

ارائه طرح ملات ترمیمی کارآمد حاوی میکروسیلیس و الیاف ترکیبی با ارزیابی مقاومت فشاری و خمشی

سینا اسداللهی شاه‌بابلی¹، محمدرضا عالمیان²، مهدی دهستانی^{3*}

¹ دستیار پژوهشی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

² دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

³ استاد و عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

(دریافت: 00/00/00، پذیرش: 00/00/00، نشر آنلاین: 00/00/00)

چکیده

بسیاری از سازه‌های بتنی موجود در جهان به پایان عمر طراحی خود رسیده‌اند و یا تحت بارهای مختلف دچار خرابی‌های متعددی شده‌اند. بنابراین، تقویت و ترمیم این سازه‌ها برای جلوگیری از بازسازی‌های پرهزینه و یا ساخت مجدد سازه‌ها حیاتی است. به منظور ترمیم و مقاومسازی سطوح، بهبود عملکرد سازه‌های آسیب‌دیده و افزایش عمر بهره‌برداری سازه‌های بتنی از ملات ترمیمی استفاده می‌شود. در این تحقیق با بهره‌گیری از روش طرح آزمایشگاهی تاگوچی، طرح اختلاط‌های مختلفی برای ملات ترمیمی حاوی الیاف‌های ترکیبی، میکروسیلیس و چسب لاتکس در نسبت‌های مختلف آب به ماده سیمانی و ماده سیمانی به ماسه در نظر گرفته شده است. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی مقاومت فشاری و خمشی یک ملات ترمیمی کارآمد حاوی میکروسیلیس و الیاف ترکیبی است. براساس نتایج بدست آمده مشاهده شد کارآمدترین مقاومت خمشی و فشاری ملات ترمیمی زمانی بدست می‌آید که طرح حاوی 10 درصد مقدار میکروسیلیس و دو نوع الیاف فولادی و غیرفولادی (الیاف شیشه‌ای و یا پلی‌استر) با درصدهای متوسط باشد. نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های خمشی به خوبی نشان داد که با پل‌زدن ترکیبی الیاف‌ها مقاومت به طور قابل قبولی افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: ملات ترمیمی؛ کارآمدی؛ مقاومت فشاری؛ مقاومت خمشی؛ الگوریتم تاگوچی.

1- مقدمه

انجام داد (Hu و همکاران، 2020؛ Julio و همکاران، 2004). در بسیاری از پروژه‌های مهندسی سازه مانند بتن‌ریزی غیرپیوسته، ترمیم و مقاومسازی سازه‌ها از ملات به عنوان لایه‌های روکش و یا لایه ترمیمی بر روی سطوح المان‌های بتنی آسیب‌دیده استفاده می‌گردد.

استفاده از لایه روکش مناسب (ملات ترمیمی) برای اتصال به بتن قدیمی (بتن بستر) در سیستم‌های ترمیم و مقاومسازی حائز اهمیت است، چراکه ناحیه اتصال² میان ملات ترمیمی و بتن بستر به طور قابل توجهی ضعیف‌ترین ناحیه در نظر گرفته می‌شود (Julio و همکاران، 2004) و مقاومت چسبندگی آن همواره تحت تأثیر پارامترهایی چون کیفیت و خصوصیات ملات ترمیمی، زبری سطح بتن بستر، ریزترک‌ها، حالت تنش موجود در ناحیه اتصال، آماده‌سازی ناحیه اتصال، میزان مقاومت بتن بستر و ملات ترمیمی،

بتن سیمانی به سبب ویژگی‌هایی همچون سهولت ساخت، هزینه کم و مقاومت و سختی بالا به‌طور گسترده در حوزه مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال هموار تحت اثر عواملی مانند بارگذاری، نشست غیریکنواخت و تغییرات دمایی مستعد ترک خوردن است. با افزایش عمر بهره‌برداری و افزایش عرض ترک‌ها، نفوذ عوامل محیطی به درون بتن می‌تواند باعث آسیب بیشتر و در نتیجه کاهش عمر سازه‌های بتنی شود (Bogas و همکاران، 2019). از این‌رو، به منظور تأمین ایمنی و قابلیت سرویس سازه‌های در حال تخریب یا آسیب دیده از روش ترمیم و مقاومسازی استفاده می‌شود. مقاومسازی سازه‌های بتنی قدیمی و یا سازه‌های آسیب دیده را می‌توان با افزودن لایه‌های روکش¹ به عنوان پوشش بتنی و جایگزینی آن با بتن آسیب دیده و فرسوده

² Bond region

¹ Overlays

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 011-32331707.

آدرس ایمیل: sina.asdlihi@gmail.com (س. اسداللهی شاه‌بابلی)، mreza.alamian@gmail.com (م.ر. عالمیان)، dehestani@nit.ac.ir (م. دهستانی).

سیمان برای به حداقل رساندن منافذ موبینگی (Chetty و همکاران، 2022)، اثر استفاده از لاتکس در ملات ترمیمی (نعمتی چاری و همکاران، 2018) و یا استفاده از الیاف فولادی در مخلوط ملات سیمان برای بهبود مقاومت خمشی و کششی (Feng و همکاران، 2018) پیشنهاد شده است. بسیاری از محققان ویژگی‌های مختلف الیاف در بتن یا ملات‌های سیمانی را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج تحقیقات نشان داد استفاده از انواع مختلف الیاف به طور قابل توجهی خصوصیات سازه‌ای مانند مقاومت خمشی و کششی و شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشد (Mohammadi و همکاران، 2008؛ Shah و Naaman، 1976). طوری که مقاومت کششی و یا خمشی ملات تقویت‌شده با الیاف فولادی حداقل دو تا سه برابر بیشتر از ملات معمولی بدست آمد. همچنین تغییرشکلی بیش از 10 برابر تغییرشکل ملات معمولی از خود نشان دادند. سهم الیاف‌ها را می‌توان پس از ترک‌های خمیر سیمان در بتن و یا ملات مشاهده نمود که از انتشار ترک‌ها جلوگیری می‌کنند (Babut و Stroeven، 1986).

