

بررسی رابطه خواص مقاومتی و وزن مخصوص بتن حاوی سنگدانه سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS) و سبک دانه رس منبسط شده (LECA)



محمد شکرچی زاده

رییس هیات مدیره انجمن بتن ایران
استاد دانشگاه تهران

ریاست انستیتو مصالح دانشکده فنی دانشگاه تهران



جعفر سبحانی

دانشیار، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه،
مسکن و شهرسازی، تهران

عضو حقیقی انجمن بتن ایران



سمیرا کمیجانی

کارشناس شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

در سال‌های اخیر تحقیقات کاربردی و بنیادی در زمینه استحصال، شناسایی و استفاده از مواد و مصالح دوستدار محیط‌زیست، به‌عنوان عرصه نوینی از تحقیقات در حوزه ساخت‌وساز در حال ظهور است. در مقابل به دلیل شتاب فزاینده صنعتی‌سازی، تولید انواع مواد پسماند با سرعت بسیار زیادی در حال افزایش است که موجبات عدم تعادل اکولوژیکی می‌شود که همین امر نیاز به مدیریت دارد. از این‌رو تلاش می‌شود تا از پسماندها و ضایعات صنعتی در ساخت‌وساز برای حفظ منابع طبیعی و کاهش هزینه مصالح ساختمانی استفاده بهینه شود. در این راستا تحقیق حاضر باهدف امکان‌سنجی تولید یک نوع بتن سبز بهینه (بتن دوست‌دار محیط‌زیست) با حداکثر درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه‌های سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS) و تعدیل وزن مخصوص این مخلوط‌های بتنی با استفاده از سبک دانه رس منبسط‌شده (LECA) پرداخته است. به همین منظور ۷ طرح مخلوط پیشنهادی شامل طرح مخلوط R (حاوی سنگ‌دانه EAFS) به عنوان طرح مخلوط مرجع، و طرح مخلوط‌های گروه E (حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی، EAFS و LECA) با فرض نسبت آب به سیمان ثابت به‌منظور دستیابی به مقاومت حدود ۳۰ MPa مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج نشانگر این است که در همه‌ی طرح مخلوط‌ها کاهش درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS و افزایش درصد جایگزینی LECA موجب کاهش وزن مخصوص آزمون‌های بتنی نسبت به طرح مخلوط مرجع شده به طوری که تمامی طرح مخلوط‌ها به استثنای طرح مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگ‌دانه EAFS (طرح مخلوط E6) در رده بتن‌های با وزنی معمولی قرار گرفتند، ضمن آنکه دو طرح مخلوط E4 و E5 (به ترتیب حاوی ۷۰ و ۷۵ درصد سنگ‌دانه EAFS) مطابق استاندارد EN206 در رده مقاومتی C30/37 قرار گرفتند، که بیانگر دستیابی به مقاومت هدف و امکان تولید بتن سبز بهینه با درصد جایگزینی بالای سنگ‌دانه EAFS است. واژه‌های کلیدی: پسماند صنعتی، بتن دوست‌دار محیط‌زیست، سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS)، سبک دانه رس منبسط‌شده (LECA)، سبک‌سازی بتن

1 Electric arc furnace slag

2 Lightweight expanded clay aggregate

بتن به‌عنوان بیشترین ماده تولیدشده از لحاظ وزنی در جهان شناخته‌شده است [۱]، که تولیدات آن عوارض و مشکلات بسیاری را برای محیط‌زیست به همراه دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استخراج منابع طبیعی توده‌ای (به‌عنوان مثال، شن، ماسه، مواد معدنی) که ممکن است سبب تخریب و زوال زمین یا تغییر شکل آن، سست شدن لایه‌های نگه‌دارنده آب، فرسایش حاشیه رودخانه و غیره شود [۲]. از سوی دیگر استخراج منابع محلی ارتباط مستقیمی با انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، زیرا در صورت عدم دسترسی آسان به مواد اولیه، مسافتی که جهت دسترسی به منابع باید طی شود افزایش می‌یابد که در این صورت افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد. مطالعات ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۳ در این موارد بیانگر آن است که تأثیرات ناشی از حمل‌ونقل، حجم بالایی از تأثیرات ناشی از کل زنجیره تأمین سنگ‌دانه‌های طبیعی را بر محیط‌زیست شامل می‌شود [۳]، انتظار می‌رود این تأثیرات در طی سال‌های آتی در کشورهای در حال توسعه بیش از کشورهای دیگر پدیدار شود [۴]. خوشبختانه بتن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در احداث مهم‌ترین سازه‌های زیربنایی و توسعه‌ای، دارای پتانسیل مشارکت مهم و مثبتی با محیط‌زیست بوده و می‌تواند این واقعیت را به نحو جدی به عرصه ظهور برساند. به‌طوری‌که تحقیقات صورت گرفته در زمینه استفاده از مواد بازیافتی در بتن در سال‌های گذشته به پیشرفت چشمگیری دست‌یافته است و اجازه

فرموله سازی بتن‌هایی با همان خصوصیات (یا حتی بهتر) از مخلوط‌های معمولی را که فقط شامل مواد طبیعی هستند را می‌دهد. در بعضی از کشورها نیز کدها و استانداردهایی برای تنظیم استفاده از مواد بازیافتی در بتن ارائه‌شده است که بسته به کاربرد سازه‌ای مورد استفاده حداکثر نسبت‌های جایگزینی را مشخص می‌کنند [۵].

از سویی مقررات زیست‌محیطی مستلزم به کاهش یا حداقل رساندن دفع پسماندهای صنعتی و استفاده مجدد از این مواد زائد است. پسماندهای صنعتی از جمله باطله‌ها، سرباره‌ها، گردوغبار خروجی از دودکش‌ها و باقی‌مانده‌های حاصل از مواد اولیه حاوی مقدار قابل‌توجهی فلزات گوناگون هستند که در صورت استخراج، قابلیت استفاده مجدد در مصارف مختلف را دارند.

در این بین صنعت فولادسازی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین صنایع شناخته‌شده در جهان است که باوجود نیاز مبرم بدان، آثار منفی قابل‌توجهی نیز در کاهش شاخص‌های زیست‌محیطی به دنبال دارد [۶، ۷]، از جمله این آثار منفی، تولید پسماندهای جامد نظیر سرباره‌های فولادی می‌باشد، به‌طوری‌که سالانه حدود ۱۹۰-۲۹۰ میلیون تن سرباره فولادی طی فرایند تولید فولاد تولید می‌شود [۸]. به‌طورکلی سرباره فولادی از تبدیل آهن به فولاد در یک BOF یا ذوب قراضه برای تولید فولاد در EAF به‌صورت مذاب مایع حاصل می‌شود و توسط خنک‌کننده هوا یا سایر روش‌ها سرد شده و به حالت جامد تغییر فاز داده می‌شود، به‌طوری‌که تقریباً سرباره تولیدشده در فرایندهای BOF و EAF به ۱۲۰-۱۵۰ کیلوگرم در هر

تن فولاد تولیدشده می‌رسد [۹]. مدیریت پسماندهای این صنایع چه به لحاظ زیست‌محیطی و چه از نظر فضای وسیعی که برای دپوی آن اشغال می‌شود یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در صنعت فولاد به شمار می‌رود. بنابراین حفاظت از محیط زیست با استفاده مجدد یا بازیابی ضایعات امری ضروری در صنایع فولاد می‌باشد.

به‌طور کلی سرباره EAF در مقایسه با سرباره BOF به‌طور مناسب‌تری به‌عنوان سنگ‌دانه در مخلوط بتن استفاده‌شده است [۱۰، ۱۱]. به‌طوری که در زمینه استفاده از ضایعات سرباره EAF در محصولات صنایع ساختمانی، موفقیت‌های بسیاری حاصل شده است، این را می‌توان با حجم زیادی از مطالعاتی که در زمینه بازیافت سرباره EAF گزارش شده است اثبات کرد [۵، ۱۰-۲۳].

امروزه در تعداد زیادی از کشورهای پیشرفته دنیا، با انجام مطالعات و تحقیقات وسیع، سرباره‌های فولادی را به دلیل خواص ذاتی آن‌ها در مقایسه با مصالح طبیعی، در مقیاس وسیعی به‌عنوان مصالح سنگدانه‌ای در تولید بتن‌های سبز مورد استفاده قرار می‌دهند. در حالی که میزان استفاده مجدد از سرباره‌های فولادی در کشورهای پیشرفته مانند ژاپن یا آلمان بسیار زیاد است، اما این مقادیر در کشورهای کمتر توسعه‌یافته بسیار پایین است [۲۴] که این موضوع زمینه‌ساز مشکلات زیست‌محیطی برای این کشورها و همچنین برای جهان است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که عمدتاً در کشورهای آسیایی میزان بازیافت سرباره فولاد بسیار پایین است [۷، ۲۵، ۲۶]. به طوری که متأسفانه امروزه در سطح کارخانجات مختلف کشور، به دلیل عدم آگاهی و شناخت خواص سرباره‌های فولادی، میلیون‌ها تن از این مواد انباشته‌شده و تبدیل به معضل جدی در حوزه

زیست‌محیطی گردیده است. از سویی با توجه به حضور ۲۰ ساله ایران در عضویت مجمع عمومی فدراسیون جهانی بتن، سرانه مصرف بتن در ایران ۳۸ درصد بیشتر از سرانه مصرفی در جهان است، که منجر به بهره‌برداری حجم بالایی از معادن طبیعی جهت تامین سنگ‌دانه‌های مورد نیاز تولید بتن خواهد شد. بنابراین با ارزیابی فنی امکان استفاده حداکثری از این نوع پسماندها به‌عنوان جایگزینی مناسب به‌جای سنگ‌دانه در تولیدات بتنی با رویکرد توسعه پایدار، ضمن جلوگیری از دفن زباله‌های صنعتی با ارزیابی احتمالی انتشار آلاینده‌های حاصل از آن به محیط اطراف، مدیریت صحیح حجم بالایی از سرباره‌های فولادی تولیدشده در کشور را در بخش فعالیت‌های عمرانی خواهیم داشت که منجر به کاهش تخلیه منابع طبیعی و در نهایت تولید بتنی مطابق با دستورالعمل‌های فنی و مهندسی خواهد شد، همچنین جایگزینی این سنگ‌دانه کاهش هزینه‌های تولید و ساخت بتن را نیز به همراه دارد [۲۷-۳۰].

۲- مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه کاربرد سنگ‌دانه EAFs

بر اساس مطالعات صورت گرفته در زمینه سرباره‌های فولادی امکان بهره‌گیری از آن‌ها به‌منظور تولید محصول سبز وجود دارد. محصول سبز، با مفهوم "محصولی با ماهیت ضایعات صنعتی، غیر خطرناک، قابل بازیافت و از نظر اقتصادی هزینه تمام‌شده آن ارزان‌تر باشد، سبز تلقی می‌شود" مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱].

از ویژگی‌های بارز سرباره فولادی می‌توان به مقاومت سایشی و وزن مخصوص بالای آن اشاره کرد، ضمن آن که داشتن سطح ناهموار سنگ‌دانه‌های سرباره قابلیت چسبندگی بالایی به ماده چسبنده مانند سیمان را در این نوع از سنگ‌دانه‌ها موجب می‌شود [۳۲]. همچنین به

دلیل مقاومت فشاری بالای سرباره فولادی معمولاً بتن حاوی این نوع از سنگدانه‌ها مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهند، این امر به‌طور کلی تابعی از مشخصات سنگدانه‌ها، نحوه تولید آهن و فرآیند سرد شدن و جداسازی سرباره است؛ بنابراین، شناخت ویژگی‌ها و مزایای سنگدانه‌های سرباره فولادی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی موجب شده تا این نوع از سنگدانه‌ها جایگزینی مناسب برای سنگدانه‌های طبیعی باشند. یکی از نخستین تلاش‌ها برای ارزیابی امکان استفاده از سرباره EAF در بتن در سال ۱۹۹۷ انجام شد [۳۳] که خصوصیات مکانیکی اصلی مخلوط‌های بتنی EAF را مورد آزمایش قرار داد. تحقیقات بعدی صورت گرفته در این زمینه بیانگر آن است که خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های تولیدشده با این سرباره نسبت به بتن‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی معمول، مشابه یا حتی بهتر است [۳۴، ۳۵]. سرباره EAF معمولاً به‌عنوان سنگدانه‌هایی با دامنه اندازه ذرات ۵-۴۰ میلی‌متر طبقه‌بندی می‌شود و ظاهری مشابه سنگدانه‌هایی دارد که معمولاً در صنعت ساختمان استفاده می‌شود [۳۶] و دارای مقاومت عالی در برابر تکه‌تکه شدن که این خصوصیات سبب می‌شود که سرباره EAF به‌ویژه در مصارف بتنی، همچنین برای اهداف ساخت‌وساز مناسب باشد [۳۷]. از سوی دیگر به گفته حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۶، سرباره‌های فولادی معمولاً به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌های ساختمانی، به‌ویژه در بتن‌سازی و راه‌سازی، بازیافت می‌شوند [۳۸]. همچنین چندین محقق ایده استفاده از سرباره EAF را به‌عنوان سنگدانه در تولید بتن‌سازه‌ای ارائه داده‌اند [۱۰-۲۳]. مطالعات دیگر افزایش مقاومت مکانیکی به دلیل اتصال قوی بین سرباره EAF و خمیر سیمان را نشان می‌دهد

[۱۰، ۱۴، ۳۹]. به‌طور کلی، در چند دهه گذشته، مطالعات زیادی برای بررسی امکان بازیافت سرباره EAF در تلاش برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از این محصول جانبی انجام شده است. به‌طوری‌که در زمینه استفاده از ضایعات سرباره EAF در محصولات صنایع ساختمانی، موفقیت‌های بسیاری حاصل شده است. این را می‌توان با حجم زیادی از مطالعاتی که در زمینه بازیافت سرباره EAF گزارش شده است اثبات کرد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد سنگدانه EAF، ضمن بررسی خواص مکانیکی و دوام این نوع از بتن‌ها، بیانگر آن است که سرباره‌های فولادی به علت حضور حجم زیاد اکسید آهن، وزن مخصوص بیشتری را نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارا می‌باشند [۴۰]. به طوری‌که دامنه مقادیر وزن مخصوص سرباره EAF بین ۳/۱ تا ۳/۸ گرم بر سانتی مترمکعب است [۳۲]، که در صورت افزایش درصد جایگزینی سنگدانه EAF شاهد افزایش وزن مخصوص بتن‌های حاوی این سنگدانه‌ها هستیم. در این راستا به منظور بررسی سبک‌سازی نمونه‌های بتنی تولیدی توسط این سرباره‌ها و در جهت نیل به اهداف توسعه پایدار، جایگزین کردن بخشی از سنگدانه طبیعی مصرفی در این نمونه‌ها با سنگدانه‌های سبک مصنوعی از آن جهت که این فرآورده‌ها نیاز کمتری به حمل و نقل دارند و از موادی استفاده می‌شود که در حالت طبیعی خود کاربردهای سازه‌ای محدود دارند و نیز قابلیت کاهش تقاضای صنعت ساختمان را برای منابع محدود شن و ماسه طبیعی را دارا می‌باشند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین با توجه به مهم‌ترین ویژگی‌های سبک‌دانه LECA عبارت‌اند از چگالی کم و مقاومت بالای این سنگدانه در برابر جداسازی [۴۱] سبب شده است تا به‌منظور تحقق

چشم‌اندازهای تحقیق مورد نظر از این سبک‌دانه استفاده شود. لازم به ذکر است در مقایسه با آنچه ممکن است در ادبیات فنی یافت شود، تا کنون، هیچ مطالعه‌ای در زمینه بتن حاوی این سنگ‌دانه‌ها به صورت ترکیبی منتشر نشده است، و طراحی چنین مخلوط‌های بتنی یکی از اولین نمونه‌هایی است که ممکن است در سراسر جهان یافت شود.

۳- برنامه آزمایشگاهی

برای مطالعات فاز آزمایشگاهی، آزمایش‌های روانی (اسلامپ) به منظور تعیین کارایی بتن مطابق با استاندارد [۴۲] ASTM C143-90 در محدوده 50 ± 30 میلی‌متر، آزمایش اندازه‌گیری وزن مخصوص در حالت تازه مطابق با استاندارد [۴۳] ASTM-C138 و آزمایش تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتن سخت شده بر اساس استاندارد [۴۴] BS EN 12390-3 بر روی نمونه‌های بتنی شامل طرح مخلوط R با درصد جایگزینی ۱۰۰ درصدی سنگ‌دانه EAFS و نمونه‌های بتنی گروه E حاوی سنگ‌دانه‌های EAFS، LECA و مصالح طبیعی انجام شد. تمامی مراحل ساخت و بررسی

نمونه‌ها در آزمایشگاه بخش بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته است.

۳-۱ مصالح

سنگ‌دانه EAFS و LECA مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان و شرکت لیکا واقع در منطقه ساوه تهیه شده است. به منظور دستیابی به منحنی‌های مطلوب ترکیب سنگ‌دانه‌های از روش ملی طرح مخلوط بتن ایران استفاده شده است [۴۵]. لذا پس از بررسی نسبت‌های مختلف و بر اساس نتایج به دست آمده، مناسب‌ترین دانه‌بندی تعیین نسبت ۵۷٪ از سنگ‌دانه ریز و ۴۳٪ سنگ‌دانه درشت EAFS و نسبت ۸۰٪ از سنگ‌دانه ریز و ۲۰٪ سنگ‌دانه درشت LECA و ۵۷٪ از ماسه و ۴۳٪ شن طبیعی نسبت به کل سنگ‌دانه طبیعی مصرفی در نظر گرفته شد.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی، جذب آب و وزن مخصوص سنگ‌دانه EAFS را که مطابق با استانداردهای [۴۶-۴۸] ASTM و BS812: Part110 [۴۹] [۵۰] ISIRI 4982 انجام شده است نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه EAFS

مشخصات	سنگ‌دانه EAFS		
	ریزدانه	شن نخودی	شن بادامی
اندازه ذرات (mm)	۰-۴/۷۵	۴/۷۵-۱۲/۵	۱۲/۵-۱۹
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	۳۵۴۰	۳۴۸۰	۳۵۰۰
وزن مخصوص خشک (kg/m^3) ^۱ (OD)	۳۱۶۰	۳۱۴۰	۳۲۹۰
وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک (kg/m^3) ^۲ (SSD)	۳۲۶۰	۳۳۴۳	۳۳۵۰
جذب آب (%)	۳/۲	۱/۸	۱/۸
ارزش خردشوندگی (%) ^۳ (ACV)	-	۷	-
سایش لس آنجلس (%)	-	۱۵/۸	۱۳/۹
شکل	تیز گوشه و زاویه‌دار		

1 Oven dried

2 Saturated surface dry

3 Aggregate crushing value

در پژوهش حاضر تعیین جذب آب و وزن مخصوص سبک دانه LECA بر اساس ضمیمه C استاندارد EN 1097-6 انجام و در جدول ۲ ارائه گردید. و جذب آب نیم‌ساعته این سبک‌دانه ملاک محاسبات موردنظر قرار گرفته است. دلیل این امر آن است که معمولاً آب آزاد موجود در بتن تازه پس از گذشت نیم تا یک ساعت تا حدی با سیمان واکنش داده و امکان نفوذ آن به داخل سبک دانه از بین می‌رود. همچنین جذب آب و وزن مخصوص سنگ‌دانه شن و ماسه با استفاده از استاندارد [۵۰] ISIRI 4982 تعیین و در جدول ۲ ارائه گردید.

جدول ۲- وزن مخصوص و جذب آب سنگ‌دانه‌های طبیعی و LECA

سنگ‌دانه	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک SSD (kg/m^3)	جذب آب* (%)
سنگ‌دانه درشت LECA	۵۰۸	۶/۵
سنگ‌دانه ریز LECA	۱۰۲۷	۱۱/۵
شن	۲/۳۱	۲/۲
ماسه	۲/۴۱	۳/۵۴

* جذب آب نیم‌ساعته سبک‌دانه LECA ملاک محاسبات قرار گرفته است.

آب مورد استفاده در پژوهش حاضر نیز آب شرب شهر تهران بوده است، همچنین سیمان پرتلند معمولی نوع II مورد استفاده قرار گرفت. از سویی اضافه کردن سبک دانه LECA به بتن به دلیل جذب آب بالای این سنگ‌دانه‌ها بر میزان کارایی مخلوط بتنی تأثیرات سوئی را به همراه دارد و معمولاً با افزایش آن تأثیرات سو بر کارایی نیز با شدت بیشتری اضافه می‌شود، به طوری که برای حفظ کارایی، لازم است آب اضافی برای ساخت بتن به ترکیب مصالح افزوده شود. در همین راستا در این پژوهش، فوق روان کننده از محصول شرکت همگرایان که بر پایه پلی

کربوکسیلات اثر با حفظ روانی مطلوب است، استفاده شده است.

۳-۲ طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها

فرایند اختلاط بتن در این پژوهش پس از اجرای آزمایشی چندین طرح مخلوط به دست آمده است و در انتها طرح مخلوط‌های پیشنهادی با درصدهای مختلفی از سنگ‌دانه‌ها و میزان آب و سیمان مصرفی، در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول حروف E, L, N به ترتیب نشان‌دهنده سنگ‌دانه EAFS, LECA و سنگ‌دانه‌های طبیعی در طرح مخلوط‌ها و اعداد مقابل حروف بیانگر میزان درصد استفاده از این سنگ‌دانه‌ها است.

