and samples are made and tested after curing without the addition of Bagasse and LECA. Then, samples are made with the mentioned mixing design and the combination of Bagasse and LECA by weight ratio of (Bagasse unit, LECA unit). Additionally, samples using LECA (without Bagasse) with 10%, 20%, and 30% replacement of aggregates are made and tested after curing. Compressive and impact tests are performed on all samples in accordance with regulations using appropriate testing machines and procedures. Results indicate that concrete containing lightweight LECA and Bagasse fibers has a higher impact resistance than ordinary concrete, and that the use of LECA in concrete can create structural lightweight concrete.

Key Words: Impact resistance, compressive strength, bagasse, LECA, lightweight concrete.

DAMAGE DETECTION OF STEEL STRUCTURES THROUGH FEM UPDATING BASED ON STRAIN DATA

N. Fallah

nfallah@stu.qom.ac.ir

S.R. Hoseini Vaez (corresponding author)

hoseinivaez@qom.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

University of Qom

A. Esfandiari

a_esfandiari@aut.ac.ir

Dept. of Marine Engineering

Amirkabir University of Technology

DOI:10.24200/J30.2023.61055.3144

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 39-49, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 5 September 2022; received in revised form 5 January 2023; accepted 21 January 2023.

Abstract

This article proposes a new approach for identifying damage in structures through model updating. The approach is based on principal component analysis (PCA) of strain-based power spectral density (PSD) data. The proposed method detects damage, identifies damage location, and quantifies damage severity using an innovative sensitivity equation of strain-based data on a least square optimization. The data is obtained from incomplete measured structural responses, and the approach utilizes frequency domain data where changes in stiffness matrix of elements model damage. One of the cru-

cial components for successful model updating is evaluating an accurate sensitivity relation. Highly sensitive structural indices such as PSD data require a valid sensitivity relation to yield satisfactory results. The PCA technique provides an advantage by transforming PSD data to PCs with the most significant changes and ignoring PCs that correspond to low changes caused by measurement errors. The presented approach embeds the PCA of incomplete PSD data and measured strain data for a damaged structure into a mathematical formulation to obtain an appropriate sensitivity equation. To prevent weakening the sensitivity equation, the proposed formulation does not employ derivatives of the PCs. The proposed method is applied to two steel structures, a 2-D truss and a 2-D two-story two-bay frame, to demonstrate its performance as a strong damage identification algorithm, even in the presence of measurement errors. Comparative observations indicate that the results obtained by the provided sensitivity equation and strain-based PSD data are more appropriate than the results of other strain-based methods such as PCA-FRF or using only PSD data.

Key Words: Damage identification, model updating, strain data, principal components analysis, SVD (singular value decomposition), and power spectral density.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELEMENTS IN INDUSTRIAL WASTES USED IN CLAY STABILIZATION BY GEOPOLYMER METHOD

A. Vasigh

ati.vgh@gmail.com

D. Moazami (corresponding author)

d_moazami@mshdiau.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Mashhad Branch, Islamic Azad University

SH. Pourakbar

pourakbar@binaloud.ac.ir

Faculty of Engineering

Binaloud University

DOI:10.24200/J30.2023.59981.3092

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 51-57, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 7 September 2022; received in revised form 26 December 2022; accepted 29 January 2023.

Abstract

Climate change and global warming pose significant threats to life on earth, leading governments worldwide

and the angle of bents to maintain stable hysteresis loops with respect to the target drift of the CHD.

Key Words: Metallic yielding damper, honeycomb geometry, non-linear analysis, cyclic behavior, finite element method.

COMPARISON OF FLEXURAL BEHAVIOR AND CRACKING PATTERN OF RC AND SFRC BEAMS REINFORCED WITH MINIMUM AND MAXIMUM LONGITUDINAL TENSILE BARS

H. Hasanzade

hamidhasanzadeh3020@gmail.com

M.K. Sharbatdar(corresponding author)

msharbatdar@semnan.ac.ir

Faculty of Civil Engineering

Semnan University

DOI:10.24200/J30.2022.60932.3131

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 15-27, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 29 August 2022; received in revised form 1 December 2022; accepted 11 December 2022.