اگرچه الیاف فولادی نسبت به الیاف‌های دیگر بدلیل سختی بیشتر عملکرد مکانیکی بهتری دارد (Mu و همکاران، 2017)، اما استفاده از آن در مقدار بالاتر به دلیل فشردگی نامناسب و سختی بالا کارایی بتن یا ملات را کاهش و هزینه ساخت آن را افزایش می‌دهد (Ramli و Dawood، 2011). از این‌رو، برای افزایش کارایی یا قابلیت روانی بهتر ملات و دستیابی به عملکرد کارآمد، می‌توان از دو یا سه نوع الیاف مختلف استفاده نمود (Yao و همکاران، 2003). الیاف‌های انعطاف‌پذیر مانند الیاف‌های مصنوعی در مقایسه با الیاف‌های فولادی سختی کمتر دارند و تقریباً همانند الیاف فولادی از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کنند. این الیاف‌ها را می‌توان در نسبت‌های حجمی مختلف استفاده نمود (Sahmaran و همکاران، 2005؛ Sivakumar و Santhanam، 2007). از این‌رو، ترکیب الیاف فولادی و غیرفولادی می‌تواند باعث کاهش هزینه تولید گردد و از طرفی ترکیب مدول بالا و پایین آن‌ها سبب افزایش خصوصیات بتن و یا ملات شود (Bentur و Mindess، 2006). Feng و همکاران (2020) اثرات سختی الیاف را بر روی مقاومت چسبندگی میان ملات ترمیمی و بتن بستر بررسی کردند. الیاف فولاد و کربن تفاوت قابل توجهی در سختی داشتند طوری که به ترتیب نقش الیاف صلب و انعطاف‌پذیر را در ملات ترمیمی ایفا کردند. از این‌رو، الیاف فولادی حالت اولیه خود را در اختلاط تازه حفظ نمود، در حالی که الیاف کربن دچار کماتش و تغییرشکل شد. نتایج تحقیق نشان داد که اثر هم افزایی الیاف کربن و فولاد پتانسیل اثر پل زدن⁴ الیاف فولادی را ارتقاء داد

رطوبت و سن بتن بستر و کارایی ملات ترمیمی است (Daneshvar و همکاران، 2022؛ Feng و همکاران، 2022؛ Liu، Xiao، Feng، 2021 و همکاران، 2021؛ Ma، Xiao، Feng، 2021؛ Santos و Júlio، 2013). برای آن‌که ناحیه اتصال ملات ترمیمی با سطح المان‌های بتنی موجود سازگاری داشته باشد و تفاوت ناشی از ناهمگنی در آن به وجود نیاید، ضمن در نظر داشتن مقاومت باید کارایی آن به طور مناسبی تأمین گردد. بدین ترتیب، ملات ترمیمی به طور یکنواخت و با پیوستگی مناسب بر روی سطوح بتن قرار می‌گیرند و به تقویت سازه‌ها و ترمیم ترک‌های آن کمک می‌کند. عملکرد یکپارچه سازه‌های تقویت‌شده از اتصال مناسب ملات ترمیمی با سطوح بتن و عملکرد ترکیبی آن‌ها ایجاد می‌شود که در صورت وجود ضعف در پیوستگی اتصال می‌تواند سبب انتقال نامناسب تنش و جدا شدن زود هنگام ملات ترمیمی از سطح بتن گردد. بر اساس مطالعات گذشته، بخش قابل ملاحظه‌ای از عملیات ترمیمی سازه‌ها منجر به شکست شده است (Warner و Mather، 2003). افزایش احتمال شکست در عملیات ترمیم به مواردی چون مصالح نامناسب، روش ترمیم نامناسب و یا ترکیبی از هر دو اطلاق می‌شود (Júlio و همکاران، 2006).

به همین سبب در مطالعات گذشته، محققان برای عملیات ترمیم از مواد تقویت شده به عنوان مواد سیمانی برای ارتقاء عملکرد ملات ترمیمی استفاده نمودند (Rashid و همکاران، 2020؛ Wang و Gupta، 2021). مواد سیمانی بکار گرفته شده به سه دسته مواد مبتنی بر سیمان، مواد مبتنی بر سیمان اصلاح شده با پلیمر، و مواد رزین یا پلیمر تقسیم‌بندی شدند (Guo و همکاران، 2018). به سبب ادغام پلیمر و محصولات هیدراتاسیون سیمان، مواد مبتنی بر سیمان اصلاح شده با پلیمر ضمن کاهش تخلخل در ناحیه انتقال³ با پر کردن منافذ موبینه، منجر به افزایش خصوصیات مقاومتی نظیر خمشی، کششی و چسبندگی (Alanazi و همکاران، 2016؛ Momayez و همکاران، 2005؛ Rashid و همکاران، 2020؛ Rashid و همکاران، 2019) و خصوصیات دوامی مانند مقاومت شیمیایی (Ohama، 1980؛ Vincke و همکاران، 2002) می‌شوند. مواد رزینی یا پلیمری نیز می‌توانند به ترمیم سریع و مؤثر بتن بستر دست یابند (Júlio و همکاران، 2005). با توجه به مقاومت چسبندگی مناسب و هزینه پایین مواد مبتنی بر سیمان، آن‌ها اغلب به سبب وجود ریز منافذ و مقاومت خمشی و کششی پایین‌تر منجر به شکست ناحیه اتصال می‌شوند (Algaifi و همکاران، 2021؛ Guo و همکاران، 2018؛ Ramli و Akhavan و Tabassi، 2012؛ Rashid و همکاران، 2020). از این‌رو، در ادبیات فنی استفاده از رویکردهای مختلفی مانند کاهش نسبت آب به

³ OTZ

⁴ Dowel effect

سطح طراحی (4 مقدار مختلف) و 16 طرح اختلاط تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که طرح اختلاط کارآمد منجر به بالاترین مقاومت فشاری در بین همه طرح اختلاطها شده است. کارآمدسازی مقاومت فشاری طرح اختلاط منجر به جایگزینی سیمان با مقدار 20 درصد پودر سنگ آهک، 20 درصد خاکستر بادی، 20 درصد سرباره و 4 درصد نانوسیلیس گردید.