جدول ۳- مشخصات طرح مخلوط‌های ساخته شده*

گروه	شماره طرح	شناسه طرح
R	R	E100
E	E1	E50L35N15
	E2	E60L25N15
	E3	E65L20N15
	E4	E70L15L15
	E5	E75L15N10
	E6	E80L10N10

* $w/c = 0.4$ ، سیمان 400 kg/m^3

۴- نتایج و بحث

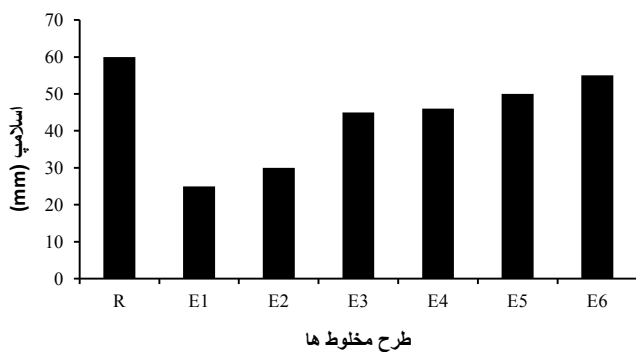
۴-۱ آزمایش تعیین روانی (اسلامپ)

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش روانی که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقدار روانی مخلوط‌ها در محدوده S1 و S2 (۲۰ تا ۶۰ میلی‌متر) متغیر است که با توجه به میزان فوق روان کننده مصرفی در هر یک از طرح مخلوط‌ها امکان تولید آزمونه‌ی بتنی در محدوده روانی موردنظر 50 ± 30 میلی‌متر فراهم شده است. با توجه به نتایج، طرح مخلوط

مرجع (R) با بیشترین درصد جایگزینی سنگدانه EAFS (با وجود کمترین میزان فوق روان کننده مصرفی) دارای بیشترین میزان روانی می‌باشد، بنابراین سنگدانه EAFS نقش مثبتی بر کارایی بتن دارد و موجب افزایش روانی در آزمون‌ها شده است، که این امر را می‌توان به درصد جذب آب کمتر سنگدانه EAFS در این پژوهش نسبت به سایر سنگدانه‌های مصرفی نسبت داد. نتایج مطالعات وانشاتی^۷ نیز در سال ۲۰۱۴ به تأثیرات مثبت سنگدانه EAFS به‌عنوان جایگزینی سنگدانه درشت در بتن برای کارایی بهتر و مقاومت بیشتر تا سطح جایگزینی ۶۰ درصد اشاره دارد [۵۲]. ضمن آن که طرح مخلوط E6 نیز بیشترین روانی را در میان آزمون‌های ساخته‌شده نسبت به طرح مرجع دارا می‌باشند.

همچنین در طرح مخلوط‌های ساخته‌شده با توجه به کاهش درصد جایگزینی LECA، به دلیل جذب بالای آب توسط این سنگدانه‌های (۱۰/۵٪) در مقایسه با سایر سنگدانه‌های مصرفی، ضمن افزایش میزان فوق روان کننده مصرف‌شده، میزان روانی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. به بیان دیگر تخلخل زیاد LECA باعث جذب آب مخلوط بتن در این بخش شده و مقدار آب قابل دسترسی سیمان مخلوط کاهش یافته است، در نتیجه خمیر سیمان سفت‌تر شده و کارایی مخلوط بتن تا حدی کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل‌شده با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه EAFS و LECA، میزان فوق روان کننده مصرفی در طرح

مخلوط‌های گروه E کاهش یافته است، علت این امر را می‌توان به تأثیرات مثبت سنگدانه طبیعی بر میزان کارایی و منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های بتنی نسبت داد. همچنین نتایج مطالعات منسو^۸ نیز بیانگر آن است که تعیین منحنی دانه‌بندی بهینه یک پارامتر اصلی برای بهبود کارایی و خواص مکانیکی بتن تولیدشده با استفاده از سنگدانه‌های EAFS است [۳۵]. به‌طور خاص، محققان پیشنهاد کردند که استفاده از سنگدانه‌های EAFS با اندازه ۰-۲۰ میلی‌متر و افزودن نسبت مناسب از سنگدانه‌های طبیعی برای تنظیم منحنی دانه‌بندی، می‌تواند کارایی بتن را بهبود بخشد. این امر با تحقیقات دیگر نیز مشاهده و نتیجه‌گیری شد [۳۵].



شکل ۱- نمودار روانی طرح مخلوط‌ها

۴-۲ وزن مخصوص بتن تازه

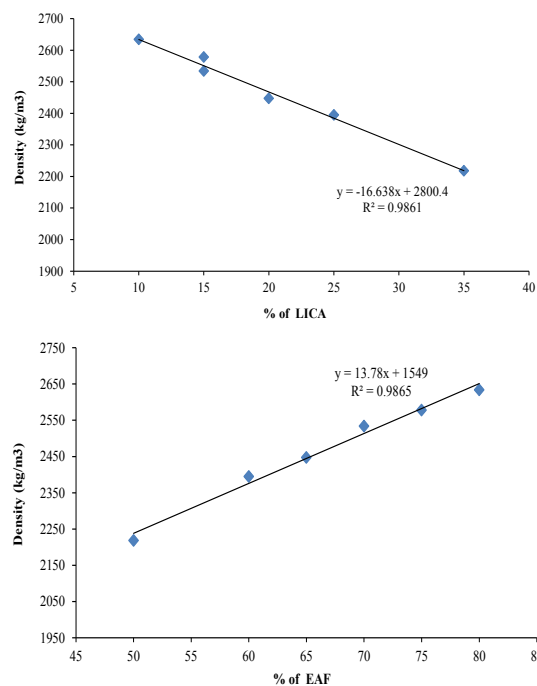
نتایج مربوط به اندازه‌گیری وزن مخصوص آزمون‌ها به همراه تأثیرات سنگدانه EAFS و LECA بر این مشخصه در شکل ۲ نشان داده شده است.

مصرفی در این پژوهش که بر اساس نتایج بدست آمده به ترتیب ۲/۳۷، ۳/۳ و ۰/۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند توجیه‌پذیر است.

طبق نتایج فوق طرح مخلوط E1 با کمترین درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS (۵۰ درصد)، دارای کم‌ترین وزن مخصوص نسبت به سایر طرح مخلوط‌ها می‌باشد. مطابق استاندارد EN206 [۵۳] مخلوط‌های R و E6 در دسته بتن‌های سنگین با چگالی بیشتر از ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار گرفته‌اند [۵۳]. همچنین آزمون‌های بتنی با وزن مخصوصی در محدوده ۲۰۰۰-۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در دسته بتن با وزن معمولی قرار می‌گیرند [۵۳]، بنابراین همه مخلوط‌ها به‌جز مخلوط‌های R و E6 در این رده قرار دارند.

۳-۴ آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح مخلوط‌های ساخته‌شده (آزمون‌های مکعبی) به همراه درصد تغییرات نسبت به طرح مخلوط مرجع در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۲- تأثیرات درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS و LECA بر وزن مخصوص

مطابق نتایج بدست آمده در طرح مخلوط‌های گروه E با کاهش درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS و افزایش درصد جایگزینی LECA شاهد کاهش وزن مخصوص آزمون‌های بتنی نسبت به طرح مخلوط مرجع (R) هستیم. این امر با توجه به چگالی سنگ‌دانه EAFS، مصالح طبیعی و LECA

جدول ۴- مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح مخلوط‌ها به همراه درصد تغییرات نسبت به طرح مخلوط مرجع

کد طرح	شناسه طرح	مقاومت فشاری (MPa)	درصد تغییرات نسبت به طرح مخلوط مرجع
R	E100	۴۹/۸	۰
E1	E50L35N15	۳۰/۸	-۳۹/۱
E2	E60L25N15	۳۴/۱	-۲۶
E3	E65L20N15	۳۴/۸	-۲۳/۳
E4	E70L15N15	۴۰/۱	-۱۵/۸
E5	E75L15N10	۴۰/۵	-۱۴/۸
E6	E80L10N10	۴۱/۴	-۱۲/۷

با توجه به نتایج جدول ۴ در طرح مخلوط‌های گروه E کاهش درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS و افزایش درصد جایگزینی LECA شاهد کاهش مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی نسبت به طرح مخلوط مرجع (R) هستیم. به‌طورمعمول جایگزینی کامل سنگ‌دانه‌های طبیعی با EAFS منجر به افزایش ۲۹-۳۰ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه در مقایسه با جایگزینی درصدهای مختلف EAFS و LECA شده است، به‌طورکلی با توجه به ویژگی‌های سنگ‌دانه EAFS (جدول ۱) مقاومت سایشی بالای لس آنجلس و ارزش خردشوندگی کمتر این سنگ‌دانه نسبت به سایر سنگ‌دانه‌ها این امر توجیح پذیر است. عامل دیگری که سبب افزایش مقاومت در این نوع از بتن‌ها می‌شود، زاویه‌دار بودن سنگ‌دانه EAFS و چسبندگی عالی بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان در ناحیه انتقال سطحی (ITZ)^۹ است که باعث افزایش مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی درصدهای بالای سنگ‌دانه EAFS می‌شود. به‌طوری‌که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی بالاترین درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS در سن ۲۸ روز بیشترین مقدار را نسبت به سایر طرح مخلوط‌ها دارا می‌باشند. بنابراین طبق نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری مقاومت فشاری آزمون‌ها خواهیم داشت:

$$R > E6 > E5 > E4 > E3 > E2 > E1$$

در نهایت در راستای طبقه‌بندی بتن‌های ساخته شده بر اساس میزان مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN206 [۵۳]، طرح مخلوط R در رده‌ی مقاومتی C۳۵/۴۵، طرح

مخلوط‌های E4 و E5 در رده‌ی C۳۰/۳۷ طرح مخلوط‌های E1، E2، E3 در رده‌ی C۲۰/۲۵ طبقه‌بندی شدند [۵۳].

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به دیدگاه مهندسی و نگاه زیست محیطی به موضوع، بررسی آزمایشگاهی همراه با فرایندهای مهندسی برای بدست آوردن درصد جایگزینی LECA به همراه سنگ‌دانه EAFS در ساخت بتن به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی بتن، با هدف کاهش بخش قابل توجه ای از اثرات مخرب زیست محیطی تولید سنگ‌دانه و مدیریت حجم بالای از پسماندهای صنعت فولاد سازی پرداخته است. در همین راستا ارائه طرح مخلوط‌های که دارای قابلیت کاربرد در عمل باشد به همراه تاثیرات بر روی خصوصیات مکانیکی شامل کمترین افت مقاومت از نظر آزمایش‌های میانگین مقاومت فشاری و خصوصیات فیزیکی وزن واحد حجم بتن، کارایی پرداخته شد.

نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که طرح مخلوط مرجع (R) با بیشترین درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS (با وجود کم‌ترین میزان فوق روان کننده مصرفی) دارای بیشترین میزان روانی می‌باشد، بنابراین سنگ‌دانه EAFS نقش مثبتی بر کارایی بتن دارد و موجب افزایش روانی در آزمون‌ها شده است. همچنین طرح مخلوط بتن E1 با کمترین درصد جایگزینی سنگ‌دانه EAFS (۵۰ درصد) و بیشترین درصد جایگزینی LECA (۳۵ درصد) کمترین وزن مخصوص را نسبت به بتن مرجع دارند. مخلوط R (با چگالی ۲۸۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب) و E6 (با چگالی ۲۶۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب) در رده‌ی بتن

9 Interfacial transition zone

مطابق استاندارد EN206 در رده مقاومتی C30/37 قرار گرفتند، که بیانگر دستیابی به مقاومت هدف و امکان تولید بتن سبز بهینه با درصد جایگزینی بالای سنگدانه EAFS است.

سنگین به ترتیب به مقاومت فشاری $49/8 \text{ MPa}$ و $41/4 \text{ MPa}$ دست یافتند. سایر طرح مخلوطها از منظر وزن مخصوص نیز در رده‌ی بتن‌های با وزن معمولی طبقه‌بندی شدند، همچنین طرح مخلوطهای E4 و E5 (به ترتیب حاوی ۷۰ و ۷۵ درصد سنگدانه EAFS)

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاران آزمایشگاه فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جهت همکاری در ساخت نمونه‌های بتن و انجام آزمایش‌های مورد نظر و همچنین کارخانه فولاد مبارکه اصفهان جهت فراهم آوردن مواد اولیه این تحقیق مراتب تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

منابع

- [1] Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., and Horvath, A. (2017). "Towards sustainable concrete". *Nature Materials* 16, 698-699. [10.1038/nmat4930](https://doi.org/10.1038/nmat4930).
- [2] Dash, M.K., Patro, S.K., and Rath, A.K.J.I.J.o.S.B.E. (2016). "Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete-A review". 5, 484-516.
- [3] Faleschini, F., Zanini, M.A., Pellegrino, C., and Pasinato, S. (2016). "Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant". *Waste Management* 49, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.013>.
- [4] Pellegrino, C., Faleschini, F., and Meyer, C. (2019). 2 - "Recycled materials in concrete. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*", S. Mindess, ed. (Woodhead Publishing), pp. 19-54. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00002-2>.
- [5] Monosi, S., Ruello, M.L., and Sani, D. (2016). "Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production". *Cement and concrete composites* 66, 66-72.
- [6] Kumar, S., Kumar, R., and Bandopadhyay, A. (2006). "Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries". *Resources, Conservation and Recycling* 48, 301-314. [10.1016/j.resconrec.2006.03.003](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003).
- [7] Schino, A.D. (2018). "Environmental Impact of Steel Industry". In *Handbook of Environmental Materials Management*, pp. 1-21. [10.1007/978-3-319-58538-3_101-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_101-1).
- [8] *Mineral Commodity Summaries* (2020).
- [9] ASA-Australasian Slag Association. (2002). "A guide to the use of iron and steel slag in roads".
- [10] San-José, J.T., Vegas, I., Arribas, I., and Marcos, I. (2014). "The performance of steel-making slag concretes in the hardened state". *Materials & Design* 60, 612-619.

- [11] Chunlin, L., Kunpeng, Z., and Depeng, C. (2011). "Possibility of Concrete Prepared with Steel Slag as Fine and Coarse Aggregates: A Preliminary Study". *Procedia Engineering* 24, 412-416. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2667>.
- [12] Ducman, V., and Mladenović, A. (2011). "The potential use of steel slag in refractory concrete". *Materials Characterization* 62, 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.04.016>.
- [13] Yildirim, I.Z., and Prezzi, M. (2011). "Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag". *Advances in Civil Engineering* 2011, 463638. [10.1155/2011/463638](https://doi.org/10.1155/2011/463638).
- [14] Pellegrino, C., and Gaddo, V. (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate". *Cement and Concrete Composites* 31, 663-671.
- [15] Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F., and Brunelli, K. (2013). "Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate". *Cement and Concrete Composites* 37, 232-240.
- [16] González-Ortega, M.A., Segura, I., Cavalaro, S.H.P., Toralles-Carbonari, B., Aguado, A., and Andrello, A.C. (2014). "Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags". *Construction and Building Materials* 51, 432-438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.067>.
- [17] Devi, V.S., Gnanavel, B. (2014). "Properties of concrete manufactured using steel slag". *Procedia Engineering* 97, 95-104.
- [18] Abu-Eishah, S.I., El-Dieb, A.S., and Bedir, M.S. (2012). "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region". *Construction and Building Materials* 34, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>.
- [19] Santamaría, A., Orbe, A., San José, J.T., and González, J.J. (2018). "A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags". *Construction and Building Materials* 161, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.121>.
- [20] Sekaran, A., Palaniswamy, M., and Balaraju, S. (2015). "A study on suitability of EAF oxidizing slag in concrete: an eco-friendly and sustainable replacement for natural coarse aggregate". *The Scientific World Journal* 2015.
- [21] Tarawneh, S.A., Gharaibeh, E.S., and Saraireh, F.M. (2014). "Effect of using steel slag aggregate on mechanical properties of concrete". *American Journal of Applied Sciences* 11, 700.
- [22] Jiang, Y., Ling, T.-C., Shi, C., and Pan, S.-Y. (2018). "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review". *Resources, Conservation and Recycling* 136, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>.
- [23] Wang, Q., Yan, P., Yang, J., and Zhang, B. (2013). "Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete". *Construction and Building Materials* 47, 1414-1420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.044>.
- [24] Motz, H., Motz, J., and Geiseler, J. (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources". *Waste Management* 21, 285-293. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00102-1).

- [25] Sarkar, R., Singh, N., and Das Kumar, S. (2010). "Utilization of steel melting electric arc furnace slag for development of vitreous ceramic tiles". *Bulletin of Materials Science* 33, 293-298. 10.1007/s12034-010-0045-5.
- [26] Yusuf, M., Chuah, L., Mohammed, M., and Shitu, A. (2013). "Investigations of nickel (II) removal from aqueous effluents using electric arc furnace slag". *Research Journal of Chemical Sciences*.
- [27] Kim, S.-W., Lee, Y.-J., and Kim, K.-H. (2012). "Flexural behavior of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag aggregates". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 11, 133-138.
- [28] Kim, S.-W., Lee, Y.-J., and Kim, K.-H. (2012). "Bond behavior of RC beams with electric arc furnace oxidizing slag aggregates". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 11, 359-366.
- [29] Kim, S.-W., Kim, Y.-S., Lee, J.-M., and Kim, K.-H. (2013). "Structural performance of spirally confined concrete with EAF oxidising slag aggregate". *European journal of environmental and civil engineering* 17, 654-674.
- [30] Kim, S., Lee, Y., Jung, Y., Lee, J., and Kim, K. (2014). "Applicability of electric arc furnace oxidising slag aggregates for RC columns subjected to combined bending and axial loads". *Materials Research Innovations* 18, S2-793-S792-798.
- [31] Gabaldón-Estevan, D., Criado E., Monfort E. (2014). "The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry". *Journal of Cleaner Production*.
- [32] Yildirim, I., and Prezzi, M. (2009). "Use of Steel Slag in Subgrade Applications".
- [33] Al-Negheimish, A. I., Al-Sugair F. H., Al-Zaid R. Z. (1997). "Utilization of Local Steelmaking Slag in Concrete". *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*; 9(1):39-54.
- [34] Faleschini, F., Alejandro Fernández-Ruiz M., Zanini M. A., Brunelli K., Pellegrino C., Hernández-Montes E. (2015). "High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties". *Construction and Building Materials*.;101:113-21.
- [35] Manso, J. M., Polanco J. A., Losanez M., Gonzalez J. J. (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate". *Cement and concrete composites*; 28(6):528-34.
- [36] Suh, M., Troese M. J., Hall D. A., Yasso B., Yzenas J. J., Proctor D. M. (2014). "Evaluation of electric arc furnace-processed steel slag for dermal corrosion, irritation, and sensitization from dermal contact". *Journal of Applied Toxicology* ;34(12):1418-25.
- [37] Faleschini, F., Pellegrino C. (2013). "Experimental behavior of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag as recycled aggregate". *ACI Mater J* ;110:197-206.
- [38] Hosseini, S., Soltani S. M., Fennell P. S., Choong T. S., Aroua M. K. (2016). "Production and applications of electric-arc-furnace slag as solid waste in environmental technologies: a review". *Environmental Technology Reviews* ;5(1):1-11.

[39] Maslehuddin, M., Sharif A. M., Shameem M., Ibrahim M., Barry M. (2003). "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes". *Construction and building materials* ;17(2):105-12.

[40] Teo, P.T., Zakaria, S.K., Salleh, S.Z., Taib, M.A.A., Sharif, N.M., Abu Seman, A., Mohamed, J.J., Yusoff, M., Yusoff, A.H., Mohamad, M., et al. (2020). "Assessment of Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review". *Metals* 10, 1347. 10.3390/met10101347.

[41] Rashad, A.M.J.C., and Materials, B. (2018). "Lightweight expanded clay aggregate as a building material—An overview". 170, 757-775.

[42] ASTM C143. (2015). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete".

[43] ASTM C138. (2017). "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete".

[44] BS EN 12390-3. (2019). "Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens".

[۴۵] آیین نامه بتن ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۴۰۰).

[46] ASTM C127-07. (2012). "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate".

[47] ASTM C128-07a. (2017). "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate".

[48] ASTM C131-06. (2010). "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine", ASTM C131-06.

[49] *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. (2015).

[50] Organization, I.N.S. (2017). "Aggregate- Determination of density, relative density (specific gravity) and water absorption of coarse aggregate- Test method".

[51] UNE standards. (2014). "Tests for mechanical and physical properties of aggregates". Part 6: Determination of particle density and water absorption.

[52] Vasanthi, P. (2014). "Flexural behaviour of reinforced concrete slabs using steel slag as coarse aggregate replacement". *Technol* 3, 141-146.

[53] BS EN 206. (2013). "Concrete — Specification, performance, production and conformity".

بررسی میزان تاثیر الیاف پلی پروپیلین، میکروسیلیس، و اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بر خواص مکانیکی و هدایت هیدرولیکی بتن تراوا



مجتبی کریمائی طبرستانی
استادیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران



مصطفی آدرسی
استادیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



علیرضا یمانی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

با افزایش شهرنشینی و توسعه‌ی سازه‌های شهری، سطوح نفوذناپذیر به صورت قابل ملاحظه‌ای گسترش پیدا کرده است. به عبارتی با کاهش سطوح نفوذپذیر، امکان تبادل انرژی و آب میان لایه‌های مختلف روسازی به شدت تقلیل یافته و مشکلات زیادی همچون سیلاب‌های غیر قابل کنترل، افزایش اثر جزیره گرمایی، آب‌گرفتگی معابر و از بین رفتن منابع آب سطحی را به همراه داشته است. به همین دلیل، جهت جلوگیری از مشکلات مذکور، موضوع روسازی‌های نفوذپذیر با استقبال کشورهای مختلف روبه‌رو شد. این روسازی‌ها انواع مختلفی داشته که یکی از مهم‌ترین آن‌ها روسازی با بتن تراوا است. از ویژگی‌های این بتن می‌توان به نبود ریزدانه در ساخت آن اشاره کرد. همچنین یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های آن، وجود منافذ متصل به هم پیوسته بوده که امکان کنترل و مدیریت روان آب را به راحتی فراهم می‌کند. بتن تراوا نسبت به بتن معمولی دارای مقاومت کمتری بوده و به همین دلیل نمی‌توان در تمامی سطوح از آن استفاده نمود و فقط در سطح‌های با بار ترافیکی کم کاربرد دارد. در همین راستا تحقیق‌های زیادی بر روی خواص مکانیکی و هدایت هیدرولیکی آن انجام گرفته است تا بتوان با حفظ نفوذپذیری، مقاومت آن را افزایش داد. این تحقیق‌ها معمولاً بر روی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها، میزان استفاده از میکروسیلیس و سایر مواد افزودنی و انواع الیاف‌ها متمرکز بوده است. در تحقیق حاضر، ابتدا با توجه به مطالعات انجام شده، برای هر یک از مواد تشکیل‌دهنده‌ی بتن تراوا میزان مشخصی تعیین گردید. بدین منظور برای سیمان مقدار ۲۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳۳ و نسبت سنگ‌دانه‌ها به سیمان برابر با ۴ انتخاب شد. سپس تاثیر الیاف پلی پروپیلین، میکروسیلیس و اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بر روی بتن تراوا مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور به میزان ۵ درصد وزنی سیمان از میکروسیلیس و ۰/۵ درصد حجم مخلوط از الیاف پلی پروپیلین در ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شد. همچنین تاثیر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها در محدوده‌های ۱۲/۵ الی ۹/۵ میلی‌متر و ۹/۵ الی ۴/۷۵ میلی‌متر بر روی خواص بتن تراوا بررسی شد. نتایج مشخص نمود که استفاده از الیاف، مقاومت مکانیکی را ۶۴ درصد کاهش داد و تنها موجب افزایش ۳۷ درصدی تخلخل و ۲۰ درصدی نفوذپذیری شد. میکروسیلیس نیز با افزایش حجم خمیر، مقاومت بتن تراوا را تا ۲۱ درصد افزایش داد ولی به کاهش ۳۰ درصدی در تخلخل و ۷۸ درصدی در نفوذپذیری منجر شد. در مورد اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها نیز مشخص شد که استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت‌تر در ساخت بتن تراوا، باعث کاهش مقاومت آن گردید ولی به افزایش نفوذپذیری (۰/۹۷ سانتی‌متر بر ثانیه) کمک کرد.