Abstract

The flexural performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) is significantly influenced by fiber properties such as fiber quality, shape, aspect ratio, orientation, and distribution. Digital image processing is an optical and non-contact measurement method that can determine the extent of sample size and deformation under any loading conditions. In this paper, eight reinforced concrete beams with and without steel fibers were selected, including four separate groups containing different volumetric percentages of steel fibers, designed and loaded with four-point bending test in accordance with the rules of ACI 318-19 design regulations. The first group consisted of two ordinary concrete beams as reference samples and six other concrete beams reinforced with steel fiber with a percentage of 0.5, 1.0, and 1.5%. Different longitudinal reinforcements (one state of minimum reinforcement and one state of maximum reinforcement in accordance with the provisions of the design regulations) were examined and analyzed in these specimens. Strain gauges were installed on the longitudinal bars to measure the strain during the loading process. Experimental results showed that the loads, flexural strength, ductility, and energy absorption of fiber-reinforced concrete beams were improved compared to

similar conventional concrete beams. The highest ductility ratio among the samples made with tensile reinforcement was observed in the beam with a minimum longitudinal bar and 1.0% of fibers. The ductility of this sample was 30% higher than the similar non-fibrous sample with minimum longitudinal tensile reinforcement. The results showed that the ratio of ductility of the sample with maximum tensile reinforcement was decreased up to 46% compared to the companion beam with minimum tensile reinforcement. Significant increases in flexural strength, equal to 16, 23, and 29%, respectively, were observed in beams with minimum tensile reinforcement and containing steel fibers 0.5, 1.0, and 1.5%.

Key Words: Steel fibers, ductility, flexural strength, fiber concrete, energy absorption, minimum tensile reinforcement.

LABORATORY STUDY OF IMPACT EFFECTS ON LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING BAGASSE AND LECA

A.R. Khaloo

khaloo@sharif.edu

Dept. of Civil Engineering

Sharif University of Technology

S.A. Borsi(corresponding author)

borsi_sa@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering

University of Applied Science and Technology

DOI:10.24200/J30.2023.61026.3140

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 29-38, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 5 September 2022; received in revised form 17 December 2022; accepted 18 January 2023.

Abstract

Concrete quality control tests usually focus on the compressive strength of concrete, while neglecting other important properties such as impact and explosion resistance, which are essential for creating resilient concrete structures. Additionally, in the process of refining sugarcane, Bagasse, a yellow fiber that is considered a waste product, is produced. Khuzestan province alone produces around one million tons of Bagasse annually, which leads to environmental concerns. To address these issues, this research investigates the mechanical properties and impact resistance of concrete containing lightweight LECA aggregates and Bagasse fibers under compressive

Abstracts of Papers in English

NUMERICAL STUDY OF CORRUGATED HONEYCOMB DAMPERS

A.R. Moazezi Mehretehran(corresponding author)

a.moazezi@sharif.edu

M. Jafary

m.jafary@sharif.edu

Dept. of Civil Engineering

Sharif University of Technology

DOI:10.24200/J30.2022.60894.3130

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 39, Issue 2, Page 3-13, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 15 August 2022; received in revised form 31 October 2022; accepted 10 December 2022.

Abstract

In this study, a new metallic damper, the Corrugated Honeycomb Damper (CHD), is presented. The CHD is designed for ease of manufacturing and implementation in various structures, with a stable energy dissipation characteristic when subjected to lateral loading. The basic configuration of the CHD consists of