همان‌طور که در مطالعات گذشته بررسی شد، برای ارتقاء عملکرد مکانیکی ملات ترمیمی در عملیات ترمیم و مقاوم‌سازی از رویکردهای مختلفی استفاده می‌شود. برای در نظر گرفتن پارامترهای مختلف به منظور دستیابی به ملات ترمیمی با مشخصات مکانیکی کارآمد، لازم است تا از یک الگوریتم طراحی استفاده گردد. در تحقیق حاضر، با بهره‌گیری از روش طرح آزمایشگاهی تاگوچی، طرح اختلاطهای مختلفی برای ملات ترمیمی حاوی الیاف‌های ترکیبی، میکروسیلیس و چسب لاتکس در نسبت‌های مختلف آب به ماده سیمانی و ماده سیمانی به ماسه در نظر گرفته شده است. هدف آن است تا با بررسی نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از الگوریتم تاگوچی به مقاومت فشاری و خمشی کارآمد و مناسب برای ساخت ملات ترمیمی دست یافت.

2- برنامه آزمایشگاهی

2-1- مصالح مصرفی

در این پژوهش، علاوه بر اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده ملات، از افزودنی میکروسیلیس و چسب لاتکس و از الیاف‌های فولادی، شیشه‌ای و پلی‌استر استفاده گردیده است. میکروسیلیس و چسب لاتکس بر اساس در صدی از وزن سیمان و الیافها بر اساس درصدی از حجم ملات در نظر گرفته شدند. طول الیاف‌های فولادی، پلی‌استر، و شیشه‌ای به ترتیب برابر 16، 6، و 12 میلی‌متر و قطر آنها به ترتیب برابر 0/25 میلی‌متر، 10، و 12 میکرومتر می‌باشد. جذب آب سنگدانه‌های ریز (ماسه) براساس استاندارد (ASTM C128-07) برابر 1/2 درصد بدست آمد. منحنی دانه‌بندی ماسه براساس استاندارد (ASTM C136-06) محاسبه گردید که در شکل 1 نشان داده شده است. در این مطالعه، از چسب لاتکس که از رزین‌های آکریلات ساخته و سبب افزایش چسبندگی و نفوذناپذیری بتن در برابر آب می‌شوند، به عنوان چسب اتصال بتن و ملات استفاده شده است. برای مطالعه حاضر، از سیمان تیپ 2 کارخانه فراز فیروزکوه استفاده شده است. از فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات برای بدست آوردن کارایی مناسب در بازه 200-220 میلی‌متر استفاده شد.

طوری‌که در نسبت آب به سیمان 0/35 ظرفیت بارگذاری و مقاومت خمشی ملات ترمیمی بیشتر افزایش یافت. Dawood و Ramli (2011) ملات تقویت شده با مقاومت بالا با الیاف هیبریدی متشکل از الیاف فولادی، الیاف نخل⁵ و الیاف مصنوعی⁶ را مورد بررسی قرار دادند. میزان استفاده از الیاف در این تحقیق به 2 درصد حجمی محدود شد. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف هیبریدی با مقدار 1/5 درصد الیاف فولادی، 0/25 درصد الیاف نخل و 0/25 درصد الیاف مصنوعی، به دلیل بهبود پیوند مکانیکی در خمیر سیمان، مقاومت فشاری، خمشی و کششی و همچنین سختی خمشی ملات را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشید. این ترکیب به عنوان بهترین و کارآمدترین طرح معرفی شد. حجازی و همکاران (2017) تأثیر استفاده از پنج نوع الیاف (فولاد صنعتی و ضایعاتی، شیشه، پلی‌پروپیلن و کاه) را به صورت تک و ترکیبی بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن سبک مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه‌های دارای ترکیب دوگانه، عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند. از ترکیب الیاف فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن بیشترین مقاومت فشاری و از ترکیب الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن بیشترین مقاومت کششی و خمشی حاصل شده است.

برای استفاده از الیاف‌های مختلف با درصدهای متفاوت و همچنین در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای دیگر بر عملکرد ملات مانند نسبت‌های مختلف آب به ماده سیمانی، ماده سیمانی به ماسه و استفاده از موادی همچون میکروسیلیس در جایگزینی بخشی از سیمان، روش یا الگوریتمی لازم است تا با بکارگیری طرح اختلاطهای مختلف شامل پارامترهای گوناگون به کارآمدترین مشخصات مکانیکی ملات دست یافت. برای این منظور، می‌توان از الگوریتم‌های مختلفی مانند الگوریتم ژنتیک⁷، منطق فازی⁸ و الگوریتم تاگوچی برای کنترل کیفیت محصول آزمایش استفاده نمود. با در اختیار داشتن طرح اختلاطهای آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از آزمایش می‌توان به راحتی به طرح کارآمد دست یافت. یکی از راه‌های شناخته شده برای یافتن طرح کارآمد آزمایشگاهی استفاده از الگوریتم تاگوچی می‌باشد که در مطالعات متعددی از آن استفاده شده است (Ghani و همکاران، 2004؛ Keleştemur و همکاران، 2014؛ Narong و همکاران، 2018؛ Zahedi و Dehestani، 2022). در مطالعه تیمورتاشلو، دهستانی و جلال (2018) برای طرح اختلاط ملات خودتراکم به منظور کارآمدسازی مقاومت فشاری آن از روش تاگوچی استفاده گردید. در این آزمایش سه عامل خاکستر بادی، سرباره و نانوسیلیس برای جایگزینی جزئی سیمان پرتلند در 4

⁷ Genetic algorithm

⁸ Fuzzy logic

⁵ Palm fiber

⁶ Barchip

استاندارد قالب‌گیری نمونه‌ها، این کار حداکثر طی مدت 2 دقیقه و 30 ثانیه پس از تکمیل اختلاط ملات صورت گرفت. پس از 24 ساعت، نمونه‌های سخت‌شده ملات از قالب‌ها خارج و درون محفظه آب گذاشته شدند. نمونه‌ها به مدت 28 روز جهت نگهداری و عمل‌آوری درون محفظه آب قرار گرفتند.