واژه‌های کلیدی: بتن تراوا، روسازی، نفوذپذیری، مقاومت فشاری، میکروسیلیس

گسترش شهرها در کنار افزایش قابل توجه ساخت راه‌ها، باعث اجرای بیشتر سطوح نفوذناپذیر شده است. این گسترش به حدی بوده که امروزه این سطوح به یک مشکل زیست‌محیطی با معایب متعدد تبدیل شده‌اند. شکل‌گیری سیلاب و افزایش اثر جزیره گرمایی شهری از جمله این مشکلات است. به منظور حل این مسئله، می‌توان یکی از مهم‌ترین راهکارها را اجرای روسازی‌های نفوذپذیر نام برد^۱. این نوع روسازی‌ها انواع مختلفی دارد که از مشهورترین آن می‌توان به روسازی با بتن تراوا^۲ اشاره کرد [۱]. این روسازی‌ها به آب و انرژی حرارتی اجازه عبور در لایه‌های مختلف سطوح را می‌دهند و از تشکیل سیلاب‌های گسترده و افزایش گرما در لایه‌های زیرین شهری جلوگیری می‌کنند. در واقع این سیستم می‌تواند به عنوان یک راه حل توانمند، روان‌آب اضافی را ذخیره کند و مشکلات بالقوه مانند سیلاب را به طور موثری برطرف نماید [۲]. از بتن تراوا به عنوان بتن بدون ریزدانه، بتن با تخلخل زیاد، و بتن نفوذپذیر هم یاد می‌شود [۳]، [۴]. این نوع خاص از بتن دارای توانایی هدایت و جمع‌آوری آب‌های سطحی برای شارژ مجدد مخازن آب زمینی است [۵]. بتن تراوا شامل منافذ متصل به هم پیوسته با طول بین ۲ تا ۸ میلی‌متر، تخلخل بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و مقاومت فشاری بین ۲/۸ تا ۲۸ مگاپاسکال است و توصیه می‌شود که نسبت آب به سیمان آن مابین ۰/۲۶ تا ۰/۴۵ قرار گیرد [۶]. همچنین می‌توان برای رسیدن

به تخلخل مطلوب، از دانه‌هایی با اندازه ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر استفاده کرد [۶]. علاوه بر این، بر خلاف بتن معمولی که شامل مصالح سنگی با دانه‌بندی پیوسته است، در بتن تراوا از سنگ‌دانه‌های هم‌اندازه و یکنواخت استفاده می‌شود [۷]. بر خلاف بتن معمولی، بتن تراوا از میزان ریزدانه‌ی کمی بهره می‌برد و یا اصلاً از ریزدانه در ساخت آن استفاده نمی‌شود [۸]. به دلیل نبود ریزدانه در ساخت بتن تراوا و میزان کم سیمان مورد استفاده، این بتن همچون بتن غلتکی^۳ رفتار نموده و دارای اسلامپ صفر است و به راحتی قابلیت جابه‌جایی ندارد [۹]–[۱۶]. به عبارتی، دو عامل کارایی و مقاومت فشاری که در بتن معمولی مورد توجه قرار می‌گیرند، در بتن تراوا جزو عوامل اساسی نیستند و در بتن تراوا سعی بر حفظ نفوذپذیری لازم به همراه مقاومت فشاری مطلوب است. در نتیجه نمی‌توان از فاکتورهایی که برای تعیین خواص بتن معمولی استفاده می‌شود، در سنجش بتن تراوا استفاده نمود.

محققان زیادی در مورد تاثیر اندازه و نوع سنگ‌دانه‌ها بر روی خواص بتن تراوا تحقیق کرده‌اند. یو و همکاران^۴ مشاهده کردند که با کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها، مقاومت بتن تراوا افزایش می‌یابد [۱۷]. این موضوع در حالی است که سان و همکاران^۵ به نتیجه کاملاً متفاوتی رسیدند و مشاهده کردند که با افزایش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها، تخلخل افزایش و مقاومت کاهش می‌یابد [۱۸]. در

³⁻ Roller compacted concrete (RCC)

⁴⁻ Yu et al.

⁵⁻ Sun et al.

¹⁻ Permeable pavement

²⁻ Permeable concrete pavement

از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مورد نیاز، نحوه‌ی تاثیر میکروسیلیس، الیاف پلی‌پروپیلین و اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بر روی خواص هدایت هیدرولیکی و مکانیکی بتن تراوا مشخص گردید.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۱.۲. مواد

در این پژوهش از سیمان پرتلند معمولی نوع ۲، مخلوط شن و ماسه‌ی طبیعی دوبارشسته شده (معدن شهریار) با ارزش ماسه‌ای بالای ۹۵ درصد و فاقد اندیس خمیری برای عبوری از الک ۲۰۰ آن به همراه الیاف پلی‌پروپیلین (شرکت رامکا) و افزودنی میکروسیلیس استفاده شد.

۱.۱.۲. سنگ‌دانه‌ها

به منظور تولید یک بتن تراوای با دوام و باکیفیت مناسب، توصیه می‌شود از سنگ‌دانه‌های سخت، تمیز و بدون مواد شیمیایی و ذرات رس استفاده گردد [۲۲]. علاوه بر این، رطوبت دانه‌ها تا حد زیادی بر خواص طرح مخلوط تاثیر می‌گذارد. بنابراین لازم است قبل از ساخت بتن تراوا، اطمینان حاصل شود که سنگ‌دانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک قرار دارند [۲۲]. در تحقیق حاضر از شن و ماسه طبیعی شهریار به دلیل رعایت الزامات مندرج در ASTM C33 و داشتن مقاومت کافی برای ساخت بتن تراوا استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات سنگ‌دانه‌های مورد استفاده ارائه شده است.

همین مورد ژانگ و همکاران^۶ به این نتیجه رسیدند که با کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها، به دلیل افزایش سطح ویژه مصالح سنگی، قفل و بست میان آن‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش مقاومت و کاهش تخلخل بتن تراوا می‌شود [۱۹]. در نتیجه نمی‌توان به یک نتیجه قطعی در مورد تاثیر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت بتن تراوا رسید. در مورد الیاف پلی‌پروپیلین^۷ و مواد افزودنی نیز پژوهش‌های بسیاری انجام شد. وو و همکاران^۸ مشاهده کردند که استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت کششی در بتن تراوا می‌گردد [۲۰]. در همین رابطه، بونیکلی و همکاران^۹ نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها افزایش مقاومت کششی در بتن تراوا در ترکیب با الیاف را شاهد بودند [۲۱].

در این تحقیق سعی شده تا تاثیر الیاف پلی‌پروپیلین و میکروسیلیس^{۱۰} و همچنین اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بر عملکرد بتن تراوا بررسی شود. بدین منظور ابتدا با استفاده از نتایج مطالعات قبلی میزان مناسبی برای هر یک از اجزای بتن تراوا انتخاب شد. در طرح مخلوط انتخابی، ۲۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳ و نسبت سنگ‌دانه به سیمان برابر با ۴ در نظر گرفته شد. دانه‌بندی نمونه‌ی شاهد نیز بر اساس ASTM C33: NO 89 تعیین گردید. سپس بعد

⁶⁻ Zhang et al.

⁷⁻ Polypropylene fibers

⁸⁻ Wu et al.

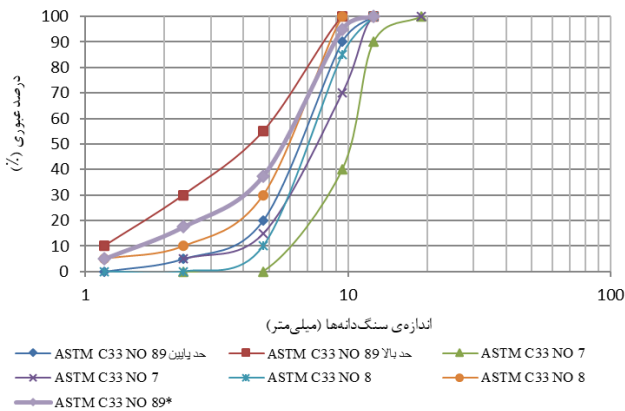
⁹⁻ Bonicelli et al.

¹⁰⁻ Micro silica

جدول ۱ مشخصات سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

مشخصه	استاندارد	واحد	محدوده
چگالی ویژه در حالت اشباع با سطح خشک ^{۱۱}	ASTM C127-128	-	۲/۷۳- ۲/۶۱
چگالی توده‌ای در حالت اشباع با سطح خشک ^{۱۲}	ASTM C29/C29M	gr/cm ³	۱/۴۴- ۱/۳۵
جذب آب توسط سنگ‌دانه‌ها ^{۱۳}	ASTM C127-128	%	۴/۹۵- ۱/۷۲
درصد رطوبت سنگ‌دانه‌ها در حالت طبیعی ^{۱۴}	ASTM C566	%	۱/۶۷- ۰/۳۵
کاهش جرم سنگ‌دانه‌ها توسط آزمایش لس آنجلس	ASTM C131	%	۱۸/۶- ۱۴/۲

و مقاومت مکانیکی بتن تراوا از منحنی شماره ۸ با درصد ریزدانه کم نیز استفاده شد. همچنین به منظور بررسی حداکثر اندازه دانه مصالح سنگی بر خواص هدایت هیدرولیکی و مقاومت مکانیکی بتن تراوا از منحنی شماره ۷ با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلیمتر استفاده شد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی منتخب ASTM C33 NO 89 مورد استفاده در تحقیق حاضر

۲.۱.۲. مواد سیمانی و الیاف پلی‌پروپیلین

در این پژوهش از سیمان پرتلند معمولی نوع دوم طبق استاندارد ASTM C150 استفاده گردید [۲۴]. ویژگی‌های این سیمان در جدول ۲ آورده شده است. همچنین از میکروسیلیس نیز به عنوان ماده افزودنی مطابق با استاندارد ASTM C1240 استفاده شد تا اثرات آن برافزایش مقاومت و تغییرات احتمالی بر هدایت هیدرولیکی بتن تراوا نسبت به روی طرح مخلوط شاهد بررسی شود [۲۵]. ویژگی‌ها و مواد تشکیل‌دهنده میکروسیلیس در جدول ۳ نمایش داده شده است. در تحقیق حاضر، اثرات الیاف پلی‌پروپیلین بر مخلوط شاهد بررسی شد. الیاف پلی‌پروپیلین توسط شرکت رامکا (ایران) تولید و تحت استاندارد ASTM C1116 (نوع سوم) در بتن استفاده گردید [۲۶]. در جدول ۴ مشخصات فیزیکی این الیاف مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، الیاف پلی‌پروپیلین دارای چگالی ۰/۹۱ گرم

برای ساخت یک طرح مخلوط بهینه که شامل استحکام لازم و خواص هدایت هیدرولیکی مناسب است، لازم است میزان ریزدانه محدود شود. این مقدار در تحقیق حاضر در حدود ۵ تا ۷ درصد از کل سنگ‌دانه‌ها در نظر گرفته شد. به طور کلی، دانه‌بندی و تعیین ویژگی‌های مواد سنگی برای ساخت بتن تراوا توسط ASTM C33/C33M و منحنی‌های مربوطه (نشان داده شده در شکل ۱) به وسیله ASTM C136 تعیین گردید [۲۲]، [۲۳]. در شکل ۱ حدود بالا و پایین منحنی‌های دانه‌بندی مختلف مصالح سنگی پیشنهاد شده توسط ASTM C33/C33M برای ساخت بتن تراوا نشان داده شده است. در این پژوهش از منحنی دانه‌بندی ASTM C33 No. 89 با حداکثر دانه بندی ۹/۵ میلیمتر استفاده شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر ریزدانه بر خواص هدایت هیدرولیکی

¹¹⁻ Specific Gravity (Gs) in saturated surface dry state (SSD)

¹²⁻ Bulk Density (Unit Weight) in saturated surface dry state

¹³⁻ Absorption of aggregate

¹⁴⁻ Moisture content in dried state (oven dried or OD)

۲/۳	SO_3
۱	$Alkalis (Na_2O\%+0.658K_2O\%)$
۱/۴	$Free\ Cao$
۴۵/۵	C_3S
۲۸/۰	C_2S
۶/۵	C_3A
۱۲/۲	C_4AF

جدول ۳ خصوصیات و مواد تشکیل دهنده‌ی میکروسیلیس مورد استفاده در تحقیق حاضر

ویژگی	مقدار
افت حرارتی (%)	۳/۴۱
pH	۷/۶۶
چگالی توده‌ای (kg/m^3)	۳۰۰
چگالی ویژه	۲/۲
مواد تشکیل دهنده	درصد بر حسب جرم
SiO_2	۹۱/۹۹
Al_2O_3	۰/۶۰
Fe_2O_3	۱/۳۱
CaO	۰/۳۲
MgO	۱/۲۲
SO_3	۰/۳۸
Cl	۰/۰۴
H_2O	۰/۲۴
Na_2O	۰/۴۶
K_2O	۱/۵۲

جدول ۴ مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلین مورد استفاده در تحقیق حاضر

مشخصه	مقدار
طول (میلی متر)	۱۲
نسبت طول به قطر	۱۲۰۰
چگالی (gr/cm^3)	۰/۹۱
مقاومت گسیختگی ^{۲۰} (مگاپاسکال)	۴۰۰≤
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳۵۰۰

بر سانتی متر مکعب، به طول ۱۲ میلی متر و قطر ۳۳ میکرون است. یکی از مهم ترین ویژگی های این الیاف، اقتصادی بودن و در دسترس بودن آن است و می توان به راحتی از آن برای افزایش خصوصیات مکانیکی و هدایت هیدرولیکی بتن تراوا همچون افزایش مقاومت در برابر سایش و چرخه ی یخ زدن و آب شدن بهره برد [۲۷]. در این پژوهش به کمک نتایج تحقیقات قبلی مقدار مناسبی برای میکروسیلیس و الیاف پلی پروپیلین انتخاب گردید. طبق گزارش های لو و همکاران ۱۵ می توان با جایگزینی ۵ درصد از سیمان با میکروسیلیس به میزان مناسبی از مقاومت در بتن تراوا رسید [۲۸] همچنین طبق تحقیق های رهدر و همکاران ۱۶، در صورتی که به اندازه ی ۰/۵ درصد از حجم مخلوط از الیاف پلی پروپیلین استفاده گردد، می توان به مقاومت و خواص هدایت هیدرولیکی مناسبی دست یافت [۲۹].

جدول ۲ خصوصیات و مواد تشکیل دهنده‌ی سیمان پرتلند نوع II با توجه به استاندارد ASTM C150

خاصیت	مقدار
افت حرارتی (%) ^{۱۷}	۱/۳
باقی مانده‌ی نامحلول (%) ^{۱۸}	۰/۶
سطح ویژه‌ی موثر (m^2/kg) ^{۱۹}	۲۹۰
چگالی ویژه	۳/۱۵
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۴۳
مواد تشکیل دهنده	درصد بر حسب جرم
SiO_2	۲۱/۲۴
Al_2O_3	۵/۰
Fe_2O_3	۴/۰
CaO	۶۳/۰۴
MgO	۲

^{۱۵} Liu et al.

^{۱۶} Rehder et al.

^{۱۷} Loss on ignition

^{۱۸} Insoluble residue

^{۱۹} Specific surface area

^{۲۰} Fracture strength

۲.۲. روش انجام تحقیق

دیگر طرح‌ها استفاده شد. میزان سیمان و نسبت آب به سیمان و نسبت سنگ‌دانه به سیمان در تمامی طرح‌ها برابر است و با توجه به مطالعات گذشته انتخاب گردید [۲۲]، [۳۰]، [۳۱]. در جدول ۵، طرح مخلوط‌ها نشان داده شده است.

در این تحقیق از ۶ نوع طرح مخلوط استفاده شد. طرح شماره ۱، طرح شاهد است و سایر طرح‌ها نسبت به آن بررسی می‌گردند. دانه‌بندی طرح‌های ۱ الی ۴، طبق ASTM NO 89 انجام شده و فقط در دانه‌بندی طرح‌های ۵ و ۶ از اندازه‌های مشخص و متفاوت نسبت به

جدول ۵ مشخصات طرح مخلوط‌ها در تحقیق حاضر

شماره طرح	کد آزمایش	شرایط آزمایش	نسبت سنگ‌دانه به سیمان	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m^3)
۱	Control mix	دانه‌بندی طبق ASTM NO 89	۰/۳۳	۴	۲۸۰
۲	SF5PP0	۵٪ جایگزینی سیمان با میکروسیلیس	۰/۳۳	۴	۲۸۰
۳	SF0PP0.5	استفاده از الیاف به اندازه‌ی ۰/۵ حجم مخلوط	۰/۳۳	۴	۲۸۰
۴	SF5PP0.5	۵٪ جایگزینی سیمان با میکروسیلیس، استفاده از الیاف به اندازه‌ی ۰/۵ حجم مخلوط	۰/۳۳	۴	۲۸۰
۵	A9.5	اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بین ۹/۵ و ۴/۷۵ میلی‌متر (منحنی شماره ۸)	۰/۳۳	۴	۲۸۰
۶	A12.5	اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بین ۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر (منحنی شماره ۷)	۰/۳۳	۴	۲۸۰

نمونه‌ها نسبت به طرح ۱ بررسی گردید. بدین منظور ۶ نمونه از هر یک از طرح‌های ۵ و ۶ ساخته شد چرا که در این دو طرح، کانتابرو انجام نمی‌شود و آزمایش کانتابرو به همراه آزمایش‌های دیگر در طرح‌های ۱ الی ۴ بررسی می‌شود. در ادامه پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی، آزمایش‌های تخلخل بر اساس استاندارد ASTM B962-17 [۳۲]، مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 [۲۲]، مقاومت کششی برزیلی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۲۳] و کانتابرو بر اساس استاندارد ASTM C1747 [۲۴] بر روی آن‌ها انجام می‌گیرند. با توجه به این موضوع که آزمایش کانتابرو مخصوص روسازی‌های آسفالتی بوده، می‌توان از آن جهت سنجش مقاومت سطح بتن متخلخل در مقابل

پس از تعیین طرح مخلوط‌ها، تاثیرات الیاف پلی‌پروپیلین و میکروسیلیس بر روی طرح مخلوط شماره ۱ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور از چهار طرح مخلوط ۱ الی ۴، هر کدام ۹ نمونه و در مجموع ۳۶ نمونه‌ی بتنی ساخته شد. در واقع، طرح اول همان طرح مخلوط شاهد بود و در طرح دوم، ۵ درصد از سیمان با میکروسیلیس جایگزین گردید [۲۵]. در طرح مخلوط سوم، به اندازه‌ی ۰/۵ درصد از حجم مخلوط از الیاف پلی‌پروپیلین استفاده شد و طبق استاندارد ASTM C1116 نوع سوم، نمونه‌ی بتنی ساخته شد [۲۶]. طرح مخلوط چهارم نیز ترکیبی از طرح مخلوط دوم و سوم بود به صورتی که ۵ درصد میکروسیلیس و ۰/۵ درصد حجمی الیاف به مخلوط اضافه شد. در طرح‌های ۵ و ۶ نیز تفاوت در نحوه‌ی دانه‌بندی نسبت به طرح شاهد و تاثیر آن در نفوذپذیری و مقاومت

سایش استفاده کرد [۳۶]، [۳۷]. در شکل ۲ نمایی از نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده در تحقیق حاضر

همچنین برای محاسبه نفوذپذیری نمونه‌های بتن تراوا، یک دستگاه آزمون نفوذپذیری در آزمایشگاه ساخته شد که بر مبنای بار افتان در خاک عمل می‌کرد [۳۸]–[۴۱]. این دستگاه براساس نمونه‌ی ساخته شده توسط نیتالاث و همکاران طراحی گردید [۴۰] و طرح ساخته شده‌ی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ دستگاه سنجش نفوذپذیری ساخته شده در تحقیق حاضر

نحوه‌ی انجام آزمایش نفوذپذیری بدین صورت بود که زمان رسیدن آب از ارتفاع اولیه به ثانویه ثبت گردید و

سپس توسط رابطه‌ی ۱، نفوذپذیری نمونه‌ی بتنی محاسبه شد [۴۲].

$$K = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad ۱$$

در رابطه‌ی ۱، نفوذپذیری با k ، سطح مقطع و طول نمونه با A و L ، سطح مقطع لوله توسط a ، ارتفاع اولیه سطح آب با h_1 و ارتفاع ثانویه سطح آب با h_2 نشان داده شده است. همچنین زمان رسیدن سطح آب از ارتفاع اولیه به ثانویه توسط t نمایش داده شده است.