two steel plates that are bent to form trapezoidal corrugations. The plates are then welded together along the bent lines to build the honeycomb geometry. To investigate the behavior of the CHD, a closed-form expression for the elastic stiffness was first obtained using the matrix analysis method. A verified numerical model was then developed in ABAQUS software to study the non-linear behavior of the CHD, considering both material and geometric non-linearity as well as the potential for ductile steel damage. A comprehensive parametric study was performed, analyzing 12 CHDs with different geometric characteristics, and evaluating both monotonic and cyclic responses. Force-displacement and cumulative dissipated energy curves were extracted, and relevant elaborations were presented. Additionally, the equivalent stiffness and equivalent damping of the CHDs during cyclic loading were calculated, taking into account the principles of dynamics of structures. The results demonstrated that the CHD has stable and symmetric dissipative loops of energy, and that increasing the depth and thickness of the CHD can enhance its energy absorbing and load bearing capacities. Minimizing the width of the damper can fatten the hysteresis loops, but may also affect the ductility of the damper. Recommendations were given for the total height of the damper

Civil Engineering

The logo for Sharif University of Technology, featuring the word "Sharif" in a bold, stylized, black font.

Summer
2023

Editor-in-Chief: Mirmosadegh Jamali

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, “**Sharif**” publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN

Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983

Web: <http://journal.sharif.ir/> [http:// www. globalsciencejournals.com](http://www.globalsciencejournals.com)

E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

- 3 **NUMERICAL STUDY OF CORRUGATED HONEYCOMB DAMPERS**
A.R. Moazezi Mehretehran and M. Jafary
- 15 **COMPARISON OF FLEXURAL BEHAVIOR AND CRACKING PATTERN OF RC AND SFRC BEAMS REINFORCED WITH MINIMUM AND MAXIMUM LONGITUDINAL TENSILE BARS**
H. Hasanzade and M.K. Sharbatdar
- 29 **LABORATORY STUDY OF IMPACT EFFECTS ON LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING BAGASSE AND LECA**
A.R. Khaloo and S.A. Borsi
- 39 **DAMAGE DETECTION OF STEEL STRUCTURES THROUGH FEM UPDATING BASED ON STRAIN DATA**
N. Fallah, S.R. Hoseini Vaez and A. Esfandiari
- 51 **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELEMENTS IN INDUSTRIAL WASTES USED IN CLAY STABILIZATION BY GEOPOLYMER METHOD**
A. Vasigh, D. Moazami and SH. Pourakbar
- 59 **TREATMENT OF TARTERAZINE DYE WASTEWATER BY A COLD ATMOSPHERIC PLASMA PROCESS**
M. Khojasteh, M. Delnavaz and H. Mehdian
- 69 **ANALYSIS OF BARRIERS TO IMPLEMENTING BIM IN AEC PRIVATE PROJECTS: AN IRANIAN APPROACH**
H.R. Athari Nikooravan and M. Golabchi
- 81 **REDUCING THE NEGATIVE EFFECTS OF CONSTRUCTION JOINTS IN ROLLER COMPACTED MASS CONCRETE STRUCTURES USING ZEOLITE**
A. Sarafi, A.M. Ramezaniapour and S.M. Zahrai
- 93 **MICRO-STRUCTURAL EVALUATION OF THE IMPACT OF CURING METHOD ON THE PROCESS OF CEMENT BASED STABILIZATION/SOLIDIFICATION OF PB ION-CONTAMINATED BENTONITE**
V.R. Ouhadi, B. Yousefi and R. Safadoust
- 103 **HIGHER MODE EFFECTS ON FRICTION PENDULUM BASE ISOLATED ASYMMETRIC BUILDINGS**
M. Amri, A. S. Moghadam, A. Aziminejad and M.R. Mansoori
- 115 **STUDY OF WETTING AND DRYING CYCLE EFFECT ON THE CLAYEY SANDY SOIL PERMEABILITY**
N. Ghobadpour, M. Hassanlourad and F. Kilanehei

RESEARCH NOTE:

- 125 **OPTIMIZATION OF CABLE PRE-TENSIONING FORCE IN CABLE-STAYED BRIDGES BY SIMPLIFYING THE STRUCTURAL MODEL WITH A CASE STUDY OF LALI BRIDGE**
M. Ravan and A.R. Ghiami Azad

APPENDIX

- 141 **ABSTRACTS OF PAPERS IN ENGLISH**