جدول 1- طرح اختلاط نمونه‌های ملات

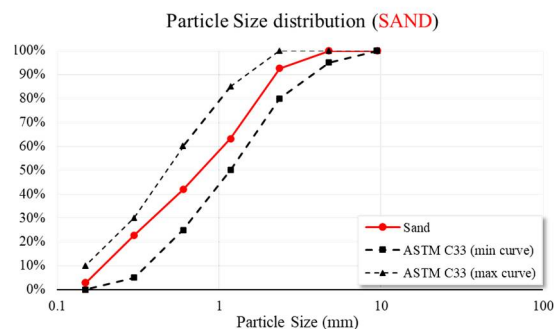
نام طرح	سیمان kg/m ³	ماسه kg/m ³	آب kg/m ³	میکرو سیلیس kg/m ³	چسب لاتکس kg/m ³	الیاف فولادی %	الیاف پلی- استر %	شیشه شیشه %
M1	505	1516	129	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
M2	618	1237	155	30/9	61/8	0/50	0/25	0/25
M3	806	806	201	80/6	161/2	1/00	0/50	0/50
M4	476	1427	143	0/0	47/6	0/50	0/50	0/50
M5	584	1168	175	29/2	116/8	1/00	0/00	0/00
M6	892	892	268	89/2	0/0	0/00	0/25	0/25
M7	471	1412	165	23/5	0/0	1/00	0/25	0/50
M8	604	1208	211	60/4	60/4	0/00	0/50	0/00
M9	826	826	289	0/0	165/1	0/50	0/00	0/25
M10	449	1346	180	44/9	89/7	0/50	0/00	0/25
M11	606	1212	242	0/0	0/0	1/00	0/50	0/25
M12	838	838	335	41/9	83/8	0/00	0/50	0/50
M13	455	1364	205	22/7	90/9	0/00	0/50	0/25
M14	591	1183	266	59/1	0/0	0/50	0/00	0/50
M15	812	812	365	0/0	81/2	1/00	0/25	0/00
M16	440	1320	220	44/0	44/0	1/00	0/00	0/25
M17	577	1154	288	0/0	115/4	0/00	0/25	0/50
M18	826	826	413	41/3	0/0	0/50	0/00	0/00

2-4-4- آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی از جمله آزمایش‌هایی است که برای بررسی عملکرد ملات‌های ترمیمی ساخته‌شده در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه به هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود. نمونه‌های ملات پس از 28 روز عمل‌آوری برای انجام آزمایش از محفظه آب خارج شدند. لازم بذکر است که برای آزمایش مقاومت فشاری و خمشی 3 نمونه از هر طرح اختلاط در نظر گرفته شده که میانگین نتایج آن ارائه می‌گردد.

2-4-4-1- آزمایش مقاومت فشاری

در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری ملات بر اساس استاندارد (ASTM C109-02) بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد 50 × 50 × 50 میلی‌متر که در هنگام ساخت در 2 لایه ریخته شده و با استفاده از میله کوبش متراکم شده‌اند، انجام گرفته است. تمامی نمونه‌ها برای انجام عمل‌آوری به مدت 28 روز درون استخر آب قرار داده شده‌اند. این آزمایش بر روی 3 نمونه از هر طرح اختلاط انجام گرفته شد تا میانگین نتایج بدست آمده به عنوان مقاومت فشاری نمونه‌ها ثبت گردد.



شکل 1- منحنی دانه‌بندی ماسه

2-2-2- طرح اختلاط نمونه‌های ملات

به منظور بررسی اثر مصالح در نظر گرفته شده برای ساخت ملات ترمیمی مناسب، هجده طرح همراه با طرح مرجع تهیه شده است که در جدول 1 بیان گردید. طرح اختلاط‌ها دارای نسبت آب به ماده سیمانی 0/20، 0/25، 0/30، 0/35، 0/40، 0/45، 0/50 و نسبت ماده سیمانی به ماسه 0/33، 0/50، و 1/0 بوده و از فوق‌روان‌کننده براساس درصد وزنی مواد سیمانی برای رسیدن ملات به اسلامپ در حدود 180-220 میلی‌متر استفاده شده است. درصد الیاف‌های فولادی بکار گرفته شده در طرح اختلاط‌ها برابر صفر، 0/5، و 1/0 درصد و درصد الیاف‌های شیشه‌ای و پلی‌استر برابر صفر، 0/25، و 0/5 درصد وزن حجمی ملات در نظر گرفته شده است. چسب لاتکس بر اساس صفر، 10، و 20 درصد و میکروسلیس بر اساس صفر، 5، و 10 درصد وزن سیمان در طرح‌های مدنظر بکار گرفته شده‌اند. جهت مقایسه نتایج حاصل از ملات ترمیمی، مقدار صفر درصد از چسب لاتکس، الیاف‌ها و میکروسلیس برای ملات معمولی در نظر گرفته شده است.

2-3-2- ساخت و عمل‌آوری

اختلاط و ساخت نمونه‌های ملات با استفاده از دستگاه همزن اتوماتیک ملات 4 لیتری موجود در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل صورت گرفت. در گام اول، تمامی آب به درون همزن و سپس ماده سیمانی (شامل سیمان و پودر میکروسلیس) به آن اضافه و به مدت 30 ثانیه مخلوط شدند. پس از گذشت 30 ثانیه از تشکیل خمیر سیمان، تمامی ماسه به مخلوط اضافه گردید و به مدت 60 ثانیه درون همزن فرآیند اختلاط صورت پذیرفت. در ادامه مقداری فوق‌روان‌کننده برای دستیابی به روانی مناسب و مشخص شده مطابق با کارایی هر طرح اختلاط به مخلوط اضافه شد. پس از آماده‌شدن مخلوط ملات معمولی، مطابق طرح اختلاط‌ها به ترتیب چسب لاتکس، الیاف فولادی، الیاف پلی‌استر، و الیاف شیشه به ترکیبات ملات اضافه و در هر گام حدود 30 الی 45 ثانیه درون همزن ترکیب شدند. در گام آخر، پس از اختلاط مناسب مصالح و دستیابی به اسلامپ مشخص، مخلوط ملات درون تمامی قالب‌های مکعبی و منشوری ریخته شدند. طبق

2-4-2- آزمایش مقاومت خمشی

مقاومت خمشی ملات بیان‌گر مقاومت نمونه‌ها در برابر گسیختگی و تغییرشکل در اثر اعمال نیروهای خمشی می‌باشد. پس از عملیات ترمیم جهت تقویت یک المان بتنی، انتظار می‌رود سطح تماس ملات ترمیمی و بتن موجود توانایی تحمل خمش ایجاد شده در اثر نیروهای اعمالی را داشته باشد. در واقع در اثر اعمال لنگر خمشی، ملات به آسانی از سطح بتن جدا نگردد و به نوعی یک المان یکپارچه‌ای را با بتن مدنظر ایجاد نماید. از این‌رو براساس استاندارد (ASTM C348-02)، آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلی‌متر که در 2 لایه ریخته شده و با میله کوبش متراکم گردیده، انجام شده است. این آزمایش نیز بر روی 3 نمونه از هر طرح اختلاط در سن 28 روزه انجام گرفته و میانگین نتایج آن به صورت مقاومت خمشی نمونه‌ها گزارش شده است.