۳. تحلیل نتایج

۱.۳. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، برزیلی،

تخلخل و نفوذپذیری

نتایج آزمایش‌های مذکور و همچنین مقایسه‌ی بین طرح مخلوط‌های مختلف در شکل ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس باعث افزایش حجم خمیر سیمانی شد و در نتیجه باعث شد سطح سنگ‌دانه‌ها بهتر پوشانده شود و خواص مکانیکی بتن تراوا همچون مقاومت فشاری و کششی در تست برزیلی افزایش یابد (شکل ۴ الف و ب). از طرفی به دلیل افزایش حجم خمیر، تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافت چرا که از پراکندگی خلل و فرج بتن تراوا می‌کاهد و منافذ آن را می‌بندد (شکل ۴ ج و د). لازم به ذکر است که لو و همکاران نیز در مورد تاثیر میکروسیلیس بر روی ویژگی‌های بتن تراوا به نتایج مشابهی دست یافتند و افزایش مقاومت و کاهش تخلخل را مشاهده کردند [۲۸]. در این تحقیق مشاهده شده که استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش ۲۱ درصدی در مقاومت مکانیکی، کاهش ۳۰ درصدی در تخلخل و ۷۸ درصدی در نفوذپذیری بتن تراوا است. همچنین استفاده از الیاف پلی‌پروپلین به افزایش تخلخل و نفوذپذیری در بتن تراوا کمک نمود (شکل ۴ ج و د). دلیل این موضوع این است که با توجه

به میزان کم خمیر، الیاف در بین سنگدانه و خمیر قرار گرفته است و مانع چسبندگی میان سنگدانه‌ها شد. همین موضوع به افزایش منافذ متصل و پراکندگی فضاهای خالی کمک کرد و در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم شد (شکل ۴ الف و ب). ازل و همکاران^{۲۱} نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و در تحقیق آن‌ها اثر مخرب الیاف پلی‌پروپیلین بر روی مقاومت بتن تراوا آشکار است [۲۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلین باعث کاهش ۶۴ درصدی در مقاومت مکانیکی، افزایش ۳۷ درصدی در تخلخل و افزایش ۲۰ درصدی در نفوذپذیری بتن تراوا است. در مورد استفاده از ترکیب میکروسیلیس با الیاف پلی‌پروپیلین نیز می‌توان با توجه به تحلیل‌های حالات قبلی نتایج حاصل شده را توجیه نمود. به عبارتی با این‌که استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش حجم خمیر می‌شود، ولی به دلیل وجود الیاف میان سنگدانه‌ها و ممانعت از ایجاد چسبندگی کافی، تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری افزایش پیدا می‌کند و باعث کاهش خواص مکانیکی نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌گردد. در مورد اندازه‌ی سنگدانه‌ها نیز مشاهده می‌شود که مقاومت با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها، کاهش و تخلخل افزایش می‌یابد (شکل ۴ الف و ج). همچنین مشاهده شد با کاهش مقدار ریزدانه در مخلوط مصالح سنگی از مقاومت کاسته می‌شود و تخلخل افزایش می‌یابد (شکل ۴ الف و ج). قطعاً دلیل این موضوع را میتوان در افزایش فضای خالی مصالح سنگی با کاهش مقدار ریزدانه و همچنین با افزایش حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی مرتبط دانست. با افزایش فضای خالی مصالح سنگی، سهم خمیر سیمان

نسبت به سهم مصالح سنگی کاهش می‌یابد و در نتیجه ضخامت فیلم خمیر سیمان که سنگدانه‌ها را می‌پوشاند و باعث چسبندگی بین آن‌ها می‌شود کاهش می‌یابد که این به کاهش مقاومت بتن و افزایش میزان تخلخل بتن تراوا منجر خواهد شد. سان و همکاران نیز در تحقیق خود به نتایج مشابهی دست یافتند و با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها، شاهد کاهش مقاومت و افزایش تخلخل بودند [۱۸].

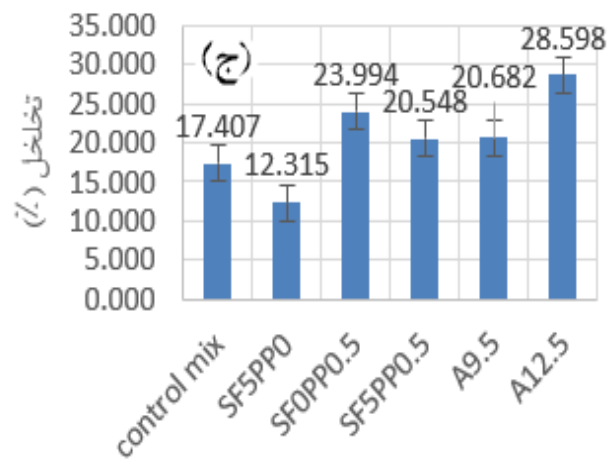
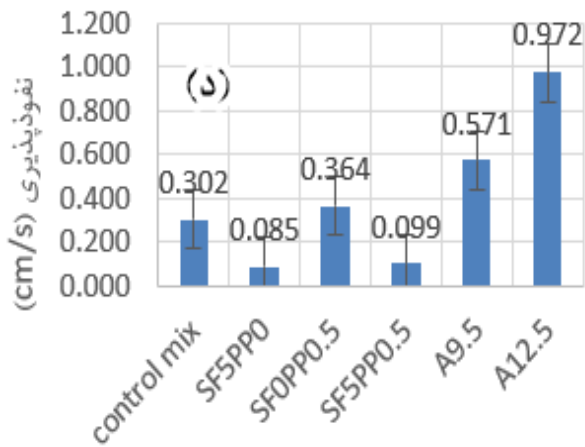
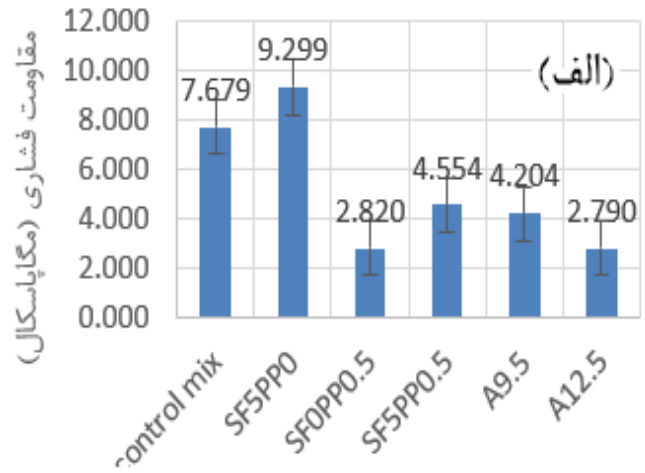
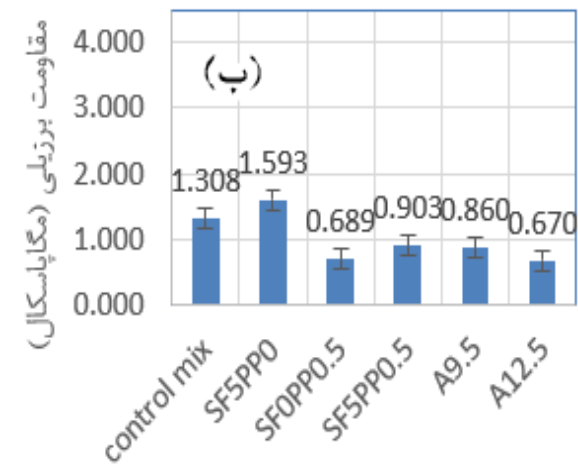
۲.۳. نتایج آزمایش کانتابرو

جهت انجام آزمایش کانتابرو براساس استاندارد مذکور در ابتدا سه نمونه‌ی باقی‌مانده از هر طرح مخلوط ۱ الی ۴ وزن شد و به نوبت درون دستگاه لس‌آنجلس قرار داده شد و پس از اتمام ۱۵۰ سیکل چرخش، مجدداً نمونه‌ها وزن گردید و دوباره درون دستگاه قرار داده شد و پس از گذشت ۱۵۰ سیکل دیگر، برای بار سوم وزن نمونه‌ها یادداشت شد. سپس میزان کانتابرو محاسبه گردید. نحوه‌ی تخریب نمونه‌ها در شکل ۵ و نتایج آزمایش کانتابرو در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ بطور بصری مشخص است، با افزایش سیکل چرخش، میزان جرم از دست رفته نیز افزایش پیدا می‌کند. این موضوع با تحقیق وو و همکاران نیز هم‌خوانی دارد [۲۶].

مقادیر کاهش جرم در آزمایش کانتابرو در شکل (۶ الف) مشخص است. بر اساس نتایج بدست آمده، طرح مخلوط SF5PP0 دارای کمترین میزان کاهش جرم (کمتر از ۲ درصد) و طرح مخلوط SFOPP0.5 دارای بیش‌ترین میزان کاهش جرم (بیشتر از ۱۲ درصد) در آزمایش سایش کانتابرو است (شکل ۶ ب). دلیل این موضوع این است که با افزایش تخلخل و به تبع آن کاهش مقاومت، خواص مکانیکی بتن تراوا از جمله مقاومت در برابر سایش، کاهش می‌یابد (شکل ۶ ج و د). همچنین الیاف و همکاران در این مورد اشاره می‌کنند که مخلوط‌های با تخلخل بالاتر و مقاومت کمتر، نسبت به کاهش جرم در مقابل سایش ضعیف بوده و با سرعت بیش‌تری تخریب

مشاهده است [۶].

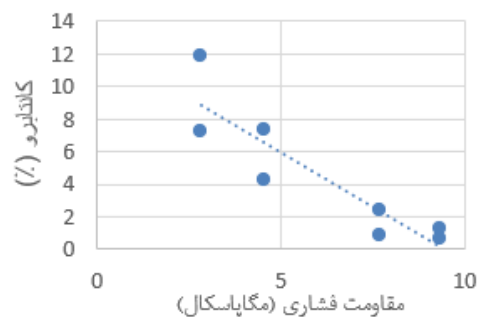
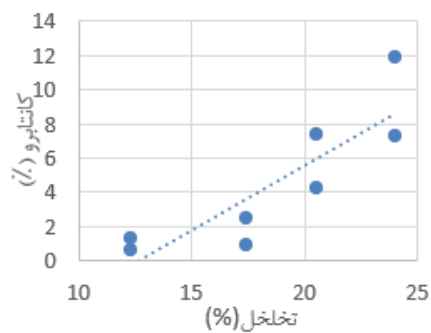
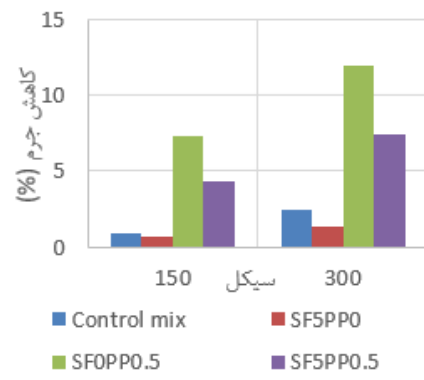
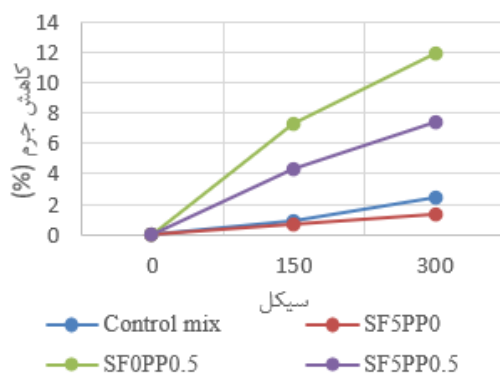
می‌گردند که این موضوع در آزمایش حاضر نیز قابل



شکل ۴ مقایسه‌ی ویژگی‌های طرح مخلوط‌های ساخته شده در این تحقیق



شکل ۵ تخریب نمونه‌های بتنی ناشی از افزایش سیکل چرخش در دستگاه لس آنجلس



شکل ۶ نتایج آزمایش کانتابرو در تحقیق حاضر

۴. نتیجه گیری

می‌گردد. در نتیجه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلین در بتن تراوا که نسبت خمیر به سنگدانه ناچیز است، توصیه نمی‌شود.

۲- استفاده از میکروسیلیس به افزایش مقاومت مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش منجر خواهد شد. به صورتی که بیش‌ترین مقاومت فشاری مربوط به طرح مخلوط SF5PP0 با مقدار ۹/۳ مگاپاسکال است. دلیل این موضوع استفاده از میکروسیلیس است که باعث افزایش حجم خمیر شده و در نتیجه خمیر بیش‌تری سنگدانه‌ها را می‌پوشاند. به صورت کلی مشاهده شد که استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش ۲۱ درصدی در مقاومت مکانیکی، کاهش ۳۰ درصدی

در این تحقیق، تاثیر الیاف پلی‌پروپیلین و ماده‌ی افزودنی میکروسیلیس بر روی خواص مکانیکی و هدایت هیدرولیکی بتن تراوا بررسی شد. همچنین تاثیر اندازه‌ی سنگدانه‌ها بر روی خواص مکانیکی و هدایت هیدرولیکی این نوع بتن مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارتند از:

۱- استفاده از الیاف پلی‌پروپیلین باعث کاهش ۶۴ درصدی در مقاومت مکانیکی، افزایش ۳۷ درصدی در تخلخل و ۲۰ درصدی در نفوذپذیری بتن تراوا می‌شود. دلیل این موضوع این است که برخلاف بتن معمولی، در بتن متخلخل از خمیر بسیار کمی استفاده می‌شود و وجود الیاف در آن، از چسبندگی بین خمیر و سنگدانه‌ها جلوگیری کرده و مانع ایجاد قفل و بست لازم میان سنگدانه‌ها

۴- همچنین با کاهش میزان ریزدانه از ۵ الی ۷ درصد در دانه بندی شماره ۸۹ به ۲ الی ۵ درصد در دانه بندی شماره ۸، مقاومت در حدود ۶۰ درصد، تخلخل در حدود ۲۵ درصد و نفوذپذیری در حدود ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

۵- مخلوطی که دارای بیش‌ترین مقاومت فشاری بوده (SF5PP0)، دارای بیش‌ترین مقاومت در برابر سایش است و مخلوطی که دارای کم‌ترین مقاومت فشاری است (SF0PP0.5)، با بیش‌ترین کاهش جرم در مقابل سایش همراه شد.

در تخلخل و ۷۸ درصدی در نفوذپذیری بتن تراوا می‌شود.

۳- هرچه اندازه‌ی اسمی مصالح سنگی افزایش یابد، مقاومت کمتر و نفوذپذیری و تخلخل بیش‌تر می‌شود، به صورتی که بیش‌ترین نفوذپذیری مربوط به طرح مخلوط A12.5 بوده و مقدار آن ۰/۹۷ سانتی‌متر بر ثانیه است. دلیل آن افزایش فضای خالی مصالح سنگی، با افزایش اندازه اسمی دانه-بندی مصالح سنگی است. در این حالت با ثابت بودن حجم خمیر، خمیر کمتری اطراف سنگدانه‌ها را می‌پوشاند و مقاومت کاهش می‌یابد.

۵. مراجع و منابع

- [1] J. Chen, R. Chu, H. Wang, L. Zhang, X. Chen, and Y. Du, 2019, "Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement," *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117722, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117722.
- [2] W. Huang and H. Wang, 2022, "Multi-aspect engineering properties and sustainability impacts of geopolymer pervious concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 242, p. 110035, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110035.
- [3] M. Adresi, B. Shirgir, and A. Nagherzadeh, 2022, "Porous concrete pavement," *Road*, vol. 30, no. 111, pp. 83–96.
- [4] S. N. Basavana Gowda, S. Kumar Goudar, H. P. Thanu, and B. Monisha, 2023, "Performance evaluation of alkali activated slag based recycled aggregate pervious concrete," *Mater. Today Proc.*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.085.
- [5] X. Zhu and Z. Jiang, 2023, "Reuse of waste rubber in pervious concrete: Experiment and DEM simulation," *J. Build. Eng.*, vol. 71, p. 106452, doi: 10.1016/j.job.2023.106452.
- [6] K. S. Elango, R. Gopi, R. Saravanakumar, V. Rajeshkumar, D. Vivek, and S. V. Raman, 2021, "Properties of pervious concrete – A state of the art review," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 2422–2425, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.839.
- [7] M. V. Seshagiri Rao, T. Manoj, and K. Ajith Narayana, 2023, "Role of supplementary cementitious materials in the development of sustainable pervious concrete," *Mater. Today Proc.*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.332.
- [8] Y. Zhu, H. Fu, P. Wang, P. Xu, Z. Ling, and D. Wei, 2023, "Pore structure characteristics, mechanical properties, and freeze–thaw resistance of vegetation-pervious concrete with unsintered sludge pellets,"

Constr. Build. Mater., vol. 382, p. 131342, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131342.

- [9] M. Adresi, M. A. Ghanbari, and A. Omid, 2021, "Investigation of the Effect of Various Mixing Designs and Macro Textures on the Skid Resistance of Roller Compacted Concrete Pavement Surface," *Civ. Infrastruct. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 111–129.
- [10] M. Yekrangnia and M. Adresi, 2021, "Study on the effects of Polypropylene fibers on the splitting strength, strain capacity and energy absorption of rolled compacted semi-lightweight concrete with applicability in concrete blocks," *Sharif J. Civ. Eng.*, vol. 37.2, no. 3.1, pp. 135–141, doi: 10.24200/j30.2021.56548.2836.
- [11] M. Adresi, 2022, "The effect of mineralogy and grain size of fine aggregate and different macro textures on the durability of the RCCP surface under abrasion conditions," *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 54, no. 1, pp. 343–362.
- [12] J. Kevern, V. Schaefer, and K. Wang, 2009, "Design of Pervious Concrete Mixtures," *NPCPA*, vol. 3, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/237654465>
- [13] C. Chhorn, S. J. Hong, and S. W. Lee, 2017, "A study on performance of roller-compacted concrete for pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 535–543, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.135.
- [14] M. Adresi and G. Lacidogna, 2021, "Investigating the micro/macro-texture performance of roller-compacted concrete pavement under simulated traffic abrasion," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 12, pp. 1–19, doi: 10.3390/app11125704.
- [15] H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, and M. Adresi, 2019, "Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 88–98, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223.
- [16] A. Ahmadi, M. K. Gogheri, M. Adresi, and E. Amoosoltani, 2020, "Laboratory evaluation of roller compacted concrete containing RAP Amin," *Adv. Concr. Constr.*, doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2020.10.6.489>.
- [17] F. Yu, D. Sun, J. Wang, and M. Hu, 2019, "Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 463–475, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140.
- [18] Z. Sun, X. Lin, and A. Vollpracht, 2018, "Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 797–803, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067.
- [19] Z. Zhang, Y. Zhang, C. Yan, and Y. Liu, 2017, "Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 112–118, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203.
- [20] H. Wu, Z. Liu, B. Sun, and J. Yin, 2016, "Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 117, pp. 63–71, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130.
- [21] A. Bonicelli, G. M. Arguelles, and L. G. F. Pumarejo, 2016, "Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads," *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 1568–1573,

doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.628.

- [22] ACI-552R, 2010 , “Report on Pervious Concrete, American Concrete Institute,” *Aci 522R-10*, p. 38.
- [23] ASTM C136/C136M, 2015 , “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” *ASTM Int.*, pp. 1–5, doi: 10.1520/C0136.
- [24] ASTM C150/C150M, 2015 , “Standard Specification for Portland Cement,” *ASTM Int.*, vol. 04, no. Reapproved, pp. 1–8, doi: 10.1520/C0150.
- [25] ASTM C1240-15, 2015 , “C1240 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures,” *ASTM Int.*, pp. 1–7, doi: 10.1520/C1240-15.2.
- [26] ASTM C1116, 2015 , “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete,” *ASTM Int.*, no. Reapproved, doi: 10.1520/C1116.
- [27] S. Elavarasan, A. Priya, S. Bharath, R. Satheeshkanna, and D. Arunraj, 2022 , “Experimental studies on pervious concrete reinforced with polypropylene fiber,” *Mater. Today Proc.*, vol. 68, pp. 2280–2283, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.492.
- [28] R. Liu et al., 2018 , “Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes,” *Processes*, vol. 6, no. 7, doi: 10.3390/pr6070078.
- [29] B. Rehder, K. Banh, and N. Neithalath, 2014 , “Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 118, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.015.
- [30] M. Adresi, A. Yamani, M. Karimaei Tabarestani, and H. Rooholamini, 2023 , “A comprehensive review on pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 407, p. 133308, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133308.
- [31] O. AlShareedah and S. Nassiri, 2021 , “Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 288, p. 125095, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125095.
- [32] ASTM B962-17, “Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes’ Principle.” *ASTM International, West Conshohocken*, 2009.
- [33] ASTM C39, 2005 , “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1,” *ASTM Int.*, vol. i, no. March, pp. 1–7.
- [34] ASTM C496, 2011 , “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” vol. i, pp. 1–5, doi: 10.1520/C0496.
- [35] ASTM C1747, 2013 , “Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion,” *ASTM Int.*, pp. 2–5, doi: 10.1520/C1747.
- [36] D. E. Watson, K. A. Moore, K. Williams, and L. A. Cooley, 2003 , “Refinement of New-Generation Open-Graded Friction Course Mix Design,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1832, pp. 78–85, doi: 10.3141/1832-10.
- [37] H. Wu, B. Huang, X. Shu, and Q. Dong, 2011 , “Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 697–702, doi:

10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000210.

- [38] H. A. Ibrahim et al., 2020 , “Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 253, p. 119251, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119251.
- [39] V. R. Schaefer, K. W. and M. T. Suleiman, and J. Kevern, 2006 , “Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Climates,” no. January, pp. 1–67, [Online]. Available: http://www.ctre.iastate.edu/reports/mix_design_pervious.pdf
- [40] N. Neithalath, J. Weiss, and J. Olek, 2006 , “Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements,” *ResearchGate*, no. 315, pp. 1–22, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228788494_Predicting_the_Permeability_of_Pervious_Concrete_Enhanced_Porosity_Concrete_from_Non-Destructive_Electrical_Measurements?enrichId=rgreq-eac44b75b2dc10557296cdd1b2860a41-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIyOD
- [41] B. Huang, H. Wu, X. Shu, and E. G. Burdette, 2010 , “Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 5, pp. 818–823, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025.
- [42] F. Montes and L. Haselbach, 2006 , “Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 960–969, doi: 10.1089/ees.2006.23.960.
- [43] B. Furkan Ozel, Ş. Sakallı, and Y. Şahin, 2022 , “The effects of aggregate and fiber characteristics on the properties of pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 356, p. 129294, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129294.