3- نتایج آزمایش و بحث

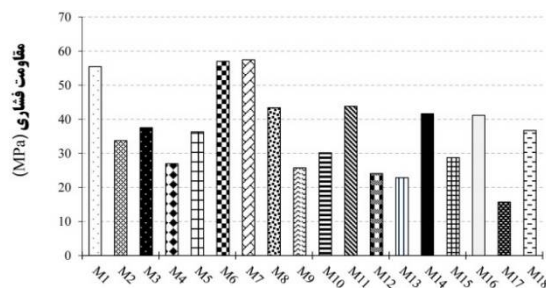
3-1- آزمایش مقاومت فشاری

با در نظر گرفتن خطاهای احتمالی در هنگام ساخت نمونه‌های ملات، آزمایش مقاومت فشاری بر روی سه نمونه ملات از هر طرح اختلاط انجام شد. از این‌رو، میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌های ملات در شکل 2 نشان داده شده است. همچنین از آن‌جایی که چگالی ملات، میزان تراکم ملات را نشان می‌دهد و بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن تأثیرگذار است، چگالی هر یک از طرح اختلاط‌ها اندازه‌گیری شده که در جدول 2 نشان داده شده است. بر اساس جدول مذکور، طرح M7 پس از طرح M1 بیشترین و طرح M12 کمترین چگالی را به خود اختصاص داده است. مطابق شکل 2 مشاهده می‌شود که طرح‌های M6 و M7 بیشترین و طرح M17 کمترین مقاومت فشاری را در میان طرح اختلاط‌های ساخته شده داشته‌اند. بر اساس نتایج آزمایش، مشاهده گردید که به غیر از طرح‌های M6 و M7، طرح اختلاط‌های دیگر در مقایسه با M1 (ملات معمولی) مقاومت فشاری کمتری را از خود نشان داده‌اند. از آن‌جایی که در این مطالعه از 6 نسبت آب به ماده سیمانی مختلف استفاده شده است، از این‌رو می‌توان طرح اختلاط‌ها را به صورت جدا از یکدیگر مقایسه نمود. اگرچه در یک نسبت آب به ماده سیمانی یکسان نیز نسبت ماده سیمانی به ماسه متغیر خواهد بود. با این حال، مطابق شکل 2 در طرح‌های با نسبت آب به ماده سیمانی 0/20، 0/25، 0/30، 0/35، 0/40، 0/45، و 0/50 به ترتیب طرح‌های M1، M6، M7، M11، M14، و M16 بیشترین مقدار مقاومت فشاری را داشته‌اند. نکته قابل‌توجه آن است که

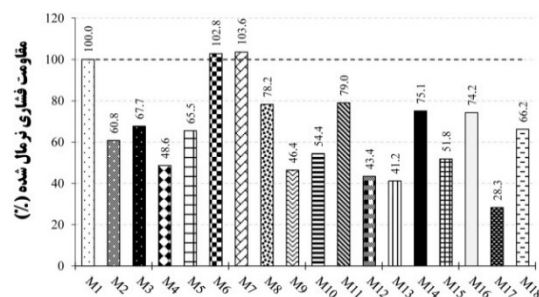
وجه اشتراک این طرح‌ها به جز طرح M16 آن است که در اختلاط هیچکدام از آن‌ها از چسب لاتکس استفاده نشده است. نکته جالب‌تر آن است که در طرح M16 که بر خلاف طرح‌های فوق دارای چسب لاتکس بوده و در نسبت آب به ماده سیمانی 0/50، بیشترین مقاومت فشاری را داشته است، از متوسط درصد چسب لاتکس استفاده شده است. همچنین نکته قابل توجه آن است که در طرح‌های مذکور از حداقل دو الیاف استفاده شده است. این امر تأثیر مثبت الیاف‌ها در مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ترمیمی را نشان می‌دهد. نمودار مقاومت فشاری نرمال‌شده نمونه‌های ملات در شکل 3 ارائه گردید. مطابق این شکل، مقاومت فشاری طرح‌های M7 و M6 حدود 2-3 درصد نسبت به نمونه معمولی افزایش یافته است. در شکل 4 تصاویری از نمونه‌های فشاری آزمایش شده ارائه شد.

جدول 2- چگالی نمونه‌های ملات

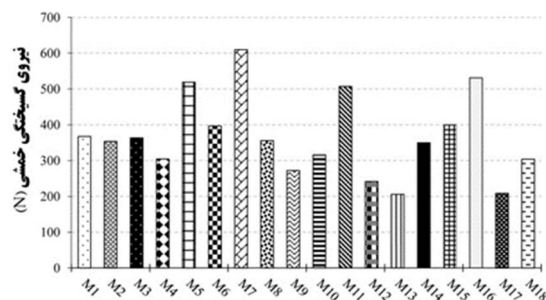
نام چگالی طرح (kg/m ³)	نام چگالی طرح (kg/m ³)	نام چگالی طرح (kg/m ³)	نام چگالی طرح (kg/m ³)
M1 2416	M7 2408	M13 2064	M18 1952
M2 2088	M8 2192	M14 2088	M17 2016
M3 2080	M9 2024	M15 2072	M16 2248
M4 2224	M10 2248	M16 2072	M6 2064
M5 2232	M11 2232	M17 2016	M12 2184
M6 2184	M12 2184	M18 1952	



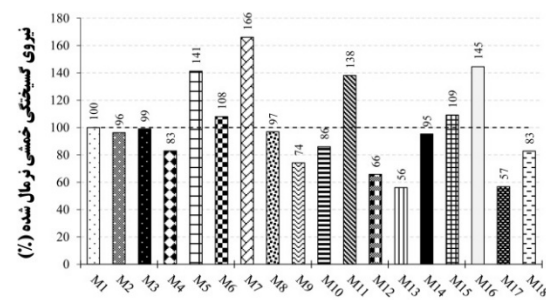
شکل 2- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات



شکل 3- مقاومت فشاری نرمال‌شده نمونه‌های ملات



شکل 5- نیروی گسیختگی خمشی نمونه‌های ملات



شکل 6- نیروی گسیختگی خمشی نرمال شده



شکل 7- نمونه‌های خمشی

4- روش آزمایشگاهی تاگوچی

به منظور کارآمدسازی مقاومت فشاری و خمشی ملات ترمیمی از الگوریتم تاگوچی برای دستیابی به درصد کارآمد الیاف فولادی، شیشه‌ای، و پلی‌استر، چسب لاتکس، میکروسیلیس، نسبت آب به ماده سیمانی و نسبت ماده سیمانی به ماسه استفاده شد. در این تحقیق در الگوریتم تاگوچی، 6 عامل الیاف فولادی، شیشه، و پلی‌استر، چسب لاتکس، میکروسیلیس و نسبت ماده سیمانی به ماسه در 3 سطح و یک عامل نسبت آب به ماده سیمانی در 6 سطح طراحی شد که در مجموع

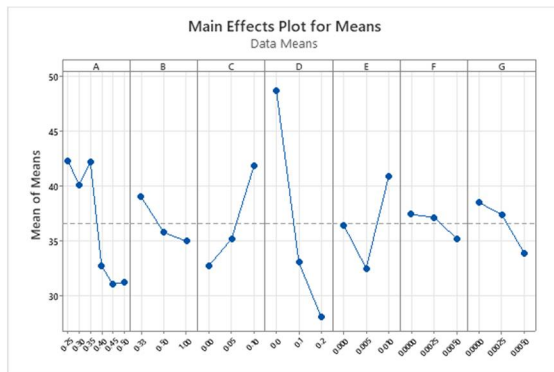


شکل 4- نمونه‌های فشاری

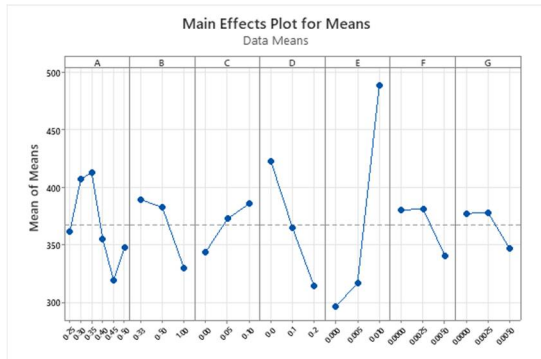
3-2- آزمایش مقاومت خمشی

میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی 28 روزه نمونه‌های ملات در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به آن که نتایج استخراج شده از دستگاه آزمایش خمشی ملات بر اساس نیروی گسیختگی خمشی نمونه‌ها می‌باشد، از این رو نتایج جدول مذکور بر حسب نیوتون نشان داده شده‌اند. مطابق شکل از میان طرح اختلاط‌های ساخته شده، طرح M7 بیشترین و طرح‌های M13 و M17 کمترین مقاومت خمشی را داشته‌اند. برخلاف نتیجه بدست آمده در آزمایش مقاومت فشاری، در آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های دیگری چون M5، M6، M11، M15، M16 در مقایسه با طرح مرجع M1 مقاومت خمشی بیشتری داشته‌اند. مطابق شکل 5، طرح‌های M1، M5، M7، M11، M15، M16 بیشترین مقدار مقاومت خمشی را به ترتیب در طرح‌های با نسبت آب به ماده سیمانی 0/25، 0/30، 0/35، 0/40، 0/45، و 0/50 داشته‌اند. نکته قابل توجه آن است که وجه اشتراک این طرح‌ها به جز طرح M1 آن است که در اختلاط آن‌ها از حداکثر مقدار درصد الیاف فولادی استفاده شده است. همچنین علاوه بر الیاف فولاد، یک یا دو الیاف دیگر نیز در این طرح‌ها قابل مشاهده است. نتایج حاصل به خاطر پل زدن الیاف‌ها در نمونه منشوری است که در اثر اعمال نیروی گسیختگی عملکرد خود را نشان می‌دهند. در طرح‌های M2، M4، M9، M10، M12، M13، M18 و M1 که مقاومت خمشی کمتری نسبت به طرح M1 دارند، الیاف فولادی با درصد 0/50 درصد استفاده شده است. مشاهده می‌شود که حضور درصد الیاف فولادی به همراه الیاف‌های شیشه‌ای یا الیاف‌های پلی‌استر در طرح اختلاط می‌تواند به صورت مناسبی عملکرد نمونه‌ها را ارتقاء دهد. نمودار نیروی گسیختگی خمشی نرمال شده نمونه‌های ملات در شکل 6 ارائه گردید. مطابق این شکل، مقاومت فشاری طرح‌های M5، M7، M11، M16 به ترتیب 41، 66، 38 و 45 درصد نسبت به نمونه معمولی افزایش یافته است. در شکل 7 تصاویری از نمونه‌های خمشی آزمایش شده ارائه شد.

قابل توجه آن است که براساس تاگوچی، طرح حاوی تنها الیاف فولادی می‌تواند مقاومت خمشی مشابهی با طرح حاوی حداقل دو نوع الیاف فولادی و غیرفولادی (شیشه یا پلی‌استر) داشته باشد. این در حالی است که در نتایج آزمایشگاهی بیشترین مقاومت خمشی برای طرح M7 حاوی ترکیب هر سه نوع الیاف بدست آمده بود. در مجموع، با توجه به نتایج آزمایشگاهی و براساس نتایج تاگوچی، می‌توان گفت که برای دستیابی به مقاومت خمشی کارآمد می‌توان از ترکیب دو نوع الیاف فولادی و غیرفولادی (شیشه یا پلی‌استر) استفاده نمود. همان‌طور که پیش‌تر در بخش نتایج آزمایشگاهی خمشی و فشاری گفته شد، طرح‌هایی که دارای چسب لاتکس بودند، مقاومت کمتری را از خود نشان دادند. در نتایج تاگوچی نیز برای هر دو مقاومت فشاری و خمشی مقدار صفر درصد از چسب لاتکس را برای ساخت ملات ترمیمی پیشنهاد نموده است.