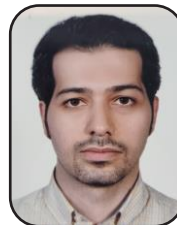
مقایسه ی عملکرد الیاف میکرو مختلف در کنترل و کاهش ترک خوردگی های

ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین



یوسف ثمین

رئیس هیئت مدیره شرکت دانش رویان یکتا ماندگار
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمدرضا حاجی زاده

کارشناس ارشد، مدیریت MBA
دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران TBS
عضو حقوقی انجمن بتن ایران

چکیده

دال های بتنی متکی بر زمین از انواع سازه های پر کاربرد در صنعت عمران محسوب شده که در کاربری های مختلف مانند رویه های بتنی، کف های صنعتی و کف پارکینگ ها، مورد استفاده قرار می گیرد. وقوع و رشد ترک خوردگی در این نوع سازه های بتنی از متغیر های مهم در طراحی آن بوده و می تواند باعث خرابی و کاهش عمر خدمت دهی این سازه های بتنی شود. ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکی از انواع شایع ترک خوردگی در سازه های بتنی مسطح مانند دال های متکی بر زمین است. استفاده از الیاف مختلف، یکی از رویکردهای نوین در صنعت بتن به منظور کنترل و کاهش این ترک خوردگی ها می باشد. تحقیق حاضر به مقایسه ی عملکرد الیاف میکرو مختلف¹ (*Micro-synthetic fiber*) در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین می پردازد. پس از تعیین نسبت های اختلاط بتن دال متکی بر زمین مطابق با دستور العمل ACI 211-09، الیاف میکرو پلی پروپیلن، میکرو پلی استر و میکرو شیشه در مقدار مصرف ۰٫۱ درصد حجم بتن تازه مورد استفاده قرار گرفتند. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی با استفاده از روش استاندارد ASTM C1579 و با استفاده از روش تحلیل تصاویر دیجیتال، ارزیابی گردید. نتایج حاکی از آن بوده که تعداد الیاف میکرو در یک حجم ثابت و خصوصیات مقاومتی آنان نقش مهمی در عملکرد آن دارد. الیاف میکرو شیشه به دلیل خصوصیات مقاومتی بالاتر از الیاف میکرو پلی استر، عملکرد بهتری از خود نشان داده و منجر به کاهش متوسط عرض، طو و مساحت ترک خوردگی به ترتیب تا میزان ۴۹، ۲۰ و ۶۰ درصد نسبت به دال بتنی شاهد گردید. اما، الیاف میکرو پلی پروپیلن به دلیل تعداد بالاتر نسبت به الیاف میکرو شیشه و برخورداری از خصوصیات مقاومتی قابل قبول، عملکرد بهتری داشته و باعث کاهش متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی دال بتنی شاهد به ترتیب به میزان ۶۴، ۵۷ و ۸۱ درصد شد. دیده شد که الیاف میکرویی مختلف مورد نظر در این تحقیق، اثر بهتری در کنترل و کاهش ترک خوردگی در جهت عرضی دارد. عنوان شد که الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقدار مصرف کافی (در اینجا به میزان ۰٫۱ درصد حجم بتن تازه) عملکرد بسیار خوبی در کنترل و کاهش عرضی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین دارد. تاثیر این نوع الیاف در کنترل و کاهش طولی ترک خوردگی کمتر بوده اما نسبت به دال بتنی شاهد، باعث کاهش چشمگیر این متغیر هندسی ترک خوردگی می شود. کلمات کلیدی: دال های بتنی متکی بر زمین، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، الیاف میکرو پلی پروپیلن، الیاف میکرو شیشه، الیاف میکرو پلی استر

¹ پلی پروپیلن و شیشه

دال های بتنی متکی بر زمین، از انواع سازه های بتنی پر کاربرد در صنعت عمران بوده که در کاربری های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. کف های مورد استفاده در پارکینگ ها، کف های صنعتی و کف های مورد استفاده در بنادر، از جمله دال های متکی بر زمین می باشند [1-5]. مطابق با دستور العمل ACI 360-10، دال های متکی بر زمین، دال هایی بوده که بر روی زمین قرار داشته و تکیه گاهشان، سطح زمین زیر آن ها است. وظیفه ی اصلی این نوع دال ها تحمل بار های وارده و انتقال این بار ها در میزان قابل تحمل برای زمین زیر آن است. دال های بتنی متکی بر زمین، می توانند به طور مستقیم بر روی سطح خاک بستر قرار داده شده و یا بر روی سطح زیر اساس و اساس ساخته شده اجرا شوند. دال های بتنی متکی بر زمین از نظر انتخاب های طراحی اصلی، به چهار دسته شامل دال بتنی غیر مسلح، دال های بتنی مسلح شده به منظور محدود کردن ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی، تنش های حرارتی و بار های وارده، دال های بتنی مسلح به منظور جلوگیری از ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی، تنش های حرارتی و بار های وارده و دال های بتنی سازه ای طراحی شده مطابق با دستور العمل ACI 318، تقسیم بندی می شوند [6]. این تقسیم بندی، اهمیت ترک خوردگی ناشی از عوامل مختلف در دال های بتنی متکی بر زمین را نشان می دهد چرا که با ایجاد اولین ترک

در دال بتنی، زمینه برای رشد ترک خوردگی در دیگر قسمت های سازه به وجود آمده و می تواند منجر به شکست موضعی و یا کلی دال گردد. از این جهت در نظر گرفتن عوامل مختلف ترک خوردگی و به کار گیری رویکرد های مناسب به منظور جلوگیری و یا کنترل این ترک خوردگی ها در طراحی و ساخت دال های بتنی متکی بر زمین اهمیت می یابد.

جمع شدگی در مخلوط های بتنی یکی از عوامل مهم ایجاد کننده ی ترک خوردگی در اغلب سازه های بتنی از جمله دال های بتنی متکی بر زمین است. در بین جمع شدگی های مختلفی که مخلوط های بتنی از زمان ساخت تا انتهای عمر خدمت دهی خود تجربه می کند، جمع شدگی خمیری به دلیل مسطح بودن دال های بتنی متکی بر زمین و نسبت سطح به ضخامت بالای این سازه ها، اهمیت نسبی بیشتری داشته و عامل شایعی در ایجاد ترک خوردگی در دال های بتنی می گردد [7,8]. جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی به دلیل خشک شدن سریع سطح دال و تشکیل فشار های مویینگی منفی در بتن رخ می دهد. پس از اجرای دال بتنی، به دلیل اختلاف وزن مصالح تشکیل دهنده ی مخلوط بتنی، نشست در دال بتنی رخ داده و آب بتن از طریق منافذ داخلی به سطح بتن منتقل می شود. این فرآیند که موسوم به آب انداختگی^۱ در بتن بوده، منجر به ایجاد لایه ی آب در سطح دال بتنی می شود [9,10]. نرخ آب انداختگی در مخلوط بتنی متاثر از عوامل مختلف

¹ Bleeding

شامل نسبت آب به مواد سیمانی، نوع و میزان مواد سیمانی و مقدار مواد ریزدانه می باشد. آب قرار گرفته در سطح دال، با نرخ‌ی متاثر از عوامل و شرایط محیطی شامل دمای محیط، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد تبخیر می شود. پس از برابری نرخ تبخیر و آب انداختگی در سطح دال بتنی، لایه ی آب سطحی حذف شده و فشار های موپینگی منفی در سطح بتن شکل می گیرد. تشکیل این فشاری های موپینگی منفی و افزایش آن منجر به ایجاد جمع شدگی در مخلوط بتنی می شود. وجود عواملی مانند سطح زیر خاک بستر، سطح زیر اساس یا اساس و قالب های بتنی، باعث می شود تا از حرکت ناشی از جمع شدگی در دال بتنی جلوگیری شود. جمع شدگی مقید باعث ایجاد تنش های کششی در سطح بتن شده که در صورت تجاوز شدت این تنش های کششی از مقاومت کششی بتن تازه، ترک خوردگی در دال بتنی ایجاد می شود [11,12]. ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری به صورت ترک های ریز و سطحی با پراکندگی نا منظم بوده که امکان ترمیم این ترک خوردگی ها را مشکل و پرهزینه می کند. همچنین، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری علاوه بر کاهش زیبایی دال بتنی، باعث بروز خرابی های دیگر در دال بتنی و شکست کلی آن شده، در نتیجه نیاز به استفاده از روش ها و مواد نوین به منظور به کنترل و کاهش این نوع ترک خوردگی ها در دال های بتنی متکی بر زمین است.

استفاده از الیاف های مختلف یکی از انواع روش ها و مصالح نوین در صنعت بتن به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی های مختلف در سازه های بتنی است. الیاف در مخلوط های بتنی باعث افزایش مقاومت کششی

و ضربه ای در بتن شده و همچنین، قابلیت جذب انرژی و سختی آن را بهبود می بخشد. افزایش مقاومت خمشی بتن یکی دیگر از اثرهای استفاده الیاف در مخلوط های بتنی است [13-15]. الیاف ها، از نظر مشخصات هندسی و مکانیکی به دو دسته شامل ماکرو و میکرو تقسیم بندی می شوند. الیاف ماکرو، با خصوصیات مقاومتی و هندسی بالاتر به منظور بهبود خصوصیات مقاومتی و جایگزین نمودن با عناصر مسلح کننده، استفاده می شود. از طرف دیگر، الیاف میکرو به جهت کنترل ریز ترک ها و ترک خوردگی های سطحی در مخلوط های بتنی استفاده می شود. از این جهت استفاده از این نوع الیاف در دال های بتنی به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی مورد توجه بیشتری واقع شده است. الیاف میکرو از نظر جنس مختلف بوده و شامل الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی، الیاف شیشه و الیاف فولادی می گردد.

ارزیابی تاثیر استفاده از الیاف مختلف در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی مورد بررسی برخی از محققان بوده است. به عنوان مثال، برتلسن و همکاران عنوان نمودند که الیاف میکرو پلی پروپیلن مصنوعی در مقدار حجمی ۰٫۱ درصد، عملکرد مناسبی در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری از خود نشان دادند [16]. در یک مطالعه ی مروری جامع در مورد بررسی عملکرد الیاف مختلف بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های سیمانی، تاثیر مثبت الیاف مصنوعی و شیشه در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع

شدگی خمیری عنوان گردید [17]. محققان دیگری نیز به تاثیرات مثبت الیاف مصنوعی و دیگر الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری اشاراتی داشته و این موضوع را مورد بررسی قرار دادند (به عنوان مثال [18-22]). با این وجود، در برخی از پروژه ها، نیاز است تا در یک شرایط واقعی تاثیرات چند الیاف مختلف در کنترل و کاهش ترک خوردگی و عملکرد هر یک مورد ارزیابی قرار بگیرد. این موضوع در تحقیقات بررسی شده در این زمینه، کمتر دیده شده است. از طرف دیگر، برخی از الیاف های مصنوعی از نظر خصوصیات هندسی و تا حدودی، از نظر خصوصیات مکانیکی مشابه یکدیگر بوده، اما عملکرد متفاوتی از یکدیگر دارند. الیاف مصنوعی بر پایه ی پلی استر، از این نوع الیاف بوده که از نظر شکل و خصوصیات هندسی مشابه با الیاف میکرو پلی پروپیلن بوده، اما عملکرد متفاوتی در کنترل و کاهش ترک خوردگی دارد. مقایسه ی این الیاف در کنار یکدیگر در تحقیقات کمتر دیده شده است. طی سال های اخیر در داخل کشور و به دلیل ارزان تر بودن الیاف پلی استر نسبت به پلی پروپیلن، مصرف الیاف پلی استر شدت بیشتری گرفته است.

اهمیت بررسی اثر مقایسه ای الیاف های میکرو ی مختلف، علاوه بر انتخاب الیاف با عملکرد و اثر بهتر به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین بوده، از نقطه نظرات اقتصادی نیز اهمیت بالایی داشته به گونه ای که می توان از الیاف با هزینه ی اولیه ی بالاتر در مقدار

مصرف مناسب به گونه ای استفاده کرد که هزینه ی نهایی این الیاف به منظور دستیابی به هدف مورد نظر، از الیاف با هزینه ی اولیه ی پایین تر، کمتر گردد. در بین الیاف های میکرو ی مختلف، الیاف های میکرو پلی پروپیلن، میکرو پلی استر و شیشه، از انواع الیاف های پر کاربرد در صنعت بتن است. بررسی مقایسه ای این الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین، موضوع مهمی بوده که در تحقیقات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این جهت، جای خالی تحقیقی به منظور پر کردن این خلا تحقیقاتی و دستیابی به ساخت یک دال بتنی متکی بر زمین با عملکرد و دوام مناسب تر احساس می گردد. از این جهت تحقیق حاضر به مقایسه ی عملکرد الیاف میکرو مختلف در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین می پردازد. در ابتدا مشخصات مصالح، نسبت های اختلاط و روش آزمایشگاهی به کار گرفته شده ارائه می شود. پس از آن نتایج به دست آمده در تحقیق، تحلیل شده و مورد بحث واقع می گردد.

۲- مصالح و روش

۱-۲ مصالح

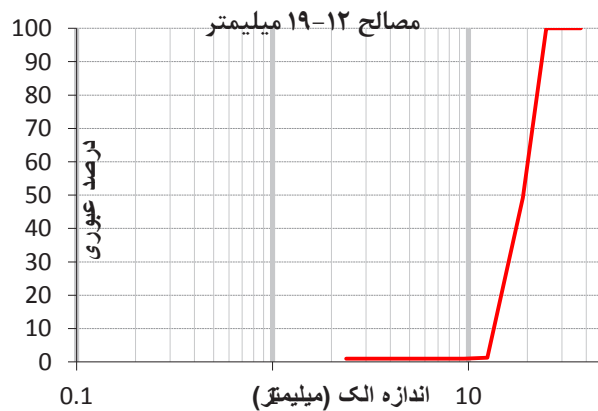
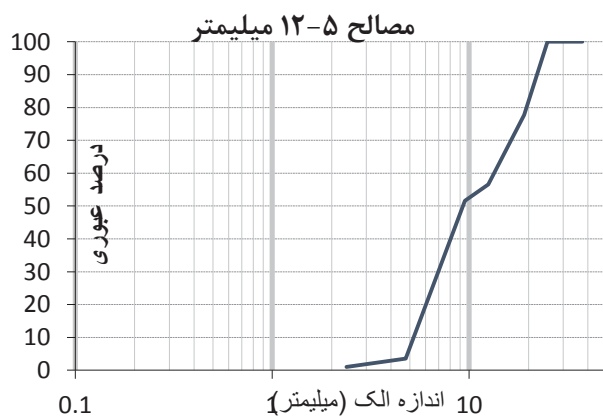
مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی آهکی در ابعاد ۱۹-۰ میلیمتر بود. مصالح سنگی مورد نظر در سه دسته شامل مصالح سنگی ۵-۰ میلیمتر، مصالح سنگی ۱۲-۵ میلیمتر و مصالح سنگی ۱۹-۱۲ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱، نمودار دانه بندی هر سه گروه مصالح سنگی مورد استفاده نشان داده شده است. مصالح سنگی ۵-۰ میلیمتر دارای مدول نرمی،

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ با وزن مخلوط ۳,۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب بود. در جدول ۱، مشخصات تحلیل شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق مشاهده می شود.

جذب آب و چگالی نسبی به ترتیب به میزان ۳,۱۷، ۱,۰۸٪ و ۲,۶۳ بود. چگالی نسبی و جذب آب برای مصالح سنگی ۵-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲,۶۲ و ۰,۷٪ و برای مصالح سنگی ۱۲-۱۹ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲,۶۲ و ۰,۵٪ بود.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو مورد استفاده در این تحقیق

K ₂ O	Na ₂ O	IR	SO ₃	L.O.I	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	مشخصه ی شیمیایی
۰,۴۵	۰,۵۰	۰,۳	۲,۰	۱,۴	۲,۹	۶۲,۵	۳,۹	۴,۶	۲۱,۰	مقدار (%)
-	-	<۰,۷۵	<۳	<۳	<۵	-	<۶	<۶	>۲۰,۰	مقدار الزامات مقرارت ملی ایران شماره ی ۳۸۹



شکل ۱: حدود دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

الیاف مورد استفاده در این تحقیق شامل الیاف میکرو پلی پروپیلن، الیاف میکرو پلی استر و میکرو شیشه مقاوم در محیط های قلیایی^۱ مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 بود. شکل ۲ الیاف های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. در جدول ۲، مشخصات مکانیکی الیاف مورد استفاده در تحقیق آورده شده است.



شکل ۲: الیاف مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۲: مشخصات مکانیکی الیاف مورد استفاده در این تحقیق

وزن مخصوص (gr/cm ³)	جذب آب	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	علامت اختصاری	نام تجاری	شکل ظاهری	جنس الیاف	نوع الیاف
۰٫۹۱	ندارد	۳۱۰	۰٫۰۳	۱۲	PP	MICROFORC E-500	تک رشته ای	پلی پروپیلن خالص	میکرو
۱٫۳۵	دارد	۲۸۵	۰٫۰۵	۱۲	PET	MICROFORC E-300	تک رشته ای	پلی استر PET	میکرو
۲٫۷۰	دارد	۱۶۰۰	۰٫۰۸	۱۲	ARG	ARGFOR-800	تک رشته ای	شیشه AR	میکرو

در این تحقیق از آب آشامیدنی به منظور ساخت مخلوط های بتنی استفاده گردید.

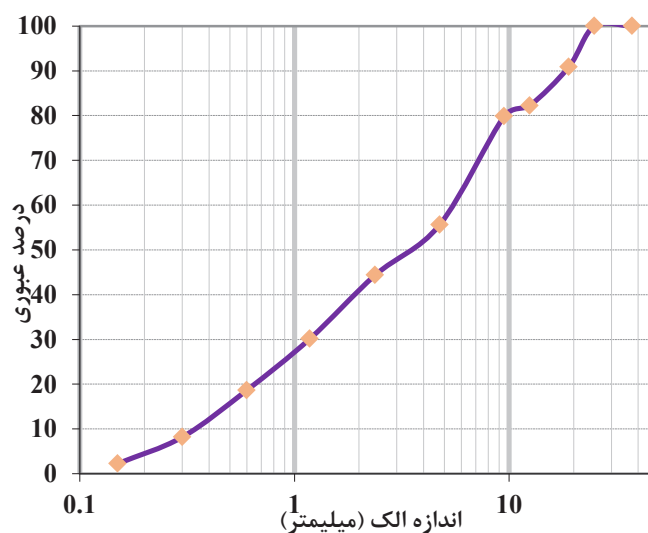
^۱ AR-Glass

۲-۲ نسبت های اختلاط بتن دال بتنی

نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در دال بتنی متکی بر زمین مطابق با ضوابط ذکر شده در دستور العمل ACI 211-09 و با استفاده از روش ذکر شده در آن، برای مخلوط های بتنی مورد استفاده در دال ها و رویه های بتنی، تعیین گردید. مقدار اسلامپ برای مخلوط های بتنی به در حدود ۲۵ تا ۷۵ در نظر گرفته شد. حداکثر اندازه مصالح سنگی به میزان ۱۹ میلیمتر در مخلوط های بتنی مد نظر قرار گرفت. نسبت آب به مواد سیمانی به جهت دستیابی به حداقل مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال استوانه ای استاندارد در سن ۲۸ روزه، به میزان ۰٫۵۰ انتخاب گردید. این میزان مقاومت فشاری، حداقل مقاومت مناسب در اکثر روش های طراحی دال ها و رویه های بتنی بوده و با مقاومت های مورد استفاده در پروژه های واقعی نیز همخوانی دارد. میزان سیمان در مخلوط های بتنی به مقدار

۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. انتخاب این میزان سیمان و همچنین نسبت آب به مواد سیمانی از آن جهت در نظر گرفته شد تا حداکثر استعداد ترک خوردگی در مخلوط های بتنی را به وجود آورده تا امکان بررسی بهتر اثر ایلاف مختلف فراهم گردد. سهم مصالح سنگی ۵-۰، ۱۲-۵ و ۱۹-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۵۵، ۲۷ و ۱۸ درصد انتخاب شد. این میزان سهم مصالح سنگی باعث ایجاد یک منحنی دانه بندی با پراکندی مناسب برای ترکیب مصالح سنگی، مطابق با شکل ۳ می گردد.

بدین ترتیب نسبت های اختلاط بتن شاهد مورد استفاده در دال بتنی متکی بر زمین تعیین گردید. در جدول ۳، مقادیر وزنی مصالح جهت ساخت یک متر مکعب بتن تازه در حالت اشباع با سطح خشک مصالح سنگی آورده شده است.



شکل ۳: حدود دانه بندی ترکیب مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

جدول ۳: نسبت های اختلاط بتن دال بتنی شاهد

آب (Kg/m ³)	مصالح سنگی درشت دانه متوسط (12-19 mm) (Kg/m ³)	مصالح سنگی درشت دانه ریز (5-12 mm) (Kg/m ³)	مصالح سنگی ریزدانه (0-5 mm) (Kg/m ³)	سیمان (Kg/m ³)	طرح اختلاط
۲۲۵	۲۹۱	۴۳۸	۸۹۳	۴۵۰	شاهد



شکل ۴: قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در تحقیق

میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن، میکرو پلی استر و میکرو شیشه به میزان ۰٫۱ درصد حجم بتن تازه انتخاب شد. این میزان مصرف برای الیاف مورد نظر در این تحقیق با توجه به مقادیر استفاده شده در تحقیقات قبلی و توصیه تولید کنندگان آن انتخاب شده تا بتوان اثر هر یک از الیاف را در مقدار مصرف مناسب با یکدیگر مقایسه نمود. بدین ترتیب، تعداد یک طرح اختلاط بتن شاهد (RE)، و سه طرح اختلاط بتن الیافی شامل الیاف میکرو پلی پروپیلن (PP)، میکرو پلی استر (PET) و میکرو شیشه (ARG) در روند تحقیق در نظر گرفته شد.

۲-۳ ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

به منظور ارزیابی تغییر رفتار شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی از روش استاندارد ASTM C1579 استفاده گردید. در این روش از یک قالب به ابعاد ۱۰۰*۳۵۵*۵۶۰ به همراه یک ابزار فولادی به منظور ایجاد استعداد ترک خوردگی در نمونه های بتنی استفاده گردید. ابزار فولادی در این روش متشکل از یک افزاینده ترک در میانه آن و دو قید در دو طرف آن است. در شکل ۴، قالب به همراه ابزار فولادی مورد نظر در آن مشاهده می شود.

در این روش از یک محفظه به منظور ایجاد و حفظ شرایط محیطی مورد نظر در روند آزمایش استفاده گردید. این محفظه قابلیت ایجاد و حفظ شرایط محیطی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد در مدت زمان آزمایش را دارا می باشد. شکل ۵، محفظه ی کنترل شرایط محیطی در این تحقیق را نشان می دهد. شرایط محیطی مورد نظر در این تحقیق به منظور ایجاد حداکثر میزان ترک خوردگی شامل دمای محیطی ۴۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوا ۲۰ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد. مدت

محفظة قرار داده می شد. تعداد ۲ آزمون در هر بار آزمایش ساخته شده و مورد آزمایش قرار می گرفت. در شکل ۶، ساخت آزمون های دال بتنی در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۶: ساخت آزمون های دال بتنی

پس از اتمام آزمایش، آزمون های بتنی از داخل محفظه خارج شده و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری، تصاویر دیجیتال از محل ترک خوردگی گرفته می شد. تصاویر دیجیتال گرفته شده به داخل نرم افزار تحلیل

زمان آزمایش به میزان ۶ ساعت بود. این مدت زمان به منظور رسیدن رشد ترک خوردگی به حداکثر میزان خود مد نظر قرار گرفت.



شکل ۵: محفظه ی کنترل شرایط محیطی مورد استفاده در تحقیق

مراحل ساخت مخلوط و آزمون های بتنی بدین ترتیب بود: در ابتدا مصالح سنگی به صورت خشک به مدت ۲ دقیقه در مخلوط کن بتنی، مخلوط شدند. سپس، سیمان به مخلوط مصالح سنگی اضافه شده و پس از گذشت ۲ دقیقه، آب به مخلوط مصالح سنگی و سیمان اضافه گردید. مخلوط بتنی به مدت زمان ۵ دقیقه با سرعت بالاتر مخلوط می شد. در مخلوط های بتنی حاوی الیاف، الیاف در آخرین مرحله به بتن اضافه شده و به مدت زمان ۲ دقیقه مخلوط می گردید. پس از اتمام اختلاط بتن، مخلوط بتنی در یک لایه به داخل قالب بتنی ریخته شده و مطابق با روش ذکر شده در استاندارد ASTM C1579 متراکم می گردید. سپس، دمای مخلوط بتنی به منظور اطمینان از عدم تغییرات ناخواسته کنترل می شد به طوری که دمای تمامی مخلوط های بتنی ساخته شده در حدود 24 ± 2 درجه سانتی گراد قرار می گرفت. پس از آن قالب به همراه مخلوط بتنی تسطیح شده و سپس داخل

تصاویر انتقال داده شده و مطابق با روش به کار گرفته شده توسط زیاری و همکاران [23]، تصاویر دیجیتال تحلیل شده و متغیرهای هندسی ترک خوردگی شامل متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی مخلوط های بتنی تعیین می گردید (جهت بررسی روش تحلیل تصاویر به کار گرفته شده رجوع شود به [23]). شکل ۷، تصویر برداری از محل ترک خوردگی و تصاویر دیجیتال ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری مشاهده می شود.



شکل ۷: تصویر برداری و تصویر دیجیتال ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری

بدین ترتیب، متغیرهای وابسته مورد بررسی در این تحقیق به شرح ذیل بود:

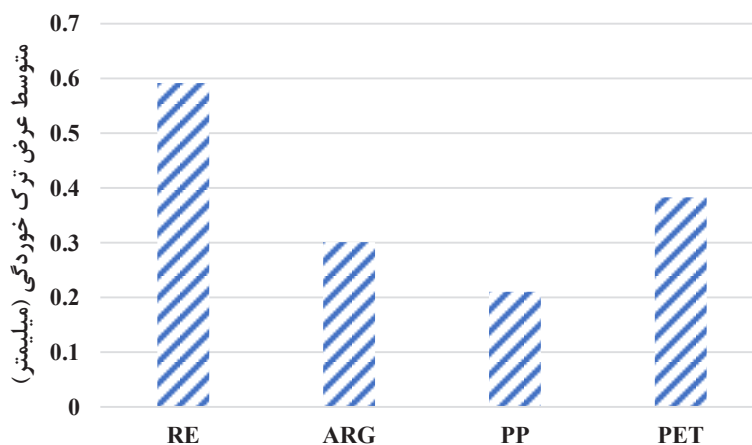
- ۱- متوسط عرض ترک خوردگی
- ۲- طول ترک خوردگی
- ۳- مساحت ترک خوردگی

۳. نتایج و بحث

در این قسمت تاثیر الیاف میکرو مختلف بر خصوصیات هندسی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری شامل متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی مورد تحلیل و بحث واقع می گردد. شکل های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی شاهد (RE) و مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن (PP)، میکرو پلی استر (PET) و میکرو شیشه (ARG) را نشان می دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزودن هر سه نوع الیاف به مخلوط بتنی شاهد، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری کاهش می یابد. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی طرح مخلوط PP به ترتیب به میزان ۵۷، ۶۴ و ۸۱ درصد نسبت به طرح اختلاط بتن RE کاهش می یابد. در طرح مخلوط بتن PET نیز مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۳۵، ۷ و ۵۴ درصد کاهش و در طرح مخلوط بتن ARG به ترتیب به میزان ۴۹، ۲۰ و ۶۰ درصد کاهش می یابد. با افزودن الیاف به طرح مخلوط بتن شاهد، مقاومت کششی و قابلیت جذب انرژی بتن افزایش می یابد. در نتیجه، با تشکیل فشارهای موئینگی منفی و افزایش میزان تنش های کششی در بتن، الیاف باعث بهبود باربری بتن شده و تحمل سازه را در برابر تنش های کششی افزایش می دهد. با ثابت ماندن شدت جمع شدگی خمیری و تنش

های کششی ناشی از آن، مخلوط های بتنی حاوی الیاف، شدت ترک خوردگی کمتری را نسبت به طرح مخلوط شاهد تجربه می کنند. با توجه به این نتایج می توان

اینطور استنباط نمود که افزودن الیاف میکرو مورد نظر در این تحقیق، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی را کاهش می دهند.



شکل ۸: متوسط عرض ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد و مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو مختلف

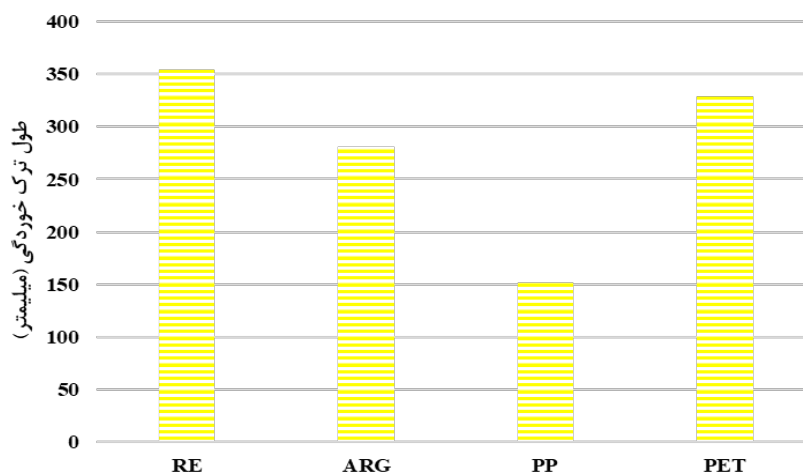
با بررسی بیشتر نتایج، مشاهده می شود که عملکرد الیاف میکرو پلی پروپیلن، از عملکرد دو الیاف دیگر در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بیشتر است. همچنین، مشاهده می شود که تاثیر الیاف میکرو شیشه از عملکرد الیاف میکرو پلی استر در کاهش ترک خوردگی بهتر است. مقدار مصرف حجمی هر سه نوع الیاف میکرو در مخلوط بتنی یکسان بوده و به میزان ۰٫۱ درصد حجم بتن تازه می باشد. با توجه وزن مخصوص متفاوت هر یک از الیاف مورد نظر، میزان مصرف وزنی این الیاف با یکدیگر متفاوت شده به طوری که میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن و میکرو پلی استر در حدود ۰٫۹ کیلوگرم در متر مکعب بتن تازه و میزان مصرف الیاف شیشه به میزان ۲٫۷ کیلوگرم بر متر مکعب بتن تازه خواهد بود.

همچنین، ذکر این نکته لازم است که تعداد الیاف میکرو پلی پروپیلن و میکرو پلی استر با توجه به قطر کمتر نسبت به الیاف میکرو شیشه، بیشتر است. در نتیجه، یکی از علت های برتری عملکرد الیاف میکرو پلی پروپیلن نسبت به الیاف شیشه، تعداد بالاتر این الیاف نسبت به الیاف میکرو شیشه است. اما این تمام ماجرا نبوده، چرا که با وجود تعداد بالاتر الیاف میکرو پلی استر نسبت به الیاف میکرو شیشه، عملکرد این الیاف از الیاف شیشه پایین تر می باشد. در نتیجه، می توان به این طور در نظر گرفت که با مقایسه ی عملکرد الیاف میکرو پلی استر و میکرو شیشه، با وجود تعداد بالاتر الیاف میکرو پلی استر در یک حجم ثابت در مخلوط بتنی، عملکرد این الیاف نسبت به الیاف شیشه، به دلیل پایین تر بودن خصوصیات مقاومتی آن، کمتر

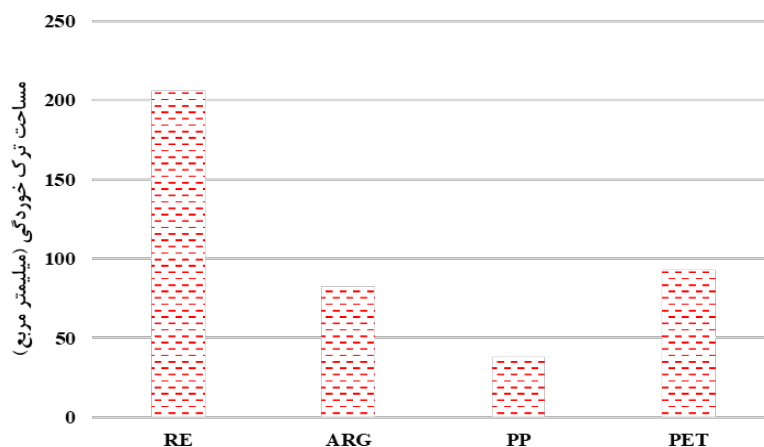
می باشد (جهت مقایسه خصوصیات مقاومتی الیاف، به جدول ۲ مراجعه شود). به عبارت دیگر، اثر خصوصیات مقاومتی الیاف میکرو شیشه بر اثر مثبت تعداد الیاف میکرو پلی استر، غلبه کرده و باعث می شود تا مخلوط بتنی حاوی الیاف میکرو شیشه شاهد کاهش بیشتر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری باشد. همچنین، با وجود یکسان در نظر گرفتن تعداد الیاف میکرو پلی پروپیلن و میکرو پلی استر در حجم ثابت، بالاتر بودن خصوصیات مقاومتی الیاف میکرو پلی پروپیلن نسبت به الیاف میکرو پلی استر، منجر به برتری این الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی می شود.

در طرف دیگر، با مقایسه ی عملکرد الیاف میکرو پلی پروپیلن و الیاف میکرو شیشه، با در نظر گرفتن تعداد بالاتر الیاف میکرو پلی پروپیلن و همچنین بالاتر بودن خصوصیات مقاومتی الیاف میکرو شیشه، می توان اینطور استنباط کرد که اثر مثبت تعداد الیاف میکرو پلی پروپیلن بر اثر مثبت

خصوصیات مقاومتی الیاف میکرو شیشه غلبه کرده و منجر به کاهش بیشتر شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن می گردد. ذکر این نکته لازم است که به غیر از اثر تعداد و خصوصیات مقاومتی الیاف، قابلیت پخش و اختلاط همگن الیاف در مخلوط بتنی، یکی دیگر از عوامل موثر در عملکرد الیاف بوده، که این موضوع در الیاف میکرو پلی پروپیلن بهتر اتفاق افتاده چرا که خصوصیات شیمیایی و عوامل تاثیر گذار در ساخت این نوع الیاف، منجر به اختلاط بهتر این نوع الیاف در مخلوط های بتنی نسبت به اکثر الیاف های مورد استفاده در صنعت بتن بوده است. همچنین، الیاف میکرو پلی پروپیلن با وجود خصوصیات مقاومتی پایین تر از الیاف میکرو شیشه، از خصوصیات مقاومتی مناسب و قابل قبول برخوردار بوده که این موضوع به بهبود اثر تعداد این الیاف در یک حجم ثابت کمک شایان می کند.



شکل ۹: طول ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد و مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو مختلف



شکل ۱۰: مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد و مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو مختلف

حال ذکر این نکته لازم است که میزان کاهش طول ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکروی مختلف، محسوس بوده و نمی توان از اثر این الیاف در کنترل رشد طولی ترک خوردگی چشم پوشی کرد.

با توجه به نتایج به دست آمده، می توان این گونه عنوان نمود که به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین، استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقدار مصرف حجمی کافی، رویکرد مناسبی تلقی شده و این الیاف قابلیت کنترل و کاهش رشد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری به خصوص در جهت عرضی را دارد. اما، استفاده از این نوع الیاف در مقدار مصرف مورد بررسی در این تحقیق (۰،۱ درصد حجم بتن تازه) توانایی حذف کامل ترک خوردگی را نداشته و نیاز به اتخاذ دیگر رویکردها به منظور جلوگیری از ایجاد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی می باشد.

با بررسی بیشتر نتایج به دست آمده، مشاهده می گردد که متوسط عرض ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکروی مختلف، بیشتر از طول ترک خوردگی تغییر کرده و کاهش بیشتری پیدا می کند. به عبارت دیگر، تغییرات عرضی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی این نوع الیاف، بیشتر از تغییرات طولی آن است. علت این موضوع می تواند ناشی از طول کم این نوع الیاف بوده که قابلیت آن را در کنترل رشد ترک در جهت طولی را کمتر از قابلیت آن در جلوگیری از رشد عرضی ترک خوردگی می کند. این موضوع در مورد هر سه نوع الیاف مورد بررسی در تحقیق مشاهده می شود. در نتیجه، می توان اینطور استنباط کرد که الیاف میکروی مورد نظر در تحقیق، اثر بیشتری در کنترل و کاهش رشد ترک خوردگی در جهت عرضی دارد. بنابراین، در صورت افزایش رشد ترک خوردگی در جهت طولی، نیاز است تا رویکرد مناسب تری به منظور کنترل این ترک خوردگی ها به کار گرفت. با این

۴. نتیجه گیری

مهم ترین نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر است:

- الیاف میکرو پلی پروپیلن، پلی استر و شیشه مورد بررسی در این تحقیق، باعث کاهش چشمگیر شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین شدند.

- الیاف میکرو شیشه در مقایسه با الیاف میکرو پلی استر به دلیل خصوصیات مقاومتی بالاتر، عملکرد مناسب تری داشته و باعث کاهش متوسط عرض طول و مساحت ترک خوردگی دال بتنی شاهد به ترتیب تا میزان ۴۹، ۲۰ و ۶۰ درصد گردید.

- خصوصیات مقاومتی بالاتر الیاف میکرو پلی پروپیلن نسبت به الیاف میکرو پلی استر، باعث عملکرد مناسب تر این نوع الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال بتنی متکی بر زمین شد.

- تعداد الیاف میکرو پلی پروپیلن در یک حجم ثابت و خصوصیات اختلاط بهتر این نوع الیاف در دال بتنی و همچنین برخورداری از خصوصیات مقاومتی قابل قبول، باعث عملکرد بهتر این نوع الیاف نسبت به الیاف میکرو شیشه شده و منجر به کاهش متوسط عرض طول و مساحت ترک خوردگی دال بتنی شاهد به ترتیب تا میزان ۶۴، ۵۷ و ۸۱ درصد شد.

- الیاف میکرووی مختلف مورد بررسی در این تحقیق اثر بهتری در کنترل و کاهش عرض ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی متکی بر زمین از خود نشان داد.

- بررسی کلی نتایج حاکی از عملکرد مناسب الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقدار مصرف کافی در کنترل و کاهش چشمگیر شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری به خصوص در جهت عرضی، در دال های بتنی متکی بر زمین بود.

۵. منابع

- [1] G.B. Davis, J.H. Knight, J.L. Rayner, *Extinguishing Petroleum Vapor Intrusion and Methane Risks for Slab-on-ground Buildings: A Simple Guide*, *Groundw. Monit. Remediat.* 41 (2021) 61–72. <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12440>.
- [2] Z. Liu, D. Alterman, A. Page, B. Moghtaderi, D. Chen, *An experimental study on the thermal effects of slab-edge-insulation for slab-on-grade housing in a moderate Australian climate*, *Energy Build.* 235 (2021) 110675. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110675>.
- [3] A. Tur, *Large-size jointless concrete slab-on-grade with combined prestressing*, *Solid State Phenom.* 309 SSP (2020) 201–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.309.201>.
- [4] R. Awad, S. Barakat, S. Altoubat, M. Leblouba, *Reliability-based design for the flexural capacity of*

- fiber reinforced concrete slabs on ground, *World Congr. Civil, Struct. Environ. Eng.* (2020) 155-1-155-8. <https://doi.org/10.1115/9.icsect20.155>.
- [5] A. Baricevic, M. Grubor, R. Paar, P. Papastergiou, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, Long-term monitoring of a hybrid SFRC slab on grade using recycled tyre steel fibres, *Adv. Concr. Constr.* 10 (2020) 547–557. <https://doi.org/10.12989/acc.2020.10.6.547>.
- [6] ACI Committee 360, *ACI 360R-10- Guide to Design of Slabs-on-Ground*, (2010).
- [7] K. Yang, M. Zhong, B. Magee, C. Yang, C. Wang, X. Zhu, Z. Zhang, Investigation of effects of Portland cement fineness and alkali content on concrete plastic shrinkage cracking, *Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.130>.
- [8] M. Nasir, O.S. Baghabra Al-Amoudi, M. Maslehuddin, Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather, *Constr. Build. Mater.* 152 (2017) 943–953. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068>.
- [9] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete, *Cem. Concr. Res.* 89 (2016) 249–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.016>.
- [10] I. Yakoubi, S. Aggoun, H. Ait Aider, H. Houari, The influence of bleeding, extra water and superplasticizer on the SCC plastic shrinkage cracking: Case of hot weather, *J. Adhes. Sci. Technol.* 30 (2016) 2596–2618. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1189869>.
- [11] R. Gupta, N. Banthia, Correlating plastic shrinkage cracking potential of fiber reinforced cement composites with its early-age constitutive response in tension, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 1499–1509. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0591-9>.
- [12] A.Z. Bendimerad, E. Rozière, A. Loukili, Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 733–745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.056>.
- [13] M. A. Abdulridha, M. M. Salman, Q. S. Banyhussan, Effect Polypropylene of Fiber on Drying Shrinkage Cracking of Concrete Pavement Using Response Surface Methodology, *J. Eng. Sustain. Dev.* 25 (2022) 10–21. <https://doi.org/10.31272/jeasd.25.3.2>.
- [14] I.M.G. Bertelsen, L.J. Belmonte, G. Fischer, L.M. Ottosen, Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials, *Constr. Build. Mater.* 286 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122738>.
- [15] W. Ahmed, C.W. Lim, Production of sustainable and structural fiber reinforced recycled aggregate concrete with improved fracture properties: A review, *J. Clean. Prod.* 279 (2021) 123832.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123832>.

- [16] I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen, G. Fischer, *Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation*, *Constr. Build. Mater.* 199 (2019) 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.268>.
- [17] I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen, G. Fischer, *Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review*, *Constr. Build. Mater.* 230 (2020) 116769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>.
- [18] F. Pelisser, A.B.D.S.S. Neto, H.L. La Rovere, R.C.D.A. Pinto, *Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking*, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 2171–2176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041>.
- [19] A. Sivakumar, M. Santhanam, *A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete*, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005>.
- [20] Y. Ma, B. Zhu, M. Tan, K. Wu, *Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar*, *Mater. Struct. Constr.* 37 (2004) 92–95. <https://doi.org/10.1617/13920>.
- [21] J. Mora, M.A. Martin, R. Gettu, A. Aguado, *Study of plastic shrinkage cracking in concrete, and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture*, *Ind. Ital. Del Cem.* 71 (2001).
- [22] Y. Ma, M. Tan, K. Wu, *Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars*, *Mater. Struct. Constr.* 34 (2002) 165–169. <https://doi.org/10.1007/bf02533585>.
- [23] H. Ziari, H. Fazaeli, S.J. Vaziri Kang Olyaei, M.A. Ziari, *Evaluation of effects of temperature, relative humidity, and wind speed on practical characteristics of plastic shrinkage cracking distress in concrete pavement using a digital monitoring approach*, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 15 (2022) 138–158.

کارایی ماشین بردار پشتیبان برای تعیین مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف و مقایسه با آیین نامه NIST 1681 در پروژه احداث راه آهن چابهار به زاهدان



امیدنوروزی انگنایبی

فوق لیسانس مهندسی آب و لیسانس مهندسی عمران
ناظر شرکت مهندسی مشاور هگزا

چکیده

هدف از این پژوهش برآورد مقاومت فشاری ۴۲ روزه بتن با توجه به طرح اختلاط در دماهای مختلف بوسیله ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مقایسه با آیین نامه NIST1681 در پروژه احداث راه آهن چابهار به زاهدان است. برای این منظور، ابتدا داده های مربوط به مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف از شیت های آزمایشگاهی گذشته جمع آوری شده و سپس مدل ماشین بردار پشتیبان برای تخمین مقاومت فشاری در هر دما بکار گرفته شده است. مقادیر اجزای مختلف طرح اختلاط بتن و دما به عنوان متغیرهای ورودی شبکه و مقاومت فشاری بتن در دمای مورد نظر به عنوان خروجی مدل انتخاب شده است. نتایج مدلسازی ها نشان می دهد مدل ماشین بردار پشتیبان از دقت بالایی در تخمین مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف برخوردار است. همچنین مقایسه نتایج حاصله از SVM با نتایج مقاومت فشاری حاصله از NIST بیان نمود که با توجه به نوع مصالح و شرایط محیطی نمی توان با اطمینان لازم از روابط ریاضی سنتی استفاده نمود و استفاده از روش های نوین ماشین بردار پشتیبان برای تخمین مقادیر دیر یافت مقاومت بتن در پروژه های بزرگ جایگزین آن شود. همچنین، با بررسی نتایج آزمایشگاهی معلوم گشت که استفاده از این روش دقت مناسبی داشته و برای هر نوع طرح اختلاط دلخواهی مناسب و قابل اعتماد است. همچنین نمایان شد که روابط آیین نامه NIST1681، با افزایش دما دارای خطای بیشتری شده و از اطمینان آن کاسته می شود و اگر تجزیه و تحلیل براساس آن صورت پذیرد نتایج بسیار محافظه کارانه شده که به دور از واقعیت است. این امر موجب از بین رفتن توجیه اقتصادی طرح می شود. با توجه به توضیحات ارائه شده برای پیش بینی و بدست آوردن مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف استفاده از روش ماشین های بردار پشتیبان در مقایسه با روابط آیین نامه از کارایی بالاتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: ماشین های بردار پشتیبان (SVM)، همیداد، مقاومت بتن، دمای بتن، احداث راه آهن چابهار - زاهدان، تابع کرنل.

مقدمه

نسبتاً پیچیده، وقت گیر و مستلزم آماده سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه های گران قیمت، مجهز و حساس است. از طرف دیگر نتایج وابستگی شدیدی به عوامل خارجی مثل خطاهای انسانی، ابعاد نمونه، نحوه بارگذاری و غیره دارد. از سوی دیگر در پروژه های عظیم،

مقاومت، از مهم ترین و شاخص ترین پارامترهای بتن است که کارایی و کیفیت آن را تعیین می کند. نحوه اندازه گیری این مهم، در استانداردهای مختلف ذکر شده است. مقاومت بتن به طور مستقیم با آزمون های فشاری و تعیین مقاومت حداکثر بوسیله دستگاه فشار به دست می آید. این روش

بتن‌ریزی‌های حجیم طی چند مرحله صورت می‌گیرد که در هر مرحله باید نتایج مقاومت ۱۱ روزه و سپس ۴۲ روزه مرد تایید قرار بگیرد تا مرحله‌ی بعدی انجام شود (۱)، در این مواقع پیمانکار ۲ راه در پیش دارد، یا اینکه منتظر نتایج مقاومت ۴۲ روزه بماند (که این امر باعث تلف شدن زمان و محدودیت‌هایی خواهد شد) یا اینکه قبل از رسیدن موعد نتایج، به نظارت پروژه تعهد بدهد که در صورت به حد لازم نرسیدن مقاومت، هردو پارت را تخریب کند که این موضوع ریسک بسیار بالایی دارد. برای حل این مشکل و گریز از روش مستقیم، همواره مهندسان سعی کرده‌اند به وسیله روابط تجربی و دستگاه‌های مختلف، روش کوتاه و غیرمستقیم و در عین حال دقیق، برای پیش بینی و تخمین این مهم پیدا کنند (Greco et al., 2021). مدل‌سازی و پیش‌بینی خواص بتن اهمیت خاصی در مدرنیزه کردن ساخت سازه‌ها و قضاوت مهندسی دارد، در واقع پیش‌بینی زمان لازم برای قالب برداری، کنترل و زمان بندی پروژه، کنترل کیفیت و عوامل دیگر را فراهم می‌کند. هم‌چنین می‌تواند اطلاعات مهمی به مهندسان و طراحان به ویژه مهندسان سازه برای کاربرد در مباحث بتن ارایه دهد (۲). یکی از روش‌های مرسوم، سریع و نسبتاً دقیق، تعیین مقاومت از روش‌های غیرمخرب و استفاده از روابط تجربی است. مهندسان همیشه به ارزیابی خواص بتن با تکنیک‌های غیرمخرب در دنیا علاقه مند بوده‌اند. این آزمون‌ها به راحتی قابل انجام و ارزیابی نتایج آن‌ها ساده و سریع است، زیرا ساخت نمونه در این روش‌ها اندک و یا اصلاً نیاز به تهیه نمونه نیست (۳).