شکل 8- نتایج طرح فشاری کارآمد براساس الگوریتم تاگوچی



شکل 9- نتایج طرح خمشی کارآمد براساس الگوریتم تاگوچی

5- نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از ملات ترمیمی برای تقویت و ترمیم سازه‌هایی که به پایان عمر طراحی خود رسیده‌اند و یا تحت بارهای مختلف دچار خرابی‌های متعددی شده‌اند و همچنین برای جلوگیری از بازسازی‌های پرهزینه کاربرد زیادی دارد. در این تحقیق با بکارگیری روش طرح آزمایشگاهی تاگوچی، طرح اختلاط‌های مختلفی برای ملات ترمیمی حاوی الیاف‌های ترکیبی، میکروسیلیس و چسب لاتکس در نسبت‌های مختلف آب به ماده

18 سری آزمون را تشکیل می‌دهند. عوامل و سطوح مورد استفاده در الگوریتم تاگوچی و همچنین تمامی 18 سری آزمون به ترتیب در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 3- عوامل تعریف شده در الگوریتم تاگوچی

ردیف	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	0/25	0/33	0	0	0/00	0/00	0/00
2	0/25	0/50	0/05	0/10	0/0050	0/0025	0/0025
3	0/25	1/00	0/10	0/20	0/0100	0/0050	0/0050
4	0/30	0/33	0	0/10	0/0050	0/0050	0/0050
5	0/30	0/50	0/05	0/20	0/0100	0/00	0/00
6	0/30	1/00	0/10	0	0	0/0025	0/0025
7	0/35	0/33	0/05	0	0/0100	0/0025	0/0050
8	0/35	0/50	0/10	0/10	0	0/0050	0/00
9	0/35	1/00	0	0/20	0/0050	0/00	0/0025
10	0/40	0/33	0/10	0/20	0/0050	0/0025	0/00
11	0/40	0/50	0	0	0/0100	0/0050	0/0025
12	0/40	1/00	0/05	0/10	0/00	0/00	0/0050
13	0/45	0/33	0/05	0/20	0/00	0/0050	0/0025
14	0/45	0/50	0/10	0	0/0050	0/00	0/0050
15	0/45	1/00	0	0/10	0/0100	0/0025	0/00
16	0/50	0/33	0/10	0/10	0/0100	0/00	0/0025
17	0/50	0/50	0	0/20	0	0/0025	0/0050
18	0/50	1/00	0/05	0	0/0050	0/0050	0/00

Taguchi Array L18(6¹ 3⁶)
Factors 7 Runs 18

نتایج کارآمدسازی طرح‌های فشاری و خمشی به ترتیب در شکل 8 و 9 نشان داده شده است. مطابق شکل 8، کارآمدترین مقاومت فشاری برای طرح حاوی 10 درصد میکروسیلیس بدست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که تنها استفاده از الیاف فولادی می‌تواند عملکرد مناسبی را بر مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته باشد. براساس الگوریتم تاگوچی مقدار کارآمد الیاف فولادی برای طرح مقاومت فشاری برابر یک درصد گزارش شده است. این در حالی است که پارامترهای دیگری مانند چسب لاتکس و الیاف‌های پلی‌استر و شیشه بر مقاومت فشاری تأثیرگذار نبوده و مقدار صفر برای آن‌ها نشان داده شده است. براساس نتایج شکل 9، مشاهده می‌شود که کارآمدترین مقاومت خمشی همانند مقاومت فشاری برای طرح حاوی 10 درصد میکروسیلیس بدست آمده است. همانند نتایج آزمایش مقاومت فشاری حاصل از الگوریتم تاگوچی، مشاهده می‌شود که استفاده از یک درصد الیاف فولادی، تأثیر خوبی بر مقاومت خمشی داشته است. مطابق شکل 9، درصد کارآمد الیاف‌های غیرفولادی (شیشه و پلی‌استر) برای نمونه‌های خمشی برابر صفر و 0/25 درصد بدست آمده است. نکته

- Daneshvar, D., Behnood, A., & Robisson, A., "Interfacial bond in concrete-to-concrete composites: A review", *Construction and Building Materials*, 2022, 359, 129195.
- Dawood, E. T., & Ramli, M., "High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres", *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5), 2240-2247.
- Feng, H., Chen, G., Gao, D., Zhao, K., & Zhang, C., "Mechanical properties of steel fiber-reinforced magnesium phosphate cement mortar", *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-11.
- Feng, S., Xiao, H., & Geng, J., "Bond strength between concrete substrate and repair mortar: Effect of fibre stiffness and substrate surface roughness", *Cement and concrete composites*, 2020, 114, 103746.
- Feng, S., Xiao, H., & Li, Y., "Influence of interfacial parameters and testing methods on UHPC-NSC bond strength: Slant shear vs. direct tensile testing", *Cement and concrete composites*, 2022, 131, 104568.
- Feng, S., Xiao, H., Liu, R., Dong, X., Liu, Z., & Liu, H., "The influence of different bond primers on the bond strength of concrete overlays and the microstructure of the overlays transition zone", *Cement and concrete composites*, 2021, 119, 104023.
- Feng, S., Xiao, H., Ma, M., & Zhang, S., "Experimental study on bonding behaviour of interface between UHPC and concrete substrate", *Construction and Building Materials*, 2021, 311, 125360.
- Ghani, J. A., Choudhury, I., & Hassan, H., "Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters", *Journal of materials processing technology*, 2004, 145(1), 84-92.
- Guo, T., Xie, Y., & Weng, X., "Evaluation of the bond strength of a novel concrete for rapid patch repair of pavements", *Construction and Building Materials*, 2018, 186, 790-800.
- Hu, B., Li, Y., & Liu, Y., "Dynamic slant shear bond behavior between new and old concrete", *Construction and Building Materials*, 2020, 238, 117779.
- Júlio, E., Branco, F., & Silva, V., "Concrete-to-concrete bond strength: influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface", 2005, *Magazine of Concrete Research*, 57(8), 463-468.
- Júlio, E. N., Branco, F. A., Silva, V. D., & Lourenço, J. F., "Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate", *Building and Environment*, 2006, 41(12), 1934-1939.
- Julio, E. N., Branco, F. A., & Silva, V. t. D., "Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface", *Construction and Building Materials*, 2004, 18(9), 675-681.
- Keleştemur, O., Arıcı, E., Yıldız, S., & Gökçer, B., "Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber
- سیمانی و ماده سیمانی به ماسه در نظر گرفته شد تا مقاومت فشاری و خمشی کارآمد ملات ترمیمی بدست آید. در نهایت پس از بررسی نتایج آزمایشگاهی و الگوریتم تاگوچی، مقاومت خمشی و فشاری کارآمد با طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس 10 درصد و همچنین ترکیب 1/0 درصد الیاف فولادی با الیاف غیرفولادی (پلی‌استر یا شیشه) بدست می‌آید.
- با توجه به اهمیت بحث دوام بتن که عدم شناخت رفتار بلندمدت این ماده آثار نامطلوبی را در پروژه‌های عمرانی به جای می‌گذارد و از طرفی سازه‌هایی که تحت اثر عوامل محیطی در طول مدت بهره‌برداری با کاهش عمر مفید روبرو می‌شوند، از این رو توصیه می‌شود که در مطالعات آینده به بررسی و ارائه ملات ترمیمی مناسب با شرایط محیطی شدید پرداخته شود. همچنین برای بررسی بهتر عملکرد ملات ترمیمی، توصیه می‌شود از آزمایشات دیگری مانند آزمایش برش دوطرفه و برش مایل نیز استفاده گردد.