اثرات دمای اختلاط بتن

با افزایش دمای اختلاط بتن، سرعت هیدراسیون سیمان افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث گیرش سریع‌تر بتن می‌شود. در چنین حالتی اگر بتن کامل و مناسب ریخته نشده و بتن ریزی به اتمام نرسیده باشد، ریزترک‌های داخلی در آن ایجاد خواهد شد. با تشخیص این گیرش سریع می‌توان بتن را اصلاح کرد و با افزودن مقداری آب اضافی، سرعت

گیرش آنرا کم کرده و کارایی را بیشتر کرد. این آب اضافی درصد آب به سیمان (w/c) را افزایش داده و مقاومت فشاری بتن را کاهش خواهد داد. این افت مقاومت را می‌توان با اضافه کردن مقداری سیمان به ملات جبران کرد. ولی این سیمان اضافی بدلیل واکنش‌های هیدراسیون بیشتر، دمای داخلی بتن را افزایش خواهد داد. حرارت نیز باعث افزایش سرعت تبخیر از سطح بتن تازه خواهد شد که اگر این تبخیر بیشتر از قدرت آب انداختن بتن باشد، ترک‌های سطحی بتن بیشتر شده و دوام آن کاهش می‌یابد [۳].

برای پیشگیری از چنین مشکلاتی می‌توان راهکارهایی را برای کاهش این اثرات نامطلوب ارائه داد، بعنوان نمونه می‌توان با سرد کردن سنگدانه‌ها و یا آب اختلاط بتن، آنرا خنک کرد مثلاً. می‌توان سنگدانه‌ها را در سایه قرار داد، از یخ استفاده کرد و یا حتی مقداری نیتروژن مایع به بتن اضافه کرد. هم‌چنین از فوق روان‌کننده‌ها نیز می‌توان در کاهش عملیات اصلاحی بتن استفاده کرد. راهکارهایی را نیز می‌توان برای انجام در محل پیشنهاد داد، بعنوان نمونه عملآوری مکفی، بتن‌ریزی سریع، جلوگیری از برخورد باد و پرهیز از اجرای مقاطع بتنی نازک مثل پیاده‌روها [۲].

اکثر مطالعات انجام یافته در رابطه با اثرات حرارت بتن، مفهوم حرارت را بروشنی بیان نکرده‌اند ولی در عوض توصیه کرده‌اند که شرایط مختلف با توجه به ویژگی‌های آن مثل دمای محیط، دمای بتن، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش آفتاب مورد بررسی قرار گیرند. بعلاوه تهیه نمونه‌های آزمایشی در اکثر مطالعات توصیه شده است، هرچند که شبیه‌سازی ترکیبات ممکن دما و مدت زمان اختلاط بتن کاری دشوار می‌باشد [۳].

طبق گزارشات انجمن بتن امریکا (ACI) قرارگیری بتن تازه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۸ درجه سانتیگراد ممکن است باعث افت مقاومتی در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد گردد و هم‌چنین مطابق این گزارشات، نمونه‌های استوانه‌ای عمل‌آوری شده در دماهای ۲۳ و ۳۸ درجه سانتیگراد،

بسته به رطوبت نسبی محیط عملآوری، ممکن است برتیب به ۷۳٪ و ۶۲٪ مقاومت فشاری بهینه خود برسند. [۲] انجمن سیمان پرتلند (PCA)، دمای ۲۴-۳۸ درجه سانتیگراد را بعنوان آب و هوای گرم معرفی می کند. [۶] این انجمن تصریح می کند که در پروژه های بتنی دمای بتن باید زیر ۳۲-۳۰ درجه سانتیگراد باشد و طبق تحقیقات انجام یافته دمای ۱۶-۱۰ درجه سانتیگراد را مطلوبترین دما برای بتن بیان کرده اند. [۳] سایر محققین دمای ۴۰-۴ درجه سانتیگراد را بعنوان دمای بهینه بتن معرفی کرده اند [۱] و [۷] برخی از محققین عقیده دارند که دمای ۳۵ درجه سانتیگراد تنها باعث افت مقاومتی در حدود ۱٪ خواهد شد، در صورتیکه سایرین افت مقاومتی در حدود ۱۰٪ را برای دمای اولیه ۳۸ درجه سانتیگراد پیشبینی می کنند. [۹-۷] در مجموع میتوان گفت که اغلب این مطالعات در این مورد که دمای اختلاط ۳۲-۳۸ درجه سانتیگراد باعث افت مقاومتی در حدود ۴٪ شده و در دماهای بالاتر از ۳۸ درجه سانتیگراد این افت مقاومت ممکن است به حدود ۱۰٪ برسد، اتفاق نظر دارند [۵].

اثرات مدت زمان اختلاط بتن

طبق توصیه محققین، برای ساخت بتن در آب و هوای گرم، مدت زمان و سرعت اختلاط بتن باید حداقل باشند [۳]. با توجه به اینکه اغلب ممکن است سرعت اختلاط بتن ثابت باشد، به منظور جلوگیری از گیرش سریع بتن می توان مدت زمان اختلاط را کاهش داد. بعنوان یک راهکار عملی برای پرهیز از اختلاط اضافی می توان مصالح را لایه لایه در جام دستگاه مخلوطکن ریخته و در موقع لزوم اختلاط را شروع کرد [۶]. همچنین حمل و انتقال بتن را می توان ترجیحاً در ساعات خنک تر شبانه روز انجام داد و از مسیره های پر رفت و آمد اجتناب کرد، کاهش حجم اختلاط بتن (در نتیجه تولید حرارت کمتر) و استفاده از مواد دیرگیر کننده نیز ممکن است موثر واقع شوند [۳].

مطالعات نشان می دهند که مدت زمان اختلاط، تعدادی از خواص بتن را تحت تاثیر قرار می دهد. هوای گرم و اختلاط طولانی، تاثیر روان کننده ها را از بین خواهد برد. همچنین مشاهده شده است که روان کننده ها بعد از اختلاط طولانی در دماهای بالا، مقاومت فشاری را تا ۱۰٪ کاهش می دهند و به ازاء هر ساعت اختلاط بیشتر مشاهده شده است که درصد هوای بتن در حدود ۲٪ کاهش می یابد. همچنین تحقیقات نشان می دهند که دمای بتن تقریباً به اندازه ۳ درجه سانتیگراد به ازاء هر ساعت اختلاط بیشتر، افزایش می یابد. حتی برخی از محققین اختلاط بیشتر را مفید دانسته اند و عده ای نیز بر این باورند که بعد از ۹۰ دقیقه اختلاط در هوای گرم، مقاومت بتن تا ۱۰٪ افزایش می یابد [۳]. در صورتیکه آب به نمونه ها اضافه نشود، مقاومت آنها تا ۸٪ به ازاء هر ساعت اختلاط بیشتر، افزایش می یابد ولی در نمونه هایی که آب به آنها اضافه شده است، مقاومت فشاری آنها ممکن است تا ۱۵٪ به ازاء هر ساعت اختلاط، کاهش یابد [۳].

برای تعیین مقاومت فشاری بتن در درجه حرارت های بالا سه روش با تنش، بدون تنش و مواد باقیمانده بدون تنش آزمایشگاهی وجود دارد:

آزمون با تنش: اعمال یک بار ثابت به نمونه به میزان ۲۵ تا ۵۵ درصد مقاومت قابل تحمل را در دماهای مختلف انجام می شود و در هر دما میزان بار به بار شکست افزایش می یابد. مقاومت بدست آمده از این آزمایش بیشتر برای اعضای بتنی که وظیفه باربری را دارند به کار برده می شود. آزمون بدون تنش: در هر دما بار را به میزان بار شکست رسانده و مقدار آن را محاسبه می کنند. این آزمایش برای اعضای که به عنوان عایق (مانع) به کار برده می شوند کاربرد دارند.

مواد باقیمانده بدون تنش: هدف از این آزمایش بدست آوردن مقاومت فشاری بتن پس از آتش سوزی و حرارت است. در این روش به نمونه بتن امکان داده می شود تا دمای آن کاهش یابد و به حد محیط برسد و سپس در آن

دما میزان مقاومت با افزایش بار شکست بدست می‌آید. این نتایج جهت ارزیابی پس از آتش سوزی و حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مطالعه تمرکز خود را بر نقش مقاومت بتن برای تحمل بارهای وارده بر عضو قرار می‌دهیم در نتیجه تمام نتایج آزمایشگاهی، نتایجی هستند که بر مبنای آزمون با تنش در آزمایشگاه بدست آمده‌اند.

در زمینه مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. در این زمینه می‌توان به آیین نامه ایالت متحده آمریکا که به تجزیه و تحلیل سازه‌های بتن آرمه در برابر آتش سوزی پرداخته است و برای مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا روابطی را ارائه کرده است (NIST, 1681). تعداد زیادی از پارامترها در تعیین مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا تاثیرگذار هستند؛ بخشی از آنها پارامترهای کمی و بخشی دیگر مانند نحوه عملآوری و شیوه ساخت بتن کیفی می‌باشند، این پارامترها باعث می‌شود محاسبه‌ی مقاومت بتن در دماهای بالا با مشکل مواجه شود. مدل‌های تحلیلی مختلفی برای تعیین مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا ارائه شده است، برای حل هر کدام از این مدل‌ها باید تعدادی فرضیه و معادله سازگاری در نظر گرفته شود. در بعضی از این معادلات فرض می‌شود که سطح مقطع ثابت است در حالی که در دماهای بالا به علت پدیده پوسته پوسته شدن بتن سطح مقطع کاهش پیدا می‌کند و این فرض درست نمی‌باشد [۳].

روش دیگر استفاده از معادلات تجربی می‌باشد؛ که اغلب بسیار ساده سازی شده و جواب‌ها با واقعیت تفاوت زیادی دارد، بنابراین قابل اعتماد نبوده و در تجزیه و تحلیل باعث خطا می‌شود.

به عنوان یک روش جایگزین به جای دو مدل فوق می‌توان از روش‌های عددی و محاسبات نرم استفاده کرد. یکی از این روش‌ها، روش شبکه عصبی مصنوعی یا روش نوین ماشین بردار پشتیبان می‌باشد. شبکه عصبی مصنوعی یکی

از سه جزء اصلی محاسبات نرم است و در قسمت محاسبات نورونی جای می‌گیرد. شبکه عصبی مصنوعی به دنبال پیدا کردن راه حلی با توجه به داده‌های ورودی و بدون توجه به پدیده‌ها و شرایط فیزیکی موجود در قسمتهای مختلف است، این روش به نحوی کارآمد خروجی‌ها و پاسخ را بدست می‌آورد. شبکه عصبی مصنوعی در زمینه‌های مختلفی استفاده شده است. در زمینه مهندسی عمران نیز پژوهشگران به وسیله آن مسائل مختلفی از قبیل تخمین مقاومت فشاری و اسلامپ بتن با شبکه عصبی مصنوعی تخمین مقاومت فشاری بتن با شبکه عصبی مصنوعی (۱)، تخمین مقاومت ملات بنایی با شبکه عصبی (۱۱)، تعیین مقاومت و مدول الاستیسیته گچ با رگرسیون (ایلماز، ۲۰۰۹) بررسی نقش طرح اختلاط در مقاومت بتن با استفاده از شبکه عصبی (۱۲) اشاره کرد.

از سوی دیگر، بتن ماده‌ای است که از نقطه نظر مقاومت، در دسترس بودن، دوام و اقتصاد دارای مزیت‌های فراوانی است. در طراحی یک المان سازه‌ای بتنی، مقاومت فشاری بتن از جمله عوامل اساسی می‌باشد. مقاومت فشاری ۴۲ روزه بتن معمولاً به عنوان مقاومت طرح در نظر گرفته می‌شود. بدست آوردن این مقاومت و اطمینان از صحت آن، ۴۲ روز به طول می‌انجامد که این مدت زمان از لحاظ روند کنترل کیفیت اختلاط بتن، بتن‌ریزی، متراکم‌سازی، عمل‌آوری و غیره بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ از طرفی طرح اختلاط بتن شامل روندی است که معمولاً به صورت آیین‌نامه‌ای آماده شده و با تجربه مهندس مربوطه مخلوط می‌شود. در این میان ممکن است به دلیل وجود خطاهایی در طرح اختلاط و یا به هنگام مخلوط بتن در کارگاه، مقاومت فشاری بتن به مقاومت فشاری طرح نرسیده و آزمایش انجام شده غیر قابل قبول بوده و در نتیجه نیاز به تکرار تمامی مراحل انجام شده باشد که خود حداقل ۴۲ روز به طول می‌انجامد. بنابراین برای تخمین مقاومت ۴۲ روزه بتن در سنین اولیه آن نیاز به یک روش جایگزین می‌باشد و بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ایران، در

صورتی که آگاهی از کیفیت بتن در موعدهای خاصی مانند زمان باز کردن قالبها و غیره ضرورت داشته باشد، علاوه بر آزمونهای متعارف ارزیابی و روش عمل آوردن و مراقبت بتن آزمونهایی از بتن گرفته و در موعدهای مورد نظر تحت آزمایش قرار می‌دهند. این آزمونها را آزمونهای آگاهی می‌نامند. از جمله نمونه‌های آگاهی عبارتند از نمونه‌های با سنین ۳، ۷ و ۱۱ روزه (۱). از جمله موارد استفاده آزمونهای آگاهی، تخمین و پیش‌بینی مقاومت ۴۲ روزه بتن از روی مقاومت آزمونهای آگاهی با سنین کمتر است. از جمله مزایای این امر آن است که در صورت بروز اشکال در مقاومت بتن، مدیران و مهندسان کارگاه و دستگاه نظارت میتوانند در زمانهای زودتر از این امر آگاهی یافته و هرچه زودتر از ادامه مشکل پیشگیری کرده و در جهت تصحیح و اصلاح امر اقدام کنند (۲). در استانداردهای معتبر دنیا و همچنین آیین‌نامه بتن ایران به روابط و ضرایب مختلفی برای تبدیل مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه (۱۱ روزه) به مقاومت فشاری ۴۲ روزه آن اشاره شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل تفاوت مصالح مصرفی در ساخت بتن، نوع طرح اختلاط، روش ساخت و اجرا، نگهداری و همچنین رفتار پیچیده بتن، روابط ارائه شده توسط منابع علمی سایر کشورها، با نتایج موجود در کشور ایران هماهنگی نداشته و تخمین مقاومت فشاری به کمک این روابط ممکن است خطاهای جبران ناپذیری را در پی داشته باشد، در همین راستا و باتوجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش با استفاده از نتایج مقاومت‌های فشاری ۱۱ روزه بدست آمده از بتن‌های ساخته شده با مصالح محلی پروژه احداث راه آهن چابهار به زاهدان قطعه ۲ حدفاصل نیکشهر- چابهار، و دماهای مختلف به برآورد مقاومت ۴۲ روزه بتن با استفاده از روش سنتی NIST و روش هوش مصنوعی ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) پرداخته شده است.

Malasri و همکاران در سال ۲۰۰۶ بوسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی خصوصیات بتن پرداختند.

آنها بیان نمودند که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی می‌تواند مقاومت بتن را با خطای بسیار پایین تخمین بزند آنها بیان نمودند که با توجه به خصوصیات دانه‌بندی منطقه‌ای، برنامه‌نویسی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی مقاومت دراز مدت بتن، برای صرفه‌جویی در وقت و پیش‌برد کار توصیه کردند.

نوروزی انگنایی و همکاران در سال ۱۴۰۱، به برآورد مقاومت ۴۲ روزه بتن با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی پرداختند. آنها بیان نمودند که مصالح مصرفی هر منطقه تاثیر متفاوتی در مقدار مقاومت نهایی دارد، همچنین روش‌های هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های ریاضی ارائه شده برای برآورد مقاومت بتن می‌تواند کارایی بیشتری داشته باشد.

روشن، قلعه‌نوی و خسروی در سال ۱۳۹۹ به پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیونی یادگیری ماشین پرداختند. در این پژوهش به بررسی و مقایسه الگوریتم‌های رگرسیونی یادگیری ماشین پرداخت شده است که بر همین اساس مجموعه ۱۰۰۰ تایی طرح اختلاط بتن استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده استفاده از روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم سرعت تحلیل را بهبود بخشیده و ضریب همبستگی بهتری را نسبت به روش‌های شبکه عصبی ارائه می‌کند.

بهداد، قدوسیان و مهدیخانی در سال ۱۳۹۶ به پیش‌بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن حاوی میکروسیلیس، متاکائولن، خاکسترپوسته برنج، زئولیت براساس مقاومت ۷ روزه با استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی با دقت بالایی می‌تواند مقادیر ۲۸ روزه را برآورد کند.

باقرزاده و همکاران در سال ۱۳۹۳ به تخمین مقادیر مقاومت بتن با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی پرداختند. در این تحقیق

پشتیبان) محقق شود. در ادامه توضیح مختصری در مورد روش مورد استفاده در این پژوهش ارائه می‌گردد:

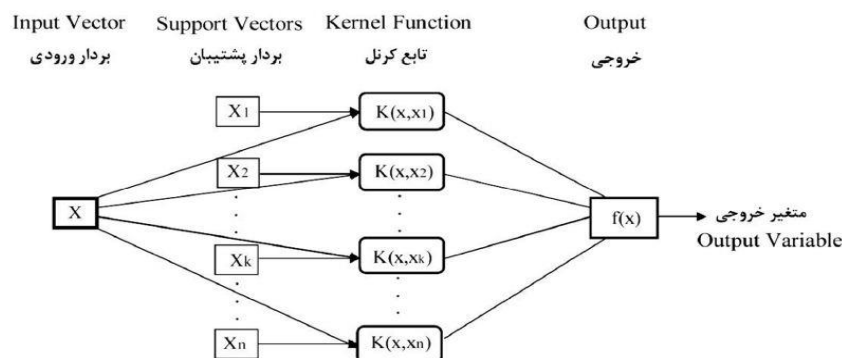
مدل‌سازی بر پایه ماشین‌های بردار پشتیبان ساختار مدل ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) توسط وپنیک که یک ریاضیدان روسی در دهه ۱۹۶۰ بود، ارائه شد. مدل‌های SVM که بر پایه تئوری آموزش احتمال قرار دارند، یک کلاس جدید از مدل‌هایی هستند که به منظور طبقه‌بندی و پیش‌بینی در علوم مختلف استفاده می‌شوند (۱۲). اخیراً این مدل‌ها در یک گستره وسیع از مسائل هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشابه با هر مدل ریاضی و آماری، مدل‌های SVM نیز دارای معایبی هستند. وجود تعداد زیاد متغیر ورودی اصلی‌ترین مشکل در توسعه این مدل‌هاست. تعداد زیاد متغیرهای ورودی ممکن است مانع یافتن مدل بهینه توسط SVM شود. راه‌های متعددی برای کاهش تعداد متغیرهای ورودی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی اشاره نمود (۱۷). ویژگی مهم ماشین بردار پشتیبان این است که برخلاف الگوریتم‌های کلاسیک و رگرسیون‌های خطی که به وسیله حداقل کردن قدرمطلق خطا یا توان دوم خطا عمل می‌کنند، ریسک عملیاتی را حداقل می‌کنند. ماشین بردار پشتیبان برخلاف شبکه‌های عصبی با مشکل گیر افتادن در حداقل‌های محل تابع خطا مواجه نمی‌باشد (۱۸). شکل (۱) ساختار ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد (۲). شکل (۱) ساختار ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد.

بازر نظرگیری اجزای نرمالایزشده طرح اختلاط بتن به عنوان متغیرهای ورودی، از شبکه‌های عصبی تطبیقی برای برآورد ماومت ۲۸ روزه بتن استفاده شد که در پایان نتایج کارایی بالای مدل‌های شبکه عصبی-فازی را در مقایسه با مدل رگرسیونی نشان داد.

بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی مقادیر بتن، برای کاهش ریسک تخریب از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد، همچنین پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که استفاده از روش ماشین‌های بردار پشتیبان در تعیین مقاومت ۴۲ روزه بتن در دماهای مختلف و مقایسه آن با روش آیین نامه NIST1681 صورت نگرفته است که در این پژوهش به صورت جامع به این مهم پرداخته شده است.