6- مراجع

- Alanazi, H., Yang, M., Zhang, D., & Gao, Z. J., "Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymers mortar", *Cement and Concrete Composites*, 2019, 65, 75-82.
- Algaifi, H. A., Bakar, S. A., Alyousef, R., Sam, A. R. M., Alqarni, A. S., Ibrahim, M., Shahidan, S., Ibrahim, M., & Salami, B. A., "Machine learning and RSM models for prediction of compressive strength of smart bio-concrete", *Smart Struct. Syst*, 2021, 28, 535-551.
- ASTM C109-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). (Vol. PA 19428-2959), West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- ASTM C348-02, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, (Vol. PA 19428-2959), West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. (2015), (Vol. PA 19428-2959), West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- ASTM C136-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, (Vol. PA 19428-2959), West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- Bogas, J., Carriço, A., & Pontes, J., "Influence of cracking on the capillary absorption and carbonation of structural lightweight aggregate concrete", *Cement and concrete composites*, 2019, 104, 103382.
- Chetty, K., Watson, M., Raine, T., McGurgan, T., Ladislaus, P., Chen, J., Zhang, S., Lin, L., & Jiang, G., "Enhancing Concrete and Mortar Properties and Durability Using Pristine Graphene Particles", *Coatings*, 2022, 12(11), 1703.

- Santos, P. M., & Júlio, E. N., "A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces", *Construction and Building Materials*, 2013, 38, 912-923.
- Shah, S. P., & Naaman, A. E., "Mechanical properties of glass and steel fiber reinforced mortar", *Journal Proceedings*, 1976.
- Sivakumar, A., & Santhanam, M., "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres", *Cement and concrete composites*, 2007, 29(8), 603-608.
- Stroeven, P., & Babut, R., "Fracture mechanics and structural aspects of concrete", *Heron*, 1986, 31(2), 15-44.
- Teimortashlu, E., Dehestani, M., & Jalal, M., "Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar", *Construction and Building Materials*, 2018, 190, 1182-1191.
- Vincke, E., Van Wanseele, E., Monteny, J., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., & Verstraete, W., "Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete", *International biodeterioration & biodegradation*, 2002, 49(4), 283-292.
- Wang, B., & Gupta, R., "Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods", *Cement and concrete composites*, 2021, 115, 103830.
- Yao, W., Li, J., & Wu, K., "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction", *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(1), 27-30.
- Zahedi, F., & Dehestani, M., "Post-fire optimum mechanical properties of self-compacting mortar using Taguchi method and analysis of variance", *Construction and building materials*, 2022, 315, 125642.
- حجازی و همکاران، بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای با استفاده از الیاف ترکیبی، 2017.
- نعمتی چاری و همکاران، اثر استایرن اکریلات روی مشخصات مکانیکی ملات‌های ترمیمی و مقایسه شرایط عمل‌آوری 2018، مصالح و سازه‌های بتنی، 3(1)، 44-53.
- exposed to high temperature by using Taguchi method", *Construction and building materials*, 2014, 60, 17-24.
- Mather, B., & Warner, J., "Why do concrete repairs fail", Interview held at Univ. of Wisconsin, Dept. of Engrg. Professional Development, 2003.
- Mohammadi, Y., Singh, S., & Kaushik, S., "Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state", *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5), 956-965.
- Momayez, A., Ehsani, M., Ramezani-pour, A., & Rajaie, H., "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", *Cement and Concrete Research*, 2005 35(4), 748-757.
- Mu, R., Li, H., Qing, L., Lin, J., & Zhao, Q., "Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field", *Construction and Building Materials*, 2017, 131, 309-316.
- Narong, O., Sia, C., Yee, S., Ong, P., Zainudin, A., Nor, N., & Hassan, M. F., "Optimisation of EMI shielding effectiveness: Mechanical and physical performance of mortar containing POFA for plaster work using Taguchi Grey method", *Construction and building materials*, 2018, 176, 509-518.
- Ohama, Y., "Polymer-based admixtures", *Cement and concrete composites*, 1998, 20(2-3), 189-212.
- Ramli, M., & Akhavan Tabassi, A., "Effects of different curing regimes on engineering properties of polymer-modified mortar", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(4), 468-478.
- Rashid, K., Ahmad, M., Ueda, T., Deng, J., Aslam, K., Nazir, I., & Sarwar, M. A., "Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers", *Construction and Building Materials*, 2020, 249, 118798.
- Rashid, K., Wang, Y., & Ueda, T., "Influence of continuous and cyclic temperature durations on the performance of polymer cement mortar and its composite with concrete", *Composite structures*, 2019, 215, 214-225.
- Sahmaran, M., Yurtseven, A., & Yaman, I. O., "Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete", *Building and Environment*, 2005, 40(12), 1672-1677.