روش تحقیق

در این تحقیق از داده‌های زود یافت شامل دمای بتن و مقاومت ۱۱ روزه بتن به عنوان ورودی‌های شبکه و مقاومت ۴۲ روزه بتن به عنوان خروجی استفاده شده است. در این پژوهش از ۶۵۰۰ ردیف داده، مربوط به عملیات بتن ریزی المان‌های مختلف ابنیه‌ی پروژه احداث راه‌آهن چابهار زاهدان قطعه دوم (کیلومتر ۷۵ الی ۱۴۰ چابهار به نیکشهر) استفاده شده است. اولین گام برای توسعه مدل‌ها، ارائه روابط تجربی میان خصوصیات پایه بتن و عواملی است که باید پیش‌بینی شوند. این امر می‌تواند به وسیله روش‌های مختلف ریاضی (رگرسیون بردار



شکل (۱) - ساختار ماشین بردار پشتیبان

$$\phi(\omega, C) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_i^l = 1(C_i^- + C_i^+) \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} yi - (\langle \omega, xi \rangle + b) \leq \varepsilon + C_i^- \\ (\langle \omega, xi \rangle + b) - b \leq \varepsilon + C_i^+ \\ C_i^-, C_i^+ \geq 0 \end{cases}$$

که C یک مقدار از پیش تعیین شده بود، C_i^+ و C_i^- ، متغیرهای شل هستند که قیود بالا و پایین خروجی سیستم را تعیین می‌کنند. اگر داده‌ها به صورت خطی مجزا از هم باشند، یک سطح بهینه که داده‌ها را بدون خطا و با حداکثر فاصله میان صفحه و نزدیک‌ترین نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک می‌نماید، آموزش می‌دهد. اگر نقاط آموزشی را به صورت (x_i, y_i) و بردار ورودی $x_i \in R^n$ تعریف کنیم، در حالتی که داده‌ها به صورت خطی قابل تفکیک باشند، معادله به صورت زیر است:

$$y = f(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^N y_i \alpha_i \langle x_i, x \rangle + b \right] \quad (5)$$

که در آن y خروجی معادله و y_i ارزش طبقه نمونه آزمایشی x_i می‌باشد. بردار $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ نشان دهنده یک داده ورودی و بردارهای $x_i, i=1, 2, \dots, N$ بردارهای پشتیبان هستند. اگر داده‌ها به صورت خطی قابل تفکیک نباشند، می‌توان با اعمال پیش‌پردازش، نمونه‌ها را به فضای بالاتر برد. در این حالت رابطه (5) به رابطه (6) تغییر می‌یابد:

$$y = f(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^N y_i \alpha_i K(x, x_i) + b \right] \quad (6)$$

تابع $K(x, x_i)$ تابع کرنلی است که برای ایجاد ماشین‌هایی با انواع مختلفی از سطوح غیرخطی در

مدل‌های ماشین‌های بردار پشتیبان به دو گروه عمده، مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان تقسیم بندی می‌شود. از مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان جهت حل مسائل طبقه‌بندی داده‌هایی که در کلاس‌های مختلف قرار می‌گیرند استفاده می‌گردد و مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان در حل مسائل پیش‌بینی کاربرد دارد. همانگونه که بیان شد، ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر می‌نیم کردن ساختاری ریسک¹ می‌باشد که از تئوری آموزش آماری گرفته شده است. وینیک برای کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان در مسائل رگرسیون از تابع خطایی استفاده کرد که خطاهایی که در یک ε -Insensitive به نام فاصله معین از مقادیر واقعی می‌باشند، را نادیده می‌گیرد. این تابع به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$L(y, f(X, \alpha)) = |y - f(X, \alpha)|_\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - f(X, \alpha)| \leq \varepsilon \\ |y - f(X, \alpha)| - \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

این تابع خطا، مقادیر خطای کمتر از ε را در نظر نمی‌گیرد. مسأله تقریب یک مجموعه از داده‌های زیر را در نظر می‌گیریم:

$$D = \{(x^1, y^1), \dots, (x^l, y^l)\}, \quad (x \in R^n, y \in R) \quad (2)$$

تابع رگرسیون به وسیله تابع زیر تخمین زده می‌شود.

$$D = \{(x^1, y^1), \dots, (x^l, y^l)\}, \quad (x \in R^n, y \in R) \quad (3)$$

که $\langle \cdot \rangle$ ضرب داخلی می‌باشد. تابع بهینه رگرسیون به وسیله می‌نیم تابع زیر بیان می‌گردد.

¹- Structural Risk Minimization (SRM)

فضای داده‌ها، ضرب‌های داخلی تولید می‌کند. برای مدل رگرسیون بردارپشتیبان از کرنل‌های مختلفی استفاده می‌شود که عبارتند از خطی، درجه دوم، گوسی و چند جمله‌ای. معمولاً تابع کرنل گوسی شعاعی برای پیش‌بینی عملکرد بهتری دارد که در این تحقیق از این تابع استفاده شده است. معادله (۸)، تابع کرنل شعاعی را نشان می‌دهد (۱۸).

برآورد مقادیر مقاومت فشاری با استفاده روش تجربی آیین نامه

در اکثر آیین نامه‌ها به خاطر گستردگی طرح‌های اختلاط، به نوع مصالح و میزان مصرف آنها توجه نشده است و تنها مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ساخته شده در نظر گرفته شده است و بر اساس آن مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف بیان شده است. یکی از آیین نامه‌ها، آیین نامه NIST1681 ایالت متحده آمریکا می‌باشد که مقاومت فشاری برای بتن‌های معمولی که شامل تمام بتن‌هایی با مقاومت کمتر از ۸۳ مگاپاسکال می‌شود را طبق روابط (۹) و (۱۰) بیان می‌شود:

$$F_{C,T} = F_{C,0} \quad T \leq 450^{\circ}C \quad (9)$$

$$F_{C,T} = F_{C,0} [2.011 - 2.353 * (T-20/1000)] \quad T > 450^{\circ}C \quad (10)$$

که در این روابط $F_{C,0}$ مقاومت فشاری بتن ۴۲ روزه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ارزیابی نتایج

در تحقیق حاضر، داده‌های موجود به دودسته داده‌های آموزش و داده‌های آزمون تقسیم شدند.

آموزش مدل به وسیله ۸۰ درصد داده‌ها، انجام شد و عملکرد روش‌ها با استفاده از ۲۰ درصد داده‌های باقی‌مانده ارزیابی گردید. برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده از شاخصه‌های کمی ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده یا $NRMSE^2$ (رابطه ۱۱)، ضریب تعیین یا R^2 (رابطه ۱۲) و انحراف جذر میانگین مربعات خطا یا MSD (رابطه ۱۳) استفاده گردید. مقادیر ضریب تعیین و ضریب کارایی نش هرچه به عدد یک نزدیکتر باشد، عملکرد و صحت مدل بالاتر خواهد بود.

مقدار $NRMSE$ بین صفر و یک است که می‌توان آن را به صورت درصد نیز بیان نمود و هر چه مقدار آن کمتر باشد صحت تخمین بهتری خواهد داشت. به‌طور کلی مقادیر کمتر از ۱۰ درصد صحت تخمین ایده‌آل در مدل سازی دارند. مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب صحت تخمین خوب و متوسط و مقادیر بالای ۳۰ درصد فاقد اعتبار لازم در مدل‌سازی را داراست (۱۸).

²- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

جدول ۱- خصوصیات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

پارامتر	دمای محیط	دمای بتن	روانی بتن	نسبت رشد ۱۱ روزه به ۴۲ روزه		مقاومت ۱۱ روزه	مقاومت ۴۲ روزه
حداکثر	۵۶	۴۲	۲۰	۴۰	۴۳۰	۵۸۰	
حداقل	۱۲	۱۰	۵	۱۰	۱۰۶	۱۲۰	
میانگین	۳۱	۳۰	۱۱	۲۱	۳۳۷	۳۸۰	
کشیدگی	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۵۴	-	۰/۸۲	۰/۵۴	
چولگی	۰/۸۹	۰/۳۸	۰/۱۹	-	۰/۴۵	۰/۸۲	

(تعداد ۶۵۰۰ داده)

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که در بهترین حالت مقادیر ضریب تعیین، انحراف جذر میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده به ترتیب برابر با ۰/۹۸، ۰/۹۲ و ۱/۱۹ بدست آمده است که برآوردهای بدست آمده از ماشین بردار بهبود قابل توجه‌ای در مقایسه با روش سنتی NIST را در پی داشته است. همچنین براساس تعاریف معیار ارزیابی NRMSE، سطح تمام سناریوهای حاصله از رگرسیون بردار پشتیبان برای مقاومت بتن توصیف می‌شود، همچنین با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که در بهترین حالت مقادیر ضریب تعیین، انحراف جذر میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۰/۷۵ و ۱۰/۶۵ بدست آمده است که برآوردهای بدست آمده است. همچنین براساس تعاریف معیار ارزیابی NRMSE، سطح تمام سناریوهای حاصله از NIST خوب توصیف می‌شود.

نتایج مدل‌سازی رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و روش NIST

جهت دست‌یافتن به بهترین عملکرد روش‌های به کار رفته، برای هر کدام از مدل‌ها، بهترین مدل از هر نوع با توجه به معیارهای ارزیابی ذکر شده و نتایج به دست آمده انتخاب شد. جهت انجام عملیات یادگیری و استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان در برآورد نقاط مهم رطوبتی از نرم افزار LibSVM استفاده شد (۱۸). این نرم افزار دو حالت کلی برای حل مسأله رگرسیونی دارد (epsilon- و nu-SVR) که تفاوت آنها در چگونگی بیان مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی و همچنین پارامتر مورد تنظیم است. در این پژوهش یک روش برای توابع کرنل خطی، یعنی تابع شعاعی (RBF) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده برای مدل‌سازی مقاومت ۴۲ روزه بتن با روش رگرسیون بردار پشتیبان در جداول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج ماشین‌های بردار پشتیبان در برآورد مقاومت ۴۲ روزه بتن

هسته	آموزش		آزمون		پارامترهای مدل		
	R^2	MS _D	R^2	NRMSE	MSD	C	ϵ
RBF	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۸	۱/۱۹	۰/۹۲	۱/۰۲	۰/۰۰

جدول ۳- نتایج NIST در برآورد مقاومت ۴۲ روزه بتن

آموزش		آزمون		
R^2	MSD	R^2	NRMSE	MSD
۰/۹۲	۳/۴۵	۰/۸۸	۱۰/۶۵	۷/۲۵

جدول (۴) برخی از مقادیر مقاومت فشاری واقعی، مقاومت حاصله از روش SVM و مقاومت آیین نامه NIST در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌کنید روش آیین نامه، مقادیر مقاومت بتن در دماهای بالا را با اختلاف زیاد و مقدار بالاتری پیش‌بینی می‌کند در صورتیکه SVM با دقت بسیار بالایی مقادیر را برآورد کرده است زیرا در روند آموزش، تاثیر دما را به خوبی درک کرده است. همچنین، زمانی که مقاومت واقعی پایین باشد، روش آیین نامه مقادیر را با ارقام بسیار بالایی تخمین می‌زند، گرچه تعداد این موارد از پیش‌بینی‌ها کم و تصادفی می‌باشد اما می‌تواند منجر به اشتباهات فاحش و تخریب المان گردد.

در مقایسه عملکرد مدل‌های حاصله از روش NIST با روش رگرسیون بردار پشتیبان، مشهود است که روش رگرسیون بردار پشتیبان عملکرد بهتری داشته است. مقادیر بالاتر ضریب تعیین در سناریوهای حاصله از این روش، نشان از صحت و کارایی بالاتر این مدل در برآورد مقادیر مقاومت فشاری بتن داشته است.

جدول ۴- برخی از مقادیر مقاومت فشاری واقعی، مقاومت حاصله از روش SVM و مقاومت آیین نامه NIST در دماهای مختلف

دما	مقاومت واقعی	مقاومت SVM	مقاومت آیین نامه	دما	مقاومت واقعی	مقاومت SVM	مقاومت آیین نامه
۳۶	۲۳۶	۲۳۸	۲۶۲	۳۳	۲۷۲	۲۷۲	۲۹۳
۲۳	۳۴۱	۲۳۹	۲۵۳	۳۱	۴۰۶	۴۰۹	۴۲۳
۳۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۶	۲۴	۴۲۱	۴۲۶	۴۳۶
۳۲	۲۹۴	۲۹۶	۳۳۰	۳۰	۲۸۷	۲۸۷	۳۰۲
۲۹	۳۸۳	۳۸۳	۳۹۷	۲۷	۳۷۰	۳۷۰	۳۸۰
۳۴	۴۱۹	۴۱۹	۴۳۵	۲۹	۴۳۶	۴۳۳	۴۳۰
۲۶	۲۸۵	۲۸۵	۲۹۵	۳۳	۲۵۹	۲۵۹	۲۹۰

نتیجه گیری

پارامترهای موجود و نمونه های بیش تری از آزمایش‌های آزمایشگاهی در دسترس باشد خطای پیش‌بینی کم‌تر و مقاومت پیش‌بینی شده دقت بیش‌تری دارد. نتایج این تحقیق دارای دو کاربرد متفاوت است، نخست پیش‌بینی مقاومت بتن با استفاده از خواص سنگ دانه‌ها برای اکتشاف منابع قرضه و دوم هنگامی که نیاز است اطلاعاتی

شبکه نهایی ساخته شده دارای دو ورودی و یک خروجی و ضریب هم بستگی بین نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده NIST 1681، ۰,۹۷ و با نتایج ماشین بردار پشتیبان و ۰,۹۸ بدست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقاومت بتن ارتباط زیادی با پارامترهای سنگ دانه دارد، به طوری که هر چه

از سنگ دانه‌ها و مقاومت بتن حاصل شود وقتی که جزئیات و امکان انجام آزمایش‌های بتن فراهم نباشد. روش رگرسیون بردار پشتیبان در مقایسه با روش‌هایی همچون شبکه عصبی و روش رگرسیون آماری و NIST، نتایج را بهبود می‌دهد. همانگونه که لین و همکاران (۱۹) بیان داشتند، روش SVM در مقایسه با روش‌های سنتی، نتایج بهتری در مرحله آموزش حاصل داشته است که این مهم، عامل تعیین کننده در برآوردهای مرحله آزمون نیز می‌باشد، مقاومت بتن به ترتیب مقادیر ضریب تعیین و MSD به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۹۲ برای SVM در مقایسه با ۰/۸۸ و ۷/۲۵ برای روش NIST می‌تواند گویای این مطلب باشد. این نتیجه با گزارش‌های حاصله از محققانی همچون نوری و همکاران (۲۰)، کیسی و سیمن (۲۱)، کاکایی لعدانی و همکاران (۲۲) و کائوهو و همکاران (۲۳) برابری می‌کند.

با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان بدون ساخت بتن تخمینی از کیفیت آن با استفاده از خواص سنگ دانه‌ها به دست آورد و از نتایج آن برای شناسایی سنگ دانه‌های مناسب برای مصرف در بتن در مراحل اکتشاف معادن شن و ماسه استفاده کرد. از آن جاکه شبکه‌های عصبی قابلیت یادگیری و به روز شدن دارند، شبکه ساخته شده در این تحقیق نیز دارای این قابلیت است و برای بتن‌های با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف قابل گسترش است. برای این منظور کافی است که داده‌های جدید به مدل وارد و مدل سازی انجام شود (۱). با توجه به مقادیر بدست آمده از روش آیین‌نامه‌ای و روش ماشین بردار پشتیبان می‌توان گفت که روش آیین‌نامه، مقادیر مقاومت بتن در دماهای بالا را با اختلاف زیاد و ارقام بالاتری پیش‌بینی می‌کند در صورتیکه SVM با دقت قابل توجه‌ای مقادیر را برآورد کرده است زیرا در روند آموزش، تاثیر دما را به خوبی درک کرده است. همچنین،

زمانی که مقاومت واقعی پایین باشد، روش آیین‌نامه مقادیر را با ارقام بسیار بالایی تخمین می‌زند، گرچه تعداد این موارد از پیش‌بینی‌ها کم و تصادفی می‌باشد اما می‌تواند منجر به اشتباهات فاحش و تخریب المان گردد.

با مقایسه نتایج بدست آمده از روش ماشین‌های بردار پشتیبان با نتایج آزمایشگاهی معلوم گشت که استفاده از این روش دقت مناسبی داشته و برای هر نوع طرح اختلاط دلخواهی مناسب و قابل اعتماد است. همچنین نمایان شد که روابط آیین‌نامه NIST1681، با افزایش دما دارای خطای بیشتری شده و از اطمینان آن کاسته می‌شود و اگر تجزیه و تحلیل براساس آن صورت پذیرد نتایج بسیار محافظه کارانه شده که به دور از واقعیت است. این امر موجب از بین رفتن توجیه اقتصادی طرح می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده برای پیش‌بینی و بدست آوردن مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف استفاده از روش ماشین‌های بردار پشتیبان در مقایسه با روابط آیین‌نامه از کارایی بالاتری برخوردار است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که طرح اختلاط نقش مهمی در مقاومت بتن در دماهای بالا دارد و باید در سازه‌هایی که احتمال قرار گرفتن در معرض حرارت را دارند به نقش طرح اختلاط علاوه بر مقاومت مورد نیاز دقت و توجه شود.

در روش SVM به دلیل زیاد بودن خطا در مراحل اولیه، شبکه با تغییراتی در پارامترهای ورودی و هم چنین تغییر در لایه‌های ورودی و پنهان، در سه مرحله بازسازی شده و محاسبات انجام شد. در نهایت با عمل سعی و خطا شبکه بهینه طراحی و پیش‌بینی مقاومت بتن انجام شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از روش ماشین‌های بردار پشتیبان با نتایج آزمایشگاهی معلوم گشت که استفاده از این روش دقت مناسبی داشته و برای هر نوع طرح اختلاط دلخواهی مناسب و قابل اعتماد است. همچنین نمایان شد که روابط آیین‌نامه NIST1681، با

مقایسه با روابط آیین نامه از کارایی بالاتری برخوردار است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که طرح اختلاط نقش مهمی در مقاومت بتن در دماهای بالا دارد و باید در سازه‌هایی که احتمال قرار گرفتن در معرض حرارت را دارند به نقش طرح اختلاط علاوه بر مقاومت مورد نیاز دقت و توجه شود.

افزایش دما دارای خطای بیشتری شده و از اطمینان آن کاسته می‌شود و اگر تجزیه و تحلیل براساس آن صورت پذیرد نتایج بسیار محافظه کارانه شده که به دور از واقعیت است. این امر موجب از بین رفتن توجیه اقتصادی طرح می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده برای پیش بینی و بدست آوردن مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف استفاده از روش ماشین‌های بردار پشتیبان در

قدردانی

این مقاله با حمایت و پیگیری‌های جناب مهندس مهدی حاجی هاشمی (برنامه ریزی و کنترل پروژه موسسه پایدارسازان) و مهدی مقدم (مدیریت و برنامه ریزی موسسه پایدارسازان) به مرحله ارسال رسیده که نویسندگان این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را از ایشان داریم و امید است که با حمایت ایشان بتوانیم تجربیات و دانش حاصل از کار در پروژه را در قالب پژوهش برای دانشجویان و خوانندگان گرامی عرضه داریم.

منابع

- [۱] نوروزی انگنایی، امید، خلفی، محمدجواد، کریمی سورند، محبوبه. (۱۳۹۸). "بررسی عملکرد روش های داده مبنا در تخمین نقاط مهم رطوبتی در منطقه شاهرود". علوم و مهندسی آبیاری 42(4), 29-44. doi: 10.22055/jise.2017.22685.1617
- [۲] نوروزی انگنایی، امید، فاضلی، سید ابراهیم، آقاییگ، احسان، حسینی برآقتابی، سید جمال الدین. شیروانی، محمد. (۱۴۰۱). "تخمین داده دیریافت مقاومت بتن با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در پروژه احداث راه آهن چابهار به زاهدان". چهارمین همایش بین المللی ایده های نوین در معماری، شهرسازی، جغرافیا و محیط زیست پایدار. مشهد. ۶ خرداد ۱۴۰۱. <https://civilica.com/doc/1490470/>
- [۳] جعفری دلیگانی، وحید و اکبری، محمود (۱۳۹۵). تخمین مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف با توجه به طرح اختلاط بتن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، سومین همایش بین المللی مهندسی سازه، تهران، <https://civilica.com/doc/660008>
- [۴] قاسم زاده موسوی نژاد، سید حسین، جوهری مجد، فرزاد، سرادار، اشکان. (۱۴۰۰). "پیش بینی خواص مکانیکی بتن سبک مسلح به الیاف بازالت حاوی دوده سیلیس و خاکستر بادی با سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار" نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز. doi: 10.22034/jcee.2021.39150.1933
- [5] Ergün Ali, A. et. al (2013). The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. Fire Safety Journal 55, 160-167.
- [6] Huang, Y.H. (2004). "Pavement Analysis and Design, Volume 1", Pearson/Prentice Hall.
- [7] G. Hsin Lai, Ch. Chen, B. Chiang Jeng, and W. Chao, "Ant-based IP traceback," Expert Systems with Applications, vol. 34 pp. 3071-3080, 2008.

- [8] Greco R., Sorriso-Valvo M., "Relationships between joint apparent separation, Schmidt hammer rebound value, and distance to faults, in rocky outcrops, Calabria, Southern Italy", *Engineering Geology* 78 (2021) 309-320.
- [9] Benardos P.G., "Optimizing feedforward artificial neural network architecture", *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 20, Issue 3* (2007) 365-382.
- [10] Nicolas R., Christian, Grosse U., De Belie .N., "Relating ultrasonic measurements on fresh concrete with mineral additions to the microstructure development simulated by Cemhyd3D", *Cement and Concrete Composites, Volume 33, Issue 6* (2020) 680-693.
- [11] S. Malasri, E. Thorsteinsdottir, J. Malasri, "Concrete Strength Prediction Using a Neural Network", *MAESC 2006 Conference, USA,)2006(*.
- [12] Vapnik, V. N., and C. Cortes. 1995. Support vector networks. *Machine Learning*, 20, 273-297.
- [13] Yin J., and P. Log. 2011. Prediction for blocked tripe tides with amino acids descriptors (HMLP) by multiple linear regression and support vector regression", *Procedia Environmental Sciences*. 8:173-178.
- [14] Yoon, H., Jun, S.C., Hyun, Y., Bae, G.O., and K. Lee. 2011. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *J. Hydrol.* 396(1-2): 128-138.
- [15] Zhang, Y. 2007. Artificial neural networks based on principal component analysis input selection for clinical pattern recognition analysis. *Talanta*. 73 (1): 68-75.
- [16] Schaap, M. G. and F. Leij. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*. 47:37-42.
- [17] Long T. Phan, Therese P. McAlliste, John L. Gross, Morgan J. Hurley (2010). *NIST Technical Note 1681. Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*.
- [18] Norouzi Angnaei, Omid and Khalafi Khatbasra, Mohammad Javad and Karimi, Mahboubeh, 1398. Investigation of the performance of data-based methods in estimating important moisture points in Shahroud region, *Journal of Irrigation Science and Engineering* 44 (4), 44-29. (In Persian)
- [19] Ministry of Roads and Urban Development (2013). "Chapter 9, Design and Execution of Reinforced Concrete Buildings", *Office of National Building Regulations*. Iran Tehran.
- [20] Roshan, Naeem. Ghalehnavi, Mansour and Khosravi, Amir, 1399. Prediction of concrete compressive strength using machine learning regression algorithms. *Twelfth Civil Engineering Congress, Tabriz*. (In Persian)
- [21] Bagherzadeh, Sina and Akbari, Mahmoud, 2015. Estimation of concrete strength using artificial neural networks and fuzzy-neural-comparative inference system, *10th International Congress of Civil Engineering, Tabriz*. (In Persian)
- [22] Jafari Gilande, p. Khodavardilo, H. and Rasolzadeh, A. 2016. Application and Comparison of Parametric Transfer Functions of Vennoghten Model in Simulation of Unstable Water Flow in Cultured Soil. *Journal of Water and Soil Knowledge. Volume 26, Number 2/2, 94-81*. (In Persian)
- Chen Li, A. et. al (2015). Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete. *International Journal of Impact Engineering* No.86, 40-56.